

การเฝ้าสังเกตสถานะการตัดเหล็กกล้าบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยใช้เซนเซอร์ร่วมกัน



นายชัยวัฒน์ ภูษณพากร

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

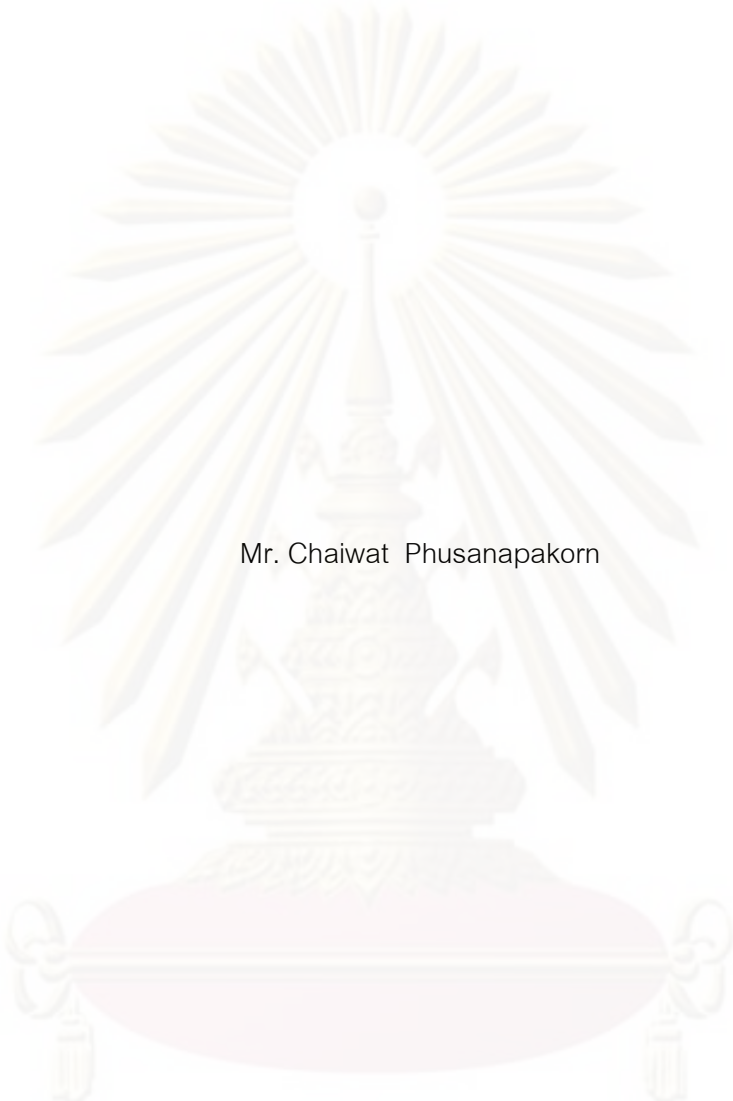
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MONITORING OF MILD STEEL CUTTING STATES ON CNC TURNING MACHINE
UTILIZING SENSOR FUSION



Mr. Chaiwat Phusanapakorn

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

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเฝ้าสังเกตสถานะการตัดเหล็กกล้าบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

โดยใช้เซนเซอร์ร่วมกัน

โดย

นายชัยวัฒน์ ภูษณพากร

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

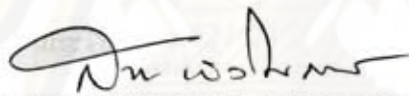
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

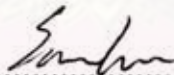


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

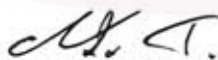
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



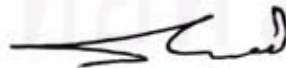
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ)



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



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคิก)

ชัชววัฒน์ ภูษณพากร : การเฝ้าสังเกตสถานะการตัดเหล็กกล้าบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยใช้เซนเซอร์ร่วมกัน. (MONITORING OF MILD STEEL CUTTING STATES ON CNC TURNING MACHINE UTILIZING SENSOR FUSION) อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ, 186 หน้า.

เครื่องจักรกลอัจฉริยะจะมีความสำคัญมากขึ้น ดังนั้นระบบการตรวจติดตามจึงมีความจำเป็นสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตในระหว่างการตัด จึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ซึ่งก็คือการพัฒนากระบวนการตรวจติดตามการสึกหรอของมีดกลึงและสถานะการตัดของเศษ โลหะและการสั่นแบบแฉดเตอร์ที่เกิดขึ้นของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) โดยการใช้เซนเซอร์ร่วมกัน ได้แก่ เซนเซอร์แรงตัด, เซนเซอร์วัดความเร่ง, เซนเซอร์เสียง และเซนเซอร์อะคูสติก อิมิตชัน ในการทดลองจะเป็นการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและไม่มีการทำซ้ำในแต่ละการทดลอง เพื่อที่จะได้ข้อมูลของสัญญาณจากทุกเซนเซอร์ ต่อมาแต่ละสัญญาณจะถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งในโดเมนความถี่โดยวิธีการประมวลผลสัญญาณที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว และใน โดเมนเวลา เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นกับการสึกหรอของมีดกลึง, การแตกหักของเศษ โลหะ และการเกิดการสั่นแบบแฉดเตอร์ ซึ่งสัญญาณที่ได้ทำการวิเคราะห์จากแต่ละเซนเซอร์จะถูกประมวลผลผ่าน โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ, โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน และ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ เพื่อพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกลึง และตรวจจับสถานะของการตัดว่าเป็นเศษ โลหะแบบต่อเนื่อง, แบบแตกหัก หรือเกิดการสั่นแบบแฉดเตอร์ขึ้นในกระบวนการกลึง

ผลลัพธ์ที่ได้รับจากการทดลองพบว่า ระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการที่ถูกเสนอและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถประมาณค่าระดับการสึกหรอของมีดกลึง และตรวจจับสถานะของการตัดของเศษ โลหะและแฉดเตอร์ที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต..... ใบนี้ฉบับ ภูษณพากร.....
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2552

5070665221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : TURNING / TOOL WEAR / CONTINUOUS CHIP / BROKEN CHIP /
CHATTER / SENSOR FUSION / NEURAL NETWORK

CHAIWAT PHUSANAPAKORN : MONITORING OF MILD STEEL CUTTING
STATES ON CNC TURNING MACHINE UTILIZING SENSOR FUSION. THESIS
ADVISOR : ASST.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, Ph.D.Eng, 186 pp.

The intelligent machine tool plays an important role and the monitoring system is required to improve the productivity during the in-process cutting. Hence, the aim of this research is to propose and develop the in-process monitoring system of the tool wear and the cutting states of chip and chatter for the carbon steel (S45C) in CNC turning process by utilizing the sensor fusion which are the force sensor, the sound sensor, the accelerometer sensor and the acoustic emission sensor. The dry cutting experiments are conducted with one replication to obtain the signals from all sensors. All signals are analyzed in both frequency domain by the signal processing method called Fast Fourier Transform (FFT) and time domain to find the correlation between each signal and the tool wear, the chip breaking as well as the chatter. Their analyzed signals have been integrated via the neural network with the back propagation, the perceptron and the pattern recognition technique to predict the tool wear level and detect the cutting states which are the continuous chip, the broken chip and the chatter occurred.

The experimentally obtained results showed that the in-process monitoring system proposed and developed in this research can be effectively used to estimate the tool wear level and detect the cutting states of chip and chatter with the percentage accuracy over 90 %.

Department : Industrial Engineering

Student's Signature ชวติช พุฒนาศักดิ์

Field of Study : Industrial Engineering

Advisor's Signature สมเกียรติ ตังจิติชารoen

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเสียสละให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาของการจัดทำงานวิจัย และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ได้รับสนับสนุนโดยทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร. ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคีก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ภาพรวมของระบบการผลิตในอนาคต.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	7
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	10
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	60
3.1 การออกแบบการทดลอง	60
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	60

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	63
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล	66
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	68
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	70
4.1 การพยากรณ์ขนาดของการสีกหรือของมีดกึ่ง	70
4.2 การจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น	76
4.3 การตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	88
5.1 สรุปผลการวิจัย	88
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	89
5.3 อุปสรรคในการวิจัย	91
5.4 ข้อเสนอแนะ	91
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ สำหรับวิเคราะห์การสีกหรือของมีดกึ่ง	96
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ สำหรับวิเคราะห์รูปแบบของเศษโลหะ	115
ภาคผนวก ค ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ สำหรับวิเคราะห์การเกิดแชนเตอร์	137
ภาคผนวก ง โปรแกรม Matlab สำหรับการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว	160

ภาคผนวก จ ขั้นตอนการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม.....	171
ภาคผนวก ฉ อุปกรณ์จับยึดด้ามมีดตัดและเซนเซอร์	183
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	186



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 : กลไกที่ทำให้เกิดการสึกหรอบนมีดตัด.....	25
ตารางที่ 3.1 : ตารางแสดงการปรับตั้งค่าเครื่องออกซิลโลโคป	65
ตารางที่ 3.2 : ตารางแสดงค่า sensitivity และช่วงความถี่ใช้งานของแต่ละเซนเซอร์.....	67
ตารางที่ 4.1 : ตารางแสดงผลของการพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกลึง.....	76
ตารางที่ 4.2 : ตารางแสดงผลลัพธ์ของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ.....	82
ตารางที่ 4.3 : ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ.....	82
ตารางที่ 4.4 : ตารางแสดงผลลัพธ์ของการตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์	87
ตารางที่ 4.5 : ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์	87

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 : การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตอัจฉริยะ.....	2
1.2 : วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ.....	3
1.3 : โครงร่างของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะ.....	5
1.4 : โครงสร้างพื้นฐานของระบบการผลิตอัจฉริยะ	5
1.5 : เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามระบบการผลิต	7
2.1 : หลักการพื้นฐานของอินพุท-เอาต์พุทของกระบวนการตัด	12
2.2 : 7 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด	13
2.3 : กระบวนการกลึง	14
2.4 : เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง	14
2.5 : ภาพ 3 มิติ (a) ของการตัดแบบอโทโกนอล ซึ่งมองลดมิติลงเหลือ 2 มิติ (b).....	16
2.6 : ความเครียดเฉือนระหว่างการเกิดเศษโลหะ : (a) การเกิดเศษโลหะที่ถูกอธิบายด้วยลำดับของการไหลเลื่อนของแผ่นโลหะที่ขนานกัน ; (b) แผ่นโลหะ 1 แผ่น ที่แสดงความเครียดเฉือน; (c) สามเหลี่ยมของความเครียดเฉือนที่ถูกใช้เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2-9 และ 2-10.....	17
2.7 : บริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 และบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2	18
2.8 : 4 รูปแบบหลักของการเกิดเศษโลหะในการตัด: (a) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง , (b) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง , (c) เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่มีการยึดติดที่คมตัด , (d) เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย	18
2.9 : การจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1977	20
2.10 : แสดงรูปแบบของเศษโลหะที่ยอมรับได้และแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น	21

2.11 : แรงในการตัดโลหะ: (a) แรงที่กระทำต่อเศษโลหะในการตัดแบบอโทโกนอล และ(b) แรงที่กระทำต่อมิตตัดที่สามารถถูกวัดได้..... 21

2.12 : แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (F , N , F_s , F_n , F_c , F_t) 23

2.13 : ภาพการสึกหรอของมิตตัด แสดงตำแหน่งและรูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้น 24

2.14 : (a) รอยสึกบนผิวคาย และ (b) รอยสึกบนผิวหลบบนมิตตัดซีเมนต์ คาร์ไบด์..... 26

2.15 : การวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหลบ 27

2.16 : การวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวคาย 27

2.17 : การสึกหรอที่ปลายมิต 28

2.18 : รูปแบบต่างๆของการสึกหรอบนวัสดุมิตตัดที่ต่างกัน 28

2.19 : ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอบนผิวหลบกับเวลาที่ใช้ในการตัด 29

2.20 : ผลกระทบของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอบนผิวหลบ โดยให้เกณฑ์การหมดอายุของมิตตัดในการสึกหรอบนผิวหลบเป็น 0.5 มิลลิเมตร 30

2.21 : Natural log-log กราฟระหว่างความเร็วในการตัดกับอายุการใช้งานของมิตตัด 31

2.22 : (a) 7 ส่วนประกอบของมิตตัดคมตัดเดี่ยว, (b) สัญลักษณ์ของมิตตัดที่ใช้กำหนดรูปทรงมิตตัด 33

2.23 : แสดงวิธีการตีเม็ดมิตบนด้ามมิต (a) การยึดเม็ดมิตกับด้ามมิต, (b) แสดงการประกอบเม็ดมิต, (c) ตัวอย่างของเม็ดมิตที่แตกต่างกันที่ติดอยู่กับด้ามมิต..... 34

2.24 : รูปทรงของเม็ดมิต (a) กลม, (b) สี่เหลี่ยม, (c) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม 80° , (d) หกเหลี่ยม, (e) สามเหลี่ยมด้านเท่า, (f) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม 55° และ (g) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม 35° 35

2.25 : ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานเมื่อเกิดแชตเตอร์ขึ้นในระหว่างกระบวนการกลึง..... 36

2.26 : ขนาดความกว้างของเศษโลหะในกระบวนการกลึง 37

ภาพประกอบ

หน้า

2.27 : สัญญาณอะคูสติคแบบต่อเนื่องและแบบที่เกิดเป็นช่วงๆ.....	38
2.28 : ลักษณะรูปคลื่นอะคูสติคและคุณลักษณะต่างๆของสัญญาณ	39
2.29 : แสดงการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่	40
2.30 : แสดงหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม.....	42
2.31 : แสดงรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม	42
2.32 : แสดงฟังก์ชันการถ่ายโอน linear	43
2.33 : แสดงฟังก์ชันการถ่ายโอน Hard-Limit	43
2.34 : แสดงฟังก์ชันการถ่ายโอน Log-Sigmoid	43
2.35 : แสดงโครงข่ายแบบชั้นเดียว(One-layer network).....	44
2.36 : แสดงโครงข่ายแบบหลายชั้น(Multiple-layer network)	44
2.37 : แสดงสถาปัตยกรรมของ Feedforward network	46
2.38 : แสดงสถาปัตยกรรมของ Feedback network	46
2.39 : แสดงโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน	47
2.40 : โครงสร้างของระบบตรวจติดตามเสียง	51
2.41 : รูปแบบของสัญญาณอะคูสติคในกระบวนการกลิ้ง	52
2.42 : เพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณอะคูสติค (ch1) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง, (ch2) เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นเกลียว, (ch3) เศษโลหะแบบแตกหัก	53
2.43 : ตัวอย่างของเพาเวอร์สเปคตรัมของแรงตัดที่ระดับของการสีกหรือ R1, R2, R3 และ R4 (a) แรงตัดหลัก, (b) แรงป้อนตัด	53

ภาพประกอบ

หน้า

2.44 : สัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก และเศษโลหะแบบต่อเนื่อง รวมถึงเงื่อนไขของการตัดที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก และเศษโลหะแบบต่อเนื่อง	54
2.45 : สัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดที่มีแชตเตอร์เกิดขึ้นและเงื่อนไขของการตัดที่ทำให้เกิดแชตเตอร์	54
2.46 : การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญของค่า AE_{rms} ในกรณีเครื่องมือตัดเกิดความเสียหาย	55
2.47 : รูปแบบการแตกหักของการยึดติดที่คมตัดที่มีผลต่อสัญญาณอะคูสติก อิมิสชัน	57
2.48 : การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณอะคูสติก อิมิสชันในความเร็วและความลึกในการตัดที่ต่างกัน	57
3.1 : ภาพแสดงวัสดุชิ้นงานกลึง	60
3.2 : ภาพแสดงเม็ดมีดตัด	61
3.3 : ภาพแสดงด้ามมีดตัด.....	61
3.4 : ภาพแสดงเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน.....	61
3.5 : ภาพแสดง (ก) เซนเซอร์แรง, (ข) เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชัน, (ค) เซนเซอร์เสียง, (ง) เซนเซอร์วัดความเร่ง.....	62
3.6 : ภาพแสดงเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน.....	62
3.7 : ภาพแสดงเครื่องมือวัดขนาดชิ้นงาน	62
3.8 : ภาพแสดงเครื่องไมโครสโคป	63
3.9 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง,เซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชัน...	64
3.10 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์เสียง	64
3.11 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับการดำเนินการทดลอง	65

ภาพประกอบ	หน้า
3.12 : ภาพแสดงการตัดที่ปริมาตรต่างๆ	66
3.13 : ภาพแสดงการตัดที่ปริมาตรต่างๆ	66
3.13 : ภาพแสดงทิศทางของแรงตัด (แรงรัศมี, แรงป้อนตัด และแรงตัดหลัก)	67
3.14 : ภาพแสดงสัญญาณแรงป้อนตัด	68
4.1 : ภาพแสดงสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อมีดกึ่งมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น	70
4.2 : ภาพแสดงแอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่งที่สูงขึ้น ตามระดับของการสึกหรอของมีดกึ่ง.....	71
4.3 : แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการหาค่าแอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณ	72
4.4 : ภาพแสดงเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียง เมื่อมีดกึ่งมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น.....	73
4.5 : ภาพแสดงเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่น เมื่อมีดกึ่งมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น	73
4.6 : ภาพแสดงวิธีการพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกึ่งโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	74
4.7 : ภาพแสดงผลพัทธ์ของการพยากรณ์ระดับสึกหรอของมีดกึ่ง	75
4.8 : ภาพแสดงการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (ซ้าย) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ขวา)	77
4.9 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณความเร่ง เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (บน) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ล่าง).....	77
4.10 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียง เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (บน) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ล่าง).....	78
4.11 : ภาพแสดงตัวอย่างของการเปรียบเทียบสัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่น เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (บน) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ล่าง).....	79
4.12 : ภาพแสดงวิธีการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	80

4.13 : ภาพแสดงตารางการปะปนระหว่างประเภทข้อมูลของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง	81
4.14 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกนเมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ (ซ้าย) และในกรณีที่ไม่เกิดแชนเตอร์ขึ้น (ขวา) ในระหว่างการกลึง.....	83
4.15 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณความเร่ง เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ (บน) และในกรณีที่ไม่เกิดแชนเตอร์ขึ้น (ล่าง) ในระหว่างการกลึง	83
4.16 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณเสียง เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์(บน) และในกรณีที่ไม่เกิดแชนเตอร์ขึ้น (ล่าง) ในระหว่างการกลึง	84
4.17 : ภาพแสดงวิธีการตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	85
4.18 : ภาพแสดงตารางการปะปนระหว่างประเภทข้อมูลของการตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง.....	86
ก : ภาพแสดงหน้าเริ่มต้นสำหรับการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม	172
ข : ภาพแสดงการไหลด์ไฟล์ของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรส่งออก.....	173
ค : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนของข้อมูลสำหรับการเรียนรู้, การยืนยันความถูกต้องและการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม	173
ง : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม.....	174
จ : ภาพแสดงขั้นตอนการฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม	174
ฉ : ภาพแสดงการฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม	175
ช : ภาพแสดงหน้าเริ่มต้นของการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม	176
ซ : ภาพแสดงการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน.....	177
ฅ : ภาพแสดงการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน.....	177
ญ : ภาพแสดงการตั้งค่าข้อมูลสำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	178

ภาพประกอบ

หน้า

ฎ : ภาพแสดงการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน.....	178
ฏ : ภาพแสดงการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ	179
ฐ : ภาพแสดงการการไหลดไฟล์ของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรนำออก.....	180
ฑ : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนของข้อมูลสำหรับการเรียนรู้, การยืนยันความถูกต้องและการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ	180
ฒ : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ	181
ณ : ภาพแสดงการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ	181
ด : ภาพแสดงการฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม	182
ต : ภาพแสดงอุปกรณ์จับยึดด้ามมีดตัดและเซนเซอร์	184
ถ : ภาพแสดง Drawing ของอุปกรณ์จับยึดด้ามมีดตัดและเซนเซอร์.....	185

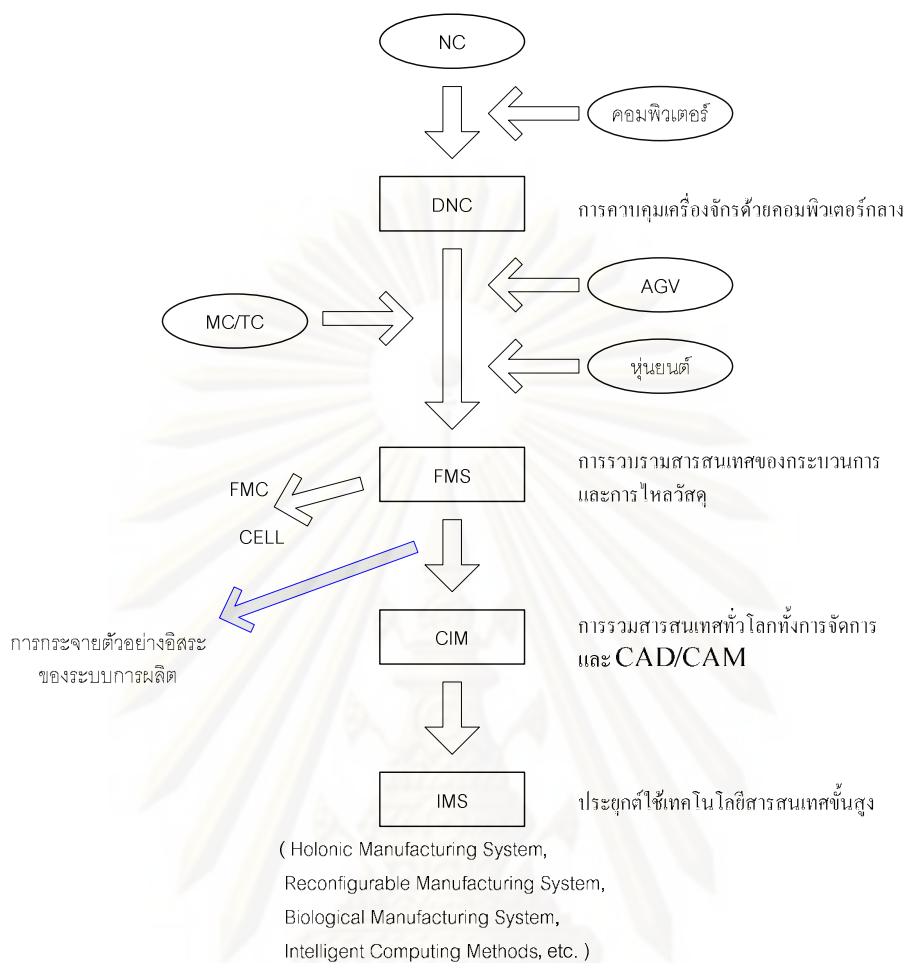
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภาพรวมของระบบการผลิตในอนาคต^[1]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตได้ประสบกับการเปลี่ยนแปลงอันยิ่งใหญ่และการแข่งขันที่สูง เนื่องจากสภาวะแวดล้อมต่างๆทางธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ดังนั้นระบบการผลิตในอนาคตควรมีคุณลักษณะที่คล่องแคล่ว, มีความเป็นอัจฉริยะ, มีการตอบสนองที่รวดเร็ว, ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง, รองรับการผลิตปริมาณน้อยแต่มีความหลากหลายได้ และตระหนักถึงสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อคุณลักษณะต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นก็คือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System : IMS) ซึ่งเป็นระบบการผลิตที่มีการศึกษาและพัฒนากันอย่างกว้างขวาง เพื่อให้ระบบการผลิตอัจฉริยะสามารถที่จะควบคุมและตรวจสอบตนเองได้ อันจะเป็นผลให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ ที่ซึ่งผลิตภัณฑ์จะถูกผลิตในสภาวะแวดล้อมจำลอง และเพื่อให้มีความเข้าใจในประวัติของการพัฒนาของเทคโนโลยีของระบบการผลิตจากในอดีต ไปจนถึงระบบการผลิตที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ดังแสดงในรูปที่ 1.1

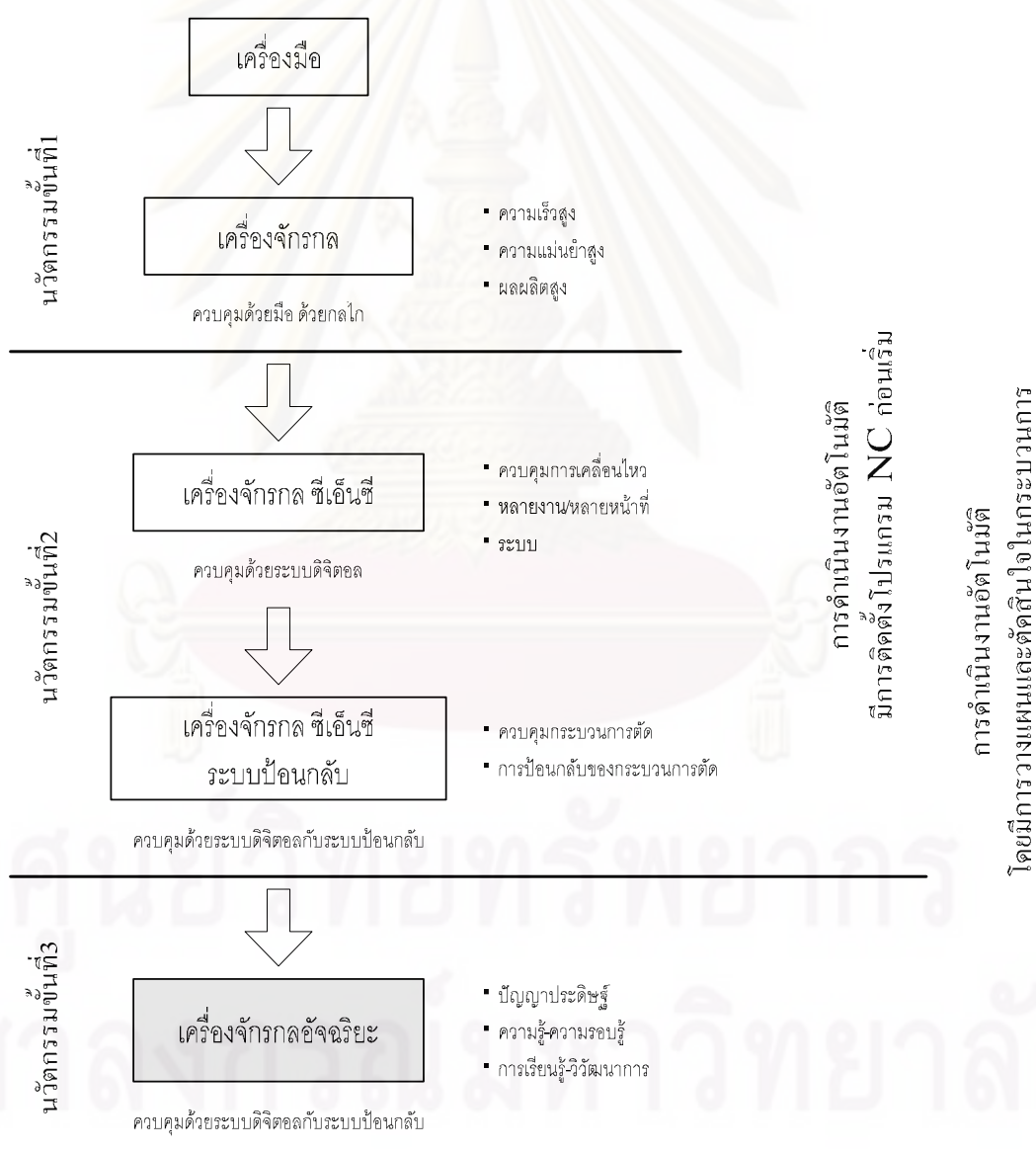
ระบบอัตโนมัติและการจัดระบบของการผลิตเชิงกลสมัยใหม่ เริ่มต้นจากการเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (NC) ในปีค.ศ. 1954 ต่อมาได้พัฒนามาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct NC : DNC) โดยเครื่องจักรที่ควบคุมเชิงตัวเลขหลายๆเครื่องนี้จะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์กลาง ระบบดีเอ็นซีถูกบ่งชี้ในรูปของผลลัพธ์ของการบูรณาการการไหลของสารสนเทศในระบบการผลิต ซึ่งก็คือระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System : FMS) โดยชิ้นงานและเครื่องมือต่างๆได้ถูกขนส่งระหว่างคลังสินค้ากับเครื่องจักรอย่างอัตโนมัติโดยเอจีวี (Automated Guide Vehicles : AGVs) และทำการขนถ่ายโดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและอื่นๆ แต่โดยปกติแล้วระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นต้องการการลงทุนสูงเพื่อที่จะติดตั้ง และก็ไม่ง่ายที่จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อที่จะจัดการกับการเปลี่ยนแปลงอันมากมายในปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ได้ ด้วยเหตุนี้ระบบการผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell: FMC) จึงเป็นที่นิยมมากกว่า และบางครั้งการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติด้วยระบบการผลิตแบบเซลล์ นั้นมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังเดินเครื่องได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่าที่จะจัดการกับความเปลี่ยนแปลงของการสั่งซื้อของลูกค้า



รูปที่ 1.1 : การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตอัจฉริยะ

การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีซอฟต์แวร์และเทคโนโลยีการประมวลผลสารสนเทศ ร่วมกับการพัฒนาในฮาร์ดแวร์ทางด้านการผลิตที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ทำให้เป็นไปได้ที่จะบูรณาการกิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรมทางด้านการตลาด ทางด้านการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตในขั้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และการส่งสินค้าเข้าด้วยกันซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในนามของ คอมพิวเตอร์บูรณาการการผลิต (Computer Integrated Manufacturing : CIM) ที่มีความสามารถในการประมวลผลสารสนเทศของอุตสาหกรรมการผลิตเพิ่มเข้ามาในขอบเขตทั้งหมดของกิจกรรมการผลิตอันได้แก่ การตลาด การจัดการ การควบคุมกระบวนการผลิต และการบริการ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำมาซึ่งความยืดหยุ่นและความสามารถในการผลิตที่เพิ่มขึ้นในการผลิตจริง ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นมีความคาดหวังว่าระบบการผลิตที่แจกจ่ายได้ด้วยตัวเอง (Autonomous distributed manufacturing systems) ประกอบกับเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงจะเป็นคำตอบของการผลิตในอนาคตที่สามารถผลิตสินค้าที่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ใหม่ได้มากขึ้นเนื่องมาจากการอุปสงค์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอด

จากลูกค้า ระบบนี้มีชื่อว่ารระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System: IMS) และเพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยเครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะอยู่ภายในจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ และสิ่งอำนวยความสะดวกทางการผลิต ดังนั้นเครื่องจักรกลที่มีการทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นและทำงานได้ด้วยตัวเองนี้ก็จะมีความอัจฉริยะที่สูงมาก ซึ่งวิวัฒนาการเครื่องจักรกลอัจฉริยะแสดงดังรูปที่ 1.2 โดยนวัตกรรมแรกเกิดขึ้นในระหว่างยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม ซึ่งเครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะ และเครื่องไสแบบดั้งเดิมส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.2 : วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ

นวัตกรรมขั้นที่สองคือการควบคุมเชิงตัวเลข ความถูกต้องและการวัดซ้ำของเครื่องจักรกล ควบคุมเชิงตัวเลขนั้นมีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลที่เดินเครื่องด้วยคนมาก อัตราผลิตภาพจะถูกปรับปรุงอย่างมากโดยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (Non - productive time) ในวงจรการผลิต เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนหลายเครื่องได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือการควบคุมที่สามารถปรับได้ (Adaptive control: AC) ตัวอย่างเช่นในกระบวนการตัดที่อยู่ในวงจรของการควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องจักร ในขณะที่มีดตัดและโต๊ะงานถูกควบคุมด้วยซีเอ็นซี ซึ่งเซนเซอร์หลายรูปแบบได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในการตรวจจับสถานะของการตัดเพื่อที่จะป้อนกลับสารสนเทศต่างๆด้วย

อย่างไรก็ตาม, เครื่องจักรกลที่ได้พัฒนาขึ้นมาจนถึงปัจจุบันถูกขับเคลื่อนและควบคุมตามความต้องการที่กำหนดไว้ซึ่งถ้าไม่ถูกเตรียมขึ้นมาด้วยมือ ก็โดยคอมพิวเตอร์พร้อมกับซอฟต์แวร์ช่วยผลิต (CAM) และฐานข้อมูล ระบบควบคุมที่เป็นไปได้ในอนาคตสำหรับเครื่องจักรกลในรุ่นถัดไปจะเป็นการควบคุมแบบอัจฉริยะ เครื่องจักรกลอัจฉริยะสามารถตัดสินใจได้ด้วยตัวเองว่าจะทำอะไรบนพื้นฐานการตัดสินใจของตัวเอง ซึ่งจะสนองตอบต่อคำสั่งการที่ไม่ชัดเจนโดยใช้ประโยชน์จากประสบการณ์ และการรวบรวมองค์ความรู้ผ่านการเรียนรู้ ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงสามารถที่จะหาค่าสมรรถนะที่เหมาะสมสำหรับตัวเองภายใต้สภาวะการณ์ที่กำหนด รวมไปถึงสถานการณ์ที่ไม่เคยพบมาก่อนและมีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งโครงสร้างของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคตสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1.3 ระบบควบคุมซีเอ็นซีแบบดั้งเดิมแบ่งออกได้ 2 ระดับ: การควบคุมตำแหน่ง (ระดับที่ 1) และการแทรกคำสั่งหรืออินเทอร์โพลเลเตอร์ (ระดับที่ 2) เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนของเครื่องตัด ระบบควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคตได้เพิ่มระดับเข้าไปอีก 2 ระดับเพื่อที่จะสามารถควบคุมกระบวนการที่มีความซับซ้อนได้ ระบบการควบคุมแบบปรับได้ (AC) ได้ถูกนำมาใช้ในระดับที่ 3 ของลำดับชั้นการควบคุม (control hierarchy) สำหรับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีขั้นสูง มีความต้องการการติดตามกระบวนการแบบอัจฉริยะซึ่งสามารถตรวจจับสถานะการตัดที่ไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัดและวิธีการตัด ระดับที่ 4. นั้นคือระดับของการสั่งการ (supervisory level) ซึ่งได้รับการป้อนกลับมาจากการวัดชิ้นส่วนที่สำเร็จแล้ว (finished part) ระดับนี้ต้องการดัชนีที่มีเหตุผลเพื่อที่จะประเมินผลของการตัดและกลยุทธ์เพื่อปรับปรุงผลของการตัด ด้วยเหตุผลนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะพิจารณาใช้ประโยชน์จากองค์ความรู้ เทคโนโลยี และทักษะที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานที่กำหนดโดยพนักงานที่มีประสบการณ์ การใช้ประโยชน์ที่มีประสิทธิผลของสารสนเทศป้อนกลับโดยการพิจารณาที่ผลของการตัดมีความสำคัญมาก ระบบดังรูปที่ 1.4 ได้ถูกสร้างเพื่อที่จะนำเอาการควบคุมชนิดนี้ไปใช้ในเครื่องจักรกลจริง

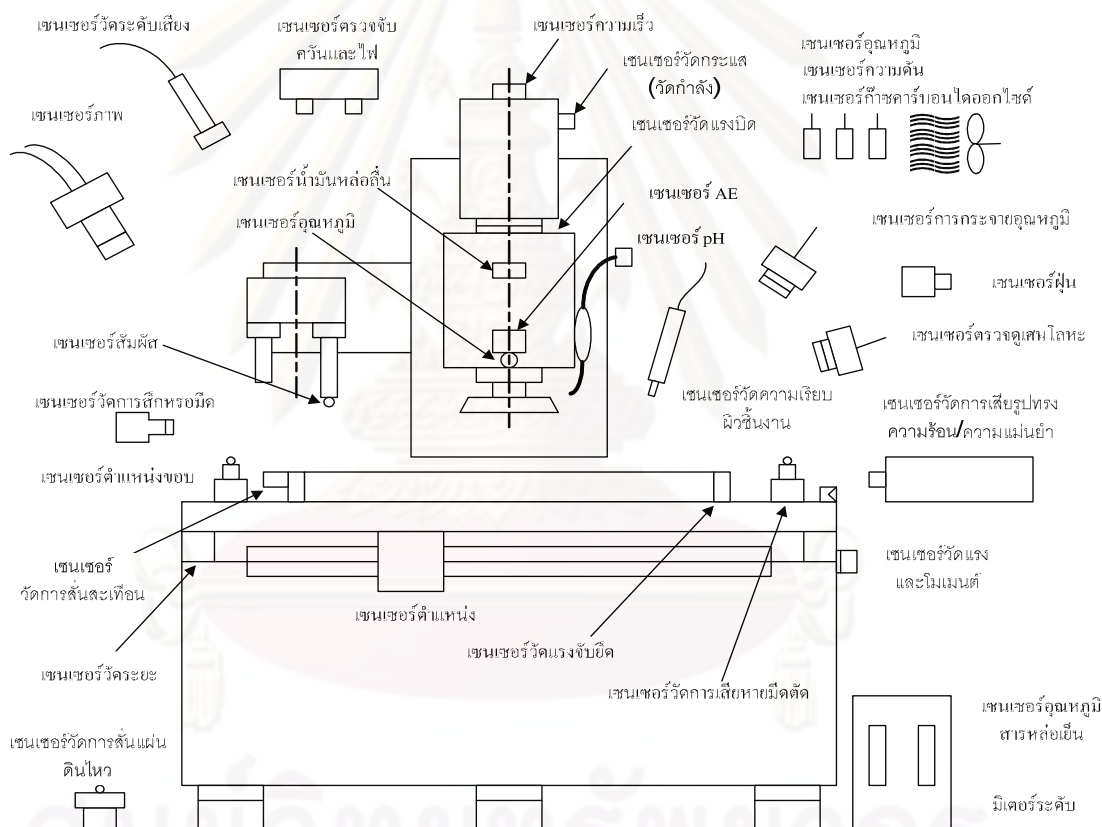
จากโครงสร้างพื้นฐานของระบบการผลิตอัจฉริยะจะเห็นว่าเซนเซอร์ได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในระบบการผลิตอัจฉริยะ ในฐานะที่เป็นอุปกรณ์ใหม่ที่อยู่ในระบบการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตเนื่องจากแนวโน้มของการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบัน ซึ่งสาเหตุของการที่ต้องตรวจติดตามระบบการผลิตก็เพื่อให้แน่ใจว่าระบบการผลิตนี้มีสมรรถนะเหมาะสมที่สุด โดยในการตรวจติดตามจะมุ่งเน้นไปที่เครื่องจักร (ประสิทธิภาพและความบกพร่องต่างๆ), เครื่องมือ (สถานะของการสึกหรอ), ชิ้นงาน (ขนาด, พื้นผิว) และกระบวนการ (รูปแบบของเศษโลหะ, อุณหภูมิ) ซึ่งได้มีการใช้เซนเซอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกันในการที่จะตรวจติดตามไม่ว่าจะเป็นในด้านของการผลิต หรือในด้านของสภาพแวดล้อมของการผลิตที่มีมากมายหลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 1.5 และจากการพิจารณาแนวโน้มการพัฒนาทางด้านการผลิตที่สามารถที่จะสรุปเพื่ออธิบายว่าทำไมเซนเซอร์และเทคโนโลยีการตรวจติดตามได้กลายมาเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆในระบบการผลิตอัจฉริยะ

- ระบบการผลิตปริมาณมาก (Large-scale manufacturing system) ควรที่จะถูกปฏิบัติงานภายใต้ความน่าเชื่อถือและความพร้อมที่สูงเพราะเวลาหยุดที่เกิดจากระบบเกิดการขัดข้องส่งผลกระทบต่อกิจกรรมทางการผลิตมากมาย
- การเพิ่มขึ้นของค่าแรงงานและการขาดแคลนของการทำงานที่ต้องใช้พนักงานที่มีทักษะทำให้จำเป็นต้องมีระบบการผลิตที่มีคนเข้ามาเกี่ยวข้องให้น้อยที่สุด
- ระบบการผลิตที่มีความแม่นยำเพียงตรงพิเศษ (Ultra-precision manufacturing) สามารถบรรลุผลสำเร็จได้ด้วยการช่วยเหลือของศาสตร์ของการวัดและเทคโนโลยีของการตรวจติดตามกระบวนการขั้นสูงโดยการใช้ระบบเซนเซอร์ที่มีความน่าเชื่อถือ
- การใช้เครื่องจักรกลที่มีความซับซ้อน ซึ่งต้องการการบำรุงรักษาของระบบการตรวจติดตามเพื่อที่จะป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร
- เครื่องจักรกลที่ใช้งานหนัก (Heavy-duty machine) พร้อมกับการตัดและการเจียรความเร็วสูงควรที่จะถูกจัดการด้วยคนให้น้อยที่สุดด้วยเหตุผลทางด้านความปลอดภัย
- ความตระหนักทางด้านสิ่งแวดล้อมในการผลิตปัจจุบันทำให้ต้องการเซนเซอร์ที่จะตรวจติดตามการปล่อยของเสียจากกระบวนการผลิต

การรวมความแตกต่างของเซนเซอร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อที่จะเอาชนะข้อด้อยของเซนเซอร์เดี่ยว ซึ่งมากกว่าหนึ่งในสี่ของงานวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การรวมเซนเซอร์ (Sensor fusion) ซึ่งเป็นความสามารถในการรวมหรือเพิ่มเติมผลลัพธ์ที่ได้จากเซนเซอร์อื่นๆเพื่อที่จะให้การตัดสินใจที่มีความแน่นอนมากขึ้น ซึ่ง โดยทั่วไป กระบวนการผลิตและระบบการผลิตเกือบจะทุกชนิดต้องการ

การตรวจติดตามเพื่อที่จะรักษาความน่าเชื่อถือของกระบวนการและเพื่อหลีกเลี่ยงสภาวะที่ผิดปกติ โดยบทบาทของเซนเซอร์ในกระบวนการผลิตและระบบการผลิตสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

- เซนเซอร์ควรถูกจะสามารถตรวจจับการทำงานที่ผิดปกติซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตโดยที่ไม่คาดว่าจะเป็นได้
- สารสนเทศที่เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตที่ได้จากเซนเซอร์และระบบการตรวจติดตามสามารถที่จะนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการ
- ระบบเซนเซอร์และการตรวจติดตามจะทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระบวนการผลิต



รูปที่ 1.5 : เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามระบบการผลิต

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าของไทยเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆเป็นจำนวนมาก

เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เฟอร์นิเจอร์ อาหารกระป๋อง (บรรจุภัณฑ์) เครื่องจักรกล และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น และในปัจจุบัน วัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน เช่น S45C ได้ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนสำคัญต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะชิ้นส่วนประกอบยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องจักร (เพลลา, ล้อเฟือง, สลักเกลียว) โดยการกลึงนั้นเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในการตัดชิ้นรูปวัสดุดังกล่าวให้ได้รูปร่างตามต้องการ[19], ดังนั้นจึงมีความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้สูงขึ้นในกระบวนการผลิตอัตโนมัติเพื่อรองรับระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคตอันใกล้ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของระบบการตรวจติดตามในกระบวนการกลึง และเนื่องจากการสึกหรอของมีดกลึงและสถานะการกลึงมีอิทธิพลต่อคุณภาพของผิวชิ้นงาน, ความถูกต้องของขนาดชิ้นงาน, อัตราการผลิต, การหยุดของเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนมีดตัดหรือการกำจัดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง รวมถึงเป็นการเพิ่มต้นทุนของการผลิตด้วย และในกระบวนการกลึงนั้น มีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ก็คือ ความเร็วตัด, ความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด โดยเงื่อนไขของการตัดทั้ง 3 ตัวนี้มีผลต่อการสึกหรอของมีดกลึง และรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในขณะตัดหรือแชตเตอร์ เช่นเศษโลหะสามารถแตกหักได้ดีเมื่อเพิ่มความลึกในการตัด, เพิ่มอัตราการป้อนตัดและลดความเร็วตัด หรือการลดแชตเตอร์สามารถทำได้โดยลดความลึกในการตัด, ลดอัตราการป้อนตัดและลดความเร็วตัด[5], ซึ่งในกระบวนการกลึงโดยทั่วไปแล้ว เพื่อให้ได้คุณภาพที่สูงของกระบวนการตัดนั้น ควรต้องมีการตรวจติดตามพารามิเตอร์อย่างน้อย 3 ตัวก็คือ การสึกหรอของมีดกลึง, รูปแบบของเศษโลหะและการเกิดแชตเตอร์[12], จึงเป็นที่มาของความต้องการที่จะพัฒนาระบบการตรวจติดตามสภาพของมีดกลึง (การสึกหรอของมีดกลึง) และสถานะการกลึง (รูปแบบของเศษโลหะ, แชตเตอร์) ในกระบวนการผลิตอัตโนมัติ โดยการนำเซนเซอร์มาใช้ช่วยวิเคราะห์สภาพของมีดกลึงและสถานะการกลึงในขณะกลึงจริงโดยติดตั้งเซนเซอร์ 4 ชนิด (เซนเซอร์แรง, เซนเซอร์อะคูสติกรีมิสชัน, เซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์เสียง) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อคู่สัญญาของเซนเซอร์ในขณะกลึง แล้วนำผลของสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ทั้ง 4 ชนิด มาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการตรวจติดตามในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจติดตามสภาพมีดกลึงและสถานะการกลึง โดยการรวมรูปแบบที่แตกต่างกันของเซนเซอร์ เพื่อบ่งชี้สถานะของการกลึงอย่างต่อเนื่องเพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือที่สูง

เซนเซอร์ทั้ง 4 ชนิดที่เลือกมาใช้ในกระบวนการตรวจติดตามบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีนั้น เซนเซอร์แต่ละตัวจะมีความสามารถในการตรวจติดตามสภาพของมีดกลึงและสถานะการกลึงต่างกันซึ่งจะให้สัญญาณในลักษณะที่คล้ายกันคือ เมื่อมีดกลึงมีการสึกหรอที่มากขึ้นจะทำให้แรง

ตัดสูงขึ้น, สัญญาณความเร่งและสัญญาณเสียงที่มีแอมพลิจูดสูงขึ้น โดยในการวัดสัญญาณเสียงนั้น ในช่วง 0 – 2 กิโลเฮิร์ตซ์ สัญญาณที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อม เช่น เสียงจากเครื่องจักรใกล้เคียงหรือเสียงรบกวนจากภายนอก และในช่วงระหว่าง 6 – 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ขนาดการสั่นหรือที่เพิ่มขึ้นมีผลให้แอมพลิจูดของเสียงเพิ่มขึ้น[14], และอาจทำให้เกิดแซตเตอร์ขึ้นด้วย (เนื่องจากการสั่นหรือที่ปลายมีด) นอกจากนี้เมื่อการสั่นหรือที่เพิ่มขึ้น แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ชันก็จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถนำมาช่วยในการพยากรณ์ขนาดการสั่นของมีดกลึงได้ ส่วนในการตรวจติดตามรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นนั้น ในขณะที่เกิดเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่อง แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดเล็ก (แรงตัดหลัก, แรงป้อนตัดและแรงรัศมี)[6], แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติกจะมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous-type AE signal) และเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ชันก็จะมีขนาดต่ำ [11-13], แต่เมื่อเศษโลหะเป็นแบบแตกหักแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะแรงป้อนตัดพลวัตจะมีแอมพลิจูดขนาดใหญ่สุด[5-6], และแอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติกจะมีลักษณะเป็นช่วงๆ (Burst-type AE signal) อีกทั้งเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ชันก็จะมีขนาดสูงขึ้น และในการตรวจติดตามแซตเตอร์ในขณะกลึงนั้น เมื่อเกิดแซตเตอร์ขึ้นแอมพลิจูดของสัญญาณแรงตัดหลักพลวัตจะมีขนาดใหญ่สุดในระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตทั้งสามและค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ชันหรือเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ชัน ก็สามารถตรวจจับแซตเตอร์ที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากช่วงความถี่ของสัญญาณสูงกว่าช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรและสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยช่วงความถี่ใช้งานของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ชันจะอยู่ที่ประมาณ 100 kHz – 1 MHz [11,13,18]

จากการเกิดลักษณะของสัญญาณของเซนเซอร์ทั้ง 4 ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถนำมาใช้ในการบ่งชี้สถานะการกลึงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงดังกล่าวข้างต้นได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเซนเซอร์ทั้ง 4 ชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาสถานะการกลึงจากรูปแบบของสัญญาณที่ได้ให้มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือที่สูงขึ้น รวมทั้งหาค่ามาตรฐานในการบ่งชี้สถานะการกลึงและพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นเพื่อช่วยในการตรวจติดตามการสั่นหรือสถานะการกลึงแบบอัตโนมัติในขณะกระบวนการกลึงจริงโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไป

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.) เพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการกลึงจริงและอัลกอริทึมในการบ่งชี้สถานะของการกลึง(รูปแบบของเศษโลหะ, แซตเตอร์) และสภาพของมีดกลึง(การ

สึกหรอของมีดกลึง) อย่างอัตโนมัติโดยไม่ต้องใช้พนักงานควบคุมเครื่อง สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคต

- 2.) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณจากเซนเซอร์แต่ละชนิดที่ได้ในกระบวนการกลึงร่วมกัน เพื่อเพิ่มความมั่นใจในขณะทำการตัดชิ้นงานจริง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.) การทดลองการตัดแห้ง (Dry Cutting) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
- 2.) วัสดุชิ้นงานในการกลึงเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร
- 3.) เม็ดมีดตัดที่ใช้เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide) เบอร์ KC9110
- 4.) พารามิเตอร์ในกระบวนการกลึง คือ ความเร็วในการตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด
- 5.) เซนเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้
 - เซนเซอร์แรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
 - เซนเซอร์เสียง (Sound Sensor) ยี่ห้อ 01dB-Metravib รุ่น PRE 21A
 - เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่น (Acoustic Emission Sensor) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 8152B
 - เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) ยี่ห้อ Endevco รุ่น 27A11
- 6.) ตัวชี้วัดผลสำเร็จวัดจากความสามารถในการบ่งชี้สถานะการกลึงและสภาพมีดกลึงของอัลกอริทึมที่สร้างขึ้น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) ระบบการตรวจติดตามสภาพมีดกลึง(การสึกหรอของมีดกลึง) และสถานะการกลึง (รูปแบบของเศษโลหะ, แชนเตอร์) สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคต

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

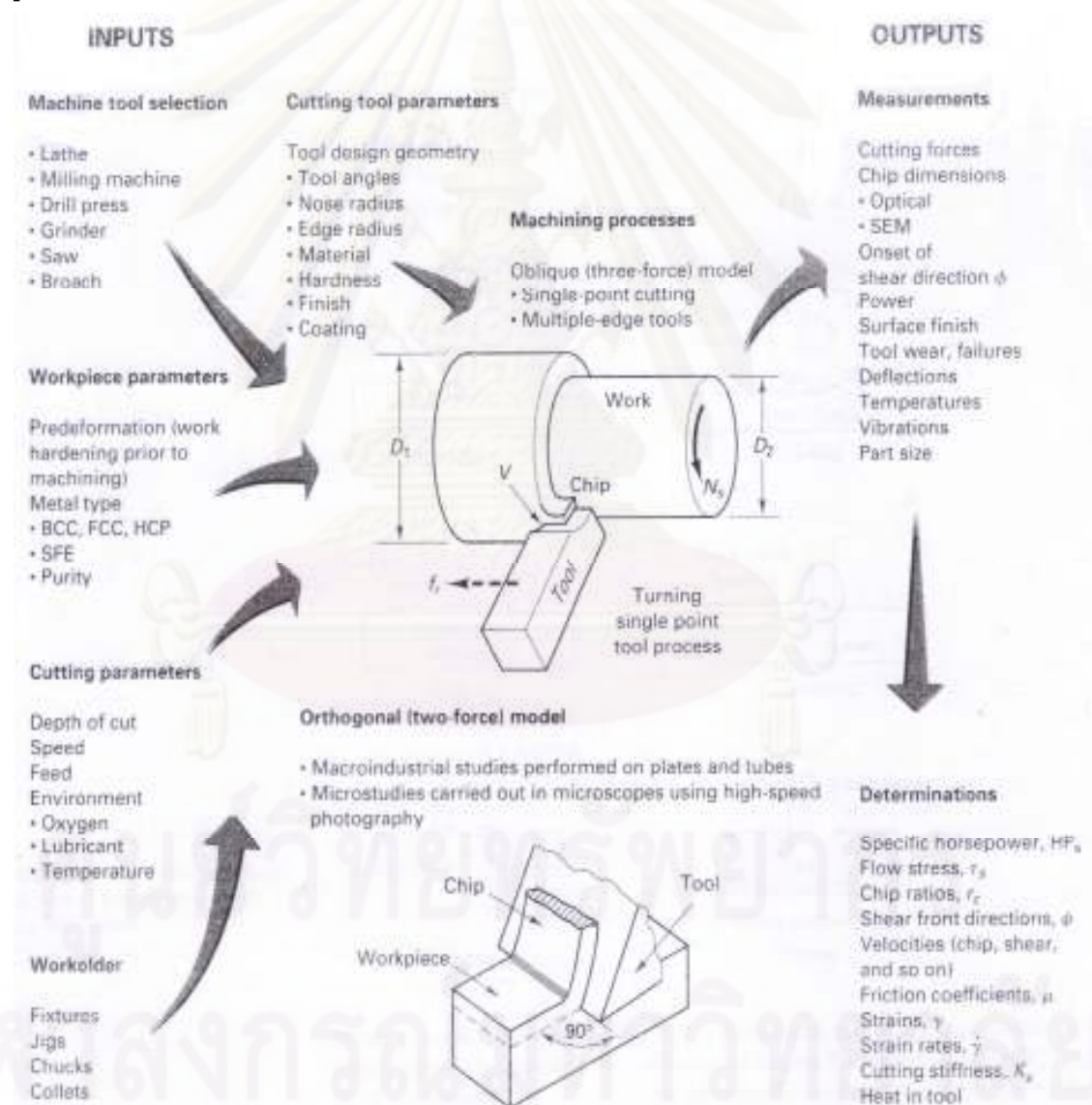
- 1.) ระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการกลึงและอัลกอริทึมในการบ่งชี้สถานะของการกลึงและสภาพของมีดกลึงอย่างอัตโนมัติ สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคต
- 2.) เพิ่มอัตราผลิตภาพในกระบวนการตัดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมถึงลดต้นทุนจากการผลิตของเสีย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 หลักการพื้นฐานของกระบวนการตัด (Fundamentals of Machining) ^[2]

กระบวนการตัดเป็นกระบวนการของการกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงานในรูปของเศษโลหะ ซึ่งถ้าชิ้นงานเป็นโลหะแล้ว, กระบวนการนั้นมักจะถูกเรียกว่ากระบวนการตัดโลหะ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากมันมีหลายปัจจัยที่เป็นอินพุทของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีดังนี้

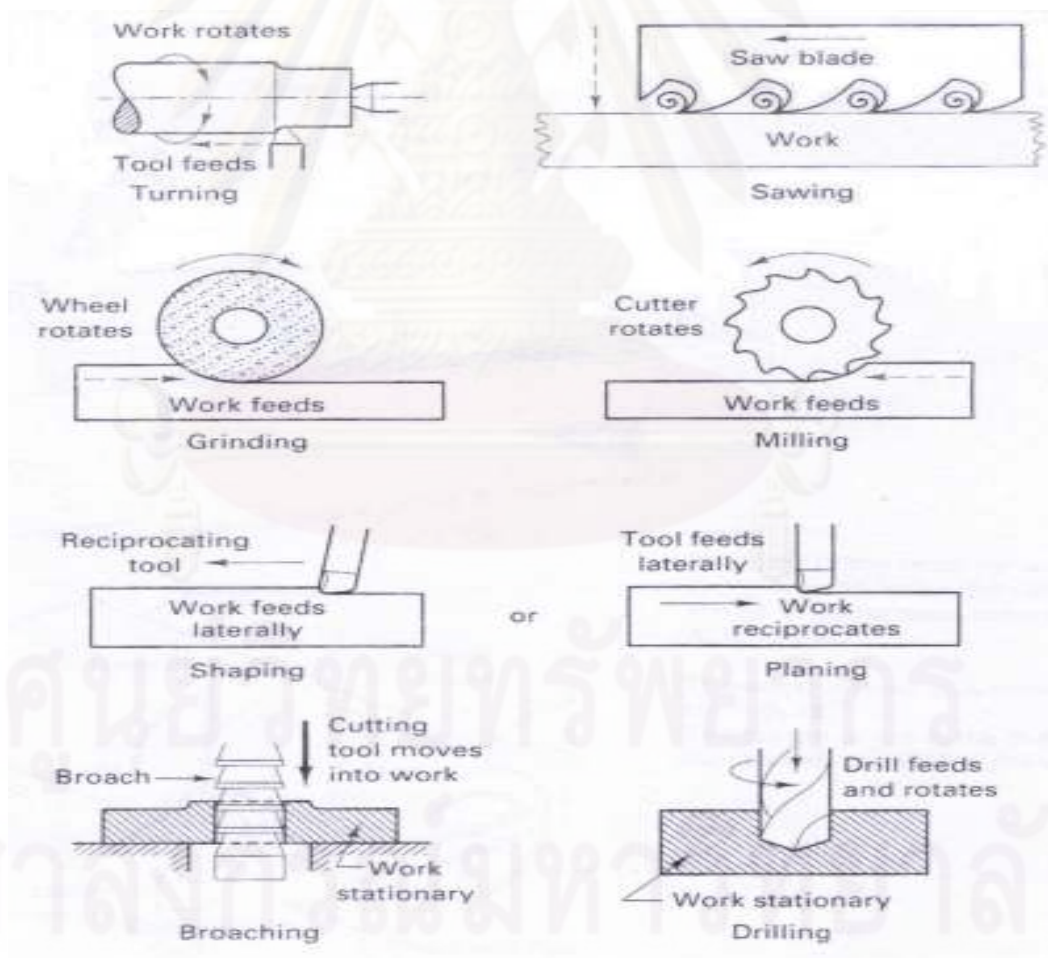


รูปที่ 2.1 : หลักการพื้นฐานของอินพุท-เอาต์พุทของกระบวนการตัด

- อุปกรณ์ (Machine tool) ที่ถูกเลือกเพื่อใช้ในกระบวนการ เช่น เครื่องกลึง, เครื่องกัด, เครื่องเจาะและเครื่องเจียระไน เป็นต้น
- มีดตัด (Cutting tool) เช่น รูปทรงและวัสดุของตัวมีดตัด เป็นต้น
- คุณสมบัติและตัวแปรต่างๆของชิ้นงาน (Properties and parameters of the workpiece) เช่น ชนิดของโลหะ, ความบริสุทธิ์ของเนื้อโลหะและกระบวนการชุบแข็งของชิ้นงานก่อนหน้า เป็นต้น
- เงื่อนไขของการตัด (Cutting parameters) เช่น ความลึกตัด, ความเร็วในการตัด, อัตราป้อนตัดและสิ่งแวดล่อม (สารหล่อเย็น, อุณหภูมิ)
- อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน (Work holder)

ในกระบวนการตัดโลหะจะมีอยู่ 7 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการดังกล่าวดังแสดงในรูปที่

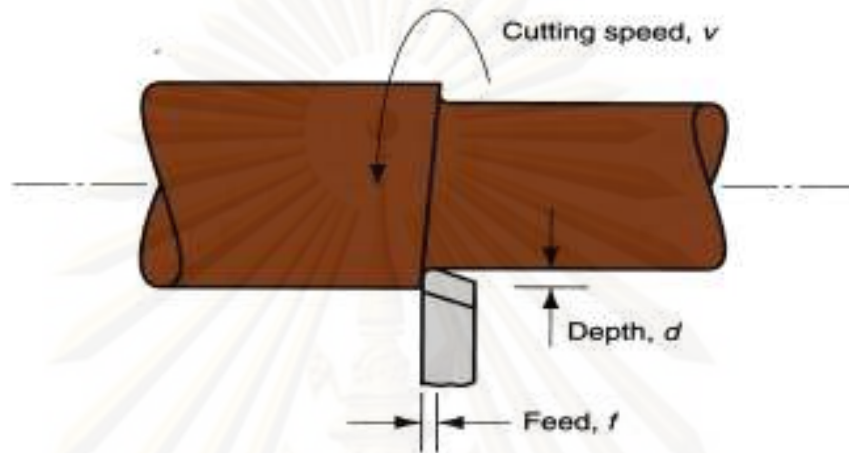
2.2



รูปที่ 2.2 : 7 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด

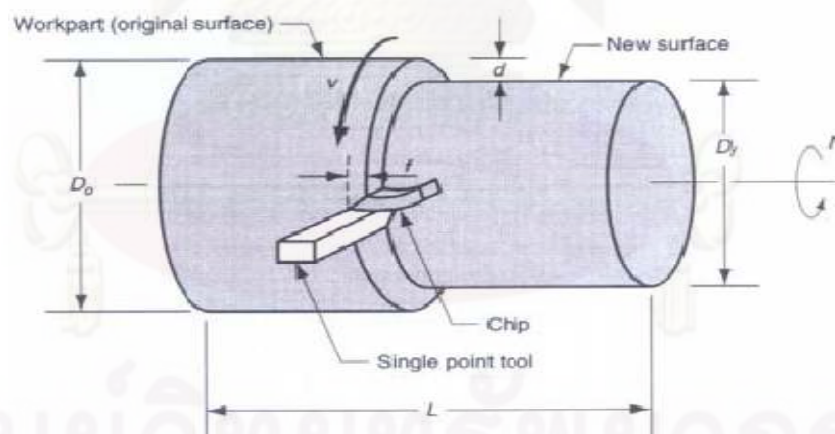
2.1.2 กระบวนการกลึง (Turning) ^{[3][4]}

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการตัดซึ่งใช้มีดตัดคมตัดเดียวในการขจัดเนื้อวัสดุออกจากพื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอกที่กำลังหมุนอยู่ และมีดตัดจะถูกตั้งที่ความลึกตัดที่แน่นอนและถูกป้อนเป็นเส้นตรงไปทางซ้ายมือด้วยความเร็วที่แน่นอนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 : กระบวนการกลึง

2.1.2.1 เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง (Cutting Conditions in turning)



รูปที่ 2.4 : เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง

ความเร็วรอบในกระบวนการกลึงมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการตัดที่พื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอกดังสมการที่ 2-1

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

โดยที่ N (Rotational Speed)

= ความเร็วรอบในการหมุน (รอบ/นาที)

v (Cutting Speed) = ความเร็วในการตัด (เมตร/นาที หรือ ฟุต/นาที)

D_0 (Diameter of workpiece) = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้น (เมตร หรือ ฟุต)

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

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

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

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

โดยที่ f_r (feed rate) = อัตราป้อนตัดมีดเชิงเส้น (มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้วต่อนาที)

f (feed) = อัตราการป้อนมีด (มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้วต่อรอบ)

เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงานจากด้านหนึ่งของชิ้นงานไปอีกด้านหนึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-4

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

โดยที่ T_m (Time of actual machining) = เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน (นาที)

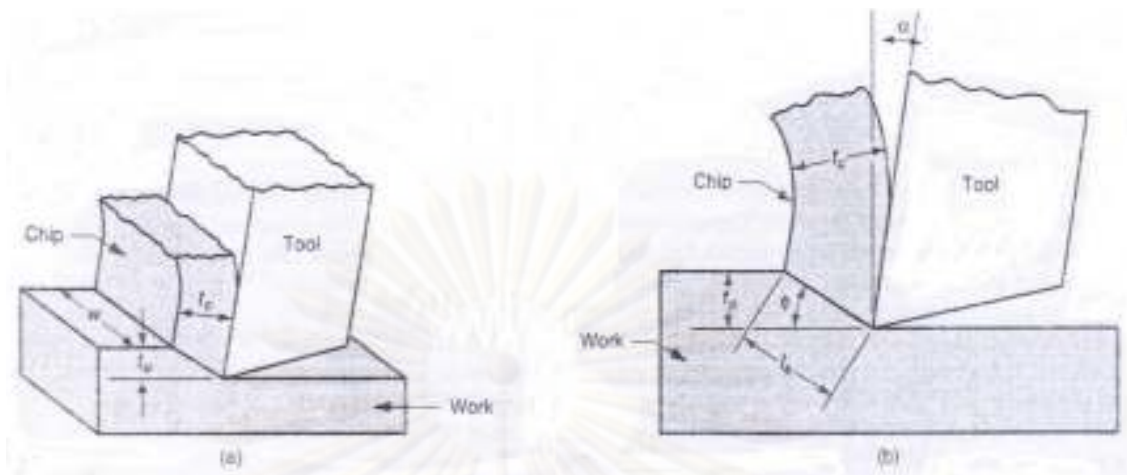
L (Length) = ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร หรือนิ้ว)

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

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

2.1.3 ทฤษฎีการเกิดเศษโลหะ (Theory of chip formation)^[3]

ในความเป็นจริงแล้วกระบวนการตัดโลหะจะเป็นรูปแบบเอียง (Oblique Cutting) และค่อนข้างซับซ้อนต่อการวิเคราะห์ แต่เราก็สามารถใช้รูปแบบการตัดแบบออร์ทोगอนอล (Orthogonal Cutting) ในการวิเคราะห์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และถึงแม้ว่ากระบวนการตัดที่แท้จริงจะเป็นรูปแบบ 3 มิติ แต่ในการตัดแบบออร์ทोगอนอลจะเป็นรูปแบบใน 2 มิติเท่านั้นซึ่งจะทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้นมาก



รูปที่ 2.5 : ภาพ 3 มิติ (a) ของการตัดแบบอโทโกนอล ซึ่งมองลดมิติลงเหลือ 2 มิติ (b)

2.1.3.1 โมเดลการตัดแบบอโทโกนอล (The Orthogonal Cutting Model)

โดยนิยามแล้ว การตัดแบบอโทโกนอลจะใช้มีดตัดที่มีลักษณะเป็นลิ้มซึ่งคมตัดของมีดตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วในการตัด และเมื่อมีดตัดถูกป้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุของชิ้นงาน จะทำให้เกิดเศษโลหะขึ้นตามระนาบเฉือน (Shear Plane) และทำมุมกับระนาบของผิวชิ้นงานเป็นมุมเฉือน (Shear angle) ซึ่งบริเวณระนาบเฉือนจะเป็นบริเวณที่พลังงานเชิงกลส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการตัด และทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของชิ้นงาน

รูปร่างของมีดตัดสามารถแสดงได้ด้วยมุม 2 มุมคือ มุมคาย (Rake angle , α) และมุมหลบ (Clearance angle) โดยมุมคายจะเป็นตัวกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ของเศษคลึงโลหะ ส่วนมุมหลบจะเป็นมุมระหว่างผิวหลบ (flank face) กับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว โดยในระหว่างการตัด คมตัดของมีดจะถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่แน่นอนในระยะที่ต่ำกว่าพื้นผิวของชิ้นงาน รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความลึกตัด (t_c) ในขณะที่เศษโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะเพิ่มขึ้นเป็น t_c อัตราส่วนระหว่าง t_c กับ t_o เรียกว่าอัตราส่วนความหนาของเศษโลหะ (Chip thickness ratio , r) ซึ่งอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2-6 และอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากความหนาของเศษโลหะหลังจากการตัดจะมากกว่าความหนาก่อนการตัดเสมอ

$$r = \frac{t_o}{t_c} \quad (2-6)$$

จากโมเดลการตัดแบบอโทโกนอล เราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของเศษโลหะ, มุมคาย และมุมระนาบเฉือน (Shear plane angle, ϕ) ได้โดยให้ l_s เป็นความยาวของระนาบเฉือน และจาก $t_o = l_s \sin \phi$ และ $t_c = l_s \cos(\phi - \alpha)$ ดังนั้น

$$r = \frac{l_s \sin \phi}{l_s \cos(\phi - \alpha)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2-7)$$

นอกจากนี้ยังสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของ ϕ ได้ดังสมการที่ 2-8

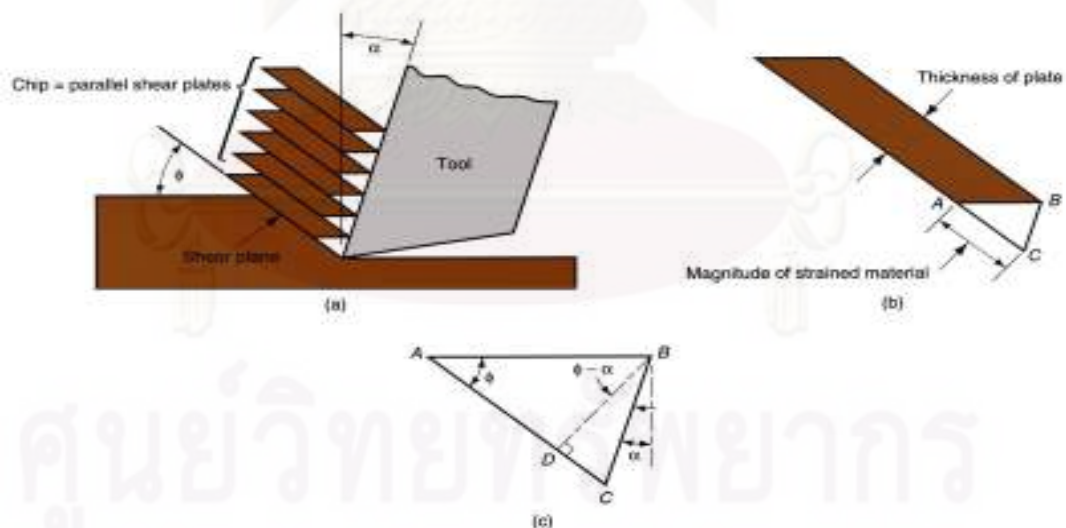
$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (2-8)$$

ความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นตามแนวของระนาบเฉือนสามารถที่จะถูกประมาณได้โดยใช้รูปที่ 2.6 (a) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนรูปร่างแบบเฉือนที่ถูกประมาณด้วยการไหลเลื่อนของแผ่นโลหะที่ขนานกันของการเกิดเศษโลหะ โดยแต่ละแผ่นจะมีความเครียดเฉือนเกิดขึ้นดังรูป 2.6 (b) และจากรูป 2.6 (c) เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2-9

$$\gamma = \frac{AC}{BD} = \frac{AD + DC}{BD} \quad (2-9)$$

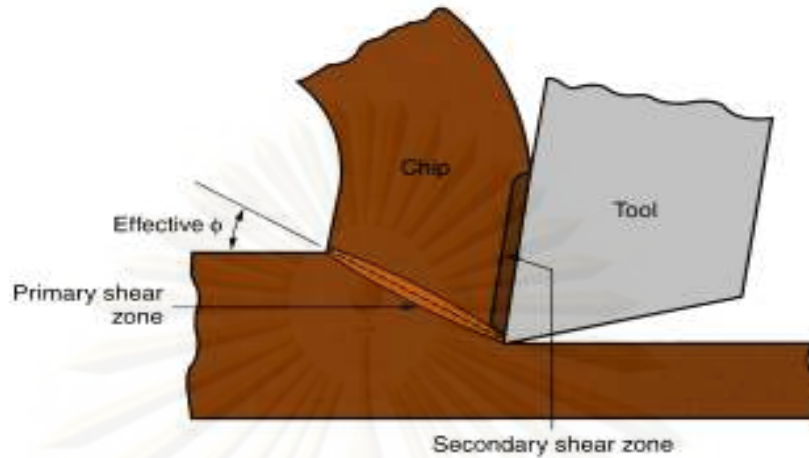
และสามารถถูกทำให้อยู่ในเทอมของนิยามของความเครียดเฉือนในการตัดโลหะได้ดังดังนี้

$$\gamma = \tan(\phi - \alpha) + \cot \phi \quad (2-10)$$



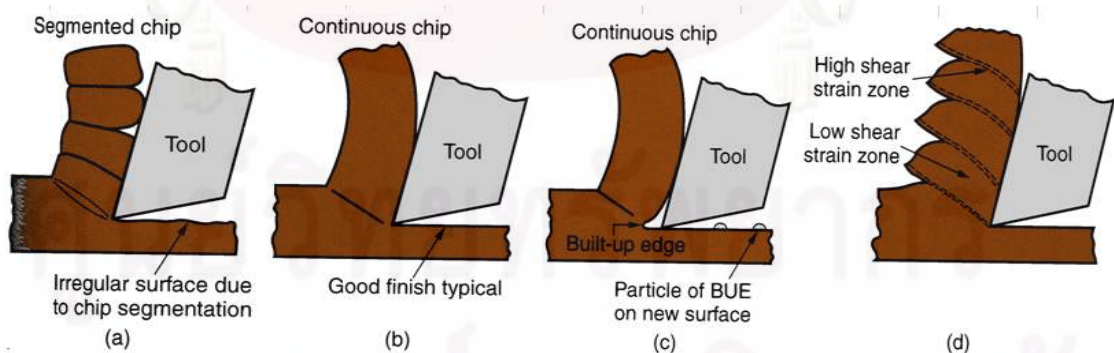
รูปที่ 2.6 : ความเครียดเฉือนระหว่างการเกิดเศษโลหะ : (a) การเกิดเศษโลหะที่ถูกอธิบายด้วยลำดับของการไหลเลื่อนของแผ่นโลหะที่ขนานกัน ; (b) แผ่นโลหะ 1 แผ่น ที่แสดงความเครียดเฉือน; (c) สามเหลี่ยมของความเครียดเฉือนที่ถูกใช้เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2-9 และ

2.1.3.2 การเกิดเศษโลหะ (Chip Formation)



รูปที่ 2.7 : บริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 และบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2

ในการเกิดเศษโลหะจริงในการตัดจะแตกต่างจากการตัดแบบอโทโกนอล เพราะว่าการเปลี่ยนรูปแบบเฉือนไม่ได้เกิดตามแนวระนาบ แต่จะเกิดเป็นบริเวณ (Zone) และยังมีการเฉือนอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในเศษโลหะ ซึ่งถูกอ้างอิงเป็นแรงเฉือนในบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2 ที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างเศษโลหะและมิตตัดตามที่เศษโลหะที่เลื่อนไปตามแนวของผิวคายของมิตตัด โดยบริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 (Primary shear zone) และบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2 (Secondary shear zone) แสดงดังรูปที่ 2.7 นอกจากนี้ในการเกิดเศษโลหะนั้นจะขึ้นกับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัด โดยรูปแบบการเกิดของเศษโลหะสามารถแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบหลัก ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 : 4 รูปแบบหลักของการเกิดเศษโลหะในการตัด: (a) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง , (b) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง , (c) เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่มีการยึดติดที่คมตัด , (d) เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย

2.1.3.2.1 เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous chip)

เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่องนี้เกิดในกรณีที่ชิ้นงานเป็นวัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อและบรอนซ์ ซึ่งถูกตัดด้วยความเร็วในการตัดต่ำ โดยเศษโลหะรูปแบบนี้มักจะเป็นสภาพของเศษโลหะที่มีการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ (บางครั้งเศษโลหะพวกนี้จะติดกันอยู่อย่างหลวมๆ) เนื่องจากช่วงเวลาที่เศษโลหะสัมผัสกับเครื่องมือตัดเป็นช่วงเวลาดสั้น ๆ ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจึงติดไปกับเศษโลหะเสียเป็นส่วนมาก คุณสมบัติของเครื่องมือตัดจึงต่ำลง ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดสูงขึ้นได้ และผิวชิ้นงานที่ได้อยู่ในขั้นปานกลาง นอกจากนี้ ความเสียดทานระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะ, อัตราป้อนตัดและความลึกตัดที่สูงจะช่วยให้เกิดเศษโลหะในรูปแบบนี้

2.1.3.2.2 เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous chip)















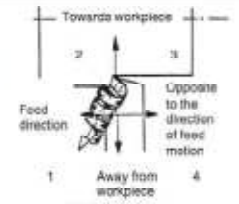


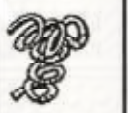

เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ, สแตนเลสและอลูมิเนียม-ผสม เป็นต้น โดยชิ้นงานถูกตัดที่ความเร็วในการตัดที่สูงและมีอัตราป้อนและความลึกตัดน้อยๆ ซึ่งผิวชิ้นงานที่ได้เรียบ นอกจากนี้คมตัดของมีดที่คมและความเสียดทานระหว่างมีดตัดและเศษโลหะที่ต่ำจะช่วยให้เกิดเศษโลหะในรูปแบบนี้ แต่ในขณะที่เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่ค่อนข้างยาวจะเป็นสาเหตุให้เกิดการพันกันของเศษโลหะรอบๆมีดตัดและชิ้นงานซึ่งส่งผลให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีความเรียบผิวแย่งลง และเพื่อที่จะแก้ไขปัญหานี้ มีดตัดในกระบวนการกลึงมักจะมีตัวหักเศษโลหะ (Chip Breaker)

2.1.3.2.3 เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่มีการเชื่อมติดที่คมตัด (Continuous chip with built-up edge)

เนื่องจากขณะเกิดการตัดวัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว ด้วยความเร็วในการตัดต่ำถึงปานกลาง ความเสียดทานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเศษโลหะและมิดตัดมีคุณสมบัติสูง ทำให้มีเนื้อบางส่วนของเศษโลหะเชื่อมติดอยู่ที่บริเวณคมตัดและผิวคาย โดยการเกิดในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า การเชื่อมติดที่คมตัด (Built-up edge , BUE) ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ จึงเกิดการพอกตัวเพิ่มของส่วนที่เชื่อมติด เมื่อส่วนนี้พอกตัวเพิ่มสูงขึ้นจนถึงขนาดที่เรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size) ชิ้นส่วนนี้จะหลุดออกมาซึ่งบางส่วนจะติดไปกับเศษโลหะและบางส่วนจะฝังตัวอยู่บนผิวสำเร็จ ซึ่งจะทำให้คุณภาพของผิวสำเร็จแย่งลง โดยการเชื่อมติดที่คมตัดจะเกิดเป็นวัฏจักร คือเกิดขึ้นแล้วหลุดออกไปแล้วก็เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งจะเพิ่มอัตราการสึกหรอของมีดตัด เนื่องจากส่วนที่หลุดออกไปนี้จะมีเนื้อของมีดตัดติดออกไปด้วย ซึ่งการเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้นจะมีผลให้ส่วนที่เชื่อมติดอ่อนตัวลง จึงทำให้ขนาดวิกฤตเล็กลงด้วย ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วตัดขึ้นสูงเพียงพอ จะไม่พบส่วนที่เชื่อมติดนี้











2.1.3.2.4 เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย (Serrated chips)

เศษโลหะในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่องและมีรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย ซึ่งเกิดจากการเกิดเศษโลหะแบบเป็นวัฏจักรของการสับเปลี่ยนกันระหว่างความเครียดเฉือนที่สูงและความเครียดเฉือนที่ต่ำโดยพื้นที่บริเวณกว้างจะมีความเครียดเฉือนต่ำและพื้นที่ส่วนน้อยเป็นบริเวณที่มีความเครียดเฉือนสูงดังรูปที่ 2.8 (d) และการเกิดเศษโลหะลักษณะนี้จะเกิดกับวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานอุณหภูมิต่ำพร้อมทั้งมีความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้น เช่น ไทเทเนียม เป็นต้น

1. RIBBON CHIPS	2. TUBULAR CHIPS	3. SPIRAL CHIPS	4. WASHER-TYPE HELICAL CHIPS	5. CONICAL HELICAL CHIPS	6. ARC CHIPS	7. ELEMENTAL CHIPS	8. NEEDLE CHIPS
							
1.1. Long	2.1. Long	3.1. Flat	4.1. Long	5.1. Long	6.1. Connected		
							
1.2. Short	2.2. Short	3.2. Conical	4.2. Short	5.2. Short	6.2. Loose		
							
1.3. Snarled	2.3. Snarled		4.3. Snarled	5.3. Snarled			

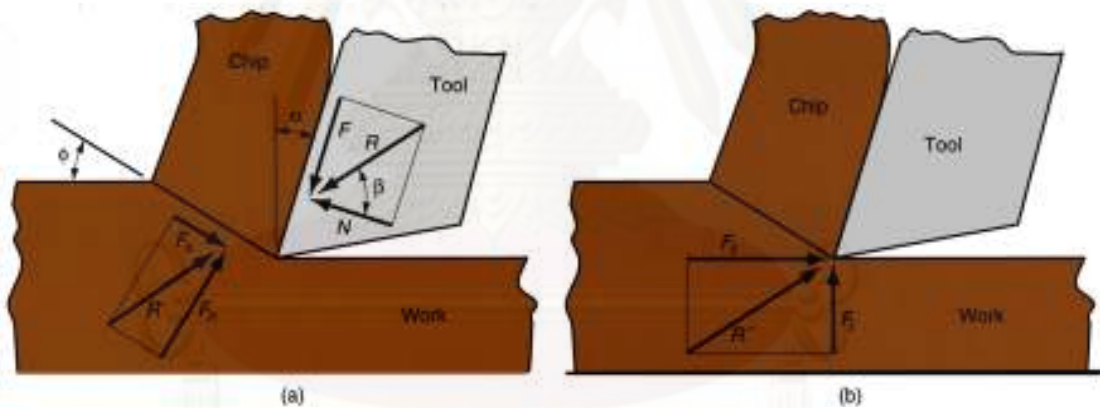
รูปที่ 2.9 : การจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1977

นอกจากนี้ยังมีการจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดจากกระบวนการตัดโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 โดยขึ้นกับขนาดและรูปร่างของมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งแบ่งเป็น 8 กลุ่มตามรูปร่างของเศษโลหะ โดยในแต่ละกลุ่มจะถูกแบ่งย่อยตามขนาด (ยาว, สั้น) และตามลักษณะทางกายภาพ (พันกัน, เป็นชิ้นเล็กๆ) ของมันอีกที ทั้งนี้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงอาจเป็นแบบริบบิ้น, แบบหยิกหยอย หรือแบบเกลียว เป็นต้น และจากรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงรูปแบบของเศษโลหะที่ยอมรับได้และแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น โดยรูปแบบของเศษโลหะแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นนั้นอาจจะไปเสียดสีผิวหน้าชิ้นงานที่ตัดแล้วอีกครั้งหรือเกิดการพันยุ่งเหยิงกับมีดตัด และยากต่อการนำเศษโลหะเหล่านั้นออกจากการตัด ซึ่งลักษณะของเศษโลหะแบบนี้จะเกิดอันตรายกับพนักงานที่ปฏิบัติงานอยู่ด้วย ผลกระทบของการทำงานไม่ดีจะทำให้ผิวชิ้นงานเสียหาย และเศษโลหะก็จะไปรวมและเกาะติดอยู่ที่มุมของมีดตัด

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

รูปที่ 2.10 : แสดงรูปแบบของเศษโลหะที่ยอมรับได้และแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

2.1.4 แรงในการตัดโลหะ (Forces in Metal Cutting) ^[3]



รูปที่ 2.11 : แรงในการตัดโลหะ: (a) แรงที่กระทำต่อเศษโลหะในการตัดแบบอโทโกนอล และ (b) แรงที่กระทำต่อมีดตัดที่สามารถถูกวัดได้

การพิจารณาแรงที่กระทำต่อเศษโลหะโดยมีดตัดในการตัดแบบอโทโกนอล ดังรูปที่ 2.11 (a) นั้นสามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 2 แรงซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน คือ แรงเสียดทาน (Friction force, F) ซึ่งเป็นแรงเสียดทานระหว่างมีดตัดและเศษโลหะที่ต่อต้านการไหลของเศษโลหะตามแนวของผิวคายของมีดตัดและแรงที่ตั้งฉากกับแรงเสียดทาน (Normal force to friction, N) โดยส่วนประกอบของแรงทั้ง 2 แรงนี้สามารถถูกใช้เพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างมีดตัดและเศษโลหะได้ดังสมการที่ 2-11

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2-11)$$

แรงเสียดทานและแรงตั้งฉากของมันสามารถรวมแบบเวกเตอร์เพื่อให้ได้แรงลัพธ์ (Resultant force , R) ซึ่งวางตัวทำมุม β กับแรงตั้งฉากของแรงเสียดทาน โดยมุมนี้ถูกเรียกว่ามุมเสียดทาน (Friction angle , β) และมุมนี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน ดังสมการที่ 2-12

$$\mu = \tan \beta \quad (2-12)$$

นอกจากแรงที่กระทำบนเศษโลหะแล้ว ยังมีอีก 2 แรงที่เกิดขึ้นบนเศษโลหะ ซึ่งก็คือแรงเฉือน (Shear force , F_s) เป็นแรงที่ส่งผลให้เกิดการเสียรูปทรงที่เกิดขึ้นในระนาบเฉือน และแรงตั้งฉากกับแรงเฉือน (Normal force to shear , F_n) และจากแรงเฉือนนี้ เราสามารถหาค่าความเค้นเฉือนซึ่งกระทำตามแนวระนาบเฉือนระหว่างชิ้นงานและเศษโลหะได้ดังสมการที่ 2-13

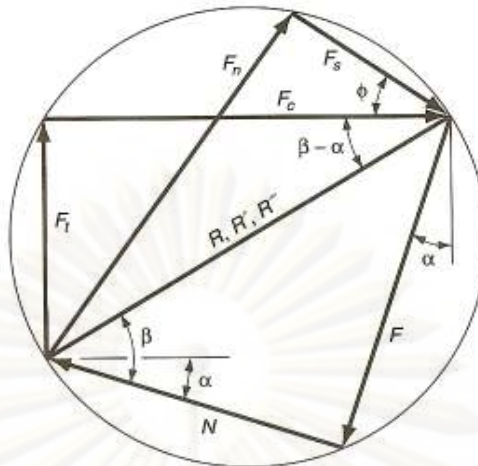
$$S = \frac{F_s}{A_s} \quad (2-13)$$

โดยที่ A_s = พื้นที่ของระนาบเฉือน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t \cdot w}{\sin \phi} \quad (2-14)$$

ความเค้นเฉือนในสมการที่ 2-13 นั้นสามารถแทนได้ด้วยระดับของความเค้นที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการตัด ดังนั้นความเค้นนี้จะเท่ากับความต้านทานแรงเฉือน (shear strength) ของวัสดุชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขของการตัดที่เกิดขึ้น และการรวมแบบเวกเตอร์ของแรง F_s และ F_n จะได้แรงลัพธ์ (R') ซึ่งต้องมีขนาดเท่ากับแรงลัพธ์ R และมีทิศทางตรงข้ามกันเพื่อให้เกิดความสมดุลของแรงที่กระทำต่อเศษโลหะ

จากแรงทั้ง 4 แรงที่ได้กล่าวมานั้น ไม่มีแรงใดที่สามารถที่จะถูกวัดได้โดยตรงจากกระบวนการ เพราะทิศทางของมันแปรผันตามรูปทรงของมีดตัดและเงื่อนไขของการตัด แต่อย่างไรก็ตาม มันมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เครื่องมือวัดแรงที่ถูกเรียกว่าไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ติดตั้งไปที่มีดตัดเพื่อทำการวัดแรงที่เกิดขึ้น โดยแรงที่วัดได้จะเป็นแรงในการตัด (Cutting force , F_c) ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกันกับความเร็วในการตัด และแรงในแนวรัศมี (Thrust force , F_t) ซึ่งตั้งฉากกับแรงในการตัด (F_c) ซึ่งผลลัพธ์จากการรวมกันแบบเวกเตอร์ของแรงทั้ง 2 นี้จะเท่ากับแรง R'' ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (b)



รูปที่ 2.12 : แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (F , N , F_s , F_n , F_c , F_t)

จากการใช้แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (Force diagram) ดังรูปที่ 2.12 นั้นจะสามารถหาค่าของแรง F , N , F_s และ F_n ได้โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของแรงที่สามารถวัดได้ (F_c , F_t) ซึ่งจะได้ค่าของแรงต่างๆดังสมการที่ 2-15 ถึง 2-18

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (2-15)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2-16)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (2-17)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2-18)$$

2.1.5 การสึกหรอของมีดตัด (Tool Wear) ^{[1][3][4][5]}

ในการใช้มีดตัดในกระบวนการตัดนั้น แรงในการตัดและอุณหภูมิในการตัดที่สูงจะเป็นสภาพแวดล้อมที่ไม่ส่งผลดีต่อมีดตัด โดยถ้าแรงในการตัดสูงเกินไป มีดตัดจะเกิดการแตกหัก และถ้าอุณหภูมิในระหว่างการตัดสูงเกินไป วัสดุจะอ่อนตัวลงและเกิดการเสียหาย ซึ่งถ้าทั้ง 2 เงื่อนไขดังกล่าวไม่ได้สูงเกินไปและนำมาซึ่งความเสียหายของมีดตัด ก็ยังเกิดการสึกหรออย่างต่อเนื่องของมีดตัดซึ่งนำไปสู่ความเสียหายของมีดตัด ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคโนโลยีในด้านของมีดตัดเข้ามาช่วย โดยจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลักใน 2 ด้าน คือด้านของวัสดุของมีดตัด (Tool material) และรูปทรงของเครื่องมือตัด (Tool geometry) ซึ่งในด้านวัสดุของมีดตัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง, อุณหภูมิ และการสึกหรอในกระบวนการตัด ส่วนในด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัดและสำหรับกระบวนการตัด ทั้งนี้เพื่อให้อายุของมีดตัดยาวนานขึ้นโดยมี 3 สาเหตุหลักๆที่เป็นไปได้ที่ทำให้มีดตัดเกิดความเสียหาย ซึ่งก็คือ

1.) การเสียหายแบบแตกหัก (Fracture failure)

รูปแบบของการเสียหายแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อแรงในการตัดที่จุดตัดมากเกินไป โดยจะนำมาซึ่งความเสียหายแบบทันทีทันใดเนื่องจากการแตกหัก

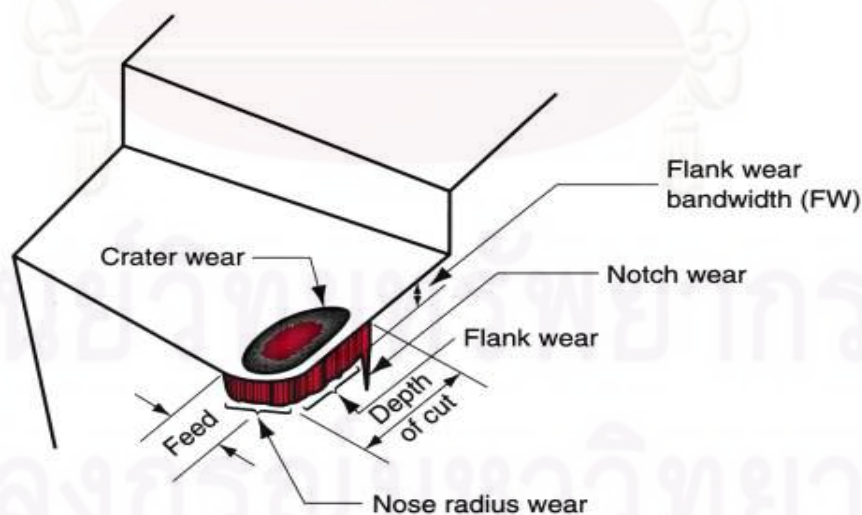
2.) การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature failure)

การเสียหายนี้เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการตัดสูงเกินไปสำหรับวัสดุของมีดตัด ทำให้วัสดุของมีดตัดอ่อนตัวลง ซึ่งจะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกและสูญเสียความคมของคมตัดไป

3.) การสึกหรอแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear)

การสึกหรออย่างค่อยเป็นค่อยไปของคมตัดจะทำให้มีดตัดเสียรูปทรงและลดประสิทธิภาพในการตัดลง และสุดท้ายมีดตัดก็จะเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้

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

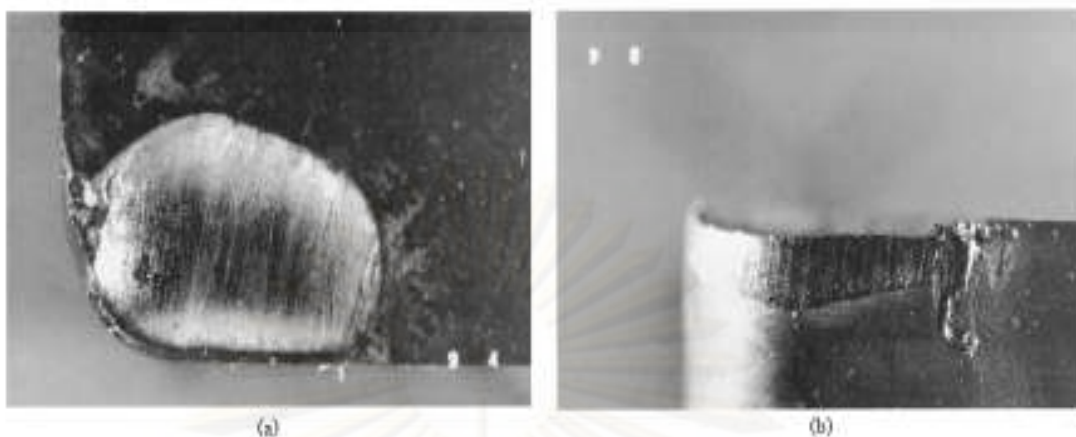


รูปที่ 2.13 : ภาพการสึกหรอของมีดตัด แสดงตำแหน่งและรูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษกิ่งโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

กลไกการสึกหรอ	สาเหตุของการเกิด	ตำแหน่งการสึกหรอ
การเสียดสี (Abrasion)	เมื่อเกิดเศษโลหะขึ้นระหว่างที่โลหะทั้งสองชนิดกำลังขัดสีกันอยู่นอกภาคที่แข็งของชิ้นงานจะทำให้บางส่วนมีดตัดค่อยๆหลุดติดออกมา	- บนผิวหลบ - บนผิวคาย
การยึดติด (Adhesive Wear)	โลหะสองอย่างที่ขัดสีกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง ทำให้โลหะที่อ่อนกว่าส่วนหนึ่งเกิดการหลอมละลายไปติดกับโลหะที่แข็งกว่าซึ่งในนี้ก็คือมีดตัด ทำให้โลหะที่แข็งกว่าเกิดปมสูงขึ้น ซึ่งปมสูงนั้นจะหลุดออกไปในระหว่างที่โลหะทั้งสองทำการขัดสีกันต่อ	- บนผิวคาย
การแพร่ (Diffusion)	เกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างผิวหน้าของวัสดุ 2 ชนิด อะตอมของมีดตัดจะหายไป ความแข็งแรงลดลงทำให้ง่ายต่อการเกิดการเสียดสีและการยึดติด และจะเกิดได้มากขึ้นเมื่อบริเวณที่เกิดการสัมผัสมีอุณหภูมิสูง และมีความเร็วต่ำ	- บนผิวคาย
ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction)	ความเร็วตัดสูงและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เครื่องมือตัดอ่อนลงพร้อมกับเกิดการสึกหรอที่ขอบคมตัดขึ้น	- บนผิวคาย
การเสียรูปแบบ พลาสติก (Plastic deformation)	เกิดอุณหภูมิที่สูงบริเวณคมตัด คมตัดจะเริ่มเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ทำให้ง่ายต่อการเกิดการเสียดสี	- บนผิวหลบ

ตารางที่ 2.1 : กลไกที่ทำให้เกิดการสึกหรอบนมีดตัด

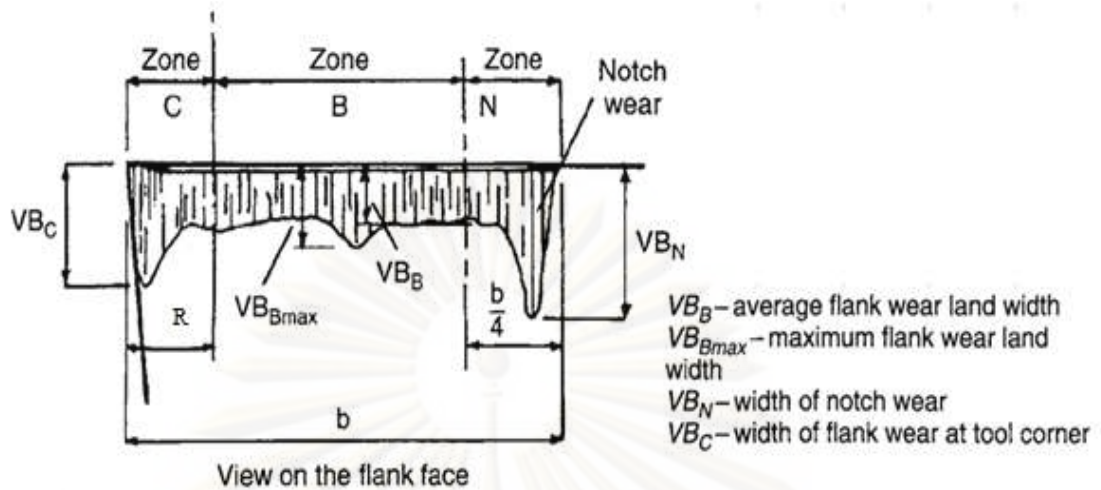


รูปที่ 2.14 : (a) รอยสึกบนผิวคาย และ (b) รอยสึกบนผิวหลบบนมีดตัดซีเมนต์ कारไบด์

กลไกการสึกหรอทั้ง 5 แบบจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นในสภาวะที่ใช้ความเร็วในการตัดสูงๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกของการแพร่และปฏิกิริยาเคมีจะยิ่งเกิดง่ายที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเห็นว่าเกิดการสึกหรอที่ 2 ตำแหน่งหลักๆคือ เกิดขึ้นที่ด้านบนของผิวคายและด้านผิวหลบ ซึ่งเรียกว่า crater wear และ flank wear ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งใช้มีดคมตัดเดียวในการแสดงตำแหน่งและรูปแบบของการสึกหรอของมีดตัด และรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นภาพขยายของรอยสึกบนผิวคายและผิวหลบ

2.1.5.1 การสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear)

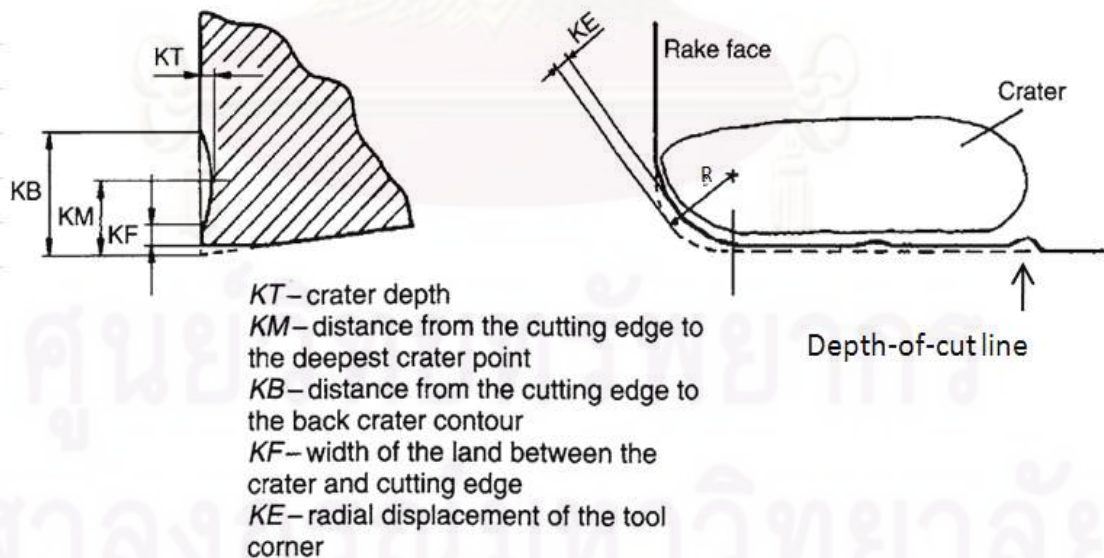
การสึกหรอรูปแบบนี้เกิดขึ้นบนผิวหลบของมีดตัด ซึ่งเกิดจากการขัดสีหรือเสียดสีกันระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานที่กลิ้งแล้ว ซึ่งเมื่อการสึกหรอบนผิวหลบเกิดขึ้นมากพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและมีดตัดก็มากขึ้น ดังนั้นจะมีการขัดสีเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นและพื้นผิวที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ โดยวิธีการวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหลบนี้แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งให้ b เป็นความยาวของการสึกหรอบนผิวหลบ และความยาวนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ เขต C, เขต B และเขต N เพื่อทำการวัดขนาดของการสึกหรอ โดยเขต C จะวัดจากรัศมีปลายมีด (Nose radius, R) ของมีดตัด ต่อมาเขต N จะเป็นความยาวของการสึกหรอหารด้วย 4 ($b/4$) โดยวัดจากขอบปลายสุดของการสึกหรอเข้ามาหาคมตัดของมีดตัด ในเขต N นี้จะพบการสึกหรอลักษณะแหว่ง (Notch wear) ด้วยซึ่งเกิดขึ้นบริเวณปลายสุดของความลึกตัด ซึ่งวัดขนาดการสึกหรอได้ด้วยค่าความกว้างของการสึกหรอลักษณะแหว่ง (VB_N) และสุดท้าย เขต B จะเป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างเขต C กับเขต N ซึ่งในส่วนนี้จะใช้วัดขนาดการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยใช้ค่าความกว้างเฉลี่ยของการสึกหรอ (VB_B) แต่อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะดูความแปรปรวนที่เกิดขึ้น จะทำการวัดขนาดของความกว้างสูงสุดของการสึกหรอ (VB_{BMAX}) ด้วย



รูปที่ 2.15 : การวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหยาบ

2.1.5.2 การสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear)

การสึกหรอบนผิวคายจะมีลักษณะเป็นหลุมหรือเป็นร่องลึก เกิดใกล้ๆกับคมตัด (รูปที่ 2.14 a) ซึ่งการสึกหรอบนผิวคายเกิดจากการไหลของเศษโลหะไปบนผิวคายของมีดกัด และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างมีดตัดกับวัสดุของชิ้นงาน เมื่อการสึกหรอบนบนผิวคายเกิดขึ้นมาก ความแข็งแรงของคมตัดจะลดลงและในที่สุดก็จะทำให้คมตัดเกิดการแตกหักได้ โดยวิธีการวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวคายนี้นี้แสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งในการวัดจะใช้ค่าความลึก (KT) โดยวัดจากจุดที่ลึกที่สุดและความกว้าง (KB - KF) ของหลุมที่เกิดขึ้นเป็นตัววัด



รูปที่ 2.16 : การวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวคาย

2.1.5.3 การสึกหรอที่ปลายมีด (Nose wear)

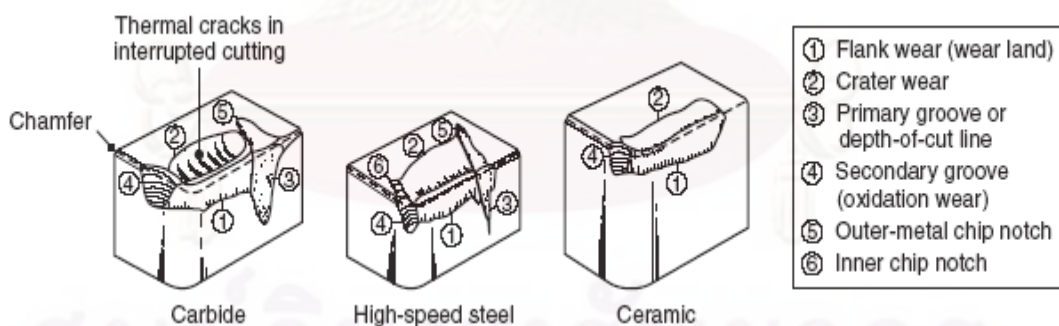
การสึกหรอที่ปลายมีดเป็นการสึกหรอที่ปลายมีดตัดหรือจุดที่เกิดการเสียดสีระหว่างปลายมีดตัดกับโลหะที่กำลังทำการตัดเฉือน ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งการสึกหรอที่ปลายมีดบนคมตัดจะส่งผลให้มีดตัดที่อ,ส่งผลต่อรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น ,คุณภาพของผิวชิ้นงาน และทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างมีดตัดและชิ้นงานมากขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.17 : การสึกหรอที่ปลายมีด

2.1.5.4 การสึกหรอลักษณะแหวน (Notch wear)

การสึกหรอลักษณะแหวนเกิดขึ้นบนผิวหลังของมีดตัด ซึ่งลักษณะของรอยสึกจะเกิดที่เส้นของความลึกตัด (Depth-of-cut line) ดังรูปที่ 2.18 (หมายเลข 3) และเป็นรอยบากที่กว้างเนื่องจากการสั่นของกระบวนการตัด โดยเมื่อเกิดการสึกหรอในลักษณะนี้ขึ้นอาจจะส่งผลให้มีดตัดเกิดการแตกหักได้

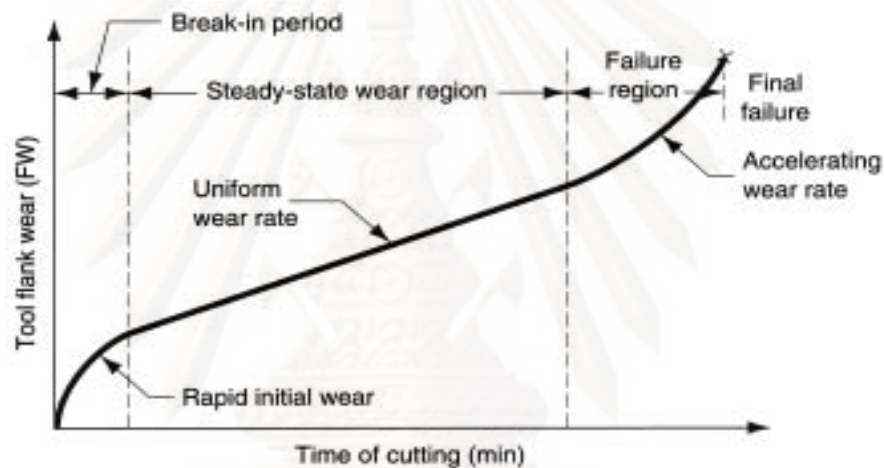


รูปที่ 2.18 : รูปแบบต่างๆของการสึกหรอบนวัสดุมีดตัดที่ต่างกัน

2.1.6 อายุใช้งานของมีดตัดและสมการอายุใช้งานของมีดตัดของเทย์เลอร์ (Tool life and the Taylor tool life equation)^[3]

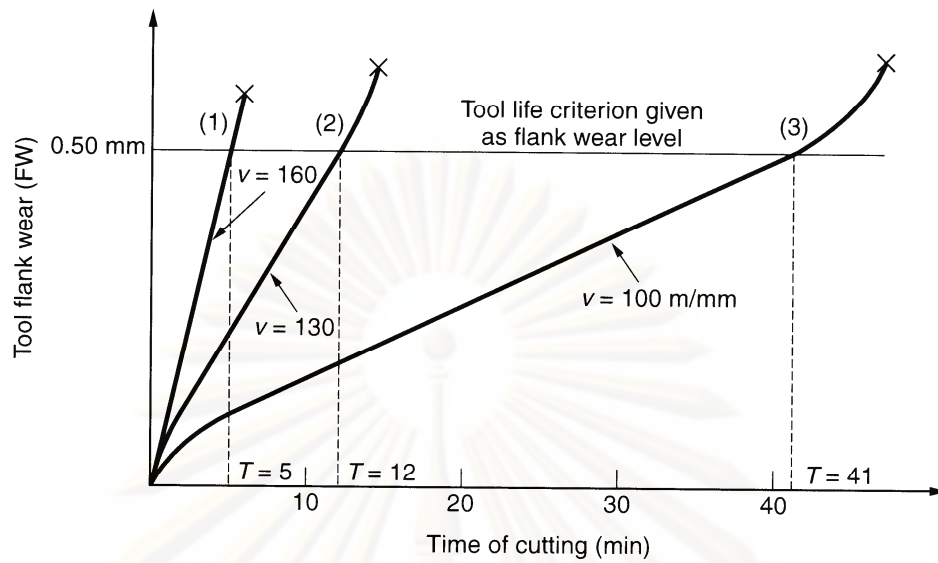
ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่ากลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นล้วนส่งผลต่อระดับการเพิ่มขึ้นของการสึกหรอบนมีดตัด ซึ่งการสึกหรอของมีดตัดนั้นมีความสัมพันธ์กับเวลาในการตัดดังรูปที่ 2.19 และถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ที่แสดงดังรูปจะเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิวหลัง แต่

ความสัมพันธ์นี้ยังสามารถใช้ได้กับการสึกหรอบนผิวคายด้วย ซึ่งจากรูปจะพบว่าปริมาณการสึกหรอบนผิวของเครื่องมือตัดกับเวลาที่ใช้ในการตัดแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง โดยในส่วนของ การสึกหรอช่วงแรก (Initial wear) คมตัดจะสึกหรออย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในระยะเวลา 2-3 นาที เนื่องจากการใช้งานมีดตัดที่มีความสมบูรณ์ ในบริเวณส่วนปลายสุดของคมตัดจะมีลักษณะเป็นสันแหลม ซึ่งง่ายต่อการสึกหรอเป็นอย่างมาก เมื่อเกิดการสึกหรอในช่วงนี้ระยะหนึ่ง อัตราการสึกหรอจะลดลง แล้วเข้าสู่ช่วงการสึกหรออัตราคงที่เมื่อเทียบกับเวลาที่ผ่านไป (Steady state wear) ซึ่งเป็นการสึกหรอตามปกติในธรรมชาติ จนถึงเมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้นถึงระยะที่สาม คือ การสึกหรอที่รวดเร็ว (Accelerating wear) เนื่องจากคมตัดเกิดการสึกหรอมาก จนทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นมาก และอุณหภูมิสูงขึ้นมาก จึงเป็นเหตุที่ทำให้เร่งการสึกหรอให้เร็วขึ้น



รูปที่ 2.19 : ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอบนผิวคากับเวลาที่ใช้ในการตัด

ความชันของเส้นโค้งของการสึกหรอในช่วงที่ 2 จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัด โดยวัสดุของชิ้นงานที่แข็งกว่าจะนำมาซึ่งอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าในวัสดุชิ้นงานที่อ่อน และในทำนองเดียวกัน ความเร็วในการตัด, อัตราป้อนตัด และความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้อัตราการสึกหรอที่สูงขึ้นเช่นกัน โดยความเร็วจะส่งผลต่อการสึกหรอมากที่สุด และถ้านำเส้นโค้งของการสึกหรอมาพล็อตระหว่างความเร็วในการตัดเทียบกับเวลาจะได้ผลดังรูปที่ 2.20 ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าความเร็วในการตัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นด้วยและทำให้ระดับของการสึกหรอถึงค่า 0.5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวคาลบเร็วกว่าของความเร็วในการตัดที่ต่ำกว่า



รูปที่ 2.20 : ผลกระทบของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอบนผิวหลบ โดยให้เกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวหลบเป็น 0.5 มิลลิเมตร

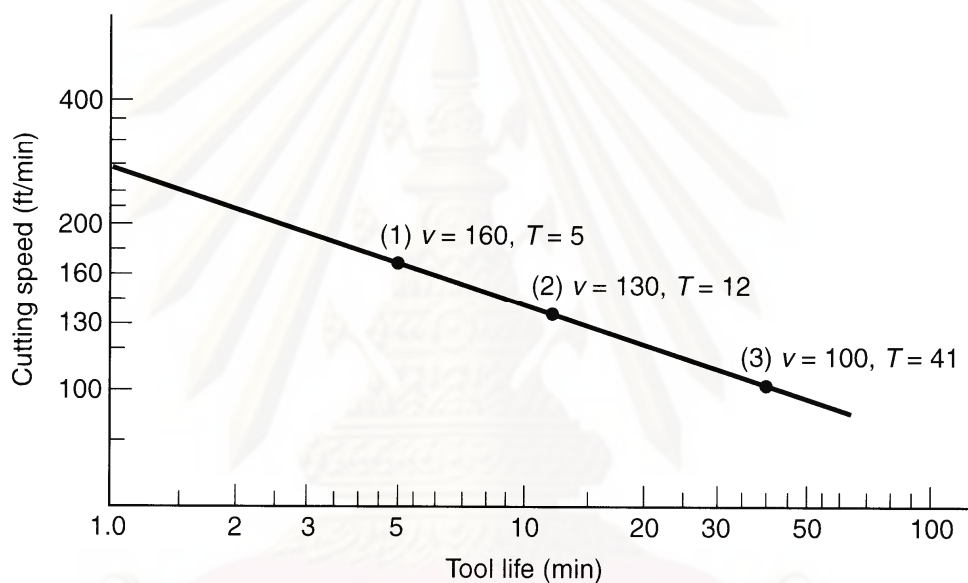
อายุการใช้งานของมีด (Tool life) ถูกกำหนดเป็นระยะเวลาของการตัดที่มีดตัดสามารถใช้งานได้ หรือระยะเวลาที่มีดตัดเริ่มใช้จนกระทั่งมีดตัดเสียหายอย่างมากจนไม่สามารถใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตจริงนั้น ไม่สามารถใช้งานมีดตัดจนกระทั่งมีดตัดเสียหายได้ เนื่องจากความยากในการลับคมมีดตัดใหม่, ปัญหาในเรื่องคุณภาพของชิ้นงาน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

- 1.) มีดตัดถูกใช้งานจนกระทั่งคมตัดเสียหาย (การเสียหายแบบแตกหัก, การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ หรือการสึกหรอจนกระทั่งมีดตัดไม่สามารถใช้งานต่อไปได้)
- 2.) พนักงานใช้สายตาในการตรวจสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้น ซึ่งเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดถูกกำหนดโดยขึ้นอยู่กับ การตัดสินใจและความสามารถของพนักงานแต่ละคน
- 3.) พนักงานใช้เล็บมือในการตรวจสอบคมตัดของมีดตัด
- 4.) พนักงานตัดสินใจจากเสียงของกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนไป
- 5.) เศษโลหะเริ่มพันกันเป็นสายยาวและยากต่อการจัดการ
- 6.) พื้นผิวสุดท้ายของงานมีคุณภาพลดลง
- 7.) การใช้พลังงานในการตัดเพิ่มขึ้น โดยวัดจากมิเตอร์ที่ต่ออยู่กับเครื่องจักร

- 8.) การนับจำนวนชิ้นงาน โดยพนักงานจะทำการวัดจำนวนชิ้นงานที่ทำได้ และทำการเปลี่ยนมีดตัดเมื่อถึงจำนวนที่กำหนดไว้
- 9.) การนับเวลาที่ใช้ในการตัดทั้งหมด ซึ่งหลักการคล้ายกันกับการวัดจำนวนชิ้นงาน

2.1.6.1 สมการอายุใช้งานของมีดตัดของเทย์เลอร์ (Taylor Tool Life Equation)

จากรูปที่ 2.20 ถ้านำค่าอายุการใช้งานของมีดตัดของเส้นโค้งการสึกหรอทั้ง 3 ค่ามาทำพล็อตกราฟ natural log-log ของความเร็วในการตัดกับอายุการใช้งานของมีดตัด จะได้ผลของความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 : Natural log-log กราฟระหว่างความเร็วในการตัดกับอายุการใช้งานของมีดตัด

ความสัมพันธ์นี้ได้ถูกค้นพบโดย Frederick W. Taylor ในช่วงทศวรรษที่ 1900 โดยแสดงความสัมพันธ์นี้ออกมาในรูปแบบสมการ ซึ่งต่อมาถูกเรียกว่าสมการอายุการใช้งานของเทย์เลอร์ ดังสมการที่ 2-19

$$v \times T^n = C \quad (2-19)$$

โดยที่ v (Cutting Speed) = ความเร็วในการตัด (เมตร/นาที หรือ ฟุต/นาที)

T (Tool life) = อายุการใช้งานของมีดตัด (นาที)

n = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุของมีดตัด

C = ค่าที่ขึ้นอยู่กับวัสดุของมีดตัด, วัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัด

การตัด

2.1.7 วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool Materials) ^{[3][5]}

จาก 3 สาเหตุหลักที่ทำให้มีดตัดเกิดความเสียหายนั้น สามารถที่จะใช้ในการกำหนดคุณสมบัติที่สำคัญที่ควรต้องมีในวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด ซึ่งก็คือ ความแกร่ง (Toughness) ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียว โดยวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดต้องมีค่าความแกร่งที่สูงเพื่อที่วัสดุจะสามารถดูดซับพลังงานโดยที่ไม่แตกหักได้ , ความแข็งที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) เป็นความสามารถของวัสดุที่จะยังคงความแข็งที่อุณหภูมิสูง และการต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) โดยวัสดุที่ใช้ในการทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน

1.) เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะ ตีแป มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุมีดตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูกแล้วลับให้คมได้ง่าย แต่ความแข็งและการทนต่อการสึกหรอต่ำสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง มีดตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำ

2.) เหล็กกล้าเร็วสูง (High-speed steels)

ใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี

3.) โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys)

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

4.) คาร์ไบด์ (Cemented or Sintered carbide)

มีความแข็งสูงทุกอุณหภูมิ โมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ ทังสเตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบแห้งได้

5.) โคตต์ ทูล (Coated tools)

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

6.) เซรามิก (Ceramics)

ทำจากอณูโมเลกุลที่มีความแข็งแรงและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขัดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดัดขึ้นรูปไม่ได้ไม่ทนต่อการกระแทก

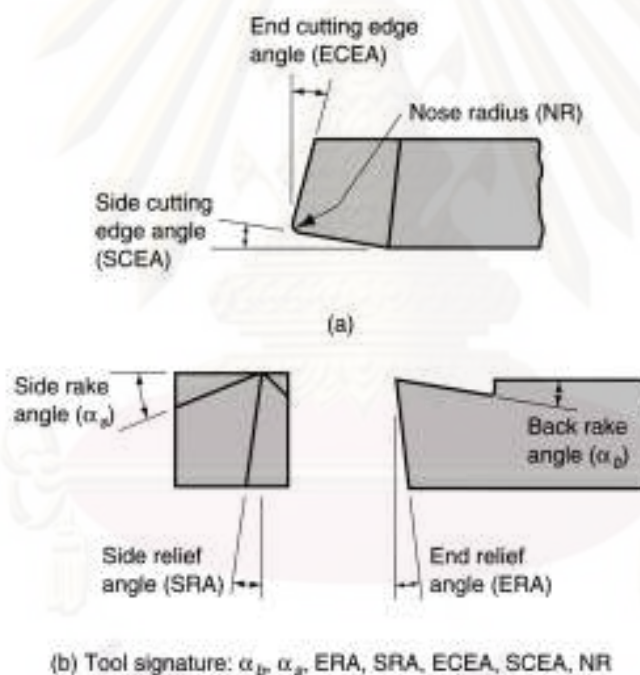
7.) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride)

เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ทนต่อการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือนเหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง

8.) เพชร (Diamond)

ทนต่อการสึกหรอได้ดี ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง

2.1.8 รูปทรงของมีดตัด (Tool Geometry) ^[3]



รูปที่ 2.22 : (a) 7 ส่วนประกอบของมีดตัดคมตัดเดียว, (b) สัญลักษณ์ของมีดตัดที่ใช้กำหนดรูปทรงมีดตัด

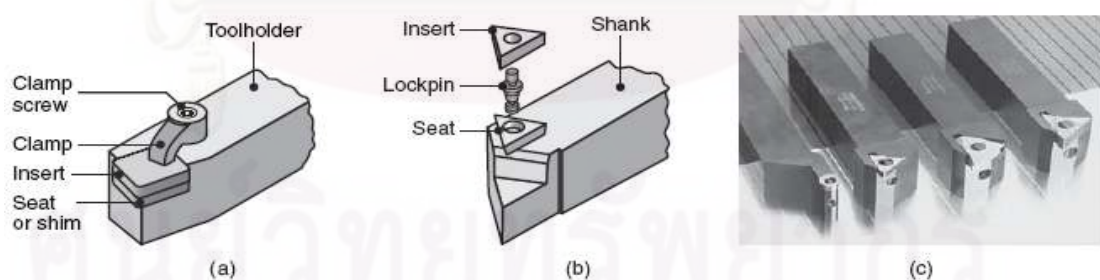
มีดตัดต้องมีรูปทรงที่เหมาะสมต่อกระบวนการตัด ซึ่งมีดตัดสามารถถูกแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ มีดตัดคมตัดเดียวและมีดตัดที่มีหลายคมตัด โดยมีดตัดคมตัดเดียวนั้นจะใช้ในกระบวนการกลึง, การคว้าน (Boring) และการไส (Shaping) ในขณะที่มีดตัดหลายคมตัดส่วนมากจะใช้กับมีด

ตัดที่มีการหมุนและใช้กับกระบวนการเจาะ (Drilling), การคว้านละเอียด (reaming), การกัด (Milling), การแท่งขึ้นรูป (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) เป็นต้น

รูปทรงของมีดตัดที่มีคมตัดเดียวมีการกำหนดสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (a) ซึ่งในแต่ละส่วนมีความสำคัญต่างกันไป โดยบนผิวคายของมีดตัดจะถูกกำหนดด้วยมุม 2 มุม คือมุมคายด้านหลัง (Back rake angle, α_b) และมุมคายด้านข้าง (Side rake angle, α_s) ซึ่งเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของเศษโลหะบนผิวคาย ส่วนบนผิวหลบจะประกอบด้วยมุมหลบด้านหน้า (End relief angle, ERA) และมุมหลบด้านข้าง (Side relief angle, SRA) ที่เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานที่ตัดแล้ว ในขณะที่คมตัดของมีดตัดที่มีคมตัดเดียวจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือมุมของคมตัดด้านข้าง (Side cutting edge angle, SCEA) ซึ่งจะช่วยลดแรงกระแทกขณะมีดเข้าไปยังชิ้นงาน และมุมของคมตัดด้านหน้า (End cutting edge angle, ECEA) ที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงาน และส่วนสุดท้าย รัศมีปลายมีด (Nose Radius, NR) ซึ่งส่งผลต่อพื้นผิวของชิ้นงาน โดยยิ่งรัศมีปลายมีดเล็ก พื้นผิวของชิ้นงานก็จะยิ่งขรุขระ แต่อย่างไรก็ตาม รัศมีปลายมีดที่ใหญ่ก็อาจทำให้เกิด chatter ขึ้นได้

จาก 7 ส่วนประกอบของรูปทรงมีดตัดคมตัดเดียว เมื่อต้องการที่จะบอกสัญลักษณ์รูปทรงของมีดตัด จะต้องมีการบอกตามลำดับดังนี้ มุมคายด้านหลัง, มุมคายด้านข้าง, มุมหลบด้านหน้า, มุมหลบด้านข้าง, มุมของคมตัดด้านข้าง, มุมของคมตัดด้านหน้า และรัศมีปลายมีด ดังแสดงในรูปที่ 8.22 (b)

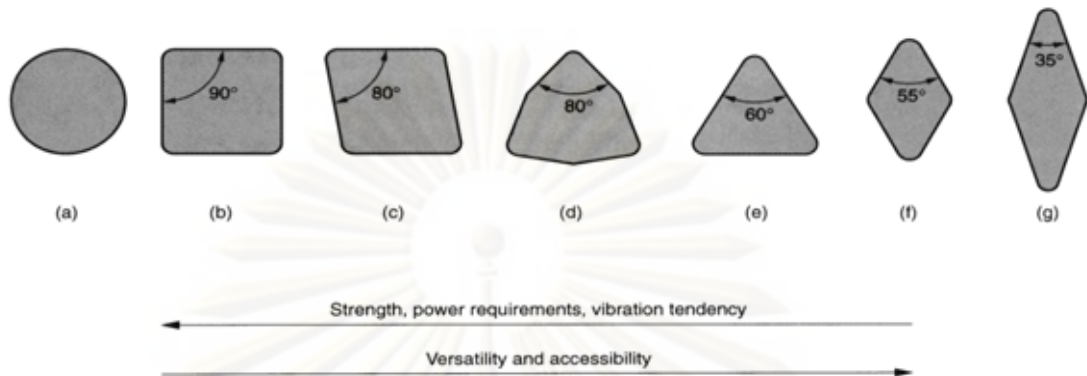
2.1.8.1 เม็ดมีด (Inserts)



รูปที่ 2.23 : แสดงวิธีการติดเม็ดมีดบนด้ามมีด (a) การยึดเม็ดมีดกับด้ามมีด, (b) แสดงการประกอบเม็ดมีด, (c) ตัวอย่างของเม็ดมีดที่แตกต่างกันที่ติดอยู่กับด้ามมีด

เม็ดมีดของมีดตัดที่ติดอยู่กับด้ามมีด (Tool holder) จะพบเห็นอย่างมากในกระบวนการตัดเนื่องจากมันมีความคุ้มค่าและสามารถที่จะเปลี่ยนได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งเม็ดมีดนั้น

มีหลายรูปทรงและหลายขนาด โดยรูปทรงของเม็ดมีดที่ถูกใช้ในกระบวนการกลึงแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 : รูปทรงของเม็ดมีด (a) กลม, (b) สี่เหลี่ยม, (c) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม 80° , (d) หกเหลี่ยม, (e) สามเหลี่ยมด้านเท่า, (f) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม 55° และ (g) สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มุม 35°

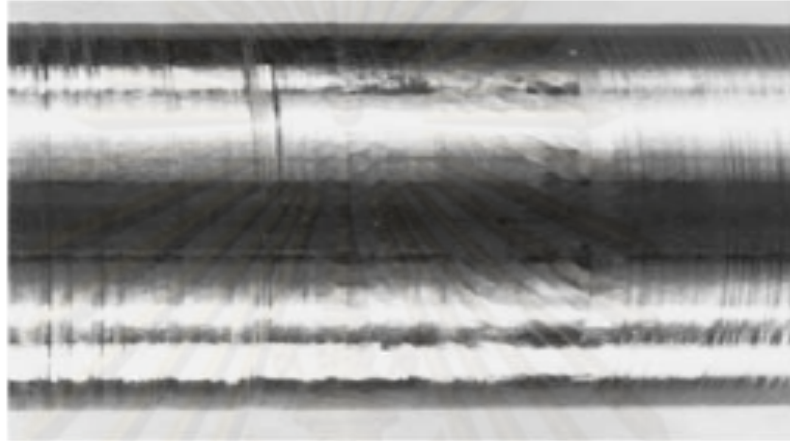
โดยทั่วไปแล้ว มุมของเม็ดมีดที่มีขนาดใหญ่ควรจะถูกเลือกใช้เมื่อต้องการความแข็งแรงและความคุ้มค่า ในขณะที่มุมของเม็ดมีดที่มีขนาดเล็กควรถูกเลือกใช้เมื่อต้องการการเข้าถึงชิ้นงานที่ง่าย และจากรูปที่ 2.24 จะเห็นว่ามีเม็ดมีดที่มีลักษณะกลม ซึ่งมีข้อดีคือ มันสามารถที่จะถูกใช้ได้มากกว่าเม็ดมีดชนิดอื่น ซึ่งเม็ดมีดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจะมี 4 คมตัด, เม็ดมีดที่มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมจะมี 3 คมตัด ในขณะที่เม็ดมีดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนจะมีเพียง 2 คมตัด โดยคมตัดยิ่งน้อยจะทำให้เกิดต้นทุนสูงขึ้นเนื่องจากสามารถใช้งานได้น้อยกว่าเม็ดมีดที่มีหลายคมตัด

2.1.9 การสั่นและแชตเตอร์ในกระบวนการตัด (Vibration and Chatter in machining operations) ^{[2][4][6]}

การสั่นและแชตเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดนั้นเป็นสิ่งที่มีความซับซ้อนมาก ซึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดการสั่นและแชตเตอร์ของมีดตัดและและส่วนประกอบต่างๆของเครื่องจักรนี้ ก็คือ ค่าความแข็งของเครื่องจักร (machine stiffness) โดยค่าความแข็งของเครื่องจักรที่น้อยกว่าจะส่งผลให้เกิดการสั่นและแชตเตอร์มากกว่าค่าความแข็งของเครื่องจักรที่มาก ยิ่งถ้าเราไม่สามารถที่จะควบคุมการสั่นและแชตเตอร์ที่เกิดขึ้นได้ ก็อาจจะเกิดผลดังนี้

- พื้นผิวของชิ้นงานที่มีความขรุขระสูง ดังรูปที่ 2.25
- ขนาดของชิ้นงานที่ได้ไม่มีความเที่ยงตรง แม่นยำ

- การสีกหรือก่อนกำหนด และการแตกหักของมีดตัด โดยเฉพาะวัสดุของมีดตัดที่เปราะ เช่น เซรามิค และคาร์ไบด์ เป็นต้น
- ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องจักรอาจเสียหายเนื่องจากการสั่นที่มากเกินไป
- เสียงรบกวนที่เกิดขึ้น โดยถ้าเสียงนั้นมีความถี่สูงๆ



รูปที่ 2.25 : ลักษณะของพื้นผิวขึ้นงานเมื่อเกิดแชนเตอร์ขึ้นในระหว่างกระบวนการกลึง

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

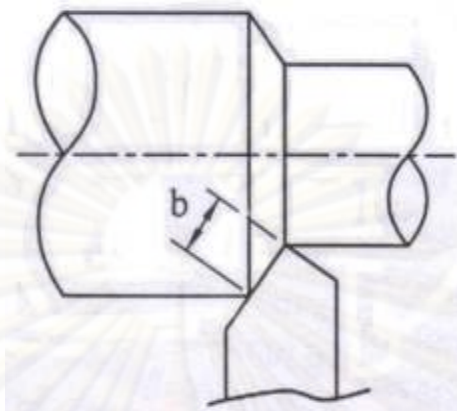
2.1.9.1 การสั่นจากแรงกระทำภายนอก (Forced vibration)

การสั่นลักษณะนี้เป็นการสั่นของระบบภายใต้แรงกระทำจากภายนอกซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับระบบในลักษณะซ้ำตัวเอง เช่นการสั่นเนื่องจากความไม่สมดุลของเครื่องจักรที่เกิดการหมุนและการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เป็นต้น และสิ่งหนึ่งที่เราจะพบกับในกรณีของการสั่นเนื่องจากมีแรงกระทำภายนอก ก็คือหากว่าความถี่ของแรงที่กระทำกับระบบนั้นไปพ้องกับความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของระบบพอดี การสั่นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่มีช่วงกว้างการสั่นที่สูงมาก เราเรียกการสั่นในลักษณะนี้ว่า การสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งผลของการสั่นพ้องนี้มักจะทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างที่กำลังเกิดการสั่นอยู่

2.1.9.2 การสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-excited vibration)

การสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเองนี้ โดยทั่วไปเรียกว่า แชนเตอร์ (Chatter) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากกลไกภายในของระบบ โดยปัจจัยตัวหนึ่งที่มีความสำคัญที่ก่อให้เกิดแชนเตอร์ก็คือ ค่าความกว้างของการตัดหรือความกว้างของเศษโลหะ (b) ดังรูปที่ 2.1.26 เมื่อความกว้างของเศษโลหะมีขนาดเล็ก การตัดจะมีเสถียรภาพโดยไม่มีแชนเตอร์เกิดขึ้น และเมื่อขนาดความกว้างของเศษโลหะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง (b_{lim}) จะทำให้เกิดแชนเตอร์ขึ้น และจะส่งผลให้เกิดการสั่นมากขึ้นสำหรับทุก

ค่าที่ $b > b_{lim}$ ซึ่งค่า b_{lim} นี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงาน, ความเร็วในการตัด, อัตราป้อนตัด และรูปทรงของมีดตัดเป็นต้น



รูปที่ 2.26 : ขนาดความกว้างของเศษโลหะในกระบวนการกลึง

การสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเองในกระบวนการตัดนั้นมีความสำคัญ ดังนี้ แอมพลิจูดจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมันคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง, ความถี่ของการสั่นจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ, ไม่มีแรงกระทำภายนอกในลักษณะเข้าตัวเองมากระทำกับระบบ และมีแหล่งพลังงานที่คงที่ ซึ่งระบบได้รับจากแรงในลักษณะเข้าตัวเองผ่านการสั่นของมันเอง โดยรูปแบบหนึ่งของการสั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีความสำคัญ คือ การสั่นที่เกิดขึ้นซ้ำๆ (Regenerative chatter) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีดตัดตัดลงบนพื้นผิวของชิ้นงานที่มีความขรุขระจากการตัดก่อนหน้านี้ โดยจะส่งผลให้ความลึกตัดและแรงในการตัดของมีดตัดมีการเปลี่ยนแปลงในขณะตัดซึ่งทำให้เกิดการสั่นขึ้น

2.1.10 อะคูสติก อิมิสชั่น (Acoustic Emission : AE)^[7]

สัญญาณอะคูสติกได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างมาก ในด้านการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing) เช่นโรงกลั่นน้ำมันที่ใช้ในการตรวจสอบรอยร้าวของท่อส่งน้ำมัน หรือนำมาใช้ในการตรวจติดตามกระบวนการตัด (การสึกหรอ, การแตกหักของมีดตัด) นอกจากนี้ยังถูกใช้ในการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตต่างๆอีกด้วย ซึ่งข้อดีหลักของการใช้อะคูสติก อิมิสชั่นนี้ก็คือช่วงความถี่ของสัญญาณจะสูงกว่าสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก รวมถึงการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรค่อนข้างมาก โดยที่สัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่นหมายถึง การปลดปล่อยคลื่นความยืดหยุ่น (Elastic Wave) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุปลดปล่อยพลังงานภายในที่อยู่ในโครงสร้างออกมา ขณะที่วัสดุเกิดการเสียรูป, การฉีกขาดของพันธะระหว่างเนื้อวัสดุ, การคราก หรือการขยายตัวของรอยร้าว เป็นต้น เมื่อวัสดุได้รับความเค้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจากการเสียรูปโดยที่ความเค้นดังกล่าวอาจจะได้รับจากภายนอกหรือ

มีตกค้างอยู่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งล้าแล้วแต่สามารถทำให้วัสดุปล่อยคลื่นออกมาได้ทั้งสิ้น โดยลักษณะทั่วไปของสัญญาณอะคูสติกที่เปล่งออกมา แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ สัญญาณแบบต่อเนื่อง (Continuous signal) ซึ่งมีลักษณะแอมพลิจูดสูงๆต่ำๆ สลับต่อเนื่องไปตลอดเวลาล้าด้วยสัญญาณของคลื่นรบกวน (Noise) และสัญญาณที่เกิดแบบเป็นช่วง (Burst type signal) ที่สัญญาณจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วค่อยๆลดลง เหมือนกับลักษณะการสั่นของกลองเมื่อถูกตี ซึ่งรูปแบบของสัญญาณทั้ง 2 แสดงดังรูปที่ 2.27 และเนื่องจากคลื่นอะคูสติกเป็นคลื่นแบบพลวัตที่ เกิดขึ้นแล้วหายไป ถ้าไม่ได้ตรวจวัดสัญญาณในขณะที่มีการปล่อยคลื่นอะคูสติกก็จะเป็นการทาบอะไรเลย ดังนั้นระบบตรวจสอบด้วยคลื่นอะคูสติกจึงต้องติดตั้งบนชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบและเปิดทำงานตลอดช่วงเวลาทำการตรวจสอบ ซึ่งระบบตรวจสอบจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ หัวรับสัญญาณ (Transducer), อุปกรณ์ขยาย กรองความถี่ของสัญญาณ และอุปกรณ์วิเคราะห์และประมวลผล โดยเมื่อตัวรับสัญญาณแปลงคลื่นความยืดหยุ่นเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณจะถูกขยายและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยอุปกรณ์ประมวลผล



รูปที่ 2.27 : สัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่องและแบบที่เกิดเป็นช่วงๆ^[7]

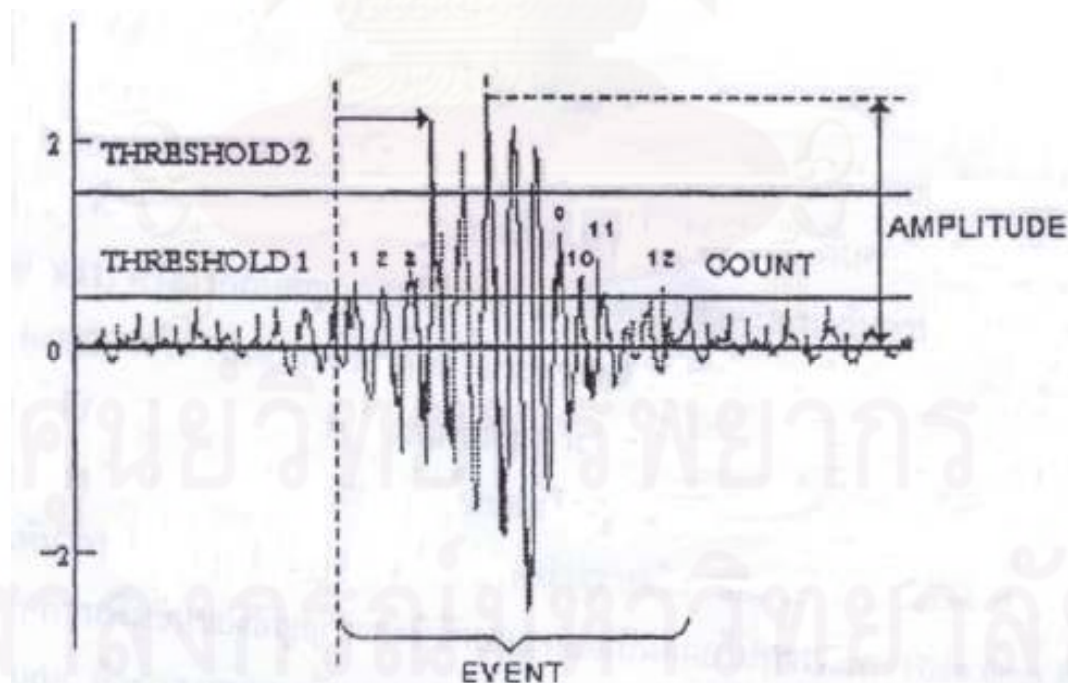
ลักษณะรูปคลื่นอะคูสติกต่างๆไป แสดงดังรูปที่ 2.28 ซึ่งโดยทั่วไปจะเหมือนกับสัญญาณของแผ่นดินไหวคือมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเทียบกับเวลา เริ่มต้นจากแอมพลิจูดของสัญญาณน้อยๆ แล้วเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแล้วกลับลงมาอีก สัญญาณอะคูสติกจะมีแอมพลิจูดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการเสียหายของวัสดุหรือปริมาณพลังงานที่วัสดุปลดปล่อยออกมา แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้อาจมีคลื่นรบกวน ดังนั้นในการวิเคราะห์และประเมินผลสัญญาณก็จะมีกำหนดขีดเริ่มเปลี่ยน 1 (Threshold 1) หรือเกณฑ์ขั้นต่ำเพื่อเป็นการคัดเลือกวิเคราะห์เฉพาะสัญญาณที่มีแอมพลิจูดสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน 1 ทำให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น ซึ่งคุณลักษณะของสัญญาณที่ใช้วิเคราะห์และประเมินผลโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสัญญาณ มีดังนี้

1.) Count เป็นจำนวนครั้งที่สัญญาณอะคูสติกมีแอมพลิจูดสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน 1 แล้วเพิ่มต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จากนั้นค่อยๆลดลงจนมีแอมพลิจูดต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน 1 อีกครั้ง ซึ่งจาก

รูปที่ 2.28 คลื่นอะคูสติกช่วงนี้มีจำนวน Count เท่ากับ 12 ทั้งนี้คลื่นอะคูสติกกลุ่มนี้เรียกว่า Event หรือ Hit

2.) Event หรือ Hit คือกลุ่มของสัญญาณที่มีแอมพลิจูดสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน 1 ต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งแสดงถึงการปลดปล่อยพลังงานอย่างกะทันหันจากเนื้อวัสดุเป็นช่วงๆ ที่ทำให้เกิดคลื่นความยืดหยุ่นแผ่กระจายออกไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยลักษณะของ Event จะเป็นกลุ่มใหญ่ กลุ่มเล็ก หรือต่อเนื่องนานๆ ก็ขึ้นกับประเภทของการปลดปล่อยพลังงาน เช่น เมื่อเนื้อวัสดุมีความเสียหายรุนแรงจากการครากหรือการร้าว จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมามากในแต่ละ Event ดังนั้นในสภาพนี้แต่ละ Event จะกินระยะเวลานานกว่าเมื่อมีการปลดปล่อยพลังงานน้อยและโดยทั่วไปก็จะมีแอมพลิจูดสูงด้วย จึงทำให้จำนวน Count มากตามไปด้วย

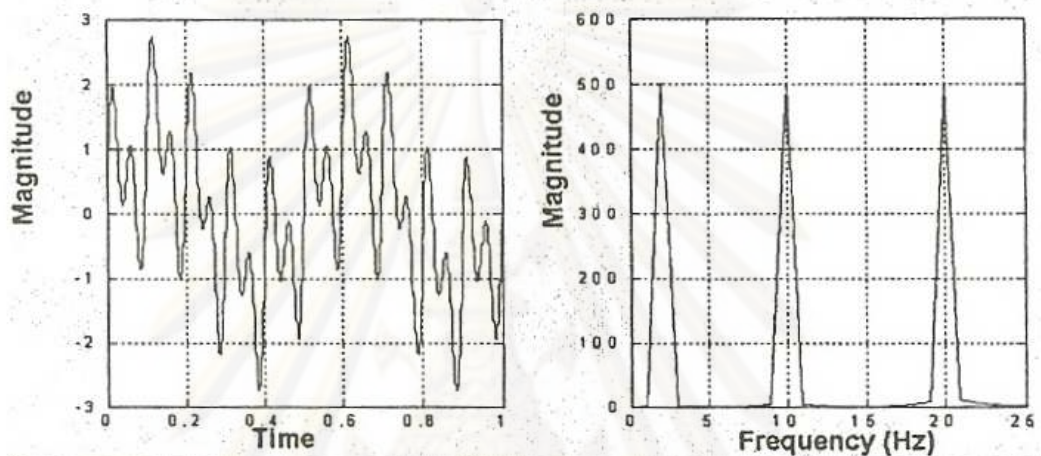
3.) แอมพลิจูด (Amplitude) คือค่าสูงสุดของสัญญาณอะคูสติกในแต่ละ Event ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จะเห็นว่า Count ที่ 6 ถือว่าเป็นแอมพลิจูดสูงสุดที่สุดเมื่อเทียบกับ Count อื่นๆ ใน Event เดียวกัน ดังนั้นความสูงของแอมพลิจูดของ Count ที่ 6 ถือว่าเป็นแอมพลิจูดของ Event นั้นๆ ซึ่งสามารถบอกถึงความแรงของแหล่งกำเนิดคลื่น ทำให้สามารถแยกแยะขนาด ชนิด และระยะทางจากแหล่งกำเนิดรวมทั้งยังอาจใช้การกระจายของแอมพลิจูดที่พบว่ามีความสัมพันธ์กับกลไกการเสียหายของวัสดุบางชนิด



รูปที่ 2.28 : ลักษณะรูปคลื่นอะคูสติกและคุณลักษณะต่างๆของสัญญาณ ^[7]

2.1.11 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ^[7]

การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analysis) เป็นสิ่งสำคัญในการประมวลผลของสัญญาณนั้น ซึ่งถ้ารู้ถึงองค์ประกอบต่างๆของสัญญาณว่าส่วนไหนสำคัญ ส่วนไหนสามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ต้องก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก ก็สามารถที่จะประมวลผลสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.29 และสมการที่ 2-20 โดยที่ $f(t)$ คือสัญญาณใดๆ



รูปที่ 2.29 : แสดงการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (2-20)$$

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

2.1.12 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural networks) ^[8]

เทคนิคที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) คือ ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) โดยเริ่มต้นปี ค.ศ. 1949 โดย Donald

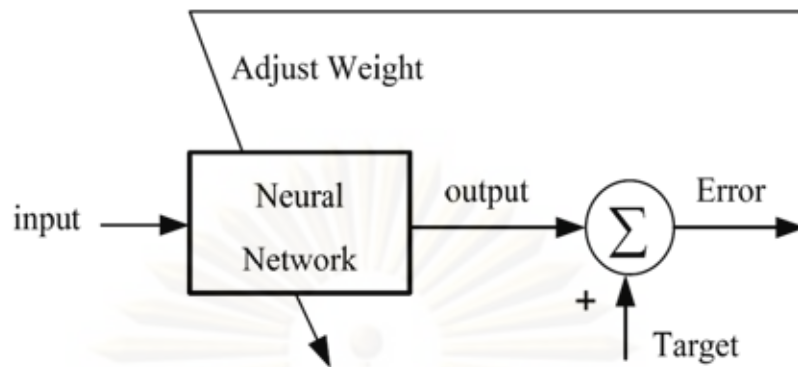
Hebb เขียนทฤษฎีเกี่ยวกับการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม และหลังจากนั้นเป็นต้นมาได้พัฒนาโดยลำดับจนกระทั่งหลังปี ค.ศ. 1980 พัฒนาอย่างรวดเร็วมากจนกระทั่งมีการจัดกลุ่มต่างๆ อย่างมากมาย เพื่อการวิจัยและเพื่อธุรกิจการค้า

โครงข่ายประสาทเทียมมีแนวความคิดในการสอนที่คล้ายคลึงกับระบบสมองของมนุษย์ โดยหลักการพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม เริ่มต้นจากแนวคิดการจำลองกระบวนการคิดในสมองมนุษย์ ซึ่งในสมองของคนนั้นจะประกอบไปด้วยเซลล์พิเศษหลายร้อยชนิดเรียกว่า นิวรอน (Neurons) ซึ่งรวมกันมีมากกว่าหนึ่งล้านเซลล์ นิวรอนถูกแบ่งเป็นกลุ่มๆ และสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้เรียกว่าข่ายงาน(Networks) ซึ่งแต่ละข่ายงานก็จะทำหน้าที่ต่างๆ ไป

ขั้นตอนของการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้สำหรับการพยากรณ์ก็มีลักษณะเช่นเดียวกับ วิธีการพยากรณ์อื่นๆ ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลป้อนเข้าเพื่อสร้างแบบจำลองในการพยากรณ์ข้อมูลในอนาคต ปรับปรุงให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของตลาดที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีความสามารถในการรวมการวิเคราะห์พื้นฐานและเทคนิคเพื่อสร้างแบบจำลอง โดยที่โครงข่ายประสาทเทียมจะพยายามลดจำนวนของการทำนายที่ผิดพลาดให้ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่มีการนำมาใช้ในการทำนายข้อมูลทางธุรกิจ นอกจากใช้ในการพยากรณ์แล้วยังสามารถนำมาใช้ในสาขาต่างๆ เช่น ด้านการแพทย์ มีงานวิจัยศึกษาถึงการจำแนกเซลล์ที่เป็นมะเร็ง, ด้านการทหาร มีงานวิจัยศึกษาถึงการจำแนกเรือรบที่ล้าเข้า่าน้ำ, ด้านอุตสาหกรรม มีงานวิจัยศึกษาการทำนายของเสียจากกระบวนการผลิต เป็นต้น

2.1.12.1 หลักการของโครงข่ายประสาทเทียม

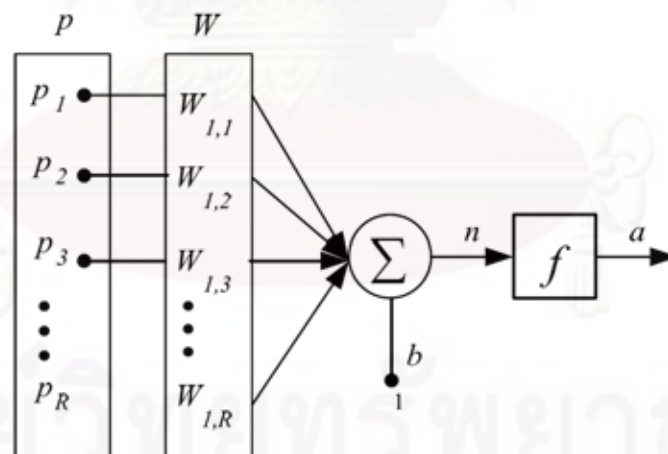
โครงข่ายประสาทเทียมเป็นระบบที่มีส่วนประกอบซึ่งจำลองรูปแบบการทำงานจากระบบของสมองมนุษย์ หน้าที่และการทำงานของนิวรอนสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่ และสามารถฝึกสอน(Train) ระบบเพื่อการนำไปใช้งานเฉพาะได้ หลักการทำงานของนิวรอนจะอาศัยการปรับค่าน้ำหนัก(Weight) ในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 โดยการทำงานของนิวรอนจะเป็นการเปรียบเทียบ ผลลัพธ์(Output) ของนิวรอนที่ได้กับค่าของเป้าหมาย(Target) ที่กำหนด หากในกรณีที่ได้ค่าผลลัพธ์มีความแตกต่างหรือไม่เท่ากับเป้าหมาย ระบบของนิวรอนจะทำการปรับค่าน้ำหนัก ไปจนกว่าค่าของผลลัพธ์ตัวใหม่มีค่าเท่ากับค่าเป้าหมาย ซึ่งในการฝึกสอนนิวรอนเพื่อให้ระบบมีการเรียนรู้ต้องมีข้อมูลที่ป้อนเข้า และค่าที่ใช้เป็นค่าเป้าหมายเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบนั้น จะต้องมีการจัดข้อมูลให้เป็นไปตามแบบคู่ลำดับ เพื่อใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาท



รูปที่ 2.30 : แสดงหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม^[8]

2.1.12.2 รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ ส่วนแรกเป็นส่วนตัวแปรนำเข้า (Input) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษร P โดยจะอยู่ในรูปของเวกเตอร์ และตัวแปรนำเข้าแต่ละตัวจะมีค่าของน้ำหนักประจำตัวแปรนำเข้า แทนด้วยตัวอักษร W ผลคูณที่เกิดจากการคูณค่าน้ำหนักกับค่าของตัวแปรนำเข้าแต่ละค่าจะนำมาบวกกัน ณ จุดรวมสัญญาณ จากนั้นจะนำผลคูณที่ได้ผ่านไปยังชั้นถ่ายโอน (Transfer Function) แทนด้วยสัญลักษณ์ f และออกไปส่วนของผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31



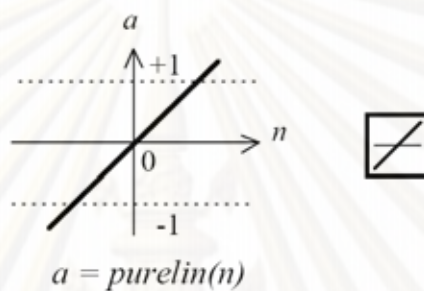
รูปที่ 2.31 : แสดงรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม^[8]

จากรูปที่ 2.31 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2-21

$$a = f(Wp + b) \quad (2-21)$$

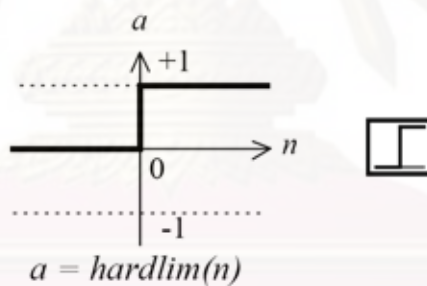
ฟังก์ชันถ่ายโอนที่นิยมใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมจะมีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น (Linear Transfer Function - รูปที่ 2.32) ใช้งานสำหรับการประมาณค่าที่เป็นเชิงเส้น,

ฟังก์ชันถ่ายโอนฮาร์ดลิมิต(Hard-Limit Transfer Function - รูปที่ 2.33 จะมีการกำหนดค่าผลลัพธ์ของนิวรอนเป็นดังนี้ โดยถ้าตัวแปรนำเข้าของนิวรอน มีค่าน้อยกว่า 0 จะให้ค่าผลลัพธ์เป็น 0 และถ้าตัวแปรนำเข้าของนิวรอน มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 0 ค่าผลลัพธ์จะมีค่าเป็น 1 ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนฮาร์ดลิมิต จึงมีความเหมาะสมสำหรับการจำแนกรูปแบบ และฟังก์ชันถ่ายโอนล็อกซิกมอยด์(Log-Sigmoid Transfer Function - รูปที่ 2.34) ซึ่งสามารถรับค่าของตัวแปรนำเข้าได้ทั้งที่เป็นค่าบวก และเป็นค่าลบ และให้ผลลัพธ์อยู่ในย่าน 0 ถึง 1 โดยจะถูกใช้ในโครงข่ายที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ(Back Propagation Network)



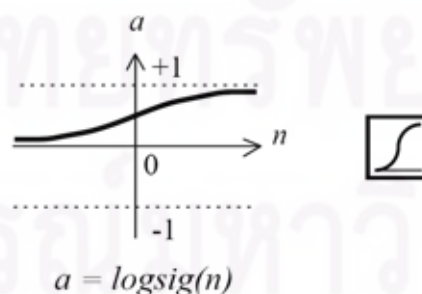
Linear Transfer Function

รูปที่ 2.32 : แสดงฟังก์ชันการถ่ายโอน linear ^[8]



Hard-Limit Transfer Function

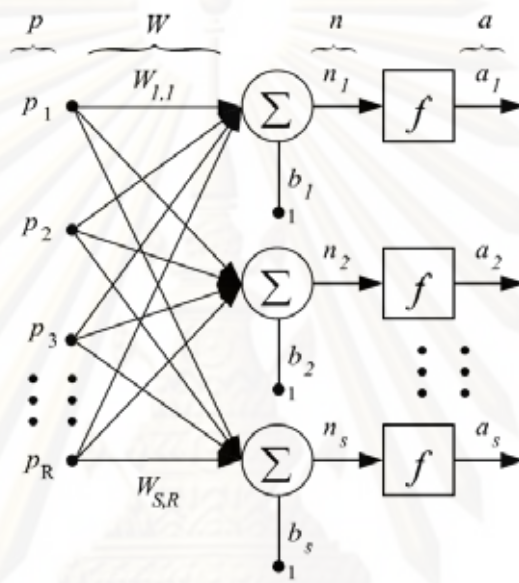
รูปที่ 2.33 : แสดงฟังก์ชันการถ่ายโอน Hard-Limit ^[8]



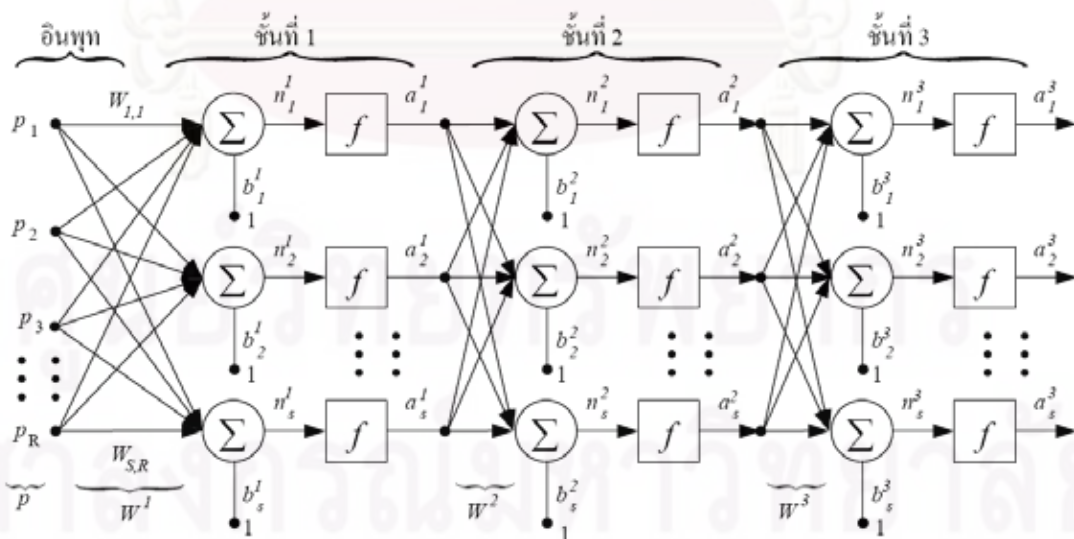
Log-Sigmoid Transfer Function

รูปที่ 2.34 : แสดงฟังก์ชันการถ่ายโอน Log-Sigmoid ^[8]

ชั้นของนิวรอน(Layer) ประกอบด้วยชั้นมากกว่าหนึ่งชั้น ในแต่ละชั้นของนิวรอนจะประกอบไปด้วยนิวรอนหลายๆ ตัวได้ แต่นิวรอนหนึ่งชั้นนั้นประกอบด้วยตัวแปรนำเข้า, ค่าน้ำหนัก และค่าไบอัส ผลที่ได้จากการคูณระหว่างค่าน้ำหนักกับตัวแปรนำเข้าแต่ละคู่จะนำมารวมกับค่าไบอัสในชั้น หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณที่รวมแล้วเข้าฟังก์ชันถ่ายโอนและส่งไปสู่อินพุตถัดไป ตัวอย่างนิวรอนแบบชั้นเดียวประกอบด้วยจำนวนนิวรอนหลายๆ ตัว แสดงในภาพที่ 2.35 ในที่นี้นิวรอนจะมีตัวแปรนำเข้าจำนวน R ตัว และมีจำนวนของนิวรอนจำนวน S ตัว



รูปที่ 2.35 : แสดงโครงข่ายแบบชั้นเดียว(One-layer network) [8]



รูปที่ 2.36 : แสดงโครงข่ายแบบหลายชั้น(Multiple-layer network) [8]

โครงข่ายแบบที่มีหลายชั้น ในแต่ละชั้นจะมีค่าน้ำหนัก, ค่าไบอัส และค่าค่าผลลัพธ์ ซึ่งตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.36 โดยชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 รวมกันเรียกว่าชั้นซ่อน(Hidden layer) ส่วนชั้นที่ 3 เรียกว่าชั้นของผลลัพธ์(Output layer)

2.1.12.3 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการ Mapping ระหว่างตัวแปรนำเข้าและผลลัพธ์ของโครงข่าย ทั้งนี้การออกแบบส่วนที่สัมพันธ์กันหรือตัวจำแนกของโครงข่ายจะขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการเรียนรู้ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนค่าจากอินพุตไปสู่ค่าเอาพุตตามกลุ่มตัวอย่างที่กำหนดไว้ในลักษณะของคู่ลำดับ ขอบเขตของการจำแนกแต่ละปัญหาจะเป็นไปตามหลักทฤษฎีการประมาณค่า และในการเรียนรู้ของโครงข่ายจะมี 2 รูปแบบ คือ

1.) การเรียนแบบมีการสอน (Supervised Learning)

การเรียนแบบมีการสอนเป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้วงจรรข่ายปรับตัว ชุดข้อมูลที่ใช้สอนวงจรรข่ายจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าวงจรรข่ายให้คำตอบที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูกต้องวงจรรข่ายก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น (เปรียบเทียบกับคน เหมือนกับการสอนนักเรียน โดยมีครูผู้สอนคอยแนะนำ)

2.) การเรียนแบบไม่มีการสอน (Unsupervised Learning)

การเรียนแบบไม่มีการสอนเป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด วงจรรข่ายจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้ วงจรรข่ายจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้ (เปรียบเทียบกับคน เช่น การที่เราสามารถแยกแยะพันธุ์พืชพันธุ์สัตว์ตามลักษณะรูปร่างของมันได้เองโดยไม่มีใครสอน)

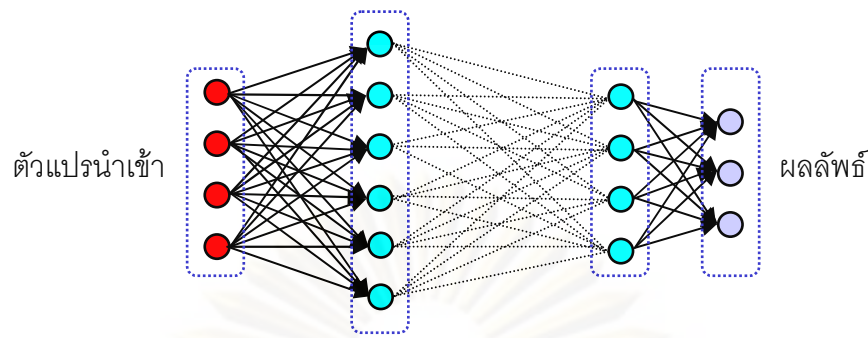
2.1.12.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่าย(Network Architecture)

1.) โครงข่ายแบบไปข้างหน้า(Feedforward network)

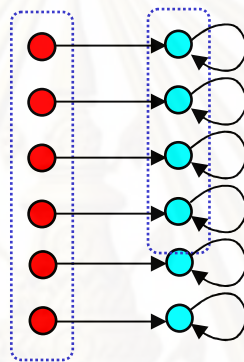
ข้อมูลที่ประมวลผลในวงจรรข่ายจะถูกส่งไปในทิศทางเดียวจากส่วนของตัวแปรนำเข้า ส่งต่อมาเรื่อย ๆ จนถึงส่วนของผลลัพธ์โดยไม่มีการย้อนกลับของข้อมูล หรือแม้แต่ในส่วนของในชั้นเดียวกันก็ไม่มีการเชื่อมต่อกัน ดังรูป 2.37

2.) โครงข่ายแบบป้อนกลับ(Feedback network)

ข้อมูลที่ประมวลผลในวงจรรข่าย จะมีการป้อนกลับเข้าไปยังวงจรรข่ายหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งได้คำตอบออกมา (บางที่เรียกว่า Recurrent network) ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.37 : แสดงสถาปัตยกรรมของ Feedforward network ^[8]



รูปที่ 2.38 : แสดงสถาปัตยกรรมของ Feedback network ^[8]

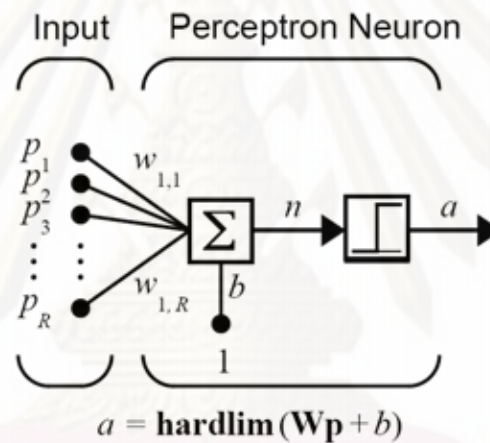
2.1.12.5 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (back-propagation neural network)

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับเป็นขั้นตอนวิธีของการเรียนรู้ของโครงข่ายวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยม หรือที่เรียกอีกอย่างว่ากฎการเรียนรู้ของ Widrow-Hoff ซึ่งโครงข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักหลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับการฝึกสอน(Train) ให้แก่โครงข่ายในแต่ละครั้งแล้วเสร็จ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้ จะถูกส่งกลับเข้าสู่โครงข่ายเพื่อใช้ปรับค่าน้ำหนักต่อไป จนกระทั่งสามารถประมาณค่าฟังก์ชันซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้าและผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงเป้าหมายมากที่สุด โดยฟังก์ชันถ่ายโอนที่เป็นที่นิยมใช้ได้แก่ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น, ฟังก์ชันถ่ายโอนแทนซิกมอยด์ และฟังก์ชันถ่ายโอนลอจิสติกมอยด์ ซึ่งถ้าขั้นสุดท้ายของโครงข่ายเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกจำกัดอยู่ในช่วงเล็กๆ แต่ถ้าขั้นสุดท้ายของโครงข่ายเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น แล้วผลลัพธ์ของโครงข่ายสามารถเป็นค่าใดๆก็ได้

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายที่เป็นที่นิยมใช้กับอัลกอริทึมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับนี้คือโครงข่ายแบบไปข้างหน้าแบบที่มีหลายชั้น(multilayer feedforward network) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 ซึ่งในการใช้งานสามารถใช้งานได้ทั้งในด้านการพยากรณ์ และการจำแนกรูปแบบ

2.1.12.6 โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน (perceptron-architecture neural network)

โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอนนั้นมีมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งหนึ่งในนั้นเป็นโครงข่ายแบบชั้นเดียว(single-layer network) โดยที่ค่าน้ำหนัก และค่าไบอัสจะถูกฝึกสอนโดยเทคนิคที่เรียกว่ากฎการเรียนรู้แบบเพอร์เซพตรอน(perceptron learning Rule) และมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบฮาร์ดลิมิต(hard-limit transfer function) ดังรูปที่ 2.39 เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ถูกต้องตามตัวแปรป้อนเข้าที่ถูกป้อนเข้าไปในโครงข่าย



รูปที่ 2.39 : แสดงโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน ^[8]

เพอร์เซพตรอนมีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาอย่างง่ายในการจำแนกรูปแบบ โดยเฉพาะ เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฮาร์ดลิมิตมีความสามารถในการจำแนกตัวแปรนำเข้าออกเป็นสองส่วน และมันมีความรวดเร็วในการประมวลผลอีกทั้งยังมีความน่าเชื่อถือสำหรับการแก้ปัญหาอย่างง่ายด้วย

2.1.12.7 ขอบข่ายการประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกนำไปประยุกต์ในการแก้ปัญหาในงานด้านต่างๆเป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่ คือการจดจำรูปแบบและจัดประเภทสู่ผลลัพธ์ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด การควบคุมและอยู่ระหว่างการขยายการประยุกต์ไปสู่งานด้านอื่นๆ อย่างรวดเร็ว เช่น การประมวลผลฐานข้อมูล การตัดสินใจ การวินิจฉัยโรค งานแปลภาษา เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงตัวอย่างขอบข่ายการประยุกต์ 3 ด้านใหญ่ ๆ ได้แก่

1.) การจดจำและการจำแนกประเภทรูปแบบ (Pattern Recognition and Classification) แต่เดิมงานทางด้าน การจดจำรูปแบบ หมายถึงการอ่านอักษรเขียน การอ่านแผนที่ภูมิอากาศ หรือ การถอดคำสุนทรพจน์ เป็นต้น ต่อมาเป้าหมายของงานเริ่มขยายไปสู่การเลียนแบบฟังก์ชันระบบประสาทรับรู้สีกทางชีวภาพ ซึ่งจะสามารถรับรู้รูปแบบของสิ่งต่างๆ ได้ ลักษณะคล้ายกับการส่งสัญญาณความรู้สึจากเซลล์ประสาทต่างๆ รอบตัวสู่ระบบเส้นประสาทส่วนกลาง การประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียมในขอบข่ายงานด้านนี้ ได้มีการพัฒนามากกว่า 30 ปีแล้ว

2.) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) วัตถุประสงค์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ การจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดไปสู่งานโดยให้ ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด (หรือเงื่อนไขอื่นๆ) โดยวิธีการต่างๆ เช่น การทดลองความเป็นไปได้ทั้งหมด แล้วสรุปหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเวลามาก โครงข่ายประสาทเทียมได้เข้ามาเป็นทางเลือกหนึ่ง ด้วยความสามารถในการคำนวณ ด้วยความเร็วสูงจากปมข้อมูลจำนวนมาก และการเชื่อมโยงระหว่างแต่ละปมข้อมูล ทำให้สามารถเชื่อมหาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

3.) การควบคุม (Control) เป้าหมายพื้นฐานในการควบคุม คือ การจัดเตรียมสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มี เพื่อให้ได้ผลตามต้องการ

2.1.12.8 ข้อดีและข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียม

เทคนิคของโครงข่ายประสาทเทียม มีความสามารถที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ หลายประการ ได้แก่ ความสามารถในการจดจำรูปแบบ การสอน การจำแนกประเภท การลงความเห็น สรุป และการรับรู้ข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ การประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียมในงานบางประเภทนั้น ซ้อนกับเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์อื่นๆ แต่โครงข่ายประสาทเทียมจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่า เพราะระบบที่สามารถสอนเองได้เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงมากกว่าระบบที่มาจากการโปรแกรม โดยเฉพาะในงานจดจำรูปแบบคำพูดได้ชี้ให้เห็นถึงข้อดีอย่างชัดเจนของโครงสร้างการประมวลผลแบบขนาน โครงข่ายประสาทเทียมมีทักษะในการแก้ปัญหาคล้ายคลึงกับมนุษย์ ซึ่งเป็นสิ่งที่เทคนิคการวิเคราะห์ทางตรรกในระบบผู้เชี่ยวชาญและเทคโนโลยีทางซอฟต์แวร์ในปัจจุบันสามารถทำได้ยากตัวอย่างเช่น โครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก เพื่อสร้างรูปแบบและคุณลักษณะต่างๆ ที่ไม่สามารถกำหนดเป็นกฎที่ตายตัวได้ อีกทั้งทักษะในการตีความ เพื่อรับรู้ข้อมูลที่คลุมเครือหรือไม่ชัดเจนหรือไม่สมบูรณ์ด้วยความคุ้นเคย ลักษณะการทำงานต่างๆ เหล่านี้ได้พิสูจน์มาแล้วว่าสิ่งที่เกินความสามารถสำหรับเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์แบบเดิม ซึ่งเป็นรูปแบบวิธีการทางตรรกหรือระบบสัญลักษณ์ โดยข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียมที่เห็นได้ชัดเจน คือ ความสามารถในการเลียนแบบพฤติกรรมมนุษย์ ดังนั้น จึงไม่แปลกที่โครงข่ายประสาทเทียมจะมีข้อจำกัดในการทำงานที่มนุษย์ไม่ถนัด เช่น

การคำนวณหรือการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นงานที่ระบบคำนวณแบบอนุกรมสามารถทำได้ดี ซึ่งข้อดีอื่นๆ ของโครงข่ายประสาทเทียมที่สำคัญ คือ

1.) ความสามารถในการทำงานภายใต้ความผิดพลาด เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมากทำการประมวลผลโดยเชื่อมโยงกับข้อมูลอื่นแบบขนาน ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบางข้อมูลจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานโดยรวมของข่ายงาน

2.) การสรุปความเห็น แม้ว่าข้อมูลเข้าที่ได้รับมีความไม่ชัดเจนหรือไม่สมบูรณ์ด้วยสิ่งรบกวนต่างๆ แต่โครงข่ายประสาทเทียมก็สามารถทำการประมวล เพื่อสรุปความเห็นว่ามีผลลัพธ์ที่ควรเป็นอย่างไร

3.) ความยืดหยุ่น ข่ายงานสามารถสอนและปรับเปลี่ยนรูปแบบต่างๆ ตามปัจจัยแวดล้อมและวัตถุประสงค์ที่เปลี่ยนไป

ข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียม คือ ขาดความสามารถในเชิงตรรก การแสดงเหตุผล เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เนื่องจากความไม่ชัดเจนในการแปลความจากค่าน้ำหนักการเชื่อมโยง ดังจะเห็นได้ว่าในการจดจำรูปแบบนั้น เป็นเรื่องที่ยากหรือแทบเป็นไปไม่ได้ที่จะอธิบายเหตุผลของการแสดงผล อีกทั้งด้วยเงื่อนไขทางด้านค่าใช้จ่ายและความสามารถของเทคโนโลยีทางฮาร์ดแวร์ในปัจจุบัน ได้ทำให้การประยุกต์จำกัดอยู่ทางซอฟต์แวร์เป็นส่วนมากและประการสุดท้าย ปัญหาจากการสอนให้ข่ายงานสอนคือ ต้องเสียเวลาเป็นอย่างมาก อีกทั้งความต้องการข้อมูลจำนวนมาก ในการใช้สำหรับสอนและทดสอบข่ายงาน เหล่านี้เป็นข้อจำกัด ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้การประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียมไม่แพร่หลายเท่าที่ควรจะเป็น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Somkiat Tungjitsitjaroen ^[9] ได้เสนอวิธีการในการตรวจติดตามและบ่งชี้สถานะของการตัดในกระบวนการกลึงโดยใช้แรงตัดพลวัตที่ถูกรวบรวมระหว่างการตัดด้วยไดนาโมมิเตอร์จากนั้นแรงตัดจะถูกขยายก่อนที่จะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขแล้วทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เพื่อได้ค่าความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum Density, PSD) ของแรงตัดพลวัตมาวิเคราะห์เพื่อจำแนกรูปแบบของเศษโลหะว่าเป็นแบบแตกหักหรือแบบต่อเนื่องและเซตเตอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างตัด ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้ผลรวมของอัตราส่วนของผลรวมของความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตกับอัตราส่วนของผลรวมของความหนาแน่นของเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตในกรณีที่เศษโลหะเป็นแบบผสม (เศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหัก) มาหาเกณฑ์ในการตรวจจับรูปแบบของเศษโลหะและเซตเตอร์ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการตัดสินใจ

Somkiat Tungjitsitjaroen, Moriwaki T. ^[10] ได้พัฒนาวิธีการในการตรวจติดตามและบ่งชี้สถานะการตัดในกระบวนการกลึงโดยใช้เทคนิคการจำแนกรูปแบบ ซึ่งในวิธีการจะใช้ตัวแปร 3 ตัวที่คำนวณได้จากค่าอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนของแรงตัดพลวัตทั้ง 3 แรง (แรงตัดหลัก, แรงป้อนตัด และแรงรัศมี) ที่ถูกวัดระหว่างการตัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ และหาค่าที่เหมาะสมโดยกำหนดได้จากพื้นที่อ้างอิงที่ได้จากการทดลองเพื่อเป็นเกณฑ์ในการแบ่งแยกสถานะการตัด เช่นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง, เศษโลหะแบบแตกหัก และแชตเตอร์ ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าในขณะเกิดเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อเศษโลหะเป็นแบบแตกหักแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตทั้งสามจะมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะแรงป้อนตัดพลวัต และเมื่อเกิดแชตเตอร์ขึ้น แรงตัดหลักพลวัตจะให้แอมพลิจูดขนาดใหญ่ที่สุดในระหว่างแรงตัดพลวัตทั้งสาม โดยประโยชน์ที่ได้จากการพัฒนาระบบการตรวจติดตามและบ่งชี้สถานะการตัดในกระบวนการกลึง ก็คือสถานะการตัดสามารถถูกบ่งชี้ได้ง่ายในระหว่างกระบวนการกลึงจริงโดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

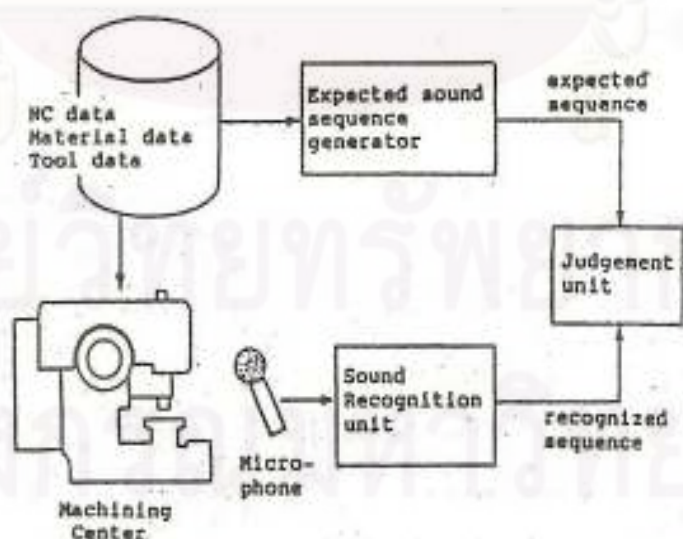
Moriwaki T., Shibasaka T. and Somkiat Tungjitsitjaroen ^[11] ได้พัฒนาระบบการตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัดในกระบวนการตัดสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยนำฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลแบบเสื่อมถอยมาใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการตัดเฉพาะและอัตราการป้อนตัด ซึ่งค่าดัชนี a ในฟังก์ชันถูกกำหนดให้เป็นตัวชี้วัดขนาดของการสึกหรอของมีดตัดและมีค่าเทียบเท่ากับอัตราส่วนความต้านทานการตัดเฉพาะที่อัตราการป้อนตัดศูนย์เทียบกับที่อัตราการป้อนตัดอนันต์ เพื่อที่ต้องการหาค่า a , ทฤษฎีได้ถูกเสนอให้แทรกคำสั่งเพิ่มเติมตัดในกระบวนการตัดจริงเมื่อต้องการตรวจสอบหาขนาดของการสึกหรอของมีดตัด โดยในคำสั่งเพิ่มเติมจะเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดปัจจุบันในกระบวนการตัดปกติให้เป็นอัตราการป้อนตัดในขั้นขึ้นหรือขั้นลงที่อัตราการป้อนตัดต่ำๆอย่างตั้งใจเพื่อวัดแรงตัดโดยไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซีและระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการตัดเฉพาะ จากผลการทดลองการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการตัดจริงได้พิสูจน์ว่า ดัชนี a จากสมการ
$$V_b = \frac{\ln a - \ln 1.06}{1.81}$$
 เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัด ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะแตกต่างกัน

Moriwaki T., Somkiat Tungjitsitjaroen, Shibasaka T. ^[12] ได้พัฒนาระบบเพื่อหาความเร็วตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยได้นำสมการอายุการใช้งานของมีดตัดของเทย์เลอร์มาใช้เพื่อประมาณค่าความสึกหรอของมีดตัดภายใต้ความเร็วในการ

ตัดที่แตกต่างกัน เพื่อมาหาค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด และอัตราการผลิตที่สูงที่สุด ซึ่งวิธีการนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุชิ้นงานและมีตัดชนิดอื่นๆได้ง่าย

Moriwaki T., Mori Y.^[13] ได้เสนอวิธีการบ่งชี้สถานะการตัดในระบบการกลึง เช่นการสึกหรอของเครื่องมือตัด, เซ็ตเตอร์ และการพันกันของเศษโลหะโดยทำการวิเคราะห์จากสัญญาณจากแรงตัดและสัญญาณอะคูสติก โดยใช้หลักการของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งในการทดลองเงื่อนไขในการตัดที่นำมาใช้เป็นการตัดหยาบ (ความเร็ว 150-250 เมตร/นาที, ความลึกตัด 2.0 มิลลิเมตร และอัตราป้อนตัด 0.31 มิลลิเมตร/รอบ) และจากผลการทดลองพบว่า การบ่งชี้สถานะของการสึกหรอของเครื่องมือตัด, การเกิดเซ็ตเตอร์และการพันกันของเศษโลหะสามารถถูกบ่งชี้ได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าจะมี 2 กรณีจาก 12 กรณีที่บ่งชี้การพันกันของเศษโลหะผิดพลาด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการนี้มีความน่าเชื่อถือและมีประโยชน์ค่อนข้างมากในการบ่งชี้สถานะการตัด

Takata S., Ahn J.H., Miki M., Miyao Y., Sata T.^[14] ได้เสนอระบบการตรวจติดตามเสียงโดยใช้เทคนิคการจำแนกเสียง (Sound Recognition Technique) ซึ่งระบบนี้ตรวจสอบเสียงที่ออกจากกระบวนการโดยเทียบกับข้อมูลควบคุมเพื่อดูว่ากระบวนการมีความผิดปกติหรือไม่ เช่นการจำแนกเสียงของการตัดในขณะที่เครื่องมือตัดสึกหรอกับเสียงการตัดปกติ ซึ่งโครงสร้างของระบบการตรวจติดตามเสียงแสดงดังรูปที่ 2.40

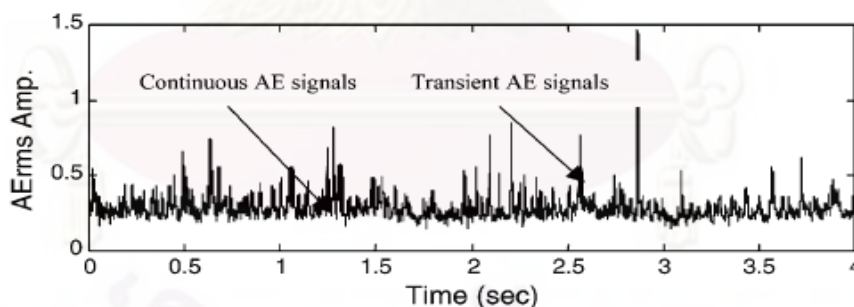


รูปที่ 2.40 : โครงสร้างของระบบตรวจติดตามเสียง^[14]

ระบบนี้ใช้เทคนิคการจำแนกคำ (word recognition technique) ที่ใช้การวิเคราะห์สเปกตรัมในช่วงเวลาสั้นๆ ของเสียงจากระบบการสำหรับการจำแนกเสียง นอกจากนี้ระบบนี้ยังสามารถจำแนกความแปรปรวนของความเร็วในการตัดและความลึกตัดได้เป็นอย่างดี

Xiaoli Li ^[15] ได้อธิบายถึงหลักการในการตรวจติดตามการสึกหรอของมิดตัดในกระบวนการตัดโดยใช้สัญญาณอะคูสติก พร้อมทั้งบอกข้อดีของการใช้สัญญาณอะคูสติกในการตรวจติดตามการสึกหรอ ซึ่งก็คือช่วงความถี่ของสัญญาณจะสูงกว่าช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรและสิ่งแวดล้อมภายนอก (100 kHz – 1 MHz) รวมถึงไม่รบกวนกระบวนการตัด โดยสัญญาณอะคูสติกจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือสัญญาณแบบต่อเนื่องและสัญญาณแบบเป็นช่วง ดังรูปที่ 2.41 โดยแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติกมีดังนี้

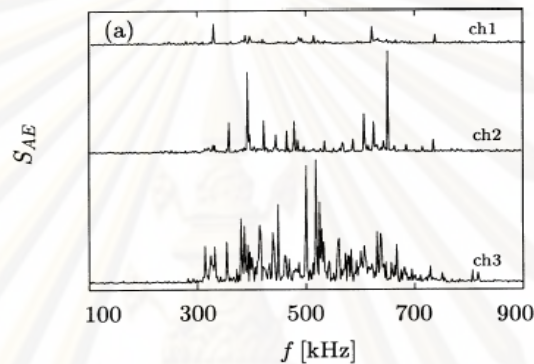
- การเสียดสีรูปแบบพลาสติกของชิ้นงานระหว่างกระบวนการตัด
- การเสียดสีรูปแบบพลาสติกของเศษโลหะ
- หน้าสัมผัสที่มีความเสียดทานระหว่างผิวหลบของมิดตัดและชิ้นงาน
- หน้าสัมผัสที่มีความเสียดทานระหว่างผิวคายของมิดตัดและเศษโลหะ
- การชนกันระหว่างเศษโลหะและมิดตัด
- การแตกหักของเศษโลหะ
- การแตกหักของมิดตัด



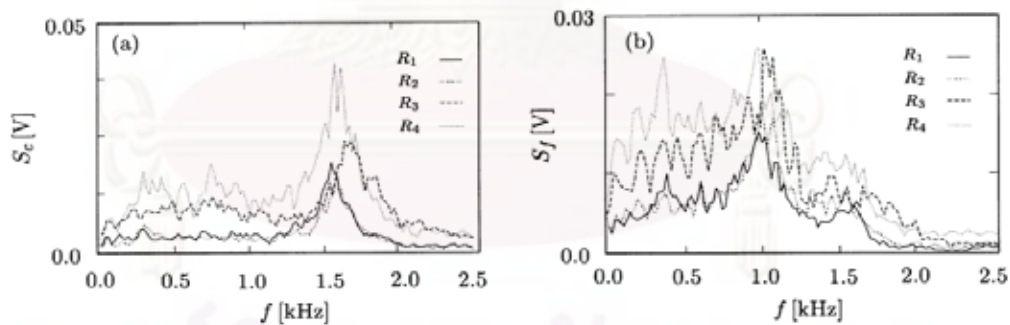
รูปที่ 2.41 : รูปแบบของสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกลึง ^[15]

จากสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นทั้ง 2 รูปแบบสามารถที่จะจำแนกการสึกหรอและการแตกหักของมิดตัด รวมถึงรูปแบบของเศษโลหะได้ โดยถ้าสัญญาณเป็นแบบต่อเนื่องจะสามารถบอกระดับการสึกหรอได้โดยดูจากขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่เกิดขึ้นและบอกได้ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นเป็นแบบต่อเนื่อง ซึ่งถ้าสัญญาณที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นช่วงๆ จะบอกได้ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นเป็นแบบแตกหักหรือมิดตัดอาจเกิดการแตกหักขึ้น

Govekar E., Gradisek J., Grabec I. ^[16] เสนอการตรวจติดตามกระบวนการตัดที่ใช้พารามิเตอร์ 3 ตัว (รูปแบบของเศษโลหะ, การสึกหรอของมีดตัด และแซตเตอร์) ในการตรวจติดตาม โดยใช้สัญญาณจากเซนเซอร์แรง และสัญญาณจากอะคูสติก อิมิสชั่น แล้วมาทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณเพื่อจำแนกสถานะของการตัด โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.42 ซึ่งแสดงเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณอะคูสติกในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ และรูปที่ 2.43 ซึ่งแสดงระดับการสึกหรอของมีดตัดที่ส่งผลต่อแรงตัดหลักและแรงป้อนตัดโดยระดับการสึกหรอที่มากขึ้นจะส่งผลให้แรงตัดมากขึ้นตามไปด้วย



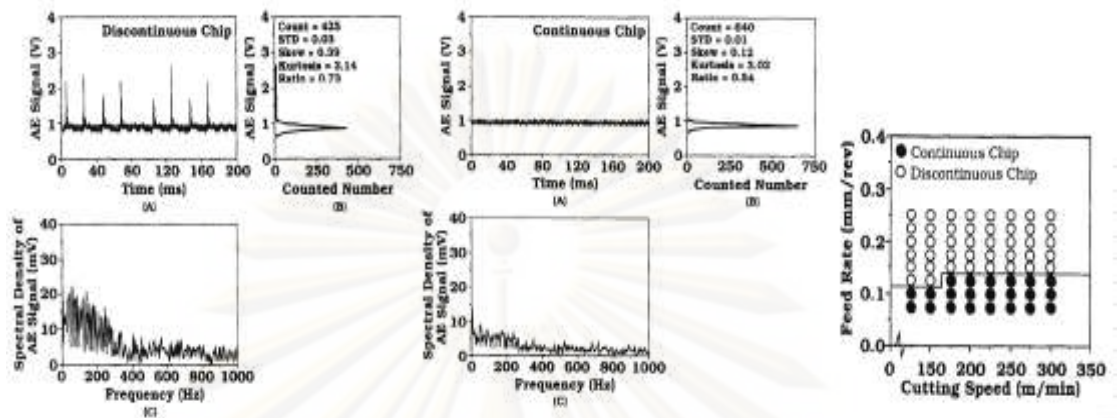
รูปที่ 2.42 : เพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณอะคูสติก (ch1) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง, (ch2) เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นเกลียว, (ch3) เศษโลหะแบบแตกหัก ^[16]



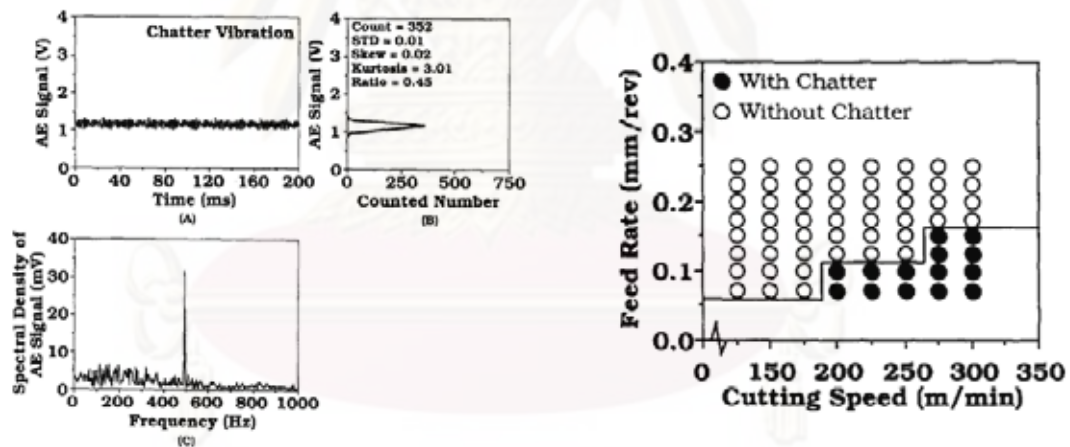
รูปที่ 2.43 : ตัวอย่างของเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดที่ระดับของการสึกหรอ R1, R2, R3 และ R4 (a) แรงตัดหลัก, (b) แรงป้อนตัด ^[16]

Inasaki I. ^[17] ได้เสนอการประยุกต์ใช้เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่นสำหรับการตรวจติดตามกระบวนการตัดด้วยเครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียวรวมถึงหลายคมตัด ซึ่งจะทำให้การตรวจจ็บบรูปแบบของเศษโลหะรวมถึงแซตเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด รวมถึงจำแนกเงื่อนไขของการตัด (อัตราป้อนตัด และความเร็วตัด) ที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก, เศษโลหะแบบต่อเนื่องและแซตเตอร์ โดยจากสัญญาณที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ รวมถึงใช้ค่าค่าความ

เบ้ (Skew) และค่าความโด่ง (Kurtosis) ในการวิเคราะห์และจำแนกสถานะการตัดที่เกิดขึ้น โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.44 และ 2.45 ตามลำดับ



รูปที่ 2.44 : สัญญาณอะคูสติคที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก และเศษโลหะแบบต่อเนื่อง รวมถึงเงื่อนไขของการตัดที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก และเศษโลหะแบบต่อเนื่อง^[17]

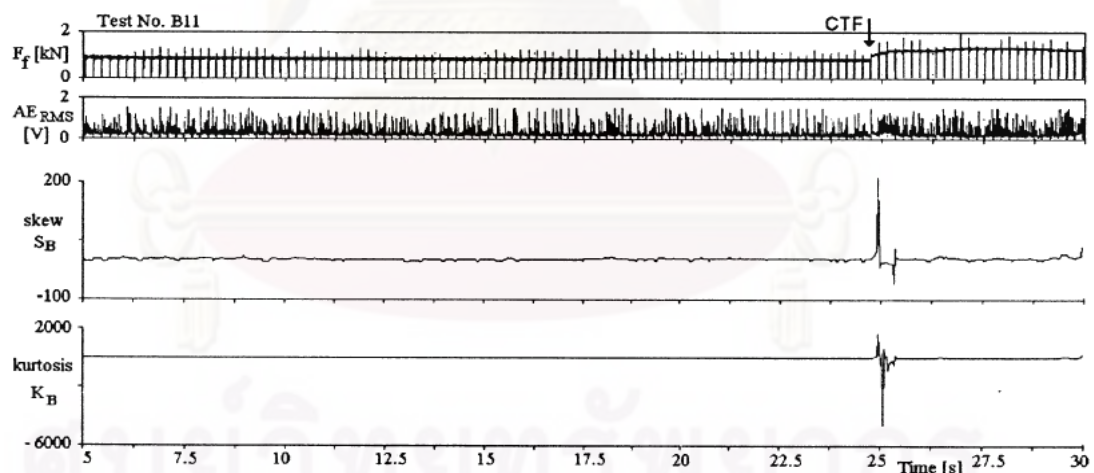


รูปที่ 2.45 : สัญญาณอะคูสติคที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดที่มีแชนเตอร์เกิดขึ้นและเงื่อนไขของการตัดที่ทำให้เกิดแชนเตอร์^[17]

Kopac J., Sali S.^[18] ได้เสนอวิธีการในการตรวจติดตามการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ของมีดตัดโดยใช้ไมโครโฟนในการตรวจติดตามและนำมาวิเคราะห์ในช่วงความถี่ 0 – 22 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งในการทดลองจะกำหนดตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัว คือความเร็วตัด (Cutting speed), อัตราป้อนตัด (Feed rate) และขนาดสึกหรอด้านข้างของมีดตัด ในขณะที่ให้ความลึกตัด (Depth of cut) เป็นค่าคงที่ ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ในช่วง 0 – 2 กิโลเฮิร์ตซ์ สัญญาณที่ได้ไม่แตกต่างกัน

อย่างชัดเจนในทุกๆเงื่อนไขของการทดลอง เนื่องจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อม เช่น เสียงจากเครื่องจักรใกล้เคียง หรือเสียงรบกวนจากภายนอก และในช่วงระหว่าง 6 – 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ขนาดการสั่นหรือด้านข้างที่เพิ่มขึ้นมีผลให้แอมพลิจูดของเสียงเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันการเพิ่มอัตราป้อนก็ส่งผลให้ความเข้มเสียงเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 2 – 19 กิโลเฮิร์ตซ์ ในขณะที่อิทธิพลของความเร็วดัดนั้นส่งผลค่อนข้างน้อยต่อสัญญาณเสียง

Jemielniak K., Otman O. ^[19] ได้เสนอวิธีการในการตรวจจับความเสียหายของเครื่องมือตัด เช่นการแตกร้าวหรือการแตกหักในระหว่างกระบวนการตัด โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติของการแจกแจงของสัญญาณ AE_{rms} ซึ่งได้สมมติการแจกแจงแบบ β ขึ้นมาและใช้ค่าความเบ้ (Skew) ที่วัดความสมมาตรของการแจกแจง และค่าความโด่ง (Kurtosis) ซึ่งวัดค่าความโด่งของจุดสูงสุดเป็นตัววัดหลักในการตรวจติดตาม ซึ่งค่าทั้ง 2 ตัวมีความไวต่อระดับการสั่นหรือของเครื่องมือตัด และให้เหตุผลถึงการที่ไม่ใช่ค่า AE_{rms} เป็นตัววัดหลักว่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณอะคูสติก อิมพัลส์ (AE_{rms}) ไม่สามารถตรวจจับความเสียหายของเครื่องมือตัดได้เสมอไป ดังรูปที่ 2.46 และจากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่าตัววัดทั้ง 2 ตัวมีความสัมพันธ์กับความเสียหายของเครื่องมือตัดเป็นอย่างดี



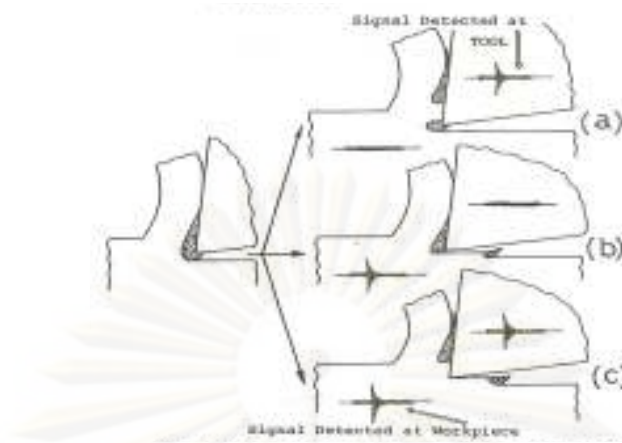
รูปที่ 2.46 : การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญของค่า AE_{rms} ในกรณีเครื่องมือตัดเกิดความเสียหาย ^[19]

Sikdar S.K., Chen M. ^[20] ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear Area) ของมีดตัด และแรงในการตัดที่ถูกวัดโดยไดนาโมมิเตอร์สำหรับกระบวนการกลึงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าแรงในการ

ตัดทั้ง 3 แรงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพื้นที่ของการสึกหรอบนผิวหลบเพิ่มขึ้นเพราะพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่าง เม็ดเม็ดและชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งยิ่งค่าของพื้นที่ของการสึกหรอบนผิวหลบมากขึ้นเท่าไร ค่าความเสียหายของเม็ดตัดบนชิ้นงานก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้นซึ่งส่งผลให้ความร้อนเกิดขึ้น โดยแรงตัดหลักมี ขนาดใหญ่สุดและแรงรัศมีมีขนาดเล็กที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม, เมื่อเม็ดเม็ดตัดเริ่มสึกหรอหรือเสียหาย แรงในการตัดทั้ง 3 แรงจะเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะแรงป้อนตัดและแรงรัศมี โดยแรงรัศมีจะมากกว่าแรงป้อนตัดเล็กน้อยเมื่อเม็ดตัดเริ่มเสียหาย ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของการสึกหรอบนผิวหลบ ของเม็ดตัดและแรงในการตัดได้ง่ายขึ้น

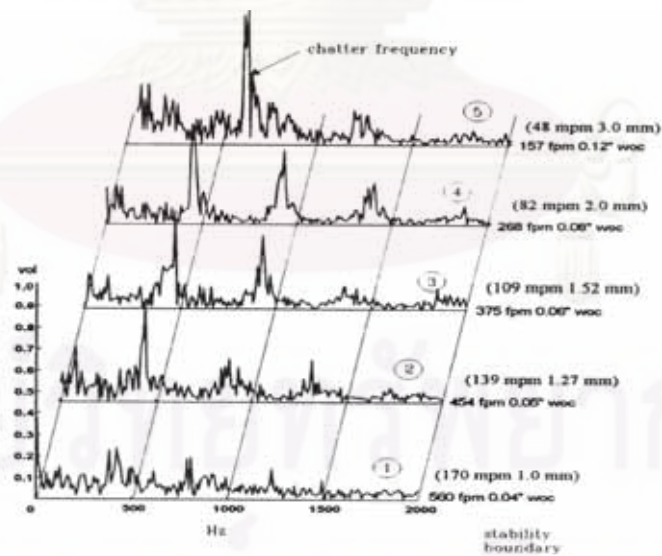
Uehara K., Kanda Y. ^[21] ได้อธิบายธรรมชาติของสัญญาณอะคูสติก อิมิสชันในกระบวนการตัดและเพื่อค้นหาวิธีการในการตรวจติดตามสถานะการตัดพร้อมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างกับกลไกการเกิดรูปแบบของเศษโลหะโดยทดลองใช้วัสดุชิ้นงานหลายรูปแบบในการกลึงและการกัดกับเม็ดตัดที่คมและสึก พร้อมทั้งวัดสัญญาณอะคูสติก อิมิสชันที่เม็ดตัดและชิ้นงาน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสัญญาณอะคูสติก อิมิสชันที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นช่วงๆ เมื่อเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องที่มีการเชื่อมติดที่คมตัด (Continuous chip with built-up edge) เนื่องจากการแตกหักของการเชื่อมติดที่คมตัด ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือสัญญาณแบบเป็นช่วงเกิดที่เม็ดตัดและไม่เกิดที่ชิ้นงาน, สัญญาณแบบเป็นช่วงเกิดที่ชิ้นงานและไม่เกิดที่เม็ดตัด และสัญญาณแบบเป็นช่วงเกิดทั้งเม็ดตัดและชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.47 และเมื่อเศษโลหะมีลักษณะเป็นแบบพื้นเลื่อยและเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง สัญญาณอะคูสติก อิมิสชันจะมีรูปแบบเป็นช่วงและเกิดเป็นระยะๆ ซึ่งการเกิดจะเกิดในเวลาเดียวกันกับช่วงของการแตกหรือการแบ่งของเศษโลหะ

ส่วนการทดลองในเรื่องของการสึกหรอของเม็ดตัดนั้นจะทำการติดเซนเซอร์ที่ชิ้นงาน (กระบวนการกัด) และติดเซนเซอร์ที่เม็ดตัด (กระบวนการกลึง) จากนั้นเอาสัญญาณอะคูสติกที่ได้มาวิเคราะห์โดยทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว แล้วทำการวิเคราะห์เพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้พบว่า เมื่อติดเซนเซอร์ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลกระทบของการสึกหรอของเม็ดตัดที่วิเคราะห์จากเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณ จะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนเซนเซอร์ที่ติดอยู่ที่เม็ดตัดนั้น เพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณจะถูกส่งผลโดยการสึกหรอของเม็ดตัด



รูปที่ 2.47 : รูปแบบการแตกหักของการยึดติดที่คมตัดที่มีผลต่อสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน^[21]

Chiou R.Y., Liang S.Y.^[22] ได้นำเสนอโมเดลที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันที่ใช้ในการตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง รวมถึงอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันที่เกิดขึ้นกับการสึกหรอของมีดตัดและความกว้างของการตัด โดยเมื่อการสึกหรอของมีดตัดหรือความลึกในการตัดเพิ่มสูงขึ้น แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันก็จะสูงขึ้นด้วย ในขณะที่แชนเตอร์ที่เกิดขึ้นจะเกิดใกล้กับความถี่ธรรมชาติของด้ามมีดตัด (Tool holder) ดังรูปที่ 2.48 และมีแนวโน้มที่จะเลื่อนไปทางด้านขวาของความถี่ธรรมชาติเมื่อความเร็วในการตัดลดลง



รูปที่ 2.48 : การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันในความเร็วและความลึกในการตัดที่ต่างกัน^[22]

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการนำเซนเซอร์เข้ามาช่วยในการตรวจติดตามภายในกระบวนการกลึง เช่นเซนเซอร์เสียง, เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่น, เซนเซอร์แรงตัด เป็นต้น ซึ่งนักวิจัยหลายๆท่านได้นำเสนอพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากแต่ละเซนเซอร์ รวมถึงวิธีการในการตรวจติดตามภายในกระบวนการกลึง ไม่ว่าจะเป็นการสึกหรอของมีดกลึง, รูปแบบของเศษโลหะ และการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ นอกจากนี้ส่วนมากจะเป็นการใช้เซนเซอร์เพียงแบบเดียว ซึ่งการใช้เซนเซอร์เพียงรูปแบบเดียวอาจจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำไม่มากนัก โดยการรวมความแตกต่างของเซนเซอร์จะทำให้สามารถรวมหรือเพิ่มเติมผลลัพธ์ที่ได้จากเซนเซอร์อื่นๆเพื่อที่จะให้การตัดสินใจที่มีความแน่นอนรวมถึงมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น และในกระบวนการกลึงโดยทั่วไปนั้นเพื่อให้ได้คุณภาพที่สูงของกระบวนการตัดนั้น ควรต้องมีการตรวจติดตามพารามิเตอร์อย่างน้อย 3 ตัวก็คือการสึกหรอของมีดกลึง, รูปแบบของเศษโลหะและการเกิดแชนเตอร์ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่จะเป็นการตรวจติดตามเพียงเฉพาะพารามิเตอร์ตัวเดียวหรือสองตัวเท่านั้น

การตรวจติดตามการสึกหรอของมีดกลึงโดยการใช้สเปคตรัมของสัญญาณเสียง และสัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่น ส่วนใหญ่จะสามารถบอกได้ว่ามีดกลึงเกิดการสึกหรอแล้วได้ แต่ไม่สามารถที่จะบอกได้ว่ามีดกลึงสึกหรอนานแค่ไหน ในขณะที่เซนเซอร์แรงจะสามารถช่วยในการพยากรณ์ระดับของการสึกหรอของมีดกลึงได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาโมเดลขึ้นมา หรือการใช้อัตราส่วนแรงตัดของแรงตัดสถิต

ในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ, การใช้เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่นจะสามารถช่วยในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการแตกหักของเศษโลหะและการเสียรูปแบบพลาสติกของเศษโลหะเป็นแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่น ดังนั้นเมื่อเกิดการแตกหักของเศษโลหะ สัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่นที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันกับในกรณีที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องอย่างชัดเจน นอกจากนี้ค่าเพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณแรงตัดยังสามารถช่วยในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดีเช่นกัน แต่ในกรณีของการใช้เซนเซอร์เสียงและเซนเซอร์วัดความเร่งยังไม่มีกรวิจัยในส่วนนี้มากนัก

การตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น ส่วนมากจะเป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ซึ่งการใช้ค่าเพาเวอร์สเปคตรัมของสัญญาณแรงตัดสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนสัญญาณอะคูสติก อิมิสชั่นซึ่งมีช่วงความถี่ของการใช้งานที่สูง ในขณะที่ความถี่ของการเกิดแชนเตอร์ส่วนมากจะเกิดที่ความถี่ไม่สูงถึงระดับของความถี่ที่ใช้ของเซนเซอร์อะคูสติก จึงทำให้การตรวจจับการเกิดแชนเตอร์โดยการใช้เซนเซอร์ชนิดนี้จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก นอกจากนี้ว่าเซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่นที่ใช้จะสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ต่ำๆได้ด้วย ในขณะที่เซนเซอร์

เสียงและเซนเซอร์วัดความเร่งยังไม่เป็นที่นิยมมากนักในการที่จะนำมาใช้ในการตรวจติดตามการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา วิธีการรวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ถูกนำเสนอ จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาในงานวิจัยนี้ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้นจากทั้ง 4 เซนเซอร์ กับการสั่นหรือของมีดกิ้ง, รูปแบบของเศษโลหะ และการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือการพัฒนากระบวนการตรวจติดตามสถานะของการกลิ้ง (รูปแบบของเศษโลหะ, แชนเตอร์) และสภาพของมีดกลิ้ง(การสึกหรอของมีดกลิ้ง) ดังนั้นในการทดลองจะต้องทำการแปรผันปัจจัยต่างๆเพื่อให้เกิดสถานะของการกลิ้งและสภาพของมีดกลิ้งที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาใช้ในการจำแนกสถานะของการกลิ้งและสภาพมีดกลิ้ง

3.1.1 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ในกระบวนการกลิ้งนั้นมีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ก็คือ ความเร็วตัด, ความลึกในการตัด และอัตราป้อนตัด โดยเงื่อนไขของการตัดทั้ง 3 ตัวนี้มีผลต่อการสึกหรอของมีดกลิ้ง และรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นในขณะตัดหรือแชนเตอร์

1.) ความเร็วตัด

- 100 , 150 , 200 , 250 , 300 เมตร/นาที

2.) อัตราป้อนตัด

- 0.10 , 0.15 , 0.20 , 0.25 , 0.30 มิลลิเมตร/รอบ

3.) ความลึกตัด

- 0.25 , 0.50 , 0.75 , 1.00 , 1.50 , 1.75 , 2.00 มิลลิเมตร

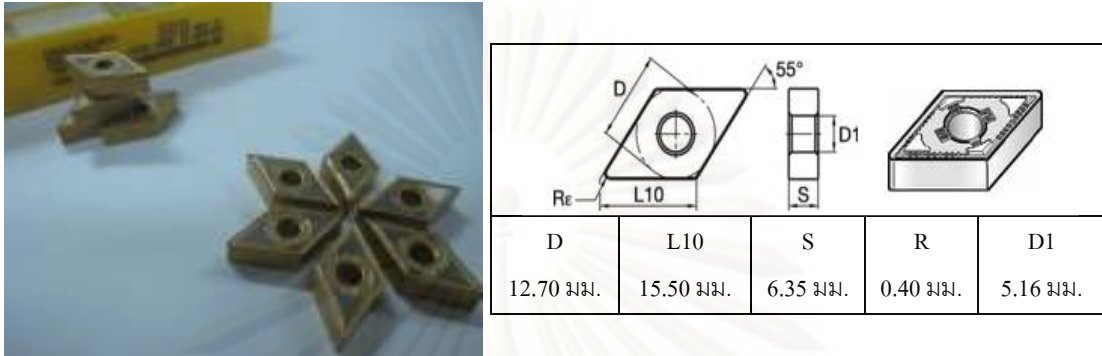
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.) วัสดุชิ้นงานในการกลิ้งเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 : ภาพแสดงวัสดุชิ้นงานกลิ้ง

- 2.) เม็ดมีดตัด(Insert) ที่ใช้เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว ยี่ห้อ KENNAMETAL เบอร์ DNMG 150604FN KC9110



รูปที่ 3.2 : ภาพแสดงเม็ดมีดตัด

- 3.) ด้ามมีดตัด(Tool Holder) ยี่ห้อ KENNAMETAL เบอร์ PCLNR2525M12



รูปที่ 3.3 : ภาพแสดงด้ามมีดตัด

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



รูปที่ 3.4 : ภาพแสดงเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน

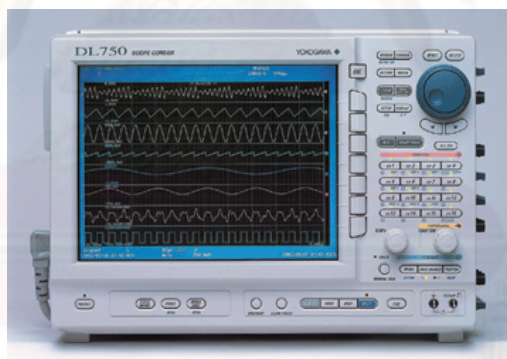
5.) เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจติดตามสภาพมีดกึ่งและสถานะการกึ่ง

- เซนเซอร์แรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
- เซนเซอร์เสียง (Sound Sensor) ยี่ห้อ 01dB-Metravib รุ่น PRE 21A
- เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่น (Acoustic Emission Sensor) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 8152B
- เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) ยี่ห้อ Endevco รุ่น 27A11



รูปที่ 3.5 : ภาพแสดง (ก) เซนเซอร์แรง, (ข) เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่น, (ค) เซนเซอร์เสียง, (ง) เซนเซอร์วัดความเร่ง

6.) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA



รูปที่ 3.6 : ภาพแสดงเครื่องกึ่งสี่เอ็นซี 4 แกน

7.) เครื่องมือวัดขนาดชิ้นงาน (Vernier calipers)



รูปที่ 3.7 : ภาพแสดงเครื่องมือวัดขนาดชิ้นงาน

8.) ไมโครสโคป (Microscope) ยี่ห้อ KEYENCE



รูปที่ 3.8 : ภาพแสดงเครื่องไมโครสโคป

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- 1.) การเตรียมชิ้นงาน นำเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยปากจับ(chuck) บนเครื่องกลึง เจาะเพื่อยันศูนย์ชิ้นงาน จากนั้น ทำปาดหน้าและปอกผิวที่มีความแข็งกว่าปกติทั้ง
- 2.) การติดตั้งเซนเซอร์
 - 2.1 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง, เซนเซอร์วัดความเร็ว และเซนเซอร์ อะคูสติก อิมัลชัน (รูปที่ 3.9)
 - ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง(Dynamometer) เข้ากับชุดป้อนมีด(Turret) ของเครื่องกลึง
 - เชื่อมต่อสายเซนเซอร์วัดแรงตัดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ(Charge Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณ จากนั้นต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป(Oscilloscope)
 - ติดเซนเซอร์วัดความเร็ว และเซนเซอร์อะคูสติก อิมัลชันเข้ากับด้ามมีด(Tool Holder) ด้วยกาวอีพ็อกซี

- ติดตั้งเม็دمีดตัดกับด้ามมีดแล้วนำไปจับยึดเข้ากับชุดจับยึดที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งกับเซนเซอร์วัดแรงตัด, เซนเซอร์วัดความเร็ว และเซนเซอร์อะคูสติก อิมิตชัน (ภาคผนวก ฉ)
- เชื่อมต่อสายเซนเซอร์วัดความเร็ว และเซนเซอร์อะคูสติก อิมิตชันเข้ากับเครื่องจ่ายไฟแล้วต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป



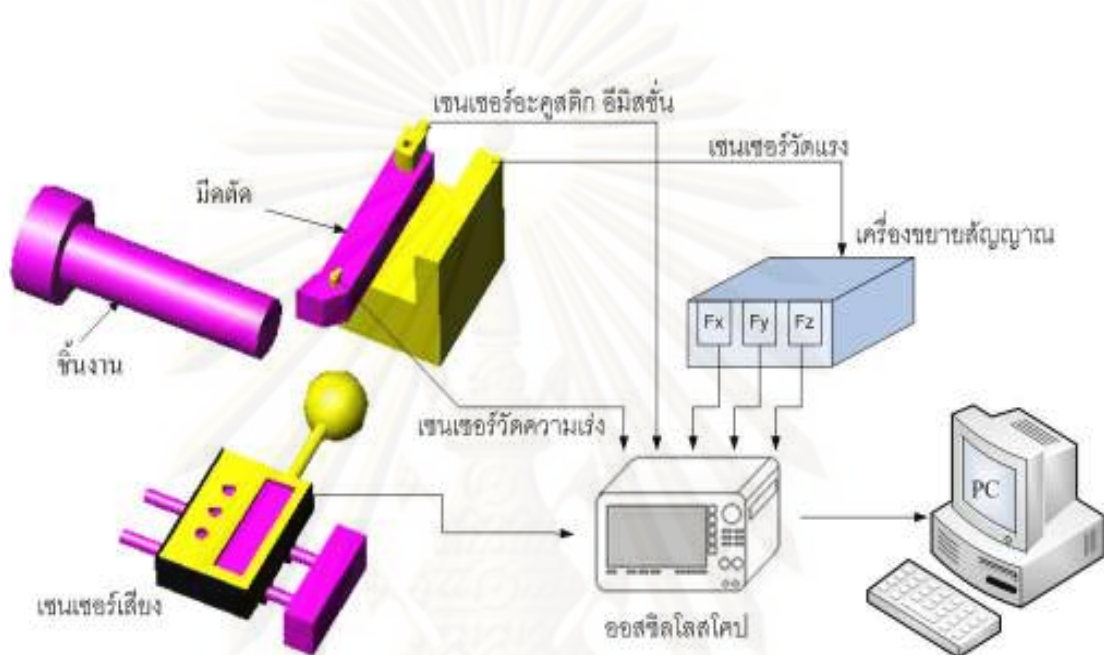
รูปที่ 3.9 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง,เซนเซอร์วัดความเร็วและเซนเซอร์อะคูสติก อิมิตชัน



รูปที่ 3.10 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์เสียง

2.2 การติดตั้งเซนเซอร์เสียง (รูปที่ 3.10)

- ทำการติดตั้งเซนเซอร์เสียงบนชุดยึดจับและต่อเข้ากับแท่งแม่เหล็กสำหรับติดตั้งภายในเครื่องกลิ้ง
- ติดแท่งแม่เหล็กภายในเครื่องกลิ้ง



รูปที่ 3.11 : ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับการดำเนินการทดลอง

3.) การปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคป (ตารางที่ 3.1)

	Low-pass Filter	Sampling Rate	Record Length
เซนเซอร์แรง	50 kHz	100 kS/s	1 M
เซนเซอร์เสียง	50 kHz	100 kS/s	1 M
เซนเซอร์วัดความเร่ง	50 kHz	100 kS/s	1 M
เซนเซอร์อะคูสติก อิมิตชัน	Full	2 MS/s	25 M

ตารางที่ 3.1 : ตารางแสดงการปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคป

- 4.) ทุกๆการตัดที่ปริมาตร 0 , 750 , 1500 , 2000 ลบ.ซม. จะทำการวัดความถี่หรือของมิดกลิ้งด้วยเครื่องไมโครสโคป ดังรูปที่ 3.12 พร้อมทั้งวัดสัญญาณเสียง, แรงตัด,

ความเร่งและสัญญาณอะคูสติก อิมิตชั่น โดยเมื่อกลิ้งชิ้นงานจนถึงปริมาตร 2000 ลบ.ซม. ก็จะทำให้การเปลี่ยนมีดกลิ้งและทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่อไป



รูปที่ 3.12 : ภาพแสดงการตัดที่ปริมาตรต่างๆ

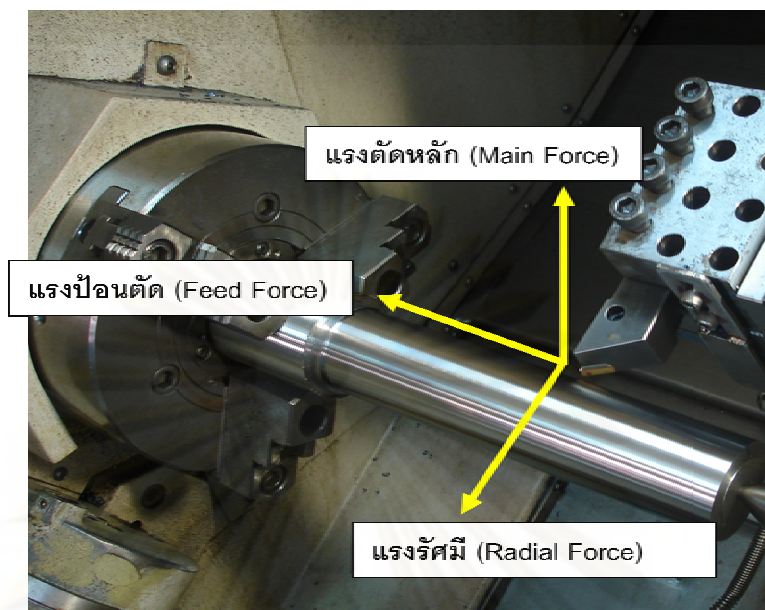


รูปที่ 3.13 : ภาพแสดงการตัดที่ปริมาตรต่างๆ

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในหน่วยโวลท์ ต้องนำมาทำการแปลงหน่วยในส่วน ของสัญญาณแรงตัด, สัญญาณความเร่งและสัญญาณเสียง ตามค่า sensitivity ตามตารางที่ 3.2 ดังนี้

- แรงรัศมี (Radial Force , N) = V_x (Volt) x 600 (N / Volt)
- แรงป้อนตัด (Feed Force , N) = V_y (Volt) x 600 (N / Volt)
- แรงตัดหลัก (Main Force , N) = V_z (Volt) x 1200 (N / Volt)
- ความเร่ง (g) = V_a (Volt) x 100 (g / Volt)
- ความดันเสียง (Pascal) = V_s (Volt) x 1000 / 48.4 (Pascal / Volt)

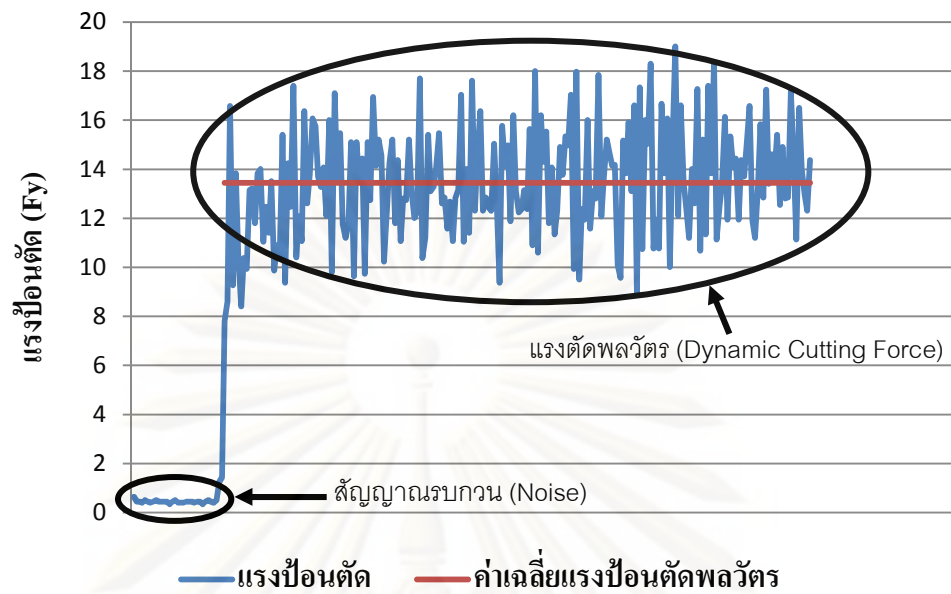


รูปที่ 3.13 : ภาพแสดงทิศทางของแรงตัด (แรงรัศมี, แรงป้อนตัด และแรงตัดหลัก)

หลังจากทำการแปลงหน่วยแล้ว ในส่วนของสัญญาณแรงตัดนั้นจะนำค่าแรงตัดพลวัตทั้งสามแรง มาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาลบออกจากค่าเฉลี่ยก่อนนำไปทำการวิเคราะห์สัญญาณในด้านของความถี่และนำค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตมาลบออกด้วยค่าสัญญาณรบกวนเฉลี่ย ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งจะได้ค่าแรงตัดสถิต(Static Force) สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นกับสถานะของการกลึง และสภาพของมีดกลึง

เซนเซอร์		Sensitivity	ช่วงความถี่ใช้งาน (Frequency Range)
เซนเซอร์แรงตัด	แรงรัศมี (Fx)	600 V / N	0 – 1,000 Hz
	แรงป้อนตัด (Fy)	600 V / N	
	แรงตัดหลัก (Fz)	1200 V / N	
เซนเซอร์วัดความเร่ง		10 mV / g	0.2 - 12,000 Hz
เซนเซอร์เสียง		48.4 mV / Pascal	20 - 20,000 Hz
เซนเซอร์อะคูสติก อิมิตชัน		48 dBref 1V/(m/s)	100 - 900 kHz

ตารางที่ 3.2 : ตารางแสดงค่า sensitivity และช่วงความถี่ใช้งานของแต่ละเซนเซอร์



รูปที่ 3.14 : ภาพแสดงสัญญาณแรงป้อนตัด

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

- 1.) จากข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง นำมาทำการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ด้วยโปรแกรม Matlab (ภาคผนวก ง)
- 2.) วิเคราะห์สัญญาณทั้งในโดเมนเวลา และในโดเมนความถี่ของสัญญาณ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นของแต่ละเซนเซอร์กับการสึกหรอของมีดกลึง, การแตกหักของเศษโลหะ และการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์
- 3.) ในส่วนของโดเมนความถี่ จะหาค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน (Energy Spectrum Density) ของช่วงความถี่ที่ใช้ในการจำแนกสถานะของการกลึงและสภาพของมีดกลึง ของแต่ละเซนเซอร์โดยการอินทิเกรตค่ากำลังสองของสเปกตรัม(เพาเวอร์สเปกตรัม)ทุกความถี่ จากทฤษฎีบทพลังงานของเรเลย์ห์ (Rayleigh's Energy Theorem) ดังสมการที่ 3-1

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

- 4.) จากข้อมูลค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานที่ได้รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำแนกสถานะการกลึงและ สภาพของมีดกลึง นำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Networks : ANN) ในการบ่งชี้ระดับการ

สีทรวงของมีดกลิ้ง, รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น และการเกิดแฮตเตอร์ใน
กระบวนการกลิ้ง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

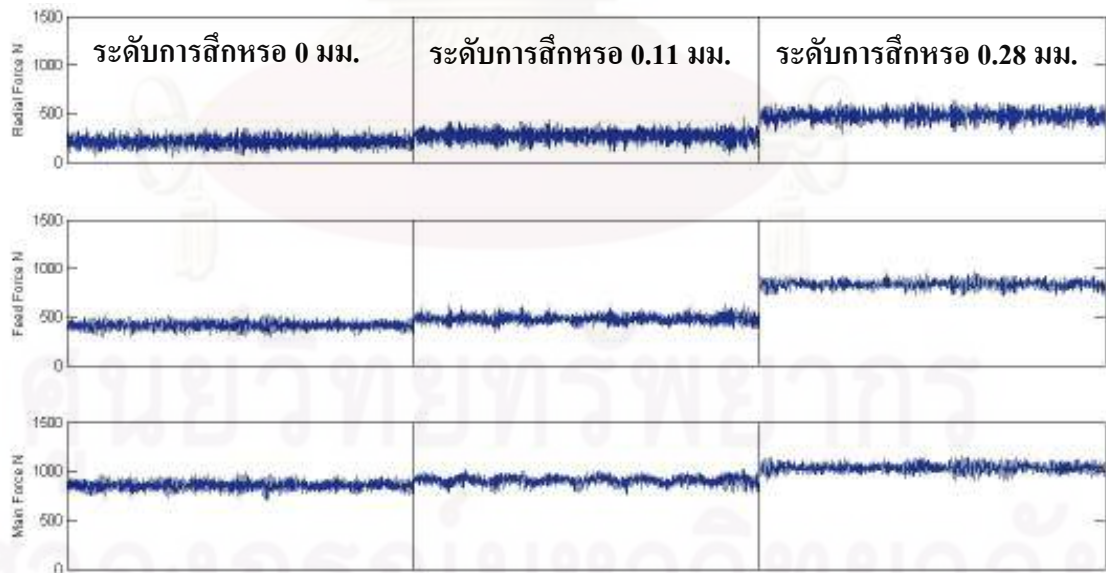
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากข้อมูลที่ได้รับจากผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณจากเซนเซอร์ทั้ง 4 ชนิด กับการสีกหรือของมีดกึ่งและสถานะของการกึ่งว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นเป็นแบบต่อเนื่องหรือแบบแตกหัก รวมถึงการสันแบบแซตเตอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกึ่ง โดยจะแยกการวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

4.1 การพยากรณ์ขนาดของการสีกหรือของมีดกึ่ง

ในกระบวนการกึ่งโดยทั่วไปนั้น, การสีกหรือบนผิวหลบจะถูกให้ความสำคัญมากกว่าการสีกหรือบนผิวคายในระหว่างการวิเคราะห์การสีกหรือของมีดกึ่ง เนื่องจากการสีกหรือบนผิวหลบจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำทางด้านขนาดของชิ้นงาน รวมถึงแนวโน้มของการเกิดการสันแบบแซตเตอร์ที่สูงขึ้น ทำให้ในการพิจารณาการสีกหรือของมีดกึ่งจะเลือกการสีกหรือบนผิวหลบเป็นตัวแทนของการสีกหรือของมีดตัด

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสีกหรือของมีดกึ่งกับสัญญาณแรงตัด



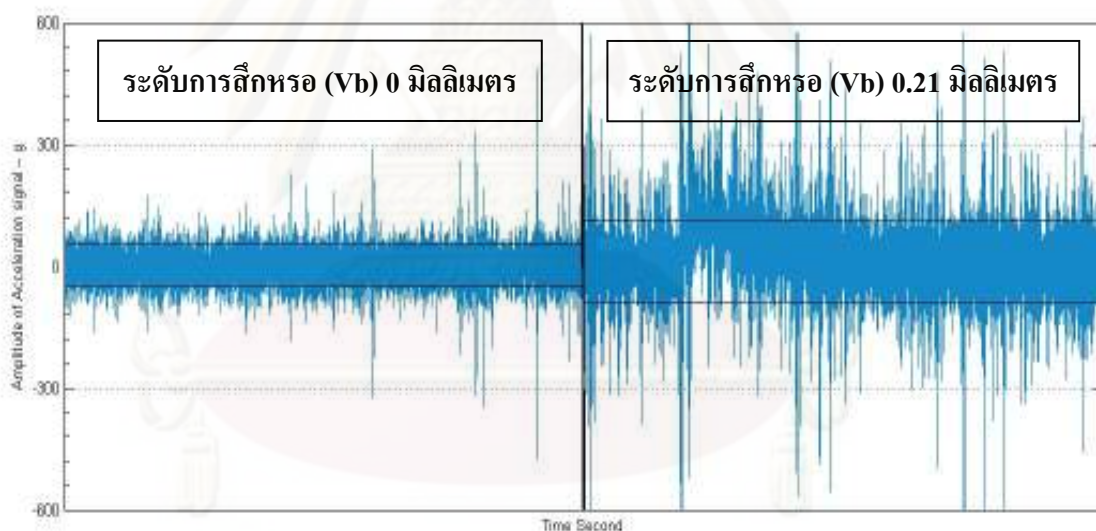
รูปที่ 4.1 : ภาพแสดงสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อมีดกึ่งมีการสีกหรือเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง(ภาคผนวก ก) เมื่อนำสัญญาณแรงตัดที่ได้มาวิเคราะห์ในโดเมนเวลา จะพบว่าเมื่อมีดกึ่งเกิดการสีกหรือเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงตัดสถิตทั้ง 3 แกน(แรงรัศมี, แรงป้อนตัด

และแรงตัดหลัก) เพิ่มขึ้นตามขนาดของการสั่นหรือของมีดกึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ดังนั้น พารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวจึงถูกนำมาใช้เพื่อพยากรณ์ระดับการสั่นหรือของมีดกึ่งสำหรับเซนเซอร์แรง ตัด

4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นหรือของมีดกึ่งกับสัญญาณความเร่ง

จากผลการทดลอง จะพบว่าเมื่อมีดกึ่งเกิดการสั่นหรือเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ แรงตัดเพิ่มมากขึ้นด้วยตามที่ได้กล่าวไปแล้ว และเมื่อแรงตัดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ในระหว่างกระบวนการตัดสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำสัญญาณความเร่งที่ได้รับจากเซนเซอร์วัด ความเร่งซึ่งมีความสามารถในการวัดการสั่นสะเทือนมาวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าค่าขนาดแอมพลิจูด ของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่งมีขนาดใหญ่ขึ้น ตามระดับการสั่นหรือของมีดกึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยค่าแอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่งที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในการพยากรณ์ระดับการสั่นหรือของมีดกึ่งนั้น สามารถหาได้โดยวิธีการ ดังรูปที่ 4.3

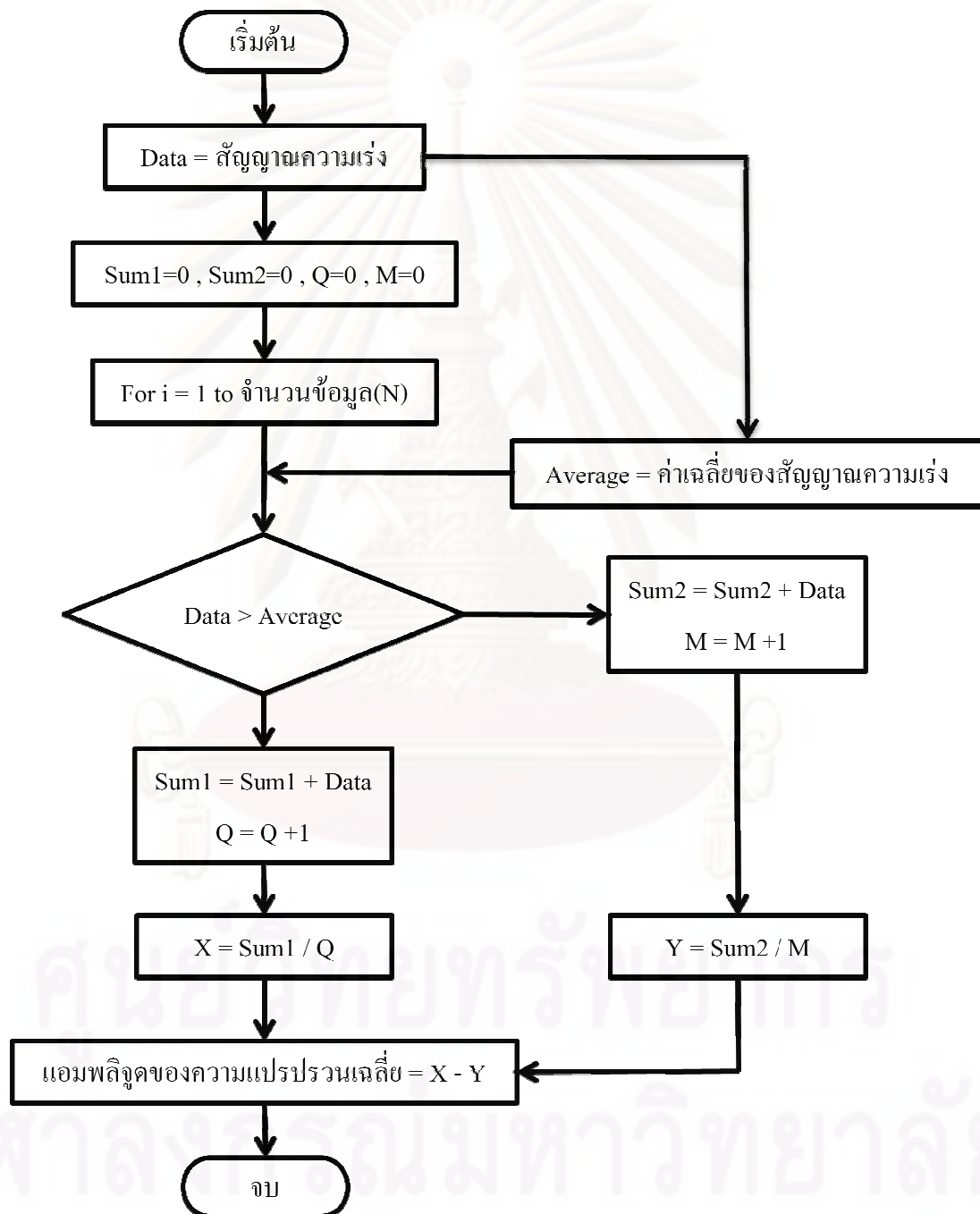


รูปที่ 4.2 : ภาพแสดงแอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่งที่สูงขึ้น ตาม ระดับของการสั่นหรือของมีดกึ่ง

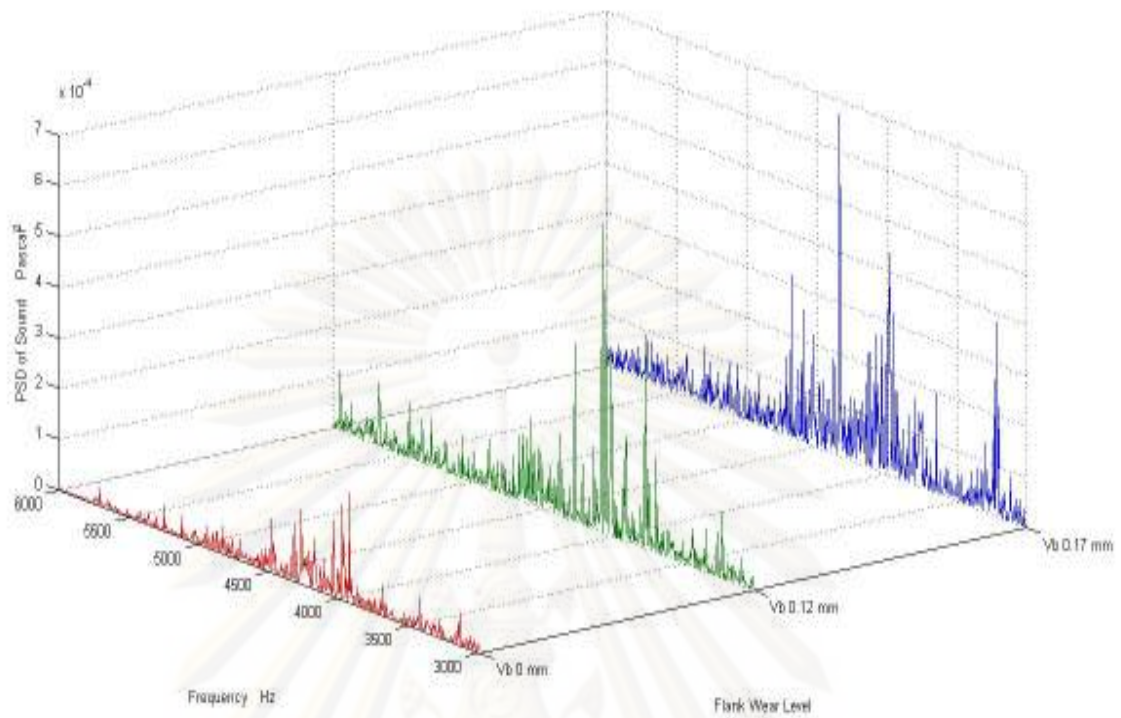
4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นหรือของมีดกึ่งกับสัญญาณเสียง

จากผลการทดลอง เมื่อนำสัญญาณเสียงที่วัดได้ในขณะตัดมาวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว จะพบว่าเมื่อมีดกึ่งมีขนาดของการสั่นหรือเพิ่มสูงขึ้น ค่าเพาเวอร์ สเปกตรัมของสัญญาณเสียงจะสูงขึ้นในช่วงความถี่ 3 - 6 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

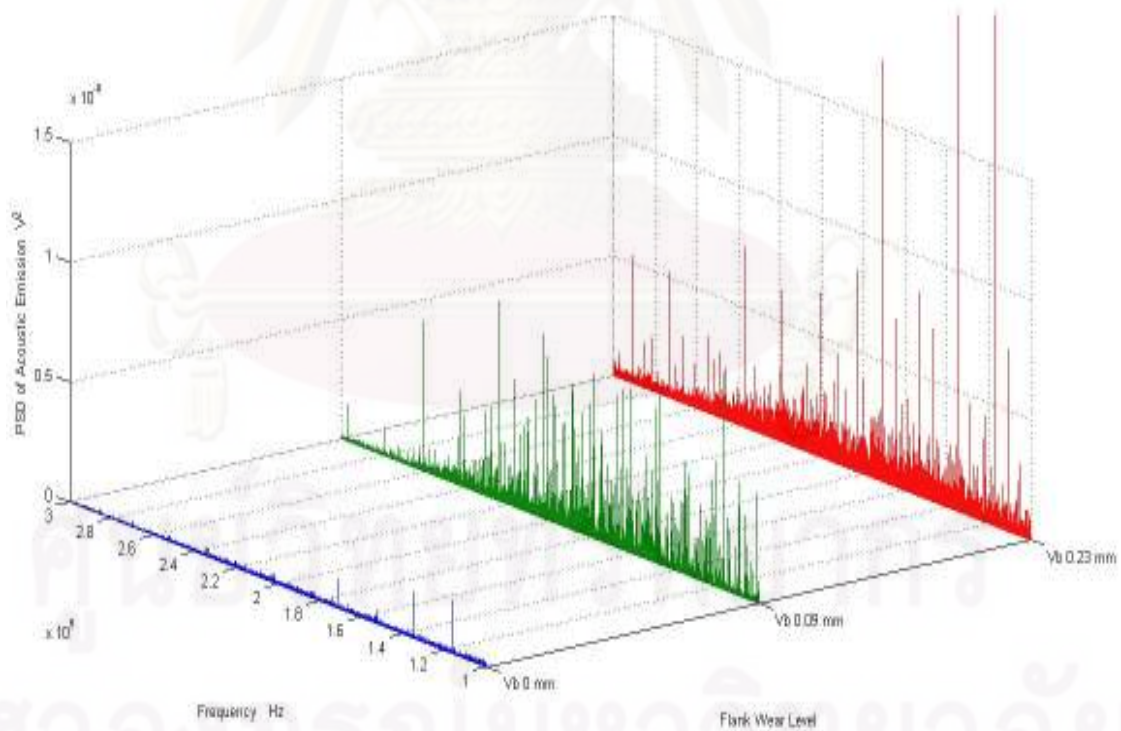
จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน (Energy Spectral Density) จากช่วงความถี่ดังกล่าวจะถูกใช้เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในการพยากรณ์ระดับการสีกหรือของมีดกึ่ง ซึ่งสามารถหาค่าของพลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าเฟาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงตลอดช่วงของความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความถี่หรือของมีดกึ่ง



รูปที่ 4.3 : แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการหาค่าแอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณ



รูปที่ 4.4 : ภาพแสดงเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียง เมื่อมีดกึ่งมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น



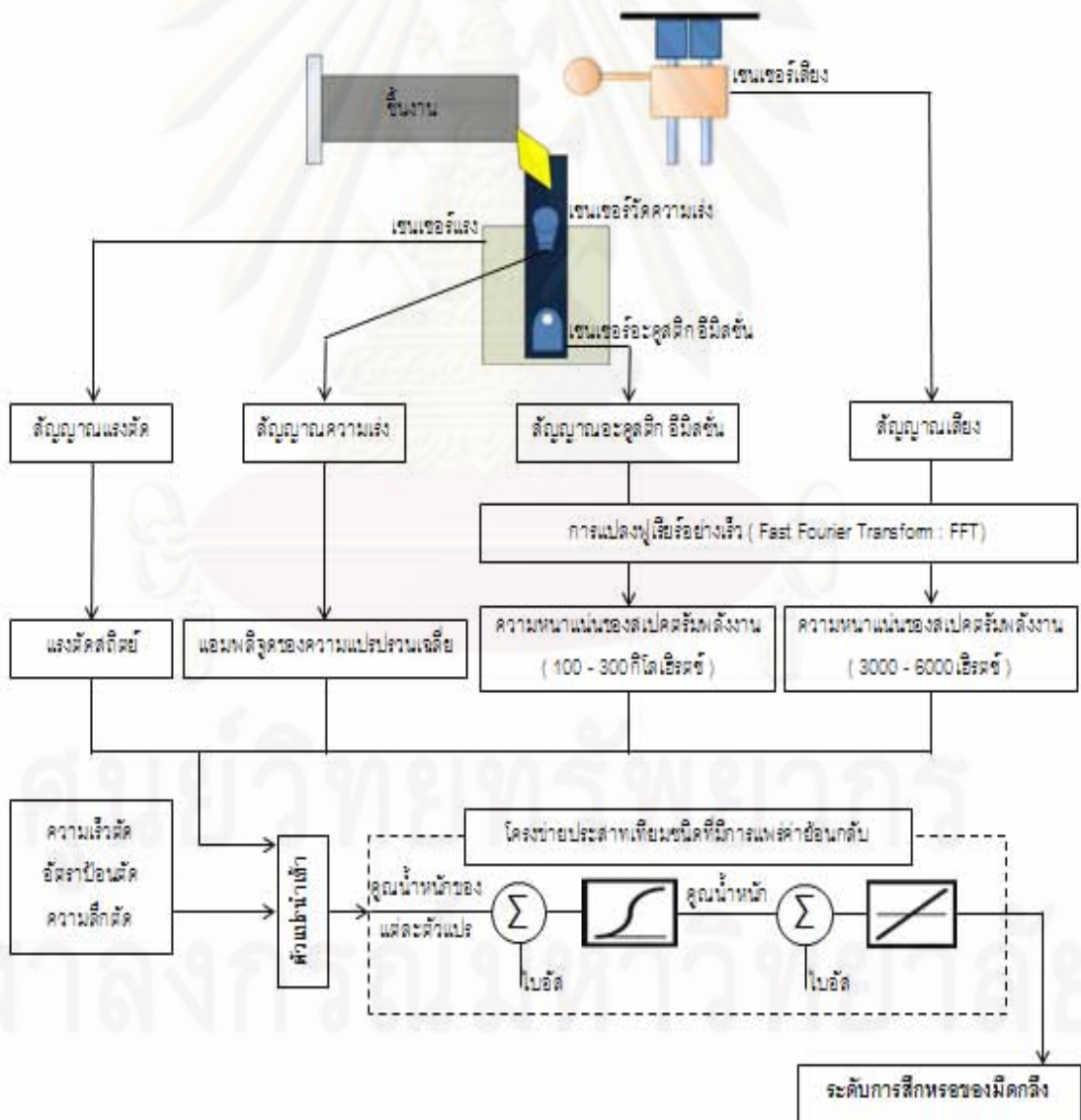
รูปที่ 4.5 : ภาพแสดงเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณอะคูสติก อิมิสชัน เมื่อมีดกึ่งมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น

4.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการสีกหรือของมีดกึ่งกับสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน

จากผลการทดลอง เมื่อนำสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันมาวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ จะพบว่าในช่วงความถี่ 100 - 300 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณจะสูงขึ้นตามระดับความสีกหรือของมีดกึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งขนาดของการสีกหรือบนผิวหลบเพิ่มขึ้นจาก 0 - 0.09 - 0.23 มิลลิเมตร ตามลำดับ

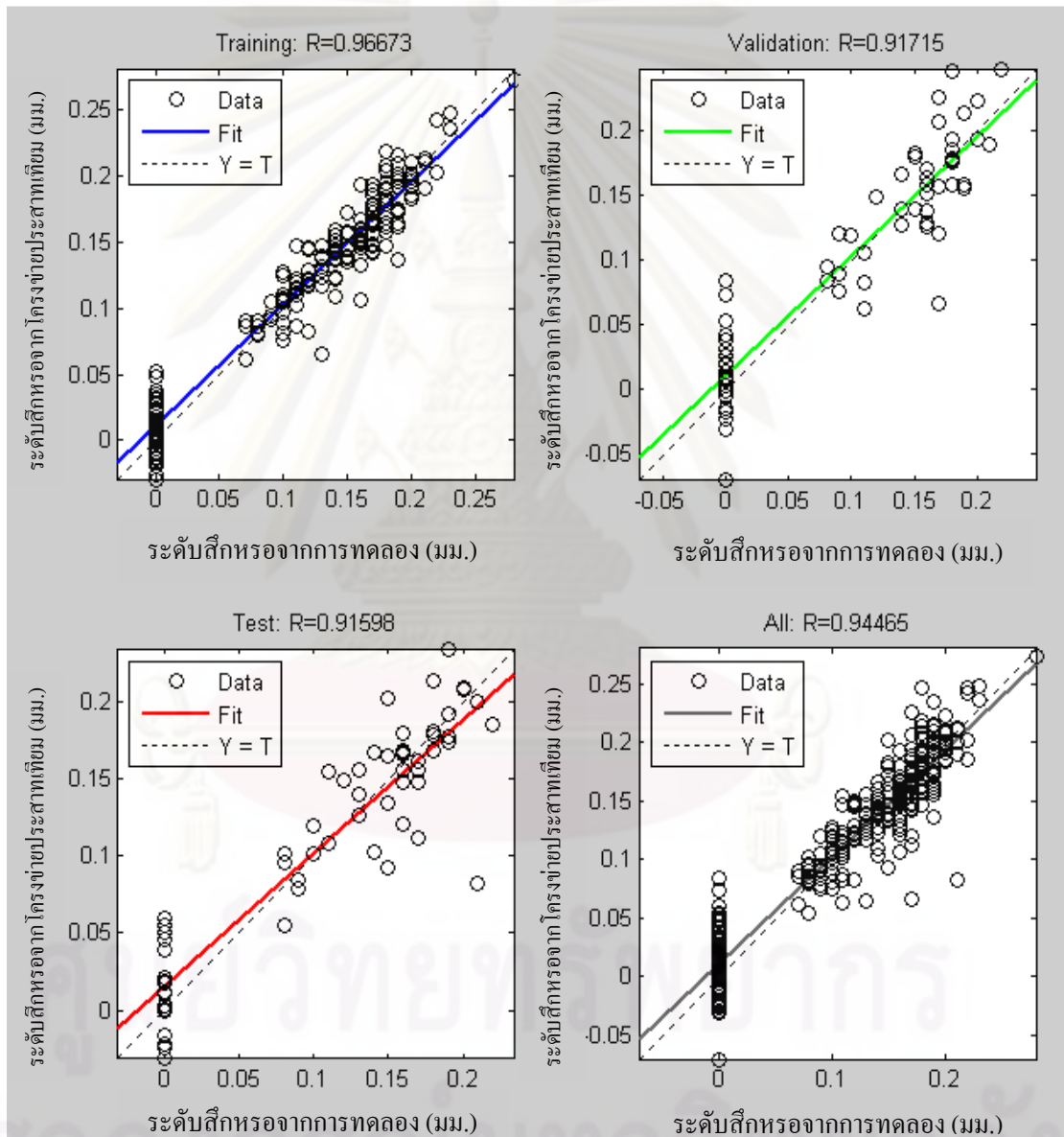
ในลักษณะเดียวกันกับสัญญาณเสียง ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานในช่วงความถี่ 100 - 300 กิโลเฮิร์ตซ์ จะถูกใช้เป็นพารามิเตอร์ในการพยากรณ์ระดับการสีกหรือของมีดกึ่ง

4.1.5 การพยากรณ์ขนาดการสีกหรือโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4.6 : ภาพแสดงวิธีการพยากรณ์ระดับการสีกหรือของมีดกึ่งโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากพารามิเตอร์ที่นำเสนอในข้างต้น ได้แก่ แรงตัดสถิตทั้ง 3 แกน, แอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่ง, ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณเสียงและสัญญาณอะคูสติก อิมพัลส์ รวมถึงเงื่อนไขของการตัด(ความเร็ว, อัตราป้อนตัดและความลึกตัด) จะถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรนำเข้าของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (Neural network with back-propagation) เพื่อใช้ในการพยากรณ์ระดับของการสึกหรอของมีดกลึง ดังรูปที่ 4.6 โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งมีวิธีการดังแสดงในภาคผนวก จ



รูปที่ 4.7 : ภาพแสดงผลลัพธ์ของการพยากรณ์ระดับสึกหรอของมีดกลึง

จากผลลัพธ์ที่ได้รับจากการพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกลึงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม(รูปที่ 4.7) พบว่ามีค่า R ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของระดับการสึกหรอ

(มม.) ของมีดกึ่งที่¹ได้รับจากการทดลอง(Target) กับผลลัพธ์ของระดับการสึกหรอ(มม.) ที่¹ได้รับจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม(Output) ซึ่งหาได้โดยเอา หนึ่งลบด้วยค่าผลรวมของผลต่างระหว่างค่าการสึกหรอที่¹ได้จากการพยากรณ์กับค่า residual ยกกำลังสอง หารด้วยผลรวมของผลต่างระหว่างค่าการสึกหรอที่¹ได้จากการพยากรณ์กับค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย(Mean Squared Error : MSE) ระหว่างผลของการทดลองกับผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลที่ถูกใช้ในการฝึกสอน, การยืนยันความถูกต้อง, การทดสอบ และข้อมูลทั้งหมด ดังตารางที่ 4.1

การพยากรณ์ระดับการสึกหรอ	R	ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
การฝึกสอน	0.96673	0.000331
การยืนยันความถูกต้อง	0.91715	0.001045
การทดสอบ	0.91598	0.000935
ข้อมูลทั้งหมด	0.94465	0.000595

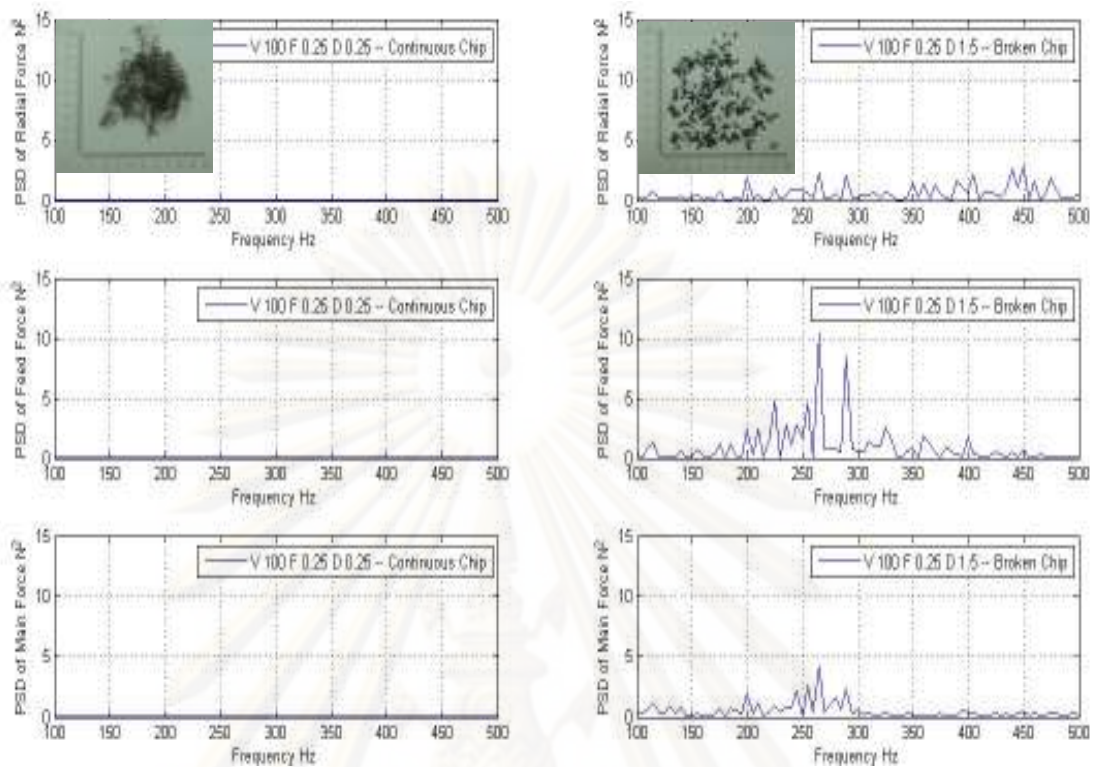
ตารางที่ 4.1 : ตารางแสดงผลของการพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกึ่ง

4.2 การจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น

รูปแบบของเศษโลหะที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของการตัดที่แตกต่างกันจะมีผลกระทบต่อพื้นผิวของชิ้นงาน, การหยุดของเครื่องจักรเพื่อกำจัดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง, อายุการใช้งานของมีดตัด รวมถึงการเกิดการสั่นแบบแฉกแฉกด้วย โดยรูปแบบของเศษโลหะที่ต้องการให้เกิดขึ้นนั้น เศษโลหะควรจะแตกหักในขนาดที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้พื้นผิวของชิ้นงานที่ดี และป้องกันการพังยุ่งเหยิงของเศษโลหะกับมีดตัด รวมถึงเป็นการเพิ่มผลผลิตภาพของการทำงานให้สูงขึ้นด้วย

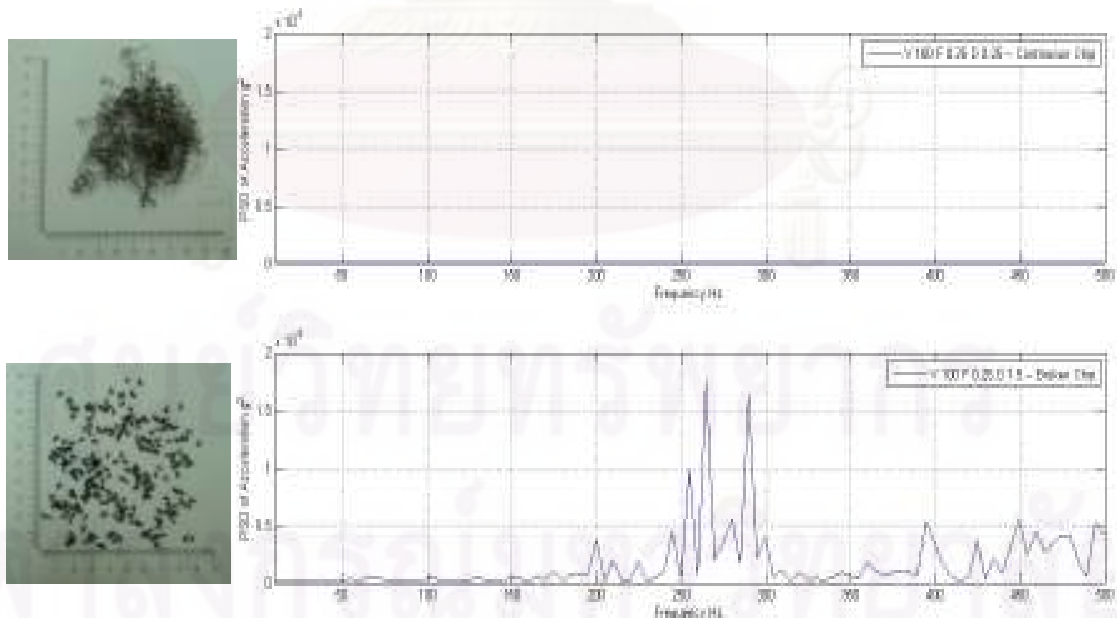
4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นกับสัญญาณแรงตัด

จากผลการทดลอง(ภาคผนวก ข) เมื่อนำสัญญาณแรงตัดมาทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเพื่อวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จะพบว่า เมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัด จะมีขนาดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในช่วงของความถี่ 100 - 500 เฮิร์ตซ์ อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ดังนั้นค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานซึ่งได้รับมาจากการอินทิเกรตเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณในช่วงความถี่ 100 - 500 เฮิร์ตซ์ ของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกนจะถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.8 : ภาพแสดงการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (ซ้าย) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ขวา)

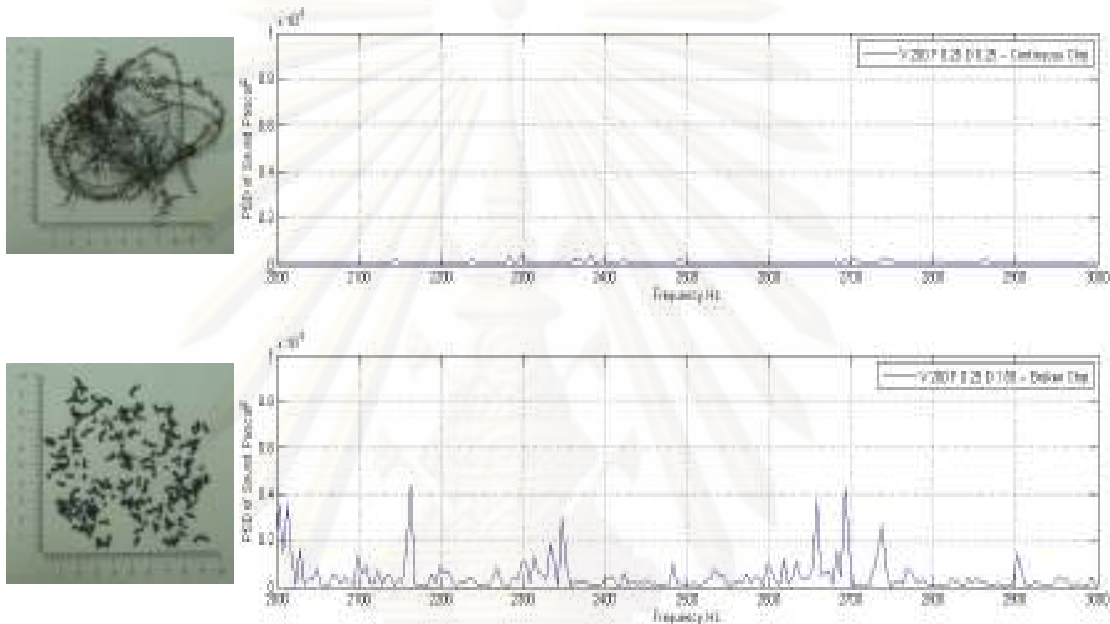
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นกับสัญญาณความเร่ง



รูปที่ 4.9 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณความเร่ง เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (บน) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ล่าง)

จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำสัญญาณความถี่มาทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เพื่อวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จะพบว่า ในช่วงความถี่ 100 - 500 เฮิรตซ์ เมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณความถี่ จะมีขนาดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เช่นเดียวกันกับสัญญาณแรงตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นกับสัญญาณเสียง

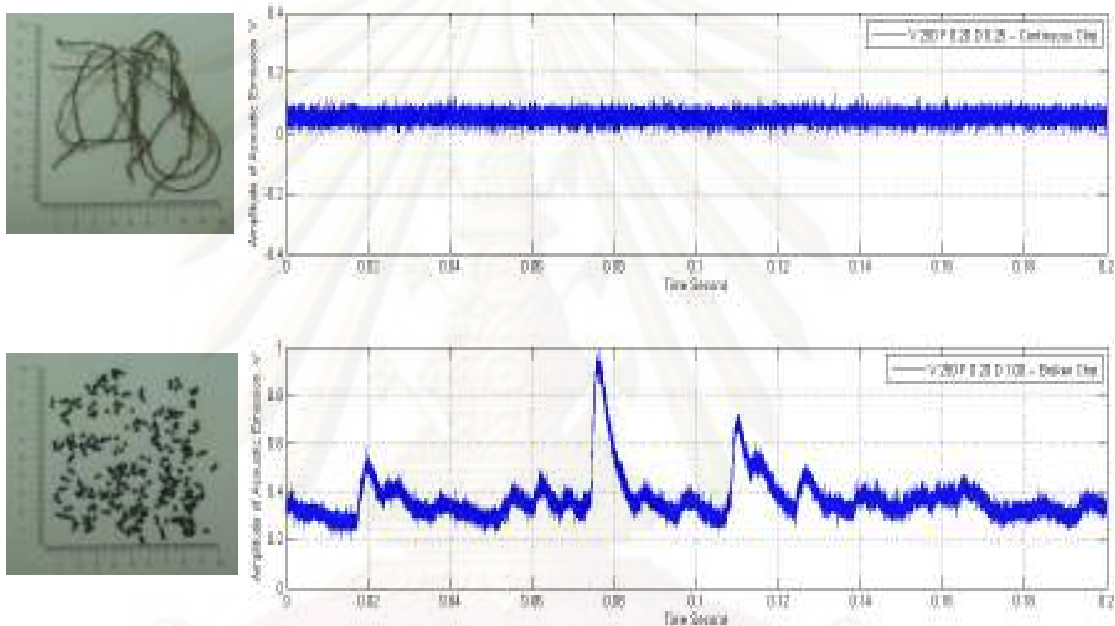


รูปที่ 4.10 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียง เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (บน) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ล่าง)

จากผลการทดลอง เมื่อนำสัญญาณเสียงมาทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เพื่อวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ จะพบว่าเมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงความถี่ 2 - 3 กิโลเฮิรตซ์ จะมีขนาดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ในขณะที่ในช่วง 0 - 2 กิโลเฮิรตซ์ สัญญาณที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อม เช่น เสียงจากเครื่องจักรใกล้เคียงหรือเสียงรบกวนจากภายนอก และในช่วงความถี่ที่เกิน 3 กิโลเฮิรตซ์ ขึ้นไปจะมีผลของการสีกหรือของมีดกlinger อยู่ด้วยดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.3 จึงไม่นำมาพิจารณาในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น จะใช้ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่ง ซึ่งจะถูกใช้เป็นปัจจัยนำเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นกับสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน

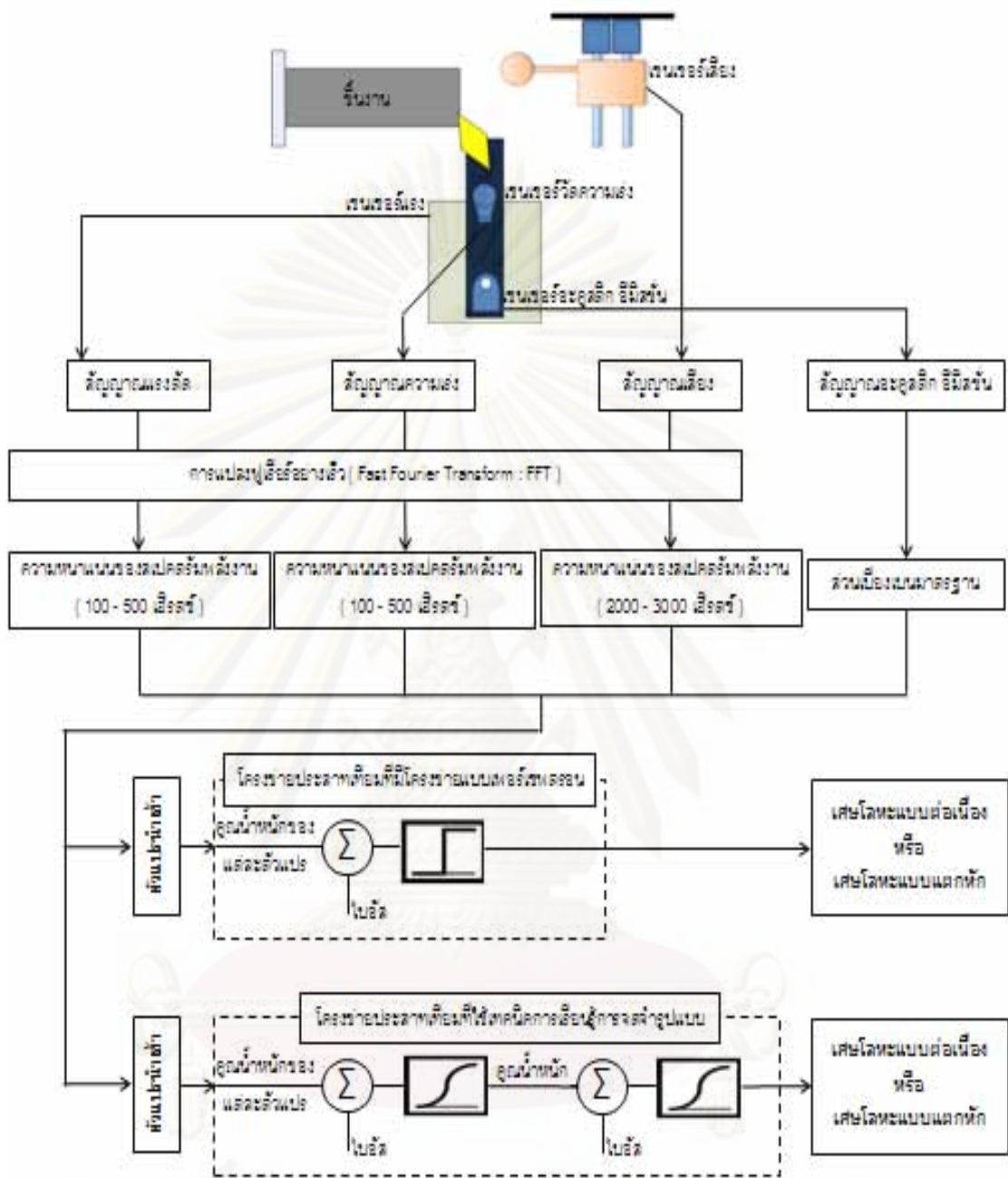
จากผลการทดลอง เมื่อนำสัญญาณอะคูสติก อิมิตชันมาวิเคราะห์จะพบว่า เมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน จะมีขนาดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เนื่องจากเศษโลหะแบบแตกหักที่เกิดขึ้นจะปลดปล่อยพลังงานออกมาทำให้สัญญาณอะคูสติก อิมิตชันมีค่าสูงขึ้นเป็นช่วงๆตามการแตกหักของเศษโลหะ ส่งผลให้สัญญาณที่เกิดมีความเบี่ยงเบนสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 : ภาพแสดงตัวอย่างของการเปรียบเทียบสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (บน) และเศษโลหะแบบแตกหัก (ล่าง)

4.2.5 การจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากพารามิเตอร์ที่นำเสนอในข้างต้น ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน, สัญญาณเสียงและสัญญาณความเร่ง รวมถึงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน จะถูกนำมาใช้เป็นปัจจัยนำเข้าของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน(neural network with perceptron) และแบบที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ(neural network pattern recognition technique) เพื่อใช้ในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ ดังรูปที่ 4.12 โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งมีวิธีการแสดงในภาคผนวก จ



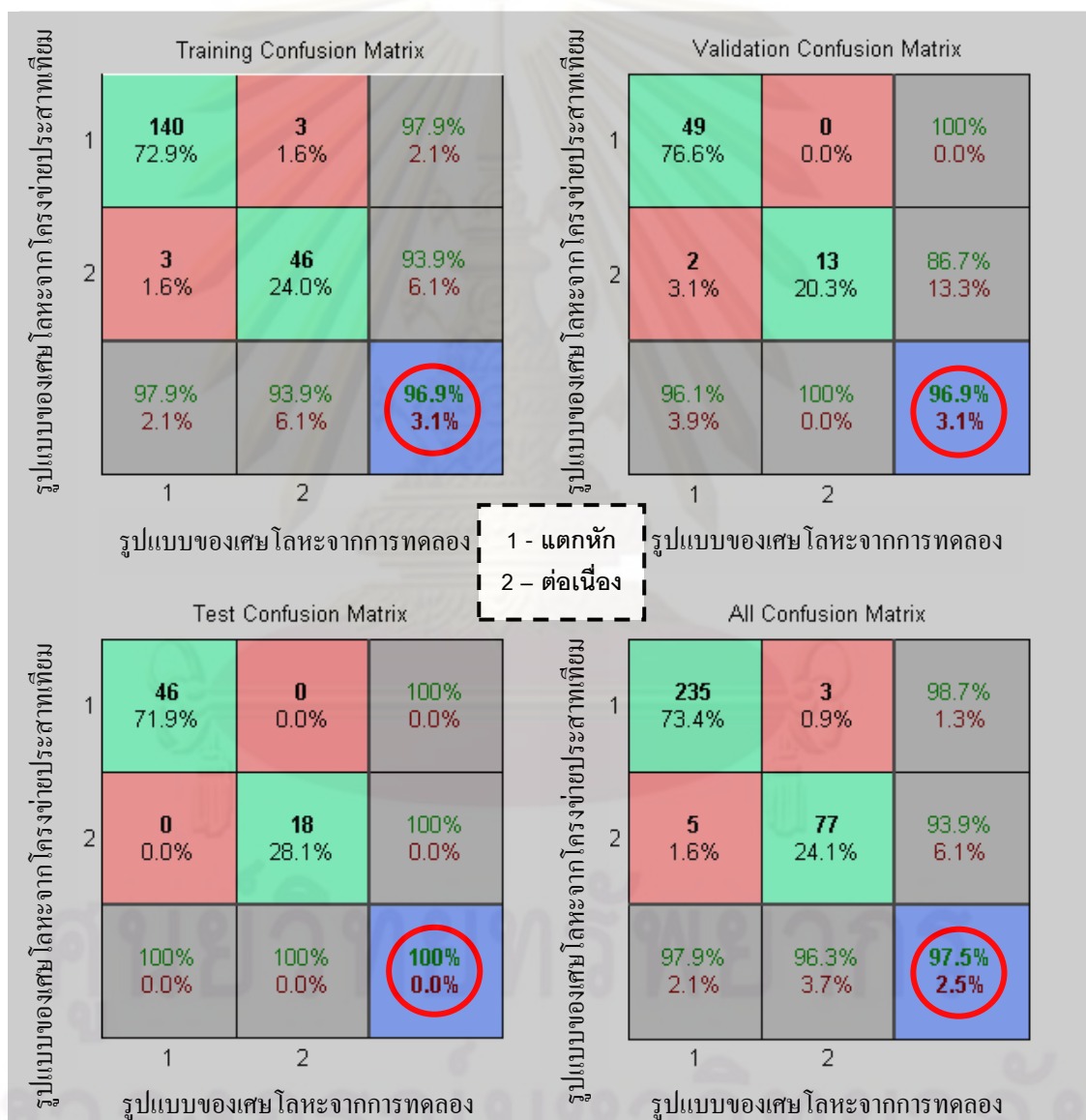
รูปที่ 4.12 : ภาพแสดงวิธีการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

1.) โครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน

จากผลลัพธ์ที่ได้รับจากการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน พบว่าในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย(Mean Absolute Error) เท่ากับ 0.0469 หรือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย(Mean Absolute Percentage Error) เท่ากับ 4.69 %

2.) เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

จากผลลัพธ์ที่ได้รับจากจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจำแนกรูปแบบ พบว่าในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน(Percent Error) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้สัดส่วนของตัวอย่างที่ถูกจัดกลุ่มผิด ของข้อมูลที่ถูกใช้ในการฝึกสอน, การยืนยันความถูกต้อง, การทดสอบ และของข้อมูลทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.13 : ภาพแสดงตารางการปะปนระหว่างประเภทข้อมูลของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง

การจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
การฝึกสอน	3.1	96.9
การยืนยันความถูกต้อง	3.1	96.9
การทดสอบ	0	100
ข้อมูลทั้งหมด	2.5	97.5

ตารางที่ 4.2 : ตารางแสดงผลลัพธ์ของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ

จากวิธีการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกลึงทั้ง 2 วิธีที่ได้ นำเสนอมาข้างต้น ผลลัพธ์ของทั้ง 2 วิธีถูกนำมาเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.3

การจำแนกรูปแบบของ เศษโลหะ	โครงข่ายประสาทเทียม	
	เพอร์เซพตรอน	การเรียนรู้การจดจำรูปแบบ
% ความถูกต้อง	95.31	97.5

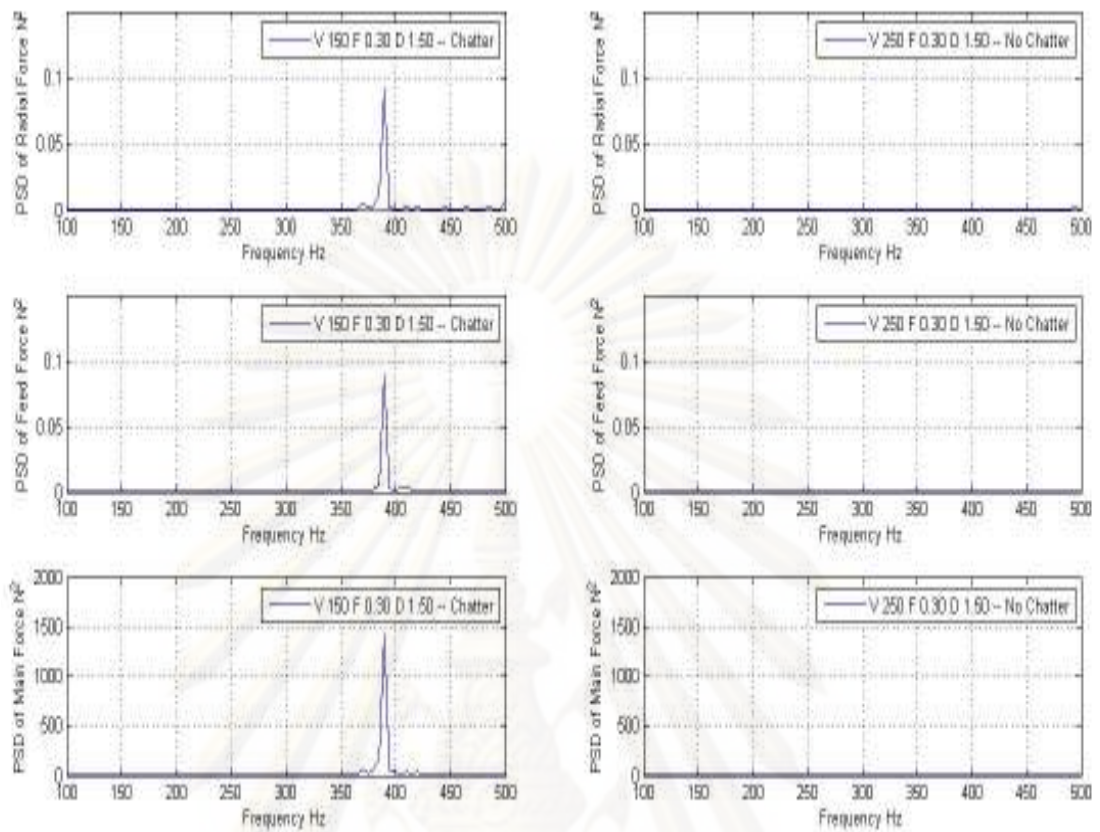
ตารางที่ 4.3 : ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ

4.3 การตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น

การเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์เป็นปัญหาที่มีความสำคัญในกระบวนการตัด ซึ่งการเกิดแชนเตอร์ขึ้นนั้น จะทำให้พื้นผิวของชิ้นงานที่มีความขรุขระสูง, ขนาดของชิ้นงานที่ได้ไม่มีความเที่ยงตรง แม่นยำ และการสึกหรอหรือการแตกหักของมีดตัดที่กำหนด เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจติดตามในกระบวนการตัดเพื่อควบคุมและป้องกันการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์อย่างทันทีทันใด

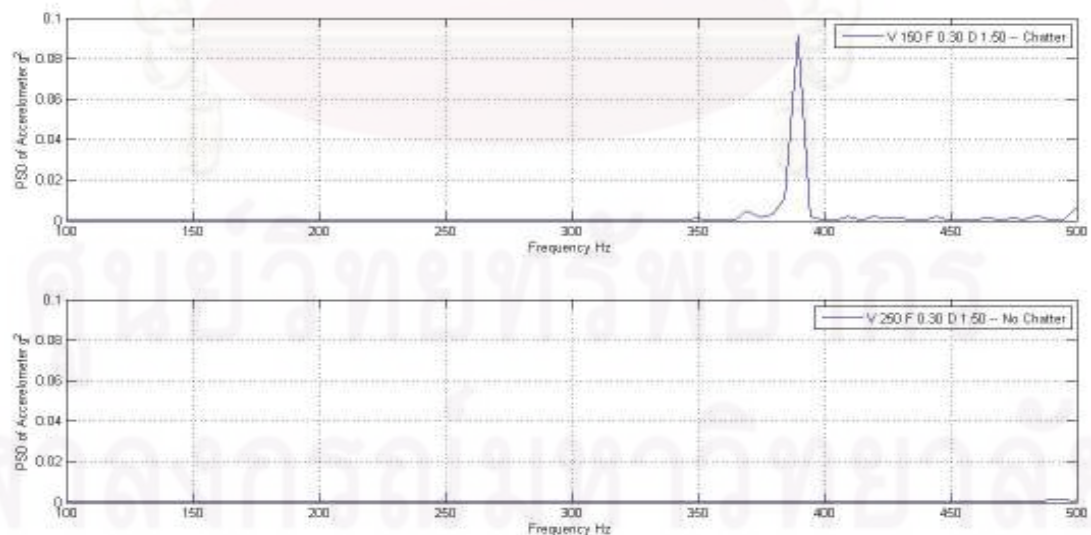
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณแรงตัด

จากผลการทดลอง(ภาคผนวก ค) เมื่อนำสัญญาณแรงตัดมาวิเคราะห์ในโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว จะพบว่า เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดทั้ง 3 แกนจะมีขนาดสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ช่วงความถี่ประมาณ 400 เฮิรตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับการกลึงแบบปกติที่ไม่มีการสั่นแบบแชนเตอร์เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ (ซ้าย) และในกรณีที่ไม่เกิดแชนเตอร์ขึ้น (ขวา) ในระหว่างการกลึง

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณความเร่ง

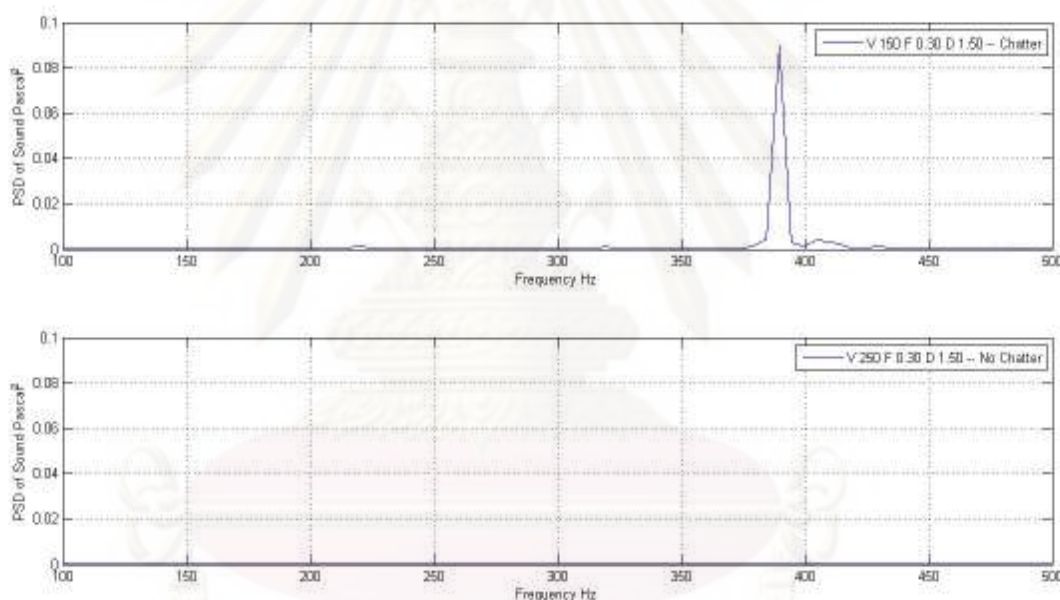


รูปที่ 4.15 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณความเร่ง เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ (บน) และในกรณีที่ไม่เกิดแชนเตอร์ขึ้น (ล่าง) ในระหว่างการกลึง

จากผลการทดลอง เมื่อนำสัญญาณความถี่มาวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จะพบว่า เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณความถี่จะมีขนาดสูงกว่าในช่วงความถี่ประมาณ 400 เฮิรตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับกับการกลิ้งแบบปกติที่ไม่มีการสั่นแบบแชนเตอร์เกิดขึ้น เช่นเดียวกันกับสัญญาณแรงตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.15

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณเสียง

จากผลการทดลอง เมื่อนำสัญญาณเสียงมาวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จะพบว่า เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น ค่าเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงจะมีขนาดสูงกว่าในช่วงความถี่ประมาณ 400 เฮิรตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของการกลิ้งแบบปกติที่ไม่มีการสั่นแบบแชนเตอร์เกิดขึ้น เช่นเดียวกันกับสัญญาณแรงตัดและสัญญาณความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.16

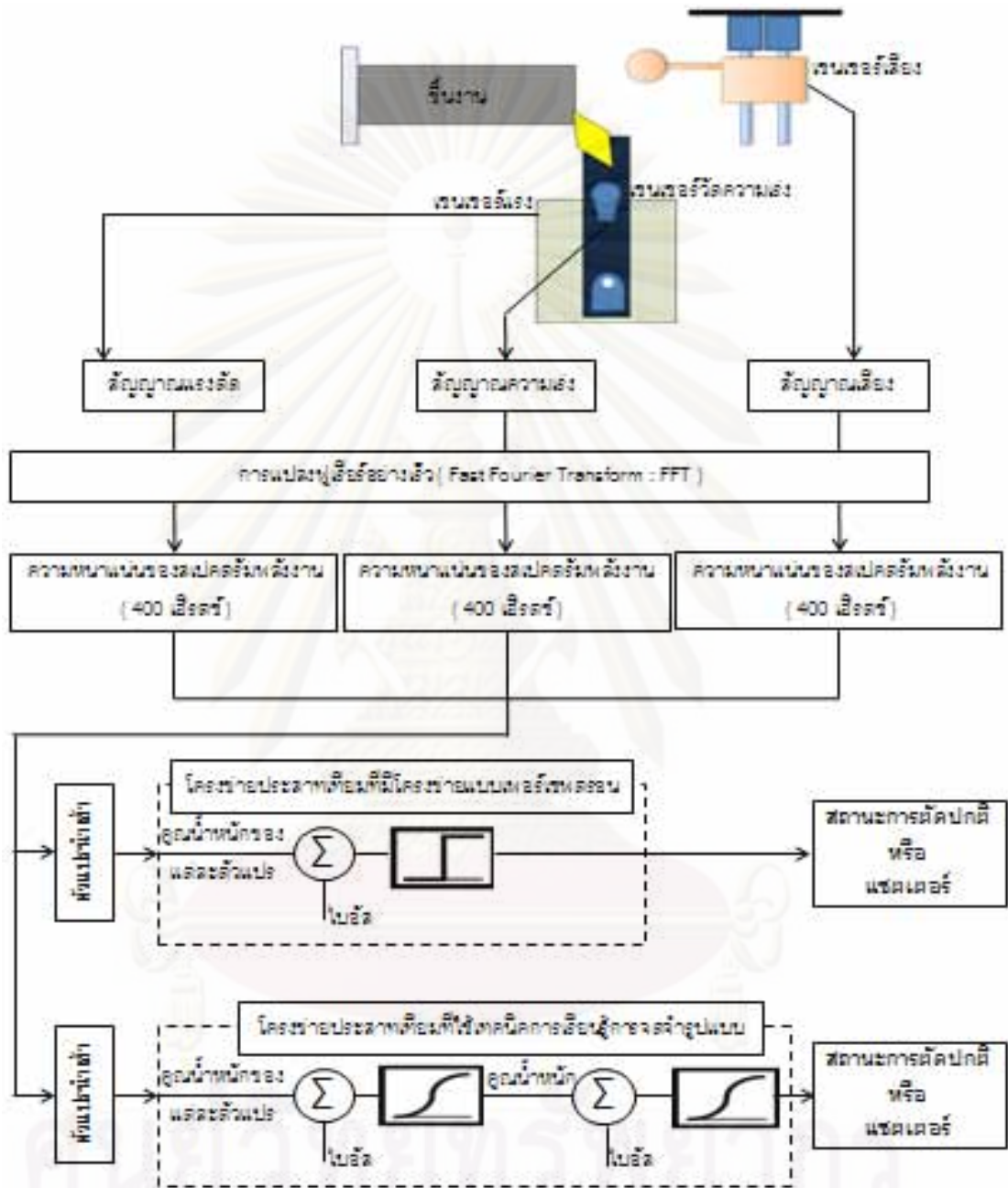


รูปที่ 4.16 : ภาพแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียง เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์(บน) และในกรณีที่ไม่เกิดแชนเตอร์ขึ้น (ล่าง) ในระหว่างการกลิ้ง

4.3.4 การตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากพารามิเตอร์ที่นำเสนอในข้างต้น ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกน, สัญญาณเสียงและสัญญาณความถี่ จะถูกนำมาใช้เป็นปัจจัยนำเข้าของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอนและแบบที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบเพื่อใช้ในการตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.17 โดยใช้

โปรแกรม Matlab ซึ่งมีวิธีการคล้ายกันกับวิธีการที่ใช้ในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะดังแสดงในภาคผนวก ๑



รูปที่ 4.17 : ภาพแสดงวิธีการตรวจจับการสั่นแบบแซดเตอร์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

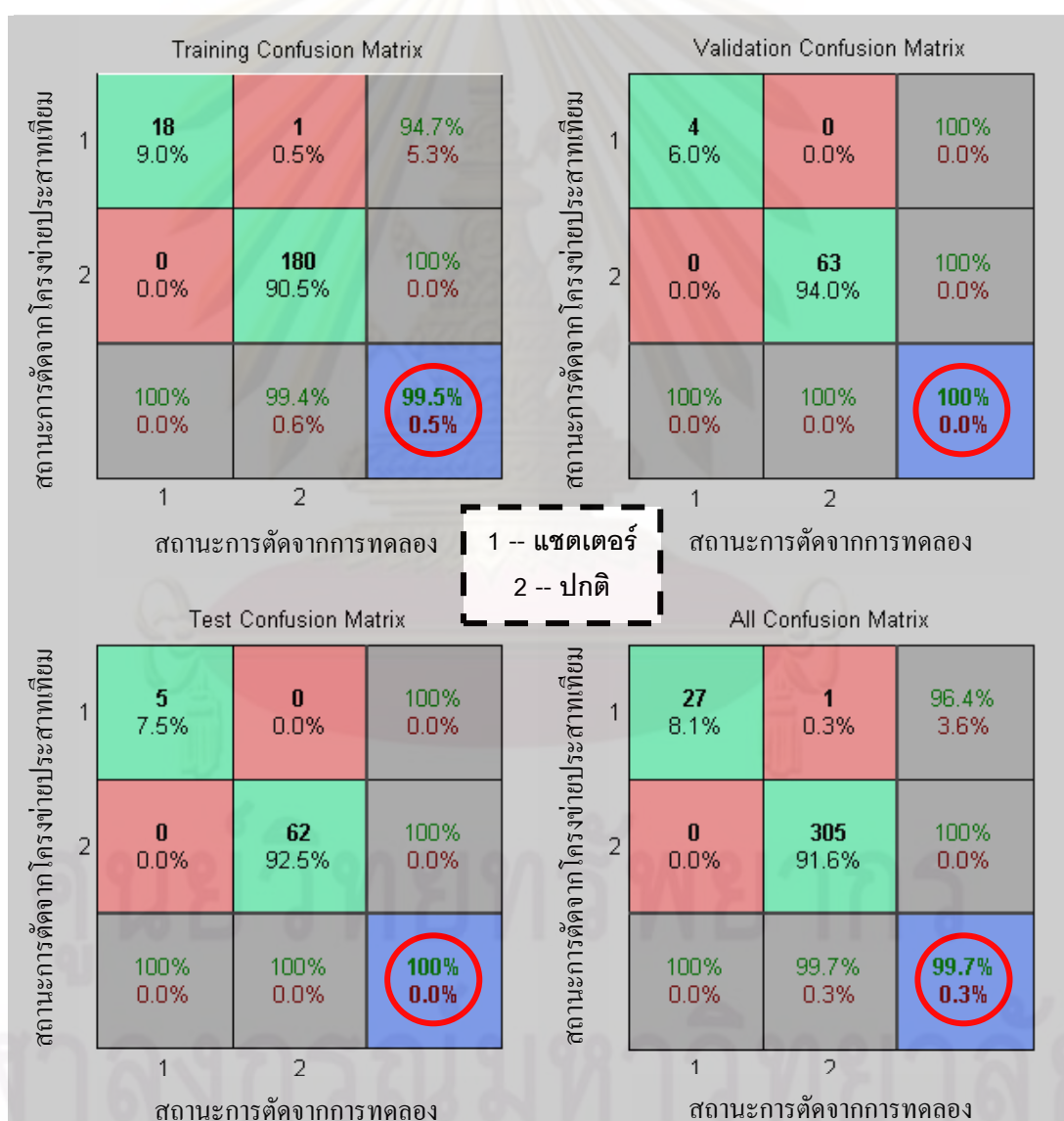
1.) โครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน

จากผลลัพธ์ที่ได้รับจากการตรวจจับแซดเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน พบว่าในการตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแซดเตอร์

มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย(Mean Absolute Error) เท่ากับ 0.0811 หรือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย(Mean Absolute Percentage Error) เท่ากับ 8.11 %

2.) เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

จากผลลัพธ์ที่ได้รับจากการตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ ที่เกิดขึ้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจำแนกรูปแบบ พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percent Error) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้สัดส่วนของตัวอย่างที่ถูกจัดกลุ่มผิด ของข้อมูลที่ถูกใช้ในการฝึกสอน, การยืนยันความถูกต้อง, การทดสอบ และของข้อมูลทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.18 : ภาพแสดงตารางการปะปนระหว่างประเภทข้อมูลของการตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง

การตรวจจับแชตเตอร์	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
การฝึกสอน	0.5	99.5
การยืนยันความถูกต้อง	0	100
การทดสอบ	0	100
ข้อมูลทั้งหมด	0.3	99.7

ตารางที่ 4.4 : ตารางแสดงผลพัทธ์ของการตรวจจับการเกิดการสั้นแบบแชตเตอร์

จากวิธีการตรวจจับการเกิดการสั้นแบบแชตเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกลึงทั้ง 2 วิธีที่ได้
นำเสนอมามาข้างต้น ผลพัทธ์ของทั้ง 2 วิธีถูกนำมาเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.5

การจำแนกการเกิดการสั้น แบบแชตเตอร์	โครงข่ายประสาทเทียม	
	เพอร์เซพตรอน	การเรียนรู้การจดจำรูปแบบ
% ความถูกต้อง	91.89	99.7

ตารางที่ 4.5 : ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลพัทธ์ของการตรวจจับการเกิดการสั้นแบบแชตเตอร์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกลึงโดยใช้เซนเซอร์แรง, เซนเซอร์วัดความเร่ง, เซนเซอร์เสียง และเซนเซอร์อะคูสติก อิมิตชันร่วมกันนั้น จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าเมื่อมีดกลึงเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงตัดสถิตทั้ง 3 แกนสูงขึ้น, แอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่งสูงขึ้น, ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณเสียงในช่วงความถี่ 3 – 6 กิโลเฮิร์ตซ์ และค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณอะคูสติกอิมิตชันในช่วงความถี่ 100 – 300 กิโลเฮิร์ตซ์ สูงขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัว ประกอบกับเงื่อนไขของการตัด ได้แก่ค่าความเร็วตัด, อัตราป้อนตัด และความลึกตัด จะถูกใช้เป็นปัจจัยนำเข้าของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค้ำย้อนกลับ เพื่อพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกลึง

จากผลการทดลองการประมาณขนาดของการสึกหรอบนผิวหลับของมีดกลึง ในระหว่างกระบวนการกลึงโดยโครงข่ายประสาทเทียม พบว่าค่า R ซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนของการบ่งชี้ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ เพราะเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของระดับการสึกหรอของมีดกลึงที่ได้รับจากการทดลอง และผลลัพธ์ที่ได้รับจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเท่ากับ 0.94465 และมีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย(Mean Squared Error : MSE) ระหว่างผลของการทดลองกับผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียม เท่ากับ 0.000595

การจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นว่าเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่องหรือเศษโลหะแบบแตกหักนั้น จากผลการวิเคราะห์จะพบว่า เมื่อเศษโลหะที่เกิดขึ้นจากการตัดเป็นแบบแตกหักจะมีค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณสูงกว่าเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องสำหรับเซนเซอร์แรงตัด, เซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์เสียง โดยที่สัญญาณแรงตัดทั้ง 3 แกนกับสัญญาณความเร่ง จะพิจารณาในช่วงความถี่ 100 - 500 เฮิร์ตซ์ ในขณะที่สัญญาณเสียงจะพิจารณาในช่วงความถี่ 2000 - 3000 เฮิร์ตซ์ ส่วนสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณจะถูกนำมาพิจารณา โดยเมื่อเกิดเศษโลหะแบบแตกหักค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีขนาดสูงกว่าเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อบ่งชี้รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

จากผลการทดลองได้พิสูจน์แล้วว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบแตกหักหรือแบบต่อเนื่องได้โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันใน

ระหว่างกระบวนการตัดจริง ด้วยความเชื่อมั่นและความแม่นยำที่สูง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 95.31 สำหรับการใส่โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน และ 97.5 สำหรับการใส่โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

การตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงนั้น จากผลการวิเคราะห์จะพบว่า เมื่อเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ขึ้น จะมีค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณในช่วงความถี่ประมาณ 400 เฮิรตซ์ สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการกลึงแบบปกติที่ไม่มีแชนเตอร์เกิดขึ้น ทั้งในส่วนของเซนเซอร์แรง, เซนเซอร์วัดความเร็วและความเร่งและเซนเซอร์เสียง ในขณะที่เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชัน

จากผลของการทดลองสามารถสรุปได้ว่าระบบการตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 91.89 สำหรับการใส่โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน และ 99.70 สำหรับการใส่โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

- 1.) จากผลของประสิทธิภาพของการพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกลึงที่ได้รับจะเห็นว่ายังคงมีความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เกิดขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของเสียงจากเครื่องจักรข้างเคียงและเสียงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งอาจจะส่งผลให้ค่าสัญญาณเสียงที่ได้เกิดความผิดพลาดขึ้น และจากผลของการติดตั้งเซนเซอร์ในแต่ละครั้ง ซึ่งอาจจะมีตำแหน่ง รวมถึงความแน่นของเซนเซอร์ที่ติดอยู่กับด้ามมีดตัดแตกต่างกันของการวัดสัญญาณในแต่ละครั้ง ทำให้สัญญาณที่ได้รับอาจเกิดความผิดพลาดโดยเฉพาะเซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชัน และเซนเซอร์วัดความเร็ว
- 2.) จากผลของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ และการตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่เกิดขึ้น โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน และแบบที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ จะพบว่าการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบจะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ และการตรวจจับการสั่นแบบแชนเตอร์ที่สูงกว่าการใช้เทคนิคแบบเพอร์เซพตรอน เนื่องจากเทคนิคแบบเพอร์เซพตรอนเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาการจำแนกรูปแบบอย่างง่าย แต่มีข้อดีในด้านของความเร็วในการประมวลผล

- 3.) ช่วงความถี่ของการสั่นแบบแฉดเตอร์ที่เกิดขึ้นที่ช่วงประมาณ 400 เฮิรตซ์ที่นำมาใช้ตรวจจับการสั่นแบบแฉดเตอร์ในงานวิจัยนี้ เป็นช่วงความถี่ที่ขึ้นกับวัสดุของชิ้นงานและของมิตัดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเมื่อเปลี่ยนวัสดุ อาจส่งผลให้ช่วงความถี่ของแฉดเตอร์ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงได้
- 4.) จากผลการทดลองที่ได้รับจะเห็นได้ว่า สัญญาณจากเซนเซอร์แรงตัดจะมีความน่าเชื่อถือสูงสุด โดยที่สัญญาณอะคูสติก อิมิสชัน, สัญญาณความเร่ง และสัญญาณเสียงจะมีความน่าเชื่อถือลดลงมาตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุมาจากเซนเซอร์แรงตัดซึ่งจะมีตำแหน่งที่มั่นคงที่สุดเพราะติดอยู่กับชุดป้อมมีด (Turret) ของเครื่องกลึง ในขณะที่เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชัน และเซนเซอร์วัดความเร่ง ซึ่งถูกติดด้วยกาวอีพ็อกซี ทำให้ตำแหน่งรวมถึงความแน่นในการติดตั้งแต่ละครั้งแตกต่างกัน และในส่วนของเซนเซอร์เสียงซึ่งมีความน่าเชื่อถือน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์อื่นๆ เนื่องจากอิทธิพลของเสียงจากเครื่องจักรข้างเคียงและเสียงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่รบกวนขณะทำการกลึง
- 5.) เซนเซอร์แต่ละชนิดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แต่ละตัวจะมีลักษณะเด่นและมีเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการตรวจติดตามสภาพมีดกลึงและสถานะของการกลึงแตกต่างกัน ดังนี้
 - เซนเซอร์แรงตัดจะเหมาะสมสำหรับการตรวจติดตามสภาพมีดกลึงและสถานะของการกลึงมากที่สุด เพราะเมื่อมีดกลึงเกิดการสึกหรอจะทำให้แรงตัดสูงขึ้นตามระดับการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น และในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะกับการตรวจจับแฉดเตอร์สามารถใช้ได้ดีเนื่องจากเซนเซอร์ชนิดนี้ได้ถูกออกแบบมาใช้ในเครื่องกลึงโดยเฉพาะทำให้มีการติดตั้งที่มั่นคง แข็งแรง และสามารถตรวจจับได้ดีที่ช่วงความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะและความถี่ของการเกิดแฉดเตอร์
 - เซนเซอร์อะคูสติก อิมิสชันสามารถใช้ในการตรวจติดตามระดับการสึกหรอได้ดีและมีความเหมาะสมในการใช้จำแนกรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น เนื่องจากการแตกหักของเศษโลหะเป็นแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติก อิมิสชัน ในขณะที่การตรวจจับการสั่นแบบแฉดเตอร์ไม่สามารถตรวจจับได้ เพราะช่วงความถี่ใช้งานของเซนเซอร์ชนิดนี้อยู่ในช่วงที่สูงกว่าความถี่ของการเกิดแฉดเตอร์จึงทำให้ไม่สามารถตรวจจับได้
 - เซนเซอร์วัดความเร่งมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจจับการสั่นแบบแฉดเตอร์ เพราะเซนเซอร์ชนิดนี้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดความสั่นสะเทือน และในส่วนของ การตรวจติดตามระดับการสึกหรอของมีดกลึง ก็สามารถนำมาใช้ได้อย่างดีตามที่ได้กล่าว

มาแล้วว่าเมื่อการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงตัดที่ใช้ในการตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงตัดที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดการสิ้นสะท้อนสูงขึ้นตามไปด้วย

- เซนเซอร์เสียงสามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามสภาพมีดกลึงและสถานะของการกลึงได้ แต่อาจจะได้ประสิทธิภาพของระบบการตรวจติดตามที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ชนิดอื่น แต่มีข้อดีในด้านของราคาต่ำกว่าเซนเซอร์ชนิดอื่น

5.3 อุปสรรคในการวิจัย

- 1.) เนื่องจากมีดกลึงและชิ้นงานที่ใช้ทดลองนั้นมีราคาต่อหน่วยสูงมาก ทำให้เงื่อนไขของการตัดที่เลือกมาในงานวิจัยนี้จึงอาจจะไม่ครอบคลุม รวมถึงไม่มีการทำซ้ำในแต่ละเงื่อนไขของการตัดของการทดลอง ซึ่งการทำซ้ำจำเป็นทำให้ผลการทดลองที่ได้รับมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น
- 2.) ปัญหาของการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเครื่องกลึงซีเอ็นซี มีผู้ใช้งานหลายคนทำให้เซนเซอร์ที่ใช้วัดในแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีการถอดออกและทำการติดตั้งใหม่ทุกครั้งที่จะทำการวัดสัญญาณ ส่งผลให้ตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในเครื่องกลึงในแต่ละครั้งอาจแตกต่างกันเล็กน้อย อาจส่งผลทำให้สัญญาณที่ได้รับในแต่ละครั้งของการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนได้

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1.) ในการดำเนินการทดลองควรทำการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไขของการตัด อย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น
- 2.) แนวทางในการนำการวิจัยขั้นต่อไป ควรทดลองในการตัดวัสดุชิ้นงานอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น หรือทดลองเปลี่ยนวัสดุของมีดกลึง เพื่อจะทำให้ระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการกลึงมีความครอบคลุม และใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น
- 3.) ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้เซนเซอร์ในการตรวจติดตามสภาพของมีดกลึง และสถานะของการกลึง มากถึง 4 ชนิด ซึ่งในการนำไปใช้งานจริงนั้น ควรจะต้องพิจารณาในเรื่องของต้นทุนของเซนเซอร์ที่จะนำมาติดตั้งเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของระบบการตรวจติดตามที่จะได้รับด้วย

- 4.) ในการแปลงฟูเรียร์ มีข้อเสียที่สำคัญ คือรายละเอียดข้อมูลแบบเวลาจะสูญเสียไป ทำให้เป็นไปไม่ได้ที่จะบอกว่าเมื่อไหร่ที่รายละเอียดของเหตุการณ์นั้นๆเกิดขึ้น ซึ่งการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้
- 5.) ในการดำเนินการทดลองได้ทำการวัดสัญญาณทุกๆการตัดที่ปริมาตร 0 , 750 , 1500 , 2000 ลบ.ซม. ซึ่งไม่ได้มีการพิจารณาในเรื่องของระยะเวลาในการตัดร่วมด้วย ซึ่งมีความจำเป็นในการนำมาใช้บอกระยะเวลาที่มีดกถึงสีทหรอ ดังนั้นในการทดลองควร จะแสดงระยะเวลาของการกลึงมาประกอบการพิจารณาด้วย
- 6.) ในการวัดสัญญาณควรที่จะต้องมีการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น โดยการต่อสายดิน, การใช้ฉนวนห่อหุ้มสายสัญญาณ และการใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณความถี่ต่ำออก (High-pass filter)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. เอกสารประกอบการสอนวิชา Advanced Manufacturing Engineering, 2008.
- [2] Degarmo, E.P., Black, J.T. and Ronald A. Kohser. Materials and Process in Manufacturing. 9th Edition.. USA : John Wiley & Sons, 2004.
- [3] Groover, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition. USA : John Wiley & Sons, 2004.
- [4] Kalpakjian, S. and Schmid, S. Manufacturing Engineering and Technology. 5th Edition. Singapore : Pearson Prentice Hall, 2006.
- [5] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [6] Tlusty, G. Manufacturing Processes and Equipment. 1st Edition. USA : Prentice Hall, 2000.
- [7] ดนุชา จันทะยานี. ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติคกับการสึกหรอของดอกสว่านในเหล็กกล้า SS400. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [8] Demuth, H., Beale, M., Hagan, M. Neural Network Toolbox™ 6. [Online]. 2008 Available from : http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/nnet/nnet.pdf [2009, November 20]
- [9] Somkiat Tungjitsitjaroen. Development of Intelligent Identification of Cutting States by Spectrum Analysis for CNC turning. Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing Vol.2, No.3, 2008 : 366-377.
- [10] Somkiat Tungjitsitjaroen and Moriwaki, T. Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine. Journal of Manufacturing Processes 2008.
- [11] Moriwaki, T. , Shibasaka, T. and Somkiat Tungjitsitjaroen. Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. JSME International Journal

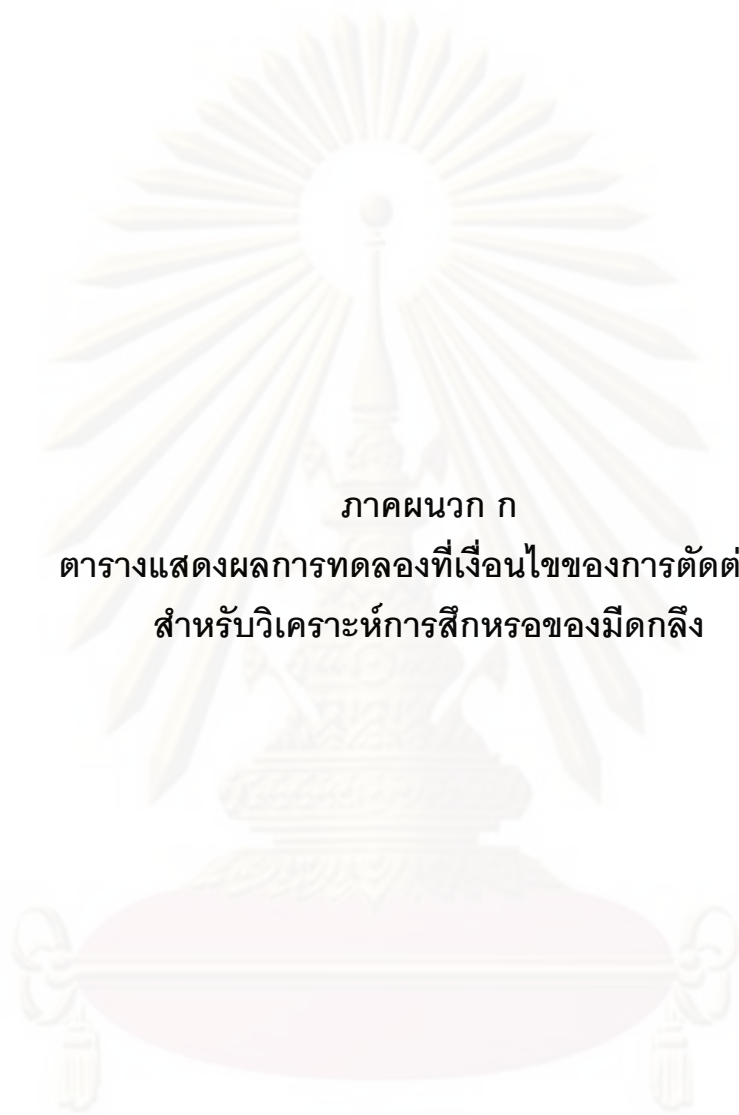
Series C, Vol 47, No3, 2004.

- [12] Moriwaki, T. , Somkiat Tungjitsitjaroen, and Shibasaka, T. Development of intelligent monitoring and optimization of cutting process for CNC turning. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 9(5), June, 2006.
- [13] Moriwaki, T. , Mori, Y. 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.
- [14] Takata S. , Ahn, J.H. , Miki, M. , Miyao Y. , Sata,T. A Sound monitoring system for fault detection of machine and machining states. Annals Of the CIRP Vol. 35 1986.
- [15] Xiaoli Li. A brief review : acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 2002 : 157-165.
- [16] Govekar, E., Gradisek, J., Grabec, I. Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes. Ultrasonics 38 2000 : 598-603.
- [17] Inasaki, I. Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. Ultrasonics 36 1998.
- [18] Kopac, J., Sali, S. Tool wear monitoring during the turning process. Journal of Materials Processing Technology 2001.
- [19] Jemielniek, K. and Otman, O. Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals. Journal of Materials Processing Technology 1998.
- [20] Sikdar, S.K., Chen, M. Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning. Journal of Materials Processing Technology 2002.
- [21] Uehara, K., Yuichi Kanda. Identification of chip formation mechanism through acoustic emission measurements. Annals of the CIRP Vol.33 1984.
- [22] Chiou, R.Y., Liang,S.Y. Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 2000 : 927-941.
- [23] Grzesik, W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. 1th Edition. Elsevier, 2008.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ
สำหรับวิเคราะห์การสึกหรอของมีดกลึง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
100_0.10_0.25	0	0	67.59	35.75	77.19	11.1452	0.001479	0.00000761
	750	0.15	97.97	55.73	117.34	11.1452	0.001479	0.00000975
	1500	0.17	77.81	48.04	99.46	12.3514	0.003145	0.00001147
	2000	0.19	102.39	49.77	127.38	12.8334	0.003482	0.00001257
100_0.15_0.25	0	0	78.56	38.45	92.47	13.3201	0.005254	0.00000830
	750	0.16	102.26	50.49	132.21	10.2332	0.001186	0.00000941
	1500	0.17	106.82	58.18	123.83	12.8936	0.004892	0.00001172
	2000	0.20	119.91	66.20	159.09	12.9662	0.004970	0.00001213
100_0.15_1.50	0	0	150.29	342.17	556.53	16.7795	0.008396	0.00000864
	750	0.08	151.87	358.37	578.43	22.2463	0.006830	0.00001170
	1500	0.11	146.86	381.43	604.41	16.1832	0.003768	0.00002402
	2000	0.14	154.91	357.94	585.92	22.7292	0.009627	0.00002696
100_0.20_0.25	0	0	100.44	48.77	141.93	9.3151	0.002172	0.00000680
	750	0.13	120.35	55.63	159.10	9.3323	0.001736	0.00000816
	1500	0.15	123.80	62.11	157.57	8.8144	0.001730	0.00001713
	2000	0.17	136.04	66.14	168.89	11.7378	0.002878	0.00001936

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกรห (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมพัลส์
100_0.20_1.50	0	0.00	185.20	389.44	675.07	16.7617	0.010915	0.00000954
	750	0.08	175.19	390.59	715.38	20.6881	0.008296	0.00001872
	1500	0.10	179.10	405.26	736.34	20.2509	0.004636	0.00001459
	2000	0.12	165.99	387.02	729.28	21.3761	0.011158	0.00001902
100_0.25_0.25	0	0.00	109.61	41.93	145.10	9.0111	0.002661	0.00000744
	750	0.14	141.51	61.74	172.77	9.4454	0.001778	0.00000847
	1500	0.16	157.95	69.41	198.25	10.8717	0.001940	0.00001244
	2000	0.18	156.32	68.27	215.58	11.0756	0.003730	0.00001468
100_0.25_1.50	0	0.00	245.65	456.83	832.44	16.5938	0.008936	0.00001165
	750	0.09	237.54	470.97	876.80	18.4766	0.005423	0.00001512
	1500	0.10	220.35	456.33	871.25	18.1927	0.004943	0.00002317
	2000	0.11	215.35	438.13	867.05	18.6178	0.009652	0.00002610
100_0.25_1.75	0	0.00	267.56	555.35	997.63	19.3168	0.008714	0.00001019
	750	0.08	259.42	555.94	1011.04	23.8425	0.006283	0.00001572
	1500	0.10	254.41	560.35	1024.91	24.1471	0.008877	0.00002610
	2000	0.11	243.32	528.28	983.73	28.8794	0.029016	0.00002689

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
100_0.25_2.00	0	0.00	268.69	606.23	1074.83	24.4860	0.011483	0.00000961
	750	0.07	267.03	651.42	1155.29	22.8655	0.007488	0.00000890
	1500	0.10	262.59	665.17	1185.30	30.7918	0.010210	0.00002610
	2000	0.11	257.45	624.84	1112.26	36.4623	0.041663	0.00002715
100_0.30_1.50	0	0.00	285.71	497.69	996.41	16.5778	0.007718	0.00000259
	750	0.07	290.54	532.02	1037.20	18.7041	0.005717	0.00000921
	1500	0.11	297.09	547.63	1057.58	19.7905	0.007751	0.00002461
	2000	0.13	291.82	510.44	1007.84	19.9699	0.008986	0.00002912
100_0.30_2.00	0	0.00	314.82	682.93	1322.23	22.9758	0.010865	0.00000915
	750	0.07	326.45	713.55	1350.02	27.2695	0.010838	0.00000958
	1500	0.09	317.24	724.41	1380.51	30.2681	0.009354	0.00002492
	2000	0.10	300.74	674.14	1321.76	31.4578	0.012881	0.00002856
150_0.10_0.25	0	0.00	66.18	36.14	72.36	21.4762	0.004512	0.00001254
	750	0.17	105.83	57.01	115.66	18.7280	0.001550	0.00000960
	1500	0.19	105.04	60.05	100.75	22.3391	0.004975	0.00001945
	2000	0.21	156.88	69.88	142.35	22.8210	0.005684	0.00002741

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.15_0.25	0	0.00	80.63	36.11	90.51	20.0064	0.006485	0.00000778
	750	0.15	93.17	53.23	113.28	20.4076	0.002708	0.00001197
	1500	0.16	116.21	62.78	128.97	20.9168	0.003271	0.00001434
	2000	0.18	125.74	64.81	136.49	22.8210	0.005684	0.00001567
150_0.15_0.50	0	0.00	117.03	101.46	182.63	26.9736	0.013776	0.00000820
	750	0.14	143.57	132.25	243.37	27.4029	0.006652	0.00001014
	1500	0.16	145.66	133.13	242.82	24.3423	0.003977	0.00003467
	2000	0.17	158.24	144.08	241.46	28.5860	0.008384	0.00003488
150_0.15_0.75	0	0.00	124.08	165.59	275.22	28.9905	0.026704	0.00000840
	750	0.13	137.37	196.83	344.86	29.6036	0.007196	0.00001083
	1500	0.15	140.22	194.88	331.33	31.4187	0.014241	0.00001737
	2000	0.17	142.11	197.73	348.41	35.1192	0.018293	0.00002017
150_0.15_1.00	0	0.00	138.81	236.29	376.74	34.4436	0.036655	0.00000807
	750	0.12	142.82	249.70	420.45	31.9689	0.014469	0.00001167
	1500	0.18	152.64	258.06	411.24	35.0396	0.013380	0.00001729
	2000	0.19	150.86	252.37	416.87	40.3976	0.012611	0.00001803

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.15_1.50	0	0.00	146.06	306.55	518.13	46.1532	0.009358	0.00000843
	750	0.11	162.93	327.46	570.64	41.4813	0.011266	0.00001090
	1500	0.16	157.80	348.66	575.07	43.3069	0.016495	0.00003420
	2000	0.18	159.69	329.09	563.05	44.3950	0.023735	0.00003867
150_0.20_0.25	0	0.00	93.98	36.26	105.90	15.4114	0.003172	0.00000842
	750	0.14	120.10	55.20	152.92	22.5683	0.011934	0.00000979
	1500	0.16	131.33	63.44	156.40	22.5728	0.010153	0.00003269
	2000	0.19	147.73	70.83	164.14	20.0126	0.005401	0.00004026
150_0.20_0.50	0	0.00	131.39	91.19	199.50	22.3662	0.009226	0.00000788
	750	0.12	157.97	129.33	267.67	27.4353	0.017770	0.00001119
	1500	0.17	169.59	144.41	283.21	28.3673	0.019464	0.00005213
	2000	0.18	165.12	145.81	312.04	28.5376	0.013258	0.00005716
150_0.20_0.75	0	0.00	167.61	200.83	364.57	24.6963	0.014413	0.00000908
	750	0.12	174.03	216.85	403.00	33.1027	0.013204	0.00001443
	1500	0.16	172.28	212.39	400.75	33.6986	0.018706	0.00003512
	2000	0.18	180.55	226.04	429.28	41.0892	0.019804	0.00003961

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรือ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.20_1.00	0	0.00	162.90	236.32	434.21	28.1039	0.016628	0.00000880
	750	0.11	161.12	266.37	498.56	36.6625	0.033242	0.00001208
	1500	0.16	174.18	277.24	506.21	40.1725	0.032854	0.00003269
	2000	0.18	179.17	275.30	518.65	33.9521	0.031011	0.00004001
150_0.20_1.50	0	0.00	176.76	334.46	633.14	33.5732	0.021824	0.00001240
	750	0.08	171.58	361.91	672.73	47.7784	0.041151	0.00001273
	1500	0.13	175.48	373.52	695.79	50.3366	0.036192	0.00006027
	2000	0.16	184.36	368.20	711.99	40.4967	0.038637	0.00005932
150_0.25_0.25	0	0.00	110.45	41.49	132.30	16.5475	0.005798	0.00000854
	750	0.15	155.89	65.04	187.86	19.0987	0.004161	0.00001033
	1500	0.17	162.05	73.58	209.02	21.8276	0.009403	0.00002809
	2000	0.19	166.67	67.74	191.80	22.8755	0.009952	0.00004951
150_0.25_0.50	0	0.00	162.43	124.59	279.79	24.2210	0.025484	0.00000878
	750	0.13	182.11	148.90	338.60	27.8506	0.012421	0.00001159
	1500	0.16	185.44	151.56	335.78	28.2658	0.019529	0.00003122
	2000	0.17	179.82	150.97	358.09	28.0918	0.020132	0.00003347

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.25_0.75	0	0.00	189.68	213.77	424.17	27.0691	0.035712	0.00000919
	750	0.11	202.49	234.61	469.37	28.3832	0.020514	0.00001208
	1500	0.16	196.07	226.39	476.04	32.8581	0.023737	0.00002434
	2000	0.18	194.47	226.08	496.94	37.1444	0.023937	0.00002626
150_0.25_1.00	0	0.00	199.81	284.16	554.96	28.7640	0.022656	0.00000919
	750	0.09	203.27	297.28	599.28	29.4270	0.012794	0.00001228
	1500	0.14	203.85	298.56	590.80	37.3645	0.029710	0.00002985
	2000	0.16	221.57	300.25	609.26	38.8516	0.029868	0.00003560
150_0.25_1.50	0	0.00	206.59	377.83	761.01	33.3082	0.038822	0.00001563
	750	0.08	213.25	421.31	839.62	37.4031	0.022658	0.00001283
	1500	0.11	211.05	414.07	829.89	40.1317	0.040442	0.00005608
	2000	0.14	207.96	403.84	843.31	42.8496	0.046125	0.00006112
150_0.25_1.75	0	0.00	236.68	487.21	932.19	43.7659	0.055328	0.00001633
	750	0.08	245.08	509.30	977.01	46.3894	0.031993	0.00001916
	1500	0.10	236.20	511.17	955.78	51.1048	0.070169	0.00008045
	2000	0.12	220.37	494.76	945.79	55.8945	0.112302	0.00008136

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรือ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.25_2.00	0	0.00	245.18	541.21	1033.60	44.7113	0.053130	0.00001462
	750	0.08	254.47	592.90	1095.09	73.2316	0.091138	0.00001774
	1500	0.10	245.19	591.42	1109.17	76.2876	0.059166	0.00008703
	2000	0.13	230.37	562.54	1069.85	79.0153	0.179210	0.00009005
150_0.30_1.50	0	0.00	259.27	447.56	944.47	29.6485	0.039414	0.00000244
	750	0.08	268.56	469.08	969.58	33.1246	0.027066	0.00002064
	1500	0.10	258.75	479.23	987.01	34.6091	0.024282	0.00001446
	2000	0.11	236.27	447.60	976.92	38.9427	0.067939	0.00002115
150_0.30_2.00	0	0.00	294.67	628.89	1244.71	49.2387	0.091461	0.00001562
	750	0.07	296.93	641.81	1299.72	78.0825	0.427541	0.00001341
	1500	0.09	311.20	650.16	1300.26	70.7193	0.057605	0.00002093
	2000	0.11	301.13	632.96	1285.09	67.1314	0.097294	0.00002743
200_0.10_0.25	0	0.00	69.45	35.22	55.24	34.2781	0.005425	0.00001304
	750	0.15	116.31	66.68	101.99	32.2491	0.001966	0.00001523
	1500	0.18	114.71	71.74	104.43	28.5167	0.007763	0.00001985
	2000	0.22	161.03	109.05	146.66	28.1219	0.012526	0.00002101

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
200_0.15_0.25	0	0.00	78.15	34.93	84.03	22.4793	0.002648	0.00001432
	750	0.15	111.39	50.03	121.15	29.3357	0.002367	0.00001444
	1500	0.18	122.67	59.25	131.10	22.8610	0.002071	0.00003032
	2000	0.19	163.69	62.87	131.30	26.0708	0.005326	0.00003954
200_0.15_0.50	0	0.00	118.04	94.45	166.70	29.5435	0.015540	0.00001421
	750	0.15	147.35	110.62	208.68	37.3033	0.014155	0.00001674
	1500	0.17	146.34	129.19	230.33	34.8633	0.016296	0.00002590
	2000	0.19	157.46	137.84	221.04	39.7025	0.018686	0.00002865
200_0.15_0.75	0	0.00	134.47	159.06	259.39	35.8712	0.025160	0.00001477
	750	0.16	165.67	179.49	302.53	45.1599	0.030256	0.00001610
	1500	0.18	146.11	190.97	331.57	43.0550	0.019788	0.00002944
	2000	0.19	162.40	192.39	343.49	58.7908	0.025823	0.00003467
200_0.15_1.00	0	0.00	124.07	205.46	348.37	36.0824	0.024592	0.00001459
	750	0.15	151.14	224.60	390.45	39.0829	0.009093	0.00001762
	1500	0.17	135.50	219.86	392.96	34.7951	0.011803	0.00002162
	2000	0.19	174.32	210.19	388.16	55.3553	0.012883	0.00002830

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมพัลส์
200_0.15_1.50	0	0.00	130.54	276.87	487.34	35.5209	0.015972	0.00001580
	750	0.13	145.49	300.73	553.99	47.5650	0.007344	0.00001803
	1500	0.16	149.10	318.35	557.67	46.0964	0.020204	0.00002074
	2000	0.17	141.97	278.85	528.82	77.8292	0.020294	0.00002111
200_0.20_0.25	0	0.00	95.46	45.16	125.73	20.9441	0.003043	0.00000200
	750	0.14	117.37	57.02	156.77	27.3755	0.002663	0.00001666
	1500	0.17	122.85	58.97	150.49	20.6506	0.002202	0.00002021
	2000	0.18	137.66	61.31	179.78	22.1189	0.008107	0.00002020
200_0.20_0.50	0	0.00	118.25	99.48	219.20	35.9586	0.022719	0.00000236
	750	0.12	138.67	104.40	235.41	36.9077	0.021418	0.00001969
	1500	0.14	150.60	130.19	275.82	37.0302	0.036954	0.00002642
	2000	0.16	154.83	142.68	278.78	46.8837	0.062615	0.00002798
200_0.20_0.75	0	0.00	150.81	171.96	322.48	39.9113	0.027787	0.00000212
	750	0.13	177.26	201.19	364.49	51.4696	0.050986	0.00001784
	1500	0.18	185.49	217.35	401.71	53.5974	0.051657	0.00002859
	2000	0.20	188.06	219.91	419.75	58.6029	0.060220	0.00002991

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
200_0.20_1.00	0	0.00	156.18	233.45	433.81	42.2959	0.032430	0.00001240
	750	0.11	169.30	251.70	475.69	53.0488	0.032874	0.00001958
	1500	0.17	191.83	280.00	506.44	53.8863	0.026680	0.00002168
	2000	0.19	187.19	279.77	527.33	59.1084	0.083408	0.00002216
200_0.20_1.50	0	0.00	169.96	329.49	624.93	50.3150	0.051011	0.00001502
	750	0.10	180.35	351.57	676.56	61.5277	0.016174	0.00001952
	1500	0.15	194.62	375.75	686.99	54.0515	0.015594	0.00002307
	2000	0.19	208.33	346.22	669.18	70.6374	0.035279	0.00002678
200_0.25_0.25	0	0.00	117.06	50.64	151.60	22.7471	0.005635	0.00000218
	750	0.15	152.37	61.52	186.63	28.2481	0.003947	0.00001693
	1500	0.17	150.74	62.25	191.02	24.9330	0.003105	0.00002654
	2000	0.18	152.97	68.09	209.48	28.0262	0.007364	0.00002780
200_0.25_0.50	0	0.00	149.29	113.62	264.44	38.9563	0.057953	0.00000226
	750	0.12	168.90	137.12	323.97	44.2449	0.031922	0.00001755
	1500	0.15	185.39	146.82	319.73	50.5594	0.032997	0.00003209
	2000	0.18	180.16	142.36	345.93	49.1984	0.068803	0.00003415

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
200_0.25_0.75	0	0.00	175.73	193.13	400.66	40.8480	0.035880	0.00000244
	750	0.12	195.67	225.76	478.99	48.6056	0.031329	0.00001835
	1500	0.16	201.50	230.83	462.25	49.6668	0.033330	0.00003809
	2000	0.18	203.42	224.88	471.84	59.1123	0.176023	0.00004095
200_0.25_1.00	0	0.00	178.83	254.05	525.98	41.5477	0.047178	0.00000248
	750	0.12	205.98	288.89	585.16	55.4696	0.039418	0.00001696
	1500	0.16	204.41	299.07	597.88	53.8198	0.041165	0.00003470
	2000	0.18	211.33	290.82	568.08	66.0759	0.093315	0.00003711
200_0.25_1.50	0	0.00	206.80	374.88	760.73	45.9209	0.053633	0.00000231
	750	0.09	213.46	403.46	831.10	59.7323	0.044297	0.00001782
	1500	0.14	240.36	421.04	838.61	62.5579	0.034424	0.00002426
	2000	0.17	233.84	417.97	847.15	61.5050	0.072903	0.00003004
200_0.25_1.75	0	0.00	232.09	460.78	916.57	60.1875	0.077846	0.00000266
	750	0.09	244.52	478.41	931.06	73.2252	0.066031	0.00001985
	1500	0.14	275.04	523.86	1001.00	85.2969	0.098459	0.00002738
	2000	0.16	259.27	514.29	991.82	87.7414	0.094516	0.00002987

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรือ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
200_0.25_2.00	0	0.00	233.56	512.04	1003.89	60.4849	0.074062	0.00001544
	750	0.08	273.23	558.37	1066.48	88.9926	0.057949	0.00001890
	1500	0.11	302.28	585.36	1100.60	89.8927	0.039081	0.00001987
	2000	0.13	283.08	563.36	1070.69	101.9482	0.204694	0.00002361
200_0.30_1.50	0	0.00	256.60	434.42	926.23	42.5088	0.054589	0.00000255
	750	0.10	266.52	461.74	954.68	53.3941	0.045188	0.00002127
	1500	0.14	291.59	478.70	983.91	56.3940	0.059706	0.00002153
	2000	0.17	296.26	472.86	970.38	58.3998	0.093328	0.00002256
200_0.30_2.00	0	0.00	286.71	585.77	1192.13	66.7601	0.149180	0.00001635
	750	0.08	286.22	622.24	1272.28	115.3194	0.154646	0.00001863
	1500	0.10	320.52	653.19	1298.18	102.9712	0.144522	0.00002132
	2000	0.14	326.25	632.45	1295.67	98.5056	0.180354	0.00002840
250_0.10_0.25	0	0.00	88.70	45.73	74.86	47.6543	0.006085	0.00001322
	750	0.17	124.69	53.46	97.07	23.4711	0.002191	0.00001544
	1500	0.19	108.93	53.97	96.07	34.7998	0.010828	0.00001992
	2000	0.20	117.33	62.78	128.81	28.0581	0.008466	0.20040000

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
250_0.15_0.25	0	0.00	84.37	42.73	100.41	28.2135	0.003802	0.00001286
	750	0.16	113.08	40.22	84.24	35.5748	0.007106	0.00001625
	1500	0.18	120.47	55.50	131.81	33.0223	0.003062	0.00002886
	2000	0.19	133.55	63.60	149.55	34.3653	0.005665	0.00003456
250_0.15_0.50	0	0.00	105.58	94.17	173.97	40.3405	0.013738	0.00000248
	750	0.14	134.23	118.72	204.97	59.5805	0.018376	0.00001698
	1500	0.17	129.08	105.31	207.17	39.3329	0.011589	0.00002442
	2000	1.80	174.48	122.88	221.41	53.4866	0.020412	0.00002665
250_0.15_0.75	0	0.00	125.37	151.83	257.89	52.5950	0.022619	0.00000236
	750	0.16	164.00	177.09	296.91	68.3489	0.027386	0.00001688
	1500	0.19	166.86	182.24	309.23	47.8482	0.009843	0.00002051
	2000	0.20	183.96	198.45	315.80	79.2694	0.014681	0.00002152
250_0.15_1.00	0	0.00	127.06	192.98	325.97	50.1328	0.020363	0.00001742
	750	0.16	157.75	221.21	370.79	75.3377	0.027902	0.00001751
	1500	0.18	159.34	206.15	384.80	47.1618	0.010782	0.00002113
	2000	0.20	170.30	238.18	392.27	76.7051	0.012760	0.00002654

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
250_0.15_1.50	0	0.00	144.67	289.89	496.87	62.4138	0.015052	0.00000242
	750	0.11	167.06	327.21	533.20	104.0179	0.027707	0.00001994
	1500	0.18	186.55	305.03	549.32	80.7040	0.012231	0.00002376
	2000	0.20	200.34	350.47	552.25	94.8164	0.013922	0.00002521
250_0.20_0.25	0	0.00	98.61	41.95	112.15	35.4974	0.004575	0.00000195
	750	0.15	130.62	45.04	129.38	38.4317	0.003042	0.00001623
	1500	0.17	136.21	64.80	155.63	33.9702	0.003658	0.00005117
	2000	0.18	154.60	72.19	180.48	43.2590	0.009024	0.00004067
250_0.20_0.50	0	0.00	133.83	109.84	229.22	50.1279	0.039672	0.00001263
	750	0.14	172.74	128.30	247.44	56.7811	0.015787	0.00001664
	1500	0.16	163.91	138.78	278.57	45.3574	0.014182	0.00002037
	2000	0.18	186.75	145.23	276.59	61.5833	0.047600	0.00002508
250_0.20_0.75	0	0.00	151.21	184.35	345.01	62.0423	0.086629	0.00000254
	750	0.15	193.28	209.64	382.80	60.2135	0.028203	0.00001864
	1500	0.17	193.36	227.33	397.32	57.2302	0.045106	0.00012191
	2000	0.19	196.86	222.37	414.78	80.9054	0.050794	0.00014013

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
250_0.20_1.00	0	0.00	152.29	233.99	440.73	58.2900	0.060853	0.00001342
	750	0.14	199.02	266.23	481.88	74.1017	0.015970	0.00001826
	1500	0.16	184.77	241.38	476.96	54.3349	0.015207	0.00011178
	2000	0.18	185.62	258.89	503.69	73.1308	0.030280	0.00011459
250_0.20_1.50	0	0.00	170.13	334.06	636.45	66.3652	0.039406	0.00001235
	750	0.11	199.29	363.81	671.41	76.0202	0.013603	0.00001712
	1500	0.17	207.01	371.72	699.28	65.4342	0.017795	0.00011465
	2000	0.19	220.95	376.50	693.21	85.8345	0.015410	0.00014112
250_0.25_0.25	0	0.00	117.28	49.11	146.38	36.7078	0.005255	0.00001565
	750	0.14	161.21	61.45	171.98	38.2797	0.005384	0.00001613
	1500	0.16	162.06	67.07	176.68	43.0763	0.004256	0.00003698
	2000	0.17	154.39	63.85	196.27	44.9171	0.006716	0.00004002
250_0.25_0.50	0	0.00	154.50	123.56	284.13	59.3377	0.066256	0.00001359
	750	0.14	195.68	145.98	317.19	57.1520	0.069970	0.00002140
	1500	0.16	206.65	160.67	337.34	58.6462	0.030566	0.00003560
	2000	0.18	208.58	153.27	324.85	58.8306	0.036302	0.00002900

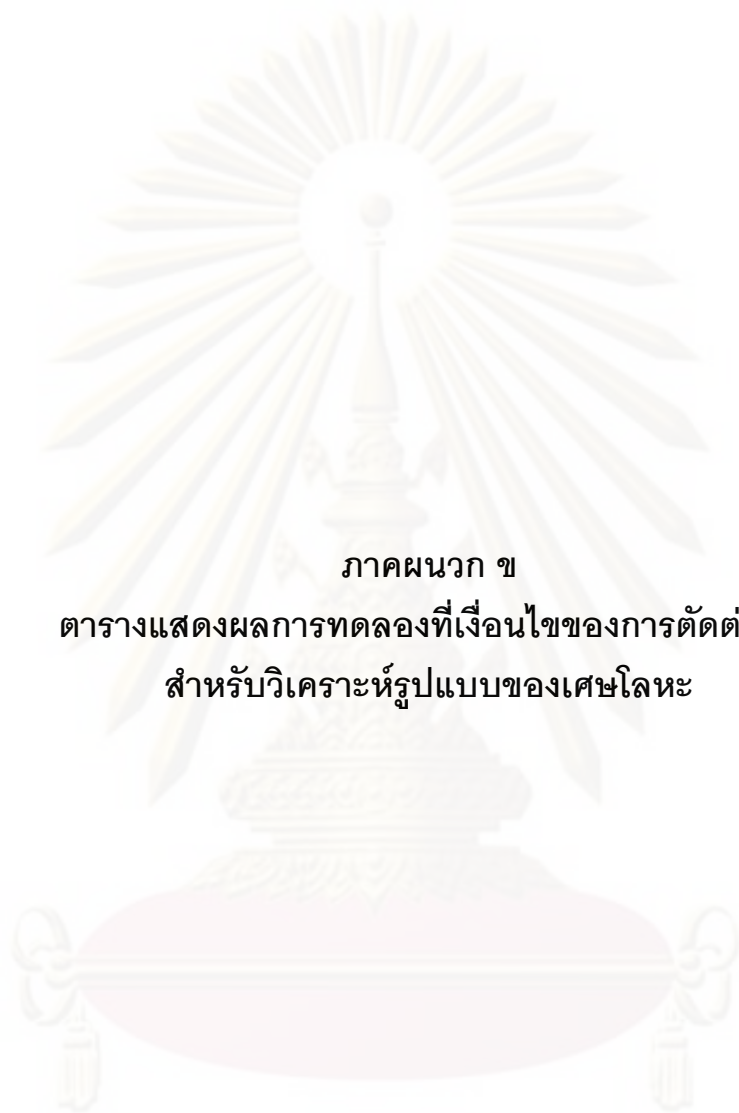
เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
250_0.25_0.75	0	0.00	188.00	208.76	425.23	74.7944	0.187506	0.00000244
	750	0.15	247.09	250.98	470.34	91.0225	0.182394	0.00001889
	1500	0.18	265.18	272.33	481.46	95.8796	0.178593	0.00003391
	2000	0.21	168.10	237.06	463.09	71.5834	0.049046	0.00004112
250_0.25_1.00	0	0.00	190.01	254.95	525.49	75.0830	0.133065	0.00000304
	750	0.12	210.85	290.71	570.11	74.9789	0.112736	0.00002040
	1500	0.20	267.87	337.64	613.99	76.8028	0.074826	0.00002047
	2000	0.22	282.05	315.60	578.01	79.5173	0.080222	0.00004100
250_0.25_1.50	0	0.00	202.07	369.49	770.73	67.6902	0.107026	0.00001690
	750	0.10	230.42	403.08	792.80	77.9684	0.086457	0.00002074
	1500	0.15	265.00	437.40	831.70	70.8262	0.024836	0.00003170
	2000	0.19	273.81	457.58	822.62	87.5375	0.032819	0.00003798
250_0.25_1.75	0	0.00	225.64	442.20	895.24	84.2648	0.073355	0.00000837
	750	0.09	246.96	467.07	908.88	97.8741	0.078342	0.00002472
	1500	0.16	252.42	538.45	972.97	122.3906	0.034149	0.00002348
	2000	0.19	270.29	532.69	963.13	96.6658	0.036296	0.00003001

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
250_0.25_2.00	0	0.00	230.70	482.85	974.69	95.7147	0.089489	0.00000314
	750	0.09	250.88	548.26	1079.04	102.9245	0.055708	0.00001445
	1500	0.14	302.41	594.88	1117.38	117.5182	0.043662	0.00002475
	2000	0.17	219.10	526.47	1023.52	135.2812	0.187743	0.00002786
250_0.30_1.50	0	0.00	226.29	366.54	887.93	64.2736	0.104819	0.00000291
	750	0.13	258.21	404.54	940.00	80.1526	0.046336	0.00002687
	1500	0.21	500.61	599.76	1016.78	148.2938	0.083822	0.00002218
	2000	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-
250_0.30_2.00	0	0.00	292.92	597.08	1216.54	110.4156	0.271353	0.00001752
	750	0.10	312.32	641.10	1281.41	129.7179	0.155943	0.00002475
	1500	0.12	333.27	672.67	1306.07	151.3452	0.112867	0.00003951
	2000	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-
300_0.10_0.25	0	0.00	78.40	46.08	81.92	69.9052	0.007571	0.00001474
	750	0.18	158.27	80.81	104.94	56.2080	0.003191	0.00001645
	1500	0.21	126.39	60.71	105.12	54.3898	0.011150	0.00002033
	2000	0.23	165.87	92.81	120.30	58.7339	0.012832	0.00002323

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรอ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
300_0.15_0.25	0	0.00	97.27	46.80	112.89	51.5047	0.005976	0.00001018
	750	0.16	139.40	70.59	123.98	63.6003	0.002779	0.00001659
	1500	0.19	118.44	60.29	133.20	57.0888	0.008269	0.00002122
	2000	0.20	139.29	70.39	138.91	61.4948	0.009272	0.00002514
300_0.15_1.50	0	0.00	136.45	283.74	485.87	87.9577	0.022293	0.00000258
	750	0.16	207.64	335.21	540.47	142.0304	0.018739	0.00001865
	1500	0.20	215.46	344.14	534.76	96.7096	0.016452	0.00002161
	2000	0.21	230.60	362.55	566.56	160.2413	0.014457	0.00002610
300_0.20_0.25	0	0.00	95.84	47.01	132.20	51.7880	0.006971	0.00001054
	750	0.17	190.23	79.85	175.55	59.8762	0.004080	0.00001652
	1500	0.21	202.77	80.14	161.48	60.9658	0.005832	0.00002066
	2000	0.22	216.32	85.57	179.94	60.0561	0.006862	0.00002103
300_0.20_1.50	0	0.00	162.11	287.51	602.02	85.9657	0.039225	0.00000306
	750	0.15	225.51	315.84	645.74	135.3432	0.024446	0.00002073
	1500	0.18	240.06	326.72	687.59	90.0061	0.016752	0.00014496
	2000	0.19	209.99	389.04	677.75	113.6739	0.024019	0.00015690

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรือ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
300_0.25_0.25	0	0.00	108.97	46.27	137.31	50.9662	0.005831	0.00001026
	750	0.17	184.48	59.27	180.25	44.8824	0.004393	0.00001360
	1500	0.19	215.42	79.42	183.74	57.8716	0.006507	0.00002586
	2000	0.20	242.48	79.17	199.58	58.4337	0.010905	0.00002664
300_0.25_1.50	0	0.00	191.51	343.83	749.75	86.4895	0.075735	0.00001838
	750	0.16	263.07	389.74	791.07	102.4722	0.038954	0.00002033
	1500	0.20	224.98	417.42	788.40	89.9517	0.023934	0.00003029
	2000	0.22	250.48	473.70	846.62	126.2920	0.052336	0.00003209
300_0.25_1.75	0	0.00	209.11	414.26	857.54	96.6968	0.073011	0.00001738
	750	0.11	273.72	478.90	913.41	112.8762	0.046376	0.00002330
	1500	0.28	478.02	834.63	1035.38	171.0782	0.024245	0.00003428
	2000	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-
300_0.25_2.00	0	0.00	238.52	491.21	1006.80	136.4002	0.079103	0.00000404
	750	0.09	296.60	550.63	1056.62	149.3570	0.060288	0.00001422
	1500	0.23	426.93	794.86	1106.96	373.4781	0.024503	0.00003278
	2000	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	ขนาดสีกหรือ (มม.)	แรงรัศมี (นิวตัน)	แรงป้อนตัด (นิวตัน)	แรงตัดหลัก (นิวตัน)	ความแปรปรวนเฉลี่ย (สัญญาณความเร่ง)	ความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน	
							สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมพัลส์
300_0.30_1.50	0	0.00	221.53	374.59	886.46	80.2512	0.127448	0.00000334
	750	0.14	287.31	394.45	905.15	103.9830	0.041291	0.00002002
	1500	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-
	2000	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-
300_0.30_2.00	0	0.00	275.83	577.83	1199.17	122.8381	0.153931	0.00001724
	750	0.13	314.40	633.98	1252.02	114.5331	0.174767	0.00002401
	1500	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-
	2000	มีดแตกหัก	-	-	-	-	-	-



ภาคผนวก ข
ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ
สำหรับวิเคราะห์รูปแบบของเศษโลหะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
100_0.10_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	7.2641	5.2813	2.2328	0.0019	0.0039	0.00224
	750	แบบต่อเนื่อง	2.7794	1.5899	1.0783	0.0014	0.0017	0.00619
	1500	แบบต่อเนื่อง	27.7318	15.6997	5.2649	0.0053	0.0048	0.00919
	2000	แบบต่อเนื่อง	5.5695	5.2683	3.9761	0.0016	0.0010	0.00975
100_0.15_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	5.2194	4.8829	2.6252	0.0010	0.0045	0.00393
	750	แบบต่อเนื่อง	1.1787	0.8502	0.9237	0.0010	0.0015	0.00700
	1500	แบบต่อเนื่อง	30.6111	24.1080	5.8265	0.0066	0.0053	0.00672
	2000	แบบต่อเนื่อง	6.7469	4.8694	3.0924	0.0013	0.0017	0.00660
100_0.15_1.50	0	แบบแตกหัก	86.6079	185.8879	62.3074	0.0248	0.0119	0.12444
	750	แบบแตกหัก	139.7921	257.7546	136.8524	0.1545	0.0177	0.01808
	1500	แบบแตกหัก	140.4475	264.9676	85.8100	0.0512	0.0142	0.01163
	2000	แบบแตกหัก	72.4214	241.5113	64.6923	0.0254	0.0140	0.01248
100_0.20_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	3.5750	3.1305	2.9349	0.0018	0.0032	0.01136
	750	แบบต่อเนื่อง	1.9988	1.1072	0.9505	0.0012	0.0018	0.00738
	1500	แบบต่อเนื่อง	1.7309	1.3798	0.9602	0.0012	0.0022	0.00857
	2000	แบบต่อเนื่อง	3.6091	2.8209	2.6248	0.0014	0.0016	0.00701



เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
100_0.20_1.50	0	แบบแตกหัก	96.2403	241.8206	117.4988	0.0477	0.0195	0.26864
	750	แบบแตกหัก	140.4113	343.4861	217.1159	0.2156	0.0128	0.03843
	1500	แบบแตกหัก	187.9595	347.7854	150.2654	0.0989	0.0168	0.02186
	2000	แบบแตกหัก	217.6358	527.3588	231.1326	0.1335	0.0184	0.01634
100_0.25_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	2.9515	2.4413	1.8116	0.0010	0.0033	0.01130
	750	แบบต่อเนื่อง	2.0435	1.2871	1.0550	0.0013	0.0020	0.00914
	1500	แบบต่อเนื่อง	3.2141	2.2762	1.2107	0.0011	0.0030	0.00648
	2000	แบบต่อเนื่อง	2.8657	1.8733	2.4429	0.0026	0.0020	0.01014
100_0.25_1.50	0	แบบแตกหัก	240.9370	378.7772	193.4804	0.0765	0.0304	0.14691
	750	แบบแตกหัก	238.2590	387.0427	325.6749	0.3862	0.0106	0.01076
	1500	แบบแตกหัก	224.3410	291.6171	173.0316	0.1445	0.0098	0.01131
	2000	แบบแตกหัก	292.8275	543.4354	274.3117	0.1714	0.0109	0.01149
100_0.25_1.75	0	แบบแตกหัก	525.9871	632.9945	347.4315	0.1531	0.0323	0.12936
	750	แบบแตกหัก	624.4267	573.1346	609.1112	0.8031	0.0182	0.03810
	1500	แบบแตกหัก	404.0565	388.8382	272.4925	0.2150	0.0179	0.01162
	2000	แบบแตกหัก	366.8490	397.7293	276.9714	0.1374	0.0339	0.01228



เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแร่ซีมี	แรงแปอนด์	แรงแด่ดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
100_0.25_2.00	0	แบบแตกหัก	627.3795	830.4338	319.5736	0.1760	0.0322	0.03268
	750	แบบแตกหัก	972.2871	980.3348	1116.8042	1.3486	0.0172	0.02433
	1500	แบบแตกหัก	292.6866	306.3866	214.5635	1.1644	0.0194	0.01162
	2000	แบบแตกหัก	502.1133	531.1421	492.1529	0.2391	0.0490	0.01365
100_0.30_1.50	0	แบบแตกหัก	715.8663	718.7713	544.9841	0.2101	0.0177	0.15932
	750	แบบแตกหัก	1228.835	894.7342	1230.6670	1.5013	0.0144	0.00840
	1500	แบบแตกหัก	603.7822	595.0293	360.3639	0.2378	0.0144	0.01300
	2000	แบบแตกหัก	714.6402	857.3624	472.5986	0.2779	0.0125	0.01173
100_0.30_2.00	0	แบบแตกหัก	1199.145	973.2609	640.8812	0.3637	0.0484	0.06728
	750	แบบแตกหัก	2040.443	1460.0387	2016.4169	2.3857	0.0118	0.04209
	1500	แบบแตกหัก	885.1154	550.6719	676.8092	0.4479	0.0299	0.01142
	2000	แบบแตกหัก	752.8993	712.1381	383.1239	0.2031	0.0164	0.01139
150_0.10_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	2.5979	2.1273	1.6409	0.0007	0.0040	0.00225
	750	แบบต่อเนื่อง	4.7839	2.8796	1.1949	0.0036	0.0026	0.00709
	1500	แบบต่อเนื่อง	21.8472	12.8070	3.6555	0.0035	0.0064	0.00744
	2000	แบบต่อเนื่อง	15.7719	7.0807	2.3109	0.0007	0.0029	0.00922

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.15_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	4.5369	4.8122	1.7270	0.0042	0.0052	0.00202
	750	แบบต่อเนื่อง	2.0229	0.8569	0.6571	0.0049	0.0022	0.00873
	1500	แบบต่อเนื่อง	2.8580	1.9686	0.8012	0.0026	0.0029	0.00754
	2000	แบบต่อเนื่อง	2.5332	1.3667	2.3069	0.0011	0.0015	0.00825
150_0.15_0.50	0	แบบแตกหัก	13.1774	14.2468	7.8635	0.0040	0.0178	0.04394
	750	แบบแตกหัก	12.1103	8.7569	4.8545	0.1342	0.0115	0.16310
	1500	แบบแตกหัก	11.4632	6.3334	4.3393	0.0063	0.0130	0.02294
	2000	แบบแตกหัก	11.0898	7.6722	5.9694	0.0047	0.0104	0.03085
150_0.15_0.75	0	แบบแตกหัก	25.0393	31.7689	16.1707	0.0083	0.0194	0.03315
	750	แบบแตกหัก	24.4690	19.4918	10.9338	0.0329	0.0168	0.07337
	1500	แบบแตกหัก	13.2914	18.4836	10.2926	0.0075	0.0144	0.01145
	2000	แบบแตกหัก	15.6273	30.7594	12.3654	0.0077	0.0153	0.01515
150_0.15_1.00	0	แบบแตกหัก	48.0975	65.7502	23.7267	0.0141	0.0225	0.03641
	750	แบบแตกหัก	24.3439	47.2780	26.2661	0.0450	0.0181	0.07377
	1500	แบบแตกหัก	19.2776	45.6885	19.0311	0.0128	0.0081	0.01007
	2000	แบบแตกหัก	22.9495	47.8334	22.1528	0.0071	0.0142	0.02237

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแรศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชัน
150_0.15_1.50	0	แบบแตกหัก	92.4517	85.6998	27.8015	0.0187	0.0379	0.06683
	750	แบบแตกหัก	36.6994	43.3425	34.7194	0.0981	0.0162	0.04247
	1500	แบบแตกหัก	45.8772	47.0902	26.0125	0.0346	0.0140	0.01292
	2000	แบบแตกหัก	50.9137	80.9117	29.0700	0.0233	0.0129	0.01632
150_0.20_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	2.5652	1.9334	4.4118	0.0016	0.0036	0.00287
	750	แบบต่อเนื่อง	10.9083	5.6574	1.8811	0.0076	0.0013	0.01290
	1500	แบบต่อเนื่อง	13.7216	8.0882	2.4860	0.0037	0.0085	0.01318
	2000	แบบต่อเนื่อง	3.2771	1.8870	2.1742	0.0010	0.0020	0.01385
150_0.20_0.50	0	แบบแตกหัก	53.6584	63.3940	42.0214	0.0134	0.0125	0.13236
	750	แบบแตกหัก	28.6270	13.9821	11.2410	0.0248	0.0315	0.08222
	1500	แบบแตกหัก	33.5581	26.9418	12.0043	0.0199	0.0421	0.01699
	2000	แบบแตกหัก	7.7564	4.6890	4.3355	0.0163	0.0244	0.02245
150_0.20_0.75	0	แบบแตกหัก	16.7763	16.4500	13.4547	0.0193	0.0660	0.05287
	750	แบบแตกหัก	50.5135	32.8639	31.9267	0.0543	0.0284	0.04390
	1500	แบบแตกหัก	60.8915	47.7727	28.4036	0.0208	0.0311	0.01409
	2000	แบบแตกหัก	34.3031	55.2008	29.6247	0.0165	0.0251	0.02307

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแรศมี	แรงแปอนด์	แรงแด่หลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.20_1.00	0	แบบแตกหัก	57.7845	97.3709	44.2896	0.0181	0.0320	0.03270
	750	แบบแตกหัก	73.0256	89.0286	67.1267	0.0639	0.0214	0.03706
	1500	แบบแตกหัก	110.6837	124.6467	82.3855	0.0446	0.0434	0.01511
	2000	แบบแตกหัก	119.0009	159.2957	81.1680	0.0468	0.0144	0.01223
150_0.20_1.50	0	แบบแตกหัก	678.2838	486.3280	126.2611	0.1057	0.0203	0.02313
	750	แบบแตกหัก	382.4102	148.7841	185.0069	0.4129	0.0345	0.06789
	1500	แบบแตกหัก	264.9466	129.9883	99.8347	0.1261	0.0398	0.02104
	2000	แบบแตกหัก	990.9344	244.4310	233.0249	0.2431	0.0109	0.02337
150_0.25_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	2.6534	2.0789	1.2321	0.0014	0.0048	0.00272
	750	แบบต่อเนื่อง	4.7354	1.5784	1.3854	0.0049	0.0037	0.01272
	1500	แบบต่อเนื่อง	12.9056	8.8229	2.2762	0.0021	0.0023	0.01139
	2000	แบบต่อเนื่อง	6.3186	3.1201	2.3437	0.0028	0.0028	0.01486
150_0.25_0.50	0	แบบแตกหัก	11.3147	9.4164	8.2920	0.0081	0.0542	0.01961
	750	แบบแตกหัก	14.6931	8.9993	10.0262	0.0631	0.0604	0.05603
	1500	แบบแตกหัก	18.9421	14.2319	5.4954	0.0093	0.0405	0.01776
	2000	แบบแตกหัก	5.3067	4.7255	3.4952	0.0185	0.0223	0.01899

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแร่ซีมี	แรงแปอนด์	แรงแด่หลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติค อิมิตชัน
150_0.25_0.75	0	แบบแตกหัก	35.9632	26.3878	21.7915	0.0098	0.0662	0.02959
	750	แบบแตกหัก	38.6740	23.8371	26.9456	0.0476	0.0673	0.01589
	1500	แบบแตกหัก	60.5925	60.1397	38.4214	0.0240	0.0381	0.01043
	2000	แบบแตกหัก	57.8146	69.1547	45.7722	0.0214	0.0232	0.01028
150_0.25_1.00	0	แบบแตกหัก	156.3345	212.9451	114.9338	0.0462	0.0781	0.04648
	750	แบบแตกหัก	216.7678	214.2351	222.4435	0.2593	0.0542	0.01614
	1500	แบบแตกหัก	154.8908	198.8733	111.6640	0.0851	0.0448	0.02213
	2000	แบบแตกหัก	248.9021	258.9185	140.6924	0.0808	0.0552	0.01124
150_0.25_1.50	0	แบบแตกหัก	1597.556	681.3583	263.1969	0.1945	0.0541	0.13020
	750	แบบแตกหัก	716.1158	350.2128	654.7010	1.4181	0.0649	0.01182
	1500	แบบแตกหัก	828.2132	171.2765	245.5989	0.3207	0.0442	0.02125
	2000	แบบแตกหัก	1100.273	170.3336	249.3940	0.3020	0.0315	0.01756
150_0.25_1.75	0	แบบแตกหัก	1934.730	452.7723	346.7292	0.2648	0.0608	0.04064
	750	แบบแตกหัก	610.9585	418.2126	698.9078	1.3302	0.0470	0.02779
	1500	แบบแตกหัก	359.2842	98.0412	130.4464	0.1751	0.0527	0.02262
	2000	แบบแตกหัก	270.8667	122.4731	124.0335	0.1364	0.0706	0.02173

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
150_0.25_2.00	0	แบบแตกหัก	671.1931	233.2052	162.1775	0.1711	0.0590	0.20030
	750	แบบแตกหัก	245.1035	220.8069	313.3887	0.6986	0.0414	0.05027
	1500	แบบแตกหัก	419.0385	123.4522	226.6015	0.3017	0.0515	0.02358
	2000	แบบแตกหัก	356.1467	158.0642	156.2403	0.1694	0.0654	0.02342
150_0.30_1.50	0	แบบแตกหัก	9878.430	3047.6284	1234.1509	0.7130	0.0773	0.10378
	750	แบบแตกหัก	1248.203	653.6737	982.7149	1.6552	0.0546	0.02228
	1500	แบบแตกหัก	1248.182	192.7868	325.0706	0.4244	0.0618	0.01073
	2000	แบบแตกหัก	1576.244	181.3747	354.0970	0.3736	0.0959	0.00848
150_0.30_2.00	0	แบบแตกหัก	745.1119	421.0516	297.4816	0.3171	0.2034	0.36642
	750	แบบแตกหัก	475.9286	629.4866	989.4072	642.8155	0.1045	0.04243
	1500	แบบแตกหัก	422.1733	234.5086	302.0731	0.4208	0.0641	0.02536
	2000	แบบแตกหัก	1313.976	434.2919	501.3281	0.5513	0.1098	0.00800
200_0.10_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	1.2884	1.1163	1.3633	0.0012	0.0036	0.00350
	750	แบบต่อเนื่อง	3.6632	1.7868	0.9568	0.0080	0.0029	0.00830
	1500	แบบต่อเนื่อง	12.5722	5.8940	1.9166	0.0061	0.0076	0.00945
	2000	แบบต่อเนื่อง	5.0216	3.0901	2.6558	0.0033	0.0028	0.00864

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแร่ซีมี	แรงแปอนด์ตัด	แรงแดดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชัน
200_0.15_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	0.5727	0.6775	0.9175	0.0014	0.0043	0.00266
	750	แบบต่อเนื่อง	6.3465	2.4093	1.1656	0.0238	0.0033	0.00881
	1500	แบบต่อเนื่อง	1.9018	1.4096	0.7327	0.0013	0.0032	0.01177
	2000	แบบต่อเนื่อง	4.6424	2.2628	2.4276	0.0031	0.0024	0.00807
200_0.15_0.50	0	แบบแตกหัก	2.0784	3.4866	4.0203	0.0190	0.0195	0.05972
	750	แบบแตกหัก	8.2622	3.7512	2.5369	0.0261	0.0155	0.01981
	1500	แบบแตกหัก	5.2471	3.0827	2.0331	0.0233	0.0156	0.01280
	2000	แบบแตกหัก	6.1591	4.5587	3.0611	0.0320	0.0157	0.01034
200_0.15_0.75	0	แบบแตกหัก	13.4956	14.1193	6.2641	0.0168	0.0147	0.05105
	750	แบบแตกหัก	12.8308	15.1207	8.9901	0.0274	0.0153	0.02039
	1500	แบบแตกหัก	11.1335	24.4696	12.2500	0.0174	0.0165	0.01428
	2000	แบบแตกหัก	17.2008	39.0634	19.7963	0.0213	0.0164	0.01255
200_0.15_1.00	0	แบบแตกหัก	23.1787	93.7124	35.2047	0.0130	0.0108	0.05838
	750	แบบแตกหัก	25.6220	68.4748	34.3854	0.0408	0.0139	0.02993
	1500	แบบแตกหัก	20.2439	99.7820	40.7363	0.0168	0.0142	0.01599
	2000	แบบแตกหัก	18.9580	70.0859	35.0711	0.0153	0.0128	0.02842

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
200_0.15_1.50	0	แบบแตกหัก	106.6202	85.3004	19.1294	0.0214	0.0186	0.03585
	750	แบบแตกหัก	37.2718	19.5307	25.6440	0.0754	0.0170	0.02153
	1500	แบบแตกหัก	42.8176	19.3080	10.2325	0.0411	0.0142	0.01469
	2000	แบบแตกหัก	29.6763	26.5423	10.2742	0.0283	0.0241	0.00973
200_0.20_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	0.7994	0.4747	0.1185	0.0014	0.0037	0.00555
	750	แบบต่อเนื่อง	3.6187	1.7248	1.1060	0.0087	0.0026	0.03059
	1500	แบบต่อเนื่อง	3.4053	1.7434	1.0065	0.0023	0.0030	0.01300
	2000	แบบต่อเนื่อง	7.6851	2.4000	2.4189	0.0061	0.0034	0.01403
200_0.20_0.50	0	แบบแตกหัก	4.6347	3.8617	2.2905	0.0350	0.0111	0.10077
	750	แบบแตกหัก	8.0059	8.0185	11.8058	0.0142	0.0148	0.04513
	1500	แบบแตกหัก	4.3661	2.8035	2.1656	0.0143	0.0146	0.01051
	2000	แบบแตกหัก	8.5868	6.2608	6.8241	0.0188	0.0182	0.01059
200_0.20_0.75	0	แบบแตกหัก	12.0672	10.3721	6.3035	0.0133	0.0220	0.17447
	750	แบบแตกหัก	13.7641	16.0392	12.4986	0.0285	0.0189	0.07360
	1500	แบบแตกหัก	44.9472	50.5395	30.5224	0.0399	0.0183	0.01415
	2000	แบบแตกหัก	60.5134	93.7527	53.1460	0.0252	0.0094	0.01369

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแร่ซีมี	แรงแปอนด์	แรงแด่หลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชัน
200_0.20_1.00	0	แบบแตกหัก	107.3375	129.5006	54.1375	0.0334	0.0219	0.08308
	750	แบบแตกหัก	90.2433	153.1631	107.5303	0.1254	0.0125	0.06273
	1500	แบบแตกหัก	95.3099	179.3013	81.6609	0.0413	0.0297	0.01130
	2000	แบบแตกหัก	88.9690	194.8549	81.2716	0.0481	0.0183	0.01545
200_0.20_1.50	0	แบบแตกหัก	494.2153	229.8401	84.9049	0.1412	0.0412	0.46098
	750	แบบแตกหัก	202.0187	133.0442	247.1618	0.6430	0.0181	0.09436
	1500	แบบแตกหัก	279.2259	47.6896	59.3067	0.1327	0.0187	0.02808
	2000	แบบแตกหัก	490.8523	67.0731	101.6939	0.2092	0.0149	0.01203
200_0.25_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	2.1369	1.3212	0.4662	0.0021	0.0065	0.00211
	750	แบบต่อเนื่อง	7.7649	2.3601	1.3708	0.0067	0.0045	0.01423
	1500	แบบต่อเนื่อง	6.5517	3.0942	1.4966	0.0037	0.0040	0.01098
	2000	แบบต่อเนื่อง	8.4745	3.6893	2.4927	0.0009	0.0028	0.01163
200_0.25_0.50	0	แบบแตกหัก	6.9421	6.1271	4.6612	0.0077	0.0186	0.12835
	750	แบบแตกหัก	10.6837	5.5580	4.9836	0.0206	0.0172	0.07956
	1500	แบบแตกหัก	11.4955	7.3397	3.9644	0.0110	0.0167	0.01538
	2000	แบบแตกหัก	11.4119	6.5392	6.4114	0.0166	0.0185	0.01139

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแรศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชัน
200_0.25_0.75	0	แบบแตกหัก	15.7476	12.3088	9.5420	0.0147	0.0842	0.19344
	750	แบบแตกหัก	30.0181	26.1801	29.3680	0.0758	0.0148	0.01531
	1500	แบบแตกหัก	58.6727	64.8780	51.1193	0.0521	0.0158	0.01261
	2000	แบบแตกหัก	61.5097	82.9909	54.6390	0.0300	0.0127	0.01293
200_0.25_1.00	0	แบบแตกหัก	266.8702	215.9144	112.8331	0.0670	0.0600	0.11788
	750	แบบแตกหัก	190.1463	196.5168	238.4028	0.4080	0.0199	0.01106
	1500	แบบแตกหัก	251.3396	290.5025	163.0709	0.1522	0.0117	0.01236
	2000	แบบแตกหัก	202.5830	295.8923	139.9073	0.0951	0.0082	0.01352
200_0.25_1.50	0	แบบแตกหัก	629.1613	227.7981	146.0733	0.1550	0.0454	0.07960
	750	แบบแตกหัก	123.4267	102.0261	165.7271	0.3867	0.0353	0.01343
	1500	แบบแตกหัก	154.1350	71.7658	71.2301	0.1734	0.0161	0.01342
	2000	แบบแตกหัก	232.6599	75.0864	69.1403	0.1251	0.0244	0.01564
200_0.25_1.75	0	แบบแตกหัก	205.0110	84.8126	55.9956	0.0960	0.0353	0.21152
	750	แบบแตกหัก	54.8986	75.3662	101.7795	0.2406	0.0424	0.02825
	1500	แบบแตกหัก	74.1878	48.3942	46.8240	0.0908	0.0180	0.01146
	2000	แบบแตกหัก	153.2696	66.3295	47.6816	0.0855	0.0180	0.01071



เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแรศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชัน
200_0.25_2.00	0	แบบแตกหัก	79.4375	52.7863	38.6570	0.0353	0.0343	0.18522
	750	แบบแตกหัก	88.3795	111.5785	157.9584	0.3532	0.0438	0.03789
	1500	แบบแตกหัก	92.5338	49.2624	44.5842	0.0592	0.0227	0.00988
	2000	แบบแตกหัก	180.5599	103.2268	77.5365	0.1115	0.0847	0.00967
200_0.30_1.50	0	แบบแตกหัก	750.3473	243.2914	268.9279	0.3135	0.1011	0.26257
	750	แบบแตกหัก	398.9668	550.9550	908.6117	2.2339	0.0906	0.02593
	1500	แบบแตกหัก	106.8599	82.9064	75.1435	0.1290	0.0310	0.01055
	2000	แบบแตกหัก	165.2553	98.2901	89.1822	0.1595	0.0469	0.01055
200_0.30_2.00	0	แบบแตกหัก	97.4088	43.5620	51.5237	0.0627	0.1327	0.25777
	750	แบบแตกหัก	144.3140	111.3863	207.2445	323.1563	0.0666	0.07932
	1500	แบบแตกหัก	230.6574	108.9210	137.1206	0.1813	0.0726	0.03257
	2000	แบบแตกหัก	1189.128	359.3672	504.8418	9.9234	0.0744	0.02216
250_0.10_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	1.4100	1.5022	1.4266	0.0025	0.0060	0.00344
	750	แบบต่อเนื่อง	8.9939	5.3008	0.8843	0.0103	0.0049	0.00738
	1500	แบบต่อเนื่อง	12.1508	5.1897	1.3771	0.0024	0.0097	0.00923
	2000	แบบต่อเนื่อง	6.2230	2.3929	2.1507	0.0030	0.0031	0.00770

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแร่ซีมี	แรงแปอนด์ตัด	แรงแดดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชัน
250_0.15_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	0.2299	0.1898	0.0945	0.0025	0.0051	0.00346
	750	แบบต่อเนื่อง	11.1656	4.0681	1.1808	0.0088	0.0091	0.01255
	1500	แบบต่อเนื่อง	10.7148	3.6755	1.0685	0.0047	0.0050	0.01491
	2000	แบบต่อเนื่อง	6.7444	2.4508	2.2155	0.0024	0.0031	0.01130
250_0.15_0.50	0	แบบแตกหัก	2.2057	2.4033	1.1651	0.0046	0.0170	0.02801
	750	แบบแตกหัก	13.1995	8.2530	4.3132	0.0263	0.0105	0.03711
	1500	แบบแตกหัก	4.5271	3.1249	2.1314	0.0100	0.0258	0.01221
	2000	แบบแตกหัก	5.6181	4.8325	3.2640	0.0086	0.0158	0.01066
250_0.15_0.75	0	แบบแตกหัก	4.9812	5.9967	3.4843	0.0144	0.0191	0.08476
	750	แบบแตกหัก	27.0630	48.2064	26.4212	0.0389	0.0142	0.03173
	1500	แบบแตกหัก	24.3338	54.5432	21.6915	0.0132	0.0180	0.02026
	2000	แบบแตกหัก	19.6007	53.5970	23.0585	0.0337	0.0161	0.01492
250_0.15_1.00	0	แบบแตกหัก	29.4702	73.6466	27.7513	0.0205	0.0103	0.15888
	750	แบบแตกหัก	32.4887	62.9427	38.4573	0.0501	0.0154	0.04683
	1500	แบบแตกหัก	46.6619	70.5763	29.8384	0.0266	0.0184	0.02626
	2000	แบบแตกหัก	16.0215	58.4141	26.1983	0.0182	0.0254	0.02643

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแร่ตรี	แรงแปอนด์	แรงแดดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
250_0.15_1.50	0	แบบแตกหัก	89.8024	68.2271	9.9458	0.0614	0.0107	0.09470
	750	แบบแตกหัก	23.0769	14.3135	13.2683	0.0508	0.0218	0.03969
	1500	แบบแตกหัก	35.9567	21.7979	7.3865	0.0339	0.0183	0.02615
	2000	แบบแตกหัก	17.2084	10.5713	5.9806	0.0312	0.0146	0.02009
250_0.20_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	1.1825	1.0744	1.7849	0.0038	0.0041	0.00424
	750	แบบต่อเนื่อง	4.0873	1.3844	0.9460	0.0252	0.0040	0.01222
	1500	แบบต่อเนื่อง	12.1728	3.8483	1.6479	0.0065	0.0043	0.01763
	2000	แบบต่อเนื่อง	5.4184	2.1959	2.6045	0.0044	0.0046	0.01294
250_0.20_0.50	0	แบบแตกหัก	7.5006	7.0127	5.6069	0.0155	0.0098	0.05143
	750	แบบแตกหัก	6.4650	4.0443	2.9140	0.0238	0.0166	0.01204
	1500	แบบแตกหัก	8.2395	3.6989	2.9726	0.0056	0.0156	0.01006
	2000	แบบแตกหัก	10.5627	6.6269	4.9188	0.0078	0.0093	0.01632
250_0.20_0.75	0	แบบแตกหัก	14.0693	17.6006	10.1650	0.0248	0.0115	0.30738
	750	แบบแตกหัก	29.2484	44.5005	31.0036	0.0512	0.0122	0.08184
	1500	แบบแตกหัก	41.8997	67.0585	37.3057	0.0255	0.0093	0.02075
	2000	แบบแตกหัก	45.0032	76.2921	37.2467	0.0384	0.0130	0.02029

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชัน
250_0.20_1.00	0	แบบแตกหัก	68.9940	160.0574	72.8975	0.0453	0.0107	0.21585
	750	แบบแตกหัก	82.5244	132.4718	102.0924	0.1661	0.0090	0.09276
	1500	แบบแตกหัก	160.3761	172.2574	79.6935	0.0701	0.0180	0.02099
	2000	แบบแตกหัก	60.5030	102.8018	46.1250	0.0354	0.0096	0.02455
250_0.20_1.50	0	แบบแตกหัก	155.6532	121.6581	34.4117	0.0597	0.0172	0.34869
	750	แบบแตกหัก	40.3918	24.4231	40.6044	0.1105	0.0180	0.06518
	1500	แบบแตกหัก	44.0685	15.9192	11.2965	0.0292	0.0110	0.01652
	2000	แบบแตกหัก	29.3578	8.4060	8.7605	0.0216	0.0081	0.01565
250_0.25_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	2.3334	1.4234	1.0138	0.0031	0.0039	0.00552
	750	แบบต่อเนื่อง	6.3939	2.6117	1.0622	0.0130	0.0062	0.01007
	1500	แบบต่อเนื่อง	5.8013	2.6530	1.2479	0.0083	0.0048	0.01350
	2000	แบบต่อเนื่อง	8.6675	3.9362	2.4308	0.0063	0.0045	0.01289
250_0.25_0.50	0	แบบแตกหัก	8.0117	7.9201	6.1519	0.0395	0.0111	0.14856
	750	แบบแตกหัก	13.0887	8.9567	8.2683	0.0302	0.0190	0.07827
	1500	แบบแตกหัก	11.8991	7.7483	5.6394	0.0129	0.0089	0.02129
	2000	แบบแตกหัก	9.5312	6.9929	6.1962	0.0063	0.0080	0.01484



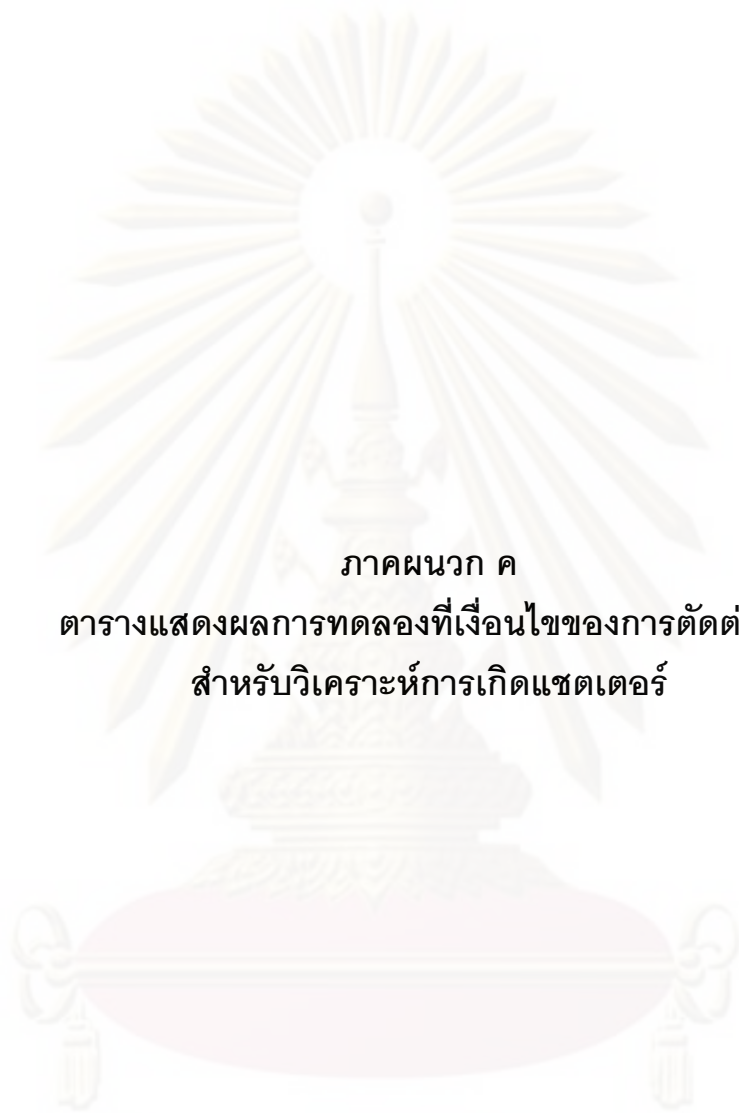
เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
250_0.25_0.75	0	แบบแตกหัก	19.3525	11.2588	12.5581	0.0416	0.0346	0.14565
	750	แบบแตกหัก	21.4272	11.1217	13.9718	0.0316	0.0173	0.08633
	1500	แบบแตกหัก	44.4501	46.4572	27.8786	0.0426	0.0151	0.01591
	2000	แบบแตกหัก	144.4378	309.6997	105.0409	0.0836	0.0114	0.01491
250_0.25_1.00	0	แบบแตกหัก	125.8654	190.9429	82.3222	0.0604	0.0261	0.16300
	750	แบบแตกหัก	164.2904	198.5417	197.6843	0.3073	0.0324	0.02511
	1500	แบบแตกหัก	212.5932	185.6576	141.4959	0.1669	0.0170	0.01059
	2000	แบบแตกหัก	124.4410	150.2706	85.6929	0.0609	0.0092	0.01466
250_0.25_1.50	0	แบบแตกหัก	102.0863	106.1706	56.1297	0.0671	0.0343	0.33418
	750	แบบแตกหัก	124.1662	171.1074	249.6530	0.5627	0.0377	0.15373
	1500	แบบแตกหัก	42.4890	29.2047	23.6205	0.0407	0.0187	0.06317
	2000	แบบแตกหัก	20.0494	20.6988	14.4764	0.0384	0.0149	0.02247
250_0.25_1.75	0	แบบแตกหัก	47.4157	36.7526	24.5871	0.1270	0.0372	0.42389
	750	แบบแตกหัก	36.7962	35.2764	44.5736	0.0915	0.0660	0.01546
	1500	แบบแตกหัก	35.5324	28.9516	27.6083	0.0524	0.0171	0.02555
	2000	แบบแตกหัก	41.3125	29.0926	25.7623	0.0555	0.0149	0.02177

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงแร้ศมี	แรงแป่นตัด	แรงแด่ดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิสชั่น
250_0.25_2.00	0	แบบแตกหัก	39.8831	40.6962	24.5574	0.0656	0.0315	0.38523
	750	แบบแตกหัก	37.3247	38.4877	45.8265	45.2953	0.0354	0.07913
	1500	แบบแตกหัก	56.7091	35.9438	29.8249	0.1539	0.0148	0.02509
	2000	แบบแตกหัก	1529.642	488.6019	509.3912	227.9224	0.0865	0.01576
250_0.30_1.50	0	แบบแตกหัก	188.7840	140.3825	94.8691	0.0855	0.0509	0.32049
	750	แบบแตกหัก	54.9100	43.0721	72.8115	0.1646	0.0360	0.02035
	1500	แบบแตกหัก	1789.038	781.0005	1038.1870	9.7914	0.0532	0.15239
	2000	แบบแตกหัก	มีดแตกหัก					
250_0.30_2.00	0	แบบแตกหัก	78.6398	52.2503	51.5857	0.2884	0.0602	0.66925
	750	แบบแตกหัก	137.6504	121.9609	214.1993	0.4080	0.0595	0.04147
	1500	แบบแตกหัก	224.4522	84.6163	144.2020	14.3714	0.0541	0.01812
	2000	แบบแตกหัก	มีดแตกหัก					
300_0.10_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	2.5492	1.3648	1.6085	0.0044	0.0069	0.00528
	750	แบบต่อเนื่อง	9.0164	6.3128	0.9847	0.0453	0.0073	0.00921
	1500	แบบต่อเนื่อง	17.7077	8.4175	1.7686	0.0030	0.0134	0.00792
	2000	แบบต่อเนื่อง	9.1891	5.2075	2.6577	0.0148	0.0047	0.00774

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที่_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
300_0.15_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	1.5101	0.5498	1.3696	0.0044	0.0068	0.01105
	750	แบบต่อเนื่อง	2.8004	1.3350	1.0562	0.1085	0.0048	0.01901
	1500	แบบต่อเนื่อง	12.2287	6.8357	1.3348	0.0068	0.0117	0.00889
	2000	แบบต่อเนื่อง	4.3734	2.1621	2.4078	0.0164	0.0066	0.00894
300_0.15_1.50	0	แบบแตกหัก	39.7869	42.3704	7.3588	0.0543	0.0135	0.15990
	750	แบบแตกหัก	29.1747	17.4208	21.1481	0.0602	0.0143	0.04147
	1500	แบบแตกหัก	12.1464	9.8655	2.7239	0.0120	0.0140	0.01442
	2000	แบบแตกหัก	7.3808	9.2970	2.9341	0.0894	0.0068	0.01326
300_0.20_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	1.7587	0.6848	1.4016	0.0027	0.0076	0.10992
	750	แบบต่อเนื่อง	3.0181	1.4643	1.2486	0.0586	0.0068	0.00832
	1500	แบบต่อเนื่อง	8.5826	4.2259	1.2107	0.0039	0.0095	0.01296
	2000	แบบต่อเนื่อง	5.2079	2.2398	2.4379	0.0073	0.0058	0.00927
300_0.20_1.50	0	แบบแตกหัก	24.3772	23.3651	11.7137	0.1832	0.0332	0.41384
	750	แบบแตกหัก	18.9787	8.5060	8.8163	0.0778	0.0203	0.07526
	1500	แบบแตกหัก	12.0876	6.9042	3.6085	0.0168	0.0135	0.02099
	2000	แบบแตกหัก	16.4110	11.6804	8.9545	0.1385	0.0112	0.01662

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
300_0.25_0.25	0	แบบต่อเนื่อง	1.2416	0.8302	1.5358	0.0031	0.0075	0.01089
	750	แบบต่อเนื่อง	4.5706	3.5040	1.2704	0.0070	0.0067	0.00633
	1500	แบบต่อเนื่อง	12.5810	5.2295	1.6684	0.0077	0.0064	0.01289
	2000	แบบต่อเนื่อง	5.6047	1.9185	2.5599	0.0061	0.0046	0.01206
300_0.25_1.50	0	แบบแตกหัก	114.6117	121.6556	59.4150	0.0910	0.0284	0.29108
	750	แบบแตกหัก	51.0852	56.5118	59.1202	0.1402	0.0298	0.15029
	1500	แบบแตกหัก	25.6587	24.3915	14.9780	0.0560	0.0173	0.01521
	2000	แบบแตกหัก	182.3453	107.9579	118.9449	18.4271	0.0335	0.01666
300_0.25_1.75	0	แบบแตกหัก	31.6858	28.7690	16.1075	0.0812	0.0411	0.42596
	750	แบบแตกหัก	26.6121	25.1061	23.8339	0.0511	0.0559	0.01888
	1500	แบบแตกหัก	106.1423	61.5671	21.0579	0.1261	0.0225	0.05444
	2000	แบบแตกหัก	มีดแตกหัก					
300_0.25_2.00	0	แบบแตกหัก	30.7665	28.5129	16.6736	0.6836	0.0428	0.40318
	750	แบบแตกหัก	47.0556	54.3308	57.1025	0.1538	0.0410	0.06144
	1500	แบบแตกหัก	97.9775	69.0550	290.8563	959.4521	0.0217	0.06848
	2000	แบบแตกหัก	มีดแตกหัก					

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	รูปแบบของ เศษโลหะ	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง	อะคูสติก อิมิตชัน
300_0.30_1.50	0	แบบแตกหัก	149.9787	153.6452	90.4402	0.1614	0.0560	0.51844
	750	แบบแตกหัก	49.0312	40.2012	60.7539	0.1612	0.0445	0.14131
	1500	แบบแตกหัก	มีดแตกหัก					
	2000	แบบแตกหัก						
300_0.30_2.00	0	แบบแตกหัก	42.2783	42.8117	39.0934	0.1607	0.0792	0.23116
	750	แบบแตกหัก	1384.358	1669.7231	3859.4428	118.4768	0.3150	0.61609
	1500	แบบแตกหัก	มีดแตกหัก					
	2000	แบบแตกหัก						



ภาคผนวก ค
ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ
สำหรับวิเคราะห์การเกิดแซตเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
100_0.10_0.25	0	ปกติ	0.42	0.41	0.10	0.000222	0.000571
	75	ปกติ	0.74	0.31	0.04	0.000171	0.001968
	1500	ปกติ	4.25	1.21	0.40	0.000624	0.000698
	2000	ปกติ	0.77	0.56	0.23	0.000300	0.001273
100_0.15_0.25	0	ปกติ	0.86	0.80	0.11	0.000160	0.000882
	75	ปกติ	0.38	0.17	0.03	0.000105	0.000926
	1500	ปกติ	4.30	4.04	0.50	0.000770	0.000571
	2000	ปกติ	0.82	0.78	0.04	0.000088	0.000769
100_0.15_1.50	0	ปกติ	3.42	9.86	2.09	0.001543	0.001614
	75	ปกติ	44.13	17.07	25.02	0.038930	0.002144
	1500	ปกติ	45.27	39.60	9.10	0.009117	0.007824
	2000	ปกติ	10.71	16.37	3.55	0.003659	0.001363
100_0.20_0.25	0	ปกติ	0.38	0.24	0.15	0.000239	0.000475
	75	ปกติ	0.86	0.40	0.06	0.000193	0.000471
	1500	ปกติ	0.21	0.29	0.05	0.000227	0.000389
	2000	ปกติ	0.73	0.37	0.04	0.000225	0.000558

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
100_0.20_1.50	0	ปกติ	13.61	16.68	4.81	0.004872	0.002760
	75	ปกติ	16.50	6.21	8.78	0.014095	0.001417
	1500	ปกติ	25.25	26.78	5.68	0.005726	0.004195
	2000	ปกติ	40.59	26.73	5.81	0.005169	0.002947
100_0.25_0.25	0	ปกติ	0.28	0.08	0.03	0.000058	0.000225
	75	ปกติ	0.93	0.45	0.02	0.000088	0.000444
	1500	ปกติ	0.53	0.44	0.03	0.000134	0.001158
	2000	ปกติ	0.39	0.31	0.06	0.000437	0.001195
100_0.25_1.50	0	ปกติ	36.80	21.56	10.29	0.007666	0.004464
	75	ปกติ	23.77	13.04	14.01	0.023149	0.004217
	1500	ปกติ	29.13	12.33	9.87	0.008383	0.003623
	2000	ปกติ	89.98	47.25	16.64	0.014048	0.011632
100_0.25_1.75	0	ปกติ	129.70	45.14	17.14	0.011318	0.008736
	75	ปกติ	44.68	26.72	43.44	0.072013	0.005802
	1500	ปกติ	79.37	21.46	20.78	0.019740	0.004878
	2000	ปกติ	78.01	22.94	28.78	0.023412	0.008489

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซตเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
100_0.25_2.00	0	ปกติ	94.95	24.16	25.01	0.015262	0.007446
	75	ปกติ	70.50	24.00	45.11	0.069130	0.004910
	1500	ปกติ	40.15	8.66	16.55	0.045356	0.006027
	2000	ปกติ	72.50	23.16	22.58	0.023576	0.011148
100_0.30_1.50	0	ปกติ	180.48	36.72	52.24	0.036731	0.028210
	75	ปกติ	102.83	48.52	82.22	0.127899	0.024232
	1500	ปกติ	100.20	5.55	18.91	0.018485	0.005834
	2000	ปกติ	184.07	41.80	34.26	0.028267	0.011087
100_0.30_2.00	0	ปกติ	139.70	25.22	44.47	0.034006	0.015312
	75	ปกติ	122.94	50.19	97.89	0.159151	0.014580
	1500	ปกติ	123.48	8.91	58.08	0.052289	0.027507
	2000	ปกติ	103.25	11.79	38.50	0.033448	0.008914
150_0.10_0.25	0	ปกติ	0.28	0.18	0.07	0.000060	0.000639
	75	ปกติ	1.06	1.08	0.10	0.000198	0.000867
	1500	ปกติ	1.70	1.49	0.31	0.000602	0.000976
	2000	ปกติ	1.32	0.39	0.04	0.000070	0.000802

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซตเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
150_0.15_0.25	0	ปกติ	0.44	0.41	0.10	0.000513	0.000329
	75	ปกติ	0.70	0.34	0.03	0.000699	0.000307
	1500	ปกติ	0.34	0.22	0.04	0.000372	0.000712
	2000	ปกติ	0.32	0.24	0.03	0.000106	0.000614
150_0.15_0.50	0	ปกติ	0.42	1.35	0.39	0.000432	0.001288
	75	ปกติ	4.75	2.89	0.64	0.014556	0.000796
	1500	ปกติ	1.63	0.97	0.41	0.000601	0.000802
	2000	ปกติ	1.39	0.93	0.35	0.000327	0.001890
150_0.15_0.75	0	ปกติ	2.62	4.27	1.38	0.000736	0.001054
	75	ปกติ	12.76	4.47	1.41	0.005439	0.001404
	1500	ปกติ	1.32	1.66	0.50	0.000986	0.000721
	2000	ปกติ	1.31	2.11	0.60	0.001114	0.001047
150_0.15_1.00	0	ปกติ	3.23	3.24	1.27	0.001406	0.001986
	75	ปกติ	8.69	3.47	2.39	0.007007	0.001139
	1500	ปกติ	2.23	1.60	0.30	0.000879	0.001295
	2000	ปกติ	3.77	4.18	0.45	0.000508	0.000599

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
150_0.15_1.50	0	ปกติ	5.13	7.90	2.29	0.001540	0.000844
	75	ปกติ	7.87	1.90	2.52	0.011635	0.002331
	1500	ปกติ	13.28	8.87	3.11	0.004162	0.003979
	2000	ปกติ	6.63	9.51	2.14	0.002302	0.001228
150_0.20_0.25	0	ปกติ	0.15	0.10	0.21	0.000233	0.002195
	75	ปกติ	4.19	2.40	0.14	0.001041	0.000707
	1500	ปกติ	2.59	1.84	0.26	0.000619	0.000831
	2000	ปกติ	0.59	0.16	0.02	0.000196	0.001467
150_0.20_0.50	0	ปกติ	0.24	0.28	0.11	0.000643	0.000396
	75	ปกติ	9.60	5.13	0.97	0.003068	0.001049
	1500	ปกติ	5.47	3.11	1.37	0.001317	0.001586
	2000	ปกติ	1.38	1.00	0.32	0.000665	0.000805
150_0.20_0.75	0	ปกติ	2.12	1.98	1.12	0.001182	0.000629
	75	ปกติ	10.33	4.38	2.62	0.005640	0.002016
	1500	ปกติ	11.55	8.78	3.80	0.005039	0.001082
	2000	ปกติ	2.73	10.40	3.82	0.004007	0.001914

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
150_0.20_1.00	0	ปกติ	5.48	13.12	4.02	0.003493	0.001724
	75	ปกติ	17.07	3.84	4.52	0.008664	0.003270
	1500	ปกติ	33.71	14.93	4.94	0.005746	0.004201
	2000	ปกติ	8.92	22.08	4.89	0.004787	0.002427
150_0.20_1.50	0	ปกติ	276.15	223.09	32.34	0.026846	0.015855
	75	ปกติ	98.03	12.98	39.01	0.084773	0.017755
	1500	ปกติ	119.28	37.73	29.89	0.034913	0.016700
	2000	ปกติ	272.72	82.67	53.87	0.042079	0.022609
150_0.25_0.25	0	ปกติ	0.16	0.14	0.08	0.000117	0.000499
	75	ปกติ	0.73	0.44	0.04	0.000569	0.000523
	1500	ปกติ	3.15	1.26	0.19	0.000407	0.000404
	2000	ปกติ	0.98	0.42	0.03	0.000425	0.003044
150_0.25_0.50	0	ปกติ	1.61	0.94	0.49	0.000949	0.002571
	75	ปกติ	3.71	2.02	0.61	0.011130	0.000717
	1500	ปกติ	5.10	3.53	0.48	0.000807	0.001652
	2000	ปกติ	0.49	0.44	0.14	0.001330	0.000754

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซตเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
150_0.25_0.75	0	ปกติ	3.22	2.85	1.59	0.001295	0.002746
	75	ปกติ	5.80	4.21	2.38	0.005488	0.002212
	1500	ปกติ	4.43	5.19	2.18	0.002852	0.001226
	2000	ปกติ	7.12	12.12	5.47	0.005265	0.001643
150_0.25_1.00	0	ปกติ	13.29	18.47	5.48	0.003829	0.004040
	75	ปกติ	69.82	28.59	42.39	0.070698	0.008554
	1500	ปกติ	56.23	36.27	11.10	0.018083	0.002998
	2000	ปกติ	28.52	35.23	9.65	0.009032	0.005515
150_0.25_1.50	0	แซตเตอร์	1113.60	407.77	128.07	0.087326	0.036227
	75	แซตเตอร์	1012.06	452.88	154.34	0.097658	0.027013
	1500	แซตเตอร์	1339.50	265.82	99.12	0.076143	0.037631
	2000	แซตเตอร์	1853.60	464.81	158.22	0.095875	0.023304
	0	แซตเตอร์	341.71	174.92	203.34	0.361504	0.044255
	75	แซตเตอร์	420.43	254.64	186.80	0.093970	0.024903
	1500	แซตเตอร์	424.51	275.55	254.34	0.150185	0.118678
	2000	แซตเตอร์	264.67	245.31	237.07	0.135869	0.136032

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แชนเดอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
150_0.25_1.75	0	แชนเดอร์	1460.80	352.27	251.42	0.162371	0.074653
	75	แชนเดอร์	1281.45	245.38	180.10	0.141135	0.072272
	1500	แชนเดอร์	1693.26	336.90	240.74	0.166797	0.031220
	2000	แชนเดอร์	2169.03	333.44	313.81	0.211803	0.035534
	0	ปกติ	140.45	56.26	86.76	0.134267	0.046405
	75	ปกติ	146.66	27.81	39.01	0.035593	0.012636
	1500	ปกติ	98.76	40.06	31.53	0.029675	0.010047
150_0.25_2.00	2000	ปกติ	251.57	143.34	61.54	0.051764	0.016669
	0	ปกติ	43.09	42.93	53.07	0.092458	0.013183
	75	ปกติ	122.52	23.80	44.54	0.036515	0.009116
	1500	ปกติ	95.40	31.18	25.25	0.019611	0.013922
150_0.30_1.50	2000	แชนเดอร์	8978.76	2589.48	1000.05	0.557500	0.543941
	0	แชนเดอร์	3682.33	738.52	298.47	0.194345	0.255073
	75	แชนเดอร์	9335.12	1526.11	919.27	0.464087	0.763496
	1500	แชนเดอร์	9790.51	1623.16	964.16	0.504429	0.854986
	2000	แชนเดอร์	591.62	181.06	379.84	0.602881	0.070896

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซตเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
150_0.30_1.50	0	แซตเตอร์	3682.33	738.52	298.47	0.194345	0.255073
	75	แซตเตอร์	9335.12	1526.11	919.27	0.464087	0.763496
	1500	แซตเตอร์	9790.51	1623.16	964.16	0.504429	0.854986
	2000	แซตเตอร์	694.58	146.80	141.51	0.160330	0.219129
	0	แซตเตอร์	925.67	76.09	170.38	0.139278	0.072934
150_0.30_1.00	75	แซตเตอร์	401.67	271.10	145.81	0.116051	0.052585
	1500	แซตเตอร์	357.75	206.42	92.92	0.071064	0.044657
	2000	แซตเตอร์	559.41	161.99	119.63	0.095268	0.060724
	0	แซตเตอร์	735.75	150.42	138.17	0.107281	0.075551
	75	ปกติ	103.87	140.81	167.86	0.007654	0.023082
	1500	ปกติ	58.83	59.84	33.81	0.034396	0.012835
	2000	แซตเตอร์	436.52	72.16	121.04	0.079702	0.084547
200_0.10_0.25	0	ปกติ	0.16	0.16	0.02	0.000183	0.001129
	75	ปกติ	0.61	0.44	0.02	0.001597	0.000607
	1500	ปกติ	2.87	0.67	0.13	0.000423	0.000288
	2000	ปกติ	0.62	0.15	0.03	0.000268	0.000320

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
200_0.15_0.25	0	ปกติ	0.04	0.04	0.03	0.000150	0.000458
	75	ปกติ	1.72	0.93	0.07	0.002129	0.000447
	1500	ปกติ	0.33	0.14	0.02	0.000154	0.000607
	2000	ปกติ	0.96	0.17	0.04	0.000398	0.000294
200_0.15_0.50	0	ปกติ	0.13	0.36	0.15	0.001166	0.000525
	75	ปกติ	3.22	0.85	0.27	0.002564	0.000427
	1500	ปกติ	1.02	0.44	0.09	0.000451	0.000452
	2000	ปกติ	1.07	0.60	0.09	0.000225	0.000484
200_0.15_0.75	0	ปกติ	0.64	0.35	0.28	0.000450	0.001316
	75	ปกติ	2.70	2.44	0.48	0.004484	0.000558
	1500	ปกติ	0.88	1.47	0.32	0.000586	0.000424
	2000	ปกติ	1.14	3.23	0.82	0.002658	0.000527
200_0.15_1.00	0	ปกติ	0.66	2.12	0.34	0.001331	0.000891
	75	ปกติ	7.30	3.44	1.95	0.005089	0.003890
	1500	ปกติ	2.21	8.48	1.33	0.001494	0.001611
	2000	ปกติ	0.95	2.82	0.52	0.001456	0.000606

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที่_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
200_0.15_1.50	0	ปกติ	22.53	29.16	4.32	0.005050	0.002216
	75	ปกติ	15.76	2.65	5.44	0.012645	0.004021
	1500	ปกติ	11.50	7.73	2.00	0.004978	0.001627
	2000	ปกติ	4.15	10.81	1.43	0.004432	0.002820
200_0.20_0.25	0	ปกติ	0.06	0.03	0.01	0.000104	0.000844
	75	ปกติ	0.98	0.69	0.03	0.001613	0.000685
	1500	ปกติ	0.50	0.22	0.05	0.000304	0.000346
	2000	ปกติ	2.33	0.46	0.04	0.000738	0.000714
200_0.20_0.50	0	ปกติ	0.25	0.27	0.12	0.000441	0.000312
	75	ปกติ	2.58	1.32	0.23	0.002207	0.000529
	1500	ปกติ	0.71	0.19	0.14	0.000628	0.000418
	2000	ปกติ	1.59	0.59	0.17	0.000614	0.000656
200_0.20_0.75	0	ปกติ	0.97	1.05	0.57	0.001239	0.000870
	75	ปกติ	2.78	0.83	0.83	0.003221	0.001349
	1500	ปกติ	6.27	4.20	1.99	0.004693	0.002570
	2000	ปกติ	2.19	4.03	1.04	0.001627	0.001346

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
200_0.20_1.00	0	ปกติ	4.29	12.72	3.49	0.005297	0.002552
	75	ปกติ	33.40	4.70	9.13	0.016560	0.004077
	1500	ปกติ	17.16	30.73	4.42	0.004929	0.003039
	2000	ปกติ	15.30	40.34	9.06	0.009371	0.004273
200_0.20_1.50	0	ปกติ	28.08	34.77	5.94	0.017666	0.005801
	75	ปกติ	28.19	3.23	12.15	0.024269	0.012004
	1500	ปกติ	56.01	18.77	7.56	0.011411	0.003135
	2000	ปกติ	23.32	14.79	3.81	0.005203	0.005982
200_0.25_0.25	0	ปกติ	0.28	0.11	0.03	0.000286	0.000807
	75	ปกติ	3.97	0.94	0.14	0.001197	0.001907
	1500	ปกติ	1.64	0.27	0.12	0.000458	0.001213
	2000	ปกติ	1.16	0.22	0.07	0.000181	0.000378
200_0.25_0.50	0	ปกติ	0.76	0.69	0.22	0.001251	0.001088
	75	ปกติ	3.24	1.62	0.37	0.002329	0.000784
	1500	ปกติ	1.81	0.77	0.12	0.001414	0.000754
	2000	ปกติ	3.09	1.23	0.25	0.001367	0.000506

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
200_0.25_0.75	0	ปกติ	1.39	1.74	0.87	0.001381	0.000801
	75	ปกติ	6.39	2.97	2.64	0.011867	0.003999
	1500	ปกติ	8.54	8.50	4.00	0.005225	0.001170
	2000	ปกติ	4.92	10.43	3.37	0.003600	0.001732
200_0.25_1.00	0	ปกติ	8.40	27.18	7.60	0.011722	0.002842
	75	ปกติ	75.00	42.61	60.93	0.098413	0.033553
	1500	ปกติ	116.62	128.39	50.18	0.057007	0.010016
	2000	ปกติ	50.93	60.60	16.00	0.019032	0.012491
200_0.25_1.50	0	ปกติ	47.96	58.73	14.75	0.014857	0.009837
	75	ปกติ	24.69	8.15	18.94	0.035229	0.007533
	1500	ปกติ	32.65	15.14	10.45	0.021454	0.006730
	2000	ปกติ	63.56	25.65	6.48	0.009434	0.003485
200_0.25_1.75	0	ปกติ	28.93	27.76	5.22	0.012729	0.003690
	75	ปกติ	5.72	3.50	4.36	0.010221	0.002465
	1500	ปกติ	17.23	11.11	7.13	0.008356	0.003038
	2000	ปกติ	20.35	13.70	3.88	0.006782	0.001330

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซตเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
200_0.25_2.00	0	ปกติ	13.11	10.63	2.47	0.002902	0.001356
	75	ปกติ	12.45	5.33	11.49	0.018211	0.004819
	1500	ปกติ	33.34	9.50	9.87	0.010816	0.008541
	2000	ปกติ	48.23	17.37	10.25	0.012943	0.006449
200_0.30_1.50	0	ปกติ	115.62	66.42	29.88	0.026040	0.010100
	75	ปกติ	41.99	29.75	54.53	0.118599	0.011352
	1500	ปกติ	17.30	5.31	3.80	0.006496	0.002263
	2000	ปกติ	23.85	9.44	6.12	0.011737	0.001977
200_0.30_2.00	0	ปกติ	11.59	11.95	5.44	0.007083	0.003088
	75	ปกติ	24.69	9.04	31.96	0.004910	0.006037
	1500	ปกติ	65.83	12.32	25.03	0.029518	0.006735
	2000	แซตเตอร์	473.88	53.04	184.67	1.097255	0.105023
250_0.10_0.25	0	ปกติ	0.08	0.05	0.02	0.000190	0.003463
	75	ปกติ	4.42	3.39	0.08	0.000927	0.000683
	1500	ปกติ	2.60	0.50	0.05	0.000198	0.001782
	2000	ปกติ	1.31	0.45	0.02	0.000444	0.000995

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
250_0.15_0.25	0	ปกติ	0.02	0.01	0.00	0.000206	0.001879
	75	ปกติ	4.02	2.04	0.10	0.000891	0.000791
	1500	ปกติ	1.25	0.35	0.06	0.000551	0.000596
	2000	ปกติ	0.70	0.16	0.02	0.000266	0.002055
250_0.15_0.50	0	ปกติ	0.19	0.19	0.06	0.000457	0.001261
	75	ปกติ	4.79	2.79	0.24	0.003489	0.000567
	1500	ปกติ	0.49	0.21	0.05	0.000892	0.000778
	2000	ปกติ	0.26	0.38	0.06	0.001096	0.000628
250_0.15_0.75	0	ปกติ	0.48	0.55	0.20	0.000929	0.002364
	75	ปกติ	8.15	4.46	1.19	0.003485	0.002131
	1500	ปกติ	2.26	3.53	0.44	0.000518	0.001375
	2000	ปกติ	1.06	6.23	1.66	0.005277	0.002011
250_0.15_1.00	0	ปกติ	1.46	8.01	1.71	0.001827	0.003123
	75	ปกติ	12.32	3.21	2.90	0.004751	0.002646
	1500	ปกติ	7.12	9.58	1.17	0.002923	0.001461
	2000	ปกติ	1.76	4.90	1.15	0.001589	0.001048

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที่_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
250_0.15_1.50	0	ปกติ	4.72	13.28	2.19	0.005718	0.002139
	75	ปกติ	6.86	2.94	1.20	0.004972	0.004833
	1500	ปกติ	6.51	6.93	0.88	0.004602	0.001510
	2000	ปกติ	1.84	1.37	0.25	0.003119	0.001101
250_0.20_0.25	0	ปกติ	0.10	0.04	0.04	0.000360	0.000825
	75	ปกติ	0.90	0.45	0.05	0.003929	0.000479
	1500	ปกติ	1.04	0.22	0.06	0.000877	0.000891
	2000	ปกติ	1.97	0.18	0.06	0.000574	0.001788
250_0.20_0.50	0	ปกติ	0.46	0.59	0.23	0.001633	0.001516
	75	ปกติ	1.75	0.72	0.15	0.003458	0.000491
	1500	ปกติ	1.35	0.69	0.11	0.000374	0.000846
	2000	ปกติ	0.77	0.41	0.20	0.000458	0.001341
250_0.20_0.75	0	ปกติ	0.83	1.41	0.53	0.003044	0.002254
	75	ปกติ	5.16	1.91	1.50	0.005919	0.001023
	1500	ปกติ	3.15	8.56	2.03	0.004233	0.002774
	2000	ปกติ	2.49	10.82	3.35	0.004179	0.003911

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซตเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
250_0.20_1.00	0	ปกติ	3.97	22.57	4.27	0.004647	0.002253
	75	ปกติ	16.60	7.86	8.20	0.018596	0.004621
	1500	ปกติ	18.18	24.72	3.77	0.005948	0.004557
	2000	ปกติ	2.92	6.74	2.11	0.002025	0.002649
250_0.20_1.50	0	ปกติ	10.11	19.79	2.66	0.006398	0.004961
	75	ปกติ	11.83	1.29	3.88	0.011786	0.004836
	1500	ปกติ	12.09	4.50	1.94	0.002696	0.003238
	2000	ปกติ	2.28	0.86	0.47	0.004299	0.001198
250_0.25_0.25	0	ปกติ	0.22	0.09	0.03	0.000205	0.001158
	75	ปกติ	3.00	1.40	0.15	0.001297	0.001903
	1500	ปกติ	0.44	0.16	0.04	0.000868	0.000938
	2000	ปกติ	2.82	0.59	0.10	0.000658	0.001922
250_0.25_0.50	0	ปกติ	0.95	1.12	0.32	0.004660	0.001824
	75	ปกติ	3.84	2.86	0.49	0.003612	0.001427
	1500	ปกติ	0.99	0.95	0.16	0.000651	0.000554
	2000	ปกติ	1.11	0.41	0.09	0.000850	0.001383

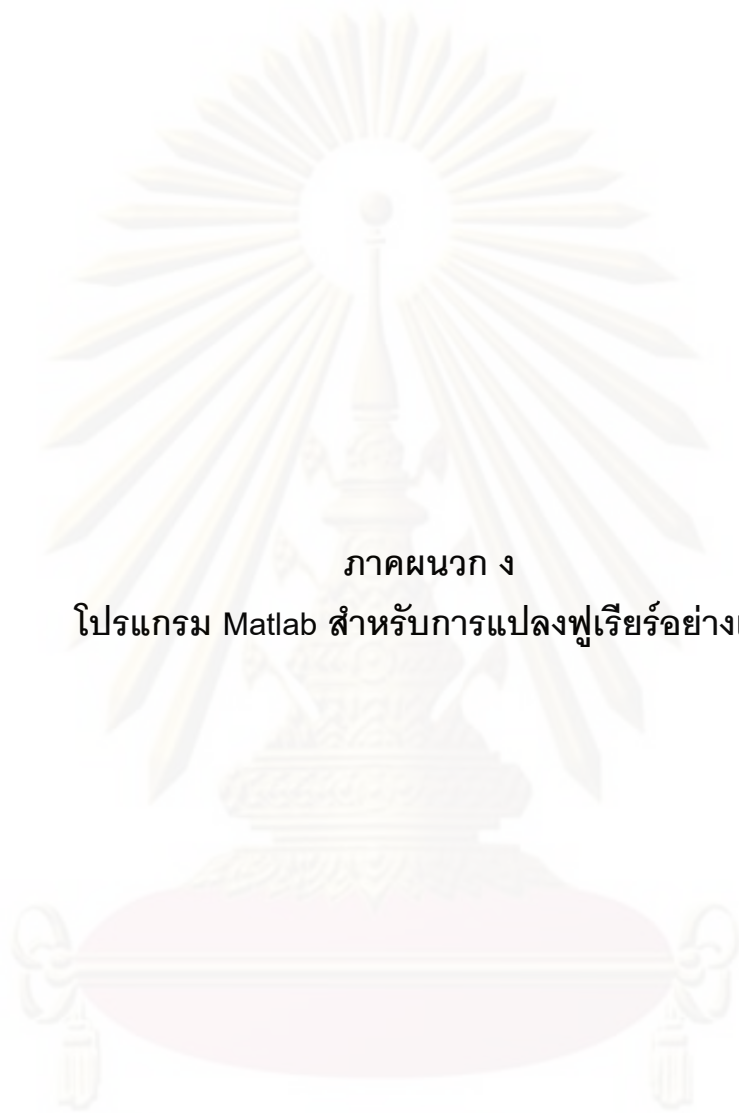
เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
250_0.25_0.75	0	ปกติ	1.88	0.76	0.90	0.007461	0.001420
	75	ปกติ	6.16	2.38	1.99	0.003702	0.003477
	1500	ปกติ	3.44	4.12	1.10	0.004738	0.001127
	2000	ปกติ	28.58	124.83	32.32	0.037657	0.008167
250_0.25_1.00	0	ปกติ	7.42	36.33	8.20	0.009243	0.004031
	75	ปกติ	40.11	26.85	31.14	0.047502	0.009913
	1500	ปกติ	25.68	14.15	7.42	0.010604	0.004491
	2000	ปกติ	14.53	21.86	9.56	0.011529	0.002876
250_0.25_1.50	0	ปกติ	13.85	28.10	8.88	0.012019	0.007807
	75	ปกติ	25.50	12.32	27.29	0.068387	0.007145
	1500	ปกติ	9.71	4.17	1.94	0.003577	0.001132
	2000	ปกติ	4.95	3.73	1.76	0.005722	0.001397
250_0.25_1.75	0	ปกติ	23.14	16.99	5.68	0.021229	0.004588
	75	ปกติ	5.05	2.52	2.77	0.006428	0.003750
	1500	ปกติ	8.26	3.76	2.88	0.004601	0.002344
	2000	ปกติ	12.51	5.05	4.94	0.008873	0.002605

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซตเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
250_0.25_2.00	0	ปกติ	5.74	5.81	2.28	0.007005	0.004530
	75	ปกติ	11.73	2.52	6.80	0.006321	0.004859
	1500	ปกติ	27.42	9.54	9.03	0.015869	0.003128
	2000	ปกติ	47.25	58.84	78.13	0.057473	0.033417
250_0.30_1.50	0	ปกติ	36.66	38.30	14.23	0.014129	0.010197
	75	ปกติ	11.14	3.44	9.67	0.022865	0.003095
	1500	ปกติ	719.76	99.49	278.95	1.577965	0.069596
	2000	-	มีดแตกหัก				
250_0.30_2.00	0	ปกติ	25.77	18.44	7.37	0.036119	0.003640
	75	ปกติ	40.59	12.43	33.12	0.050892	0.004614
	1500	ปกติ	42.05	4.90	26.16	0.558178	0.017459
	2000	-	มีดแตกหัก				
300_0.10_0.25	0	ปกติ	0.22	0.09	0.01	0.000626	0.004355
	75	ปกติ	5.24	4.48	0.20	0.005516	0.001651
	1500	ปกติ	5.31	1.70	0.06	0.000285	0.003008
	2000	ปกติ	0.82	0.21	0.07	0.001222	0.001840

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที่_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
300_0.15_0.25	0	ปกติ	0.15	0.04	0.02	0.000458	0.001597
	75	ปกติ	0.31	0.22	0.02	0.011276	0.000701
	1500	ปกติ	1.49	0.74	0.14	0.000774	0.005563
	2000	ปกติ	1.48	0.36	0.08	0.002084	0.000569
300_0.15_1.50	0	ปกติ	6.47	12.41	1.91	0.009382	0.003555
	75	ปกติ	6.70	3.36	2.79	0.007837	0.006463
	1500	ปกติ	4.25	3.66	0.63	0.001971	0.004990
	2000	ปกติ	0.72	1.25	0.22	0.011828	0.001735
300_0.20_0.25	0	ปกติ	0.11	0.03	0.03	0.000373	0.001878
	75	ปกติ	0.67	0.55	0.06	0.004337	0.001363
	1500	ปกติ	2.80	0.53	0.04	0.000454	0.003852
	2000	ปกติ	0.33	0.10	0.02	0.000641	0.002900
300_0.20_1.50	0	ปกติ	1.40	3.81	1.00	0.025173	0.004683
	75	ปกติ	3.17	1.51	0.89	0.005414	0.005242
	1500	ปกติ	2.03	1.00	0.43	0.001470	0.002861
	2000	ปกติ	3.26	1.95	1.11	0.025790	0.003656

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
300_0.25_0.25	0	ปกติ	0.10	0.09	0.05	0.000264	0.004333
	75	ปกติ	0.31	0.25	0.05	0.000685	0.000901
	1500	ปกติ	1.23	0.47	0.12	0.000726	0.001398
	2000	ปกติ	0.61	0.28	0.09	0.001007	0.001961
300_0.25_1.50	0	ปกติ	26.46	28.62	7.56	0.013259	0.006411
	75	ปกติ	11.21	6.48	8.69	0.020606	0.003972
	1500	ปกติ	8.10	1.39	1.23	0.007044	0.003184
	2000	ปกติ	33.73	22.45	17.55	1.172209	0.005346
300_0.25_1.75	0	ปกติ	4.02	7.13	2.59	0.011875	0.011502
	75	ปกติ	8.46	2.30	3.63	0.006834	0.006836
	1500	ปกติ	5.93	5.30	1.78	0.015182	0.004845
	2000	-	มีดแตกหัก				
300_0.25_2.00	0	ปกติ	11.35	11.10	2.39	0.077427	0.002867
	75	ปกติ	10.96	7.20	7.84	0.017776	0.002045
	1500	ปกติ	13.06	2.30	10.56	38.602408	0.006080
	2000	-	มีดแตกหัก				

เงื่อนไขการตัด (ม./นาที_มม./รอบ_มม.)	ปริมาตรโลหะ (ลบ.ซม.)	สถานะการกลึง ปกติ / แซดเตอร์	ความหนาแน่นของสเปคตรัมพลังงาน				
			แรงรัศมี	แรงป้อนตัด	แรงตัดหลัก	สัญญาณความเร่ง	สัญญาณเสียง
300_0.30_1.50	0	ปกติ	22.52	41.37	13.67	0.021935	0.011514
	75	ปกติ	10.66	2.69	7.45	0.019857	0.005783
	1500	-	มีดแตกหัก				
	2000						
300_0.30_2.00	0	ปกติ	5.70	7.21	2.06	0.019069	0.006393
	75	ปกติ	175.54	84.89	266.36	12.931468	0.027413
	1500	-	มีดแตกหัก				
	2000						



ภาคผนวก ง

โปรแกรม Matlab สำหรับการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด

```
clear;  
  
samp=100000;  
  
fname = 'ASF_V15_F30_D150_Volume0';  
ext = '.txt';  
filename = [fname,ext];  
load (filename);  
eval(['data=',[fname],';']);
```

```
[N,n]=size(data);
```

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

```
freq=f(1:N/2);
```

```
Fx=fft(data(:,1))/(N*2);
```

```
Fy=fft(data(:,2))/(N*2);
```

```
Fz=fft(data(:,3))/(N*2);
```

```
absFx=abs(Fx(1:N/2));
```

```
absFy=abs(Fy(1:N/2));
```

```
absFz=abs(Fz(1:N/2));
```

```
PabsFx=absFx.^2;
```

```
PabsFy=absFy.^2;
```

```
PabsFz=absFz.^2;
```

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

```
k=1;
```

```
for i=1:N
```

```
    if freq (1,i)>=100 & freq (1,i)<=500
```

```
        PSDFxforChip (j,1)=PabsFx (i,1);
```

```
        PSDFyforChip (j,1)=PabsFy (i,1);
```

```
        PSDFzforChip (j,1)=PabsFz (i,1);
```

```
        Xaxis1 (j,1)=freq(1,i);
```

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

```
    end
```

```
    if freq (1,i)>=375 & freq (1,i)<=425
```

```
        PSDFxforChatter (k,1)=PabsFx (i,1);
```

```
        PSDFyforChatter (k,1)=PabsFy (i,1);
```

```
        PSDFzforChatter (k,1)=PabsFz (i,1);
```

```
        Xaxis2 (k,1)=freq(1,i);
```

```
        k=k+1;
```

```
    end
```

```
    if freq (1,i)> 500
```

```
        break
```

```
    end
```

```
end
```

```
ESDFxforChip (1,1)=trapz(Xaxis1,PSDFxforChip);
```

```
ESDFyforChip (2,1)=trapz(Xaxis1,PSDFyforChip);
```

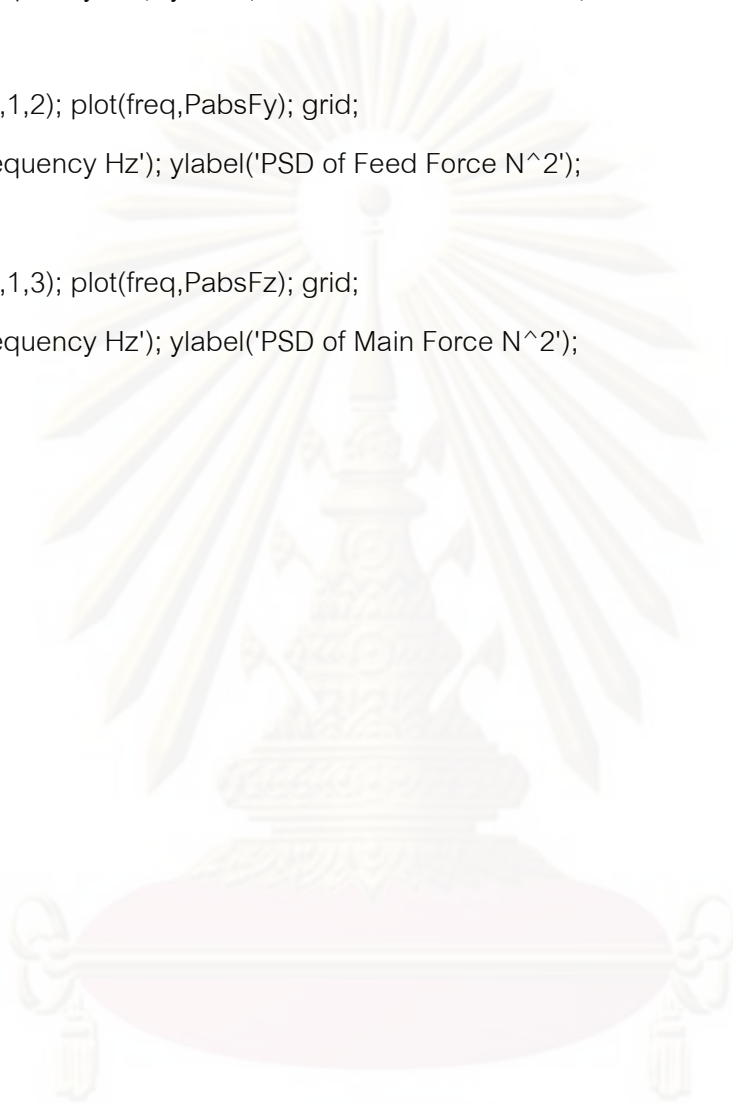
```
ESDFzforChip (3,1)=trapz(Xaxis1,PSDFzforChip);
```

```
ESDFxforChatter (1,1)=trapz(Xaxis2,PSDFxforChatter);
```

```
ESDFyforChatter (2,1)=trapz(Xaxis2,PSDFyforChatter);
```

```
ESDFzforChatter (3,1)=trapz(Xaxis2,PSDFzforChatter);
```

```
figure(1);  
subplot (3,1,1); plot (freq,PabsFx); grid;  
xlabel('Frequency Hz'); ylabel('PSD of Radial Force N^2');  
  
subplot (3,1,2); plot(freq,PabsFy); grid;  
xlabel('Frequency Hz'); ylabel('PSD of Feed Force N^2');  
  
subplot (3,1,3); plot(freq,PabsFz); grid;  
xlabel('Frequency Hz'); ylabel('PSD of Main Force N^2');
```



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณเสียง

```

clear;

samp=100000;

fname = 'ASF_V15_F30_D150_Volume0';
ext = '.txt';
filename = [fname,ext];
load (filename);
eval(['data=',[fname],'.']);

[N,n]=size(data);

f=(0:N-1)/N*samp;
freq=f(1:N/2);

Sound=fft(data(:,1))/(N*2);

absSound=abs(Sound(1:N/2));

PabsSound=absSound.^2;

j=1;
k=1;
l=1;

for i=1:N
    if freq (1,i)>=2000 & freq (1,i)<=3000
        PSDforChip (j,1)=PabsSound (i,1);
        Xaxis1 (j,1)=freq (1,i);
    
```



```
j=j+1;
end

if freq (1,i)>=4000 & freq (1,i)<=6000
    PSDforWear (k,1)=PabsSound (i,1);
    Xaxis2 (k,1)=freq (1,i);
    k=k+1;
end

if freq (1,i)>=375 & freq (1,i)<=425
    PSDforChatter (l,1)=PabsSound (i,1);
    Xaxis3 (l,1)=freq (1,i);
    l=l+1;
end

if freq (1,i)> 6000
    break
end

end

ESDSoundforChip (1,1)=trapz(Xaxis1,PSDforChip);
ESDSoundforWear (1,2)=trapz(Xaxis2,PSDforWear);
ESDSoundforChatter (1,3)=trapz(Xaxis3,PSDforChatter);

figure(1);
plot(freq,PabsSound); grid;
xlabel('Frequency Hz'); ylabel('PSD of Sound Pascal^2');
```

โปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณความเร่ง

```

clear;

samp=100000;

fname = 'ASF_V15_F30_D150_Volume0';
ext = '.txt';
filename = [fname,ext];
load (filename);
eval(['data=',[fname],'.']);

[N,n]=size(data);

t=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));

f=(0:N-1)/N*samp;
freq=f(1:N/2);

Avg=mean(data(:,1));
CumUpper=0;
NoUp=0;
CumLower=0;
NoLow=0;

for i=1:N
    if Data (i)>= Avg
        CumUpper=CumUpper+Data (i);
        NoUp=NoUp+ 1;
    else

```

```

        CumLower=CumLower+Data (i);
        NoLow=NoLow+1;
    end
end

AvgUpper=CumUpper / NoUp;
AvgLower=CumLower / NoLow;

AmplitudeforWear(1)=AvgUpper - AvgLower;

MaxTime=max(tt);
qq(1)=0;
qq(2)=MaxTime;

for a=1:2
    AvgU1 (a) =AvgUpper;
    AvgL1 (a) =AvgLower;
End

Acc=fft(data(:,1))/(N*2);

absAcc=abs(Sound(1:N/2));

PabsAcc=absAcc.^2;

j=1;
k=k+1;

for i=1:N
    if freq (1,i)>=100 & freq (1,i)<=500

```

```

    PSDforChip (j,1)=PabsAcc (i,1);
    Xaxis1 (j,1)=freq (1,i);
    j=j+1;
end
if freq (1,i)>=375 & freq (1,i)<=425
    PSDforChatter (k,1)=PabsAcc (i,1);
    Xaxis2 (k,1)=freq (1,i);
    k=k+1;
end

if freq (1,i)> 500
    break
end
end

ESDAccforChip (1,1)=trapz(Xaxis1,PSDforChip);
ESDAccforChatter (1,2)=trapz(Xaxis2,PSDforChatter);

figure(1);
plot(tt,data(:,1),qq,AvgU1,qq,AvgL1); grid;
xlabel('Time Second'); ylabel('Amplitude g');

figure(2);
plot(freq,PabsAcc); grid;
xlabel('Frequency Hz'); ylabel('PSD of Acceleration g^2');

```

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก อิมพัลส์

```

clear;

samp=2000000;

fname = 'AE_V15_F30_D150_Volume0';
ext = '.txt';
filename = [fname,ext];
load (filename);
eval(['data=',[fname],';']);

[N,n]=size(data);

f=(0:N-1)/N*samp;
freq=f(1:N/2);

AE=fft(data(:,1))/(N*2);

absAE=abs(AE(1:N/2));

PabsAE=absAE.^2;

k=1;
for i=1:N
    if freq (1,i)>=100000 & freq (1,i)<=300000
        PSDforWear (k,1)=PabsAE (i,1);
        Xaxis (k,1)=freq (1,i);
        k=k+1;
    end
end

```

```
end

if freq (1,i)> 300000
    break
end
end

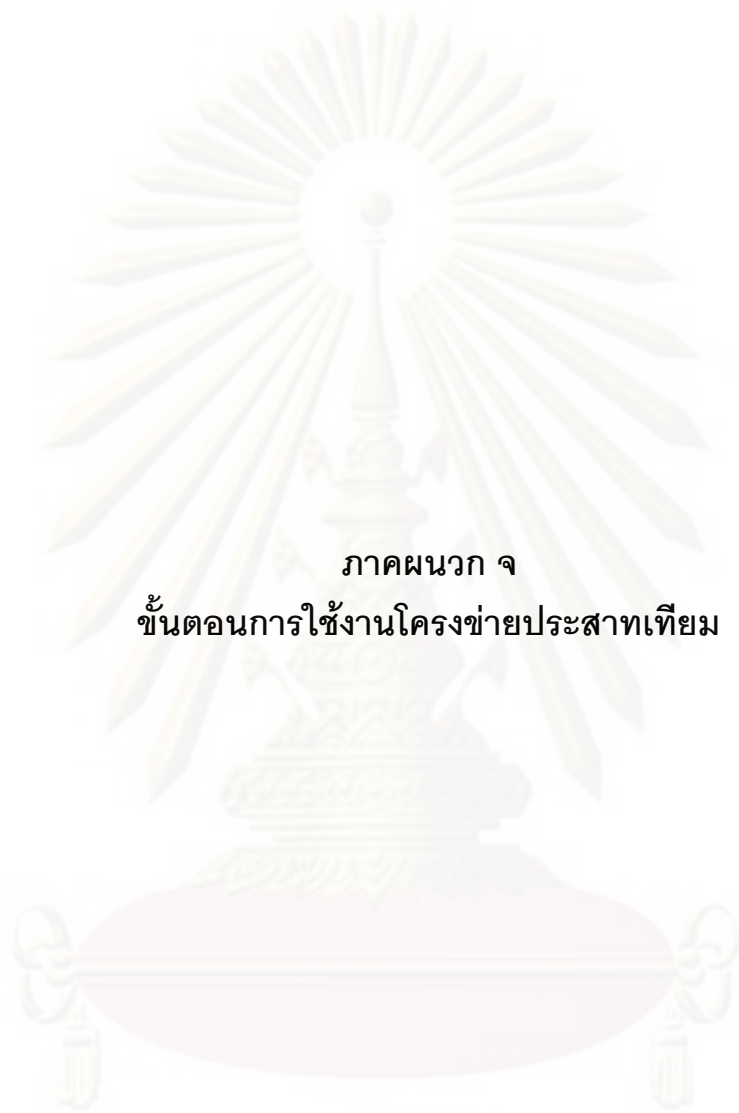
ESDSoundforWear (1,1)=trapz(Xaxis,PSDforWear);

SDforChip=std( data(:,1) );

figure(1);
plot(freq,PabsAE); grid;
xlabel('Frequency Hz'); ylabel('PSD of Acoustic Emission Volt^2');
```



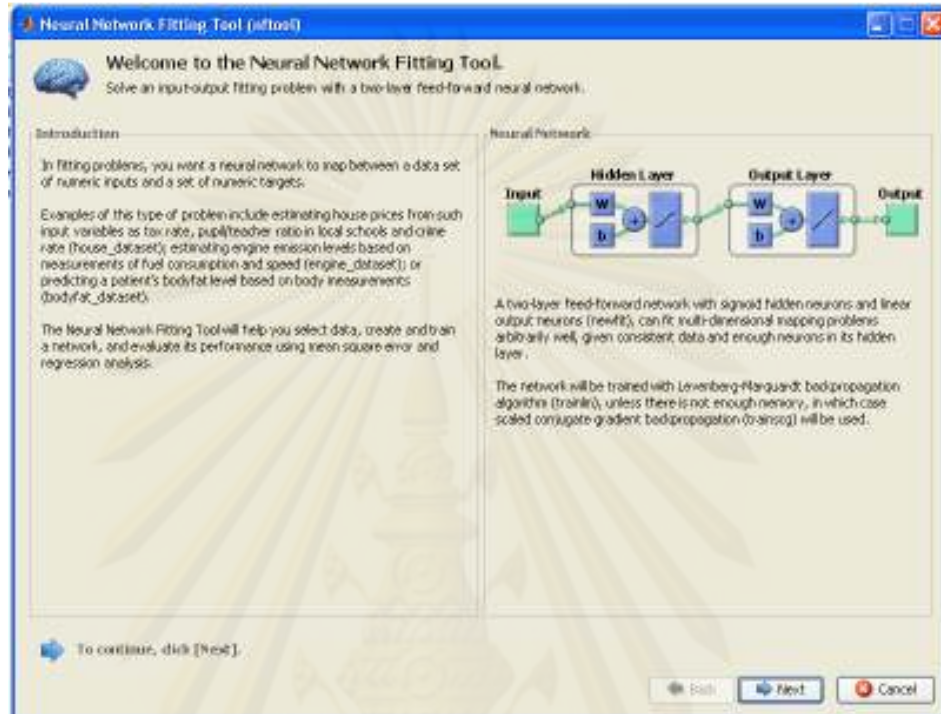
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ
ขั้นตอนการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

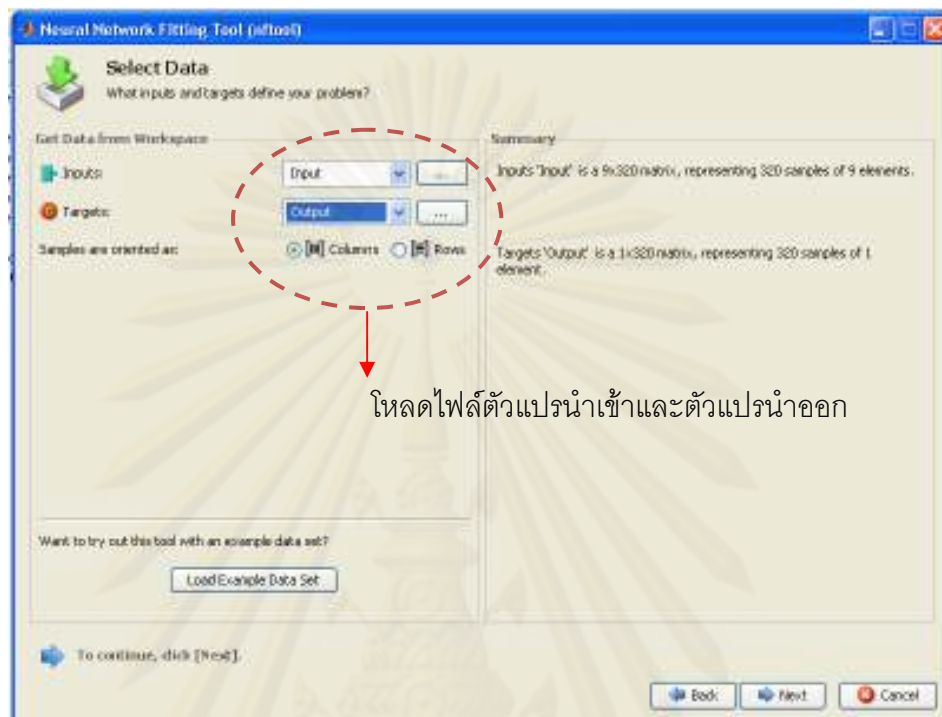
**ขั้นตอนการพยากรณ์ระดับการสึกหรอของมีดกลึง
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ**



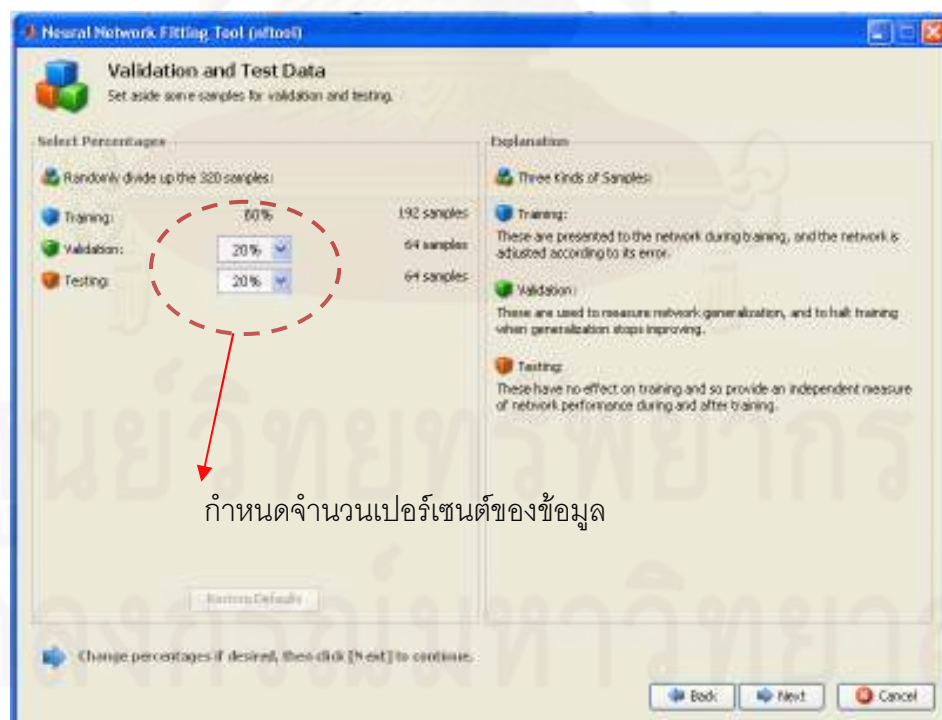
รูป ก : ภาพแสดงหน้าเริ่มต้นสำหรับการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

- 1.) เปิดการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้คำสั่ง nftool (รูป ก)
- 2.) ทำการโหลดไฟล์ของตัวแปรนำเข้า(Input) ที่ประกอบไปด้วย แรงตัดสถิติทั้ง 3 แกน, แอมพลิจูดของความแปรปรวนเฉลี่ยของสัญญาณความเร่ง, ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงานของสัญญาณเสียงและสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน รวมถึงเงื่อนไขของการตัด(ความเร็ว, อัตราป้อนตัด และความลึกตัด)และตัวแปรนำออก(Output) ซึ่งก็คือ ค่าระดับของการสึกหรอบนผิวหอบของมีดกลึง (รูป ข)
- 3.) กำหนดจำนวนเปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูลที่จะถูกนำมาใช้ในฝึกสอน (training), การตรวจสอบความถูกต้อง(validation) และการทดสอบ(Test) ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมด 320 ข้อมูล จะถูกแบ่งเป็น 192 ข้อมูล (60%) สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม, 64 ข้อมูล (20%) สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโครงข่ายประสาทเทียม และ 64 ข้อมูล (20%) สำหรับการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม ดังรูป ค
- 4.) กำหนดกำหนดจำนวนชั้นซ่อน(Hidden Layer) ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งในที่นี้จะถูกกำหนดเป็น 20 ชั้นซ่อนโดยมีทรานเฟอร์ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นล็อกซิกมอยด์ ในขณะที่ชั้นของเอาท์พุทจะเป็นแบบเชิงเส้น ดังรูป ง

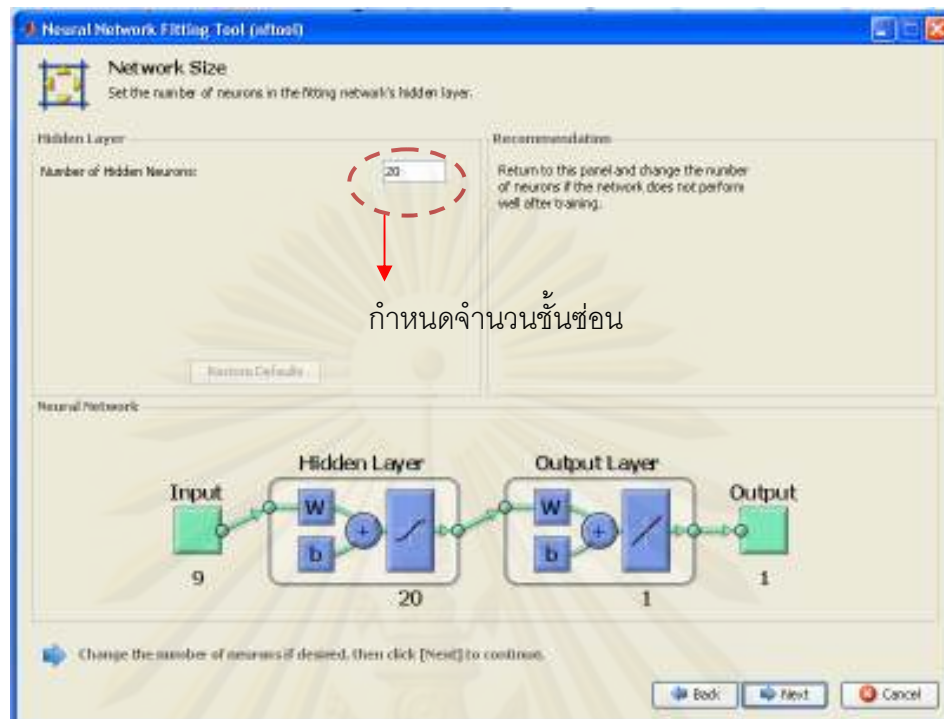
- 5.) กดปุ่ม Tran ในรูป ๑ เพื่อทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Levenberg-Marquardt backpropagation(trainlm) ในรูป ๑



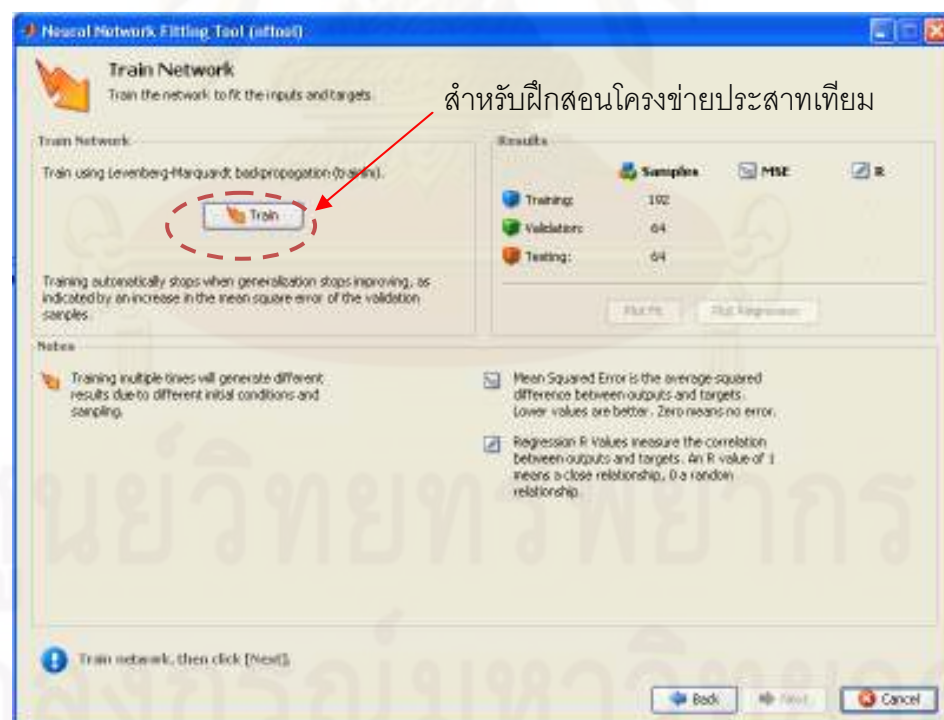
รูป ข : ภาพแสดงการโหลดไฟล์ของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรนำออก



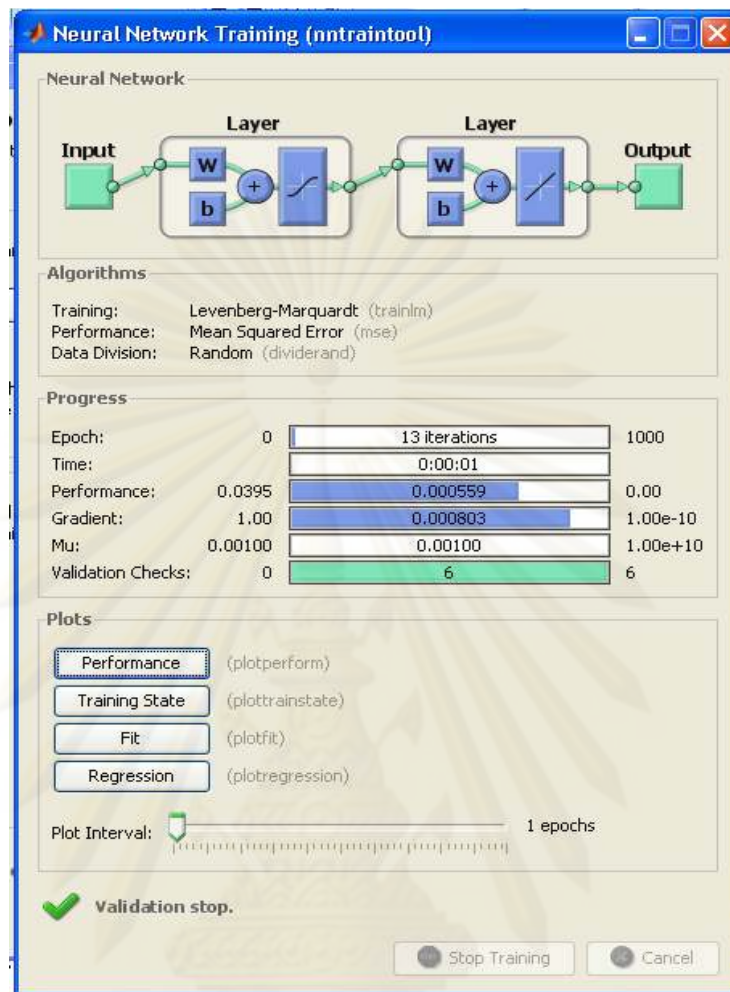
รูป ค : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนของข้อมูลสำหรับการเรียนรู้, การยืนยันความถูกต้องและการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม



รูป ง : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม



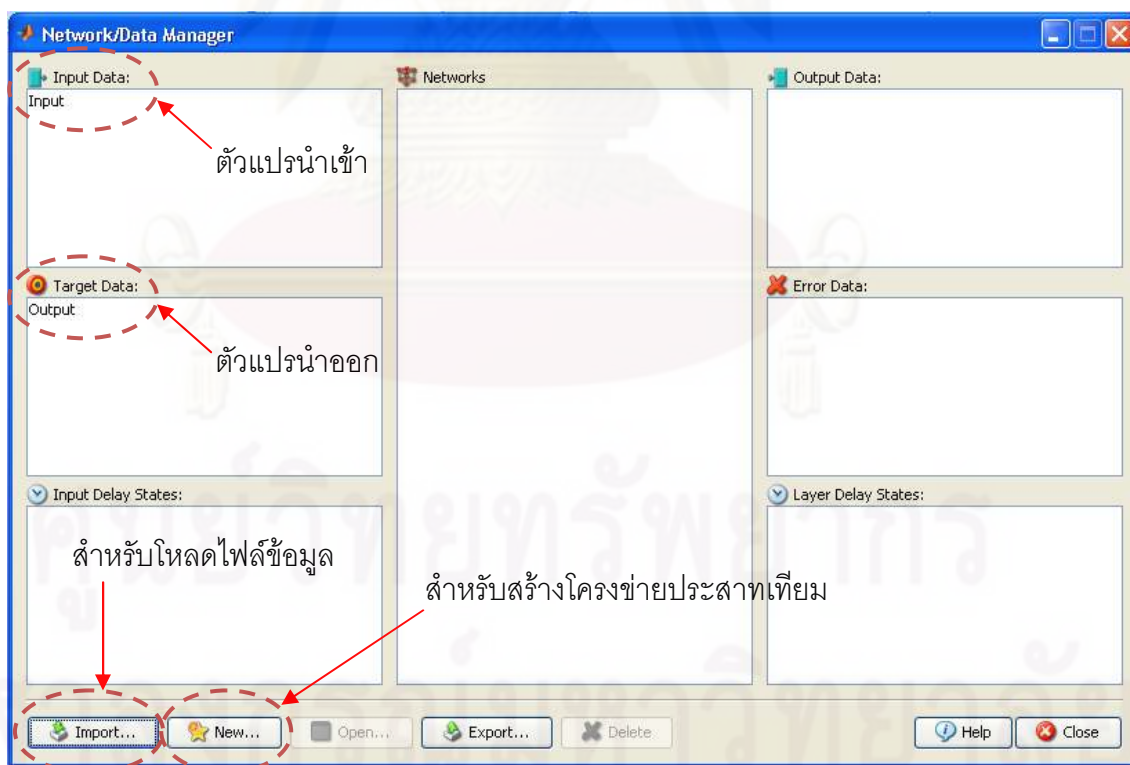
รูป จ : ภาพแสดงขั้นตอนการฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม



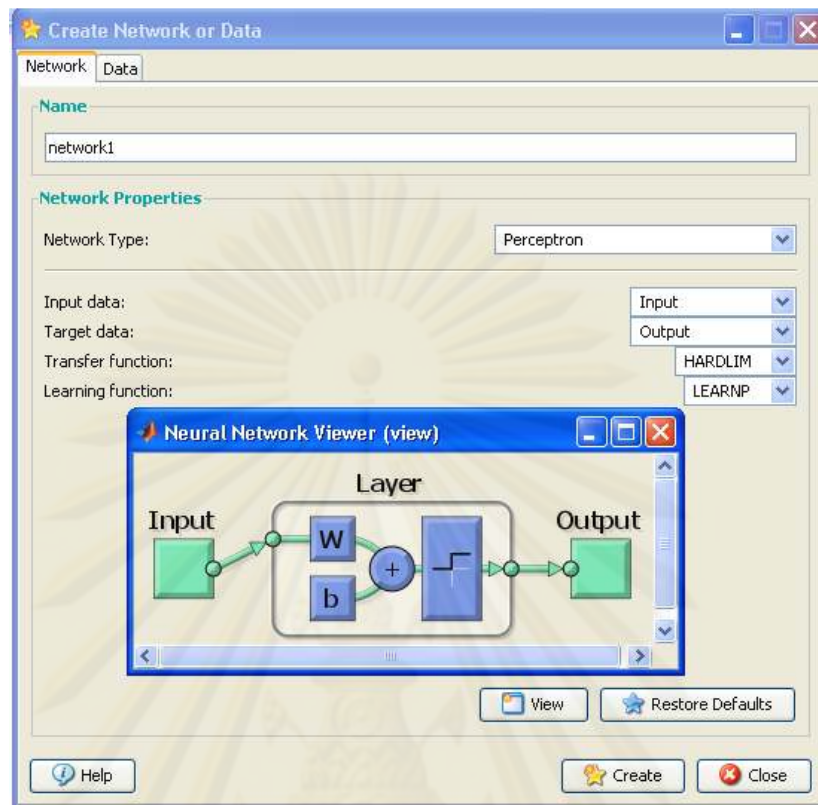
รูป ฉ : ภาพแสดงการฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะและการตรวจจับแชตเตอร์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน

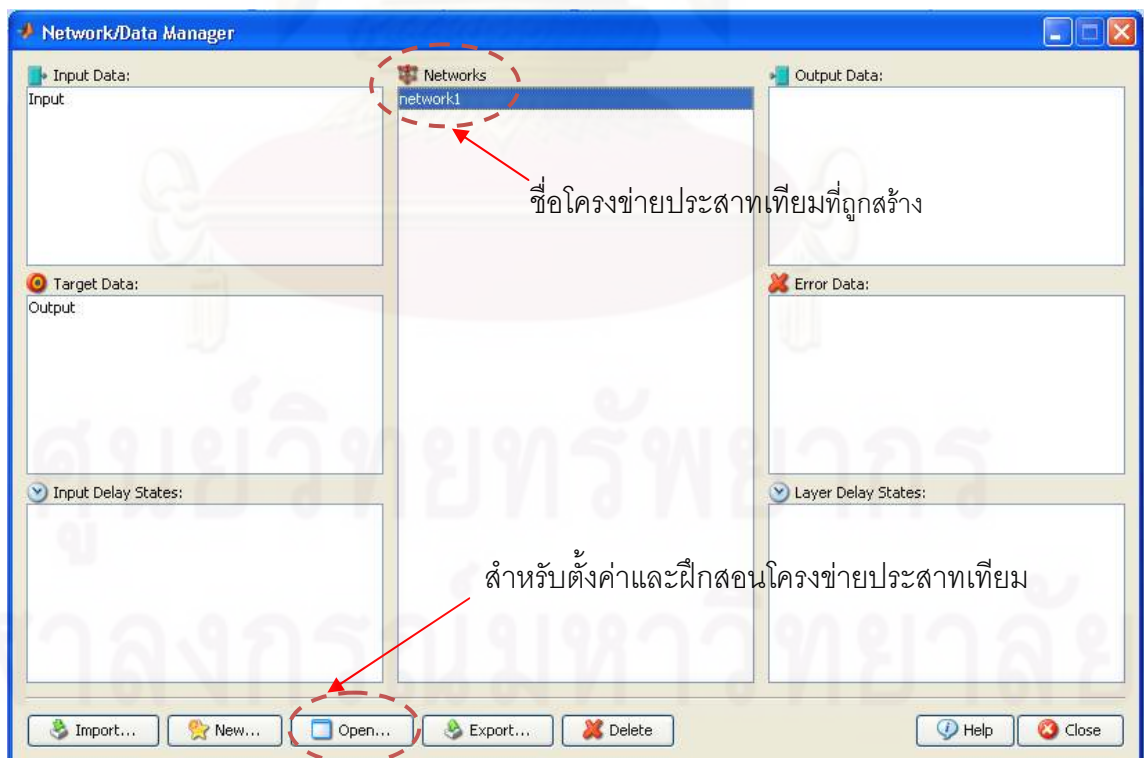
- 1.) เปิดการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้คำสั่ง nntool (รูป ข)
- 2.) โหลดไฟล์ของตัวแปรนำเข้า(Input) ที่ประกอบไปด้วย ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ หรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจจับแชตเตอร์ และตัวแปรนำออก (Output) ซึ่งก็คือ รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น หรือสถานะของการตัดว่าเกิดแชตเตอร์ขึ้นหรือไม่ โดยการกดปุ่ม Import
- 3.) กดปุ่ม New จากรูปที่ ข เพื่อสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน
- 4.) จากรูป ข เลือกรูปแบบของโครงข่าย(Network Type)เป็นแบบเพอร์เซพตรอน ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบฮาร์ดลิมิต จากนั้นกด Create
- 5.) จากรูป ฉ กดปุ่ม Open เพื่อทำการตั้งค่าและฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน
- 6.) กดปุ่ม Train Network (รูป ฉ) เพื่อทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม



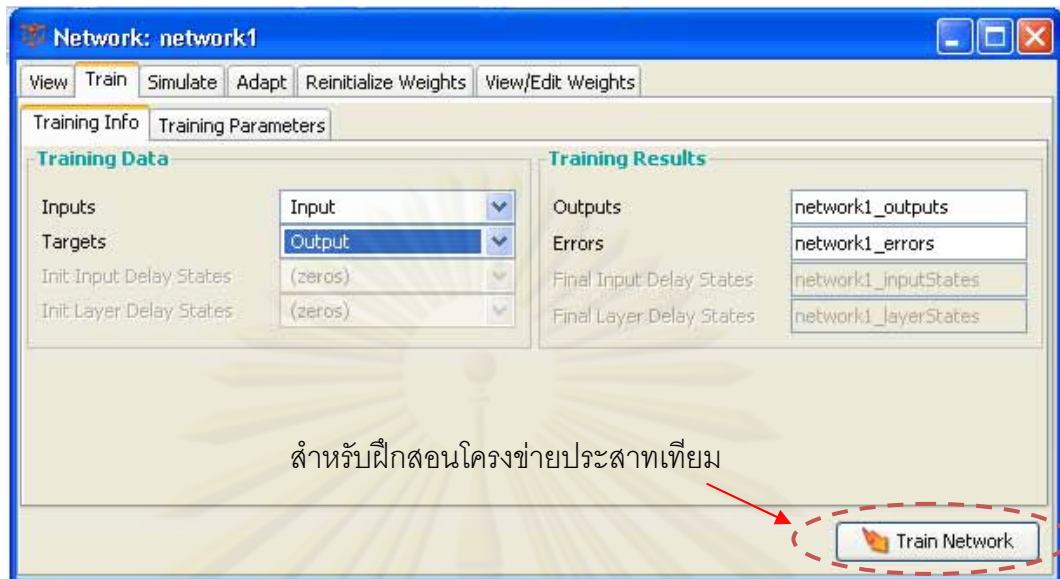
รูป ข : ภาพแสดงหน้าเริ่มต้นของการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม



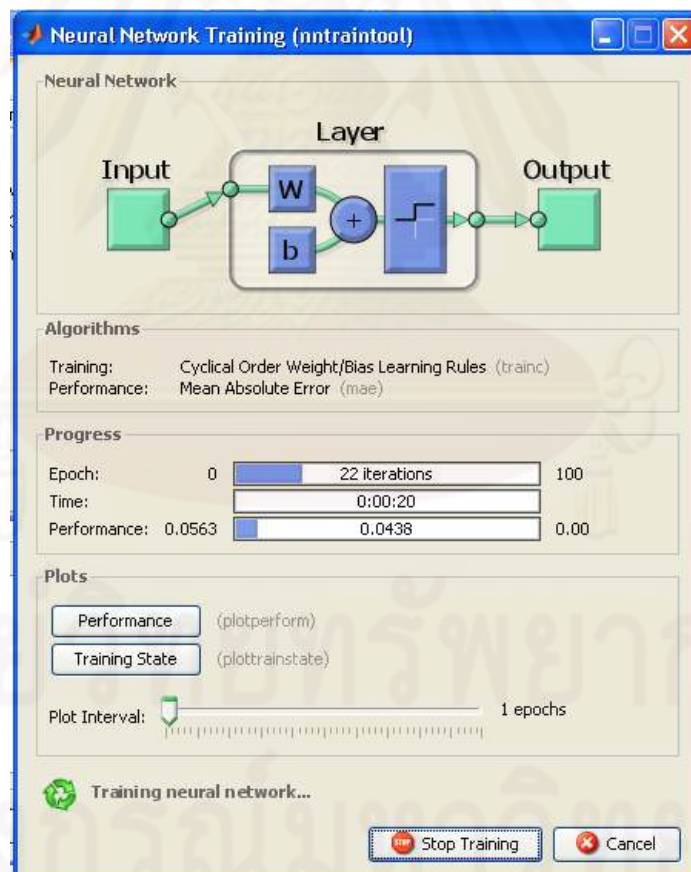
รูป ซ : ภาพแสดงการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน



รูป ฉ : ภาพแสดงการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน



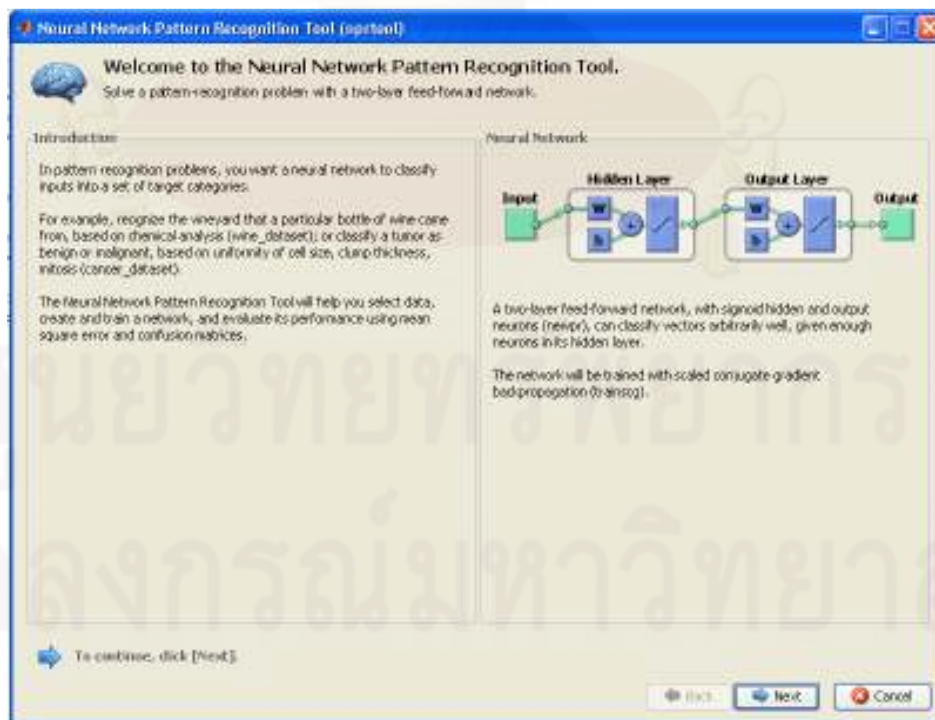
รูป ฎ : ภาพแสดงการตั้งค่าข้อมูลสำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม



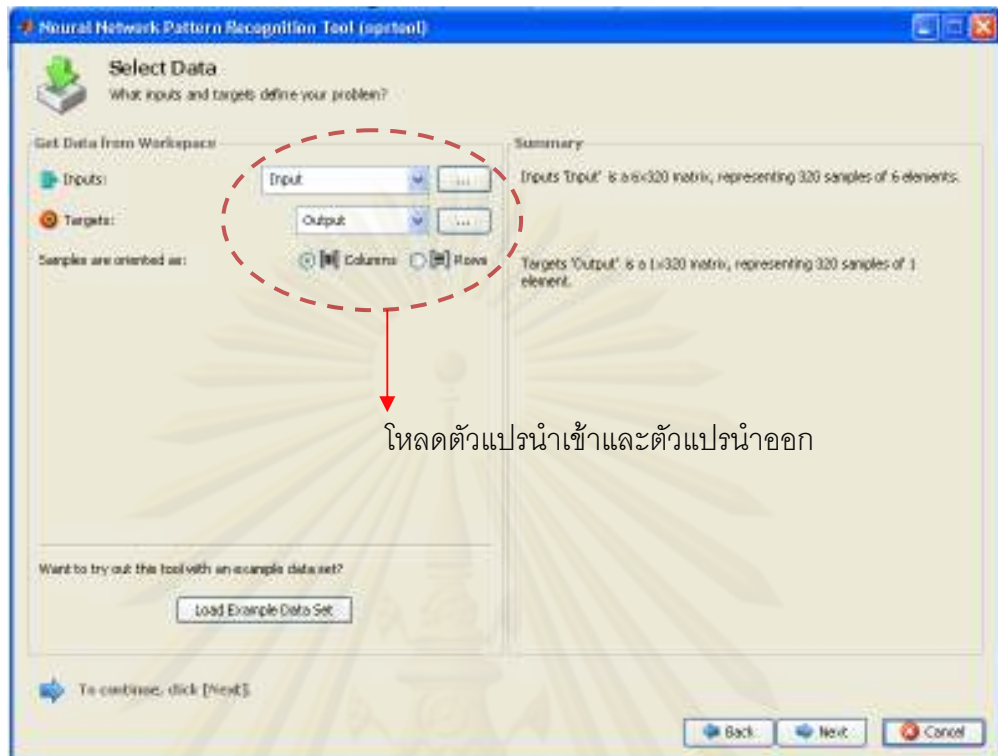
รูป ฎ : ภาพแสดงการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอน

ขั้นตอนการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะและการตรวจจับแฮตเตอร์ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

- 1.) เปิดการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้คำสั่ง nprtool (รูป ฎ)
- 2.) โหลดไฟล์ของตัวแปรนำเข้า(Input) ที่ประกอบไปด้วย ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ หรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจจับแฮตเตอร์ และตัวแปรนำออก(Output) ซึ่งก็คือ รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้น ดังรูป ฐ
- 3.) กำหนดจำนวนเปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูลที่จะถูกนำมาใช้ในฝึกสอน (training), การตรวจสอบความถูกต้อง(validation) และการทดสอบ(Test) ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมด 320 ข้อมูลของการจำแนกรูปแบบของเศษโลหะ และ 333 ข้อมูลของการตรวจจับการเกิดแฮตเตอร์จะถูกแบ่งเป็น 60% สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม, 20% สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโครงข่ายประสาทเทียม และ 20% สำหรับการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม ดังรูป ฅ
- 4.) กำหนดจำนวนชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งในที่นี้จะถูกกำหนดเป็น 20 ชั้นซ่อนโดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุทเป็นแบบล็อกซิกมอยด์ ดังรูป ฉ
- 5.) กดปุ่ม Train ในรูป ณ เพื่อทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Scaled Conjugate gradient backpropagation(trainscg) ในรูป ด

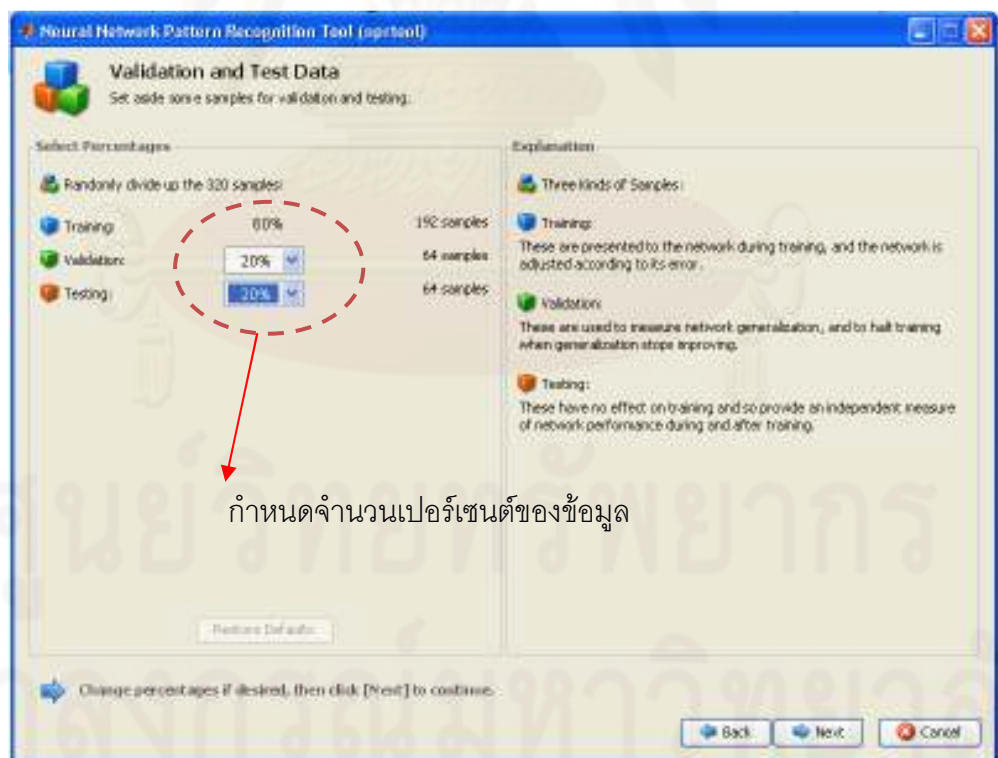


รูป ฎ : ภาพแสดงการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ



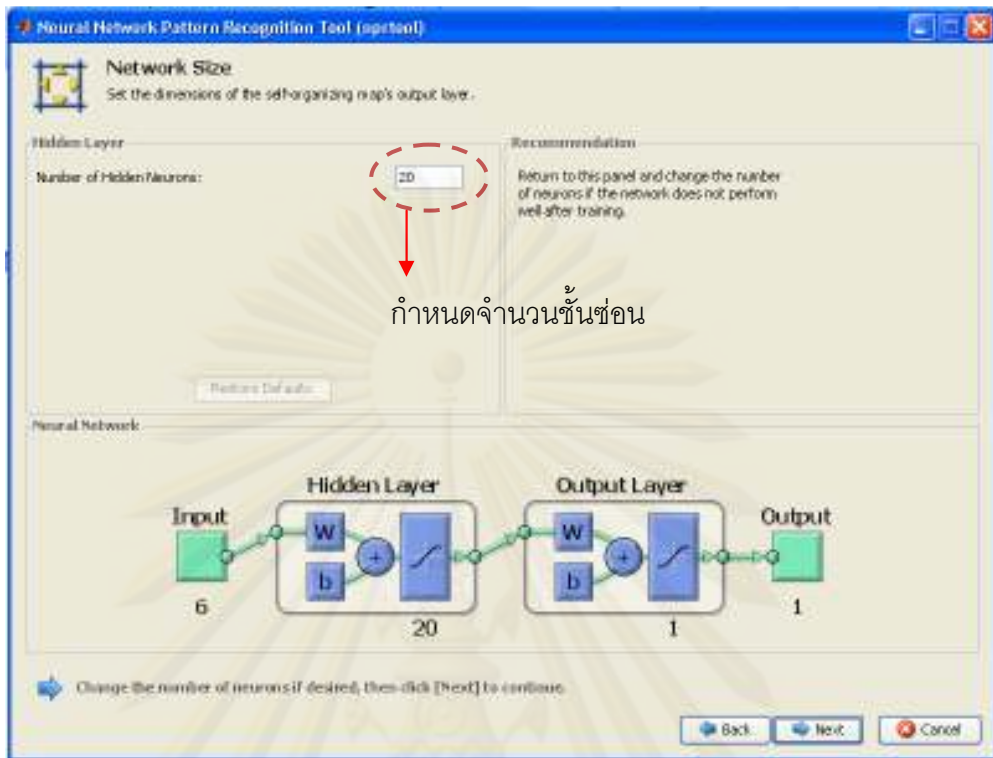
โหลดตัวแปรนำเข้าและตัวแปรนำออก

รูป ๖ : ภาพแสดงการการโหลดไฟล์ของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรนำออก

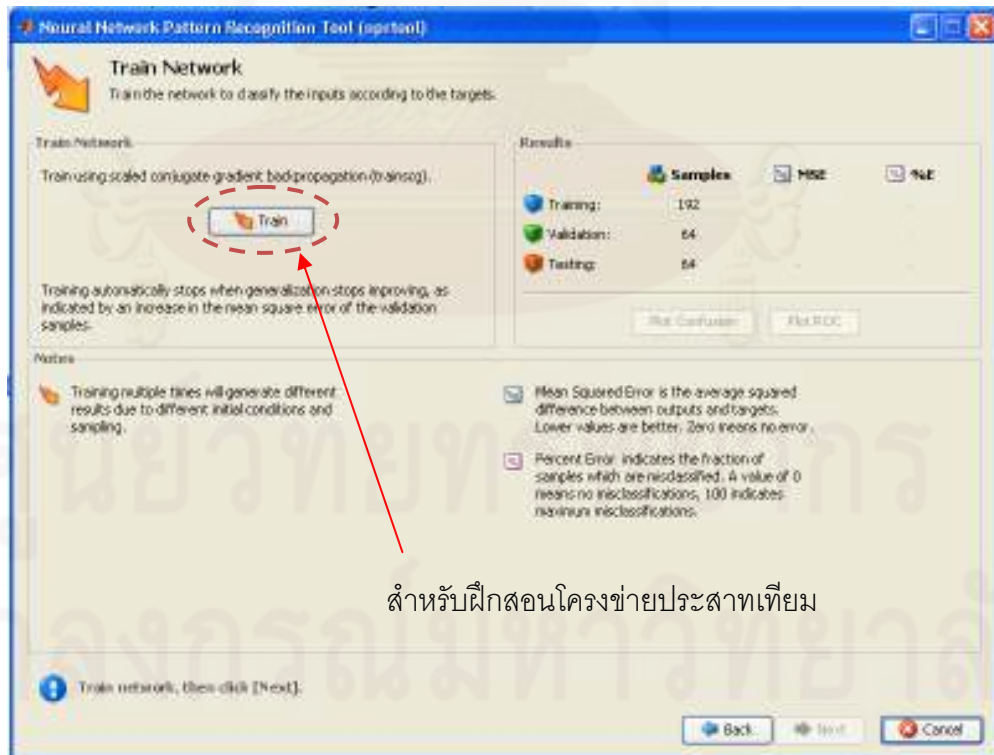


กำหนดจำนวนเปอร์เซ็นต์ของข้อมูล

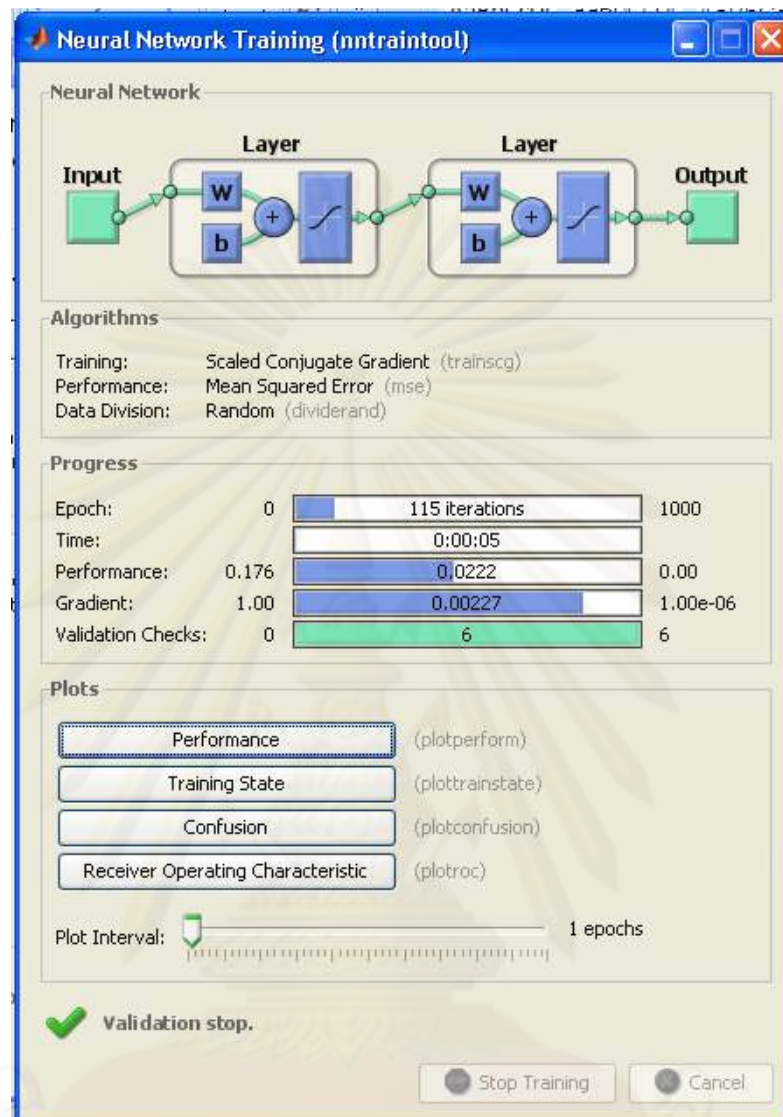
รูป ๗ : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนของข้อมูลสำหรับการเรียนรู้, การยืนยันความถูกต้องและการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ



รูป ค : ภาพแสดงการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ



รูป ค : ภาพแสดงการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

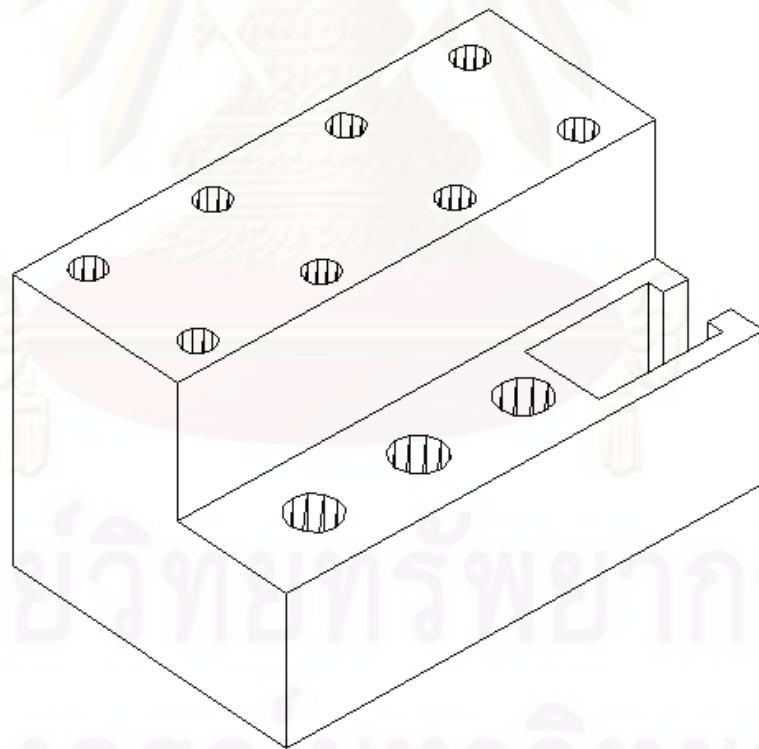
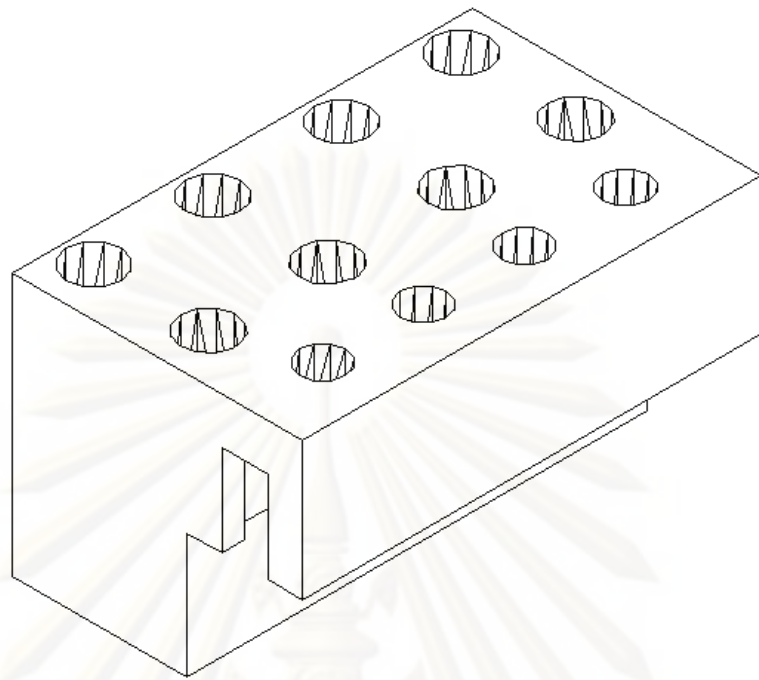


รูป ด : ภาพแสดงการฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

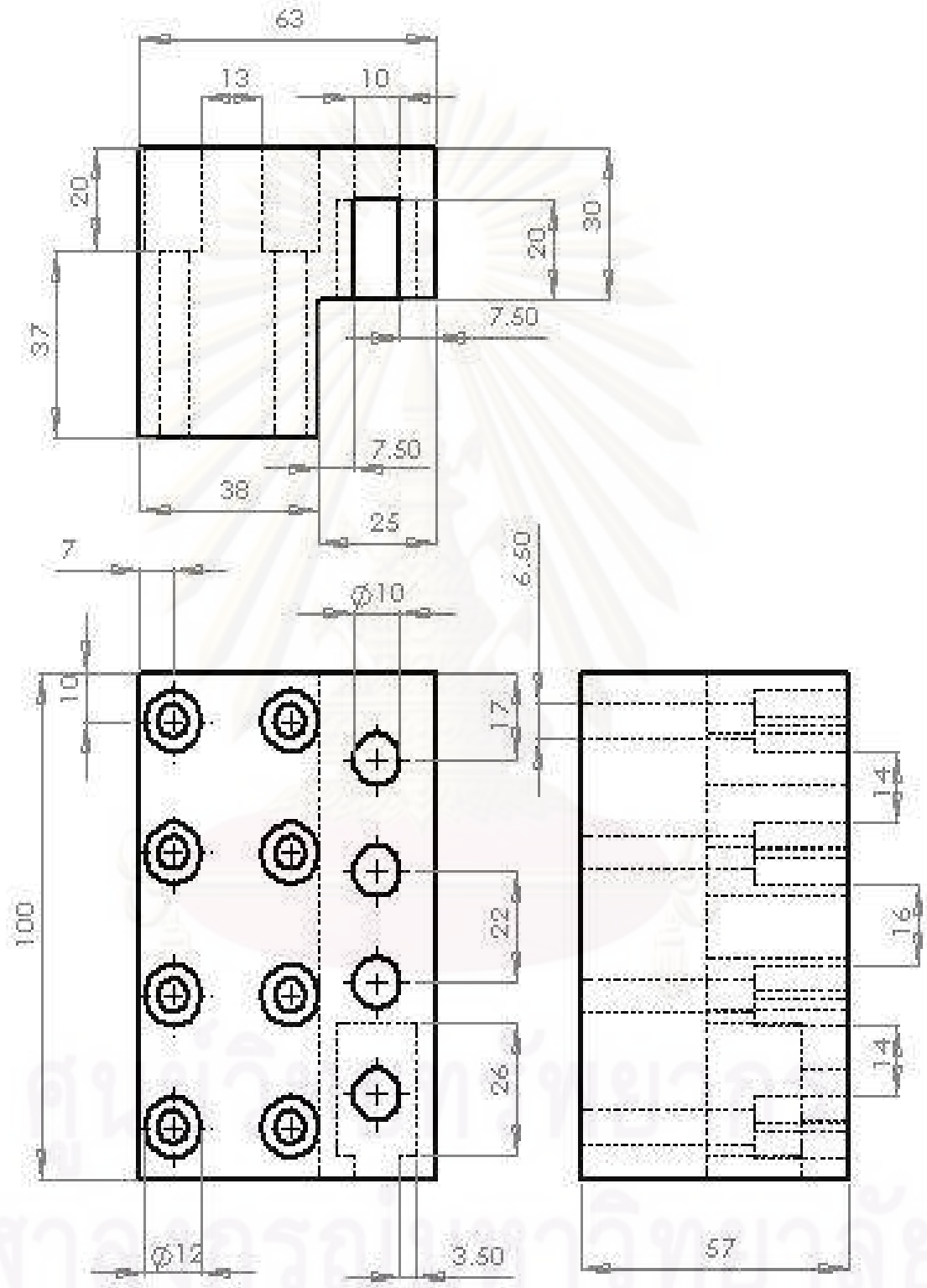


ภาคผนวก จ
อุปกรณ์จับยึดด้ามมีดตัดและเซนเซอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ต : ภาพแสดงอุปกรณ์จับยึดด้ามมีดตัดและเซนเซอร์



รูป ๓ : ภาพแสดง Drawing ของอุปกรณ์จับยึดด้ามมีดตัดและเซนเซอร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยวัฒน์ ภูษณพากร เกิดวันที่ 20 พฤศจิกายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2549 ต่อมาได้ทำงานที่บริษัท อาซาฮี อินเทค (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่ง Asst. Supervisor จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย