

การตรวจจับแฮตเตอร์ในระบบการตัดเหล็กกล้าโดยใช้ใบมีดแบบหัวบอล
บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์



นายณรงค์ศักดิ์ พงศธรวิวัฒน์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETECTION OF CHATTER IN MILD STEEL MACHINING USING BALL END MILLING
CUTTER ON CNC MACHINING CENTER

Mr. Narongsak Pongsathornwiwat

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การตรวจจับแชตเตอร์ในกระบวนการตัดเหล็กกล้าโดยใช้
ใบมีดแบบหัวบอลบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

โดย

นายณรงค์ศักดิ์ พงศธรวิวัฒน์

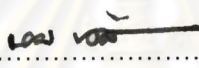
สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

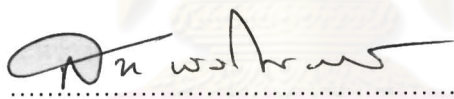
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคิก)

ณรงค์ศักดิ์ พงศธรวิวัฒน์ : การตรวจจับแฉดเตอร์ในระบบการตัดเหล็กกล้าโดยใช้
ใบมีดกัดแบบหัวบอลบนเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์. (DETECTION OF
CHATTER IN MILD STEEL MACHINING BALL END MILLING CUTTER ON
CNC MACHINING CENTER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้ง
จิตสิตเจริญ, 106 หน้า.

เครื่องจักรอัจฉริยะได้พัฒนาขึ้นอย่างมากและถูกคาดหวังว่าในอนาคตอันใกล้จะเข้ามาเป็นส่วนสำคัญสำหรับระบบการผลิต เนื่องด้วยมีความสามารถในการตรวจสอบและปรับเปลี่ยนตัวเองได้ รวมไปถึงสามารถเปลี่ยนสภาวะการตัดตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงได้โดยอัตโนมัติ สำหรับกระบวนการกัดด้วยมีดกัดแบบหัวบอลนั้น แฉดเตอร์เป็นปัญหาสำคัญในเรื่องระบบการผลิต ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของอัตราผลิตภาพ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามในระบบการกัดสำหรับตรวจจับการเกิดแฉดเตอร์โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปจากแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอพารามิเตอร์ใหม่ 3 ค่า คือ AV1 AV2 และ AV3 ตามลำดับ ซึ่งถูกคำนวณขึ้นด้วยอัตราส่วนจากค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของแรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกน โดย AV1 แทนอัตราส่วนของแรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างแกน X แกน Y AV2 แทนอัตราส่วนของแรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างแกน X แกน Z และ AV3 แทนอัตราส่วนของแรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างแกน Y แกน Z ใช้ในการระบุสภาวะการเกิดแฉดเตอร์ สำหรับอัลกอริทึมใหม่นี้ได้ถูกนำไปพัฒนาและทดสอบในระบบการกัดด้วยมีดกัดแบบหัวบอลบนเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์แบบ 5 แกน พร้อมด้วยการทดสอบสมรรถนะของระบบตรวจจับแฉดเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นด้วยการกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ สำหรับผลการทดลองนั้นได้ค่าอัตราส่วนวิกฤตใหม่ 3 ค่า เพื่อจำแนกสภาวะแฉดเตอร์ออกจากสภาวะปกติ AV1 AV2 และ AV3 ตามลำดับ คือ 1.5 1.3 และ 0.6 ตามลำดับ สำหรับระบบการตรวจติดตามที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจจับได้แฉดเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องคำนึงถึงสภาวะเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

ภาควิชา :วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อ ณรงค์ศักดิ์ พงศธรวิวัฒน์.....
สาขาวิชา :วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ.....
ปีการศึกษา :2553.....

5170297021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : CHATTER / BALL END MILLING / END MILLING / DYNAMIC CUTTING FORCE / CUTTING STATE

NARONGSAK PONGSATHORNWIWAT : DETECTION OF CHATTER IN MILD STEEL MACHINING USING BALL END MILLING CUTTER ON CNC MACHINING CENTER. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng, 106 pp.

Fully automated and intelligent machine tools are highly developed and expected to be vital in manufacturing system in the near future. Intelligent machine tool can autonomously determine the cutting states regardless of any cutting conditions and can change them automatically as required. It is hence necessary to develop a methodology to identify the cutting states automatically. In ball end milling process, the chatter is one of the major limitations of productivity in metal cutting.

The aim of this research is to develop an in-process monitoring system for detection of the chatter regardless of the cutting conditions by using the dynamic cutting force obtained during the cutting. The method proposed introduces three parameters are AV1, AV2 and AV3 which are calculated and obtained by taking the ratio of the average variances of the dynamic cutting forces of three force components, to classify the chatter. The new algorithm was developed and implemented on 5-axis CNC machining center to detect the chatter in ball end milling process and checked the performance by end milling cutting tested. The proper threshold values which determined from the exceed parameters in reference feature are 1.5, 1.3 and 0.6 respectively. The experimentally obtained results showed that the proposed method can be used efficiently to detect the chatter during the cutting even though the cutting conditions are changed.

Department :..... Industrial Engineering

Student's Signature NARONGSAK PONGSATHORNWIWAT

Field of Study :..... Industrial Engineering

Advisor's Signature Somkiat Tangjitsitcharoen

Academic Year :..... 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเสียสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนข้อคิดต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการจัดทำงานวิจัย และงานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์เครื่องขยายสัญญาณแรงดันจากคุณ ธมลวรรณ ศัญชิตากร ในนามของบริษัท Kistler จำกัด จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร. ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย พวงเพิกคิก กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณ พี่น้องๆ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน มิได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณชาญณรงค์ รุ่งเรือง ที่ได้สอนเทคนิคการใช้เครื่อง ซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์อย่างเต็มความสามารถ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

ทศด้อยภาษาไทย.....	ง
บทศด้อยภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	40
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	45

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	51
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
4.1 การตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น	53
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณแรงตัด	54
4.3 การจำแนกแลแบ่งกลุ่มสภาวะการสั่นแบบแชนเตอร์และการสั่นแบบปกติ.....	58
4.4 การตรวจสอบสมรรถนะของระบบตรวจจับและตรวจติดตามแชนเตอร์ในกระบวนการ.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย	69
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	70
5.3 อุปสรรคในการวิจัย	70
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆสำหรับวิเคราะห์การเกิด แชนเตอร์ในกระบวนการกัดด้วยมีดกัดแบบหัวบอล	76
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆสำหรับวิเคราะห์การเกิด แชนเตอร์ในกระบวนการกัดด้วยมีดกัดแบบเอ็นมิลล์.....	84
ภาคผนวก ค โปรแกรมสำหรับการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว	92
ภาคผนวก ง โปรแกรมสำหรับการหาค่าความแปรปรวนเฉลี่ย	96
ภาคผนวก จ กราฟแสดงผลจากการทดสอบย่านความถี่ธรรมชาติ (Modal Test).....	101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	106

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงเงื่อนไขการตัดด้วยดอกกัดแบบหีบอบล 41

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่า sensitivity และช่วงความถี่ใช้งานของแต่ละเซนเซอร์ 51

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงเงื่อนไขการตัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ 62



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบการผลิตอัจฉริยะ	1
รูปที่ 1.2 วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ	2
รูปที่ 1.3 โครงร่างของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะ	4
รูปที่ 1.4 เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามเครื่องจักรกล	5
รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting)	9
รูปที่ 2.2 กระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting)	10
รูปที่ 2.3 ต้นทุนกระบวนการผลิตในกระบวนการตัดแบบเปียก	11
รูปที่ 2.4 ประโยชน์ของการตัดแบบแห้ง	11
รูปที่ 2.5 ลักษณะการกัดปาดหน้า	12
รูปที่ 2.6 เครื่องกัดแนวนอน	13
รูปที่ 2.7 เครื่องกัดแนวตั้ง	13
รูปที่ 2.8 ลักษณะดอกกัดในแนวตั้ง	13
รูปที่ 2.9 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน	17
รูปที่ 2.10 ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานในงานกลึงเมื่อเกิดแชตเตอร์ขึ้น	19
รูปที่ 2.11 ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานในงานกัดเมื่อเกิดแชตเตอร์ขึ้น	19
รูปที่ 2.12 แสดงการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่	20
รูปที่ 2.13 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป	24
รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองด้วยการรู้จำแบบ	28
รูปที่ 2.15 ลักษณะของการแบ่งกลุ่มข้อมูล	29
รูปที่ 2.16 ลักษณะการแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป	30
รูปที่ 2.17 การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณอะคูสติก อิมพัลส์ในความเร็วและความลึก ในการตัดที่ต่างกัน	31
รูปที่ 2.18 ลักษณะการเกิดแชตเตอร์แบบทั่วไป	33
รูปที่ 2.19 ลักษณะการเกิดแชตเตอร์ด้วยการกัดแบบสลีต	34
รูปที่ 2.20 ลักษณะการเกิดแชตเตอร์ด้วยการกัดเต็มหน้าและทิศทางลง	34
รูปที่ 2.21 รูปแบบการแตกหักของการยึดติดที่คมตัดที่มีผลต่อสัญญาณอะคูสติก อิมพัลส์	36

รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของเพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดที่ระดับของการสึกหรอ	37
รูปที่ 2.23 สัญญาณอะคูสติคที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดที่มีแชนเดอร์เกิดขึ้นและเงื่อนไขของการตัดที่ทำให้เกิดแชนเดอร์.....	37
รูปที่ 3.1 ภาพแสดงวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการกัด.....	42
รูปที่ 3.2 ลักษณะมีดกัดแบบหั่วบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 8 มิลลิเมตร.....	42
รูปที่ 3.3 ภาพวาดแสดงลักษณะมีดกัดแบบหั่วบอลในแนวตั้ง	42
รูปที่ 3.4 แสดงมีดกัดแบบเอ็นมิลล์แบบ 2 คมตัด ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.5 ภาพวาดแสดงลักษณะมีดกัดแบบเอ็นมิลล์แบบ 2 และ 4 คมตัด.....	43
รูปที่ 3.6 ภาพแสดงเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ 5 แกน.....	44
รูปที่ 3.7 ภาพแสดงเซนเซอร์วัดแรงตัด	44
รูปที่ 3.8 ภาพแสดงชาร์จแอมพลิไฟเออร์ที่ใช้ในการทดลอง	45
รูปที่ 3.9 ออกสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด	45
รูปที่ 3.10 ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับการดำเนินการทดลอง	46
รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อโยงเครื่องออกสซิลโลสโคปกับชาร์จแอมพลิไฟเออร์	46
รูปที่ 3.12 แสดงทิศของแรงตัดทั้ง 3 แรงแค คือ F_x , F_y และ F_z ในทิศของ X Y และ Z	47
รูปที่ 3.13 ลักษณะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกน.....	48
รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงอัลกอริทึมในการคำนวณหาพารามิเตอร์ใหม่.....	49
รูปที่ 3.15 ภาพแสดงสัญญาณแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด.....	51
รูปที่ 4.1 แสดงภาพตัวอย่างเพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดการสั่นแบบไม่เกิดแชนเดอร์หรือการสั่นแบบการตัดปกติ.....	53
รูปที่ 4.2 แสดงภาพตัวอย่างเพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดการสั่นแบบเกิดแชนเดอร์ขึ้นในระหว่างการกัดขึ้นรูป	54
รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพขั้นตอนในการยืนยันการเกิดแชนเดอร์ด้วยโดเมนความถี่.....	55
รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนในการยืนยันการเกิดแชนเดอร์ด้วยการรู้จำแบบในโดเมนเวลา.....	56
รูปที่ 4.5 แรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองระหว่างแชนเดอร์และการตัดแบบปกติ.....	57
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AV1 กับ AV2 .ในพื้นที่อ้างอิง	58
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AV1 กับ AV3 .ในพื้นที่อ้างอิง	59
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AV2 กับ AV3 .ในพื้นที่อ้างอิง	60
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะ Cutting edge ของมีดกัดแบบหั่วบอล	61
รูปที่ 4.10 แรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นในการทดลองกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์.....	62

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AV1 กับความเร็วรอบตัด 63

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AV1 กับความลึกตัด 64

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AV1 กับอัตราป้อนตัด 64

รูปที่ 4.14 แสดงอัลกอริทึมในการตรวจจับแชตเตอร์และการหลีกเลี่ยงแชตเตอร์
 ในกระบวนการกัดแบบหัวบอล..... 66

รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่มีแชตเตอร์เกิดขึ้น..... 67

รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่มีดักหลอมติดบนผิวของชิ้นงาน..... 67



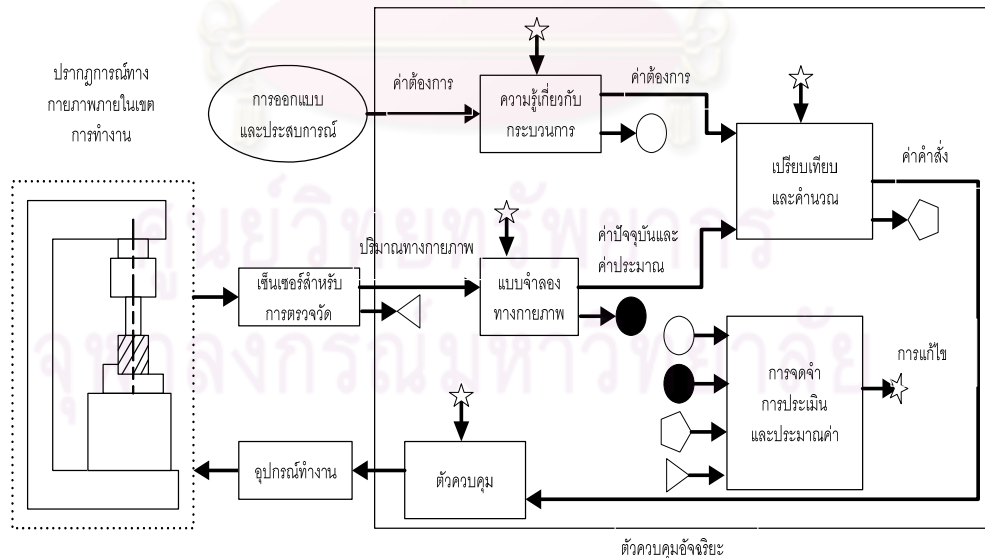
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

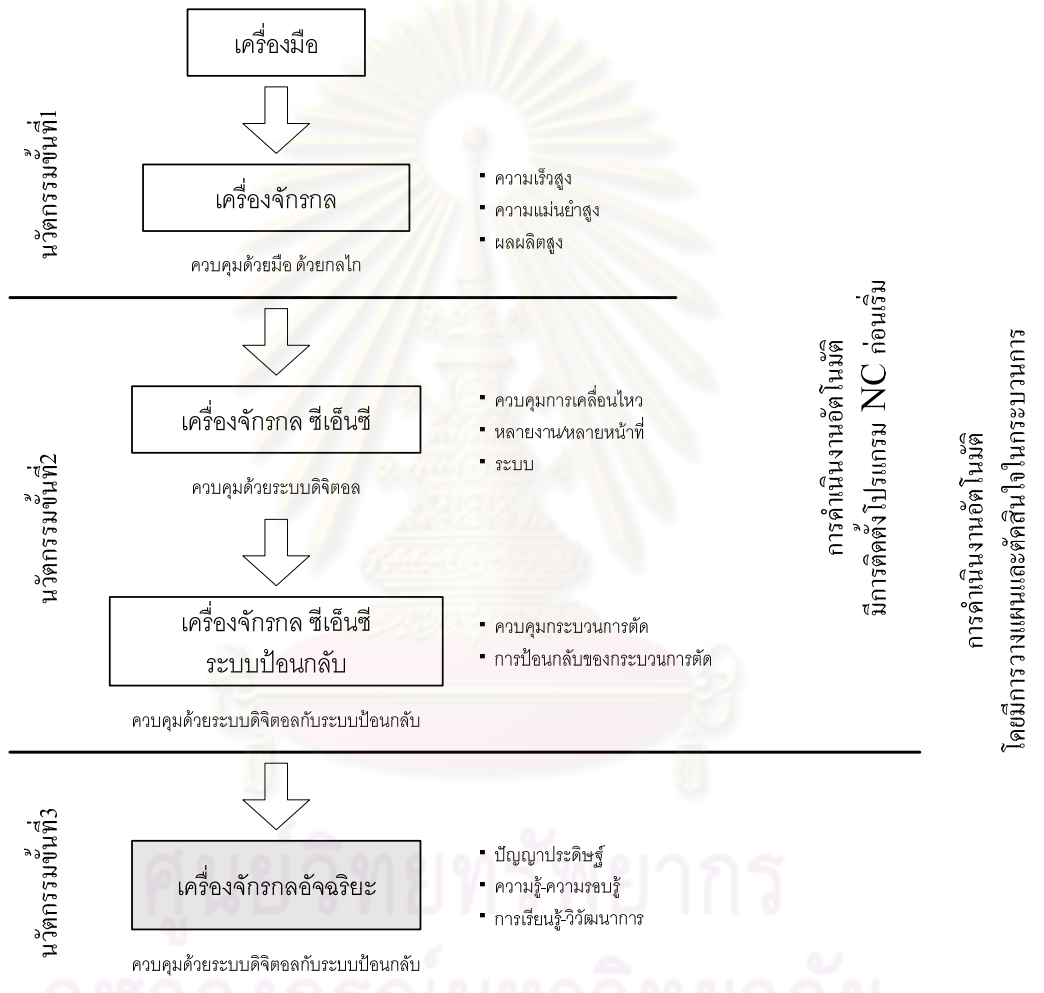
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตในยุคปัจจุบันมีแนวโน้มที่ต้องตอบสนองต่อความต้องการที่เปลี่ยนแปลง อยู่ตลอดเวลา เนื่องจากสภาวะแวดล้อมของธุรกิจเปลี่ยนไป ไม่ได้คำนึงถึงปริมาณการผลิตเพียง อย่างเดียว ยังมีความต้องการด้านอื่นเพิ่มเข้ามาด้วย เช่น ความต้องการในด้านคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ ดังนั้นระบบการผลิตใน อนาคตต้องมีลักษณะคล่องแคล่ว อัจฉริยะ มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง รองรับการผลิตปริมาณน้อย ตอบสนองความต้องการเฉพาะราย เกิดการมีส่วนร่วมกับผู้ซื้อ และ ตระหนักในสิ่งแวดล้อม ระบบการผลิตที่สามารถสนองตอบต่อคุณลักษณะต่างๆที่กล่าวมาแล้วก็ คือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing Systems: IMS) [1] ซึ่งมีการศึกษากัน อย่างกว้างขวาง ระบบการผลิตอัจฉริยะสามารถที่จะควบคุมและตรวจสอบตัวเองได้ เพื่อที่จะสร้าง ผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบซึ่งผลิตภัณฑ์จะถูกผลิตได้ในสภาวะแวดล้อม จำลองเพื่อลดอุปสรรคของการผลิตที่เกิดขึ้นมาจากการตลาดแบบโลกาภิวัตน์ สภาวะแวดล้อมที่มี การแข่งขันที่สูง และข้อจำกัดที่มากสำหรับสภาพแวดล้อมของระบบการผลิต ระบบการผลิต อัจฉริยะถูกคาดหวังว่าจะเป็นคำตอบหนึ่งที่จะเอาชนะต่ออุปสรรคของอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบการผลิตอัจฉริยะ

กลไกหนึ่งที่ประกอบให้ระบบการผลิตอัจฉริยะมีความสมบูรณ์มากขึ้น คือ **เครื่องจักรกลอัจฉริยะ (Intelligent Machine Tool)** [1] เครื่องจักรกลอัจฉริยะถูกพัฒนาขึ้นจากเทคโนโลยีควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซี ด้วยความคาดหวังเพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ โดยเครื่องจักรกลอัจฉริยะสามารถตัดสินใจเลือกสภาวะการทำงานได้ด้วยตัวเอง และสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ รวมไปถึงสิ่งอำนวยความสะดวกทางการผลิต



การดำเนินงานอัตโนมัติ
มีการติดตั้งโปรแกรม NC ก่อนเริ่ม
การดำเนินงานอัตโนมัติ
โดยมีการวางแผนและตัดสินใจในกระบวนการ

รูปที่ 1.2 วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ

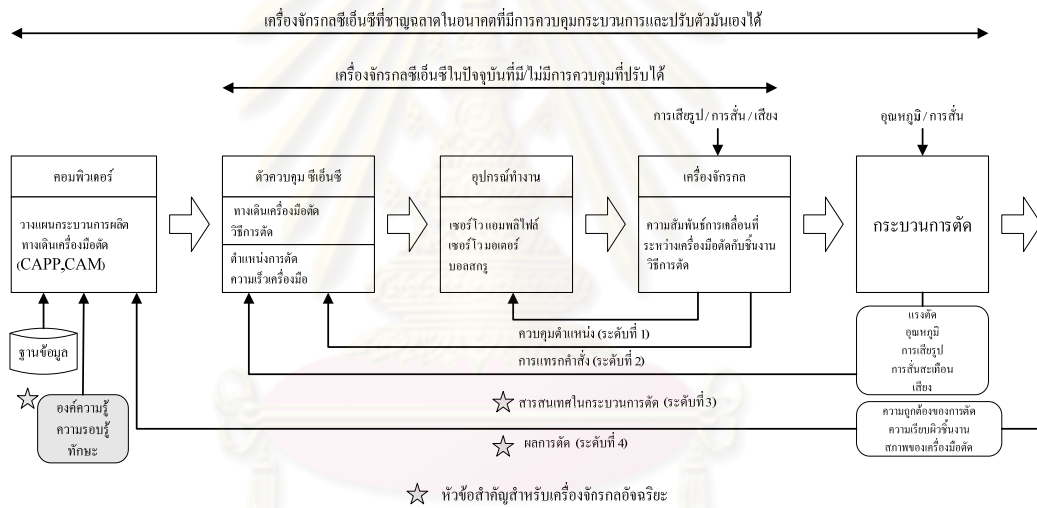
วิวัฒนาการเครื่องจักรกลอัจฉริยะแสดงดังรูปที่ 1.2 [1] โดยนวัตกรรมแรกเกิดขึ้นในระหว่างยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม ซึ่งเครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะ และเครื่องไสแบบดั้งเดิมส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรม นวัตกรรมขั้นที่สองคือการควบคุมเชิงตัวเลข ความถูกต้องและการวัดซ้ำของเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลขนั้นมีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลที่เดินเครื่องด้วยคนมาก อัตราผลิตภาพจะถูกปรับปรุงอย่าง

มากโดยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (Non - productive time) ในวงจรการผลิต เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนหลายเครื่องได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือการควบคุมที่สามารถปรับได้ (Adaptive control: AC) ตัวอย่างเช่นในกระบวนการตัดที่อยู่ในวงจรของการควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องจักร ในขณะที่มีดตัดและโต๊ะงานถูกควบคุมด้วยซีเอ็นซี ซึ่งเซนเซอร์หลายรูปแบบได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในการตรวจจับสถานะของการตัดเพื่อที่จะป้อนกลับสารสนเทศต่างๆด้วย

อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรกลที่ได้พัฒนาขึ้นมาจนถึงปัจจุบันถูกขับเคลื่อนและควบคุมตามความต้องการที่กำหนดไว้ซึ่งถ้าไม่ถูกเตรียมขึ้นมาด้วยมือ ก็โดยคอมพิวเตอร์พร้อมกับซอฟต์แวร์ช่วยผลิต (CAM) และฐานข้อมูล ระบบควบคุมที่เป็นไปได้ในอนาคตสำหรับเครื่องจักรกลในรุ่นถัดไปจะเป็นการควบคุมแบบอัจฉริยะเครื่องจักรกลอัจฉริยะสามารถตัดสินใจได้ด้วยตัวเองว่าจะทำอะไรบนพื้นฐานการตัดสินใจของตัวเอง ซึ่งจะสนองตอบต่อคำสั่งการที่ไม่ชัดเจนโดยใช้ประโยชน์จากประสบการณ์ และการรวบรวมองค์ความรู้ผ่านการเรียนรู้ ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงสามารถที่จะหาค่าสมรรถนะที่เหมาะสมสำหรับตัวเองภายใต้สภาวะการณ์ที่กำหนด รวมไปถึงสถานการณ์ที่ไม่เคยพบมาก่อนและมีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งโครงสร้างของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคตสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1.3 ระบบควบคุมซีเอ็นซีแบบดั้งเดิมแบ่งออกได้ 2 ระดับ: การควบคุมตำแหน่ง (ระดับที่ 1) และการแทรกคำสั่งหรืออินเทอร์โพลเลเตอร์ (ระดับที่ 2) เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเครื่องตัด ระบบควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคตได้เพิ่มระดับเข้าไปอีก 2 ระดับเพื่อที่จะสามารถควบคุมกระบวนการที่มีความซับซ้อนได้ ระบบการควบคุมแบบปรับได้ (AC) ได้ถูกนำมาใช้ใน ระดับที่ 3 ของลำดับชั้นการควบคุม (control hierarchy) สำหรับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีขั้นสูง มีความต้องการการติดตามกระบวนการแบบอัจฉริยะซึ่งสามารถตรวจจับสถานะการตัดที่ไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัดและวิธีการตัด ระดับที่ 4. นั้นคือระดับของการสั่งการ (supervisory level) ซึ่งได้รับการป้อนกลับมาจากการวัดชิ้นส่วนที่สำเร็จแล้ว (finished part) ระดับนี้ต้องการดัชนีที่มีเหตุผลเพื่อที่จะประเมินผลของการตัดและกลยุทธ์เพื่อปรับปรุงผลของการตัด ด้วยเหตุผลนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะพิจารณาใช้ประโยชน์จากองค์ความรู้ เทคโนโลยี และทักษะที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานที่กำหนดโดยพนักงานที่มีประสบการณ์ การใช้ประโยชน์ที่มีประสิทธิผลของสารสนเทศป้อนกลับโดยการพิจารณาที่ผลของการตัดมีความสำคัญมาก

โครงสร้างของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคตจะมีความพิเศษต่างจากเครื่องจักรยุคดั้งเดิมตรงที่มีระดับของการสั่งการ (supervisory level) ซึ่งได้รับการป้อนกลับมาจากการวัดชิ้นส่วนที่สำเร็จแล้ว (finished part) ระดับนี้ต้องการดัชนีที่มีเหตุผลเพื่อที่จะประเมินผลของการ

ตัดและกลยุทธ์เพื่อปรับปรุงผลของการตัด สำหรับอุปกรณ์สำคัญที่เพิ่มในระบบนี้คือ เซนเซอร์หรือตัวตรวจวัดที่ติดตั้งอยู่ในระบบนี้ เซนเซอร์จะทำหน้าที่ตรวจติดตามและแปลงค่าสัญญาณออกมาเปรียบเทียบกับรูปแบบของจริงเพื่อที่จะบอกถึงพารามิเตอร์ของการควบคุมในทันที ทำให้การปรับปรุงแบบต่อเนื่องสามารถทำได้อย่างทันท่วงที ส่งผลให้อัตรာผลิตภาพเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เรื่อง การเพิ่มอัตราผลิตภาพแล้ว จุดประสงค์หลักอันหนึ่งของระบบการผลิตอัจฉริยะคือการพัฒนา ระบบการผลิตแบบใหม่ที่เต็มไปด้วยความต้องการทางด้านเทคนิค ความประหยัด สิ่งแวดล้อม เพื่อความเหมาะสมและความสามารถในการรักษาไว้ซึ่งการแข่งขัน เหล่านี้ได้เพิ่มความจำเป็น ต่างๆในด้านความยืดหยุ่น การนำมาใช้ใหม่ การใช้ประโยชน์ การขึ้นอยู่กับระบบการผลิต เหล่านี้ นำไปสู่การจักระบบที่ต้องมีการประนีประนอมระหว่างสถาปัตยกรรมแบบลำดับขั้นขององค์กรใน ปัจจุบัน และสถาปัตยกรรมที่เกิดขึ้นใหม่ที่มีความยืดหยุ่น คล่องแคล่ว และรวดเร็วมากกว่า



รูปที่ 1.3 โครงร่างของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะ

ดังนั้นจึงปฏิเสธไม่ได้เลยว่า เซนเซอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในระบบการผลิตอย่างต่อเนื่องในการตรวจติดตามในระบบการผลิตแบบอัจฉริยะ เพราะสามารถตรวจติดตามกระบวนการผลิตและระบบการผลิตได้อย่างอัตโนมัติและทดแทนการตรวจติดตามด้วยประสาทสัมผัสของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 3 เซนเซอร์จะทำหน้าที่รับรู้สัญญาณในตอนแรกและเปลี่ยนสัญญาณหรือพลังงานเข้านั้นไปสู่สัญญาณหรือพลังงานออกในรูปแบบอื่นสำหรับการใช้งานต่อไป ทวีปสภาวะการตัดทางอุตสาหกรรมมีเซนเซอร์ที่ใช้กันทั่วไป คือ เซนเซอร์แรง เซนเซอร์กำลัง และเซนเซอร์อะคูสติกอิมพัลชัน ดังแสดงในรูปที่ 6 การออกแบบเซนเซอร์ขั้นสูงร่วมกับ

- (6) ความตระหนักทางด้านสิ่งแวดล้อมในการผลิตปัจจุบันทำให้ต้องการเซนเซอร์ที่จะตรวจติดตามการปล่อยของเสียจากกระบวนการผลิต

1.1.1 สภาพการผลิตปัจจุบัน

ปัจจุบันภาพรวมของกระบวนการผลิตมุ่งสนใจอัตราผลิตภาพ (productivity) ที่สูงสำหรับกระบวนการตัดโลหะนั้น อัตราผลิตภาพ คือ อัตราการขจัดเนื้อโลหะ เครื่องจักรกลอัจฉริยะมีบทบาทที่สำคัญมากในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากเครื่องจักรกลอัจฉริยะสามารถที่จะควบคุมตัวเองได้ และ/หรือ ตรวจสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เครื่องจักรกลอัจฉริยะสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับกระบวนการผลิตได้ด้วย ในกระบวนการตัด ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราผลิตภาพที่สูง คือ อัตราการป้อนตัด (Feed rate) ความเร็วตัด (Cutting speed) ความลึกของการตัด (Depth-of-cut) โดยปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด คือ ความลึกของการตัด นั่นคือสามารถที่จะกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มความลึกในการตัดมากขึ้น จะทำให้สามารถได้รูปร่างชิ้นงานที่ต้องการได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น แต่การตัดที่ใช้ความลึกตัดมากขึ้นนั้นก็จะมีโอกาสที่จะเกิดผลกระทบที่ตามมาคือแรงตัด (cutting force) ที่สูง แรงตัดจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด ซึ่งแรงตัดที่สูงขึ้นดังกล่าว ทำให้มีดตัด (tool) สึกหรือเร็วมากขึ้น อายุของมีดตัด (tool life) ลดลง ผลกระทบที่มีความสำคัญอีกประการหนึ่งคือ การเกิดแชตเตอร์ (Chatter)

แชตเตอร์ เป็นการสั่นรูปแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดที่ความถี่ธรรมชาติของระบบและทำให้เกิดผลเสียมากมาย เช่น มีดตัดแตกหัก คุณภาพของผิวชิ้นงานที่ไม่สามารถยอมรับได้ เพราะชิ้นงานมีรอยขีดข่วนที่ลึกจนยากจะแก้ไข ทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานมาใช้งานได้ ส่งผลกระทบต่อกระบวนการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเหล่านั้น เนื่องมาจากขาดเทคโนโลยีในการตัดที่ถูกต้อง ดังนั้นระบบการตรวจติดตามและการตรวจจับในกระบวนการกัดจึงมีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาแชตเตอร์ที่เกิดขึ้น เพราะระบบการตรวจติดตามและการตรวจจับในกระบวนการควบคุม (Controlling) หรือการยับยั้ง (Suppression) ปัญหาแชตเตอร์ได้อย่างเป็นระบบ การตรวจจับที่ถูกต้องและแม่นยำนั้น มีความสำคัญต่อระบบการผลิตอัจฉริยะเป็นอย่างมาก หากการตรวจจับมีข้อบกพร่องในด้านความถูกต้องและความแม่นยำแล้ว กระบวนการถัดมาไม่ว่าจะเป็นการควบคุมหรือการยับยั้งก็จะมีควมบกพร่องตามไปด้วย ทำให้กระบวนการตัดโลหะไม่ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและอัตราผลิตภาพตามที่ต้องการ ขณะเกิดแชตเตอร์แรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกนจะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับการตัดแบบปกติ ดังนั้นแรงตัดไดนามิกส์จึงถูกคาดหวังว่าจะสามารถตรวจจับการเกิดแชตเตอร์ได้ อย่างไรก็ตามแรงตัดไดนามิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงเมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไป [14] ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดไดนามิกส์จึงได้ถูกเสนอขึ้นมาในงานวิจัยนี้เพื่อตัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการ

ตัดที่เปลี่ยนไป โดยที่อัตราส่วนของแรงตัดไดมิกส์ที่คำนวณได้จะเป็นตัวดัชนีในการชี้บ่งการเกิด
 แชนเตอร์ในขณะตัดจริงได้ โดยดัชนีดังกล่าวสามารถใช้ได้ทุกเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา วิจัย และสรุปผล เพื่อที่จะสร้างระบบการตรวจติดตามและ
 ตรวจจับการเกิดแชนเตอร์ในกระบวนการกัดแบบหวับอลโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่
 เปลี่ยนแปลงไป(ในงานวิจัยนี้จะเป็นอัลกอริทึมที่ตรวจจับสัญญาณแรงตัด) ที่มีความสามารถ
 มากกว่าตัวตรวจจับแบบอื่นๆ เพราะระบบตรวจติดตามและตรวจจับแชนเตอร์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น
 นั้น สามารถทำการตรวจติดตามและตรวจจับแชนเตอร์ได้เฉพาะเงื่อนไขการตัดที่ได้ศึกษาเท่านั้น
 ถ้าเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไประบบที่ตรวจติดตามและตรวจจับแชนเตอร์จะไม่สามารถตรวจจับได้
 อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งระบบตรวจติดตามและตรวจจับแชนเตอร์ไม่สามารถตรวจติดตาม
 และตรวจจับแชนเตอร์ได้อย่างทันท่วงทีภายในกระบวนการ (In-Process)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตัดเหล็กกล้า โดยการประยุกต์ใช้
 ระบบ
 การตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดเข้ามาช่วยวิเคราะห์ผลจากกระบวนการตัด
 ด้วยเซ็นเซอร์วัดแรง
2. เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมระบบการตรวจติดตามและตรวจจับแชนเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ได้
 กับทุกเงื่อนไขของการตัด
3. เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการบ่งชี้สถานการณ์กัดโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่
 เปลี่ยนแปลงไป

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. กระบวนการตัดจะเป็นการตัดเหล็กกล้าบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์แบบ 5
 แกนยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X ด้วยมีดตัดแบบหวับอลและดอกกัดเอ็นมิลล์
 ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตร ขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลาง 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร
2. การทดลองการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ที่ความเร็วรอบการตัดที่ระดับ 5,000,
 7,000, 9,000 และ 11,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด ที่ 0.02 0.04 และ 0.06
 มิลลิเมตรต่อรอบ และที่ความลึกตัด 3, 4, 5 และ 6 มิลลิเมตร
3. วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64
 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร

4. พัฒนาระบบการตรวจติดตามและตรวจจับการเกิดแซตเตอร์โดยใช้อัตราส่วนของแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นในการกัดชิ้นงาน เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ให้อัตราผลิตภาพสูงที่สุดโดยไม่เกิดแซตเตอร์
5. ตัวชี้วัดผลสำเร็จวัดจากความสามารถในการบ่งชี้สถานการณ์กัดของอัลกอริทึมที่สร้างขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. คู่มือการตัดที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับแซตเตอร์ และเทคโนโลยีตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์
2. ระบบการตรวจติดตามที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาพัฒนาเครื่องซีเอ็นซีให้เป็นเครื่องจักรกลอัจฉริยะต่อไป
3. เพิ่มอัตราผลิตภาพในกระบวนการตัดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมถึงลดต้นทุนจากการผลิตของเสีย

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ระบบตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดแซตเตอร์บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ที่สามารถตรวจจับแซตเตอร์ได้ทุกสภาวะเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีต่างๆที่ส่งผลต่อการเกิดแซตเตอร์
2. กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการทดลอง ในที่นี้ คือ ดอกกัดหัวบอล
3. ความเร็วรอบของการตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัดและติดตั้งเครื่องมือวัดแรงตัดไดนามิกส์บนซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์เพื่อตรวจวัดแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดจริง
4. ทำการทดลองตัดโลหะและเก็บข้อมูลแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นจากการกัดแบบหัวบอล
5. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีอัตราส่วนของแรงตัดไดนามิกส์
6. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับตรวจติดตามและตรวจจับแซตเตอร์
7. ทดสอบระบบการตรวจติดตามและตรวจจับแซตเตอร์ด้วยกระบวนการตัดแบบเอ็นมิลล์ เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดแซตเตอร์
8. สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

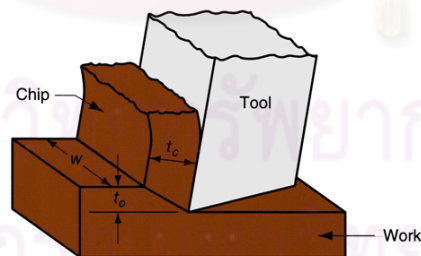
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

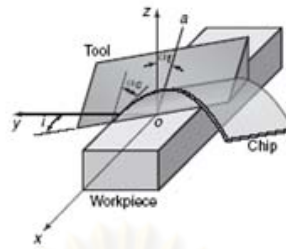
2.1.1 กระบวนการตัด (Cutting Process) [5] หมายถึง กระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือหรือมีดตัด (Cutting tool) ในการกำจัดชิ้นเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานและวัสดุส่วนที่เหลือจะมีรูปร่างตามที่ต้องการ ขั้นตอนหลักในกระบวนการตัดเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือน (Shear deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (Chip) เมื่อเศษตัดถูกตัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวชิ้นงานใหม่ กระบวนการตัดนี้ใช้ในการผลิตชิ้นงานโลหะเพื่อให้มีรูปร่างตามที่ต้องการและถือเป็นกระบวนการ

ผลิตที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง

นอกจากนี้ กระบวนการตัดสามารถแบ่งตามชนิดของเครื่องมือตัดได้เป็น การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดคมตัดเดียว การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดหลายคมตัด และการตัดที่ใช้ล้อหินเจียร และกระบวนการตัดยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของกระบวนการ คือ กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ซึ่งหมายถึงกระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษวัสดุตั้งฉากกับคมตัด [2] และกระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting) การเคลื่อนที่ของเศษวัสดุจะทำมุมกับคมตัด [4] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting)



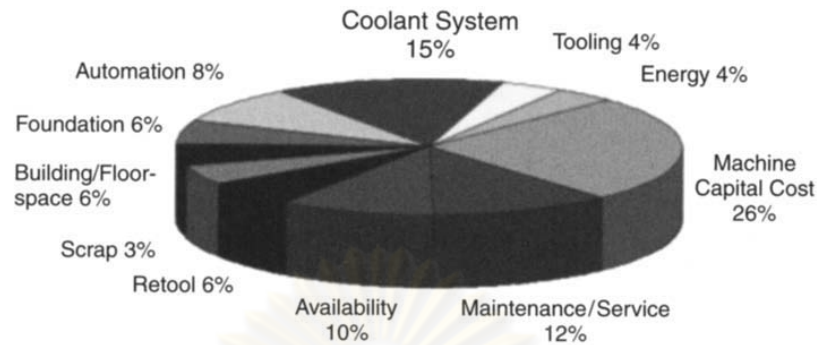
รูปที่ 2.2 กระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting)

กระบวนการตัดไม้ได้มีเพียงหนึ่งกระบวนการแต่ประกอบด้วยหลายกระบวนการย่อย ซึ่งโดยทั่วไปเป็นการใช้เครื่องมือหรือมีดตัด ในการกำจัดเนื้อโลหะออกจากชิ้นงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative motion) ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ประกอบด้วยเคลื่อนที่หลัก (Primary motion) ที่เรียกว่า ความเร็ว (Speed) และการเคลื่อนที่รอง (Secondary motion) ที่เรียกว่า การป้อน (Feed) รูปร่างลักษณะของเครื่องมือตัด และลักษณะการตัด

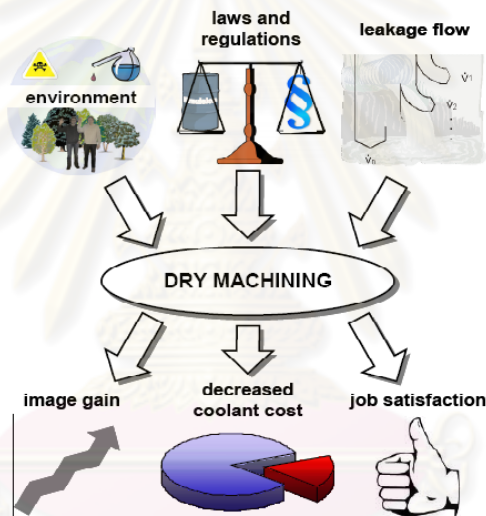
ผิวชิ้นงานประกอบกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่กล่าวถึงทำให้ได้ชิ้นงานตามรูปร่างและผิวชิ้นงานที่ต้องการ กระบวนการตัดประกอบไปด้วยหลายประเภท ซึ่งแต่ละวิธีจะมีขีดความสามารถในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างและลักษณะผิวงานที่เฉพาะตัว โดยทั่วไปแล้ววิธีการตัดที่นิยมใช้กันมากมี 3 วิธี ได้แก่ การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัดขึ้นรูป (Milling)

นอกจากนั้นกระบวนการตัดสมัยใหม่ต้องเผชิญกับความกดดันทางด้านต้นทุนการผลิตและความคาดหวังในเรื่องของคุณภาพที่สูง เพื่อรักษาสถานะภาพในการแข่งขันองค์กรจะต้องสร้างโอกาสในการลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงการผลิตอย่างต่อเนื่อง

การตระหนักถึงสิ่งแวดล้อมและความกดดันในเรื่องต้นทุนการผลิตในสภาวะปัจจุบัน ทำให้มีการพิจารณาถึงเรื่องการหล่อลื่นและหล่อเย็นในกระบวนการตัด (Machining process) มากขึ้น โดยทั่วไปพบว่าต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับสารหล่อเย็น (Cutting fluid) จะมีค่าประมาณ 7-17% [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่ต้องการผลิต โครงสร้างการผลิต และทำเลที่ตั้ง การใช้เทคโนโลยีการตัดแบบแห้งหรือการตัดแบบปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด (Minimum quantity lubricant, MQL) แทนแบบดั้งเดิม (Conventional or flooding application) จะช่วยทำให้ลดต้นทุนลงได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแล้ว ยังช่วยสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่เป็นมิตรและเสริมสร้างภาพลักษณ์ที่ดีขององค์กรอีกด้วย [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ต้นทุนกระบวนการผลิตในกระบวนการตัดแบบเปียก

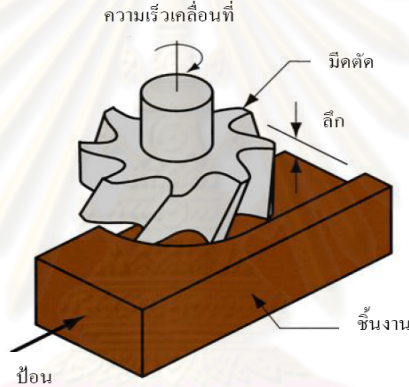


รูปที่ 2.4 ประโยชน์ของการตัดแบบแห้ง

การวิเคราะห์และทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการตัดเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนากระบวนการตัดแบบแห้งให้เหมาะสมทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัย การรับเอาเทคโนโลยีการตัดแบบใหม่นี้มาประยุกต์ใช้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงความสามารถของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องควบคู่กันไปด้วย สารหล่อเย็นจะช่วยให้การลดแรงเสียดทานในขณะตัด ทำให้ลดความร้อนและถ่ายเทความร้อนจากมีดตัด นอกจากนี้ยังช่วยเป่าเศษโลหะให้หลุดออกจากมีดตัดและชิ้นงาน และช่วยให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานซึ่งจะช่วยให้คุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ

2.1.1.1 การกัดขึ้นรูป (Milling Process) [5-6] จะใช้เครื่องมือตัดที่มีหลายคมตัด (Multiple cutting edges) ซึ่งมีหลายแบบและหลายขนาด โดยคมตัดจะพันอยู่รอบตัวแข็งและ

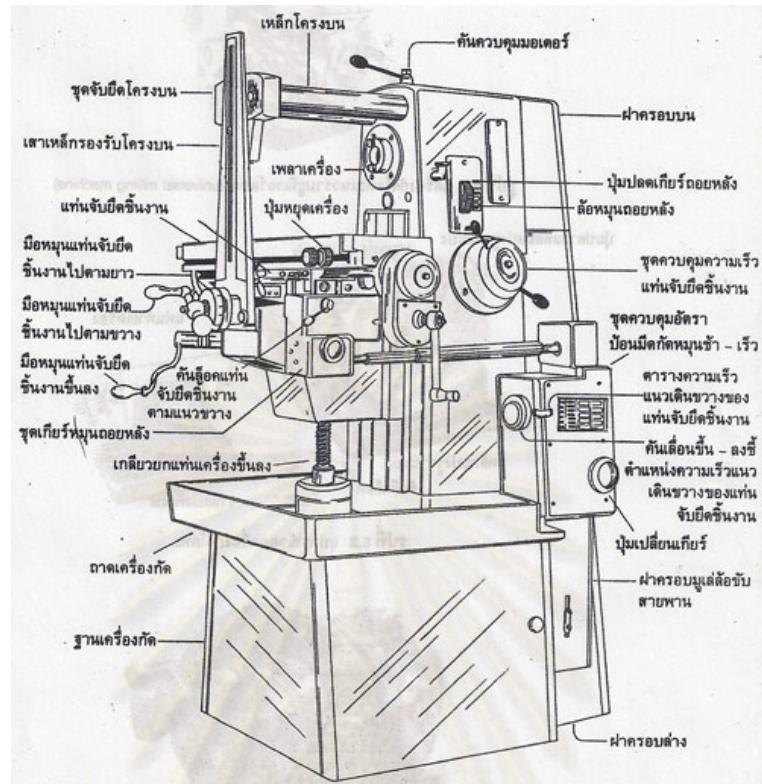
คมมาก ส่วนพื้นมีจำนวนเท่าใดนั้นขึ้นกับแบบและขนาดของเครื่องมือตัด การทำงานเครื่องมือตัดนั้นจะหมุนโดยเพลาลูกเข้ากัดชิ้นงานที่ต้องการ เครื่องมือตัดจะเข้ากัดครั้งเดียวต่อรอบและหมุนต่อจนครบจึงกัดชิ้นงานต่อไป การกัดโลหะต่างกับการกลึง คือ การกลึงต้องให้มีดกลึงเข้ามาชิ้นงานมีดกลึงต้องสัมผัสผัดสดแน่นกับชิ้นงานตลอดเวลาพร้อมกับมีดกลึงหมุนเข้าชิ้นงานด้วย ส่วนมีดกัดจะหมุนอยู่กับที่ตลอดเวลา แต่แทนจับยึดชิ้นงานจะอยู่กับที่ ในกระบวนการมีดกัดจะหมุนและเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานทำให้เกิดระนาบของผิวชิ้นงานใหม่ ทิศทางการป้อน (Feed direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัด ในขณะที่การหมุนของใบมีดถูกกำหนดด้วยความเร็ว (Speed) การกัดขึ้นรูปมีหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 วิธี ได้แก่ Peripheral milling และ Face milling [6] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการกัดปาดหน้า

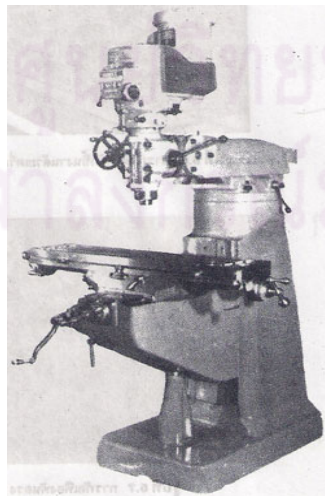
ในการกัดจะใช้เครื่องกัดโดยเฉพาะ หรือในปัจจุบันมีการใช้เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์มาช่วยในการกัดชิ้นงาน ซึ่งสามารถแบ่งเครื่องกัดออกเป็น 2 แบบตามลักษณะตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของเพลาลูก ดังนี้

1. เครื่องกัดแนวนอนหรือแนวราบ [5] (Horizontal milling machine) มีมีดตัดที่สวมอยู่ในเพลาลูกจะถูกลูกอยู่ในแนวนอน สามารถกัดงานได้ในลักษณะ กัดผิวราบ กัดเซาะ เป็นป่า-ขอบชิ้นงาน และกัดเป็นชิ้นงานพื้นเพื่อได้

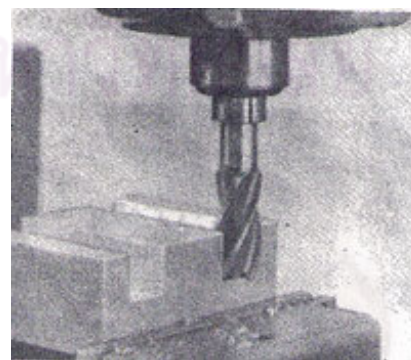


รูปที่ 2.6 เครื่องกัดแนวนอน

2. เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) [5] มีลักษณะของมีดตัดอยู่ในแนวตั้ง ใช้กัดงานได้ในลักษณะกัดร่องตรง ร่องโค้ง ร่องเป็นป่า-ขอบ รองตัวหัวที่ ร่องยาวตามขนาดและร่องยาวตลอดชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 เครื่องกัดแนวตั้ง



รูปที่ 2.8 ลักษณะดอกกัดในแนวตั้ง

2.1.2 องค์ประกอบและสภาวะการตัดโลหะ ในกระบวนการตัดอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative movement) ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน อันประกอบด้วย การเคลื่อนที่หลัก (Primary motion) เรียกว่า ความเร็วการตัด (Cutting speed, v) การเคลื่อนที่รอง (Secondary motion) เรียกว่า การป้อน (Feed, f) และขนาดการตัด เรียกว่า ความลึกในการตัด (Depth of cut, d) ทั้งสามองค์ประกอบนี้เรียกว่า สภาวะการตัด (Cutting Conditions) กระบวนการตัดในแต่ละวิธีจะมีการกำหนดสภาวะการตัดแตกต่างกัน สามารถทำการคำนวณหาความเหมาะสมกับประเภทของงานที่ต่างกันได้ ความเร็วตัดสำหรับงานกัดในกรณีดอกกัดหัวบอล (Ball-nose end milling) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1 [9]

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

โดยที่ N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัด (มิลลิเมตร)
 V_c = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

ส่วนอัตราป้อนชิ้นงานสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร/นาที ได้ดังสมการที่ 2-2

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

โดยที่ V_f = อัตราป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)
 F_z = อัตราป้อนมีดตัด (มิลลิเมตร/ฟัน)
 Z = จำนวนฟัน
 N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

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

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

โดยที่ MRR = อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที)
 V_f = อัตราป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที)
 a_a = ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

สำหรับกระบวนการตัดวิธีอื่นจะกำหนดสภาวะของการตัดแตกต่างกันไป นอกจากนั้นยังมีองค์ประกอบอื่นด้วยที่จำเป็นในกระบวนการตัด เช่น สารหล่อเย็น เป็นต้น

กรรมวิธีการกัดถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามวัตถุประสงค์และสภาวะการตัด ได้แก่ การกัดหยาบ (Roughing cuts) และการกัดละเอียด (Finishing cuts) การกัดหยาบใช้ในการกำจัดเนื้อวัสดุปริมาณมากออกจากชิ้นงานให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ได้ชิ้นงานใกล้เคียงเทียบกับชิ้นงานสำเร็จ ส่วนการกัดละเอียดจะใช้ในการทำชิ้นงานให้มีขนาด (Dimension) พิกัดเผื่อ (Tolerance) และผิวสำเร็จ (Surface finish) ที่ถูกต้องแม่นยำและเป็นไปตามต้องการ ในกระบวนการกัดทั่วไปจะมีการกัดหยาบหนึ่งครั้งหรือมากกว่านั้นและตามด้วยการกัดละเอียดอีกหนึ่งหรือสองครั้ง การกัดหยาบนั้นจะใช้ระยะป้อนและความลึกการตัดสูง โดยปกติค่าการป้อนจะเป็น 0.015-0.050 in/rev. (0.4-1.25 mm/rev.) และมีความลึกตัดเป็น 0.100-0.750 in (2.5-20 mm) ส่วนการกัดละเอียดนั้นจะใช้ค่าการป้อนและความลึกของการตัดต่ำ ได้แก่ ค่าการป้อนที่ 0.005-0.015 in/rev.(0.125-0.4 mm/rev.) และความลึกตัดที่ 0.030-0.075 in (0.75-2.0 mm)

2.1.3 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Material) มีดตัดในทางอุดมคตินั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) เป็นความสามารถของวัสดุที่จะยังคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง รับแรงกระแทกได้ดี มีความแข็งแรงและความเหนียว (Toughness) และการต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ซึ่งจะส่งผลให้มีดตัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่ในความเป็นจริงแล้วคุณสมบัติดังกล่าวไม่สามารถพบได้ในมีดตัดชนิดเดียว โดยวัสดุที่ใช้ในการทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน [7-9]

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

2. เหล็กกล้าเร็วสูง (High-speed steels) การพัฒนาในการตัดที่ความเร็วรอบสูงส่วนมากจะเป็นเหล็กหล่อผสมสูงใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี

3. โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys) มีความแข็งแรงสูง (58-64 HRC) สามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีและสามารถทนทานกับอุณหภูมิได้สูง มีความแข็งแรงสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งาน

จะสูงตาม วัสดุจะไม่เหนียวเหมือนเหล็กความเร็วรอบสูง วัสดุนี้ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ

4. คาร์ไบด์ (Cemented or Sintered carbide) มีความแข็งสูงทุกๆ อุณหภูมิ มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง ไม่แพร่ความร้อน แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบแห้งได้

5. เครื่องมือเคลือบผิว (Coated tools) การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะสามารถทำให้ใช้กับการตัดแบบอัตราการตัดที่สูงๆได้ ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงานและลดต้นทุนในการตัด การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะทำให้ลดเวลาการตัดลงได้ถึง 4 เท่า นอกจากนั้นการเคลือบผิวเครื่องมือตัดจะทำให้อายุมีดตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารเคลือบที่ใช้กันได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบแล้วจะมีความเสียดทานต่ำ มีความแข็งสูง ด้านทานอุณหภูมิที่สูง และเป็นสารที่มีความเหนียว การเคลือบผิวมีดตัดด้วยสารจะสามารถใช้ในการตัดที่อัตราการตัดสูง และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เคลือบอยู่บนทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอของ หน้าหลอมตัวได้สูง

6. เซรามิกเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สามารถทนอุณหภูมิได้สูง มีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำ และสามารถต้านทานการสึกหรอที่ผิวหยาบและผิวคายได้ดี และไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เพราะมีสารเคลือบเป็นพวกออกไซด์

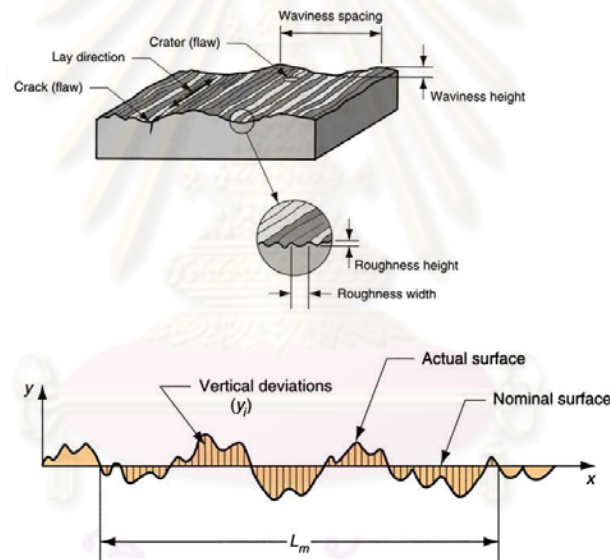
7. เซรามิก (Ceramics) ทำจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขัดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดตัดชนิดนี้ไม่ทนต่อการกระแทก สามารถทนแรงดันสูงและอุณหภูมิสูงได้ดี อย่างไรก็ตาม เซรามิกไม่มีความเหนียว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

8. คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride : CBN) เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ทนต่อการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือนเหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง จะสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ชั้น CBN จะทนการขัดถูที่สูงมากและมีค่าความเค้นของมุมมีดตัดสูง มีดตัด CBN จะผลิตให้ขนาดเล็ก เพราะมีดตัด CBN จะแตกง่าย แข็งเกร็งจึงเป็นปัจจัยสำคัญของเครื่องมือตัด

9. ซิลิกอนไนไตรด์ (SiN) เป็นวัสดุที่ทำมีดตัดที่ประกอบด้วยซิลิกอนไนไตรด์ พื้นฐานแล้วมีการเติมพวก อลูมินัมออกไซด์, ยทเทียมออกไซด์ และไททาเนียมไนไตรด์เพิ่มเข้าไป มีดตัดชนิดนี้มีความเหนียวสูง ความทนต่อความร้อนสูง และต้านทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างรวดเร็วได้ดี

เพชร (Diamond) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความเสียดทานต่ำ ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง และรูปทรงของมมมีดตัด ไม่เปลี่ยนแปลง

2.1.4 ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface Finish) ผิวสำเร็จไม่เพียงแต่จะมีอิทธิพลต่อความถูกต้องแม่นยำของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและสมรรถนะในด้านการบำรุงรักษาอีกด้วย [4, 5, 9] ลักษณะของผิวสำเร็จจะแสดงในรูปของคุณสมบัติที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน

1. ความเรียบหรือความขรุขระ (Roughness) จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็ก และละเอียดที่ติดกันหลายๆช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการตัด ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยบนชิ้นงานซึ่งแสดงถึงความขรุขระผิวถูกวัดจากการกำหนดช่วงความยาวหนึ่งที่เรียกว่า "cutoff length" หรือ "roughness sampling length"

2. รอยคลื่น (Waviness) ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า roughness sampling length (ประมาณ 1 ไมครอน) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตำหนิบนชิ้นงานที่เกิดจากรับภาระในการตัดและอุณหภูมิในการตัดมากเกินไป

3. รอยตำหนิยาว (Lay) เป็นรอยตำหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นในทิศทางของชิ้นงานมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือ

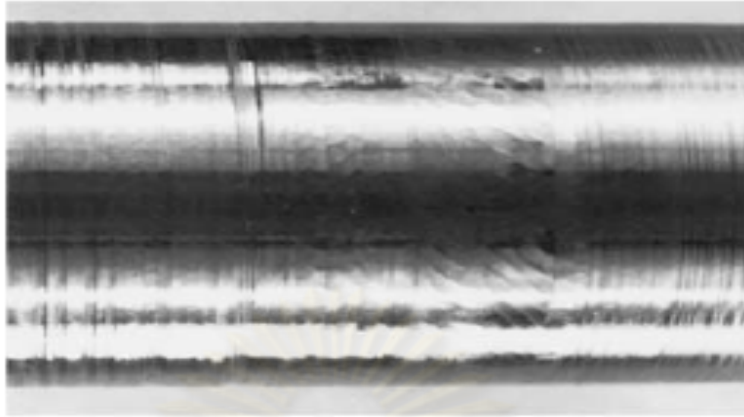
4. ตำหนิผิวหน้า (Surface Flaw) เป็นรอยตำหนิที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม สาเหตุเกิดมาจาก รอยตำหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่น รอยร้าว ฟองอากาศ

5. ผิวสำเร็จ (Surface finish) มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆ จะเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำตำหนิเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะกาชหรือของไหลไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายตาดูโดยอาศัยความมั่นใจของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง ความเรียบผิวสำเร็จมีผลมาจากพารามิเตอร์ในการตัดหลายอย่างซึ่งรวมถึงรูปทรงของมีดตัด รูปทรงของชิ้นงาน ความแข็งแรงของเครื่องจักร วัสดุชิ้นงาน ปัจจัยในการตัด และวัสดุมีดตัด

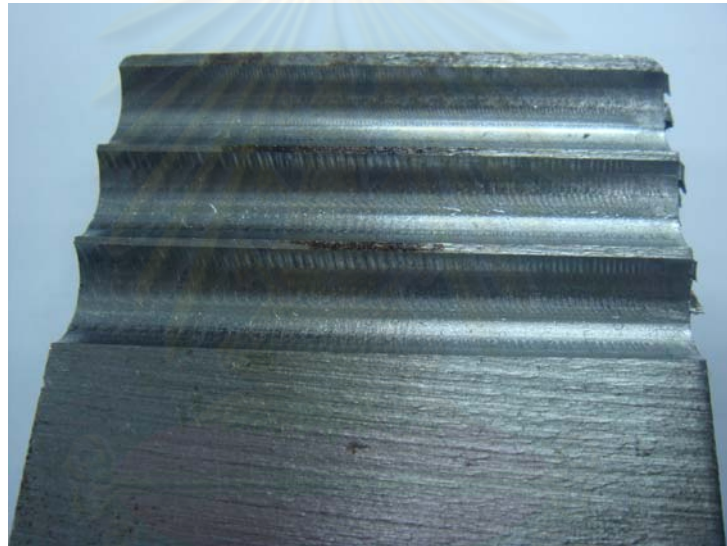
2.1.5 แรงตัดไดนามิกส์และแชตเตอร์ในกระบวนการตัด (Vibration and Chatter in machining operations) [6, 8, 10] แรงตัดไดนามิกส์ เป็นรูปแบบที่เป็นเอกลักษณ์เมื่อแชตเตอร์เกิดขึ้นในกระบวนการตัดโลหะ ซึ่งเมื่อแชตเตอร์เกิดขึ้นแล้ว จะส่งผลต่อแรงตัดไดนามิกส์ โดยแรงตัดไดนามิกส์จะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงมากกว่าเมื่อเทียบแอมพลิจูดของการตัดแบบไม่เกิดแชตเตอร์หรือการตัดแบบปกติ

การสั่นและแชตเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดนั้นเป็นสิ่งที่มีความซับซ้อนมาก ซึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดการสั่นและแชตเตอร์ของมีดตัดและและส่วนประกอบต่างๆของเครื่องจักรนี้ ก็คือ ค่าความแข็งของเครื่องจักร (machine stiffness) โดยค่าความแข็งของเครื่องจักรที่น้อยกว่าจะส่งผลให้เกิดการสั่นและแชตเตอร์มากกว่าค่าความแข็งของเครื่องจักรที่มาก ยิ่งถ้าเราไม่สามารถที่จะควบคุมการสั่นและแชตเตอร์ที่เกิดขึ้นได้ สำหรับกระบวนการกัดขึ้นรูปนั้น โอกาสในการเกิดแชตเตอร์จะมากจากการสั่นของเพลาหมุน (Spindle) ที่เข้าทำการกัดชิ้นงาน โดยอาจจะเกิดผลดังนี้

- พื้นผิวของชิ้นงานที่มีความขรุขระสูง ดังรูปที่ 2.10
- ขนาดของชิ้นงานที่ได้ไม่มีความเที่ยงตรง แม่นยำ
- การสึกหรอก่อนกำหนด และการแตกหักของมีดตัด โดยเฉพาะวัสดุของมีดตัดที่เปราะ เช่น เซรามิก และคาร์ไบด์ เป็นต้น
- ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องจักรอาจเสียหายเนื่องจากการสั่นที่มากเกินไป
- เสียงรบกวนที่เกิดขึ้น โดยถ้าเสียงนั้นมีความถี่สูงๆ



รูปที่ 2.10 : ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานในงานกลึงเมื่อเกิดแฮตเตอร์ขึ้น



รูปที่ 2.11 ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานในงานกัดเมื่อเกิดแฮตเตอร์ขึ้น

การสั่นที่เกิดขึ้นในการตัดนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การสั่นจากแรงกระทำภายนอก (Forced vibration) และการสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-excited vibration)

2.1.5.1 การสั่นจากแรงกระทำภายนอก (Forced vibration)

การสั่นลักษณะนี้เป็นการสั่นของระบบภายใต้แรงกระทำจากภายนอกซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับระบบในลักษณะซ้ำตัวเอง เช่นการสั่นเนื่องจากความไม่สมดุลของเครื่องจักรที่เกิดการหมุนและการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเป็นต้น และสิ่งหนึ่งที่เราจะพบกับในกรณีของการสั่นเนื่องจากมีแรงกระทำภายนอก ก็คือหากว่าความถี่ของแรงที่กระทำกับระบบ

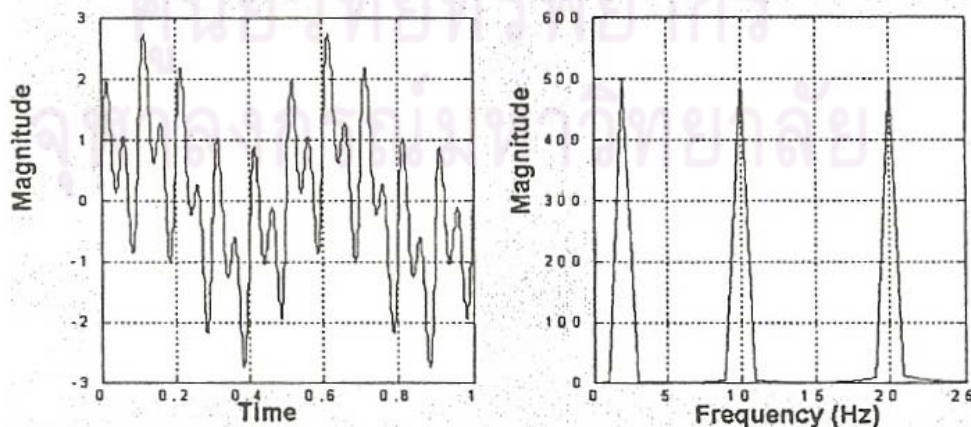
นั้นไปพ้องกับความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของระบบพอดี การสั่นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่มีช่วงกว้างการสั่นที่สูงมาก เราเรียกรสั่นในลักษณะนี้ว่า การสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งผลของการสั่นพ้องนี้มักจะทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างที่กำลังเกิดการสั่นอยู่

2.1.5.2 การสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-excited vibration)

การสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเองนี้ โดยทั่วไปเรียกว่า แชตเตอร์ (Chatter) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากกลไกภายในของระบบ โดยปัจจัยตัวหนึ่งที่มีความสำคัญที่ก่อให้เกิดแชตเตอร์คือการสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเองในกระบวนการตัดนั้นมีความสำคัญที่สำคัญ ดังนี้ แอมพลิจูดจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมันคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง, ความถี่ของการสั่นจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ, ไม่มีแรงกระทำภายนอกในลักษณะซ้ำตัวเองมากระทำกับระบบ และมีแหล่งพลังงานที่คงที่ ซึ่งระบบได้รับจากแรงในลักษณะซ้ำตัวเองผ่านการสั่นของมันเอง โดยรูปแบบหนึ่งของการสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีความสำคัญ คือ การสั่นที่เกิดขึ้นซ้ำๆ (Regenerative chatter) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีตัดตัดลงบนพื้นผิวของชิ้นงานที่มีความขรุขระจากการตัดก่อนหน้านี้ โดยจะส่งผลให้ความลึกตัดและแรงในการตัดของมีดตัดมีการเปลี่ยนแปลงในขณะตัดซึ่งทำให้เกิดการสั่นขึ้น

2.1.6 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) [11]

การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analysis) เป็นสิ่งสำคัญในการประมวลผลของสัญญาณนั้น ซึ่งถ้ารู้ถึงองค์ประกอบต่างๆ ของสัญญาณว่าส่วนไหนสำคัญ ส่วนไหนสามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก ก็สามารถที่จะประมวลผลสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.12 และสมการที่ 2-2 โดยที่ $f(t)$ คือสัญญาณใดๆ



รูปที่ 2.12 : แสดงการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (2-4)$$

ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆนั้น บางครั้งการพิจารณาที่โดเมนเวลาของสัญญาณอย่างเดียวอาจไม่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอต่อการวิเคราะห์ได้ การเปลี่ยนมุมมองของสัญญาณสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น ซึ่งการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็นตัวอย่างหนึ่งของการเปลี่ยนมุมมองนี้ โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่นั้น ใช้หลักการที่ว่าสัญญาณบางประเภทสามารถสังเคราะห์จากผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) ที่ความถี่และขนาดต่างๆได้ เมื่อรู้เกี่ยวกับความถี่และขนาดของฟังก์ชันไซน์ที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ หรือที่เรียกว่าสเปกตรัมของความถี่ (Frequency Spectrum) ของสัญญาณนั้น โดยจะทำให้รู้ถึงการกระจายกำลังของสัญญาณในความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สัญญาณนั้นๆ เพราะจะทำให้รู้ว่ากำลังของสัญญาณนั้นอยู่ในย่านไหนของสเปกตรัมของความถี่ และส่วนไหนที่สำคัญหรือไม่สำคัญ

2.1.7 การออกแบบการทดลอง [12-13] เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง และให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงต้องมีการนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อมูลสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น [3,4] ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เรพลิคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้ว่า

1. เรพลิคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เรพลิคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลิคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลอง ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ย ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิด

จากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

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

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

2.1.5.1 แนวทางการดำเนินโครงการตามวิธีการออกแบบการทดลอง การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่าเรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้ [13]

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 เป็นไป

ได้ว่าการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัวและมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

3. การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างไรโดยหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

4. การทำการทดลอง (Performing the Experiment) เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

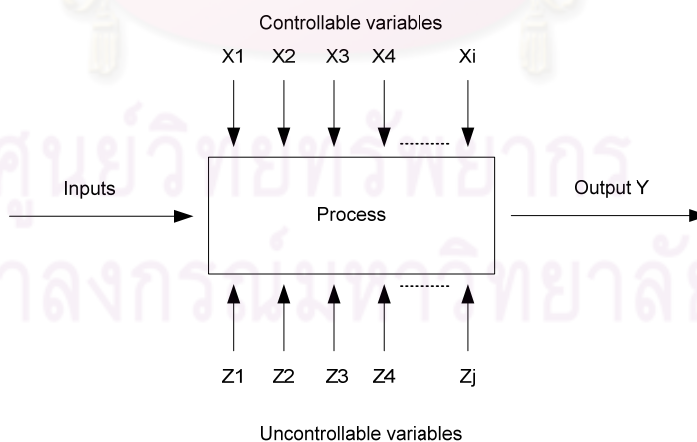
5. การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Choice of Factors and Levels) ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร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

6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้

ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือ ทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

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

การออกแบบการทดลองเป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable variables or factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ [12] เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or noise variables or factors) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป

การควบคุมตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบของแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้ว ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวนมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม

ในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังนั้นในภาพรวมของการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ [3] 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 เรียกว่าการวางแผนและการดำเนินการทดลองว่า กลยุทธ์ของการทดลอง (Strategy of experimentation) ซึ่งมีหลายกลยุทธ์ที่ผู้ทดลองสามารถนำไปใช้ได้ เช่น แบบหนึ่งปัจจัยต่อครั้ง (One-factor-at-a-time) หรือการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เป็นต้น

2.1.8 การรู้จำแบบ (pattern recognition) [14] เป็นศาสตร์หนึ่งที่มีจุดประสงค์เพื่อการจำแนก วัตถุ (objects) ออกเป็นประเภท (classes) ตามรูปแบบของวัตถุ โดยในการคำนวณจะมีการใช้เทคนิคจากสาขาอื่น ๆ มากมาย เช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และสถิติ

รูปแบบ (pattern) ในที่นี้หมายถึง รูปร่าง หรือ คุณลักษณะของวัตถุที่เราสนใจ โดยวัตถุนั้นอาจเป็นรูปธรรม หรือ นามธรรม หรือจะเป็นรูปแบบที่กระจายบนพื้นที่ หรือเปลี่ยนแปลงตามเวลา ก็ได้ โดยระบบการรู้จำแบบมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1. **ลักษณะเด่น (features)** เป็นข้อมูลที่ป้อนให้ ตัวแยกประเภท เพื่อที่ตัวแยกประเภททำการแยก ข้อมูล หรือ วัตถุ ออกเป็นประเภท ได้ตามที่ถูกออกแบบได้คาดหมายเอาไว้
2. **ตัวแยกประเภท (classifiers)** เป็นผู้ตัดสินใจแยกกลุ่ม ของวัตถุ ตามข้อมูลลักษณะเด่น โดยทั่วไปนิยมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน ได้แก่

2.1 การแยกกลุ่มตามประเภทที่รู้ล่วงหน้าแล้ว (prior knowledge) และใช้ประโยชน์จากข้อมูลนั้นในการออกแบบตัวแยกประเภท ซึ่งจะเรียกว่า ตัวแยกแบบมีผู้สอน (Supervised Classifier)

2.1.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) [15] เป็นเทคนิคหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งสร้างฟังก์ชันจากข้อมูลทดสอบ (training data) ข้อมูลทดสอบประกอบด้วยวัตถุเข้า (มักจะเป็น เวกเตอร์) และผลที่ต้องการ ผลจากการเรียนรู้จะเป็นฟังก์ชันที่อาจจะให้ค่าต่อเนื่อง เรียกว่า การถดถอย (Regression) หรือ ใช้ทำนายประเภทของวัตถุ เรียกว่า การแบ่งประเภท (Classification) ภารกิจของเครื่องเรียนรู้แบบมีผู้สอน คือการทำนายค่าของฟังก์ชันจากวัตถุเข้าที่ถูกต้องโดยใช้ตัวอย่างสอนจำนวนน้อย (training examples) คู่ของข้อมูลเข้าและผลที่เป็นเป้าหมาย) โดยเครื่องเรียนรู้จะต้องวางนัยทั่วไป (Generalize) จากข้อมูลที่มีอยู่ไปยังกรณีที่ไม่เคยพบอย่างมีเหตุผล (ดู inductive bias) การแก้ปัญหาการเรียนรู้แบบมีผู้สอน เช่น การเรียนรู้เพื่อรู้จำลายมือ มีขั้นตอนต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาได้แก่

1. กำหนดชนิดของตัวอย่างสอน ก่อนจะเริ่มทำอย่างอื่นจะต้องตัดสินใจว่าข้อมูลชนิดใดที่จะใช้เป็นตัวอย่าง เช่นในกรณีการรู้จำลายมือ ตัวอย่างอาจจะเป็นตัวอักษรตัวเดียว คำ หรือบรรทัด
2. เก็บตัวอย่าง ชุดตัวอย่างสอนจะต้องมีลักษณะเป็นตามที่ใช้จริง ดังนั้นชุดข้อมูลตัวอย่างและผลที่สอดคล้องจะต้องถูกจัดเก็บจากผู้เชี่ยวชาญ หรือจากการวัด
3. กำหนดวิธีการแทนลักษณะ (feature) ของข้อมูลเข้า โดยความถูกต้องของฟังก์ชันจะขึ้นอยู่กับการแทนข้อมูลเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปวัตถุเข้าจะถูกแปลงเป็นเวกเตอร์ของลักษณะ ใช้อธิบายวัตถุที่ต้องการแบ่งประเภท จำนวนลักษณะจะต้องไม่มากจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Curse of dimensionality เนื่องจากมิติที่กว้างเกินไปจนทำให้มีพื้นที่ว่างมากจนเครื่องเรียนรู้ไม่สามารถวางนัยทั่วไปได้ แต่จำนวนลักษณะก็จะต้องมากพอที่จะทำให้สามารถทำนายผลได้แม่นยำ
4. กำหนดโครงสร้างของฟังก์ชันที่ต้องการ และขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ที่สอดคล้อง เช่น อาจจะต้องเลือกว่าจะใช้ข่ายงานประสาทเทียม หรือ ต้นไม้ตัดสินใจ
5. ทำการออกแบบให้สมบูรณ์ แล้วใช้ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้กับตัวอย่างที่เก็บมา อาจจะปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของขั้นตอนวิธีให้เหมาะสมที่สุดโดยใช้ชุดย่อยของ

ชุดตัวอย่าง เรียกว่า ชุดตรวจสอบ (Validation set) หรือ ใช้การตรวจสอบไขว้ (Cross-validation) หลังจากปรับค่าต่างๆ แล้ว อาจจะวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีโดยใช้ชุดทดสอบ (test set) ซึ่งแยกต่างหากจากชุดสอน

2.2 การแยกประชากรวัตถุ ออกจากกันโดยไม่มีข้อมูลของกลุ่มการแบ่งล่วงหน้า แต่จะแบ่งโดยการใช้ลักษณะที่มีร่วมกันในกลุ่มย่อยแต่ละกลุ่มของประชากร ซึ่งจะเรียกว่า ตัวแยกแบบไม่มีผู้สอน (unsupervised classifier)

การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) เป็นเทคนิคหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่อง โดยการสร้างโมเดลที่เหมาะสมกับข้อมูล การเรียนรู้แบบนี้แตกต่างจากการเรียนรู้แบบมีผู้สอน คือ จะไม่มีการระบุผลที่ต้องการหรือประเภทไว้ก่อน การเรียนรู้แบบนี้จะพิจารณาวัตถุเป็นเซตของตัวแปรสุ่ม แล้วจึงสร้างโมเดลความหนาแน่นร่วมของชุดข้อมูล การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนสามารถนำไปใช้ร่วมกับการอนุมานแบบเบย์ เพื่อหาความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของตัวแปรสุ่ม โดยกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการบีบอัดข้อมูล ซึ่งโดยพื้นฐานแล้ว ขั้นตอนวิธีการบีบอัดข้อมูลจะขึ้นอยู่กับ การแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูลไม่อย่างชัดแจ้ง โดยปริยาย การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนในอีกรูปแบบหนึ่งคือ การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Clustering) โดยจะไม่เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็น

นอกจากการแบ่งดังกล่าวข้างต้นแล้ว การรู้จำรูปแบบยังสามารถแบ่งตามลักษณะของข้อมูลได้ ดังนี้

1. การรู้จำรูปแบบทางสถิติ (Statistic Pattern Recognition) หรือ ทฤษฎีการตัดสินใจ (Decision Theory) โดยจะใช้พื้นฐานของทฤษฎีความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์

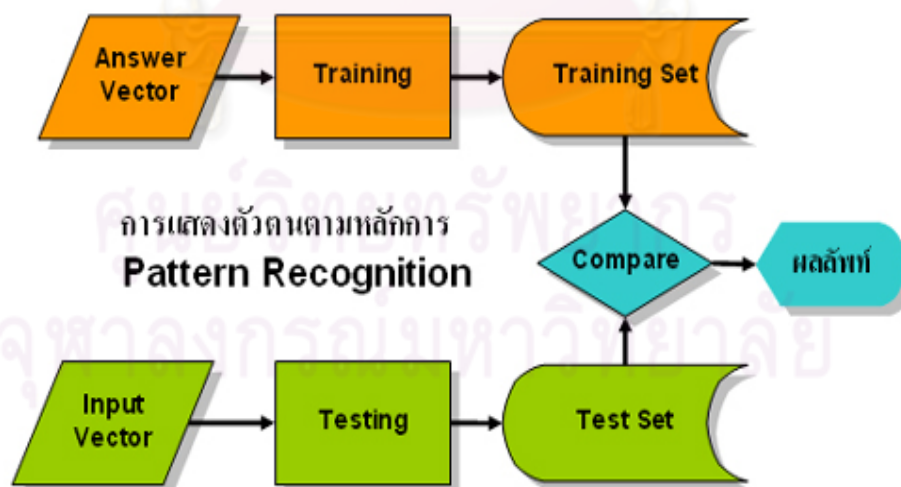
2. การรู้จำรูปแบบสังเคราะห์ (Syntactic Pattern Recognition) หรือ Structural Pattern Recognition (Linguistic Method) โดยจะใช้หลักการที่อื่นๆมาวิเคราะห์

การรู้จำแบบทุกชนิดสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ขั้นการสอน (train) เพื่อสร้างสมการ (model) ทำได้โดยใช้ training data มาสร้าง model สำหรับ pattern ทุก pattern ใน domain
2. การนำ model ไปใช้ เป็นขั้นตอนที่คอมพิวเตอร์จะตัดสินใจข้อมูลใหม่ที่เข้ามา โดยใช้ model ที่ถูก train มาในการตัดสินใจทั้งสองส่วนมีลำดับการทำงานเหมือนกัน คือ pre-processing, recognition และ post-processing แต่ต่างกันในส่วนขั้นตอนของการ recognize

โดยในแต่ละกระบวนการนั้น มีขั้นตอนหรือวิธีการสำคัญในการได้มาซึ่งการรู้จำแบบ ดังนี้

- กระบวนการเตรียมเบื้องต้น (Pre-processing) เป็นการเตรียมข้อมูลเข้าให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการ recognize ซึ่งรูปแบบจะเป็นอะไรก็ขึ้นอยู่กับ recognizer ที่ใช้ ขั้นตอนย่อยตามปกติที่มักจะทำในขั้นตอนนี้มีดังนี้
 - กำจัดข้อมูลรบกวนต่างๆ
 - Normalize ข้อมูลให้อยู่ใน scale มาตรฐาน
 - หาลักษณะเด่นของข้อมูลที่จะใช้ในการ recognize (Feature Extraction) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการทำ recognition โดย feature ที่ใช้จะส่งผลอย่างมากต่อ % ความถูกต้องที่ได้
- กระบวนการรู้จำแบบ (Recognition) สำหรับการทดสอบ (train model) ขั้นนี้จะเป็นการนำรูปแบบ (feature) ของข้อมูลทดสอบ (training data) ต่างๆที่ได้จากขั้นแรกมาสร้างเป็นแบบจำลอง (model) ไว้สำหรับเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงส่วนการรู้จำแบบ (recognize) จะเป็นการนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีอยู่ แต่ขั้นตอนปลีกย่อยจะแตกต่างกันไปสำหรับ ตัวรู้จำแบบ (recognizer) แต่ละตัว
- กระบวนการสุดท้าย (Post-processing) ขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องมีหากตัวรู้จำแบบ (recognizer) ทำงานได้ดีเพียงพอ ปกติแล้วสำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับปรุงผลที่ได้จากตัวรู้จำแบบ โดยใช้ความรู้อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับงานนั้นๆมาช่วย

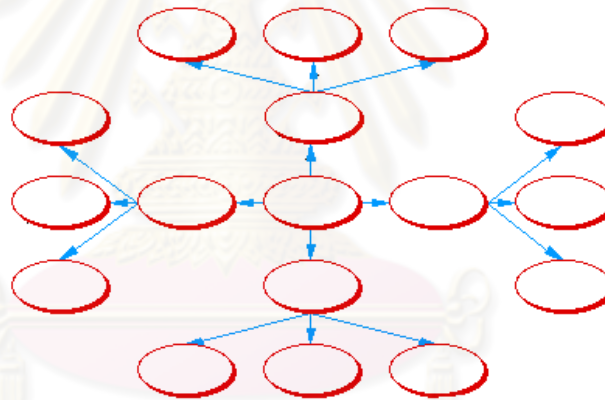


รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองด้วยการรู้จำแบบ

2.1.9 การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Data clustering) [16] เป็นเทคนิคหนึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งใช้ในการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) การทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) โดย

จะแบ่งชุดข้อมูล (มักจะเป็นเวกเตอร์) ออกเป็นกลุ่ม (cluster) นำข้อมูลที่มีคุณลักษณะเหมือนกันหรือคล้ายกันจัดไว้ในกลุ่มเดียวกัน ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแบ่งกลุ่มจะอาศัยความเหมือน (similarity) หรือ ความใกล้ชิด (proximity) โดยคำนวณจากการวัดระยะระหว่างเวกเตอร์ของข้อมูลเข้า โดยใช้การวัดระยะแบบต่าง ๆ เช่น การวัดระยะแบบยูคลิด (Euclidean distance) การวัดระยะแบบแมนฮัตตัน (Manhattan distance) การวัดระยะแบบเชบิเชฟ (Chebychev distance)

การแบ่งกลุ่มข้อมูลจะแตกต่างจากการแบ่งประเภทข้อมูล (classification) โดยจะแบ่งกลุ่มข้อมูลจากความคล้าย โดยไม่มีการกำหนดประเภทของข้อมูลไว้ก่อน จึงกล่าวได้ว่าการแบ่งกลุ่มข้อมูล เป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน โดยขั้นตอนวิธีการแบ่งกลุ่ม ได้แก่ k-means clustering, hierarchical clustering, self-organizing map (som)

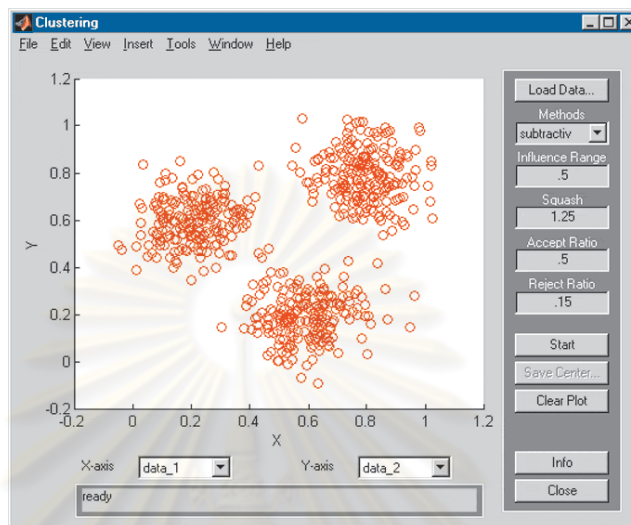


รูปที่ 2.15 ลักษณะของการแบ่งกลุ่มข้อมูล

การแบ่งกลุ่มข้อมูลอาจใช้เป็นขั้นตอนเบื้องต้นของการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อช่วยในการลดขนาดข้อมูล (แยกเป็นหลาย ๆ กลุ่มและคัดเลือกบางกลุ่มเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป หรือแยกการวิเคราะห์ออกเป็นสำหรับแต่ละกลุ่ม) ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการอื่นต่อไป

อัลกอริทึมในการแบ่งกลุ่มข้อมูล โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ **การแบ่งแบบเป็นลำดับขั้น (hierarchical)** และ **การแบ่งแบบตัดเป็นส่วน (partitional)** การแบ่งแบบเป็นลำดับขั้นนั้น จะมีทำการแบ่งกลุ่มจากกลุ่มย่อยที่ถูกแบ่งไว้ก่อนหน้านั้นซ้ำหลายครั้ง ส่วนการแบ่งแบบตัดเป็นส่วนนั้น การแบ่งจะทำเพียงครั้งเดียว การแบ่งแบบเป็นลำดับขั้น จะมี 2 ลักษณะ คือ **แบบล่างขึ้นบน (bottom-up)** หรือ เป็นการแบ่งแบบรวมกลุ่มจากกลุ่มย่อยให้ใหญ่ขึ้นไปเรื่อยๆ โดยเริ่มจากกลุ่มเล็กที่สุดคือในแต่ละกลุ่มมีข้อมูลเพียงตัวเดียว และ **แบบบนลงล่าง (top-**

down) หรือ เป็นการแบ่งแบบกลุ่มจากกลุ่มใหญ่ให้ย่อยไปเรื่อยๆ โดยเริ่มจากกลุ่มใหญ่ที่สุด คือ กลุ่มเดียวมีข้อมูลทุกตัวอยู่ในกลุ่ม



รูปที่ 2.16 ลักษณะการแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

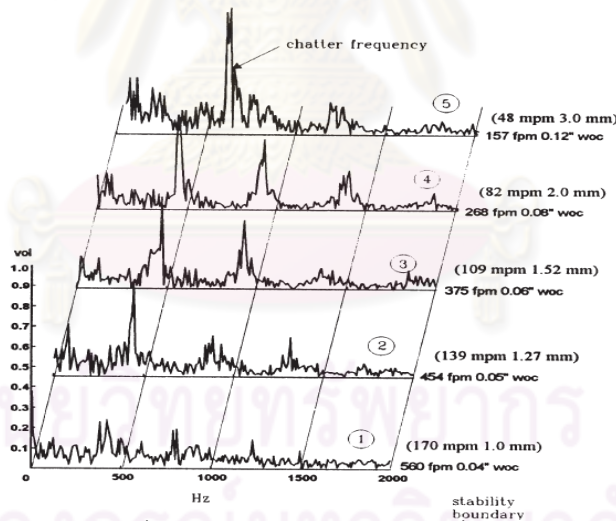
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Tangjitsitcharoen, T. Moriwaki (2008) [17] ได้พัฒนาวิธีการในการตรวจติดตามและบ่งชี้สถานะการตัดในกระบวนการกลึงโดยใช้เทคนิคการจำแนกรูปแบบ ซึ่งในวิธีการจะใช้ตัวแปร 3 ตัวที่คำนวณได้จากค่าอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนของแรงตัดพลวัตทั้ง 3 แรง (แรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี) ที่ถูกวัดระหว่างการตัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ และหาค่าที่เหมาะสมโดยกำหนดได้จากพื้นที่อ้างอิงที่ได้จากการทดลองเพื่อเป็นเกณฑ์ในการแบ่งแยกสถานะการตัด เช่นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง, เศษโลหะแบบแตกหัก และแชตเตอร์ ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าในขณะเกิดเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อเศษโลหะเป็นแบบแตกหักแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะแรงป้อนตัดพลวัต และเมื่อเกิดแชตเตอร์ขึ้น แรงตัดหลักพลวัตจะให้แอมพลิจูดขนาดใหญ่ที่สุดในระหว่างแรงตัดพลวัตทั้งสาม โดยประโยชน์ที่ได้จากการพัฒนาระบบการตรวจติดตามและบ่งชี้สถานะการตัดในกระบวนการกลึง ก็คือสถานะการตัดสามารถถูกบ่งชี้ได้ง่ายในระหว่างกระบวนการกลึงจริงโดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

S. Tangjitsitcharoen (2008) [18] ได้เสนอวิธีการในการตรวจติดตามและบ่งชี้สถานะของการตัดในกระบวนการกลึงโดยใช้แรงตัดพลวัตที่ถูกวัดระหว่างการตัดด้วยไดนาโมมิเตอร์จากนั้นแรงตัดจะถูกขยายก่อนที่จะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขแล้วทำการแปลงฟู

เร็วหรืออย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เพื่อได้ค่าความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum Density, PSD) ของแรงตัดพลวัตрмаวิเคราะห์เพื่อจำแนกรูปแบบของเศษโลหะว่าเป็นแบบแตกหักหรือแบบต่อเนื่องและสาเหตุที่เกิดขึ้นในระหว่างตัด ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้ผลรวมของอัตราส่วนของผลรวมของความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตกับอัตราส่วนของผลรวมของความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตในกรณีพิเศษโลหะเป็นแบบผสม (เศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหัก) มาหาเกณฑ์ในการตรวจจ้บรูปแบบของเศษโลหะและสาเหตุที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการตัดสินใจ

R.Y. Chiou, S.Y. Liang (2000) [19] ได้นำเสนอโมเดลที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันที่ใช้ในการตรวจจ้บการสั่นแบบสาเหตุที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง รวมถึงอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันที่เกิดขึ้นกับการสึกหรอของมีดตัดและความกว้างของการตัด โดยเมื่อการสึกหรอของมีดตัดหรือความลึกในการตัดเพิ่มสูงขึ้น แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันก็จะสูงขึ้นด้วย ในขณะที่สาเหตุที่เกิดขึ้นจะเกิดใกล้กับความถี่ธรรมชาติของด้ามมีดตัด (Tool holder) ดังรูปที่ 2.17 และมีแนวโน้มที่จะเลื่อนไปทางด้านขวาของความถี่ธรรมชาติเมื่อความเร็วในการตัดลดลง



รูปที่ 2.17 : การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันในความเร็วและความลึกในการตัดที่ต่างกัน

E. Kuljanic , G. Totis , M. Sortino (2009) [20] ได้ทำการพัฒนาระบบตรวจจ้บสาเหตุโดยอาศัยการเก็บสัญญาณจากเซนเซอร์วัดแรงเป็นหลัก ระบบที่พัฒนาขึ้นนั้นถูกทดสอบในกระบวนการกัดแบบเพลาดั้ง บัจจุบันการทดลองประกอบไปด้วยค่าความลึกตัด ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ตำแหน่งของมีดตัด ในการวิเคราะห์นั้น ทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์โดยใช้

เทคนิคเวฟเลทและระบบเครือข่ายกลาง (Neural network) ผลการวิจัย พบว่าเซนเซอร์และระบบที่ได้เสนอขึ้น สามารถทำการคำนวณสภาวะการตัดที่ไม่เกิดแชตเตอร์ได้เป็นอย่างดีแต่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดด้วย

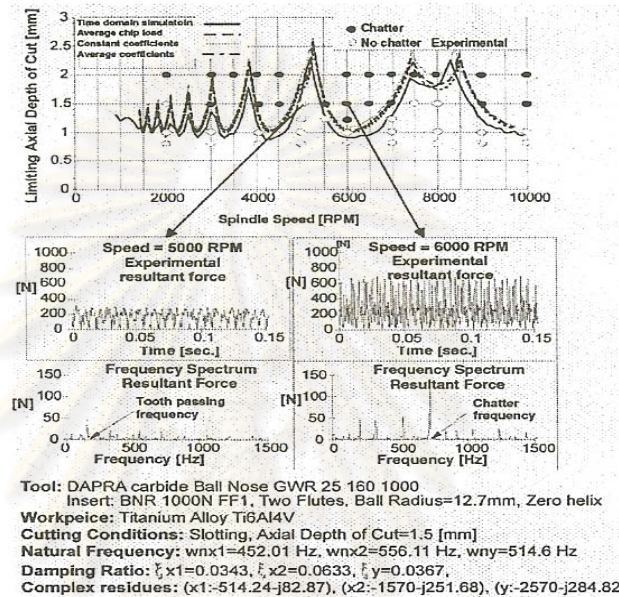
I. Bediaga , J. Munoa , J. Hernandez , L.N. Lopez de Lacalle (2009) [21] ทางผู้วิจัยได้สนใจการตรวจจับแชตเตอร์ในกระบวนการการกัดความเร็วรอบสูง(high-speed milling) โดยมุ่งสนใจศึกษาปัจจัยด้านความเร็วรอบตัด ซึ่งทางผู้วิจัยได้เสนออัลกอริทึมเพื่อใช้หาสภาวะความเร็วรอบตัดที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแชตเตอร์ในระหว่างการตัด รูปแบบอัลกอริทึมที่ถูกเสนอขึ้นประกอบด้วย 2 เฟส คือ ระบบตรวจจับแชตเตอร์และระบบวิเคราะห์สัญญาณ ผลที่ได้จากการวิจัย พบว่า ความเร็วรอบตัดจะช่วยลดปัญหาการเกิดแชตเตอร์ได้เป็นอย่างดีและอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในกระบวนการตัดได้จริง

W.X. Tang , Q.H. Song , S.Q. Sun , B.B.Li , B.Du , X.Ai (2009) [22] ได้เสนอโมเดลสำหรับคาดคะเนเสถียรภาพของการเกิดแชตเตอร์ โดยทำการศึกษาในกระบวนการกัดด้วยดอกกัดเอนมิลล์ ระบบดีกรีความอิสระหลายดีกรี (Multi-degree-of-freedom) ถูกนำมาใช้พิจารณาแรงพลวัต พารามิเตอร์ที่สนใจศึกษา คือ ความเร็วรอบตัดและความลึกตัด เทคนิคที่ใช้ คือ เทคนิคการวิเคราะห์แบบนิยาม (Mode synthesis technique) ผลที่ได้รับจากการวิจัย คือ ขอบเขตหรือสภาวะการกัดด้วยดอกเอนมิลล์ ที่ไม่ก่อให้เกิดแชตเตอร์ขึ้นในกระบวนการ

T.Vyhkidal , W.Michiels , P.Zitek , P.McGahan (2001) [23] ได้เสนอวิธีตรวจจับแชตเตอร์โดยใช้กราฟเสถียรภาพของช่วงสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งศึกษาในสภาวะวงจรรย้อนกลับ บนระบบอนุพันธ์ที่เหมาะสม (Proportional-derivative : PD) สำหรับการควบคุมนั้น ทางผู้วิจัยได้ใช้ระบบกลาง (Neutral system) เข้ามาช่วยวิเคราะห์ ผลการวิจัยที่ได้รับ คือ ระบบควบคุมการเกิดแชตเตอร์ที่มีข้อกำหนดที่ชัดเจนสอดคล้องกับทฤษฎีการตัดและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

Y. Altintas, M. Weck (2004) [24] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการเกิดแชตเตอร์ในกระบวนการกัด โดยวิเคราะห์สัญญาณด้วยแรงไดนามิกส์ที่เกิดขึ้น และจะส่งผลกระทบต่อแรงตัดในแกนหลักด้วย โดยในงานวิจัยในทำการวิเคราะห์แบบโดเมนของเวลา ซึ่งลักษณะของการกัดนั้นมีหลากหลายแบบมาก เนื่องจากดอกกัดนั้นมีหลายคมตัด ทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นมีหลากหลาย ผลที่ได้มีดังนี้

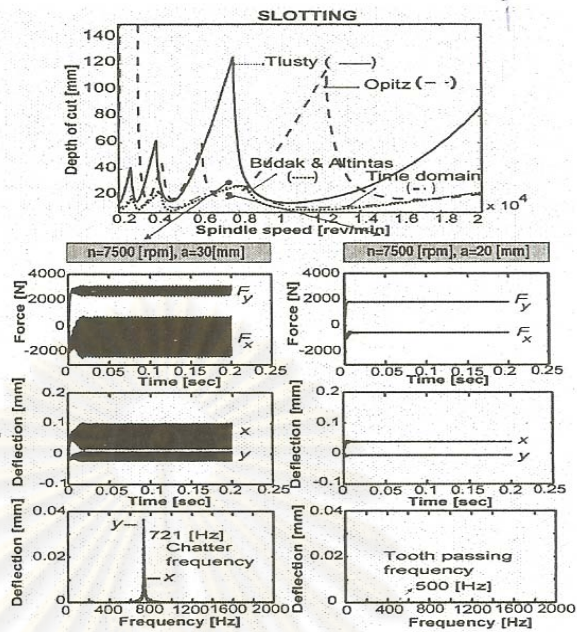
- ลักษณะการเกิด chatter แบบทั่วไป หรือเรียกว่า การกัดเต็มหน้า แสดงให้เห็นว่า เมื่อ chatter เกิดขึ้น แรงตัดไดนามิกส์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และความถี่ของการเกิด chatter จะเกิดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ โดยความถี่ของ chatter จะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงมากกว่าความถี่ของค่าอื่นๆ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะการเกิด chatter แบบทั่วไป

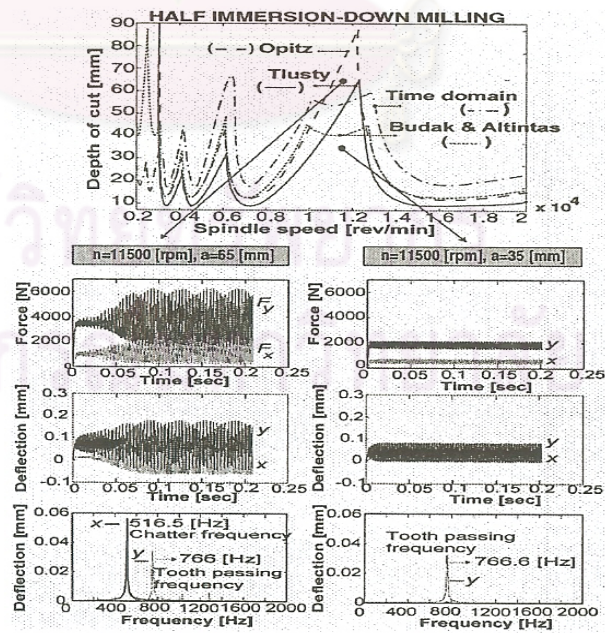
- การกัดแบบสล๊อต แสดงผลให้เห็นในทางเดียวกันกับการเกิด chatter แบบทั่วไป โดยแรงตัดที่เกิดขึ้นนั้น มีแรงตัดไดนามิกส์ที่คงที่ เนื่องจากการกัดเกิดขึ้นแบบเต็มหน้า ส่งผลให้แรงที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19 ลักษณะการเกิด chatter ด้วยการกัดแบบสลอต

- การกัดแบบลงและกัดแบบไม่เต็มหน้า แสดงให้เห็นถึงแรงตัดไดนามิกที่เกิดขึ้นว่า แรงตัดไดนามิกที่เกิดขึ้นนั้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากแรงตัดที่เกิดขึ้นมาจากหน้ากัดที่ไม่เต็ม ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 2.19



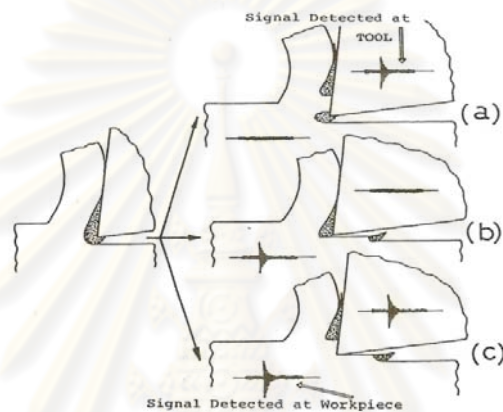
รูปที่ 2.20 ลักษณะการเกิด chatter ด้วยการกัดเต็มหน้าและทิศทางลง

จากผลการวิจัยข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า การวิเคราะห์การเกิดแชนด์เตอร์นั้น จะมีความแม่นยำมากที่สุดด้วยการวิเคราะห์ด้วยโดเมนความถี่ เมื่อเปรียบเทียบกับวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ โดยการทบทวนจากงานวิจัยด้วยเทคนิคของผู้วิจัยท่านอื่น และมีลักษณะที่เด่นชัดที่แสดงออกมาในรูปของแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้น

T. Moriwaki, T. Shibasaka and S. Tangjitsicharoen (2006) [25] ได้พัฒนาระบบการตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัดในกระบวนการตัดสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยนำฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลแบบถดถอยมาใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการตัดเฉพาและอัตราการป้อนตัด ซึ่งค่าดัชนี a ในฟังก์ชันถูกกำหนดให้เป็นตัวชี้วัดขนาดของการสึกหรอของมีดตัดและมีค่าเทียบเท่ากับอัตราส่วนความต้านทานการตัดเฉพาที่อัตราการป้อนตัดศูนย์เทียบกับที่อัตราการป้อนตัดอนันต์ เพื่อที่ต้องการหาค่า a , ทฤษฎีได้ถูกเสนอให้แทรกคำสั่งเพิ่มตัดในกระบวนการตัดจริงเมื่อต้องการตรวจสอบหาขนาดของการสึกหรอของมีดตัด โดยในคำสั่งเพิ่มตัดจะเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดปัจจุบันในกระบวนการตัดปกติให้เป็นอัตราการป้อนตัดในขั้นขึ้นหรือขั้นลงที่อัตราการป้อนตัดต่ำๆอย่างตั้งใจเพื่อวัดแรงตัดโดยไดนามิเตอร์ได้ถูกติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซีและระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการตัดเฉพา จากผลการทดลองการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการตัดจริงได้พิสูจน์ว่า ดัชนี a จากสมการ
$$v_b = \frac{\ln a - \ln 1.06}{1.81}$$
 เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัดถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะแตกต่างกัน

K. Uehara, Y. Kanda (1984) [26] ได้อธิบายธรรมชาติของสัญญาณอะคูสติค อิมิสชั่นในกระบวนการตัดและเพื่อค้นหาวิธีการในการตรวจติดตามสถานะการตัดพร้อมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างกับกลไกการเกิดรูปแบบของเศษโลหะโดยทดลองใช้วัสดุชิ้นงานหลายรูปแบบในการกลึงและการกัดกับมีดตัดที่คมและสึก พร้อมทั้งวัดสัญญาณอะคูสติค อิมิสชั่นที่มีดตัดและชิ้นงาน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสัญญาณอะคูสติค อิมิสชั่นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นช่วงๆ เมื่อเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องที่มีการเอี่ยมติดที่คมตัด (Continuous chip with built-up edge) เนื่องจากการแตกหักของการเอี่ยมติดที่คมตัด ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือสัญญาณแบบเป็นช่วงเกิดที่มีดตัดและไม่เกิดที่ชิ้นงาน, สัญญาณแบบเป็นช่วงเกิดที่ชิ้นงานและไม่เกิดที่มีดตัด และสัญญาณแบบเป็นช่วงเกิดทั้งมีดตัดและชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.20 และเมื่อเศษโลหะมีลักษณะเป็นแบบพื้นเลื่อยและเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง สัญญาณอะคูสติค อิมิสชั่นจะมีรูปแบบเป็นช่วงและเกิดเป็นระยะๆซึ่งการเกิดจะเกิดในเวลาเดียวกันกับช่วงของการแตกหรือการแบ่งของเศษโลหะ

ส่วนการทดลองในเรื่องของการสึกหรอของมีดตัดนั้นจะทำการติดเซนเซอร์ที่ชิ้นงาน (กระบวนการกัด) และติดเซนเซอร์ที่มีดตัด (กระบวนการกลึง) จากนั้นเอาสัญญาณอะคูสติกที่ได้มาวิเคราะห์โดยทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้พบว่า เมื่อติดเซนเซอร์ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลกระทบของการสึกหรอของมีดตัดที่วิเคราะห์จากเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณ จะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนเซนเซอร์ที่ติดอยู่ที่มีดตัดนั้น เพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณจะถูกส่งผลโดยการสึกหรอของมีดตัด

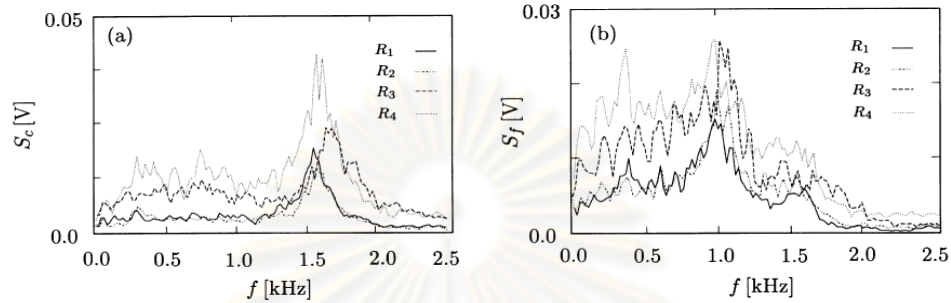


รูปที่ 2.21 : รูปแบบการแตกหักของการเชื่อมติดที่คมตัดที่มีผลต่อสัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่น

T. Moriwaki, Y. Mori (1992) [27] ได้เสนอวิธีการบ่งชี้สถานะการตัดในกระบวนการกลึง เช่นการสึกหรอของเครื่องมือตัด, แฉกแตก และ การพ่นกันของเศษโลหะโดยทำการวิเคราะห์จากสัญญาณจากแรงตัดและสัญญาณอะคูสติก โดยใช้หลักการของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งในการทดลองเงื่อนไขในการตัดที่นำมาใช้เป็นการตัดหยาบ (ความเร็ว 150-250 เมตร/นาที, ความลึกตัด 2.0 มิลลิเมตร และอัตราป้อนตัด 0.31 มิลลิเมตร/รอบ) และจากผลการทดลองพบว่าการบ่งชี้สถานะของการสึกหรอของเครื่องมือตัด, การเกิดแฉกแตกและการพ่นกันของเศษโลหะสามารถถูกบ่งชี้ได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าจะมี 2 กรณีจาก 12 กรณีที่บ่งชี้การพ่นกันของเศษโลหะผิดพลาด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการนี้มีความน่าเชื่อถือและมีประโยชน์ค่อนข้างมากในการบ่งชี้สถานะการตัด

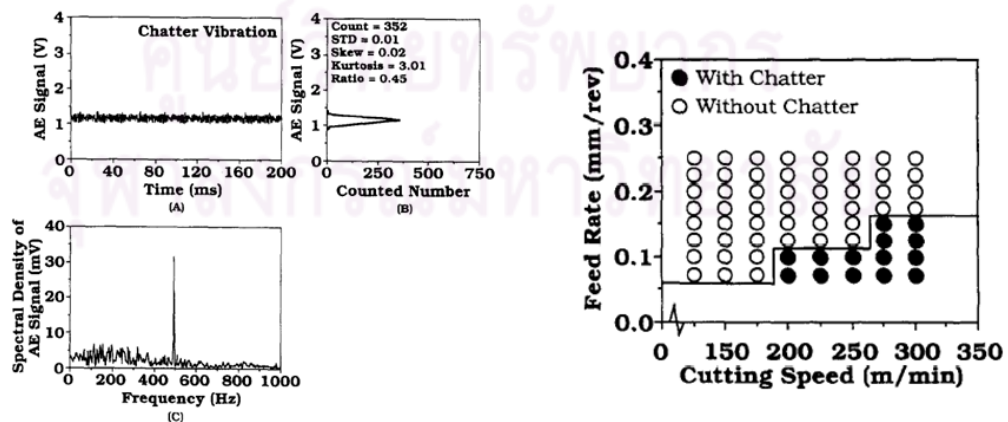
E. Govekar, J. Gradisek, I. Grabec (2000) [28] เสนอการตรวจติดตามกระบวนการตัดที่ใช้พารามิเตอร์ 3 ตัว (รูปแบบของเศษโลหะ, การสึกหรอของมีดตัด และ แฉกแตก) ในการตรวจติดตาม โดยใช้สัญญาณจากเซนเซอร์แรง และสัญญาณจากอะคูสติก อิมิสชั่น แล้วมาทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณเพื่อจำแนกสถานะของการตัด โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่ง

แสดงระดับการสั่นหรือของมีดตัดที่ส่งผลต่อแรงตัดหลักและแรงป้อนตัดโดยระดับการสั่นหรือที่มากขึ้นจะส่งผลให้แรงตัดมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.22 : ตัวอย่างของเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดที่ระดับของการสั่นหรือ R1, R2, R3 และ R4 (a) แรงตัดหลัก, (b) แรงป้อนตัด ^[16]

I. Inasaki (1998) [29] ได้เสนอการประยุกต์ใช้เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชันสำหรับการตรวจติดตามกระบวนการตัดด้วยเครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียวรวมถึงหลายคมตัด ซึ่งจะทำการตรวจจับรูปแบบของเศษโลหะรวมถึงแชตเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด รวมถึงจำแนกเงื่อนไขของการตัด (อัตราป้อนตัด และความเร็วตัด) ที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก, เศษโลหะแบบต่อเนื่องและแชตเตอร์ โดยจากสัญญาณที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ รวมถึงใช้ค่าค่าความเบ้ (Skew) และค่าความโด่ง (Kurtosis) ในการวิเคราะห์และจำแนกสถานะการตัดที่เกิดขึ้น โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 : สัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดที่มีแชตเตอร์เกิดขึ้นและเงื่อนไขของการตัดที่ทำให้เกิดแชตเตอร์

T. Thepsonthi, E. Hamdi, and S. Mitsui (2009) [30] ทำการศึกษาการกัดชิ้นงานเหล็กเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อศึกษาถึงผลลัพธ์ของการใช้วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง โดยใช้ ball end mill ชนิด insert carbide จากการศึกษาพบว่า การตัดโดยใช้วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ประสิทธิภาพของวิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง ในเทอมของผิวงานสำเร็จและการสึกหรอของเครื่องมือตัด กล่าวคือ วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet จะให้ผิวงานสำเร็จที่เรียบกว่าการวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง ในขณะที่อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดก็ยาวนานกว่าด้วย
- (2) วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบสูง (High speed end milling) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้ของวิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet ให้ประสิทธิภาพของที่ดีกว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกที่ความเร็วตัดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทอมของการสึกหรอของเครื่องมือตัด
- (3) วิธีการหล่อเย็นแบบเปียกส่งผลกระทบต่ออายุการสึกหรอของเครื่องมือตัด แต่ให้ผลลัพธ์ของความเรียบผิวที่ดี

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นไปทางด้านกระบวนการกลึง สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการบรณการกัดเป็นรองลงมา โดยเฉพาะในส่วนของงานกัดนี้ จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับดอกกัดเอ็นมิลล์ ส่งผลให้งานวิจัยเกี่ยวกับดอกกัดหัวบอลยังมีค่อนข้างน้อย ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วมีดอกกัดหัวบอลนั้นเป็นเครื่องมือตัดที่นิยมใช้กันมากในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อน อาจเนื่องด้วยมีสาเหตุมาจากการที่มีดอกกัดแบบหัวบอลมีราคาค่อนข้างจะสูงกว่ามีดอกกัดเอ็นมิลล์หรือเม็ดมีดกลึง จึงทำให้เป็นข้อจำกัดในการทำวิจัย นอกจากนั้นการนำเซนเซอร์เข้ามาช่วยในการตรวจติดตามภายในกระบวนการกลึงมีมากมาย เช่น เซนเซอร์แรงตัด , เซนเซอร์เสียง , เซนเซอร์ความเร่ง เป็นต้น แต่สำหรับการนำเซนเซอร์มาตรวจติดตามภายในกระบวนการกัดนั้นมีจำนวนไม่มาก จึงเป็นโอกาสสำคัญในการนำระบบตรวจติดตามภายในกระบวนการมาทำการพัฒนาในกระบวนการกัดขึ้นรูป ทั้งนี้นักวิจัยหลายๆท่านได้นำเสนอพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากเซนเซอร์ รวมถึงวิธีการในการตรวจติดตามภายในกระบวนการสำหรับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์

ดังนั้นการศึกษากการตรวจจับและการตรวจติดตามการตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น ส่วนมากจะเป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่โดยการใช้ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัด ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากความถี่ของการเกิดแชนเตอร์ส่วนมากจะเกิดที่ความถี่ไม่สูงถึงระดับของความถี่ที่ใช้ของเซนเซอร์อะคูสติก จึงทำให้การตรวจจับการเกิดแชนเตอร์โดยการใช้เซนเซอร์ชนิดนี้จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก นอกจากนี้ว่าเซนเซอร์อะคูสติกอิมมิตชันที่ใช้จะสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ต่ำๆได้ด้วย ในขณะที่เซนเซอร์แบบอื่นๆ เช่น เซนเซอร์แบบเสียงและเซนเซอร์วัดความเร่งยังไม่เป็นที่นิยมมากนักในการที่จะนำมาใช้ในการตรวจติดตามการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่โดยการใช้ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัด ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้เวลาในการพิจารณาสัญญาณเพื่อระบุการเกิดแชนเตอร์ที่นาน ดังนั้น การวิเคราะห์การเกิดแชนเตอร์ในโดเมนเวลา จะช่วยลดเวลาในกระบวนการลงได้

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา วิธีการรวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ถูกนำเสนอ จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาในงานวิจัยนี้ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์ กับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการศึกษาโดยเลือกศึกษาการเกิดแชนเตอร์ในกระบวนการกัดด้วยดอกกัดแบบหวับลดแบบการตัดแบบแห้ง สำหรับการตรวจจับและตรวจติดตามด้วยเซนเซอร์วัดแรง และการวิเคราะห์การเกิดแชนเตอร์ด้วยโดเมนเวลา ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและเวลาในการทดลองลง รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานให้จริงได้เป็นอย่างมาก

สำหรับเทคนิคพิเศษที่ได้เสนอขึ้นในการวิจัยนี้ คือ การนำแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดมาพิจารณาในรูปของสัดส่วนแรงตัด โดยเลือกทำการวิเคราะห์ในส่วนของแรงตัดไดนามิกส์เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำเอาสัดส่วนแรงตัดมาพิจารณายังมีค่อนข้างน้อยในกระบวนการกัด เนื่องด้วยสัดส่วนแรงตัดที่เลือกใช้ไม่มีหน่วยจึงทำให้สามารถลดตัวแปรในการพิจารณาลงได้ ช่วยลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ผลลงและยังสามารถใช้งานได้ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงไป สัดส่วนแรงตัดที่เลือกใช้ในงานวิจัยเป็นแรงในแนวสัมผัสหรือ Tangential force (F_t) , แรงในแนวรัศมีหรือ Radial force (F_r) และแรงในแนวแกนหรือ Axial force (F_a) เนื่องจากแรงตัดในแนวแกนทั้งสามนั้นเป็นแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด ซึ่งเป็นแรงหลักที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน นั่นคือส่งผลต่อการเกิดแชนเตอร์นั่นเอง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์การวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่การพัฒนากระบวนการตรวจจับและตรวจติดตามสถานะของการแชตเตอร์ในกระบวนการกัดขึ้นรูปแบบหยาบ ดังนั้นในการทดลองต้องทำการแปรผันปัจจัยต่างๆเพื่อให้เกิดสถานะของการกัดขึ้นรูปที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาใช้ในการจำแนกสถานะของการเกิดแชตเตอร์และสถานะของการตัดปกติ

3.1.1. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแชตเตอร์ในกระบวนการตัด

เนื่องจากในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ในกระบวนการกัดแบบหยาบนั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาอัตราผลิตภาพ คือ อัตราในการขจัดเนื้อโลหะออกจากวัสดุ ซึ่งจะมีอัตราในการขจัดเนื้อโลหะออกจากวัสดุมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราในการขจัดเนื้อโลหะออกจากวัสดุและแรงตัดที่สูง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดแชตเตอร์ขึ้น สามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ปัจจัยหลักๆ ได้แก่

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

งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ปัจจัยเนื่องจาก คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และสิ่งแวดล้อม เป็นปัจจัยคงที่ที่สามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้ ทั้งนี้เพื่อทำการศึกษาถึงปัจจัยเนื่องจากวิธีการเป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบการทดลองซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง (Cutting Parameter) ในกระบวนการกัดนั้น มีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลต่ออัตราผลิตภาพ คือ ความเร็วรอบ, ความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด โดยเงื่อนไขหลักทั้ง 3 เงื่อนไขดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการขจัดเนื้อโลหะออกจากวัสดุ และแรงตัดที่เกิดขึ้นตามมาด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เงื่อนไข/ปัจจัยดังที่กล่าวมาทำการศึกษา

3.1.2 การทดสอบช่วงความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ (Modal test)

ในการทดสอบเพื่อตรวจสอบย่านความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักร ซึ่งมี ส่วนประกอบดังนี้ คือ ชิ้นงาน (Workpiece) ปากกาจับชิ้นงาน (Jig) โต๊ะรองรับชิ้นงาน (Table) แท่นเซนเซอร์วัดแรง (Force sensor) อุปกรณ์จับยึดมีดตัด (Tool holder) และมีดตัด (Tool) ในการทดสอบเพื่อทำการเลือกช่วงความถี่ที่จะตรวจจับสัญญาณให้ครอบคลุมและเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับ โดยกราฟแสดงสัญญาณความถี่ธรรมชาติที่ตรวจจับได้ในภาคผนวก จ. ผลที่ได้มี ดังนี้

- ความถี่ธรรมชาติของไดนาโมมิเตอร์มีค่า 2,300 เฮิร์ต
- ชิ้นงาน ปากกาจับชิ้นงาน โต๊ะรองรับชิ้นงาน และแท่นเซนเซอร์วัดแรง (ไดนาโมมิเตอร์) ถูกจับยึดติดกัน ได้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ 790 เฮิร์ต
- มีดตัดและอุปกรณ์จับยึดมีดตัด ถูกจับยึดติดกัน โดยค่าความถี่ธรรมชาติที่ทดสอบได้ คือ 1,080 เฮิร์ต

3.1.3 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

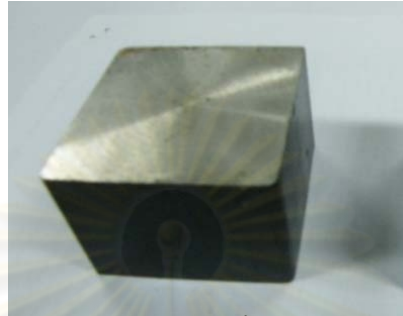
สำหรับกระบวนการกััดขึ้นรูปแบบหยาบนั้นมีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วตัด, ความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด โดยเงื่อนไขของการตัดทั้ง 3 ตัวนี้มีผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในขณะตัดหรือแชตเตอร์ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ในการกััดทั้ง 3 ค่า นั้น จะมีค่าที่สูง (ในกรณีที่มีแชตเตอร์เกิดขึ้น) เมื่อเทียบกับการกััดแบบหยาบในสภาวะปกติ ข้อมูลในการกำหนดระดับปัจจัยมาจากข้อมูลด้านเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัดโดยกำหนดให้ ได้แก่

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงเงื่อนไขการตัดด้วยดอกกััดแบบหัวบอลและเอ็นมิลล์

ชิ้นงาน	carbon steel (AISI 1050)
ลักษณะมีดกััด	1. Coated carbide ball end mill (Diameter 6, 8, 10, 12 mm) 2. Coated carbide end mill (Diameter 6, 8, 10, 12 mm)
ความเร็วตัด, รอบ/นาที	5000, 7000, 9000, 11,000
ความลึกตัด, มิลลิเมตร	3, 4, 5, 6
อัตราป้อนตัด, มม./รอบ	0.02, 0.04, 0.06

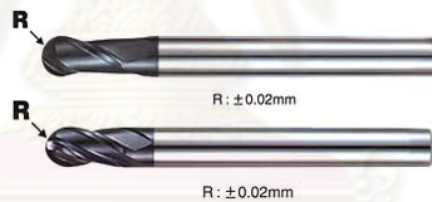
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- วัสดุชิ้นงานในการกัดขึ้นรูปเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน S50C/AISI1050 ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 : ภาพแสดงวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการกัด

- มีดกัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียม อลูมิเนียมไนไตรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 , 8 , 10 , 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ลักษณะมีดกัดแบบหัวบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 ภาพวาดแสดงลักษณะมีดกัดแบบหัวบอลในแนวตั้ง

3. มีดกัดเอ็นมิลล์ (End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์เคลือบไนไตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 , 8 , 10 , 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงมีดกัดแบบเอ็นมิลล์แบบ 2 คมตัด ที่ใช้ในการทดลอง



2-FLUTE



4-FLUTE

รูปที่ 3.5 : ภาพวาดแสดงลักษณะมีดกัดแบบเอ็นมิลล์แบบ 2 และ 4 คมตัด

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



รูปที่ 3.6 : ภาพแสดงเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซนเตอร์ 5 แกน

5. เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจติดตามสถานะการตัด

- ไดนามอมิเตอร์หรือเซนเซอร์วัดแรงตัด (Dynamometer or Force sensor) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9257B



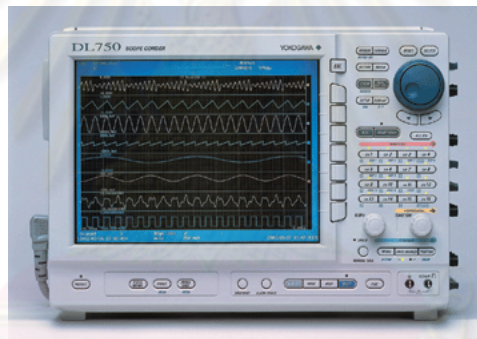
รูปที่ 3.7 : ภาพแสดงเซนเซอร์วัดแรงตัด

6. ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ยี่ห้อ Kister type 5073



รูปที่ 3.8 ภาพแสดงซาร์จแอมพลิไฟเออร์ที่ใช้ในการทดลอง

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

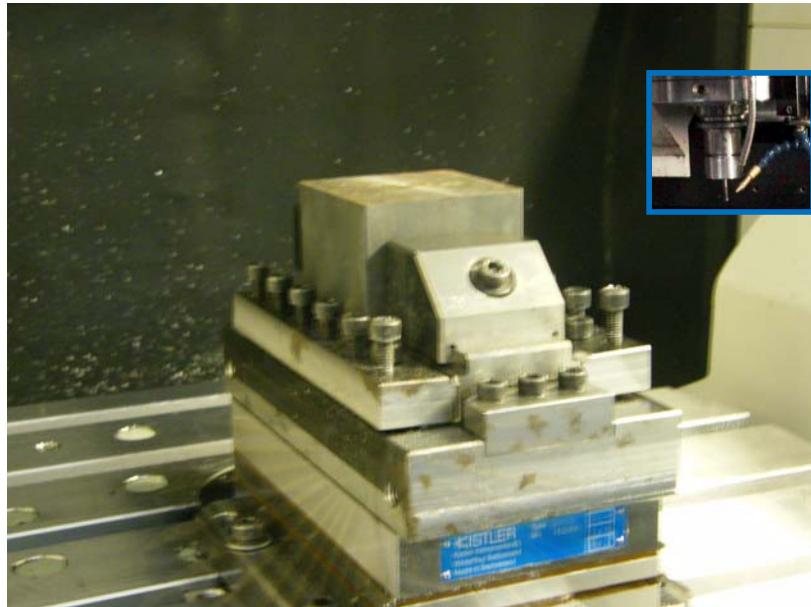


รูปที่ 3.9 ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

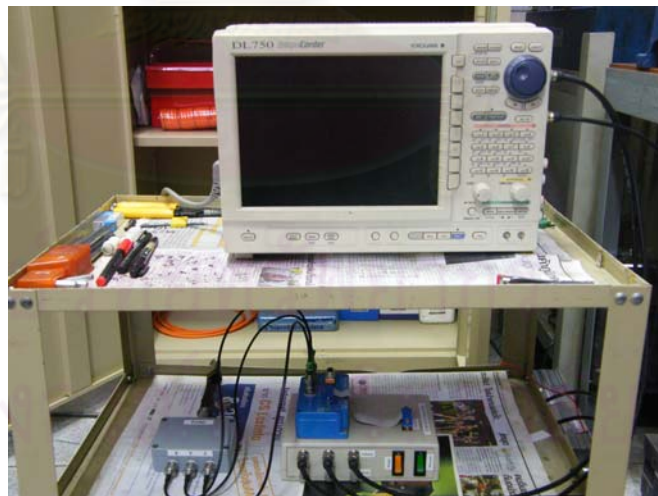
- 1.) เตรียมชิ้นงานเหล็กขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ความยาว 64 มิลลิเมตร ความสูง 45 มิลลิเมตรยึดจับด้วยปากจับ(Jig) บนเซนเซอร์วัดแรง ดังรูปที่ 3.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับการดำเนินการทดลอง

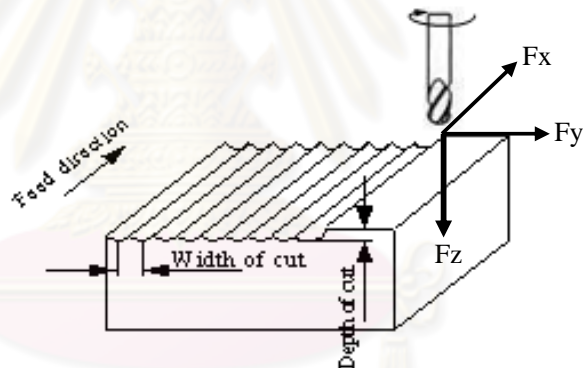
- 2.) ทำการเชื่อมโยงเซนเซอร์วัดแรงเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยการปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคปดังนี้ ค่ากรองความถี่ย่านสัญญาณต่ำ (Low-pass Filter) ที่ 5000 เฮิรท์ และอัตราการเก็บข้อมูล (Sampling rate) ที่ 10,000 ค่าต่อวินาที



รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งการเชื่อมโยงเครื่องออสซิลโลสโคปกับชาร์จแอมพลิไฟเออร์

- 3.) เริ่มต้นกวดชิ้นงานโดยใช้ความเร็วตัดและอัตราป้อนตัดค่าหนึ่งที่คงที่ แล้วทำการแปรผันค่าความลึกกัด จากนั้นทำการเก็บข้อมูลแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้น

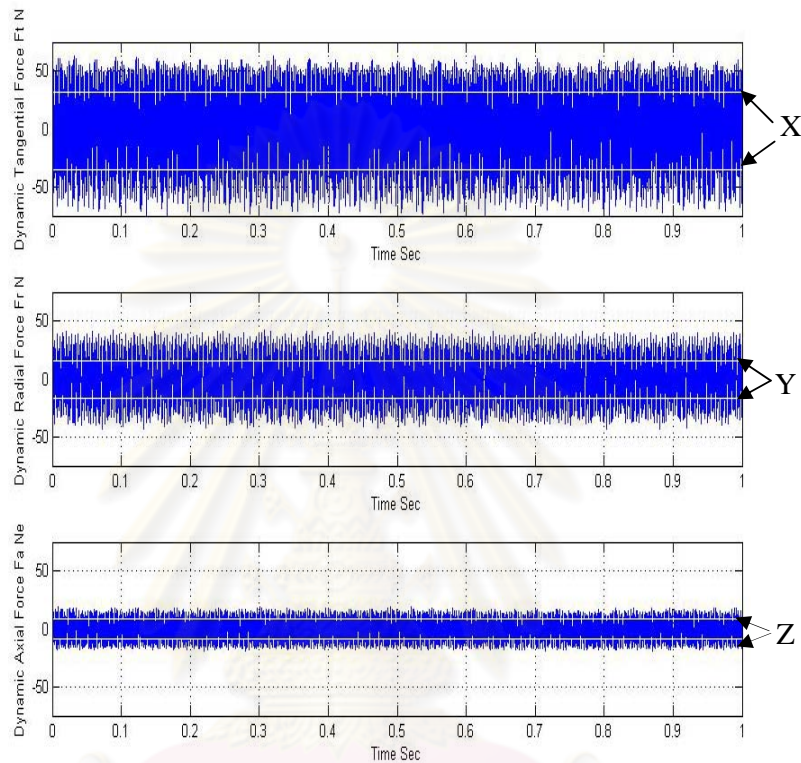
- 4.) ทำการคำนวณแรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกน จากที่ทำการบันทึก โดยการคูณค่าที่เก็บได้จากการทดลองด้วยค่าตอบสนอง (Sensitivity) ที่มีค่า 200 นิวตัน/โวลต์ จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณแรงตัดไดนามิกส์ แล้วนำไปลบออกจากค่าที่บันทึกได้ทุกค่า เพื่อทำการตัดสัญญาณ สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการระบุสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นดังนี้ แรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน X หรือเรียกได้ว่า แรงตัดในแนวสัมผัส (Tangential Force) ให้แทนด้วยสัญลักษณ์ F_x , แรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y หรือเรียกได้ว่าแรงตัดในแนวรัศมี (Radial Force) ให้แทนด้วยสัญลักษณ์ F_y และแรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z หรือเรียกได้ว่า แรงตัดในแนวแกน (Axial Force) ให้แทนด้วยสัญลักษณ์ F_z ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.12 จากค่าความลึกตัดที่เปลี่ยนแปลงในค่าความเร็วตัดคงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นทำการพิจารณาแรงตัดไดนามิกส์ที่ทำให้เกิด chatter ขึ้น ด้วยการคำนวณการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วจากโปรแกรมสำเร็จรูป (Fast Fourier Transform) ซึ่งแสดงอยู่ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 3.12 แสดงทิศของแรงตัดทั้ง 3 แรง คือ F_x , F_y และ F_z ในทิศของ X Y และ Z

- 5.) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และ 4 ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการตัดเดียวกัน และทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความแปรปรวนจากแรงตัดไดนามิกส์ที่ทำการบันทึกได้
- 6.) ทำการคำนวณค่าอัตราส่วนพารามิเตอร์ใหม่ ในที่นี้ คือ AV1 , AV2 และ AV3 โดยค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่เสนอขึ้นนั้น ได้มาจากการคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกน คือ แรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน X แรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y และแรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z ตามลำดับ ในการคำนวณนั้นจะแบ่งดังแรงตัดไดนามิกส์ที่ทำการบันทึกมาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบน หรือ ส่วนของแรงตัดไดนามิกส์ที่มีค่าเป็นบวก และส่วนล่าง หรือ ส่วนที่มีแรงตัดไดนามิกส์เป็นลบ จากนั้นทำการนำแรงตัดส่วนบนมาลบออกด้วยแรงตัดส่วนล่าง จะได้ตัวแทนของแรงตัด

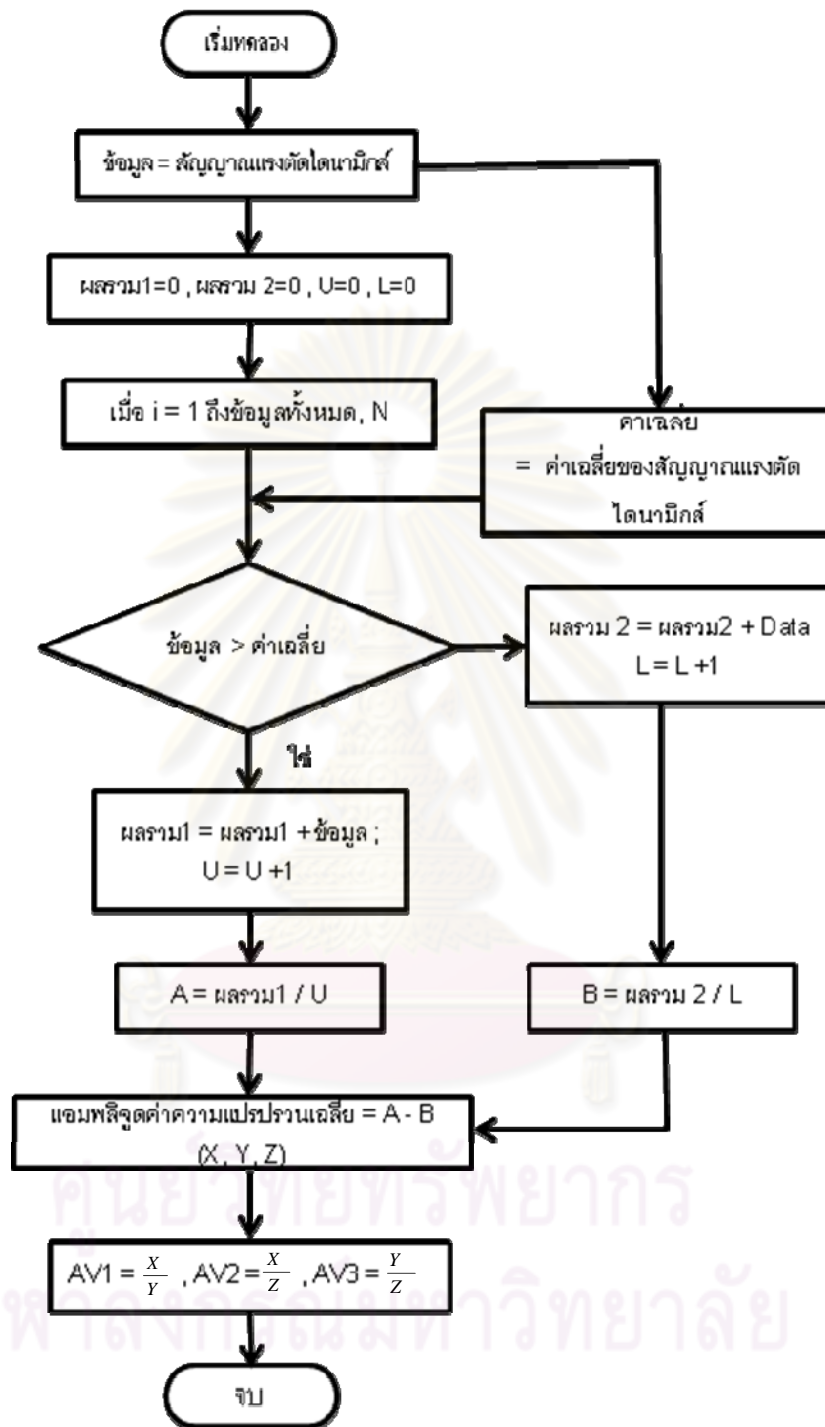
ออกมาทั้ง 3 แกน คือ X Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งตัวแทนดังกล่าวเป็นตัวแทนของแรงตัดในทิศแกน X ตัวแทนของแรงตัดในทิศแกน Y และตัวแทนของแรงตัดในทิศแกน Z ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกน

เมื่อได้ค่าตัวแปร X Y และ Z เรียบร้อยแล้ว นำไปสร้างพารามิเตอร์ใหม่ 3 พารามิเตอร์ คือ AV1 AV2 และ AV3 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 พารามิเตอร์เกิดขึ้นมาจากการนำตัวแปร X Y และ Z มาสร้างอัตราส่วนซึ่งกันและกัน ดังแสดงในสมการที่ (3-1)

$$AV1 = \frac{X}{Y}; AV2 = \frac{X}{Z}; AV3 = \frac{Y}{Z} \quad (3-1)$$



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงอัลกอริทึมในการคำนวณหาพารามิเตอร์ใหม่ คือ AV1 , AV2 และ AV3

จากแผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานข้างต้น มีการกำหนดความหมายของตัวแปร ดังนี้
ผลรวม 1 คือ ผลรวมของแรงตัดไดนามิกส์ด้านบวก

ผลรวม 2 คือ ผลรวมของแรงตัดไดนามิกส์ด้านลบ
 U แทน จำนวนของข้อมูลแรงตัดไดนามิกส์ด้านบวก
 L แทน จำนวนของข้อมูลแรงตัดไดนามิกส์ด้านลบ
 A แทน ผลรวมของแรงตัดไดนามิกส์ด้านบวก
 B แทน ผลรวมของแรงตัดไดนามิกส์ด้านลบ

- 7.) ทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าพารามิเตอร์ AV1 กับพารามิเตอร์ AV2 , ค่าพารามิเตอร์ AV1 กับพารามิเตอร์ AV3 และค่าพารามิเตอร์ AV2 กับพารามิเตอร์ AV3 ลงในพื้นที่อ้างอิงที่ถูกรวบรวมมาเพื่อใช้สำหรับการตรวจจับการเกิดแซตเตอร์
- 8.) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3 ถึง 7 ด้วยเงื่อนไขการตัดที่แปรผันอื่นๆ
- 9.) ทำการพิจารณาค่าวิกฤต ในที่นี้ คือ ค่า C1 , C2 และ C3 จากพื้นที่อ้างอิง โดยนิยามของค่าอัตราส่วนวิกฤต คือ ค่าอัตราส่วนที่เกิดมาจากพารามิเตอร์ที่มีค่าเกินกว่าค่าพารามิเตอร์ปกติ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เกิดกว่าปกตินี้ จะสามารถแบ่งสภาวะของการสั่นที่เกิดขึ้นในการตัดได้ 2 ส่วน คือ ส่วนของการเกิดแซตเตอร์และการสั่นแบบปกติ ดังนี้
 - C1 แทน ค่าอัตราส่วนวิกฤตจากความสัมพันธ์ของ AV1 กับ AV2
 - C2 แทน ค่าอัตราส่วนวิกฤตจากความสัมพันธ์ของ AV2 กับ AV3
 - C3 แทน ค่าอัตราส่วนวิกฤตจากความสัมพันธ์ของ AV1 กับ AV3
- 10.) ทำการทดสอบสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์และค่าวิกฤตที่ได้นำเสนอขึ้นมา ด้วยการทดลองตัดใหม่ด้วยดอกกัดเอ็นมิลล์
- 11.) ตรวจสอบติดตามการเกิดแซตเตอร์ เมื่อแซตเตอร์เกิดขึ้นแล้วทำการวัดแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองตัดใหม่ด้วยดอกเอ็นมิลล์ พร้อมคำนวณค่าพารามิเตอร์ AV1 เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองตัดด้วยดอกกัดหัวบอล
- 12.) ระบุสถานะของแซตเตอร์ ด้วยการพล็อตกราฟระหว่างพารามิเตอร์ AV1 กับความเร็วรอบในการตัด , พารามิเตอร์ AV1 กับค่าความลึกตัด และพารามิเตอร์ AV1 กับอัตราป้อนตัด พร้อมกำหนดค่าวิกฤต C1 ในพื้นที่อ้างอิง
- 13.) ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการกัดขึ้นรูปใหม่ เพื่อทำการตรวจจับแซตเตอร์และตรวจสอบติดตามสภาวะในการตัดด้วยเงื่อนไขที่ไม่ให้เกิดแซตเตอร์

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

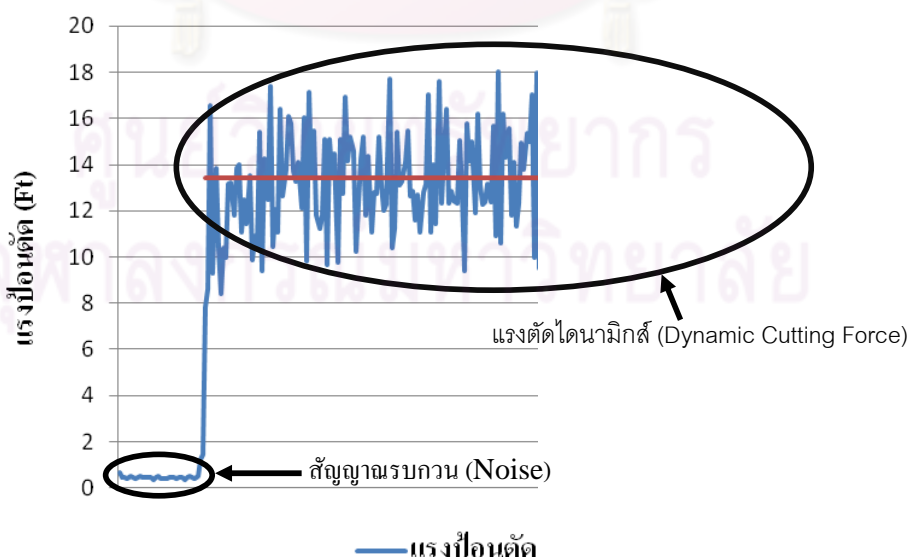
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทุกค่านั้นอยู่ในหน่วยโวลท์ ต้องทำการแปลงหน่วยในส่วนของสัญญาณแรงตัด ตามค่า sensitivity ได้ดังนี้

- แรงตัดในแนวสัมผัส (Tangential Force, F_x (N)) = V_x (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวรัศมี (Radial Force, F_y (N)) = V_y (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวแกน (Axial Force, F_z (N)) = V_z (Volt) x 200 (N/Volt)

หลังจากทำการแปลงหน่วยแล้ว ในส่วนของสัญญาณแรงตัดนั้นจะนำค่าแรงตัดไดนามิกส์ ทั้งสามแรง มาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาลบออกจากค่าเฉลี่ยก่อนนำไปทำการวิเคราะห์สัญญาณในด้านของความถี่และนำค่าเฉลี่ยแรงตัดไดนามิกส์มาลบออกด้วยค่าสัญญาณรบกวนเฉลี่ย ดังรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.2 : ตารางแสดงค่า sensitivity และช่วงความถี่ใช้งานของแต่ละเซนเซอร์

เซนเซอร์		Sensitivity	ช่วงความถี่ใช้งาน (Frequency Range)
เซนเซอร์วัดแรงตัด	แรงตัดในแนวสัมผัส(F_x)	200 V / N	0 – 2,000 Hz
	แรงตัดในแนวรัศมี (F_y)	200 V / N	
	แรงตัดในแนวแกน (F_z)	200 V / N	



รูปที่ 3.15 : ภาพแสดงสัญญาณแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

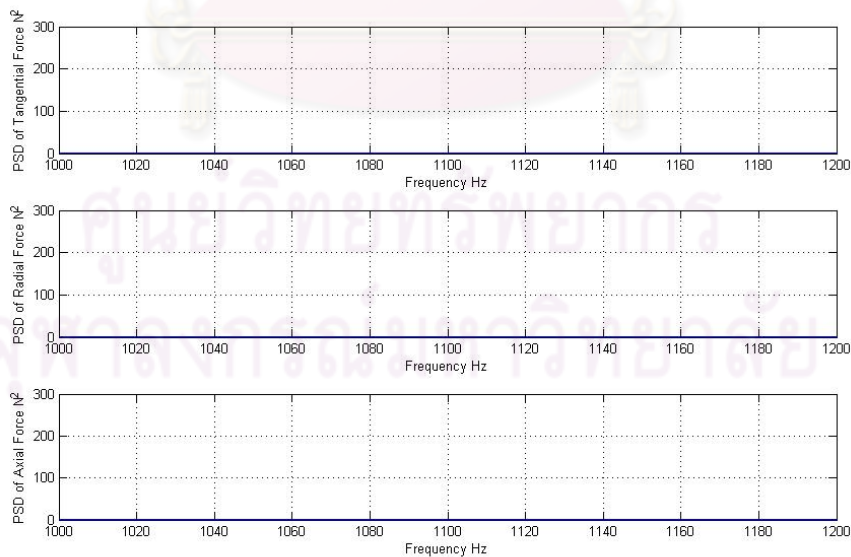
- 1.) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ต้องนำมาแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อตรวจสอบย่านสัญญาณความถี่ของแชนเนลเตอร์(ภาคผนวก ค)
- 2.) วิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลาของสัญญาณ เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นว่าสัญญาณของการตัดในสภาวะปกติหรือเป็นการสั้นของแชนเนลเตอร์
- 3.) นำสัญญาณของแรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกนมาคำนวณหาค่าความแปรปรวนเฉลี่ย จากนั้นนำไปหาอัตราส่วน เพื่อสร้างพารามิเตอร์ใหม่ พล็อตกราฟระหว่างความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ใหม่ทั้ง 3 ค่า จากนั้นทำการกำหนดค่าวิกฤตในพื้นที่อ้างอิงเพื่อระบุสภาวะของการเกิดแชนเนลเตอร์

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

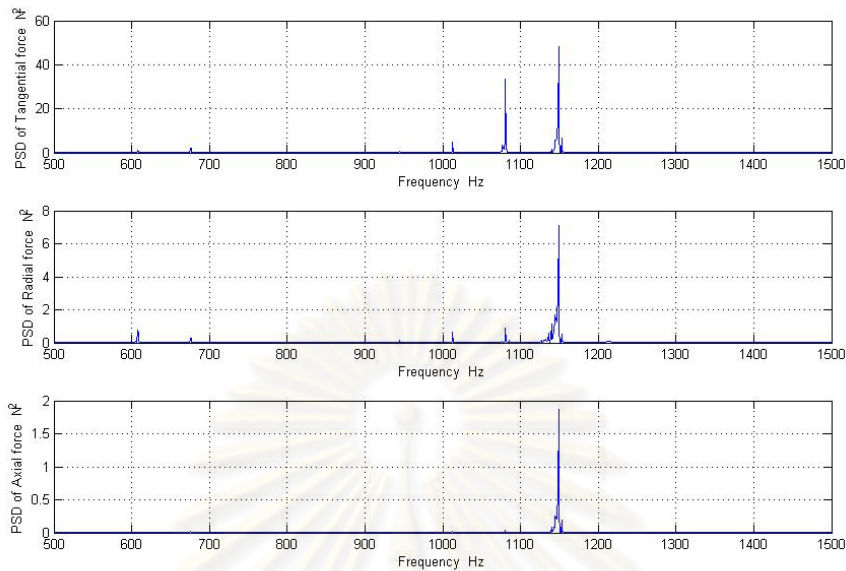
4.1 การตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น

การเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์เป็นปัญหาที่มีความสำคัญในกระบวนการตัด ซึ่งการเกิดแชนเตอร์ขึ้นนั้น จะทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระสูง, ขนาดของชิ้นงานที่ได้ไม่มีความเที่ยงตรง แม่นยำ และการสึกหรอหรือการแตกหักของมีดตัดเกิดก่อนกำหนด เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจติดตามในกระบวนการตัดเพื่อควบคุมและป้องกันการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์อย่างทันทีทันใด

จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองได้นำมาวิเคราะห์ทั้งในโดเมนของความถี่ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นจากทั้ง 3 แกน คือ แรงตัดในแนวสัมผัส (F_x) , แรงตัดในแนวรัศมี (F_y) และแรงตัดในแนวแกน (F_z) เพื่อจำแนกความแตกต่างระหว่างสัญญาณของแรงตัดไดนามิกส์แบบการสั่นแบบปกติหรือไม่เกิดแชนเตอร์และแรงตัดไดนามิกส์ที่มีการสั่นแบบแชนเตอร์เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกัดขึ้นรูป และเพื่อยืนยันว่าแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นนั้น เกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ



รูปที่ 4.1 แสดงภาพตัวอย่างเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดการสั่นแบบไม่เกิดแชนเตอร์หรือการสั่นแบบการตัดปกติในระหว่างการกัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.2 แสดงภาพตัวอย่างเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดการสั่นแบบ เกิดแชนต์เตอร์ขึ้นในระหว่างการกัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.1 – 4.2 แสดงผลจากผลการทดลอง(ภาคผนวก ก) เมื่อนำสัญญาณแรงตัดมา วิเคราะห์ในโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว จะพบว่า เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนต์เตอร์ ขึ้น ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดทั้ง 3 แกนจะมีขนาดสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงความถี่ ประมาณ 1,150 เฮิรตซ์ และเกิดขึ้นใกล้กับย่านความถี่ธรรมชาติของเพลahaman ที่ 1,060 เฮิรตซ์ (ซึ่ง พีกที่เกิดขึ้นจะแสดงให้เห็นชัดเจนที่แรงตัดหลัก สำหรับกระบวนการกัดขึ้นรูป คือ แรงตัดในแนว สัมผัส) เมื่อเปรียบเทียบกับกรกัดขึ้นรูปแบบปกติที่ไม่มีการสั่นแบบแชนต์เตอร์เกิดขึ้นนั้น เห็นได้ว่า ไม่มีความถี่เกิดขึ้นในช่วงบริเวณนี้ ทำให้ทราบว่า แชนต์เตอร์ เมื่อแชนต์เตอร์เกิดขึ้นแล้วจะปรากฏพีก ให้เห็น 2 พีก คือ พีกความถี่ของแชนต์เตอร์และพีกความถี่ของความถี่ธรรมชาติของเพลahaman ส่งผลให้สามารถการันตีว่า เงื่อนไขการตัดที่สภาวะนี้เกิดแชนต์เตอร์ขึ้น

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นแบบแชนต์เตอร์ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณแรงตัด

ในการตรวจจับสัญญาณในการเกิดแชนต์เตอร์นั้น โดยปกติทั่วไปแล้วต้องทำการยืนยันการ เกิดแชนต์เตอร์ด้วยการใช้โดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ดังวิธีที่ได้นำเสนอในรูปที่ 4.1 และ 4.2

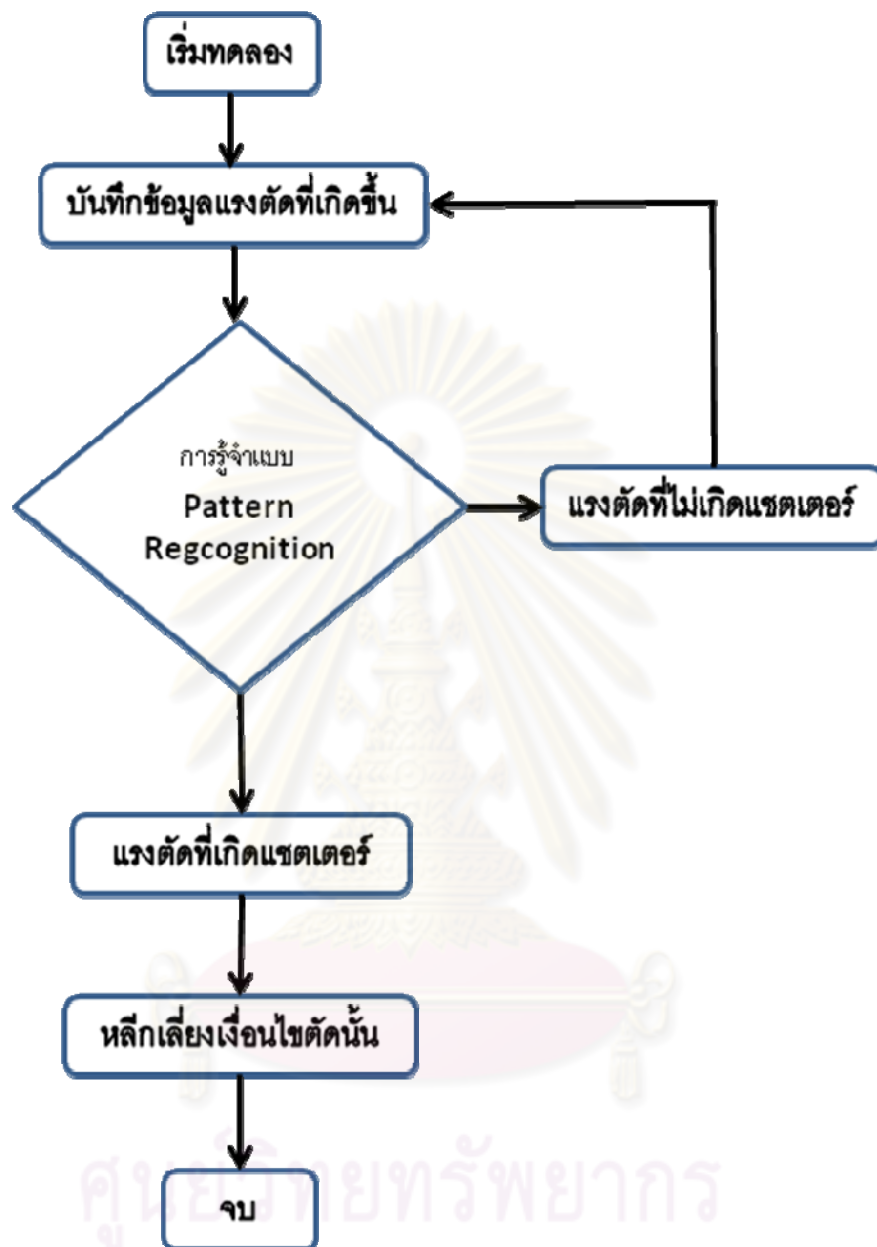
ข้อสังเกตสำคัญในการตรวจจับการเกิดแชนต์เตอร์ในกระบวนการนั้นต้องใช้เวลาในการ ประมวลผลเพิ่มขึ้น จากการต้องยืนยันผลการเกิดแชนต์เตอร์ขึ้นในรูปของโดเมนความถี่ด้วยการ ยืนยันผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.3



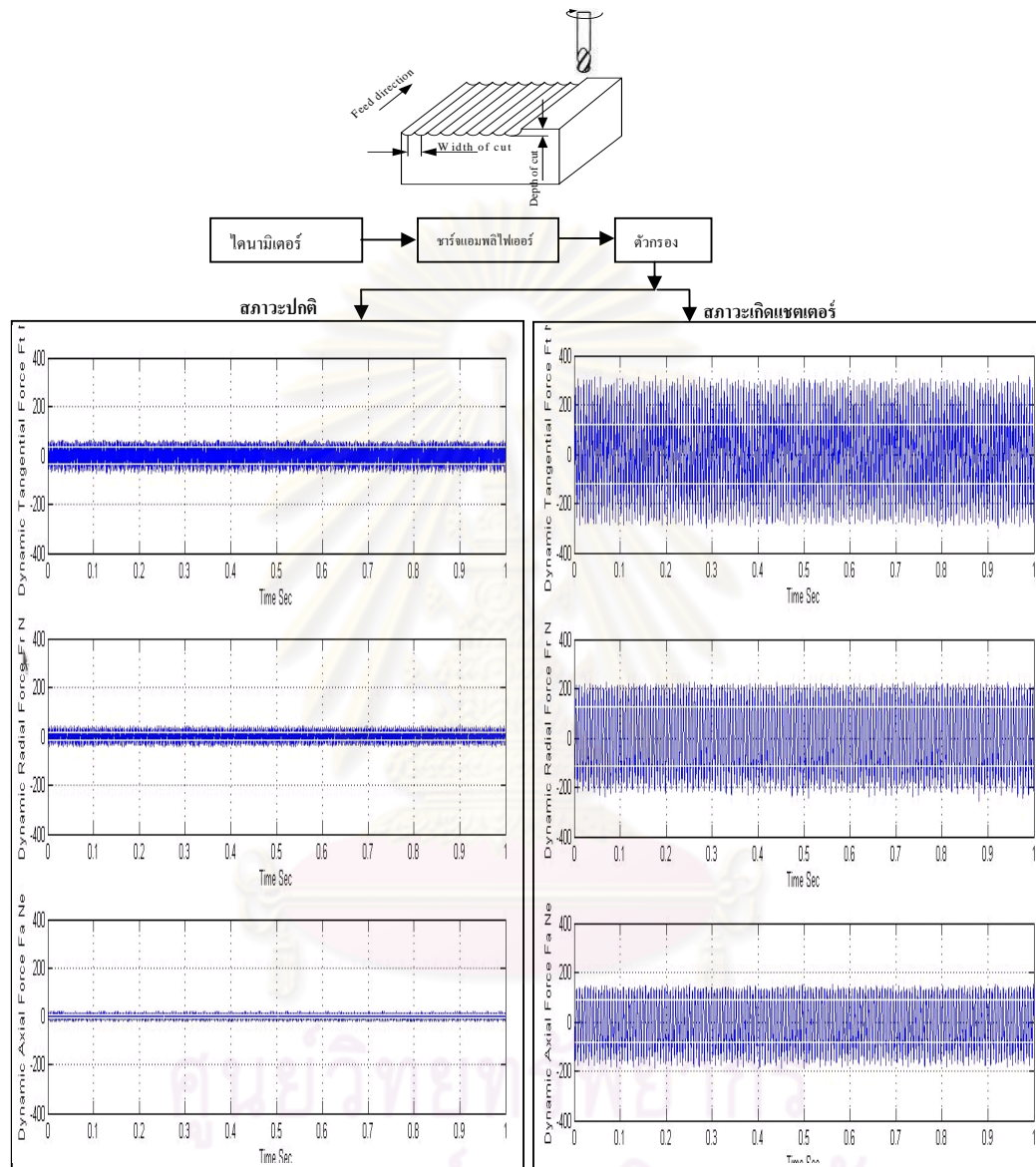
รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพขั้นตอนในการยืนยันการเกิดแชนเตอร์ด้วยโดเมนความถี่

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเสนอวิธีในการตรวจจับการเกิดแชนเตอร์ด้วยโดเมนของเวลา ซึ่งข้อดีของการใช้โดเมนของเวลา คือ สามารถลดเวลาในการตรวจจับแชนเตอร์ได้และสามารถทำการตรวจติดตามในกระบวนการได้ง่ายขึ้นด้วย ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 4.4 ซึ่งจากการสังเกตลักษณะของแรงตักที่ตรวจจับนั้น โดยอาศัยแรงตักไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นในโดเมนของเวลา ซึ่งมีเป็นลักษณะเอกลักษณ์เฉพาะตัวเมื่อแชนเตอร์เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนในการยืนยันการเกิดแชนเดเตอร์ด้วยการรู้จำแบบในโดเมนเวลา



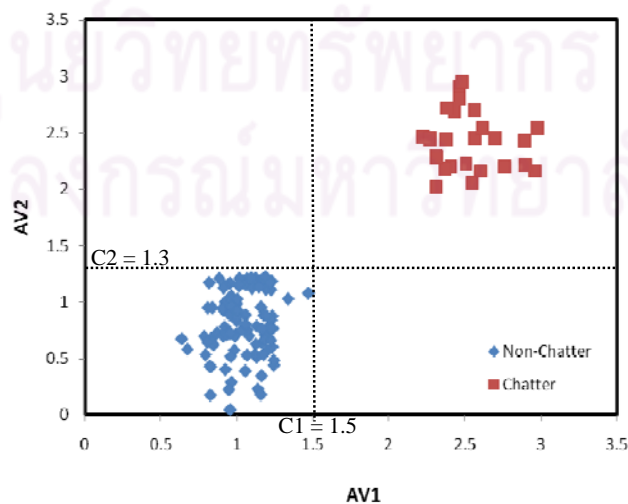
รูปที่ 4.5 แรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองระหว่างเซตเตอร์และการตัดแบบปกติ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อการสั่นแบบเซตเตอร์เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง แรงตัดไดนามิกส์ทั้ง 3 แกน จะมีค่าแอมพลิจูดของแรงตัดที่สูงมากกว่าค่าแอมพลิจูดของแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดแบบปกติ นั้นแสดงให้เห็นไปตามทฤษฎีการเกิดเซตเตอร์ว่า เมื่อการสั่นแบบเซตเตอร์เกิดขึ้นแล้ว แอมพลิจูดของแรงตัดไดนามิกส์จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับแรงตัดไดนามิกส์ที่

เกิดขึ้นจากสภาวะการตัดแบบปกติ ข้อสังเกตที่เห็นได้เด่นชัด คือ เมื่อการสั่นแบบแชนเตอร์เกิดขึ้นแล้ว แอมพลิจูดของสัญญาณแรงตัดในแนวสัมผัส (F_x) ซึ่งเป็นแรงตัดที่เกิดขึ้นแนวของแรงตัดหลักนั้น มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแรงตัดในแนวรัศมี (F_y) และแรงตัดในแนวแกน (F_z) จากทฤษฎีที่ได้เสนอไปนั้น สามารถจำแนกสภาวะการเกิดแชนเตอร์และสภาวะการสั่นที่เป็นปกติออกจากกันได้ด้วยลักษณะพิเศษนี้ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีงานวิจัยของ S.Tangjitsitcharoen และ T. Moriwaki [17]

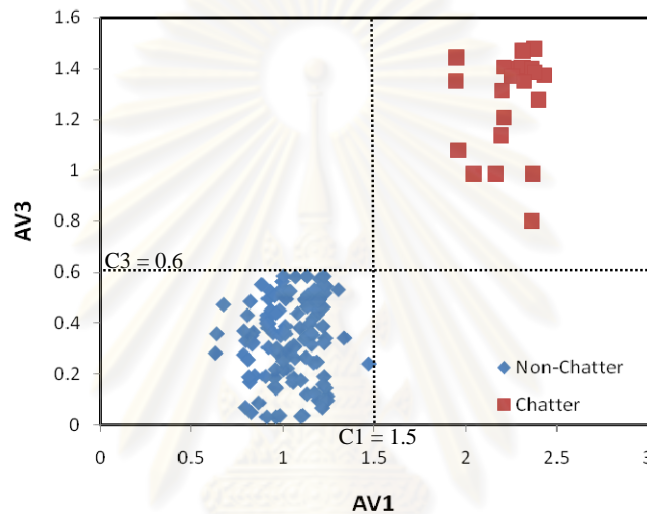
4.3 การจำแนกและแบ่งกลุ่มสภาวะการสั่นแบบแชนเตอร์และการสั่นแบบปกติ

จากความสัมพันธ์ในเรื่องของความแตกต่างของสัญญาณแรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นระหว่างการสั่นแบบแชนเตอร์และการสั่นแบบปกตินั้น พบว่า ถ้านำแอมพลิจูดของแรงตัดในแนวสัมผัส (F_x) มาเทียบในลักษณะของอัตราส่วนกับแรงตัดในแนวรัศมี (F_y) และแรงตัดในแนวแกน (F_z) ตามลำดับ จะสามารถจำแนกลักษณะของแรงตัดไดนามิกส์ของการสั่นแบบแชนเตอร์ออกจากการสั่นแบบปกติได้ โดยอัตราส่วนของพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้นำเสนอขึ้นนั้น หาได้จากการนำค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของข้อมูลมาเทียบหาอัตราส่วนซึ่งกันและกัน โดยพารามิเตอร์ที่ได้นำเสนอคือ $AV1 = \frac{X}{Y}$; $AV2 = \frac{X}{Z}$; $AV3 = \frac{Y}{Z}$ และนำความสัมพันธ์มาพล็อตกราฟลงในพื้นที่อ้างอิง เพื่อจำแนกการสั่นแบบแชนเตอร์ออกจากการสั่นแบบปกติได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ในเรื่องของแอมพลิจูดของแรงตัดไดนามิกส์ในแนวสัมผัสจะมีค่าสูงมากกว่าแรงตัดในแนวรัศมีและแรงตัดในแนวแกน ดังนั้น เมื่อการสั่นแบบแชนเตอร์เกิดขึ้นแล้ว พารามิเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของแรงตัดไดนามิกส์ของแรงตัดในแนวสัมผัสจะมีค่าสูงมากกว่าแรงตัดไดนามิกส์ในแนวสัมผัสในการตัดที่มีการสั่นแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.8



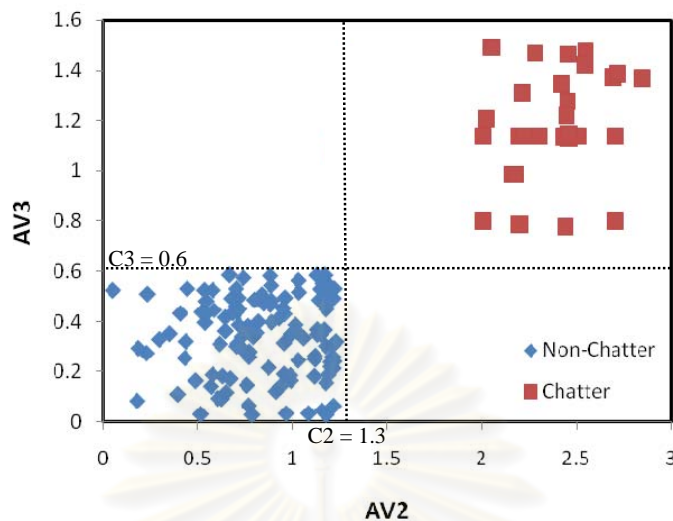
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AV1 กับ AV2 .ในพื้นที่อ้างอิง

จากรูปที่ 4.6 เห็นได้ว่า จุดสีเหลี่ยมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงด้านบนขวานั้น หมายถึงกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่เกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น เนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ AV1 และ AV2 มีค่าสูงเกินกว่าค่าพารามิเตอร์ในเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ทำให้สามารถทำการพิจารณาค่าอัตราส่วนวิกฤตได้ ดังนี้ $C1 = 1.5$ และ $C2 = 1.3$ ตามลำดับ ดังนั้น สรุปได้ว่า เมื่อค่าพารามิเตอร์ AV1 และ AV2 ที่เงื่อนไขการตัดใดมีค่าเกิดค่าอัตราส่วนวิกฤตนี้ สามารถบ่งชี้ได้ว่า เงื่อนไขการตัดในสภาวะนั้นมีแชนเตอร์เกิดขึ้นและสำหรับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ เป็นสภาวะการตัดที่เป็นปกติ



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AV1 กับ AV3 .ในพื้นที่อ้างอิง

จากรูปที่ 4.7 เห็นได้ว่า จุดสีเหลี่ยมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงส่วนด้านบนนั้น หมายถึงกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่เกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น เนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ AV1 และ AV3 มีค่าสูงเกินกว่าค่าพารามิเตอร์ในเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ทำให้สามารถทำการพิจารณาค่าอัตราส่วนวิกฤตได้ ดังนี้ $C1 = 1.5$ และ $C3 = 0.6$ ตามลำดับ ดังนั้น สรุปได้ว่า เมื่อค่าพารามิเตอร์ AV1 และ AV3 ที่เงื่อนไขการตัดใดมีค่าเกิดค่าอัตราส่วนวิกฤตนี้ สามารถบ่งชี้ได้ว่า เงื่อนไขการตัดในสภาวะนั้นมีแชนเตอร์เกิดขึ้นและสำหรับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ เป็นสภาวะการตัดที่เป็นปกติ



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ AV2 กับ AV3 ในพื้นที่อ้างอิง

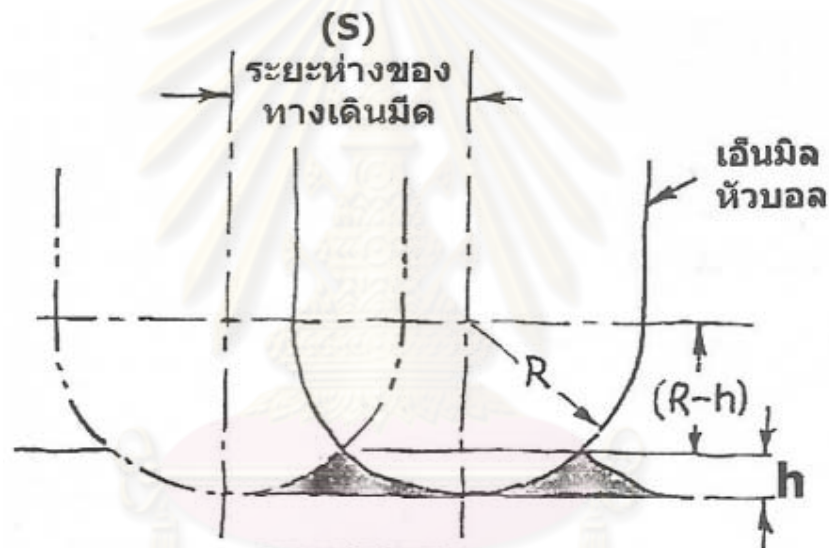
จากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่า จุดสีเหลี่ยมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงส่วนด้านบนนั้น หมายถึงกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่เกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น เนื่องจากจากค่าพารามิเตอร์ AV2 และ AV3 มีค่าสูงเกินกว่าค่าพารามิเตอร์ในเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ทำให้สามารถทำการพิจารณาค่าอัตราส่วนวิกฤตได้ ดังนี้ $C2 = 1.3$ และ $C3 = 0.6$ ตามลำดับ ดังนั้น สรุปได้ว่า เมื่อค่าพารามิเตอร์ AV1 และ AV3 ที่เงื่อนไขการตัดใดมีค่าเกินค่าอัตราส่วนวิกฤตนี้ สามารถบ่งชี้ได้ว่า เงื่อนไขการตัดในสภาวะนั้นมีแชนเตอร์เกิดขึ้นและสำหรับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ เป็นสภาวะการตัดที่เป็นปกติ

จากรูปที่ 4.6 -4.8 ดังแสดงข้างต้นนั้น สรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนวิกฤตขึ้นมาได้จากพื้นที่อ้างอิงดังกล่าว ซึ่งค่าอัตราส่วนวิกฤต มีค่าดังนี้ $C1 = 1.5$, $C2 = 1.3$ และ $C3 = 0.6$ ตามลำดับ ดังนั้นแชนเตอร์สามารถตรวจจับและตรวจติดตามในกระบวนการ โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้ โดยรูปแบบในการตัดสินใจระหว่างกระบวนการเกิดขึ้นรูปนั้น เกิดขึ้น ถ้าค่าอัตราส่วนพารามิเตอร์ของแรงตัดไดนามิกส์ AV1 , AV2 และ AV3 ที่เงื่อนไขการตัดใดมีค่าเกินค่าอัตราส่วนวิกฤต $C1$, $C2$ และ $C3$ ตามลำดับ ที่ได้เสนอขึ้นแล้วนั้น หมายความว่า เงื่อนไขการตัดในสภาวะนั้นมีการสั่นแบบแชนเตอร์เกิดขึ้น

4.4 การตรวจสอบสมรรถนะของระบบตรวจจับและตรวจติดตามแชนเตอร์ในกระบวนการ

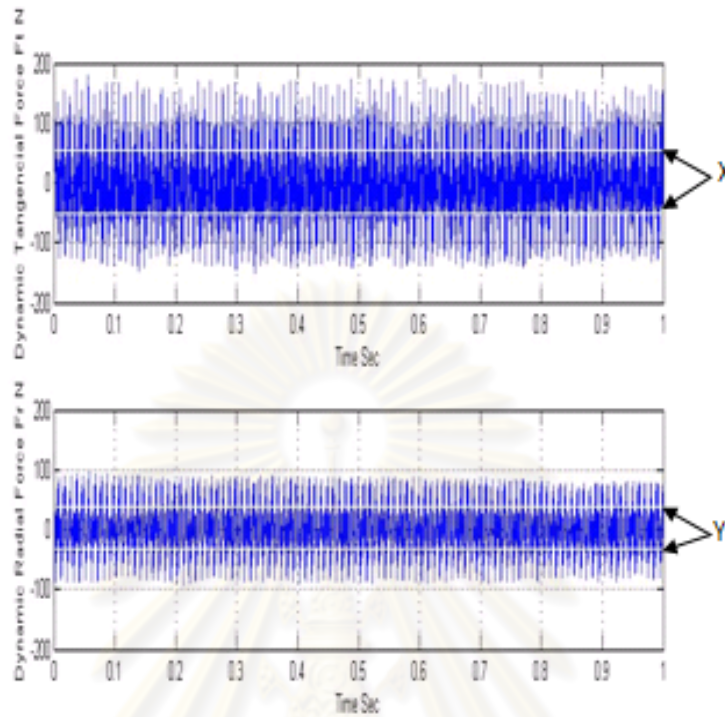
สำหรับการทดสอบสมรรถนะของระบบตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดแชนเตอร์ในกระบวนการนั้น ถูกทดสอบด้วยการทดลองการกักขังรูปด้วยดอกกัดเอ็นมิลล์พร้อมด้วยเงื่อนไขการกักขังรูปใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์ในการทดสอบสมรรถนะ คือ ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ AV1 ที่

ได้ทำการเสนอ รวมไปถึงตรวจสอบค่าอัตราส่วนวิกฤต C1 สำหรับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น (AV2 และ AV3) รวมไปถึงค่าอัตราส่วนวิกฤตตัวอื่น (C2 และ C3) นั้น แต่กระบวนการเกิดขึ้นรูปด้วยดอกเอ็นมิลล์ มีลักษณะที่แตกต่างจากการเกิดขึ้นรูปด้วยดอกกัดแบบหัวบอล เพราะกระบวนการกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ แรงตัดไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดขึ้นเฉพาะแรงในแนวสัมผัสและแรงในแนวรัศมีเท่านั้น เนื่องจากลักษณะของมีดกัดแบบเอ็นมิลล์นั้น มีลักษณะ Cutting edge เป็นเหลี่ยมซึ่งต่างจาก Cutting edge ของมีดกัดแบบหัวบอล ซึ่งมีลักษณะแบบโค้ง ทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 3 แกน แต่สำหรับแรงตัดที่เกิดขึ้นด้วยดอกแบบเอ็นมิลล์จะมีแรงตัดที่ส่งผลเพียง 2 แกน ดังรูปที่ 4.9 ทำให้ไม่สามารถทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ AV2 และ AV3 ได้ โดยแรงตัดไดนามิกส์ของกระบวนการกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะ Cutting edge ของมีดกัดแบบหัวบอล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



$$AV1 = \frac{X}{Y} \quad (4-1)$$

รูปที่ 4.10 แรงตัดไดนามิกที่เกิดขึ้นในการทดลองกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์

4.4.1 การจำแนกสภาวะการสั่นแบบแชนเตอร์และการสั่นแบบปรกติ

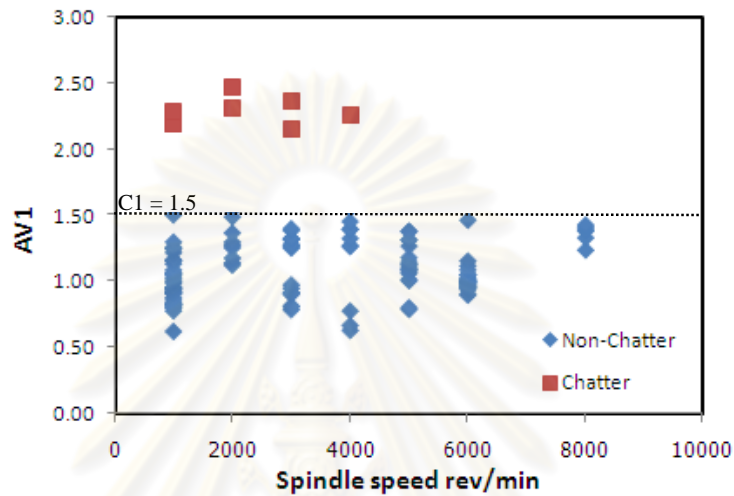
จากการทดลองเก็บข้อมูลด้วยดอกเอ็นมิลล์แบบ 2 คมตัด ด้วยมีเงื่อนไขการตัด

ดังนี้

ตารางที่ 4.1 : ตารางแสดงเงื่อนไขการตัดด้วยดอกเอ็นมิลล์

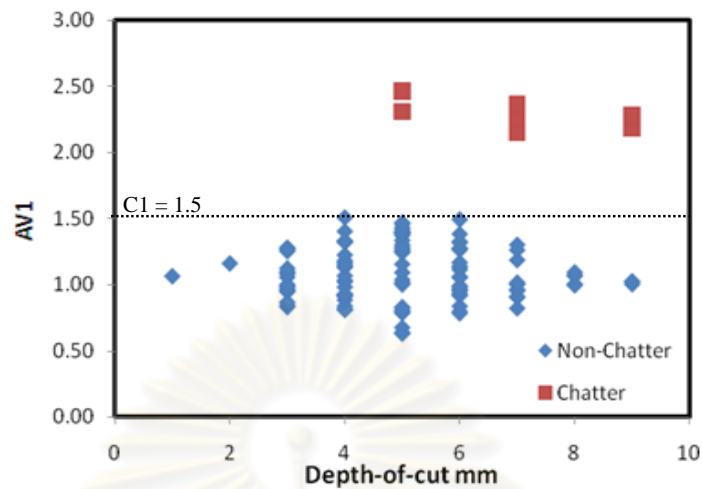
ชิ้นงาน	carbon steel (AISI 1050)
ลักษณะมีดกัด	Coated carbide end mill Diameter = 6, 8, 10, 12 mm
ความเร็วตัด, รอบ/นาที	5000, 7000, 9000, 11,000
ความลึกตัด, มิลลิเมตร	3, 4, 5, 6
อัตราป้อนตัด, มม./รอบ	0.02, 0.04, 0.06

ในการทดสอบนั้น จะนำเสนอผลที่ได้จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง AV1 กับ ความเร็วตัด ความสัมพันธ์ระหว่าง AV1 กับความลึกตัด และความสัมพันธ์ระหว่าง AV1 กับอัตราป้อนตัด เนื่องด้วยปัจจัยทั้ง 3 ค่านี้เป็นปัจจัยหลักในเงื่อนไขการตัดที่ส่งผลต่อการเกิด chatter ขึ้น ในระหว่างกระบวนการกัด ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.11 – 4.13



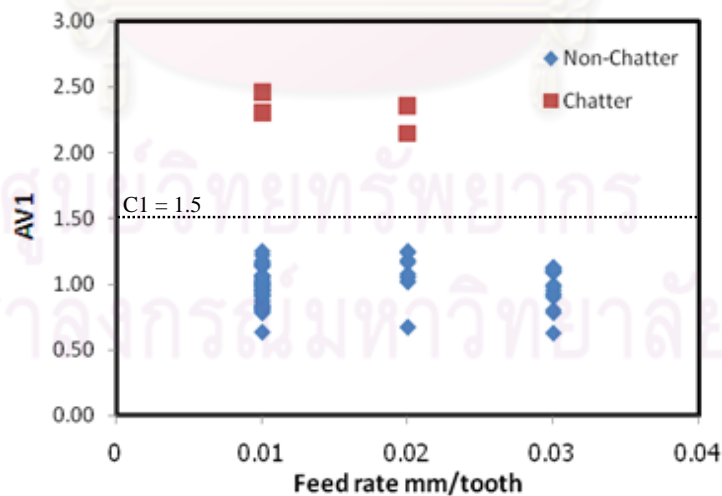
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AV1 กับความเร็วรอบตัด

จากรูปที่ 4.11 เห็นได้ว่า จุดสีเหลี่ยมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงนั้น หมายถึงกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่เกิดการสั่นแบบ chatter ขึ้น เนื่องจากจากค่าพารามิเตอร์ AV1 และค่าความเร็วตัด มีค่าสูงเกินกว่าค่าพารามิเตอร์ในเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ในการกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนวิกฤตที่ได้จากการพิจารณาจากการทดลองด้วยดอกกัดแบบหวับอล ($C1 = 1.5$) นั้นสามารถบ่งชี้ได้ว่า เงื่อนไขการตัดในสภาวะนั้นมี chatter เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการกัดด้วยดอกกัดแบบหวับอล



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AV1 กับความลึกตัด

จากรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่า จุดสีเหลี่ยมที่แสดงในพื้นที่อ้างอิงนั้น หมายถึงกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่เกิดการสั่นแบบ chatter ขึ้น เนื่องจากจากค่าพารามิเตอร์ AV1 และค่าความลึกตัด มีค่าสูงเกินกว่าค่าพารามิเตอร์ในเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ในการกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนวิกฤตที่ได้จากการพิจารณาจากการทดลองด้วยดอกกัดแบบหวับลด ($C1 = 1.5$) นั้นสามารถบ่งชี้ได้ว่า เงื่อนไขการตัดในสภาวะนั้นมี chatter เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการกัดด้วยดอกกัดแบบหวับลด



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ AV1 กับอัตราป้อนตัด

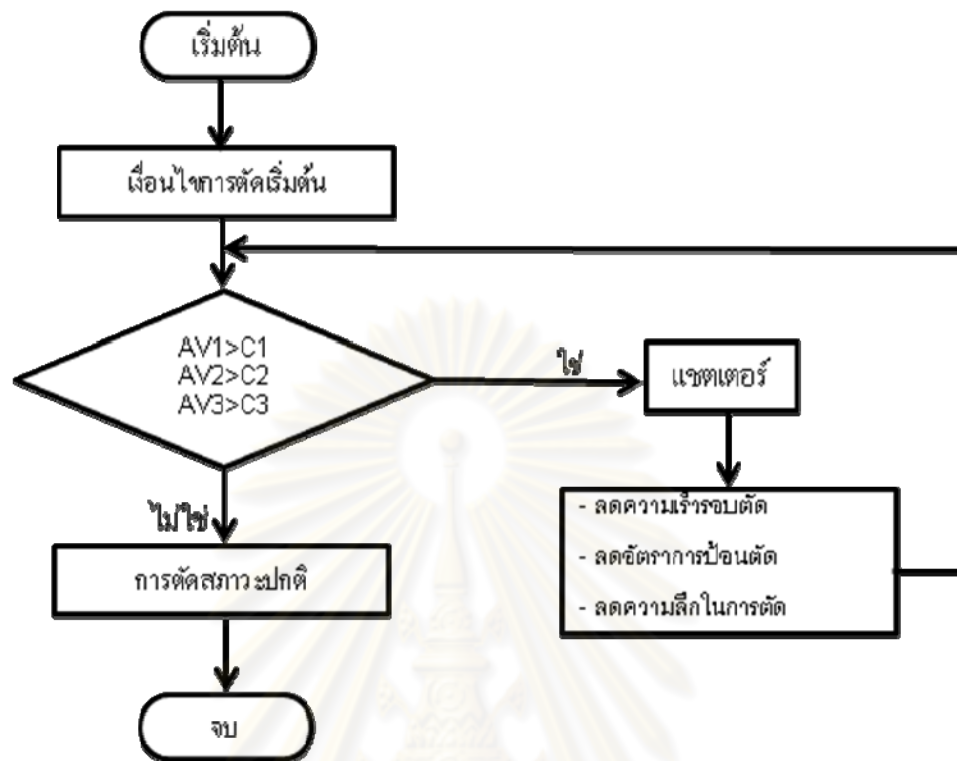
จากรูปที่ 4.13 เห็นได้ว่า จุดสี่เหลี่ยมที่แสดงในพื้นที่ข้างอิงนั้น หมายถึงกลุ่มของเงื่อนไขการตัดที่เกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น เนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ AV1 และอัตราป้อนตัดตัดมีค่าสูงเกินกว่าค่าพารามิเตอร์ในเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ในการกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนวิกฤตที่ได้จากการพิจารณาจากการทดลองด้วยดอกกัดแบบหัวบอล ($C1 = 1.5$) นั้นสามารถบ่งชี้ได้ว่า เงื่อนไขการตัดในสภาวะนั้นมีแชนเตอร์เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการกัดด้วยดอกกัดแบบหัวบอล

จากกราฟแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.13 สรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ AV1 และปัจจัยทั้ง 3 ค่า (ค่าความเร็วตัด ค่าความลึกตัดและอัตราป้อนตัด) ที่เกินค่าอัตราส่วนวิกฤต C1 สามารถบ่งชี้ถึงว่ามีแชนเตอร์เกิดขึ้นในกระบวนการที่เงื่อนไขการกัดนั้นได้ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่เกินไปนั้น คือแรงตัดไดนามิกที่สูงมากกว่าการกัดแบบปกตินั่นเอง

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้นำเสนอขึ้นจากการทดลองตัดด้วยดอกกัดแบบหัวบอล คือ AV1 , AV2 และ AV3 ตามลำดับ และค่าอัตราส่วนวิกฤตที่ได้พิจารณาค่าจากการทดลองด้วยดอกกัดขึ้นรูป คือ $C1 = 1.5$, $C2 = 1.3$ และ $C3 = 0.6$ ตามลำดับ สำหรับค่าอัตราส่วนวิกฤต $C1 = 1.5$ สามารถทำการตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดแชนเตอร์ทั้งในกระบวนการกัดด้วยดอกเอ็นมิลล์ได้เช่นเดียวกับกระบวนการกัดด้วยดอกกัดแบบหัวบอลได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงสภาวะเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

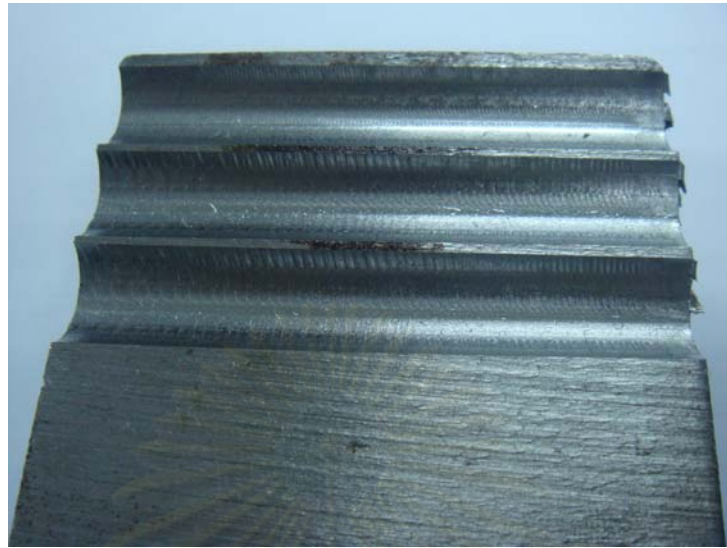
ทั้งนี้สามารถเสนออัลกอริทึมในการตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดแชนเตอร์ในระหว่างกระบวนการและวิธีในการหลีกเลี่ยงสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดแชนเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 แสดงอัลกอริทึมในการตรวจจับแฉกเตอร์และการหลีกเลี่ยงแฉกเตอร์ในกระบวนการกัดแบบหวับอล

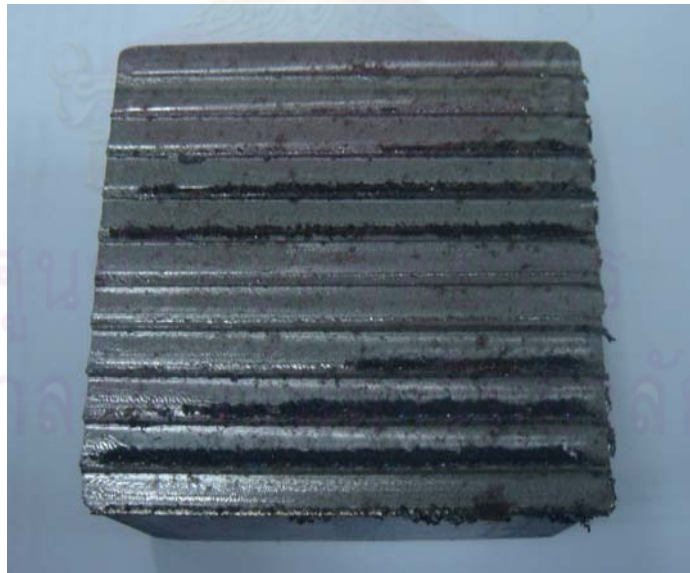
จากแผนภูมิข้างต้น แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการหลีกเลี่ยงเงื่อนไขการตัดที่ทำให้เกิดแฉกเตอร์ โดนแนวทางที่ได้เสนอนั้น เกิดขึ้นมาจากการปฏิบัติจริง โดยเงื่อนไขการตัดที่ทำให้เกิดแฉกเตอร์นั้น จะมีค่าความลึกตัด เริ่มต้นที่ 5 มิลลิเมตร เป็นต้นไป หมายความว่า ถ้าตัดด้วยเงื่อนไขความลึกตัดตั้งแต่ 5 มิลลิเมตรลงมานั้น จะไม่มีแฉกเตอร์เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด ในส่วนของอัตราป้อนตัดนั้น เงื่อนไขที่เกิดแฉกเตอร์อยู่ที่ 0.03 มิลลิเมตรต่อฟัน หมายความว่า เมื่อตัดด้วยเงื่อนไขอัตราป้อนตัดที่น้อยกว่า 0.03 มิลลิเมตรต่อฟันลงมา จะไม่มีแฉกเตอร์เกิดขึ้น และสำหรับค่าความเร็วตัดนั้น พบว่าแฉกเตอร์เกิดขึ้นได้ทุกค่าความเร็วตัด แต่ที่ส่งผลมากที่สุดคือ ค่าความเร็วตัดที่สูง ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดแฉกเตอร์ โดยจะเข้าเสริมให้เงื่อนไขการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดอื่น ทำให้แฉกเตอร์เกิดขึ้นได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่มีสเกลเตอร์เกิดขึ้น

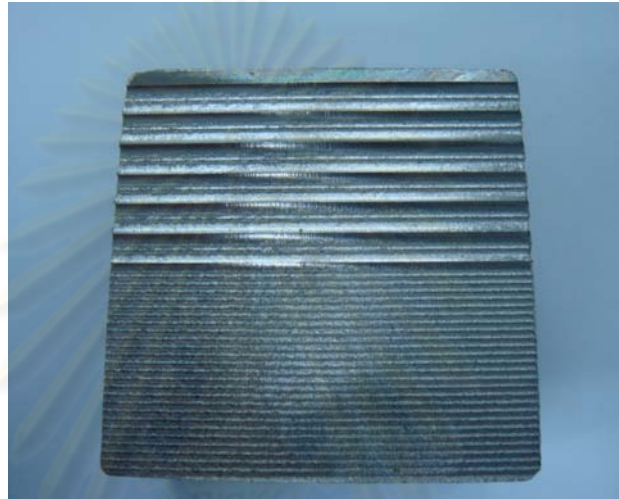
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า ลักษณะผิวของชิ้นงานมีรอยหยักหรือริ้วฟันปลาเกิดขึ้น ส่งผลต่อความเงางามของผิวชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานนี้เป็นชิ้นงานเสีย ไม่สามารถนำไปใช้งานได้

ตัวอย่างของการใช้เส้นใยการตัดที่สูงเกินความสามารถของเครื่องจักร ทำให้มีดกัดหลอม และมีเศษติดอยู่บนผิวของชิ้นงาน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่มีดกัดหลอมติดบนผิวของชิ้นงาน

เมื่อแซตเตอร์ได้เกิดขึ้นในกระบวนการ สิ่งที่ต้องทำ คือ การลดความเร็วตัด การลดความลึกในการตัดและการลดอัตราป้อนตัด โดยเงื่อนไขการตัดที่เสนอนั้น คือ ค่าความลึกตัดที่ 4 มิลลิเมตร อัตราป้อนตัดที่ 0.02 มิลลิเมตรต่อฟัน และ ค่าความเร็วตัดที่ 7000 รอบต่อนาที จึงสามารถหลีกเลี่ยงแซตเตอร์ไม่ให้เกิดขึ้นและยังสามารถรักษาอัตราผลิตภาพให้สูงด้วยเช่นกัน ตัวอย่างของชิ้นงานที่มีสภาพผิวที่เงางามและไม่เกิดแซตเตอร์ ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4 17 แสดงลักษณะของผิวชิ้นงานที่ไม่เกิดแซตเตอร์

สำหรับวิธีในการหลีกเลี่ยงและเงื่อนไขการตัดที่ได้เสนอนั้น มาจากการปฏิบัติการและเรียนรู้จริงในการทำการทดลองจริงบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบการตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ได้ถูกพัฒนาการตรวจจับและตรวจติดตามการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดขึ้นรูปด้วยดอกกัดแบบหัวบอลบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ได้เป็นอย่างดี ด้วยวิธีที่ได้นำเสนอ คือ การนำอัตราส่วนของค่าความแปรปรวนเฉลี่ย ทั้งนี้มีพารามิเตอร์ใหม่ 3 ค่า คือ AV1 , AV2 และ AV3 ซึ่งคำนวณมาจากการทำอัตราส่วนของค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของแรงตัดไดนามิกส์ในแนวแรงทั้ง 3 แรง คือ แรงในแนวสัมผัส แรงในแนวรัศมีและแรงในแนวแกน มาทำการพล็อตกราฟลงในพื้นที่อ้างอิง ทำให้พิจารณาเพื่อกำหนดค่าอัตราส่วนวิกฤตได้คือ $C1 = 1.5$, $C2 = 1.3$ และ $C3 = 0.6$ ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ (AV1, AV2 และ AV3) และค่าอัตราส่วนวิกฤต ($C1$, $C2$ และ $C3$) สามารถทำการจำแนกและระบุสถานะเงื่อนไขการตัดที่เกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ออกจากการสั่นแบบปกติได้เป็นอย่างดี รวมไปถึงสามารถประยุกต์ใช้ได้ในทุกเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้ด้วย

ทั้งนี้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม ด้วยสามารถหลีกเลี่ยงแชนเตอร์และสามารถคงอัตราผลิตภาพที่สูงได้นั้น คือ ค่าความลึกตัดที่ 4 มิลลิเมตร ค่าอัตราป้อนตัดที่ 0.02 มิลลิเมตรต่อฟัน และค่าความเร็วตัดที่ 7,000 รอบต่อนาทีและเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดแชนเตอร์ในกระบวนการ และขั้นตอนในการหลีกเลี่ยงแชนเตอร์ด้วยการลดความลึกตัด ลดอัตราป้อนตัดและลดค่าความเร็วตัดลง

วิธีที่ได้นำเสนอขึ้นนั้น ได้ทำการตรวจสอบและทดสอบความน่าเชื่อถือด้วยการนำไปทดลองตรวจจับและตรวจติดตามการเกิดแชนเตอร์ในกระบวนการกัดด้วยดอกอินซิลล์ ผลที่ได้คือวิธีที่นำเสนอขึ้นสามารถทำการตรวจจับแชนเตอร์ได้ดีเช่นเดียวกับกระบวนการกัดด้วยดอกกัดแบบหัวบอล ด้วยค่าพารามิเตอร์และค่าอัตราส่วนวิกฤตเดียวกัน สำหรับอัลกอริทึมใหม่ที่ได้นำเสนอขึ้นเพื่อตรวจจับและตรวจติดตามการสั่นแบบแชนเตอร์นั้น สามารถช่วยเพิ่มความเสถียรและความน่าเชื่อถือให้กับกระบวนการกัดด้วยดอกกัดแบบหัวบอลและดอกกัดอินซิลล์ โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

ข้อได้เปรียบของวิธีที่เสนอนั้น คือ สามารถทำการตรวจจับแชนเตอร์และบ่งชี้สภาวะเงื่อนไขการตัดได้อย่างรวดเร็วภายในระหว่างกระบวนการกัด ที่สำคัญสามารถทำการตรวจจับแชนเตอร์ได้ด้วยจำนวนข้อมูลที่น้อย เนื่องจากวิธีที่นำเสนอขึ้นนั้นถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขการตัดที่กว้างครอบคลุมเงื่อนไขการตัดและมีการทำซ้ำในทุกเงื่อนไขการตัดที่ทำการทดลอง

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

- 1.) การเลือกใช้สัดส่วนแรงตัดไดนามิกส์มาเป็นทำการศึกษา นั้น เนื่องจากแรงตัดไดนามิกส์มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวสำหรับการสั่นแบบแชนเตอร์ ยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการทดลองจะเปลี่ยนแปลงไป
- 2.) ช่วงความถี่ของการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงประมาณ 1,150 เฮิร์ตซ์ที่นำมาใช้ตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ในงานวิจัยนี้ เป็นช่วงความถี่ที่ขึ้นกับวัสดุของชิ้นงานและของมีดตัดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเมื่อเปลี่ยนวัสดุ อาจส่งผลให้ช่วงความถี่ของแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงได้
- 3.) เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นมาจากการทดลองและได้นำไปทดสอบจนเป็นที่ยอมรับได้ แต่สิ่งสำคัญคือ ทุกเงื่อนไขการตัดนั้น จะเป็นเฉพาะของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ แบบ 5 แกนจากประเทศญี่ปุ่นเท่านั้น ซึ่งถ้านำเงื่อนไขการตัดนี้ไปใช้กับเครื่องซีเอ็นซีจากประเทศอื่น เช่น จีน ไต้หวัน หรือ เยอรมัน เงื่อนไขการตัดนี้อาจเกิดการคลาดเคลื่อนได้
- 4.) เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยดอกกัดแบบหัวบอลและดอกกัดเอ็นมิลล์ชนิดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์เท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของมีดกัดหรือผิวเคลือบของมีดกัด จำเป็นต้องมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดใหม่ เนื่องจากชนิดของดอกกัดและการเคลือบผิวของดอกกัด จะมีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติ ทำให้สภาวะของการทำงานต่างกันออกไป ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อผลที่ต้องการศึกษา
- 5.) จากผลการทดลองที่ได้เห็นได้ว่า สัญญาณจากเซนเซอร์แรงตัดมีความน่าเชื่อถือสูงสุด เนื่องจากเซนเซอร์วัดแรงตัดซึ่งจะมีตำแหน่งที่มั่นคงที่สุดเพราะติดอยู่กับชิ้นงาน และเซนเซอร์วัดแรงตัดมีลักษณะเด่นและมีเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการตรวจจับตรวจติดตามการสั่นแบบแชนเตอร์ คือ เมื่อแชนเตอร์เกิดขึ้น จะส่งผลให้แรงตัดไดนามิกส์สูงขึ้นตาม

5.3 อุปสรรคในการวิจัย

- 1.) เนื่องจากดอกกัดและชิ้นงานที่ใช้ทดลองนั้นมีราคาต่อหน่วยสูงมาก ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองครบทุกประเภทของดอกกัดได้ ดังนั้นเงื่อนไขของการตัดที่เลือกมาในงานวิจัยนี้จึงเหมาะกับดอกกัดในตระกูลเอ็นมิลล์เท่านั้น

- 2.) ปัญหาของการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ มีผู้ใช้งานหลายคนทำให้เซนเซอร์ที่ใช้วัดในแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีการถอดออกและทำการติดตั้งใหม่ทุกครั้งที่จะทำการวัดสัญญาณ ส่งผลให้ตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในเครื่องในแต่ละครั้งอาจมีความแตกต่างกันเล็กน้อย อาจส่งผลทำให้สัญญาณที่ได้รับในแต่ละครั้งของการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนได้

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1.) แนวทางในการนำการวิจัยขั้นต่อไป ควรทดลองในการตัดวัสดุชิ้นงานอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น หรือทดลองเปลี่ยนวัสดุและประเภทของดอกกัด เพื่อให้ระบบการตรวจจับและตรวจติดตามการเกิด chatter ภายในกระบวนการกัดนั้นมีความครอบคลุม และใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น
- 2.) เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่ได้เสนอนั้น เกิดมาจากการทดลองตัดจริงด้วยเงื่อนไขการตัดที่กำหนดมาใช้บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่ง 5 แกน เท่านั้น ซึ่งเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อทำการตัดบนเครื่องตัดเครื่องอื่น
- 3.) ในงานวิจัยนี้มีการใช้เซนเซอร์ในการตรวจติดตามสถานะของการกัดเพียง 1 ชนิด ซึ่งทำให้ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบับผลของการตรวจจับของเซนเซอร์ชนิดอื่น จึงควรทำการทดลองเปรียบเทียบในครั้งต่อไป
- 4.) ในการแปลงฟูเรียร์ มีข้อเสียที่สำคัญ คือรายละเอียดข้อมูลแบบเวลาจะสูญเสียไป ทำให้เป็นไปไม่ได้ที่จะบอกว่าเมื่อไหร่ที่รายละเอียดของเหตุการณ์นั้นๆเกิดขึ้น ซึ่งการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้
- 5.) ในการวัดสัญญาณควรที่จะต้องมีการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น โดยการต่อสายดิน, การใช้ฉนวนห่อหุ้มสายสัญญาณ และการใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณความถี่ต่ำออก (High-pass filter)
- 6.) เนื่องจากเงื่อนไขการตัดเป็นการตัดแบบแห้ง ทำให้มีละอองของฝุ่นเหล็กกระจายไปทั่วพื้นที่ทำงาน ซึ่งละอองดังฝุ่นกล่าวเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นในการปฏิบัติงาน ควรมีการสวมหน้ากากทุกครั้งเพื่อป้องกันละอองของฝุ่นเหล็ก

รายการอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. เอกสารประกอบการสอนวิชา Advanced Manufacturing Engineering, 2008.
- [2] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, and T. Wakabayashi Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. CIRP Annals 53 (2008) : 511-537.
- [3] E.P. Degarmo, J.T. Black, and R.A. Kohser. Materials and Process in Manufacturing. 9th Edition.. USA : John Wiley& Sons, 2004.
- [4] Grzesik, W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. 1st Edition. Elsevier, 2006.
- [5] Groover, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition. USA : John Wiley & Sons, 2004.
- [6] Kalpakjian, S. and Schmid, S. Manufacturing Engineering and Technology. 5th Edition. Singapore : Pearson Prentice Hall, 2006.
- [7] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [8] Tlusty, G. Manufacturing Processes and Equipment. 1st Edition. USA : Prentice Hall, 2000.
- [9] 7-Leaders Corp. End mills, Drills, Reamers Solid Carbide Cutting Tools Catalog. 2007/2008.
- [10] Ostwald, P., and Munoz, J. Manufacturing Process and System. 9th Edition. USA : John Wiley& Son, 1997.
- [11] ดนุชา จันทะยานี. ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติคกับการสึกหรอของดอกสว่านในเหล็กกล้า SS400. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [12] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

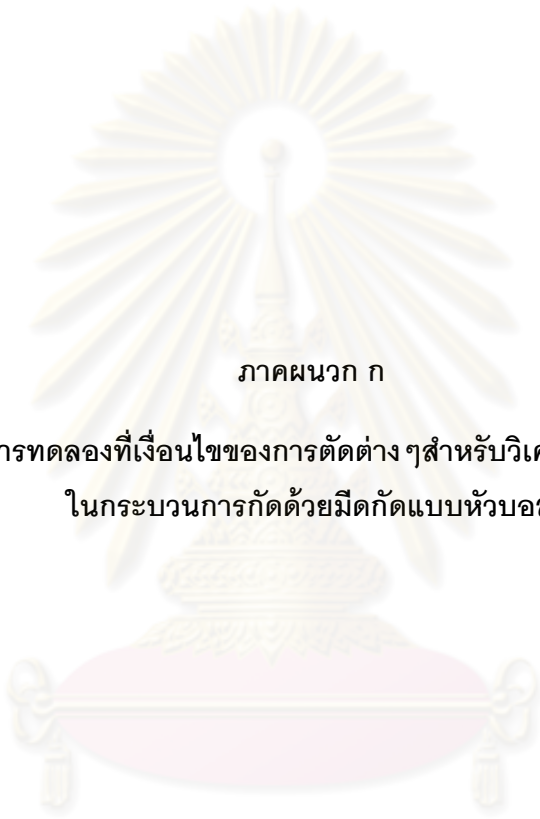
- [13] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป, 2545
- [14] Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork Pattern classification , Wiley & Sons, New York, 2001, ISBN 0-471-05669-3.
- [15] J. Schuermann, Pattern Classification: A Unified View of Statistical and Neural Approaches, Wiley & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-13534-8.
- [16] Sergios Theodoridis, Konstantinos Koutroumbas, Pattern Recognition ,Academic Press, CA, 1999.
- [17] S. Tangjitsitjaroen and T. Moriwaki. Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine. Journal of Manufacturing Processes (2008).
- [18] S. Tangjitsitjaroen. Development of Intelligent Identification of Cutting States by Spectrum Analysis for CNC turning. Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing, 2, 3, (2008) : 366-377.
- [19] R.Y. Chiou, S.Y. Liang. Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40 (2000) : 927-941.
- [20] E. Kuljanic, G. Yotis , and M. Sortino, Development of an intelligent multisensory chatter detection system in milling, Mechanical Systems and Signal Processing, 23, (2009), 1704-1718.
- [21] I. Bediaga , J. Munoa , J. Hernandez , L.N. Lopez de Lacalle ,An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed millin , International journal Tools & Manufacture , 49 , (2009), 384-394.
- [22] W.X. Tang , Q.H. Song , S.Q. Sun , B.B.Li , B.Du , X.Ai, Prediction of chatter stability in high-speed finishing end milling considering multi-made dynamic , Journal of Materials Processing Technology,209, (2009), 2585-2591.
- [23] Y. Altintas, Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling, Japan society of mechanical engineers, 44, 3, (2001), 717-723.

- [24] Y. Altintas & M. Weck., Chatter stability of metal cutting and grinding. Annals of the CIRP , 53, 2., (2004) : 619-642, ISSN:0007-8506.
- [25] T. Moriwaki, S. Tangjitsitjaroen, and T. Shibasaka. Development of intelligent monitoring and optimization of cutting process for CNC turning. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 9, 5, (June, 2006).
- [26] K. Uehara, Y. Kanda. Identification of chip formation mechanism through acoustic emission measurements. Annals of the CIRP , 33, (1984).
- [27] T. Moriwaki, Y. Mori. Sensor fusion for in-process identification of cutting process based on neural network approach. Proceeding of the IMACS/SICE International Symposium Robotics, Mechatronics and Manufacturing systems, (1992) : 245-250.
- [28] E. Govekar, J. Gradisek, I. Grabec. Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes. Ultrasonics, 38, (2000) : 598-603.
- [29] I. Inasaki. Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. Ultrasonics, 36, (1998).
- [30] T. Thepsonthi., M. Hamdi, and K. Mitsui. Investigation into Minimal-Cutting-Fluid Application in High-Speed Milling of Hardened Steel Using Carbide Mills. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49 (2009) : 156–162.
- [31] T. Moriwaki, T. Shibasaka, and S. Tangjitsitjaroen. “Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. JSME International Journal Series C, 47, 3, (2004).
- [32] B.L. Juneja, and G.S. Sekhon. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tool. 1st Edition. India : Wiley Eastern, (1987).
- [33] A.E. Hossein, K. Kadirgama, M. Hamdi, and K.Y. Benyunis. Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel. Journal of Material Processing Technology, 182 (2007) : 241–247.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆสำหรับวิเคราะห์การเกิดแซตเตอร์
ในกระบวนการกัด้วยมิดกัแบบหวับอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แซด เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
6_5000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
6_5000_4_0.01	ปกติ	37.64	11.75	65.37
6_5000_5_0.01	ปกติ	41.84	11.52	80.08
6_5000_6_0.01	ปกติ	46.82	10.35	94.29
6_5000_3_0.02	ปกติ	20.50	5.65	42.16
6_5000_4_0.02	ปกติ	24.83	8.10	51.03
6_5000_5_0.02	ปกติ	38.92	8.24	88.29
6_5000_6_0.02	ปกติ	39.75	4.80	139.50
6_5000_3_0.03	ปกติ	22.97	5.75	40.96
6_5000_4_0.03	ปกติ	25.73	4.78	46.76
6_5000_5_0.03	ปกติ	25.59	4.93	49.86
6_5000_6_0.03	แซดเตอร์	54.89	5.69	52.23
6_7000_3_0.01	ปกติ	29.33	7.30	33.01
6_7000_4_0.01	ปกติ	30.62	8.39	54.67
6_7000_5_0.01	ปกติ	31.28	9.50	58.48
6_7000_6_0.01	ปกติ	33.11	8.94	67.56
6_7000_3_0.02	ปกติ	34.50	7.28	57.20
6_7000_4_0.02	ปกติ	38.95	6.73	72.41
6_7000_5_0.02	แซดเตอร์	46.13	5.14	86.09
6_7000_6_0.02	แซดเตอร์	59.67	4.69	92.21
6_7000_3_0.03	ปกติ	35.95	7.23	50.50
6_7000_4_0.03	ปกติ	43.12	8.07	64.39
6_7000_5_0.03	แซดเตอร์	51.57	6.50	79.49
6_7000_6_0.03	มีดแตกหัก			
6_9000_3_0.01	ปกติ	51.57	6.50	79.49
6_9000_4_0.01	ปกติ	59.67	4.69	92.21
6_9000_5_0.01	ปกติ	68.89	5.69	99.41
6_9000_6_0.01	ปกติ	76.65	5.27	110.43

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาที / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แชต เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
6_9000_3_0.02	ปกติ	17.08	3.57	14.74
6_9000_4_0.02	ปกติ	24.61	6.55	41.73
6_9000_5_0.02	แชตเตอร์	30.33	8.42	57.68
6_9000_6_0.02	แชตเตอร์	45.94	8.79	80.19
6_9000_3_0.03	ปกติ	57.60	10.45	103.16
6_9000_4_0.03	ปกติ	63.70	8.20	125.79
6_9000_5_0.03	แชตเตอร์	76.23	9.40	147.13
6_9000_6_0.03	มีดแตกหัก			
6_11000_3_0.01	ปกติ	20.87	4.19	15.42
6_11000_4_0.01	ปกติ	26.50	6.49	33.85
6_11000_5_0.01	แชตเตอร์	45.94	7.87	61.67
6_11000_6_0.01	มีดแตกหัก			
6_11000_3_0.02	ปกติ	54.89	7.28	77.29
6_11000_4_0.02	ปกติ	60.38	9.80	85.57
6_11000_5_0.02	แชตเตอร์	65.74	10.68	93.65
6_11000_6_0.02	แชตเตอร์	71.23	11.94	103.11
6_11000_3_0.03	ปกติ	15.86	2.09	14.35
6_11000_4_0.03	ปกติ	25.49	2.56	35.14
6_11000_5_0.03	มีดแตกหัก			
6_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			
8_5000_3_0.01	ปกติ	15.07	4.49	39.73
8_5000_4_0.01	ปกติ	20.52	5.99	51.86
8_5000_5_0.01	ปกติ	28.01	5.27	86.85
8_5000_6_0.01	ปกติ	36.70	0.89	133.47
8_5000_3_0.02	ปกติ	52.25	6.52	103.69
8_5000_4_0.02	ปกติ	56.65	4.96	113.23
8_5000_5_0.02	ปกติ	52.34	4.71	110.09
8_5000_6_0.02	แชตเตอร์	56.09	2.62	116.08

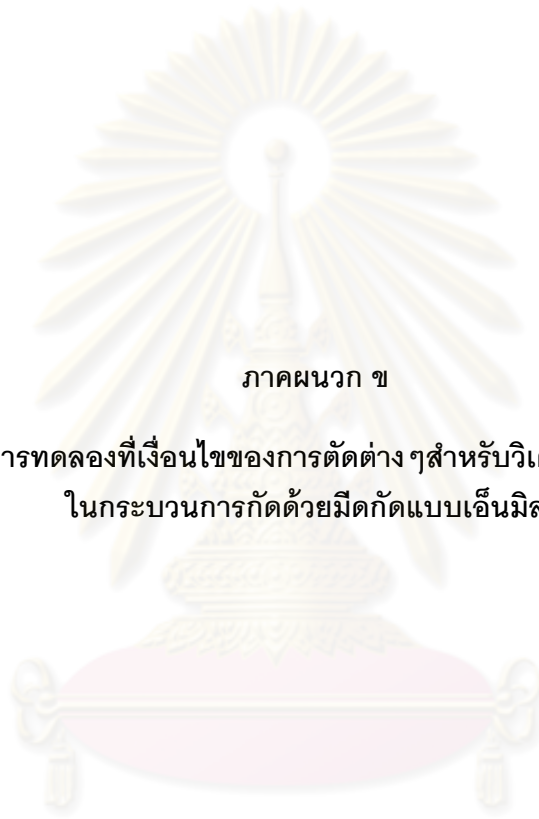
เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แชต เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
8_5000_3_0.03	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_5000_4_0.03	ปกติ	37.64	11.75	65.37
8_5000_5_0.03	แชตเตอร์	46.82	10.35	94.29
8_5000_6_0.03	มีดแตกหัก			
8_7000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_7000_4_0.01	ปกติ	37.64	11.75	65.37
8_7000_5_0.01	ปกติ	41.84	11.52	80.08
8_7000_6_0.01	ปกติ	46.82	10.35	94.29
8_7000_3_0.02	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_7000_4_0.02	ปกติ	37.64	11.75	65.37
8_7000_5_0.02	แชตเตอร์	41.84	11.52	80.08
8_7000_6_0.02	แชตเตอร์	46.82	10.35	94.29
8_7000_3_0.03	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_7000_4_0.03	ปกติ	37.64	11.75	65.37
8_7000_5_0.03	แชตเตอร์	46.82	11.52	80.08
8_7000_6_0.03	มีดแตกหัก			
8_9000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_9000_4_0.01	ปกติ	37.64	11.75	65.37
8_9000_5_0.01	ปกติ	41.84	11.52	80.08
8_9000_6_0.01	ปกติ	46.82	10.35	94.29
8_9000_3_0.02	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_9000_4_0.02	ปกติ	37.64	11.75	65.37
8_9000_5_0.02	แชตเตอร์	41.84	11.52	80.08
8_9000_6_0.02	แชตเตอร์	46.82	10.35	94.29
8_9000_3_0.03	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_9000_4_0.03	ปกติ	37.64	11.75	65.37
8_9000_5_0.03	มีดแตกหัก			
8_9000_6_0.03	มีดแตกหัก			

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาที / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แชต เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
8_11000_3_0.01	ปกติ	20.55	6.01	44.92
8_11000_4_0.01	ปกติ	23.18	5.64	50.99
8_11000_5_0.01	ปกติ	45.13	5.38	63.20
8_11000_6_0.01	แชตเตอร์	62.11	5.52	110.96
8_11000_3_0.02	ปกติ	19.53	3.37	16.26
8_11000_4_0.02	ปกติ	21.51	6.70	31.77
8_11000_5_0.02	ปกติ	26.80	3.59	30.62
8_11000_6_0.02	แชตเตอร์	45.13	7.56	48.92
8_11000_3_0.03	ปกติ	21.51	5.70	41.77
8_11000_4_0.03	ปกติ	22.65	7.49	53.67
8_11000_5_0.03	แชตเตอร์	30.41	10.25	74.66
8_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			
10_5000_3_0.01	ปกติ	31.74	6.06	26.23
10_5000_4_0.01	ปกติ	45.13	7.56	48.92
10_5000_5_0.01	ปกติ	31.32	5.57	38.24
10_5000_6_0.01	ปกติ	62.11	10.27	85.16
10_5000_3_0.02	ปกติ	31.32	5.57	38.24
10_5000_4_0.02	ปกติ	62.11	10.27	85.16
10_5000_5_0.02	แชตเตอร์	71.95	11.55	102.59
10_5000_6_0.02	แชตเตอร์	80.83	13.21	116.46
10_5000_3_0.03	ปกติ	25.37	5.54	45.06
10_5000_4_0.03	ปกติ	26.03	7.50	49.87
10_5000_5_0.03	แชตเตอร์	97.16	13.60	150.74
10_5000_6_0.03	แชตเตอร์	112.99	11.17	177.19
10_7000_3_0.01	ปกติ	24.37	6.54	49.06
10_7000_4_0.01	ปกติ	26.03	6.50	59.87
10_7000_5_0.01	ปกติ	49.53	6.00	91.47
10_7000_6_0.01	ปกติ	51.53	6.98	98.44

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟีน)	สถานะการกัด ปกติ / แชต เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
10_7000_3_0.02	ปกติ	32.11	6.08	62.48
10_7000_4_0.02	ปกติ	32.97	5.28	69.98
10_7000_5_0.02	ปกติ	40.26	6.28	90.62
10_7000_6_0.02	แชตเตอร์	80.83	13.21	116.46
10_7000_3_0.03	ปกติ	42.05	5.23	79.63
10_7000_4_0.03	ปกติ	45.24	5.21	87.83
10_7000_5_0.03	มีดแตกหัก			
10_7000_6_0.03	มีดแตกหัก			
10_9000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
10_9000_4_0.01	ปกติ	37.64	11.75	65.37
10_9000_5_0.01	ปกติ	41.84	11.52	80.08
10_9000_6_0.01	ปกติ	46.82	10.35	94.29
10_9000_3_0.02	ปกติ	41.65	17.18	24.65
10_9000_4_0.02	ปกติ	37.64	11.75	65.37
10_9000_5_0.02	ปกติ	41.84	11.52	80.08
10_9000_6_0.02	ปกติ	67.25	5.52	144.28
10_9000_3_0.03	ปกติ	49.53	6.00	98.44
10_9000_4_0.03	ปกติ	50.94	5.85	99.88
10_9000_5_0.03	แชตเตอร์	51.97	5.85	104.88
10_9000_6_0.03	มีดแตกหัก			
10_11000_3_0.01	ปกติ	20.49	1.09	53.92
10_11000_4_0.01	ปกติ	20.17	0.98	54.25
10_11000_5_0.01	ปกติ	22.74	0.91	64.18
10_11000_6_0.01	ปกติ	23.08	0.66	66.11
10_11000_3_0.02	ปกติ	26.39	0.76	75.86
10_11000_4_0.02	ปกติ	27.91	0.50	79.90
10_11000_5_0.02	แชตเตอร์	50.96	5.78	125.70
10_11000_6_0.02	แชตเตอร์	56.96	7.78	135.70

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แชต เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
10_11000_3_0.03	ปกติ	41.65	17.18	24.65
10_11000_4_0.03	ปกติ	46.82	10.35	94.29
10_11000_5_0.03	มีดแตกหัก			
10_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			
12_5000_3_0.01	ปกติ	27.91	0.50	79.90
12_5000_4_0.01	ปกติ	34.94	0.90	96.24
12_5000_5_0.01	ปกติ	48.96	2.78	125.70
12_5000_6_0.01	ปกติ	73.86	11.90	168.56
12_5000_3_0.02	ปกติ	32.37	3.67	55.37
12_5000_4_0.02	ปกติ	43.66	3.01	86.17
12_5000_5_0.02	ปกติ	50.93	1.52	107.18
12_5000_6_0.02	ปกติ	56.05	2.77	124.83
12_5000_3_0.03	ปกติ	56.05	2.77	124.83
12_5000_4_0.03	ปกติ	61.73	4.30	141.30
12_5000_5_0.03	แชตเตอร์	69.09	4.14	164.50
12_5000_6_0.03	แชตเตอร์	72.13	5.67	186.45
12_7000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
12_7000_4_0.01	ปกติ	37.64	11.75	65.37
12_7000_5_0.01	ปกติ	41.84	11.52	80.08
12_7000_6_0.01	ปกติ	46.82	10.35	94.29
12_7000_3_0.02	ปกติ	42.97	4.46	71.94
12_7000_4_0.02	ปกติ	53.84	5.30	98.53
12_7000_5_0.02	ปกติ	62.79	5.02	122.01
12_7000_6_0.02	ปกติ	70.52	5.48	143.41
12_7000_3_0.03	ปกติ	70.52	5.48	143.41
12_7000_4_0.03	ปกติ	76.15	6.23	161.54
12_7000_5_0.03	แชตเตอร์	85.64	7.54	181.91
12_7000_6_0.03	แชตเตอร์	93.00	7.77	204.32

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาที / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แชต เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
12_9000_3_0.01	ปกติ	41.15	10.18	21.65
12_9000_4_0.01	ปกติ	37.64	11.75	65.37
12_9000_5_0.01	ปกติ	41.84	11.52	80.08
12_9000_6_0.01	ปกติ	46.82	10.35	94.29
12_9000_3_0.02	ปกติ	41.65	17.18	24.65
12_9000_4_0.02	ปกติ	42.97	4.46	71.94
12_9000_5_0.02	แชตเตอร์	83.84	5.30	98.53
12_9000_6_0.02	แชตเตอร์	102.79	8.02	122.01
12_9000_3_0.03	ปกติ	41.65	17.18	24.65
12_9000_4_0.03	ปกติ	46.82	10.35	94.29
12_9000_5_0.03	มีดแตกหัก			
12_9000_6_0.03	มีดแตกหัก			
12_11000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
12_11000_4_0.01	ปกติ	44.64	11.75	65.37
12_11000_5_0.01	ปกติ	45.84	11.52	80.08
12_11000_6_0.01	ปกติ	46.82	10.35	94.29
12_11000_3_0.02	ปกติ	45.65	17.18	24.65
12_11000_4_0.02	ปกติ	49.64	11.75	65.37
12_11000_5_0.02	ปกติ	51.84	11.52	80.08
12_11000_6_0.02	แชตเตอร์	66.82	10.35	94.29
12_11000_3_0.03	ปกติ	61.65	17.18	24.65
12_11000_4_0.03	ปกติ	77.64	11.75	65.37
12_11000_5_0.03	แชตเตอร์	111.84	51.52	80.08
12_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			



ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆสำหรับวิเคราะห์การเกิดแซตเตอร์
ในกระบวนการกัดด้วยมีดกัดแบบเอ็นมิลล์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แชต เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
6_5000_3_0.01	ปกติ	26.168	28.401	5.227
6_5000_4_0.01	ปกติ	32.858	28.960	5.255
6_5000_5_0.01	ปกติ	33.709	29.004	5.289
6_5000_6_0.01	ปกติ	46.827	30.355	5.291
6_5000_3_0.02	ปกติ	24.517	25.970	4.083
6_5000_4_0.02	ปกติ	24.572	25.620	4.248
6_5000_5_0.02	ปกติ	51.931	33.390	9.086
6_5000_6_0.02	แชตเตอร์	54.897	45.805	9.505
6_5000_3_0.03	ปกติ	24.497	25.504	4.270
6_5000_4_0.03	ปกติ	26.480	24.865	5.426
6_5000_5_0.03	แชตเตอร์	65.794	28.492	10.930
6_5000_6_0.03	แชตเตอร์	72.398	35.798	14.957
6_7000_3_0.01	ปกติ	24.517	25.970	4.083
6_7000_4_0.01	ปกติ	28.326	27.478	5.463
6_7000_5_0.01	แชตเตอร์	64.837	52.248	19.248
6_7000_6_0.01	มีดแตกหัก			
6_7000_3_0.02	ปกติ	24.497	25.504	4.270
6_7000_4_0.02	ปกติ	32.858	28.960	5.255
6_7000_5_0.02	ปกติ	46.136	35.145	6.097
6_7000_6_0.02	แชตเตอร์	53.427	43.652	7.778
6_7000_3_0.03	ปกติ	35.954	37.235	50.501
6_7000_4_0.03	ปกติ	34.548	29.729	5.200
6_7000_5_0.03	แชตเตอร์	57.105	71.977	9.073
6_7000_6_0.03	แชตเตอร์	65.237	52.139	19.230
6_9000_3_0.01	ปกติ	51.574	26.505	4.492
6_9000_4_0.01	ปกติ	59.678	34.691	5.213
6_9000_5_0.01	แชตเตอร์	68.891	45.692	9.414
6_9000_6_0.01	แชตเตอร์	76.652	65.273	9.435

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
	ปกติ / แชต เตอร์	แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
6_9000_3_0.02	ปกติ	43.585	44.566	3.580
6_9000_4_0.02	ปกติ	56.032	43.856	9.830
6_9000_5_0.02	ปกติ	74.850	94.650	8.840
6_9000_6_0.02	แชตเตอร์	95.455	104.031	14.243
6_9000_3_0.03	ปกติ	57.60	10.45	103.16
6_9000_4_0.03	ปกติ	62.862	41.721	10.334
6_9000_5_0.03	แชตเตอร์	74.913	93.364	8.772
6_9000_6_0.03	มีดแตกหัก			
6_11000_3_0.01	ปกติ	20.87	4.19	15.42
6_11000_4_0.01	ปกติ	26.50	6.49	33.85
6_11000_5_0.01	ปกติ	36.75	6.87	48.05
6_11000_6_0.01	แชตเตอร์	95.673	104.394	14.144
6_11000_3_0.02	ปกติ	54.89	7.28	77.29
6_11000_4_0.02	ปกติ	60.38	9.80	85.57
6_11000_5_0.02	ปกติ	65.74	10.68	93.65
6_11000_6_0.02	ปกติ	71.23	11.94	103.11
6_11000_3_0.03	ปกติ	55.686	43.788	10.232
6_11000_4_0.03	ปกติ	60.436	61.773	29.118
6_11000_5_0.03	แชตเตอร์	77.279	58.688	38.125
6_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			
8_5000_3_0.01	ปกติ	59.286	56.254	43.117
8_5000_4_0.01	ปกติ	63.040	64.075	47.457
8_5000_5_0.01	ปกติ	74.913	83.354	38.762
8_5000_6_0.01	ปกติ	84.937	93.364	48.772
8_5000_3_0.02	ปกติ	52.25	6.52	103.69
8_5000_4_0.02	ปกติ	56.65	4.96	113.23
8_5000_5_0.02	ปกติ	63.040	64.075	47.457
8_5000_6_0.02	แชตเตอร์	79.642	58.093	27.343


เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาที่ / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด ปกติ / แชนด เตอร์	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
		แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
8_5000_3_0.03	ปกติ	48.107	54.642	30.603
8_5000_4_0.03	ปกติ	53.575	48.200	25.771
8_5000_5_0.03	แชนดเตอร์	83.916	56.356	29.435
8_5000_6_0.03	มีดแตกหัก			
8_7000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_7000_4_0.01	ปกติ	53.118	53.197	26.419
8_7000_5_0.01	ปกติ	60.436	61.773	29.118
8_7000_6_0.01	ปกติ	73.916	46.356	10.435
8_7000_3_0.02	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_7000_4_0.02	ปกติ	53.575	48.200	25.771
8_7000_5_0.02	แชนดเตอร์	63.040	64.075	47.457
8_7000_6_0.02	แชนดเตอร์	79.972	65.416	9.649
8_7000_3_0.03	ปกติ	53.040	54.075	40.251
8_7000_4_0.03	ปกติ	63.040	64.575	47.457
8_7000_5_0.03	ปกติ	86.047	53.757	29.785
8_7000_6_0.03	มีดแตกหัก			
8_9000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_9000_4_0.01	ปกติ	59.696	59.800	49.207
8_9000_5_0.01	ปกติ	67.279	48.688	18.125
8_9000_6_0.01	ปกติ	77.906	71.520	3.384
8_9000_3_0.02	ปกติ	41.65	17.18	24.65
8_9000_4_0.02	ปกติ	60.696	59.800	49.217
8_9000_5_0.02	ปกติ	69.379	48.683	18.145
8_9000_6_0.02	แชนดเตอร์	79.406	71.525	3.324
8_9000_3_0.03	ปกติ	49.188	48.678	28.683
8_9000_4_0.03	ปกติ	59.696	59.800	49.207
8_9000_5_0.03	แชนดเตอร์	79.642	58.093	27.343
8_9000_6_0.03	แชนดเตอร์	86.047	53.757	29.785

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
	ปกติ / แชนด์ เตอร์	แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
8_11000_3_0.01	ปกติ	30.55	46.01	44.92
8_11000_4_0.01	ปกติ	53.18	55.64	50.99
8_11000_5_0.01	ปกติ	73.563	63.822	3.195
8_11000_6_0.01	ปกติ	86.047	53.757	29.785
8_11000_3_0.02	ปกติ	59.53	33.37	36.26
8_11000_4_0.02	ปกติ	63.040	64.075	47.457
8_11000_5_0.02	แชนด์เตอร์	76.087	43.257	39.755
8_11000_6_0.02	แชนด์เตอร์	89.447	58.257	49.715
8_11000_3_0.03	ปกติ	74.913	93.364	8.772
8_11000_4_0.03	ปกติ	86.047	53.757	29.785
8_11000_5_0.03	แชนด์เตอร์	101.574	63.711	8.345
8_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			
10_5000_3_0.01	ปกติ	31.74	6.06	26.23
10_5000_4_0.01	ปกติ	45.13	7.56	48.92
10_5000_5_0.01	ปกติ	31.32	5.57	38.24
10_5000_6_0.01	ปกติ	62.11	10.27	85.16
10_5000_3_0.02	ปกติ	41.325	5.572	38.254
10_5000_4_0.02	ปกติ	62.118	10.257	85.176
10_5000_5_0.02	แชนด์เตอร์	80.893	13.211	96.456
10_5000_6_0.02	แชนด์เตอร์	88.287	52.184	92.656
10_5000_3_0.03	ปกติ	71.95	11.55	102.59
10_5000_4_0.03	ปกติ	80.83	13.21	116.46
10_5000_5_0.03	แชนด์เตอร์	97.16	13.60	150.74
10_5000_6_0.03	มีดแตกหัก			
10_7000_3_0.01	ปกติ	24.37	6.54	49.06
10_7000_4_0.01	ปกติ	46.035	8.502	59.871
10_7000_5_0.01	ปกติ	96.047	53.757	29.785
10_7000_6_0.01	แชนด์เตอร์	112.99	11.17	177.19

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
	ปกติ / แชต เตอร์	แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
10_7000_3_0.02	ปกติ	32.11	6.08	62.48
10_7000_4_0.02	ปกติ	52.937	18.28	69.981
10_7000_5_0.02	ปกติ	73.563	63.822	3.195
10_7000_6_0.02	แชตเตอร์	103.976	71.359	7.859
10_7000_3_0.03	ปกติ	42.05	5.23	8.63
10_7000_4_0.03	ปกติ	75.249	25.217	7.853
10_7000_5_0.03	ปกติ	101.574	63.711	8.345
10_7000_6_0.03	มีดแตกหัก			
10_9000_3_0.01	ปกติ	41.65	17.18	24.65
10_9000_4_0.01	ปกติ	57.614	19.795	25.377
10_9000_5_0.01	ปกติ	63.040	64.075	47.457
10_9000_6_0.01	ปกติ	71.794	55.150	26.574
10_9000_3_0.02	ปกติ	41.625	17.18	24.65
10_9000_4_0.02	ปกติ	37.642	11.75	25.37
10_9000_5_0.02	ปกติ	41.824	11.52	27.08
10_9000_6_0.02	ปกติ	46.822	12.35	28.29
10_9000_3_0.03	ปกติ	53.118	53.197	26.419
10_9000_4_0.03	ปกติ	63.040	64.075	47.457
10_9000_5_0.03	ปกติ	71.794	55.150	26.574
10_9000_6_0.03	แชตเตอร์	86.047	53.757	29.785
10_11000_3_0.01	ปกติ	30.449	23.049	53.925
10_11000_4_0.01	ปกติ	40.157	31.928	54.235
10_11000_5_0.01	ปกติ	76.492	71.962	12.216
10_11000_6_0.01	ปกติ	87.067	57.707	29.705
10_11000_3_0.02	ปกติ	26.39	0.76	75.86
10_11000_4_0.02	ปกติ	27.91	0.50	79.90
10_11000_5_0.02	แชตเตอร์	79.642	58.093	77.343
10_11000_6_0.02	แชตเตอร์	89.621	76.959	73.869

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
	ปกติ / แชต เตอร์	แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
10_11000_3_0.03	ปกติ	71.685	57.128	24.635
10_11000_4_0.03	ปกติ	97.624	71.745	25.327
10_11000_5_0.03	แชตเตอร์	167.187	174.369	26.987
10_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			
12_5000_3_0.01	ปกติ	37.921	20.504	29.905
12_5000_4_0.01	ปกติ	54.942	25.904	26.224
12_5000_5_0.01	ปกติ	68.926	29.748	15.70
12_5000_6_0.01	ปกติ	73.862	31.940	18.56
12_5000_3_0.02	ปกติ	49.188	48.678	28.683
12_5000_4_0.02	ปกติ	71.794	55.150	26.574
12_5000_5_0.02	แชตเตอร์	80.913	61.527	37.182
12_5000_6_0.02	แชตเตอร์	96.052	72.727	24.835
12_5000_3_0.03	ปกติ	56.05	2.77	14.83
12_5000_4_0.03	ปกติ	61.73	4.30	11.30
12_5000_5_0.03	ปกติ	69.09	4.14	14.50
12_5000_6_0.03	ปกติ	72.13	5.67	16.45
12_7000_3_0.01	ปกติ	41.65	27.128	4.652
12_7000_4_0.01	ปกติ	67.624	41.725	5.372
12_7000_5_0.01	ปกติ	86.047	53.757	9.785
12_7000_6_0.01	ปกติ	93.976	71.359	7.859
12_7000_3_0.02	ปกติ	58.800	64.616	32.357
12_7000_4_0.02	ปกติ	71.794	55.150	26.574
12_7000_5_0.02	ปกติ	82.729	55.022	12.01
12_7000_6_0.02	แชตเตอร์	103.976	71.459	17.359
12_7000_3_0.03	ปกติ	80.522	55.428	23.411
12_7000_4_0.03	ปกติ	96.125	66.263	21.54
12_7000_5_0.03	แชตเตอร์	115.565	177.274	26.083
12_7000_6_0.03	มีดแตกหัก			

เงื่อนไขการตัด (ม.ม./ รอบ/นาทื / มม. / มม./ ฟัน)	สถานะการกัด	แรงตัดไดนามิกส์แปรปรวนเฉลี่ย		
	ปกติ / แชต เตอร์	แรงสัมผัส	แรงรัศมี	แรงแนวแกน
12_9000_3_0.01	ปกติ	59.286	56.254	3.117
12_9000_4_0.01	ปกติ	63.563	63.822	3.195
12_9000_5_0.01	ปกติ	71.794	55.150	3.574
12_9000_6_0.01	ปกติ	76.492	71.962	3.216
12_9000_3_0.02	ปกติ	63.040	64.075	4.457
12_9000_4_0.02	ปกติ	79.642	58.093	4.343
12_9000_5_0.02	แชตเตอร์	95.455	104.031	4.243
12_9000_6_0.02	แชตเตอร์	103.041	112.453	5.120
12_9000_3_0.03	ปกติ	71.625	97.128	4.65
12_9000_4_0.03	ปกติ	95.673	84.394	5.144
12_9000_5_0.03	ปกติ	147.822	102.077	8.108
12_9000_6_0.03	มีดแตกหัก			
12_11000_3_0.01	ปกติ	67.279	48.688	2.653
12_11000_4_0.01	ปกติ	76.492	71.962	2.773
12_11000_5_0.01	ปกติ	82.224	82.127	2.585
12_11000_6_0.01	ปกติ	95.455	104.031	2.743
12_11000_3_0.02	ปกติ	79.642	58.093	2.343
12_11000_4_0.02	ปกติ	87.287	82.184	2.656
12_11000_5_0.02	แชตเตอร์	99.642	88.093	2.343
12_11000_6_0.02	แชตเตอร์	101.574	63.711	3.345
12_11000_3_0.03	ปกติ	79.972	65.416	4.65
12_11000_4_0.03	ปกติ	95.673	104.394	6.37
12_11000_5_0.03	แชตเตอร์	117.187	104.369	6.987
12_11000_6_0.03	มีดแตกหัก			



ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด

```

clear;

samp=10000;           %Sampling Frequency

fname = 'TB1';       % 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 เป็นจำนวน
คอลัมน์

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

f=(0:N-1)/N*samp;
freq=f(1:N/2);     %Using plot graph __ frequency domain

FX=fft(data(:,1))/(N*2); % column 1 _ take FFT of Tangential Force
absFX=abs(FX(1:N/2));
PabsFX=absFX.^2;

FY=fft(data(:,2))/(N*2); % column 2 _ take FFT of Radial Force
absFY=abs(FY(1:N/2));
PabsFY=absFY.^2;

```

```

FZ=fft(data(:,3))/(N*2);      % column 3 _ take FFT of Axial Force
absFZ=abs(FZ(1:N/2));
PabsFZ=absFZ.^2;

%SS=fft(data(:,4))/(N*2);      % column 4 _ take FFT of Sound
%absSS=abs(SS(1:N/2));
%PabsSS=absSS.^2;

%AC=fft(data(:,5))/(N*2);      % column 5 _ take FFT of Accelerometer
%absAC=abs(AC(1:N/2));
%PabsAC=absAC.^2;

%Channel 1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Time domain
Graph%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1);
subplot(3,1,1);plot(tt,data(:,1));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Tangential Force N');
subplot(3,1,2);plot(tt,data(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Radial force N');
subplot(3,1,3);plot(tt,data(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Axial force N');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Frequency domain
Graph%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(11);
subplot(3,1,1);plot(freq,PabsFX);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Tangential force N^2');
subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Radial force N^2');
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Axial force N^2');
%figure(111);
%plot(f,FX);grid;zoom on

```

```

%Channel 2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Time domain
Graph%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%figure(2);
%plot(tt,data(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Radial force N');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Frequency domain
Graph%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%figure(22);
%plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('Power spectrum
density of Radial force N^2');

%figure(222);
%plot(f,FY);grid;zoom on

%Channel 3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Time domain
Graph%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%figure(3);
%plot(tt,data(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Axial force N');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Frequency domain
Graph%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%figure(33);
%plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('Power spectrum
density of Axial force N^2');

%figure(333);
%plot(f,FZ);grid;zoom on

```



ภาคผนวก ง

โปรแกรมสำหรับการหาค่าความแปรปรวนเฉลี่ย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมที่ใช้คำนวณหาค่าความแปรปรวนเฉลี่ย

```

clear;

samp=10000;           %Sampling Frequency

fname = 'ISE144';     % 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=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));      %Using plot graph __ time domain

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

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

CumUpper1=0;         %สำหรับเก็บค่าสัญญาณที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย
CumUpper2=0;
CumUpper3=0;

NoUp1=0;             %สำหรับเก็บจำนวนสัญญาณที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย

```

```

NoUp2=0;
NoUp3=0;

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

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

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

    if Data2(i)>= Avg2    %ข้อมูลคอลัมน์ที่ 2
        CumUpper2=CumUpper2+Data2(i); %เก็บค่าที่มากกว่าค่าเฉลี่ย
        NoUp2=NoUp2+1;
    else
        CumLower2=CumLower2+Data2(i); %เก็บค่าที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ย
        NoLow2=NoLow2+1;
    end
    %#####

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

```

```

    NoUp3=NoUp3+1;

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

#####

end

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

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

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

#####

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

Amplitude=Amp %เก็บผลของค่าที่ได้ทั้ง 3 แขนงของแรงตัด

% จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
#####
#####
%ใช้สำหรับ plot กราฟของขนาดแอมพลิจูดทางแกน x
AA=max(tt);
qq(1)=0;
qq(2)=AA;

```

```

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

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

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

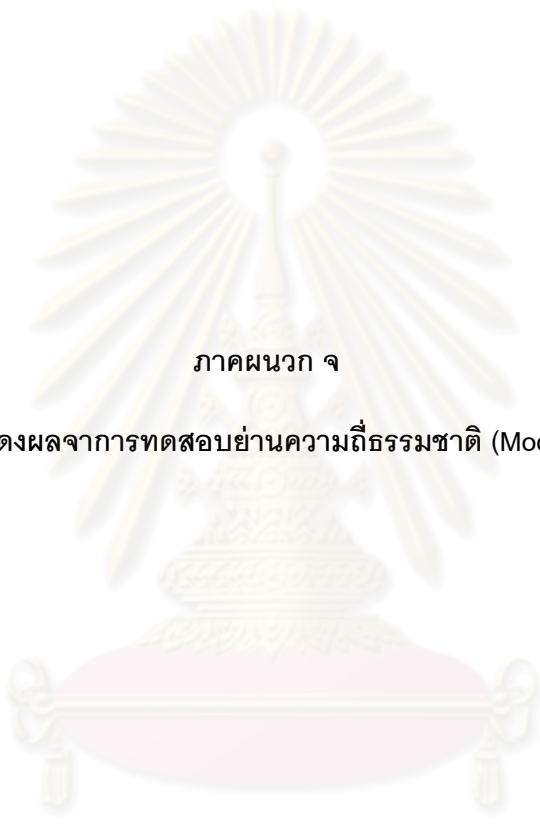
figure(2);          %Time domain Graph

subplot(3,1,1);plot(tt,data(:,1),qq,AvgU1,'r',qq,AvgL1,'r');grid;zoom on ;
xlabel('Time Sec');ylabel('Dynamic Tangential Force Ft N');
%legend('Ft');

subplot(3,1,2);plot(tt,data(:,2),qq,AvgU2,'r',qq,AvgL2,'r');grid;zoom on ;
xlabel('Time Sec');ylabel('Dynamic Radial Force Fr N');
%legend('Fr');

subplot(3,1,3);plot(tt,data(:,3),qq,AvgU3,'r',qq,AvgL3,'r');grid;zoom on ;
xlabel('Time Sec');ylabel('Dynamic Axial Force Fa Ne');
%legend('Fa');

```

ภาคผนวก จ

กราฟแสดงผลจากการทดสอบย่านความถี่ธรรมชาติ (Modal Test)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนภาพแสดงสัญญาณความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบ Modal test

1. ความถี่ธรรมชาติของไดนาโมมิเตอร์ แบบ 3 แกน รุ่น 9257B เท่ากับ 2,300 เฮิรต (ข้อมูลได้จากคู่มือแนะนำการใช้จากทางบริษัท Kistler)
2. ความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานที่ยึดกับปากกาและแท่นเซนเซอร์วัดแรง เท่ากับ 790 เฮิรต โดยในการตรวจหาสัญญาณความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานที่ยึดกับปากกาและแท่นเซนเซอร์วัดแรงนั้น มีขั้นตอน ดังนี้
 - 2.1 จัดวางชิ้นงานที่ยึดกับปากกาและแท่นเซนเซอร์วัดแรง ดังรูปที่

จ-1



รูปที่ จ-1 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ยึดกับปากกาและเซนเซอร์วัดแรง

2.2 จะใช้ค้อนหรือ Hammer รุ่น Model 2302-5 ของบริษัท Meggitt

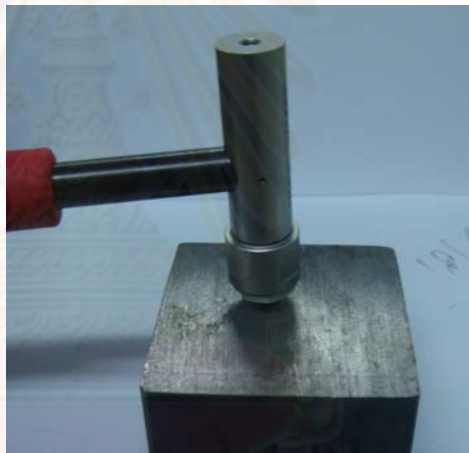
Endevco ซึ่งลักษณะของค้อน แสดงในรูปที่ จ-2

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ-2 แสดงลักษณะของค้อนที่ใช้ในการทดสอบ

2.3 ทำการเคาะค้อนลงบนชิ้นงานและทำการเก็บบันทึกแรงที่เกิดขึ้น

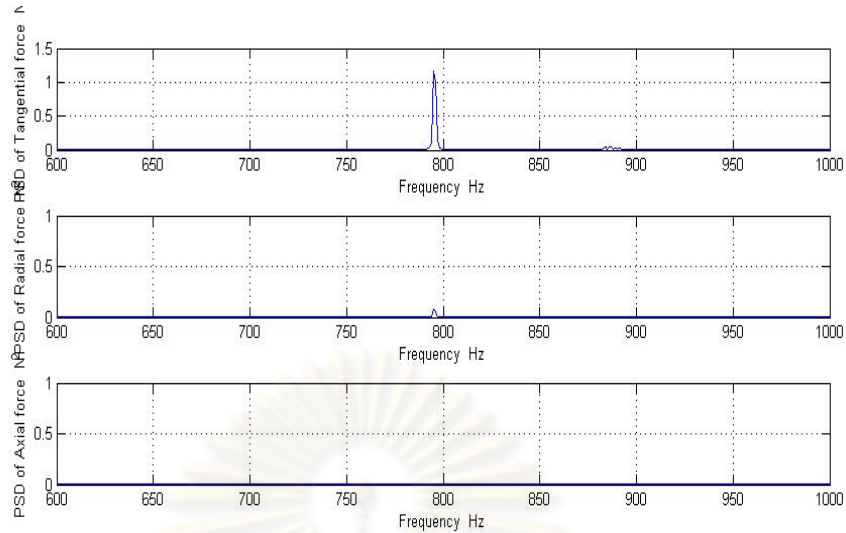


รูปที่ จ-3 แสดงลักษณะการเคาะของค้อนลงบนชิ้นงาน

2.4 นำข้อมูลที่บันทึกได้ มาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์แบบการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ผลที่ได้แสดงดังรูป

ที่ จ-4

ศูนย์วิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑-4 แสดงความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการแปลงสัญญาณ

3. ความถี่ธรรมชาติของเพลลาหมุนตัดและอุปกรณ์ยึดจับมีดตัด เท่ากับ 1,060 เฮิรต์ โดยขั้นตอนในการตรวจหาความถี่ธรรมชาตินั้น มีขั้นตอนดังนี้

- 3.1 นำ Accelerometer รุ่น 27A11 ค่า Sensitivity เท่ากับ 9.899 mV/g ของบริษัท Meggitt Endevco ดังแสดงในรูปที่ ๑-5



รูปที่ ๑-5 แสดงลักษณะของ Accelerometer ส่วนหัวของเซนเซอร์

- 3.2 นำ Accelerometer ไปติดกับเพลลาหมุนของเครื่อง (Spindle)



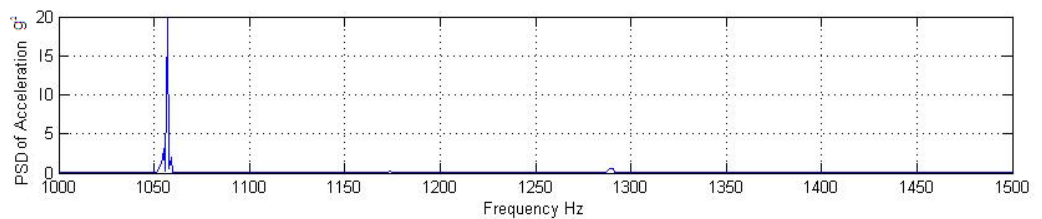
รูปที่ ๑-6 แสดงตำแหน่งของ Accelerometer ที่ติดกับเพลลาหมุน

3.3 นำค้อนไปเคาะบริเวณเพลลาหมุนและทำการบันทึกสัญญาณ



รูปที่ ๑-7 แสดงลักษณะการเคาะบนเพลลาหมุน

3.4 ทำการแปลงสัญญาณที่บันทึกได้ด้วยการวิเคราะห์การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ ๑-8



รูปที่ ๑-8 แสดงความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการแปลงสัญญาณ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณรงค์ศักดิ์ พงศธรวิวัฒน์ เกิดวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จ การศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย