

การพยากรณ์ความตรงในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีสำหรับชิ้นงานเหล็กและอะลูมิเนียมโดยการ
ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Straightness Prediction in CNC Turning Process for Steel and
Aluminum Workpieces Applying Artificial Neural Network



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

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพยากรณ์ความตรงในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีสำหรับ ชิ้นงานเหล็กและอะลูมิเนียมโดยการประยุกต์ใช้โครงข่าย ประสาทเทียม
โดย	น.ส.วริศรา หลายวัฒนไพศาล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จรัสวัฒน์ เงามะเสถียรวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

วริศรา หลายวัฒนไพศาล : การพยากรณ์ความตรงในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีสำหรับชิ้นงานเหล็กและอะลูมิเนียมโดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม. (Straightness Prediction in CNC Turning Process for Steel and Aluminum Workpieces Applying Artificial Neural Network) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตผลิตเจริญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีใหม่ ๆ ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อปรับปรุงและรองรับการผลิตขั้นสูง เนื่องจากการแข่งขันที่ดุเดือดระหว่างอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะและระบบการผลิตแบบอัจฉริยะจึงถูกคาดหวังว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้ เครื่องกลึงซีเอ็นซีถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูงที่หลากหลาย ความตรงเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในกระบวนการกลึง เนื่องจากส่งผลกระทบต่อ การประกอบชิ้นงาน อย่างไรก็ตามการควบคุมและการตรวจติดตามความตรงขณะกลึงชิ้นงานทำได้ยาก นอกจากนี้ เครื่องกลึงซีเอ็นซียังไม่สามารถปรับตั้งค่าได้แบบทันทีทันใดขณะกลึงชิ้นงานโดยไม่หยุดเครื่องจักร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมเพื่อที่จะปรับปรุงกระบวนการควบคุมและตรวจติดตามความตรงโดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสองชั้นแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า ซึ่งถูกสอนด้วยอัลกอริทึมแบบแพร่ย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ด อัตราส่วนแรงตัดถูกนำมาใช้ในการคำนวณความตรงภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ การแปลงเวฟเลทแบบคอบเบซีส์ถูกใช้ในการแยกแรงตัดที่พลวัตออกเป็น 10 ระดับ เพื่อที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ปัจจัยในการตัดที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมมิตัด และมุมคายเศษโลหะ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงแบบอื่น ๆ คือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียม และวิธีการวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบพหุคูณ จากผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมที่ถูกเสนอนั้นมีความแม่นยำที่ 76.27% สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม มีความแม่นยำที่ 82.57% สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และมีความแม่นยำที่ 69.97% สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม ในขณะที่วิธีการวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบพหุคูณมีความแม่นยำที่ 74.23% แม้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมจะมีความแม่นยำที่มากกว่าที่ 86.53% และ 70.70% ตามลำดับ แต่ผลการพยากรณ์ความตรงของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสามแบบจำลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบใน Paired t-Test

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170264621 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Straightness, Cutting Force Ratio, Wavelet Transform, Artificial Neural Networks

Warisara Laiwatthanapaisan : Straightness Prediction in CNC Turning Process for Steel and Aluminum Workpieces Applying Artificial Neural Network. Advisor: Prof. Somkiat Tangjitsitcharoen, Ph.D.

Nowadays, new technologies are continuously being developed to improve and serve advanced manufacturing due to the serious competition between manufacturing industries. Thus, an intelligent machine and manufacturing system is expected to play a critical role in the near future. CNC turning machine is widely utilized in various advanced manufacturing industries. In CNC turning process, straightness is a significant parameter, which directly affects the workpiece assembly. However, straightness is difficult to be controlled and monitored during in-process turning. What's more, CNC turning machine cannot be adjusted in real-time without stopping the operation. Hence, this research aims to develop the straightness prediction model in the CNC turning process for carbon steel and aluminum workpieces in order to improve in-process monitoring and control of straightness by employing the two-layer feed forward artificial neural network (ANN), which is trained with the Levenberg-Marquardt back-propagation algorithm. The cutting forces ratio has been adopted to estimate straightness under various cutting conditions. The Daubechies wavelet transform is utilized to decompose the dynamic cutting forces into 10 levels to remove the noise signals for the precise prediction. The concerned cutting factors are cutting speed, feed rate, depth of cut, nose radius, and rake angle. The developed straightness prediction ANN for carbon steel and aluminum are compared with the other straightness prediction models, which are ANN for carbon steel, ANN for aluminum, and the multiple regression analysis methods. As a result, the proposed straightness prediction ANN for carbon steel and aluminum could predict well with the accuracy of 76.27% for carbon steel and aluminum, 82.57% for carbon steel only, and 69.97% for aluminum only while the prediction accuracy of the multiple regression analysis methods for carbon steel and aluminum is 74.23%. Even though the ANN for carbon steel only and ANN for aluminum only have higher accuracy than ANN for carbon steel and aluminum, which are 86.53% and 70.70% respectively, the predicted straightness values of three ANNs do not differ significantly when tested in Paired t-Test.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ ตรวจสอบ ชี้แนะแนวทางแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ระหว่างการดำเนินการวิจัย จนเป็นผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เรียบร้อยสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนมอบความรู้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ รวมถึงคุณครูชำนาญการประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้ความช่วยเหลือในการสอนใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในระหว่างการดำเนินการวิจัย และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินเรื่องเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา พี่ชายและน้องชายครอบครัวหลายวัฒนไพศาล ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมถึงรุ่นพี่รุ่นน้องในแล็บที่คอยช่วยเหลือเกื้อกูลให้คำแนะนำตลอดมาส่งผลให้การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วริศรา หลายวัฒนไพศาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 กรอบแนวคิดงานวิจัย	13
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย	21
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	22
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	22
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	23
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	77
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	84
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	84
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	94
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	98

3.4 การพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	101
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	101
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	104
4.1 ผลการทดลอง.....	104
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่.....	112
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราส่วนแรงตัด.....	118
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและเงื่อนไขการตัด	119
4.5 การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	134
4.6 การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	140
4.7 การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้สมการถดถอยพหุคูณ	148
4.8 การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้สมการถดถอยพหุคูณ	153
4.9 การเปรียบเทียบการพยากรณ์ความตรงระหว่างแบบจำลอง.....	153
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	162
5.1 สรุปผลการวิจัย	162
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	165
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการวิจัย.....	165
5.4 ข้อเสนอแนะ	166
บรรณานุกรม.....	167
ภาคผนวก.....	172
ภาคผนวก ก โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วสำหรับวิเคราะห์สัญญาณความตรง.....	173
ภาคผนวก ข โปรแกรมการแปลงเวฟเลทสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัต	176
ภาคผนวก ค การใช้งานชุดเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมในโปรแกรม Matlab	199

ประวัติผู้เขียน.....208



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจติดตามคุณภาพของชิ้นงาน	10
ตารางที่ 1.2 แสดงตัวอย่างการเรียนรู้แบบต่าง ๆ และลักษณะการใช้งาน [30]	20
ตารางที่ 1.3 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง	22
ตารางที่ 1.4 แสดงตารางเวลาการดำเนินการวิจัย	24
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะการใช้งานของเหล็ก	25
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการระบุชื่อของเหล็กอื่น ๆ [32]	26
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะการใช้งานของอะลูมิเนียม	29
ตารางที่ 2.4 ประเภท รหัส และคุณสมบัติของอะลูมิเนียม	30
ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างลักษณะสัญญาณเวฟเลทแฟมิลี่ต่าง ๆ และลักษณะการใช้งาน [38]	55
ตารางที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ	60
ตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการเรียนรู้แบบต่าง ๆ และลักษณะการใช้งาน	68
ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่นำเสนออัตราการเรียนรู้ต่าง ๆ	70
ตารางที่ 2.9 งานวิจัยที่นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ต่าง ๆ	71
ตารางที่ 2.10 ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ [28]	73
ตารางที่ 2.11 ศัพท์ทั่วไปที่คล้ายคลึงกันของวิธีทางสถิติและโครงข่ายประสาทเทียม [23]	74
ตารางที่ 2.12 ข้อดีและข้อเสียของโครงข่ายประสาทเทียม [23, 28]	75
ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยในการทดลอง.....	84
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C).....	86
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองของชิ้นงานอะลูมิเนียม (Al 6063)	90
ตารางที่ 3.4 รหัสแม่พิมพ์	94
ตารางที่ 3.5 รหัสด้ามมีดกลึง	95

ตารางที่ 4.1	ปัจจัยในการทดลอง	104
ตารางที่ 4.2	ผลลัพธ์ที่ต้องการ	104
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)	105
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองของชิ้นงานอะลูมิเนียม (Al 6063)	109
ตารางที่ 4.5	ระดับการปรับค่าเปอร์เซ็นต์ของข้อมูล	135
ตารางที่ 4.6	ผลการทดลองปรับค่าเปอร์เซ็นต์ของข้อมูล	135
ตารางที่ 4.7	เงื่อนไขสัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ที่ให้ค่า R-value ที่สูงที่สุดของแต่ละแบบจำลอง	137
ตารางที่ 4.8	เงื่อนไขการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลองเดิม	140
ตารางที่ 4.9	ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลองเดิม	140
ตารางที่ 4.10	ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลองเดิม	142
ตารางที่ 4.11	เงื่อนไขการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลองเดิม	144
ตารางที่ 4.12	ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนนอกขอบเขตการทดลองเดิม	144
ตารางที่ 4.13	ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลองเดิม	145
ตารางที่ 4.14	สรุปการคำนวณค่า MAPE ของแต่ละแบบจำลอง	148
ตารางที่ 4.15	ตารางสรุปการคำนวณ MAPE ของสมการถดถอยพหุคูณสำหรับการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม	153
ตารางที่ 4.16	สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง	161
ตารางที่ 5.1	สรุปค่า R-value ของแต่ละแบบจำลอง	163
ตารางที่ 5.2	สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง	163

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 วิวัฒนาการอุตสาหกรรมไทย [2].....	1
รูปที่ 1.2 แนวโน้มความต้องการใช้เหล็กของโลกปี 2560 [5]	6
รูปที่ 1.3 แนวโน้มความต้องการใช้อะลูมิเนียมของโลกปี 2560 [7]	7
รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึงชิ้นงาน	14
รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงาน	15
รูปที่ 1.6 ตัวอย่างรูปสัญญาณเวฟเลทแฟมิลีต่าง ๆ [26, 27].....	17
รูปที่ 1.7 การแยกย่อยสัญญาณแรงตัดออกเป็น 10 ระดับ	18
รูปที่ 1.8 รูปแสดงอัลกอริทึมของโครงข่ายประสาทเทียมสองชั้นแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า โดยใช้ วิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (The Two-Layer Feed Forward Neural Networks With Back Propagation Algorithm).....	21
รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุ [31]	33
รูปที่ 2.2 กระบวนการตัดเฉือน: (a) การกลึง (b) การเจาะ (c) การกัดแนวนอน (d) การกัดปาดหน้า [31].....	34
รูปที่ 2.3 กระบวนการกลึง: (a) การกลึงปาดหน้า (b) การกลึงเรียว (c) การกลึงตามเส้นขอบ.....	36
รูปที่ 2.4 รูปร่างของมีดตัดคมเดียว [34].....	40
รูปที่ 2.5 การจำลองกลไกกระบวนการตัดรูป 2 มิติ [31]	45
รูปที่ 2.6 ประเภทของเศษโลหะ: (a) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (b) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง	48
รูปที่ 2.7 แรงตัดในกระบวนการกลึง [35]	49
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงาน	50
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง: (a) เวฟเลทแม่ (b) เวฟเลทที่หดเข้าที่ค่าสเกล , $a = 0.5$ (c) เวฟเลทที่ขยายออกที่ค่าสเกล, $a = 2$ (d) เวฟเลทที่ขยายออกที่ค่าสเกล, $a = 1$ และ เลื่อนตำแหน่ง, $b = 4$ [36].....	52

รูปที่ 2.10 กระบวนการแยกสัญญาณเวฟเลท 10 ระดับ.....	54
รูปที่ 2.11 สมาชิกของเวฟเลทคอบเซียส์ [39]	57
รูปที่ 2.12 ความตรงแบบ Endpoints [40]	57
รูปที่ 2.13 ความตรงแบบ Linear Regression [40].....	58
รูปที่ 2.14 วิธีการ Least Square [40]	58
รูปที่ 2.15 ความตรงแบบ ISO 1101 [40].....	58
รูปที่ 2.16 วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ [3].....	60
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม (a) การจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition)	62
รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์และโหนดในโครงข่ายประสาท เทียม [42].....	63
รูปที่ 2.19 ประเภทการเชื่อมต่อกันของโครงข่ายประสาทเทียม [30]	65
รูปที่ 2.20 ฟังก์ชันการแปลง [43]	71
รูปที่ 2.21 ฟังก์ชันการแปลงประเภทต่าง ๆ [44]	72
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงาน.....	94
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเม็ดมีดมุกคายเศษโลหะ -6: (ซ้าย) รัศมีจมูกมีด 0.4 (ขวา) รัศมีจมูกมีด 0.8.....	95
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างด้ามมีด: (บน) มุกคายเศษโลหะ +11 (ล่าง) มุกคายเศษโลหะ -6.....	95
รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซีชนิด 4 แกน	96
รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์ที่ติดตั้งบนป้อมมีด	96
รูปที่ 3.6 ออสซิลโลสโคป	97
รูปที่ 3.7 เครื่องขยายสัญญาณ	97
รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว.....	98
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	100
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการแปลงสัญญาณความตรงด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (a) ในโดเมนความถี่ (b) ในโดเมนความเวลา	114

รูปที่ 4.2 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตของแกน x	115
รูปที่ 4.3 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตของแกน x.....	115
รูปที่ 4.4 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตของแกน y	116
รูปที่ 4.5 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตของแกน y.....	116
รูปที่ 4.6 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตของแกน z	117
รูปที่ 4.7 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตของแกน z.....	117
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอัตราส่วนแรงตัด	118
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมและอัตราส่วนแรงตัด	118
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1)	119
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2)	120
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3)	120
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4)	121
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้า คาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1).....	122
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้า คาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2).....	122
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้า คาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3).....	123
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้า คาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4).....	124

รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1)	125
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2)	125
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3)	126
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4)	127
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมุมิตตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1).....	128
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมุมิตตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2).....	128
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมุมิตตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3).....	129
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมุมิตตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4).....	130
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1).....	131
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2).....	131
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3).....	132
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4).....	133
รูปที่ 4.35 แบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้า (Two-layer Feed Forward Neural Network).....	134
รูปที่ 4.36 ค่า R-value ของแบบจำลองสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม.....	138

รูปที่ 4.37 ค่า R-value ของแบบจำลองสำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม	139
รูปที่ 4.38 ค่า R-value ของแบบจำลองสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน	139
รูปที่ 4.39 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลอง	143
รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง	143
รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนนอกขอบเขตการทดลอง	147
รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง	147
รูปที่ 4.30 กราฟ Normal Probability Plot ของข้อมูลความตรง (St) ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม	149
รูปที่ 4.31 กราฟ Residual Versus Order ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน	150
รูปที่ 4.32 กราฟ Residual Versus Order ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียม	150
รูปที่ 4.33 กราฟ Residual Versus Fit ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน	151
รูปที่ 4.34 กราฟ Residual Versus Fit ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียม	151
รูปที่ 4.51 ผลการสร้างสมการถดถอยพหุคูณด้วยโปรแกรม Minitab	152
รูปที่ 4.43 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลอง	155
รูปที่ 4.44 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลอง	155
รูปที่ 4.45 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนนอกขอบเขตการทดลอง	156

รูปที่ 4.46 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ พยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนนอก ขอบเขตการทดลอง.....	156
รูปที่ 4.47 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้า คาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง....	157
รูปที่ 4.48 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ พยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมภายใต้ ขอบเขตการทดลอง.....	157
รูปที่ 4.49 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้า คาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง	158
รูปที่ 4.50 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ พยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมนอกขอบเขต การทดลอง.....	158
รูปที่ 4.52 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณสำหรับ พยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง.....	159
รูปที่ 4.53 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการ ถดถอยพหุคูณสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง.....	160
รูปที่ 4.54 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณสำหรับ พยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง.....	160
รูปที่ 4.55 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการ ถดถอยพหุคูณสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง	161

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

1.1.1 อุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทย

เศรษฐกิจของประเทศไทยถูกขับเคลื่อนด้วยภาคอุตสาหกรรมเป็นหลักโดยเฉพาะการผลิตเพื่อการส่งออก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เทคโนโลยีระดับกลางถึงระดับสูง และเพื่อปฏิรูปเศรษฐกิจไทยใหม่ในปัจจุบันภาครัฐจึงมีการออกนโยบายไทยแลนด์ 4.0 เพื่อปรับเปลี่ยนแนวทางพัฒนาเศรษฐกิจเดิมไปสู่เศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วยสินค้าและบริการที่มีนวัตกรรม จากนโยบายภาครัฐดังกล่าวกระทรวงอุตสาหกรรมจึงมีการดำเนินการออกนโยบายอุตสาหกรรม 4.0 เพื่อให้สอดคล้องกับวิสัยทัศน์ของภาครัฐ และยกระดับอุตสาหกรรมไทยให้เป็นอุตสาหกรรมแห่งอนาคต เพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน รวมถึงช่วยส่งเสริมให้เศรษฐกิจไทยมีการขยายตัวมากยิ่งขึ้น

อุตสาหกรรม 4.0 เป็นนโยบายที่ต้องการปรับเปลี่ยนโครงสร้างอุตสาหกรรมของประเทศจากอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานและเทคโนโลยีอย่างง่าย ซึ่งมีการผลิตสินค้าและบริการที่ไม่มีความซับซ้อน และมีมูลค่าเพิ่มต่ำไปสู่อุตสาหกรรมที่ใช้องค์ความรู้และเทคโนโลยีขั้นสูง ข้อมูลสารสนเทศ ความคิดสร้างสรรค์และการพัฒนา รวมทั้งการสร้างนวัตกรรมในการเพิ่มสมรรถนะของภาคอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อผลิตสินค้าและบริการที่ซับซ้อนและมีมูลค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น [1]



รูปที่ 1.1 วิวัฒนาการอุตสาหกรรมไทย [2]

จากรูปที่ 1.1 ในยุค 1.0 เศรษฐกิจไทยถูกขับเคลื่อนด้วยภาคเกษตรกรรม การปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 1 หรืออุตสาหกรรม 1.0 เป็นการปรับเปลี่ยนจากการผลิตในครัวเรือนมาเป็นการดำเนินการโดยพ่อค้า-นายทุน ซึ่งระบบไม่มีความซับซ้อน กระบวนการผลิตใช้แรงงานคนและสัตว์ และทรัพยากรธรรมชาติ ภายหลังจึงมีการใช้เครื่องจักรไอน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ในยุค 2.0 เศรษฐกิจไทยถูกขับเคลื่อนด้วยภาคอุตสาหกรรมเบา การปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 2 หรืออุตสาหกรรม 2.0 มีการนำระบบสายพานมาใช้ในการเพิ่มกำลังการผลิต ตัวอย่างเช่นในอุตสาหกรรมยานยนต์ การใช้พลังงานไฟฟ้าแทนพลังงานไอน้ำ ส่งผลให้เกิดการผลิตปริมาณมาก (Mass production) ในยุค 3.0 เศรษฐกิจไทยถูกขับเคลื่อนด้วยภาคอุตสาหกรรมหนักและการส่งออก การปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 3 หรืออุตสาหกรรม 3.0 เป็นยุคที่เริ่มประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในกระบวนการผลิต พัฒนาสายการผลิตให้เป็นระบบอัตโนมัติ มีการนำหุ่นยนต์เข้ามาช่วยสนับสนุนการผลิต ทำให้สามารถผลิตสินค้าที่มีความซับซ้อนมากขึ้น แต่ระบบคอมพิวเตอร์ยังขาดการเชื่อมโยงระหว่างกัน ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 หรืออุตสาหกรรม 4.0 จึงถูกคาดหวังว่าจะเป็นแรงขับเคลื่อนเศรษฐกิจตัวใหม่ เนื่องจากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต การเชื่อมโยงสื่อสารเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและกว้างขวาง เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับภาคอุตสาหกรรม เกิดการเชื่อมต่อระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักร เครื่องจักรกับเครื่องจักร ทำให้สามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างรวดเร็วและตอบสนองเฉพาะรายได้มากขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลงได้ [2]

1.1.2 การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและเซนเซอร์

เทคโนโลยีการผลิตมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากในอดีตจนถึงปัจจุบันเริ่มจากเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) และจากเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลขที่บูรณาเข้ากับเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์พัฒนาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct Numerical Control, DNC) ซึ่งเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลขหลาย ๆ เครื่องถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์กลาง เป็นการบูรณาการการไหลของข้อมูลสารสนเทศสำหรับเครื่องจักรกลในระบบการผลิต ต่อมามีการพัฒนาการควบคุมบูรณาการของการไหลของข้อมูลสารสนเทศและการไหลของวัสดุในระบบการผลิตเกิดเป็นระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System, FMS) โดยภายในระบบการผลิต ชิ้นงานและเครื่องมือต่าง ๆ จะถูกขนส่งระหว่างคลังสินค้ากับเครื่องจักรโดยอัตโนมัติด้วยรถเอจีวี (Automated Guide Vehicles, AGVs) และถูกขนถ่ายด้วยหุ่นยนต์การผลิตอื่น ๆ ต่อไป ในอดีตระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นเชื่อว่าสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงความต้องการของ

อุตสาหกรรมได้ แต่ระบบดังกล่าวสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงได้ในเวลาที่จำกัด ต้องใช้การลงทุนติดตั้งที่สูงและไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้ตามลักษณะความต้องการของอุตสาหกรรมแต่ละประเภทที่แตกต่างกันมาก ๆ ในด้านขนาดการผลิตและชนิดสินค้าได้ ระบบการผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell, FMC) จึงถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ระบบการผลิตแบบเซลล์มีขนาดเล็กและประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่จำเป็นต่อระบบการผลิต มีต้นทุนที่ต่ำ ง่ายต่อการดำเนินการผลิตและสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการของลูกค้าที่แตกต่างกันได้ ในยุคต่อมาคอมพิวเตอร์บูรณาการการผลิต (Computer Integrated Manufacturing, CIM) เป็นอีกระบบที่นำเอาความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสารสนเทศของอุตสาหกรรมเข้ามาควบคุมกิจกรรมการผลิตและกิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การตลาด การจัดการ การควบคุมการผลิตและบริการ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวไม่สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นในการผลิตและกำลังการผลิตได้ ระบบการผลิตแบบแจกจ่ายงานได้ด้วยตนเอง (Autonomous Distributed Manufacturing Systems) จึงกลายเป็นระบบที่จะเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในอนาคต ความสามารถในการรองรับการผลิตสินค้าใหม่ ๆ ที่มีความหลากหลาย อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของลูกค้า การตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว การตอบสนองความต้องการเฉพาะราย การผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง และการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและสังคมเพื่อการผลิตที่ยั่งยืน จึงเป็นระบบการผลิตในอนาคตที่คาดการณ์ว่าจะเป็นคำตอบ ซึ่งระบบนั้นคือระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) ที่สามารถทำงานอัตโนมัติและสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ อย่างอัจฉริยะ ควบคุมและตรวจสอบตัวเองได้ [3] สอดคล้องกับการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 หรืออุตสาหกรรม 4.0 ของประเทศไทยในปัจจุบันที่ต้องการให้อุตสาหกรรมของไทยมุ่งสู่การเป็นอุตสาหกรรมแห่งอนาคต

เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ ทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ลดเวลาที่ไม่ได้ผลิตลง (Non-productive Time) การควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ในกระบวนการผลิต (Adaptive Control, AC) เป็นจุดเด่นที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีรวมทั้งการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ร่วมกับระบบซีเอ็นซีเพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรกล เช่น สถานะการตัด สถานะการกลึง เป็นต้น ซึ่งใช้ในการป้อนกลับและปรับค่าการทำงานเพื่อให้ได้เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม เซนเซอร์จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อช่วยตรวจติดตามในกระบวนการผลิต ใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพในการผลิต

หลีกเลี่ยงการทำงานที่ผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้ บทบาทหลัก ๆ ของเซนเซอร์จึงประกอบไปด้วย

- 1) การตรวจจับการทำงานที่ผิดปกติในกระบวนการผลิตได้
- 2) การเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตและควบคุมกระบวนการผลิตให้ทำงานอย่างเหมาะสม
- 3) การเก็บข้อมูลนำเข้า (Input Data) และข้อมูลส่งออก (Output Data) ของกระบวนการผลิตต่าง ๆ เพื่อสร้างฐานข้อมูลสำหรับใช้อ้างอิงในการปรับตั้งค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่สนใจ

ชนิดเซนเซอร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการตัดมีมากมาย เช่น เซนเซอร์วัดแรง เซนเซอร์วัดกำลัง และเซนเซอร์อะคูสติคอีมีชัน เป็นต้น การออกแบบเซนเซอร์ขั้นสูงเพื่อทำงานร่วมกับเทคโนโลยีการผลิตจึงจำเป็นต้องพิจารณาการเลือกใช้ชนิดของเซนเซอร์ที่เหมาะสมในการป้อนกลับข้อมูลสารสนเทศและสถานะของการผลิตที่ต้องการเพื่อให้เกิดการปรับปรุงการทำงานที่เหมาะสมและควบคุมได้

1.1.3 อุตสาหกรรมเหล็กและอะลูมิเนียม

อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่อยู่ในกลุ่ม 10 อุตสาหกรรมเป้าหมาย (New S-Curve) ที่เป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งภาครัฐสนับสนุนและส่งเสริมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน [4] การส่งเสริมอุตสาหกรรมข้างต้นส่งผลให้แนวโน้มการใช้เหล็กและอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญในการผลิตอุตสาหกรรมต่อเนื่อง

เหล็กเป็นโลหะพื้นฐานที่จำเป็นในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น

โครงสร้างของอุตสาหกรรมเหล็กตามสายการผลิตประกอบไปด้วย 3 กลุ่ม คือ

- 1) อุตสาหกรรมเหล็กต้นน้ำ (Upstream) เป็นการผลิตเหล็กขั้นต้นด้วยการนำสินแร่เหล็ก (Iron ore) มาเข้าสู่กระบวนการถลุงเพื่อแปรสภาพเหล็กให้มีความบริสุทธิ์ ได้ผลลัพธ์เป็นเหล็กดิบสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมกลางน้ำและอุตสาหกรรมปลายน้ำต่อไป เหล็กดิบแบ่งออกเป็น 2

ประเภท คือ เหล็กถลุงและเหล็กพูน เนื่องจากประเทศไทยไม่มีการผลิตเหล็กต้นน้ำทำให้ต้องนำเข้าเหล็กดิบจากต่างประเทศ

2) อุตสาหกรรมเหล็กกลางน้ำ (Midstream) เป็นขั้นตอนการหลอมเหล็กดิบที่อุณหภูมิสูงและผสมกับสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติตามที่ต้องการ ได้ผลลัพธ์เป็นเหล็กกล้า (Steel) หรือเรียกว่าเหล็กชั้นกลางหรือเหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-finished Steel Products) เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom Steel) เหล็กแท่งยาว (Billet) และเหล็กแท่งแบน (Slab)

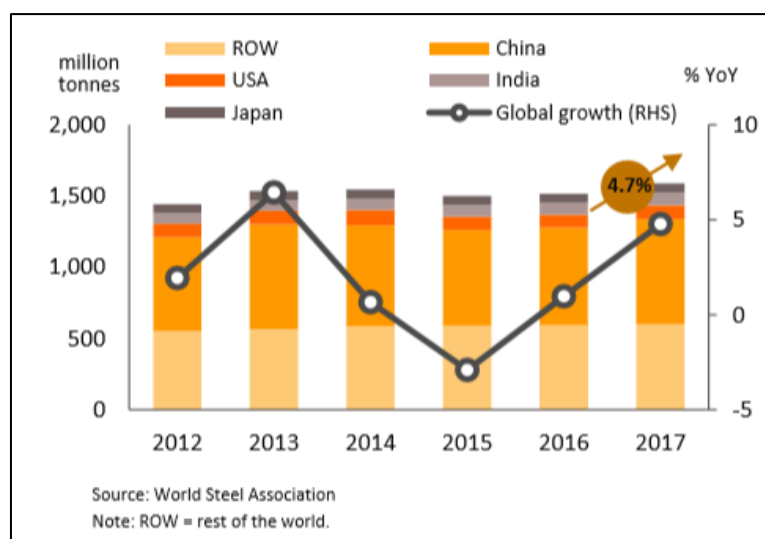
3) อุตสาหกรรมเหล็กปลายน้ำ (Downstream) เป็นขั้นตอนการแปรรูปเหล็กกึ่งสำเร็จรูปให้เป็นเหล็กชั้นปลายหรือเหล็กสำเร็จรูป (Finished Steel Products) ผ่านกระบวนการรีดร้อน รีดเย็น เคลือบผิว ตีเหล็กขึ้นรูป และหล่อเหล็ก ได้ผลลัพธ์เป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กแผ่นรีดเย็น เหล็กแผ่นเคลือบ เหล็กเส้น และเหล็กโครงสร้างรูปพรรณต่าง ๆ

ผลิตภัณฑ์เหล็กในประเทศไทยสามารถจำแนกตามประเภทของเหล็กกึ่งสำเร็จรูปที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) เหล็กทรงยาว (Long Products) ประกอบไปด้วยเหล็กแท่งใหญ่และเหล็กแท่งยาว จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเหล็กเส้นและเหล็กหลอด สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

2) เหล็กทรงแบน (Flat Products) ประกอบไปด้วยเหล็กแท่งแบน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเหล็กแผ่นรีดร้อนและเหล็กแผ่นรีดเย็นที่อยู่ในรูปเหล็กแผ่น (Plates) และเหล็กม้วน (Coils) สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ทิศทางราคาเหล็กโลกมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้น จากรูปที่ 1.2 ความต้องการใช้เหล็กของโลกขยายตัวเพิ่มขึ้นในอัตรา 4.7% เนื่องจากปัจจัยการเติบโตของภาคอสังหาริมทรัพย์ในหลายประเทศโดยเฉพาะประเทศจีนและยุโรปที่ภาครัฐลงทุนโครงสร้างพื้นฐานมากขึ้น รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมการผลิต เช่น ยานยนต์ ที่เติบโตตามภาวะเศรษฐกิจและการลงทุนของภาคเอกชน [5]



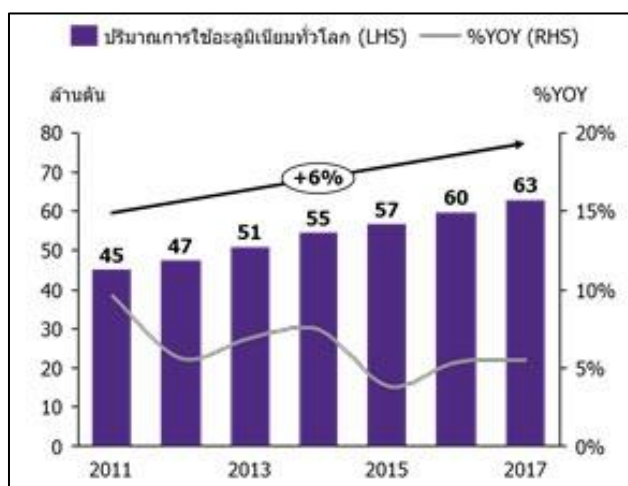
รูปที่ 1.2 แนวโน้มความต้องการใช้เหล็กของโลกปี 2560 [5]

อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในเรื่องน้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทาน ยืดตัวง่าย มีความเหนียว ต้านทานต่อการเกิดสนิมและกัดกร่อน ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ มีค่านำความร้อนสูง และนำไฟฟ้าได้ดี อะลูมิเนียมจึงเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

โครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมตามขั้นตอนการผลิต [6] ประกอบไปด้วย 4 กลุ่ม คือ

- 1) อุตสาหกรรมต้นน้ำ ได้แก่ การทำเหมืองแร่บอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งประเทศไทยไม่มีเหมืองแร่บอกไซต์ ส่งผลให้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ
- 2) อุตสาหกรรมถลุงแร่และหลอมเศษโลหะ เป็นขั้นตอนต่อจากอุตสาหกรรมต้นน้ำ เพื่อผลิตเป็นอะลูมิเนียมที่ยังไม่ขึ้นรูป (Unwrought)
- 3) อุตสาหกรรมกลางน้ำ ได้แก่ การผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เช่น แท่งอะลูมิเนียม (Ingot) อะลูมิเนียมแท่งยาว (Billet) และอะลูมิเนียมแท่งแบน (Slab) เป็นต้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมปลายน้ำต่อไป
- 4) อุตสาหกรรมปลายน้ำ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต่าง ๆ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง

ความต้องการใช้อะลูมิเนียมของโลกมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องปีละ 6% โดยประเทศจีนเป็นแรงขับเคลื่อนที่สำคัญจากรูปที่ 1.3 ส่งผลให้ทิศทางราคาอะลูมิเนียมมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นด้วย [7]



รูปที่ 1.3 แนวโน้มความต้องการใช้อะลูมิเนียมของโลกปี 2560 [7]

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแนวโน้มราคาของเหล็กและอะลูมิเนียมมีทิศทางที่สูงขึ้น ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ต้องใช้เหล็กและอะลูมิเนียมเป็นวัตถุดิบหลักต้องคำนึงถึงต้นทุนวัตถุดิบ ควบคุมการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงและใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่าเพื่อลดความสูญเสียจากของเสียให้มากที่สุด

1.1.4 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมการผลิตเพื่อการส่งออกเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทยที่ภาครัฐให้การสนับสนุนและส่งเสริมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถและศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศ ซึ่งสอดคล้องกับวิสัยทัศน์ของภาครัฐที่ต้องการยกระดับอุตสาหกรรมของประเทศไทยให้เป็นอุตสาหกรรมแห่งอนาคตจากนโยบายไทยแลนด์ 4.0 เพื่อเป็นการปฏิรูปเศรษฐกิจไทยใหม่ นำไปสู่การปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 หรืออุตสาหกรรม 4.0 ซึ่งเป็นการบูรณาการและประยุกต์ใช้องค์ความรู้ เทคโนโลยีขั้นสูง ข้อมูลสารสนเทศ ความคิดสร้างสรรค์และนวัตกรรมต่าง ๆ เพื่อผลิตสินค้าและบริการที่ซับซ้อนและมีมูลค่าสูงได้ภายใต้ต้นทุนการผลิตที่สมเหตุสมผล ทั้งนี้อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารเป็นอุตสาหกรรมในกลุ่ม 10 อุตสาหกรรมเป้าหมาย (New S-curve) ที่ได้รับการส่งเสริมจากภาครัฐ ส่งผลให้ผลวัตถุดิบหลักอย่างเหล็กและอะลูมิเนียมมีแนวโน้มการใช้ที่สูงขึ้น ความต้องการ

เหล็กและอะลูมิเนียมของโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกันจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจในหลาย ๆ ประเทศ เช่น ประเทศจีน ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น จึงส่งผลให้แนวโน้มทิศทางราคาเหล็กและอะลูมิเนียมสูงขึ้น ผู้ประกอบการภาคอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้องจึงต้องคำนึงถึงต้นทุนวัตถุดิบ และมีมาตรการควบคุมการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงเพื่อให้เกิดการใช้วัตถุดิบอย่างเกิดประสิทธิผลมากที่สุด รวมทั้งการพัฒนาวิธีการควบคุมคุณภาพให้เกิดของเสียที่น้อยที่สุด

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่สำคัญในการกำจัดเนื้อวัสดุเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งในปัจจุบันที่เทคโนโลยีถูกพัฒนาไปอย่างทันสมัย เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine) จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตที่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิตที่มีความเที่ยงตรงแม่นยำและความรวดเร็วสูง ในการตรวจวัดคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการกลึงประกอบไปด้วย การวัดความตรง (Straightness) ความกลม (Roundness) ความเรียบผิว (Flatness) และความเป็นทรงกระบอก (Cylindrical) เป็นต้น ซึ่งความตรงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของชิ้นงานโดยเฉพาะชิ้นงานที่ต้องนำไปประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่น ๆ เช่น กระจกลูกสูบ แกนเลื่อนเครื่องจักร และแกนสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดิส เป็นต้น ถ้าหากความตรงคลาดเคลื่อนไปจากค่าในการออกแบบวิศวกรรมที่กำหนดไว้จะส่งผลให้การประกอบชิ้นงานเข้ากับชิ้นส่วนอื่น ๆ ประกอบกันได้อย่างไม่สมบูรณ์ อาจเกิดการเสียดสีขณะทำงาน เครื่องจักรต้องใช้แรงขับเคลื่อนสูงขึ้น อาจเกิดความร้อนหรือการสั่นสะเทือนก่อให้เกิดการทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพและเกิดความเสียหายกับเครื่องจักรได้ในภายหลัง จึงมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ร่วมกับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเพื่อตรวจติดตามและควบคุมการทำงาน of เครื่องจักรกลซีเอ็นซีให้มีการทำงานภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม ทั้งนี้การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานไม่สามารถตรวจสอบได้ทันทีขณะเครื่องกลึงซีเอ็นซีทำงาน หรือไม่สามารถหยุดเครื่องได้กรณีที่คุณภาพไม่ได้ตามที่ต้องการขณะผลิต เพราะจะทราบได้ก็ต่อเมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบภายหลังผลิตเสร็จแล้ว

ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาจึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการตรวจติดตามคุณภาพของชิ้นงานเพื่อให้สามารถตรวจติดตามและควบคุมคุณภาพได้ทันทีที่ลดของเสียที่เกิดขึ้นและเตรียมรองรับระบบการผลิตแบบอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) ซึ่งเป็นระบบการผลิตที่ถูกคาดหวังว่าจะเป็นคำตอบของระบบการผลิตแห่งอนาคต ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปัจจัยหลัก ๆ คือ ปัจจัยภายใน เช่น แรงตัด ความสั่นสะเทือน อุณหภูมิ เป็นต้น

และปัจจัยภายนอก เช่น เงื่อนไขการตัด เป็นต้น โดยสามารถสรุปงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยดังกล่าวและการพัฒนาวิธีการตรวจติดตามคุณภาพชิ้นงานต่าง ๆ ดังตารางที่ 1.1 [8-11] [12-22]

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANNs) [23] เป็นแบบจำลองทางเลือกใหม่ในกลุ่มแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เริ่มเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แม้ว่าจะถูกคิดค้นและพัฒนา มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ซึ่งในยุคนั้นระบบคอมพิวเตอร์ยังไม่สามารถรองรับได้ดังเช่นในยุคปัจจุบัน แบบจำลองนี้ถูกพัฒนาเพื่อจำลองกระบวนการเรียนรู้ของสมองมนุษย์ มีความสามารถในการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างชุดข้อมูลนำเข้า (Input data) และชุดข้อมูลส่งออก (Output data) ที่ทราบค่า ซึ่งแบบจำลองจะเรียนรู้ความสัมพันธ์ผ่านกระบวนการสอน (Training) โดยจะทำการปรับค่าน้ำหนักระหว่างความสัมพันธ์ (Connection Weights) ซึ่งเสมือนค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยพหุคูณ (Regression Coefficients) เพื่อให้ค่าข้อมูลส่งออกที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าข้อมูลเป้าหมายที่ต้องการ และสามารถนำแบบจำลองที่ผ่านการเรียนรู้ได้อย่างเหมาะสมมาใช้นำทำนายค่าข้อมูลส่งออกที่ต้องการได้ โครงข่ายประสาทเทียมจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในการจำแนกรูปแบบ การทำนาย การหาความเหมาะสม การควบคุม และการจัดกลุ่ม เป็นต้น โดยเฉพาะลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงที่มีความซับซ้อน (Complex Non-linear relationships) อีกทั้งง่ายต่อการนำไปใช้เนื่องจากผู้วิจัยมีความเข้าใจในหลักการพื้นฐานโครงสร้างของแบบจำลองและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายสิ่งที่ผู้วิจัยสนใจก็เพียงพอแล้ว

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะสร้างวิธีการทำนายความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึงที่ใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจติดตามและควบคุมคุณภาพชิ้นงานให้เกิดของเสียน้อยลง จากข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียมข้างต้นผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่อความตรงกับค่าความตรงที่วัดได้จริงของชิ้นงาน และสร้างแบบจำลองในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้การทำนายค่าความตรงให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้วิธีนี้สามารถใช้ทำนายได้ทั้งชิ้นงานที่เป็นเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุหลักในอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อให้เกิดความสะดวกในการนำวิธีการนี้ไปใช้แม้ว่าวัสดุชิ้นงานจะต่างกัน

ตารางที่ 1.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจติดตามคุณภาพของชิ้นงาน

งานวิจัย	คุณภาพ ชิ้นงานที่ สนใจ	กระบวนการ การขึ้น รูป ชิ้นงาน	วัสดุ ชิ้นงานที่ สนใจ	ประสิทธิภาพ			ปัจจัยที่ศึกษา			วิธีการตรวจ ติดตามคุณภาพ ของชิ้นงาน
				ความเร็วดัด	อัตรา ป้อนดัด	ความลึก ดัด	รัศมี จุ่มมิต	มุมคาย เศษโลหะ	แรงดัด	
[8]	ความตรง	การกลึง	เหล็ก (S45C)	✓	✓	✓	✓	✓	Fymax- Fy(min)/ Fy(s)	- สมการถดถอย พหุคูณ
[9]	ความตรง, ความกลม	การกลึง	เหล็ก (S45C)	✓	✓	✓	✓	✓	Fymax- Fy(min)/ Fy(s), AVFx/AVFy (ประยุกต์ใช้ เวฟเลท)	- สมการถดถอย พหุคูณ
[10]	ความตรง	การกลึง	เหล็ก (S45C)	✓	✓	✓	✓	✓	Fymax- Fy(min)/ Fy(s) (ประยุกต์ใช้ เวฟเลท)	- สมการถดถอย พหุคูณ
[11]	ความตรง	การกลึง	อะลูมิเนียม ม (6063)	✓	✓	✓	✓	-	Fymax- Fy(min)/ Fy(s)	- สมการถดถอย พหุคูณ

งานวิจัย	คุณภาพ ชิ้นงานที่ สนใจ	กระบวนการ การขึ้น รูป ชิ้นงาน	วัสดุชิ้นงาน ที่สนใจ	ปัจจัยที่ศึกษา				วิธีการตรวจ ติดตามคุณภาพ ของชิ้นงาน
				ความเร็ วตัด	อัตรา ป้อนตัด	ความลึก ตัด	รัศมี จุมุมมีด เศษโลหะ	
[12]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	เหล็ก (S45C)	✓	✓	✓	✓	Fy/Fz - สมการถดถอย พหุคูณ
[13]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	เหล็ก (S45C)	✓	✓	✓	✓	Fy/Fz - สมการถดถอย พหุคูณร่วมกับ SPC
[14]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	เหล็ก (S45C)	✓	✓	✓	✓	AFy/AFz (ประยุกต์ใช้ เวฟเลท) - สมการถดถอย พหุคูณ
[15]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	เหล็ก (S45C)	✓	✓	✓	✓	AFy/AFz - สมการถดถอย พหุคูณ
[16]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	อะลูมิเนียม (Al 6063)	✓	✓	✓	-	Fy/Fz - สมการถดถอย พหุคูณ
[17]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	เหล็ก (AISI 8620)	✓	✓	✓	-	สัมประสิทธิ์ แรงดันสะท้อนใน การตัด (ประยุกต์ใช้ SSA) LS-SVM

งานวิจัย	คุณภาพ ชิ้นงานที่ สนใจ	กระบวนการ การขึ้น รูป ชิ้นงาน	วัสดุ ชิ้นงานที่ สนใจ	ปัจจัยที่ศึกษา				วิธีการตรวจ ติดตามคุณภาพ ของชิ้นงาน	
				ความเร็ว ตัด	อัตรา ป้อนตัด	ความลึก ตัด	รัศมี จุมุมิต เศษโลหะ		อื่น ๆ
[18]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	เหล็กกล้า ไร้สนิม (1Cr18Ni 9Ti)	✓	✓	✓	-	-	สมการถดถอย พหุคูณ (ประยุกต์ใช้ RSM และ Optimization)
[19]	ความ ขรุขระผิว	การกลึง	เหล็ก	-	✓	-	-	รูปจุ่ม มีดตัด, มุมข้าง คมตัด	การจำลอง สถานการณ์
[20]	ความ ขรุขระผิว	การกัดหัว บอล	เหล็ก (AISI 1050)	ความเร็ว แกนหมุน	✓	✓	ขนาดของ เครื่องมือ	-	สมการถดถอย พหุคูณ
[21]	ความ ขรุขระผิว	การกัด	เหล็ก (C62D)	ความเร็ว แกนหมุน	✓	-	-	เวลาที่ใช้ตัด	สมการถดถอย พหุคูณ (ประยุกต์ใช้ RSM)
[22]	ความ ขรุขระผิว	การกัด แข็ง	โลหะผสม เหล็ก	✓	✓	✓	✓	รูปร่าง มีดมีด, มุม ทลอบ	สมการถดถอย พหุคูณ (ประยุกต์ใช้ RSM)

1.2 กรอบแนวคิดงานวิจัย

1.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความตรงของชิ้นงาน

ปัจจัยในการตัด [11] เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างชิ้นงานโดยตรง เนื่องจากมีผลต่อลักษณะของชิ้นงานในขณะขึ้นรูป ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ปัจจัยหลัก คือ

- 1) ปัจจัยจากเงื่อนไขการตัด เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด เป็นต้น
- 2) ปัจจัยของมีดตัด เช่น เนื้อวัสดุมีดตัด รัศมีงมูมมีดตัด รูปร่างของมีดตัด เป็นต้น
- 3) ปัจจัยของชิ้นงาน เช่น เนื้อวัสดุชิ้นงาน ขนาดชิ้นงาน เป็นต้น
- 4) ปัจจัยที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติของการตัด เช่น ความสั่นสะเทือน การเกิดรูปร่างของเศษโลหะ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดจริง เช่น แรงตัด อุณหภูมิขณะตัด เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ในการตรวจวัดได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8-11] พบว่าปัจจัยจากเงื่อนไขการตัด ปัจจัยของมีดตัด และแรงตัดส่งผลกระทบต่อความตรงและความแม่นยำในการทำนายค่าความตรงของชิ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการตัดซึ่งประกอบไปด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงมูมมีดตัด มุมคายเศษโลหะ และแรงตัด กับค่าความตรงที่วัดได้ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาวิธีการทำนายความตรงโดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับความตรงของชิ้นงาน

เทคโนโลยีเซนเซอร์เป็นการตรวจติดตามทางอ้อม [10] (Indirect Monitoring Process) โดยการนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในกระบวนการตัดมาแปลงค่าเพื่อติดตามสถานะของกระบวนการตัดโดยที่ไม่ต้องหยุดเครื่องจักร ในงานวิจัยนี้ใช้ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดแรงเพื่อเก็บค่าสัญญาณแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด

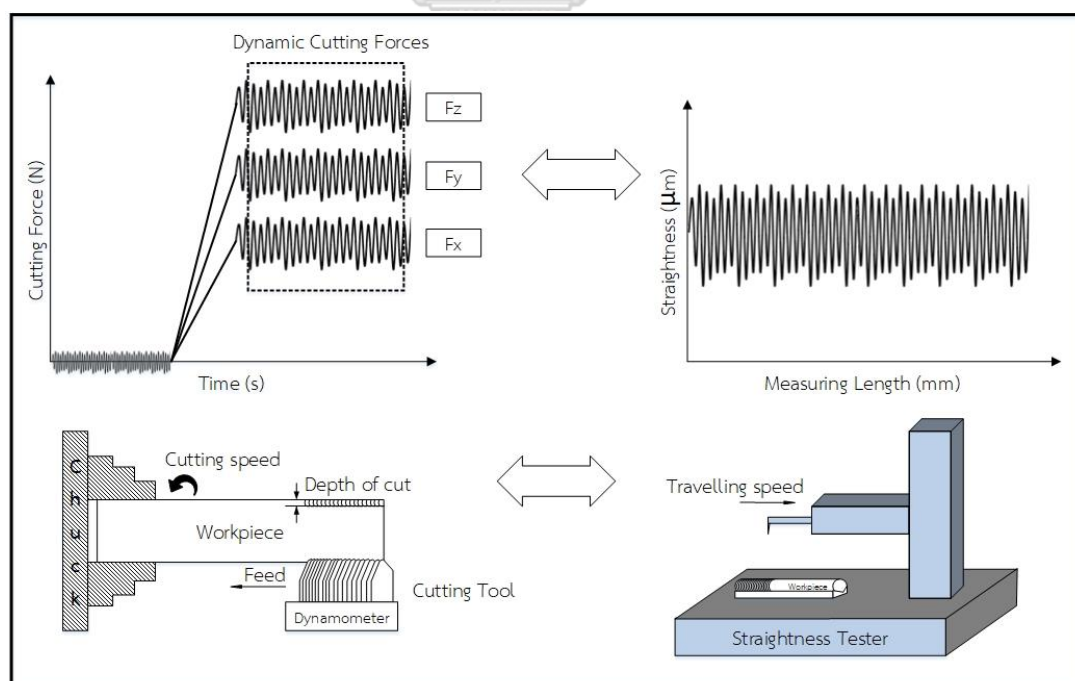
แรงตัดสามารถแบ่งได้เป็น 3 แรง คือ

- 1) แรงตัดในแนวรัศมี (Radius Force, F_R หรือ F_x)
- 2) แรงป้อนตัด (Feed Force, F_F หรือ F_y)
- 3) แรงตัดหลัก (Main Force, F_C หรือ F_z)

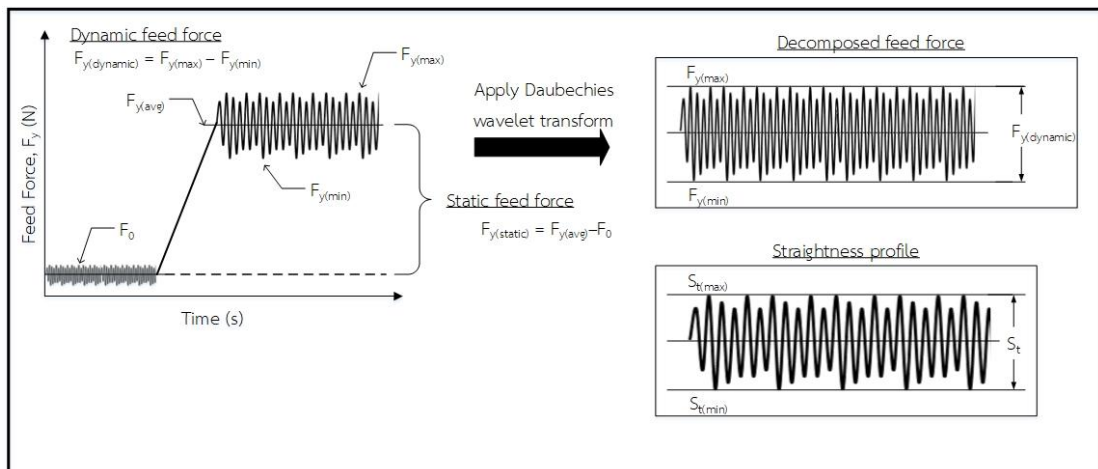
โดยแรงตัดที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์จะอยู่ในรูปสัญญาณแรงตัดประกอบไปด้วย 3 แรง คือ

- 1) แรงตัดศูนย์ คือ แรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน (Noises) จากอุปกรณ์
- 2) แรงตัดพลวัต (Dynamic Force) คือ แรงที่เกิดขึ้นขณะตัดจริง
- 3) แรงตัดสถิต (Static Force) คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์ หรือแรงตัดเฉลี่ยที่กำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นออกไปแล้ว

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8-11] พบว่าแรงป้อนตัดสามารถอธิบายความขรุขระผิวและความตรงของชิ้นงานได้ เนื่องจากทิศทางของแรงป้อนตัด และทิศทางการวัดผิวชิ้นงานเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงาน [11] ที่โดเมนเวลา ดังรูปที่ 1.4 พบว่าสัญญาณของแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน และมีความสอดคล้องกับอัตราป้อนตัดชิ้นงาน อธิบายได้ว่าการตัดที่อัตราป้อนตัดใด ๆ แรงที่เกิดขึ้นขณะตัดจะมีลักษณะเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน ซึ่งสอดคล้องกับรอยป้อนตัด (Feed Mark) ที่เป็นค่าบ่งบอกความตรงของชิ้นงาน



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึงชิ้นงาน



รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงาน

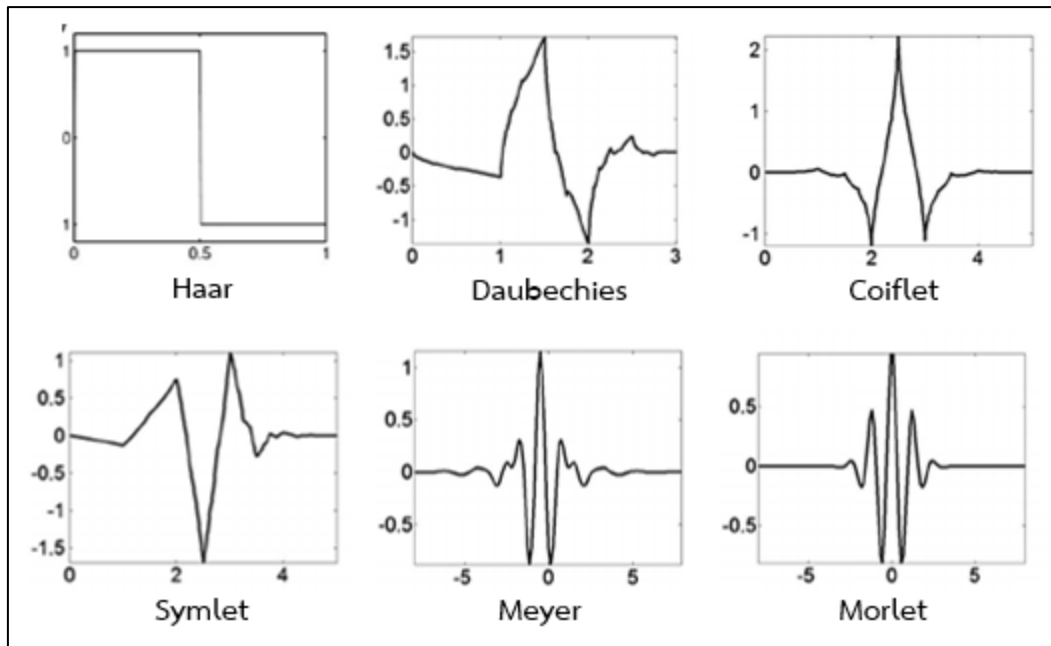
จากรูปที่ 1.5 เมื่อนำสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัตที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์มาพิจารณา จะพบว่าแรงป้อนตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_{y(max)}$) กับแรงป้อนตัดพลวัตที่น้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) มีค่าสัมพันธ์กับความตรงที่เป็นส่วนสูงระหว่างค่าความขรุขระผิวสูงสุด (Max) กับค่าความขรุขระผิวต่ำสุด (Min) แต่แรงป้อนตัดพลวัตที่วัดได้ ได้รับอิทธิพลจากความแข็งของชิ้นงานซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเงื่อนไขการตัด และเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อกำจัดอิทธิพลเงื่อนไขการตัดของชิ้นงาน อัตราส่วนแรงตัดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป โดยอัตราส่วนแรงตัดคำนวณได้จากการหาผลต่างระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_{y(max)}$) กับแรงป้อนตัดพลวัตที่น้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) เทียบกับแรงป้อนตัดสถิตในช่วงเวลาที่ทำกรวด ดังสมการที่ 1.1

$$\text{อัตราส่วนแรงตัด} = \frac{F_{y(\text{dynamic})}}{F_{y(\text{static})}} = \frac{F_{y(\text{max})} - F_{y(\text{min})}}{F_{y(\text{static})}} \quad (1.1)$$

1.2.3 การแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform)

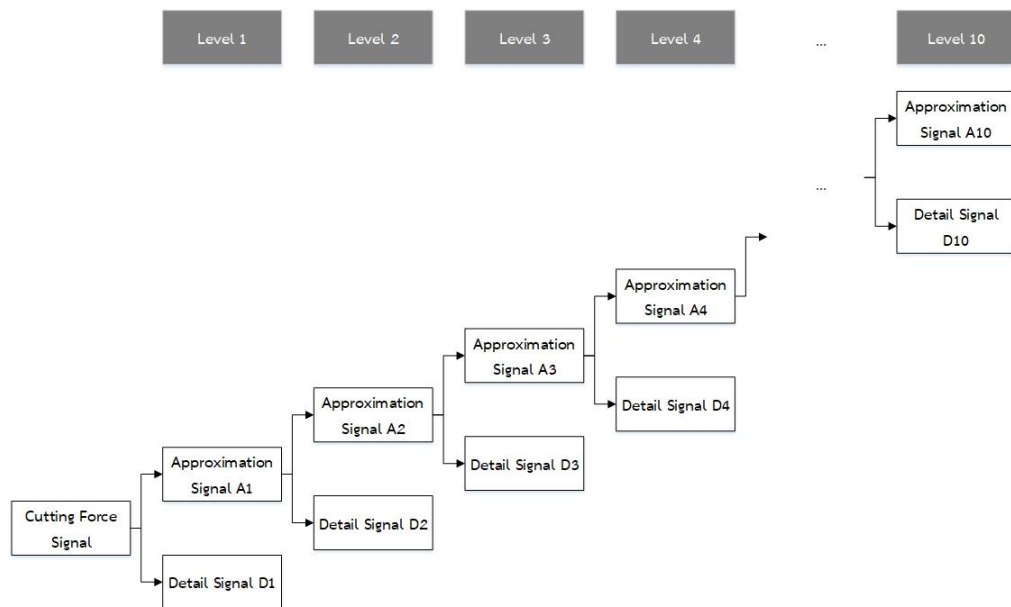
การเกิดรูปร่างของเศษโลหะเป็นปัจจัยในการตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดจริง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ เศษโลหะแบบต่อเนื่องและเศษโลหะแบบแตกหัก โดยการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักจะมีผลต่อสัญญาณแรงตัดพลวัตที่วัดได้ ทำให้สัญญาณแรงตัดพลวัตมีค่าสูงกว่าค่าที่เป็นจริงจากการมีสัญญาณแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น การแปลงเวฟเลทจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้

การแปลงเวฟเลท [14] คือ วิธีการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปยังโดเมนเวลาและความถี่ (Time-Frequency Domain) ด้วยการแยกสัญญาณย่อยออกเป็นหลายๆระดับ (Level) ซึ่งทำให้สามารถแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตที่สอดคล้องกับสัญญาณความถี่ของชิ้นงานออกจากสัญญาณแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ได้ ในขณะที่การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) [24] วิเคราะห์ได้เฉพาะสัญญาณความถี่เท่านั้น เวฟเลทสามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะที่เรียกว่า แฟมิลี (Family) เช่น Haar, Daubechies, Symlet, Coiflet, Morlet, Meyer เป็นต้น ซึ่งแต่ละแฟมิลีสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการแปลงได้เป็น 2 ประเภท [25] คือ การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform, CWT) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบหลายช่วงเวลาด้วยฟังก์ชันการหด (Contraction Function) และฟังก์ชันการขยาย (Dilatation Function) ตัวอย่างเวฟเลท เช่น Morlet, Meyer เป็นต้น มีลักษณะการใช้งานในการตรวจจบบรรยากาศและการจำแนกข้อบกพร่องที่มีหลายตัว ส่วนการแปลงเวฟเลทแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform, DWT) จะเป็นการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองหลายจุดและตัวกรองพิเศษ ตัวอย่างเวฟเลท เช่น Haar, Daubechies, Symlet, Coiflet เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะการใช้งานในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข การวิเคราะห์สัญญาณ การควบคุมซ้ำ การจดจำเสียง การบีบอัดรูปหรือสัญญาณเสียง การกำจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น ทั้งนี้การเลือกใช้เวฟเลทในการวิเคราะห์สัญญาณจะต้องคำนึงถึงลักษณะของสัญญาณที่จะนำมาวิเคราะห์ว่ามีลักษณะคล้ายกับเวฟเลทแฟมิลีใด ดังตัวอย่างรูปสัญญาณเวฟเลทแฟมิลีต่าง ๆ รูปที่ 1.6 จากงานวิจัยที่ผ่านมา [10, 11] ลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับเวฟเลทแบบดอบเชชีส์ (Daubechies Wavelet) ดังนั้นจึงเลือกใช้เวฟเลทแบบดอบเชชีส์ในการแปลงสัญญาณแรงตัดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1.6 ตัวอย่างรูปสัญญาณเวฟเลตแฟมิลีี่ต่าง ๆ [26, 27]

กระบวนการแยกสัญญาณของเวฟเลต (Wavelet Decomposition) สามารถแยกสัญญาณตั้งต้น (Original signal) ออกเป็น 2 สัญญาณ คือ สัญญาณประมาณ (Approximation Signal) และสัญญาณรายละเอียด (Detail Signal) .ในการแยกสัญญาณจะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนถึงระดับที่ต้องการ ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การแยกย่อยสัญญาณแรงตัดออกเป็น 10 ระดับ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [10] พบว่าเมื่อแยกสัญญาณย่อยออกเป็น 10 ระดับ ความถี่ของความตรงจะอยู่ที่ระดับ 8 ซึ่งสามารถนำสัญญาณแรงตัดพลวัตที่ระดับ 8 ไปใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะใช้การแปลงเวฟเลทแบบดอเบชีส์ (Daubechies Wavelet Transform) แยกสัญญาณย่อยออกเป็น 10 ระดับ

1.2.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANNs)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองกระบวนการทำงานในสมองของมนุษย์เพื่อการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนต่าง ๆ [28] ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมได้ 2 ประเภท [29] คือ โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-Layer) โดยโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นเหมาะกับลักษณะของปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinear Problem) โครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยชั้นข้อมูลนำเข้า (Input Layer) ชั้นข้อมูลส่งออก (Output Layer) และชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งเป็นชั้นระหว่างชั้นข้อมูลนำเข้าและชั้นข้อมูลส่งออก ชั้นซ่อนจะมีชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ขึ้นกับลักษณะการนำไปใช้งาน ในโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวจะไม่มีชั้นซ่อนอยู่ในโครงสร้าง

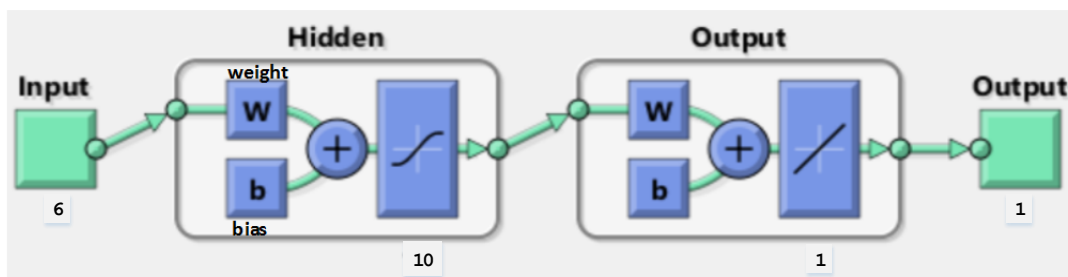
ประเภทการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมมี 3 ประเภท [30] คือ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) และการ

เรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning) การเรียนรู้แบบมีผู้สอนจะป้อนข้อมูลนำเข้าที่ต้องการสอน และค่าเป้าหมายที่สอดคล้องตามรูปแบบของข้อมูลนำเข้าให้โครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้าและค่าเป้าหมาย ซึ่งค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ที่โครงข่ายคำนวณได้จะถูกนำมาปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่ายเพื่อให้ค่าผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ในขณะที่การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนจะป้อนข้อมูลนำเข้าเพียงอย่างเดียว การปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่ายจะปรับตามกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ส่วนการเรียนรู้แบบผสมผสานจะรวมการเรียนรู้ทั้งแบบมีผู้สอนและไม่มีผู้สอนไว้ด้วยกัน โดยการเรียนรู้แบบมีผู้สอนจะใช้ในการพิจารณาปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่าย ในขณะที่การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนจะใช้ในการพิจารณาส่วนอื่น ๆ ของโครงข่าย

ตัวอย่างการเรียนรู้แบบมีผู้สอน เช่น การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Learning) การเรียนรู้แบบเพอเซปตรอน (Perceptron Learning) เป็นต้น การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากง่ายต่อการทำความเข้าใจ สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การสร้างแบบจำลอง การทำนาย การควบคุม การจัดกลุ่ม และการจัดจํารูปแบบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังเหมาะกับการแก้ปัญหาที่มีหลายมิติหรือหลายตัวแปรและลักษณะปัญหาไม่เป็นเชิงเส้นตรง การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับจะปรับค่าผิดพลาดระหว่างค่าผลลัพธ์กับค่าเป้าหมายโดยการแพร่ข้อมูลย้อนกลับจากชั้นข้อมูลส่งออกไปยังชั้นซ่อนและชั้นข้อมูลนำเข้าตามลำดับ ในขณะที่การเรียนรู้แบบเพอเซปตรอนจะเหมาะกับการแก้ปัญหาเชิงเส้นตรงเท่านั้น การเรียนรู้แบบเพอเซปตรอนจะปรับค่าน้ำหนักและเทรชโฮลด์ (Threshold) ก็ต่อเมื่อเกิดค่าผิดพลาดขึ้นในโครงข่าย ตัวอย่างอื่น ๆ ของการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนและการเรียนรู้แบบผสมผสานรวมทั้งลักษณะการใช้งานสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงตัวอย่างการเรียนรู้แบบต่าง ๆ และลักษณะการใช้งาน [30]

ประเภทการเรียนรู้	อัลกอริทึมการเรียนรู้	ลักษณะการใช้งาน
1. การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning)	-แบบเพอเซปตรอน (Perceptron)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification) การประมาณฟังก์ชัน (Function Approximation) การทำนาย (Prediction) การควบคุม (Control)
	-แบบแพร่ย้อนกลับ (Back-propagation)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification)
	-แบบบ็อลทซ์มัน (Boltzmann)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification)
	-แบบการวิเคราะห์จำแนกเชิงเส้น (Linear Discriminant Analysis)	การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification)
	-แบบการหาปริมาณเวกเตอร์ (Vector Quantization)	การจำแนกประเภทภายในกลุ่ม (Within-class Categorization) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression)
	-แบบแผนที่อาร์ต (ART Map)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification) การจำแนกประเภทภายในกลุ่ม (Within-class Categorization)
2. การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)	-แบบการคาดการณ์ของแซมมอน (Sammon's Projection)	การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)
	-แบบการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)	การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression)
	-แบบความจำเชื่อมโยง (Associative Memory)	ความจำเชื่อมโยง (Associative Memory)
	-แบบการหาปริมาณเวกเตอร์ (Vector Quantization)	การจำแนก (Categorization) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression)
	-แบบแผนที่การจัดการตนเองของโกะโฮะเน็น (Kohonen's SOM)	การจำแนก (Categorization) การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)
	-แบบอาร์ต 1 แบบอาร์ต 2 (ART1, ART2)	การจำแนก (Categorization)
3. การเรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning)	-แบบเรเดียลเบสิสฟังก์ชัน (Radial Basis Function, RBF)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification) การประมาณฟังก์ชัน (Function Approximation) การทำนาย (Prediction) การควบคุม (Control)



รูปที่ 1.8 รูปแสดงอัลกอริทึมของโครงข่ายประสาทเทียมสองชั้นแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (The Two-Layer Feed Forward Neural Networks With Back Propagation Algorithm)

ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสองชั้นแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ เนื่องจากการทำนายความตรงที่ผู้วิจัยสนใจได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดหลายตัวแปรและลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง จึงประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสองชั้นแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า และเนื่องจากลักษณะข้อมูลนำเข้าที่ผู้วิจัยจะป้อนเข้าโครงข่ายเป็นข้อมูลนำเข้าที่มีผลลัพธ์ที่ต้องการ ดังนั้นจึงใช้วิธีการเรียนรู้แบบมีผู้สอนโดยใช้วิธีการแพร่ย้อนกลับ ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการทำนายหรือการควบคุม จากรูปที่ 1.8 ที่แสดงอัลกอริทึมของโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยชั้นข้อมูลนำเข้าที่มีข้อมูลนำเข้า 6 ข้อมูล คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด $(F_{y(max)} - F_{y(min)}) / F_{y(static)}$ ในส่วนของชั้นซ่อนมีโหนดย่อย (Hidden Nodes) ทั้งหมด 10 โหนด เพื่อใช้ในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (Data Fitting) รวมถึงค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) ที่ใช้ในการปรับค่าความผิดพลาดระหว่างค่าผลลัพธ์กับค่าเป้าหมาย ในส่วนสุดท้ายคือชั้นข้อมูลส่งออกที่จะให้ค่าความตรงที่ได้จากการคำนวณของโครงข่าย

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานเหล็กและอะลูมิเนียมกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดจริงภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ และพัฒนาวิธีการพยากรณ์ค่าความตรงของชิ้นงานเหล็กและอะลูมิเนียมโดยการใช้การแปลงเวฟเลตและการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) กระบวนการกลึงปกผิวใช้วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) โดยใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี แบบ 4 แกน ยี่ห้อ MAZAK รุ่น NEXUS 200MY/MSY
- 2) ชิ้นงานทดลองคือ ชิ้นงานรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-50 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร แบ่งเป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) และอะลูมิเนียม (Al 6063)
- 3) ด้ามมีดกลึง (Tool Holder) ที่ใช้ในการทดลองคือ ด้ามมีดเบอร์ WTJNR 2525M-16N สำหรับเม็ดมีดมุมคายเศษ -6 องศา และด้ามมีดเบอร์ CTGPR 2525M-16N สำหรับเม็ดมีดมุมคายเศษ +11 องศา
- 4) เม็ดมีด (Insert) ที่ใช้ในการทดลองคือ ชนิดคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide) มีค่าการสึกหรอไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร
- 5) เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
- 6) ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง ดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	
	เหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)	อะลูมิเนียม (Al 6063)
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	100, 150 และ 200	150, 200 และ 250
อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรตอร์อบ)	0.15, 0.20 และ 0.25	0.100, 0.125 และ 0.150
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.6 และ 0.8	0.1, 0.2 และ 0.3
รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)	0.4 และ 0.8	
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6 และ +11	

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

วิธีการพยากรณ์ค่าความตรงของชิ้นงานเหล็กและอะลูมิเนียมขณะตัดจริงภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน โดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึงของเครื่องกลึงซีเอ็นซี

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถตรวจติดตามค่าความตรงของชิ้นงานหลักและอะลูมิเนียมภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงาน
- 2) พัฒนารูปแบบการควบคุมคุณภาพของผิวชิ้นงานเพื่อลดของเสีย ลดเวลาในการตรวจสอบและควบคุมต้นทุนการผลิตได้
- 3) เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบตรวจติดตามอัตโนมัติขณะตัดจริงของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อรองรับระบบการผลิตแบบอัจฉริยะในอนาคต
- 4) เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้การพยากรณ์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อพื้นผิวและรูปร่างของชิ้นงานในกระบวนการกลึงปอกผิวชิ้นงาน เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมมิต มุมคายเศษโลหะ เป็นต้น รวมทั้งวิธีการพยากรณ์พื้นผิวและรูปร่างของชิ้นงานต่าง ๆ เช่น การสร้างสมการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด การใช้โครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น
- 2) ศึกษาการใช้งานพื้นฐานของเครื่องกลึงซีเอ็นซี ข้อจำกัดของเครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง การเลือกใช้งานด้ามมีดและเม็ดมีด รวมถึงการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ การเก็บข้อมูลสัญญาณแรงตัด และการแปลงสัญญาณแรงตัด
- 3) ออกแบบการทดลองและกำหนดเงื่อนไขการตัด
- 4) ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลอง โดยการวัดและเก็บค่าสัญญาณแรงตัดในขณะตัด รวมทั้งวัดค่าความตรงของชิ้นงานหลังตัดตามเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ
- 5) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดกับความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform)
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ และป้อนข้อมูลนำเข้าลงในโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อสร้างอัลกอริทึมการพยากรณ์ความตรง

7) ทดสอบความแม่นยำของการพยากรณ์ความตรงของโปรแกรมเทียบกับค่าความตรงจริงที่วัดได้ และเปรียบเทียบกับวิธีการการพยากรณ์ความตรงแบบอื่น ๆ

8) สรุปผลการดำเนินการวิจัย และข้อเสนอแนะ

9) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1.4 แสดงตารางเวลาการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอน ที่	พ.ศ. 2562					พ.ศ. 2563						
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1)	■											
2)				■								
3)					■							
4)						■						
5)									■			
6)										■		
7)										■		
8)											■	
9)												■

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 เหล็กกล้า (Steels) [31]

เหล็กกล้าเป็นโลหะในกลุ่มเหล็ก (Ferrous Metals) ที่สำคัญในงานวิศวกรรมโดยเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนอยู่ที่ 0.02% - 2.11% โดยน้ำหนัก แต่เหล็กกล้าโดยทั่วไปจะมีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนอยู่ที่ 0.05% - 1.1% โดยน้ำหนัก และประกอบไปด้วยธาตุผสมอื่น ๆ เช่น แมงกานีส (Manganese) โครเมียม (Chromium) นิกเกิล (Nickel) โมลิบดีนัม (Molybdenum) และวานาเดียม (Vanadium) เป็นต้น เหล็กกล้ามีคุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะการใช้งานแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะการใช้งานของเหล็ก

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สัญลักษณ์ (Symbol)	Fe
เลขอะตอม (Atomic Number)	26
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	7.87
โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)	BCC (Body-Centered Cubic)
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	1539 °C
จุดเดือด (Boiling Point)	2862 °C
Elastic Modulus	209,000 MPa
สินแร่หลัก (Principal Ore)	Hematite (Fe ₂ O ₃)
ธาตุผสมที่เป็นส่วนประกอบ (Alloying Elements)	คาร์บอน (Carbon), โครเมียม (Chromium), แมงกานีส (Manganese), นิกเกิล (Nickel), โมลิบดีนัม (Molybdenum), วานาเดียม (Vanadium) และซิลิกอน (Silicon)
ลักษณะการใช้งาน (Typical Applications)	งานก่อสร้าง (Construction), เครื่องจักรกล (Machinery) ยานยนต์ (Automotive), และรางรถไฟ (Railroad Tracks)

ระบบการระบุชื่อของเหล็กจะกำหนดด้วยรหัสตัวเลข 4 ตำแหน่ง ตามสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าอเมริกัน (American Iron and Steel Institute, AISI) และสมาคมวิศวกรยานยนต์อเมริกา (Society of Automotive Engineers, SAE) โดยตัวเลขสองตำแหน่งแรกคือ ชนิดของวัสดุ และตัวเลขสองตำแหน่งหลังคือเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่ผสมอยู่ เช่น 1020 คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่ที่ 0.20% เป็นต้น ตัวอย่างการระบุชื่อของเหล็กอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการระบุชื่อของเหล็กอื่น ๆ [32]

รหัส	ชื่อเหล็กกล้า	การใช้งาน
13XX	เหล็กกล้าแมงกานีส (Manganese Steels)	เฟืองข้อเหวี่ยงและเพลาส่งกำลัง
23XX	เหล็กกล้านิกเกิล (Nickel Steels)	เฟืองเกียร์ โบลต์ ข้อต่อ และสตัด
25XX	เหล็กกล้านิกเกิล (Nickel Steels)	เฟืองเกียร์ของรถบรรทุก ลูกเบี้ยว และข้อเหวี่ยง
31XX	เหล็กกล้านิกเกิล-โครเมียม (Nickel-Chromium Steels)	เฟืองตัวหนอนและสลักลูกสูบ
4XXX	เหล็กกล้าโมลิบดีนัม (Molybdenum Steels)	ท่อไอน้ำ
41XX	เหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม (Chromium-Molybdenum Steels)	ก้านสูบของเครื่องยนต์
43XX	เหล็กกล้านิกเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม (Nickel-Chromium-Molybdenum Steels)	เพลาค้อนเหวี่ยงของรถยนต์แรงบิดสูง เฟืองเกียร์ของเครื่องบิน
5XXX	เหล็กกล้าโครเมียม (Chromium Steels)	แบร็งและลูกปืน

เหล็กกล้าในเชิงพาณิชย์ที่สำคัญสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

1) เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steels) มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักและธาตุผสมอื่น ๆ ประกอบไปด้วยแมงกานีส (Manganese) ประมาณ 0.4% ซิลิกอน (Silicon) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และกำมะถัน (Sulfur) อย่างละเล็กน้อย โดยความแข็งแรง (Strength) และความแข็ง (Hardness) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอน แต่จะส่งผลให้ความเหนียว (Ductility) ลดลง เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามปริมาณคาร์บอน ดังนี้

1.1) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steels) มีปริมาณของคาร์บอนน้อยกว่า 0.20% โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงไม่สูงมาก ขึ้นรูปง่าย ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแผ่นโลหะในยานยนต์ เหล็กแผ่นในงานตกแต่งและงานก่อสร้าง และรางรถไฟ

1.2) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steels) มีปริมาณของคาร์บอน 0.20% - 0.50% โดยน้ำหนัก ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เฟลาข้อเหวี่ยง และก้านสูบ เป็นต้น

1.3) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steels) มีปริมาณของคาร์บอนมากกว่า 0.50% ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงและความแข็งสูง เช่น สปริง เครื่องมือตัดและมิตัด และชิ้นส่วนที่ทนทานต่อการสึกกร่อน เป็นต้น

2) เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steels) ประกอบไปด้วยธาตุผสมไม่เกิน 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เหล็กกล้าผสมต่ำมีคุณสมบัติทางกลที่เหนือกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา เช่น ความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งที่อุณหภูมิสูง (Hot Hardness) ความต้านทานการสึกกร่อน (Wear Resistance) ความแกร่ง (Toughness) รวมถึงการผนวกรวมคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการโดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ซึ่งธาตุผสมโดยทั่วไปที่นิยมใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าประกอบไปด้วย

- โครเมียม (Chromium) มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง ความแข็งที่อุณหภูมิสูง และความต้านทานการสึกกร่อน
- แมงกานีส (Manganese) มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง

- โมลิบดีนัม (Molybdenum) มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแกร่ง ความแข็ง และช่วยในการแข็งตัวขึ้นรูปของคาร์ไบด์สำหรับด้านทานการสึกกร่อน
- นิกเกิล (Nickel) มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง และความแกร่ง กรณีที่ปริมาณมากพอจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน
- วานาเดียม (Vanadium) มีคุณสมบัติช่วยยับยั้งการโตของเกรน (Grain) ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความแกร่ง และช่วยในการแข็งตัวขึ้นรูปของคาร์ไบด์สำหรับด้านทานการสึกกร่อน

3) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) เป็นเหล็กผสมที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง มีธาตุผสมหลักคือ โครเมียมมากกว่า 15% และนิกเกิลที่ช่วยปกป้องผิวเหล็กกล้าจากการกัดกร่อน รวมทั้งคาร์บอนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง ทั้งนี้หากปริมาณคาร์บอนที่มากเกินไปจะส่งผลคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง เหล็กกล้าไร้สนิมมีราคาสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

4) เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels) เป็นเหล็กผสมที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการตัด อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ความแข็งแรงสูง ความแข็งสูง ความแข็งที่อุณหภูมิสูง ความต้านทานการสึกกร่อนสูง และความแกร่งสูงภายใต้แรงกระแทก

5) เหล็กกล้าชนิดพิเศษ (Specialty Steels) เหล็กผสมนอกเหนือจากกลุ่มที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งมีคุณสมบัติและกระบวนการผลิตที่เฉพาะ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.2 อะลูมิเนียม (Aluminium) [31]

อะลูมิเนียมเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Metals) ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นในเรื่องน้ำหนักเบา มีค่านำความร้อนและค่านำไฟฟ้าสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีจากลักษณะการขึ้นรูปที่มีออกไซด์เคลือบเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่ผิว มีความเหนียว และง่ายต่อการขึ้นรูปขึ้นงาน แม้ว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีค่าความแข็งแรงต่ำ แต่สามารถนำมาผสมกับโลหะผสมอื่น ๆ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความสามารถทัดเทียมกับเหล็กได้เมื่อต้องการพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา โดยคุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะการใช้งานของอะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะการใช้งานของอะลูมิเนียม

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สัญลักษณ์ (Symbol)	Al
เลขอะตอม (Atomic Number)	13
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.7
โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)	FCC (Face-Centered Cubic)
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	660 °C
จุดเดือด (Boiling Point)	1800 °C
Elastic Modulus	69,000 MPa
สินแร่หลัก (Principal Ore)	Bauxite (ในรูป Al_2O_3 และ $Al(OH)_3$)
ธาตุผสมที่เป็นส่วนประกอบ (Alloying Elements)	ทองแดง (Copper), แมกนีเซียม (Magnesium), แมงกานีส (Manganese), ซิลิกอน (Silicon), และสังกะสี (Zinc)
ลักษณะการใช้งาน (Typical Applications)	บรรจุภัณฑ์ (Containers), กระดาษฟอยล์ (Wrapping Foil), ตัวนำไฟฟ้า (Electrical Conductors), หม้อและกระทะ (Pots and Pans), ชิ้นส่วนงานก่อสร้าง (Construction Parts), ชิ้นส่วนยานยนต์ (Automotive Parts) และชิ้นงานยานอวกาศ (Aerospace Parts)

ระบบการระบุชื่อของอะลูมิเนียมผสมจะกำหนดด้วยรหัสตัวเลข 4 ตำแหน่ง โดยอะลูมิเนียมถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามสมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (Aluminum Association, AA) คือ อะลูมิเนียมที่ใช่แรงขึ้นรูป (Wrought Aluminium) และอะลูมิเนียมที่หล่อขึ้นรูป (Cast Aluminium) ดังตารางที่ 2.4 [33]

ตารางที่ 2.4 ประเภท รหัส และคุณสมบัติของอะลูมิเนียม

ประเภท	รหัส	ชนิดธาตุผสม	คุณสมบัติ	การใช้งาน
อะลูมิเนียมที่ใช้แรงขึ้นรูป (Wrought Aluminium)	1XXX	Al-บริสุทธิ์ (>99%Al)	-มีความต้านทานแรงดึงต่ำ	งานด้านอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องจักรและอุปกรณ์ด้านวิศวกรรมเคมี วัสดุตกแต่งด้านสถาปัตยกรรม และบรรจุภัณฑ์อุปโภคบริโภค
	2XXX	Al-Cu และ Al-Cu-Li	-มีความแข็งแรงสูง -มีความต้านทานต่อการคืบที่อุณหภูมิสูง -มีความเหนียวสูง -มีความสามารถในการตัดแต่งดี	งานด้านอุตสาหกรรมอากาศยาน อุปกรณ์เครื่องใช้ทางทหาร และถังน้ำมัน
	3XXX	Al-Mn	-มีความแข็งแรงปานกลาง -มีความเหนียวสูง -มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง	การป้องกันเครื่องตี
	4XXX	Al-Si และ Al-Mg-Si	-มีความแข็งแรงปานกลาง -มีความสามารถในการหล่อดี -มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ	ลูกสูบในเครื่องยนต์เบนซิน
	5XXX	Al-Mg	-มีความแข็งแรงปานกลางถึงสูง -มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง	อุปกรณ์หรือท่อความดันสูงในอุตสาหกรรมยานยนต์ รถไฟ และเรือเดินสมุทร อุปกรณ์ในงานด้านวิศวกรรมเคมีและอุปกรณ์ในน้ำทะเล
	6XXX	Al-Mg-Si	-มีความแข็งแรงปานกลาง -อัตราขึ้นรูปได้ง่าย -ชุบเคลือบผิวแบบโนโตซีได้ดี	งานด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างและการขนส่ง
	7XXX	Al-Mg-Zn	-มีความแข็งแรงสูง	อาวุธทุโธปกรณ์ งานด้านอุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ และแม่พิมพ์

ประเภท	รหัส	ชนิดธาตุผสม	คุณสมบัติ	การใช้งาน
อะลูมิเนียมที่ใช้ แรงขึ้นรูป (Wrought Aluminium)	8XXX	Al-Li, Sn, Zr หรือ B	-มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ อุณหภูมิและความดันสูง	งานในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ซอฟต์แวร์ (Soft Bearing) และอากาศยาน
อะลูมิเนียมที่ใช้ หล่อขึ้นรูป (Cast Aluminium)	1XX.X	Al-บริสุทธิ์ (>99%Al)	-มีความต้านทานแรงดึงต่ำ	งานด้านอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องจักรและ อุปกรณ์ด้านวิศวกรรมเคมี วัสดุตกแต่งด้านสถาปัตยกรรม และ บรรจุภัณฑ์อุปโภคบริโภค
	2XX.X	Al-Cu	-มีความแข็งแรงสูงกว่าประเภทอื่น ๆ	-
	3XX.X	Al-Si-Cu และ Al- Mg-Si	-มีคุณสมบัติการหล่อไหลสูง -มีความเหนียวสูง	ผลึกสุบเครื่องยนต์ กระดาษลอร์ยอนต์
	4XX.X	Al-Si	-มีคุณสมบัติการหล่อที่ดี	อุปกรณ์จับยึดในระบบสายไฟฟ้าแรงสูง
			-มีความแข็งแรงและความเหนียวไม่สูง	
	5XX.X	Al-Mg	-มีคุณสมบัติการหล่อที่ไม่ดี	ชิ้นส่วนเครื่องบิน เตียงเคลื่อนย้ายผู้ป่วย และชิ้นส่วนที่ต้องการ น้ำหนักเบา
	7XX.X	Al-Mg-Zn	-มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง -มีความแข็งแรงปานกลางถึงสูง -มีคุณสมบัติการหล่อต่ำ	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน
	8XX.X	Al-Sn	-มีความแข็งแรงสูง -ผิวหน้าเรียบลื่น	แปรง บุก

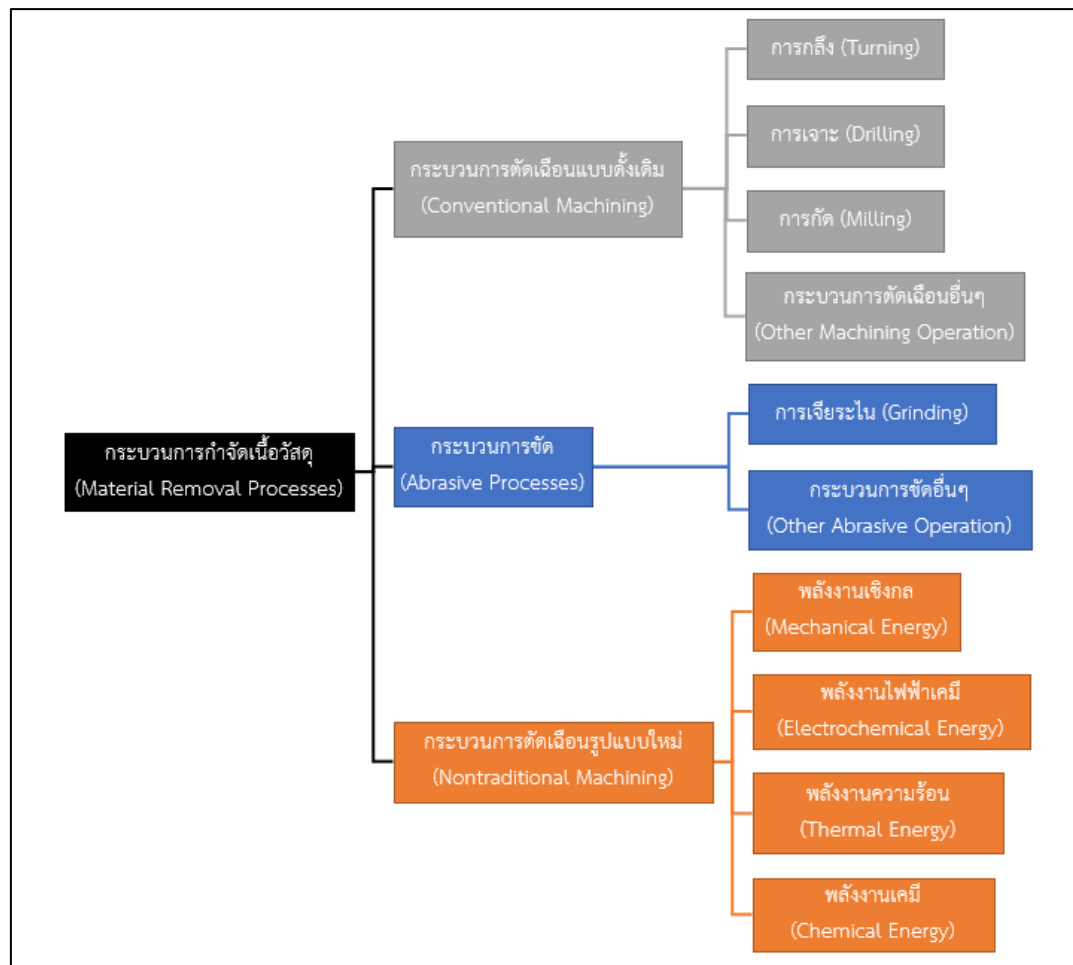
2.1.3 กระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุ (Material Removal Process) [31]

กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งวัสดุส่วนเกินถูกกำจัดออกจากชิ้นงานตั้งต้นเพื่อให้ได้รูปร่างชิ้นงานที่ต้องการ สามารถแบ่งกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) **กระบวนการตัดเฉือนแบบดั้งเดิม (Conventional Machining)** เป็นกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุโดยใช้เครื่องมือที่มีคมตัด ประกอบไปด้วยการกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) การกัด (Milling) และกระบวนการตัดเฉือนอื่น ๆ เช่น การขึ้นรูป (Shaping) การไส (Planing) การคว้านรู (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) เป็นต้น

2) **กระบวนการขัด (Abrasive Processes)** เป็นกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุโดยใช้การกระทำเชิงกลและอนุภาคหรือผงขัด ประกอบไปด้วยการเจียรระไน (Grinding) และกระบวนการขัดอื่น ๆ เช่น การลับ (Honing) การขัดผิว (Lapping) และการกัดผิวละเอียด (Superfinishing) เป็นต้น

3) **กระบวนการตัดเฉือนรูปแบบใหม่ (Nontraditional Processes)** เป็นกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุโดยใช้พลังงานรูปแบบอื่น ๆ เช่น พลังงานเชิงกล (Mechanical Energy) พลังงานไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Energy) พลังงานความร้อน (Thermal Energy) และพลังงานเคมี (Chemical Energy) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุ [31]

2.1.4 กระบวนการตัดเฉือน (Machining process) [3]

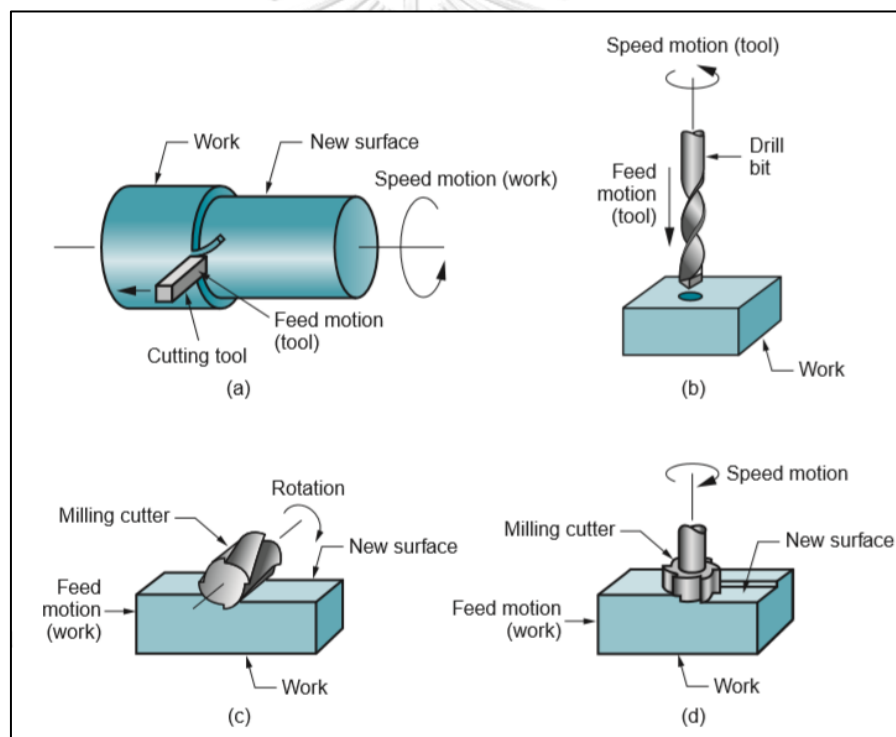
กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (Cutting Tools) ในการกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานมีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ นิยมใช้มากในการขึ้นรูปโลหะเรียกว่า กระบวนการตัดโลหะหรือกระบวนการกำจัดเนื้อโลหะ (Metal Removal Process) กระบวนการตัดเฉือนเป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีความสำคัญกระบวนการหนึ่งในเชิงพาณิชย์และเชิงเทคโนโลยี ดังนี้

- สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่วัสดุมีความหลากหลาย เช่น โลหะ (Metals) พลาสติกและวัสดุที่มีส่วนประกอบของพลาสติก (Plastic and Plastic Composites) และเซรามิก (Ceramics) เป็นต้น

- สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงเรขาคณิต เช่น ระนาบแบน (Flat Planes) รูกกลม (Round Holes) และทรงกระบอก (Cylinders) เป็นต้น และชิ้นงานที่ไม่ใช่รูปทรงเรขาคณิต เช่น สกรูเกลียว (Screw Thread) และช่องรูปตัวที (T-slots) เป็นต้น
- สามารถขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาดที่มีความแม่นยำสูงและให้พื้นผิวสำเร็จที่ดี เรียบสวย

แต่กระบวนการตัดเฉือนมีข้อเสียคือ ทำให้เกิดวัสดุสิ้นเปลืองในรูปเศษโลหะ (Chips) ที่มากและใช้เวลาขึ้นรูปนานเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ เช่น การหล่อ (Casting) การตีขึ้นรูป (Forging) เป็นต้น

กระบวนการตัดเฉือนประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก คือ การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัด (Milling) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการตัดเฉือน: (a) การกลึง (b) การเจาะ (c) การกัดแนวอน (d) การกัดปาดหน้า

กระบวนการตัดเฉือนสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์และสภาวะการตัดได้ 2 กลุ่ม คือ

1) การตัดหยาบ (Rough Cuts) เป็นการกำจัดเนื้อวัสดุในปริมาณมากออกจากชิ้นงานตั้งต้นอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด โดยใช้อัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูง แต่ความเร็วตัดต่ำ ที่อัตราป้อนตัด 0.40 – 1.25 mm/rev (0.015 – 0.050 in/rev) และความลึกตัด 2.5 – 20 mm (0.10 – 0.75 in)

2) การตัดละเอียด (Finish Cuts) เป็นการกำจัดเนื้อวัสดุเพื่อให้ชิ้นงานมีขนาด (Dimension) พิกัดความเผื่อ (Tolerance) และผิวสำเร็จ (Surface Finish) ที่ถูกต้องและสมบูรณ์ตามแบบที่ต้องการ โดยใช้อัตราป้อนตัดและความลึกตัดต่ำ แต่ความเร็วตัดสูง ที่อัตราป้อนตัด 0.125 – 0.40 mm/rev (0.005 – 0.015 in/rev) และความลึกตัด 0.75 – 2.00 mm (0.03 – 0.075 in)

2.1.5 กระบวนการกลึง (Turning process)

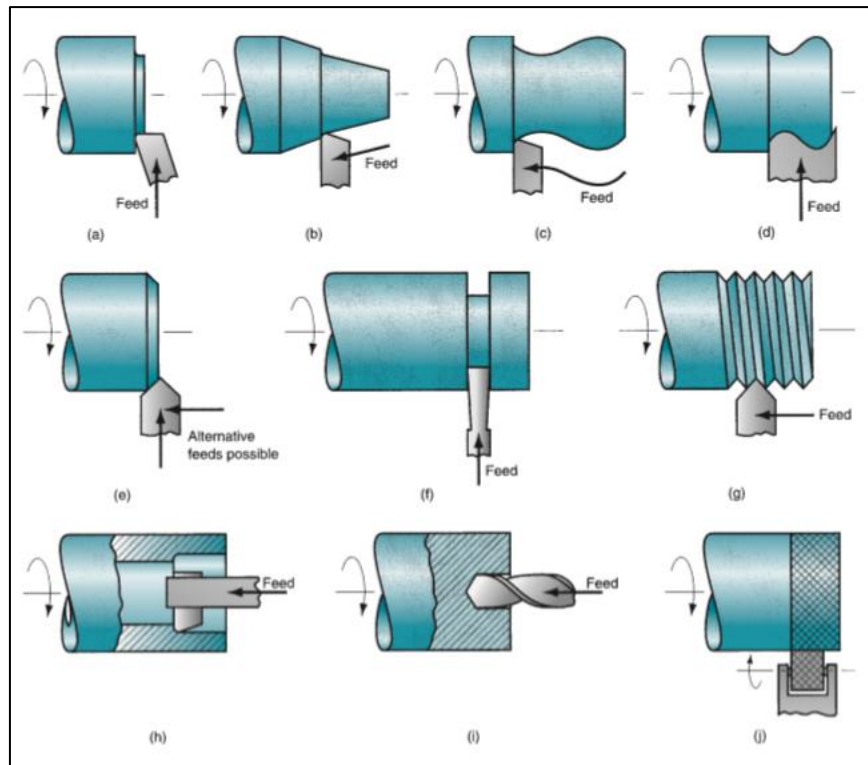
กระบวนการที่ใช้เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียว (Single Cutting Edge) ในการปอกผิวชิ้นงานขณะที่ชิ้นงานหมุนด้วยความเร็ว (Speed Motion) และมีดตัดเคลื่อนที่เข้าหาขนานกับแกนหมุนของชิ้นงาน (Axis of Rotation) ที่มีรูปทรงกระบอก (Cylindrical Shape)

การกลึงสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะและการขึ้นรูปชิ้นงานเป็น 3 ประเภท คือ

1) การกลึงผิวนอก (External Cuts) เช่น การกลึงปาดผิวหน้า (Facing) การกลึงปอกผิวนอก (Turning) การกลึงเกลียวนอก (Threading) การกลึงร่อง (Grooving) การกลึงร่องที่ผิวหน้า (Face Grooving) และการกลึงเรียว (Taper)

2) การกลึงภายใน (Internal Cuts) เช่น การเจาะรู (Drilling) การคว้านผิวเรียบ (Reaming) การกลึงร่องใน (Recessing) การคว้านรูใหญ่ (Boring) การกลึงเรียวใน (Tapping) และการกลึงตัดขาด (Parting Off)

3) การกลึงพิเศษที่ใช้อุปกรณ์เสริมอื่น ๆ เช่น การใช้งานกัดร่วมกับการกลึง (Mill-Turn) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กระบวนการกลึง: (a) การกลึงปาดหน้า (b) การกลึงเรียว (c) การกลึงตามเส้นขอบ (d) การกลึงขึ้นรูป (e) การกลึงลบคม (f) การกลึงตัดแต่ง (g) การกลึงเกลียว (h) การคว้านรู (i) การเจาะ (j) การทำปุม [31]

2.1.6 เครื่องมือตัด (Cutting Tool) [31]

เครื่องมือตัดหรือมีดตัดเป็นเครื่องมือที่สำคัญในกระบวนการตัดที่ส่งผลต่อขนาดและผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งแรงในการตัดและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดมีผลต่อความสามารถในการตัดชิ้นงานของเครื่องมือตัดหรือมีดตัด อาจเกิดการแตกหักหรืออ่อนตัวของมีดตัดได้เมื่อมีการใช้ งานมีดตัดที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นการเลือกใช้งานมีดตัดจึงจะต้องพิจารณาคุณสมบัติของมีดตัดซึ่ง ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ วัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและรูปร่างของมีดตัด

1) วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool Material) มีคุณสมบัติที่สำคัญ 4 ประการ คือ

- **ความแกร่ง (Toughness)** เป็นความสามารถของวัสดุที่จะรับพลังงานได้โดยไม่เกิดการพังหรือแตกหัก ซึ่งมีลักษณะผสมระหว่างความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Ductility)
- **ความแข็ง (Hot Hardness)** เป็นความสามารถในการคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้
- **ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Wear Resistance)** เป็นความสามารถของวัสดุในการต้านทานการสึกหรอส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น
- **ความเสถียรทางเคมี (Chemical Stability)** ความสามารถทางเคมีที่ไม่ทำปฏิกิริยากับชิ้นงานเพื่อหลีกเลี่ยงการสึกกร่อนของมีดตัด

วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon) เหล็กโลหะผสมต่ำ (Low Alloy Steel) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High-Speed Steel, HSS) โลหะผสมโคบอลต์ (Cast Cobalt Steel) ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbides) เซรามิก (Ceramics) เพชรสังเคราะห์ (Synthetic Diamond) และคิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic Boron Nitride, CBN) โดยแต่ละวัสดุมีคุณสมบัติและการใช้งาน ดังนี้

1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon) และเหล็กโลหะผสมต่ำ (Low Alloy Steel) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการทำมีดตัดช่วงแรก ๆ สามารถทำให้มีความแข็งได้สูงถึง 60 Rockwell C แต่ในปัจจุบันไม่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีดตัดชนิดนี้ตัดที่อุณหภูมิสูงได้ไม่ดี ยกเว้นกรณีการตัดที่ใช้ความเร็วตัดต่ำ ๆ เท่านั้น

1.2 เหล็กกล้าความเร็วสูง (High-Speed Steel, HSS) เป็นวัสดุที่ถูกพัฒนามาจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีดตัดชนิดนี้มีส่วนผสมของโลหะผสมมากขึ้น สามารถคงความแข็งของมีดตัดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ทำให้สามารถตัดชิ้นงานที่ความเร็วตัดสูงได้ เหล็กกล้าความเร็วสูงสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท โดยสถาบัน เหล็กกล้าอเมริกัน (AISI) คือ ประเภทที่ผสมทังสแตน (Tungsten Type) หรือเรียกว่าเหล็กเกรดที (T-Grade) และประเภทที่ผสมโมลิบดีนัม (Molybdenum Type) หรือเรียกว่าเหล็กเกรดเอ็ม (M-Grade)

1.3) โลหะผสมโคบอลท์ (Cast Cobalt Steel) ประกอบไปด้วยโคบอลท์ประมาณ 40 - 50% โครเมียมประมาณ 25 - 35% ทั้งสแตนประมาณ 15 - 20% และโลหะอื่น ๆ มีดตัดชนิดนี้จะถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อในแม่พิมพ์กราไฟต์และเจียรระไนให้มีรูปร่างและความคมตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน มีดตัดชนิดนี้มีความทนทานต่อการสึกกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าความเร็วสูง แต่ยังทนทานไม่เท่าซีเมนต์คาร์ไบด์ มีความแข็งแรงสูงกว่าซีเมนต์คาร์ไบด์ แต่แข็งแรงไม่เท่าเหล็กกล้าความเร็วสูง มีความแข็งในสภาวะการทำงานที่มีความร้อนสูงอยู่ระหว่างเหล็กกล้าความเร็วสูงและซีเมนต์คาร์ไบด์ ลักษณะการใช้งานเหมาะกับการตัดหยาบ (Heavy Rough Cuts) ที่ความเร็วตัดสูงและอัตราป้อนตัดสูง สามารถใช้ตัดหรือกัดชิ้นงานที่เป็นโลหะและอโลหะได้

1.4) ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbides) เป็นวัสดุที่ทำมาจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคโลหะผง (Powder Metallurgy Technique) โดยมีโคบอลท์ (Co) เป็นวัสดุประสานรวมกับส่วนผสมอื่น ๆ เช่น ไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และแทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) มีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมหลักเป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลท์จะใช้งานกัดชิ้นงานเหล็กหล่อและชิ้นงานที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากสามารถตัดที่ความเร็วสูงกว่ามีดตัดเหล็กกล้าความเร็วสูงและโลหะผสมโคบอลท์ได้ แต่อายุการใช้งานของมีดตัดชนิดนี้ค่อนข้างสั้นจากการสึกหรอแบบ Crater จึงไม่เหมาะกับการตัดชิ้นงานเหล็ก ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาโดยการเติมไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และแทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) จึงสามารถตัดชิ้นงานเหล็กได้ ซีเมนต์คาร์ไบด์สามารถแบ่งตามชนิดชิ้นงานได้ 2 กลุ่ม คือ

1.4.1) มีดตัดเกรดสำหรับตัดชิ้นงานที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-steel Cutting Grade) เช่น อะลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง แมกนีเซียม เหล็กหล่อ เป็นต้น มีดตัดชนิดนี้มีส่วนผสมหลักคือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลท์ (WC-Co)

1.4.2) มีดตัดเกรดสำหรับตัดชิ้นงานเหล็ก (Steel Cutting Grade) เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สแตนเลสหรือโลหะผสมกลุ่มเหล็กอื่น ๆ มีดตัดชนิดนี้มีส่วนผสมของไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และแทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC)

ซีเมนต์คาร์ไบด์มีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

- ความทนแรงอัดสูง (High Compressive Strength)
- ความทนแรงดึงต่ำถึงปานกลาง (Low-To-Moderate Tensile Strength)
- ความแข็งสูง (High Hardness)

- ความแข็งสูงในสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง (High Hot Hardness)
- ความทนทานต่อการสึกกร่อนสูง (High Wear Resistance)
- การนำความร้อนสูง (High Thermal Conductivity)
- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง (High Modulus of Elasticity)
- ความแกร่ง (Toughness) สูงแต่ต่ำกว่าเหล็กกล้าความเร็วสูง

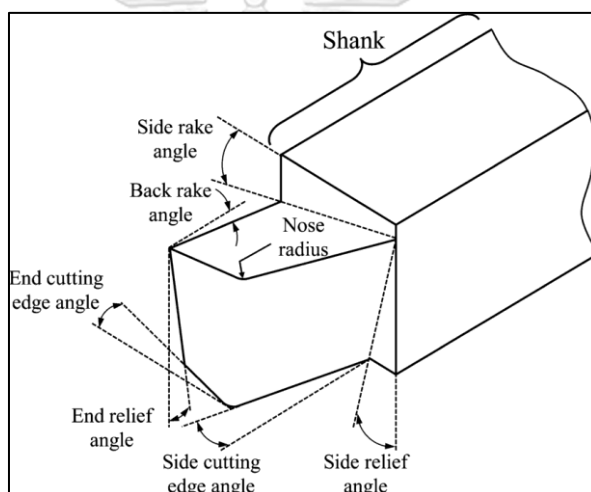
คาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbides) เป็นซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ถูกเคลือบผิวด้วยวัสดุที่ทนต่อการสึกกร่อน เช่น ไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ความหนาของการเคลือบผิวจะอยู่ในช่วง 0.0001 - 0.0005 นิ้ว (2.5 - 13 μm) เนื่องจากการเคลือบที่หนาเกินไปจะทำให้มีดตัดเปราะและแตกง่าย การใช้งานเหมาะกับชิ้นงานเหล็กหล่อและเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงและกระบวนการตัดที่ความเร็วสูง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนามีดตัดให้สามารถตัดชิ้นงานโลหะนอกกลุ่มเหล็กได้โดยการเคลือบผิววัสดุต่างชนิดกัน เช่น โครเมียมคาร์ไบด์ (CrC) เซอร์โคเนียมไนไตรด์ (ZrN) และเพชร (Diamond) ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานมีดตัดได้

1.5) เซรามิก (Ceramics) เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมหลักคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีเกรนละเอียดในปริมาณ 99% และมีออกไซด์อื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO) เซรามิกผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปที่ความดันและอุณหภูมิสูง (Sintering Process) โดยไม่ใช้วัสดุประสาน มีดตัดชนิดนี้เหมาะกับการกลึงเหล็กหล่อและเหล็กกล้าที่ความเร็วสูงโดยเฉพาะการกลึงละเอียดที่ต้องการผิวชิ้นงานที่ดีมาก การใช้งานในการขัดละเอียด (Abrasive) เช่น การเจียรระโน (Grinding) แต่ไม่เหมาะกับการตัดหยาบ เนื่องจากมีความแกร่งต่ำ

1.6) เพชรสังเคราะห์ (Synthetic Diamond) เนื่องจากเพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุด ซึ่งมีความแข็งมากกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ประมาณ 3 - 4 เท่า และความแข็งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมีดตัด ดังนั้นเพชรจึงถูกพิจารณานำมาใช้ในการทำมีดตัด เพชรสังเคราะห์ขึ้นรูปโดยการกดอัดเพชรที่มีเกรนละเอียดมากที่ความดันและอุณหภูมิสูงโดยไม่ใช้วัสดุประสาน มีดตัดชนิดนี้เหมาะกับการกัดชิ้นงานที่ไม่ใช่เหล็กที่ความเร็วสูงและการขัดผิวชิ้นงานที่ไม่ใช่โลหะ เช่น ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) และกราไฟท์ (Graphite) เป็นต้น เนื่องจากคาร์บอนในเพชรจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเหล็กจึงไม่นิยมใช้มีดตัดชนิดนี้กับชิ้นงานเหล็ก

1.7) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic Boron Nitride, CBN) เป็นวัสดุที่มีความแข็งรองลงมาจากเพชร มีดัดดชนิดนี้ขึ้นรูปโดยการกัดอัดที่ความดันและอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปมักใช้ในการเคลือบผิวมีดตัดที่ทำมาจากซีเมนต์คาร์ไบด์ เนื่องจากคิวบิกโบรอนไนไตรด์ไม่ทำปฏิกิริยากับเหล็กและนิกเกิลเหมือนกับเพชรจึงนิยมใช้ในการกัดชิ้นงานเหล็กกล้าและโลหะผสมนิกเกิล

2) รูปร่างของมีดตัด (Tool Geometry) มีดตัดแบ่งเป็น 2 ชนิดหลัก คือ มีดตัดคมตัดเดี่ยว (Single-Point Tools) และมีดตัดหลายคมตัด (Multiple-Cutting-Edge Tools) มีดตัดคมตัดเดี่ยวจะใช้ในการกลึง (Turning) การคว้าน (Boring) การไส (Shaping) และการไสยาว (Planing) ส่วนมีดตัดหลายคมตัดจะใช้ในการเจาะ (Drilling) การคว้านละเอียด (Reaming) การกัด (Milling) การแทงขึ้นรูป (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) ซึ่งรูปร่างของมีดตัดประกอบไปด้วย



รูปที่ 2.4 รูปร่างของมีดตัดคมเดี่ยว [34]

2.1) ผิวคายเศษวัสดุ (Rake Face) คือ บริเวณผิวหน้ามีดตัดที่คายเศษโลหะออกจากชิ้นงาน มีมุมสำคัญ 2 มุม คือ มุมคายเศษด้านหลัง (Back Rake Angle, α_b) และมุมคายเศษด้านข้าง (Side Rake Angle, α_s) ซึ่งใช้ในการกำหนดทิศทางการไหลของเศษโลหะบนผิวคายเศษวัสดุ

เมื่อพิจารณามุมคายเศษด้านหลังเท่ากับศูนย์ จะเกิดมุมคายเศษได้ 3 แบบ คือ

- **มุมคายเศษเป็นกลาง (Neutral Rake Angle)** เมื่อมุมคายเศษด้านข้างเป็นศูนย์
- **มุมคายเศษเป็นบวก (Positive Rake Angle)** เมื่อมุมคายเศษด้านข้างเอียง ทำมุมเป็นบวกกับเส้นตั้งฉากกับคมตัดในขณะตัด ส่งผลให้มุมเฉือนที่มาก ช่วยลดแรงในการตัด ทำให้ได้ผิวชิ้นงานดี เนื่องจากเศษโลหะไหลออกจากชิ้นงานดี
- **มุมคายเศษเป็นลบ (Negative Rake Angle)** เมื่อมุมคายเศษด้านข้างเอียง ทำมุมเป็นลบกับเส้นตั้งฉากกับคมตัดในขณะตัด ส่งผลให้มุมเฉือนน้อยลง เกิดแรงตึงมากขึ้น ทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ไม่ดี

2.2) ผิวหลบ (Flank Face) คือ บริเวณผิวหน้ามีดตัดที่เป็นช่องว่าง (Clearance) ระหว่างมีดตัดกับผิวหน้าชิ้นงานเพื่อป้องกันการขัดถูระหว่างผิวชิ้นงานกับมีดตัด ซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพผิวชิ้นงานเสียไป มีมุมสำคัญ 2 มุม คือ มุมหลบด้านหน้า (End Relief Angle, ERA) และมุมหลบด้านข้าง (Side Relief Angle, SRE) ซึ่งใช้ในการกำหนดระยะห่างระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงาน

2.3) มุมของคมตัด (Cutting Edge Angle) แบ่งออกเป็น 2 มุม คือ มุมข้างคมตัด (Side Cutting Edge Angle, SCEA) ซึ่งใช้ในการลดแรงกระแทกของมีดตัดกับชิ้นงาน และมุมปลายคมตัด (End Cutting Edge Angle, ECEA) ซึ่งใช้ในการลดแรงเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงาน

2.4) รัศมีจุมุมมีด (Nose Radius, NR) คือ ส่วนของมุมมีดตัด (Tool Point) ที่มีรัศมีคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งมีผลต่อพื้นผิวชิ้นงานโดยรัศมีที่เล็กจะส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานขรุขระ รัศมีที่ใหญ่จะส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานดี แต่ถ้ารัศมีใหญ่เกินไปอาจเกิด chatter ขณะตัดส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานขรุขระได้

2.1.7 เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions)

ในกระบวนการกลึงเงื่อนไขการตัดเป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน เงื่อนไขการตัดประกอบไปด้วยความเร็วตัด (Cutting Speed) ความเร็วรอบ (Spindle Speed) อัตราป้อนตัด (Feed Rate) ความลึกตัด (Depth of Cut) และมุมคายเศษวัสดุ (Rake Angle)

1) **ความเร็วตัด** (Cutting Speed, V) คือ ความเร็วของผิวชิ้นงานขณะมีดตัดเคลื่อนที่ตัดผ่าน มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที (m/min) หรือฟุตต่อนาที (ft/min)

$$V_c = \frac{V}{\cos\theta} \quad (2.1-1)$$

โดย V_c = ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)

V = ความเร็วผิว (เมตรต่อนาที)

θ = มุมระหว่างความเร็วตัดกับความเร็วผิว (องศา)

แต่เนื่องจากความเร็วที่เกิดจากการป้อนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วผิวชิ้นงาน ดังนั้น $\cos\theta \approx 1$ จะได้ว่า

$$V_c = V \quad (2.1-2)$$

2) **ความเร็วรอบ** (Spindle Speed, N) คือ จำนวนรอบที่ชิ้นงานหมุนในเวลา 1 นาที มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)

$$N = \frac{1000V}{\pi D_o} \quad (2.1-3)$$

โดย N = ความเร็วรอบ (มิลลิเมตรต่อรอบ)

V = ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานก่อนตัด (มิลลิเมตร)

3) **อัตราป้อนตัด** (Feed Rate, f) คือ อัตราการเดินของมีดตัดในทิศทางตามแกนหมุนของชิ้นงาน หรือระยะที่มีดตัดเคลื่อนที่ต่อการหมุนของชิ้นงาน 1 รอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev) หรือ นิ้วต่อรอบ (in/rev) การเคลื่อนที่ด้วยอัตราป้อนตัดสามารถคำนวณหาความเร็วป้อน (Feed Speed) และความหนาของเศษโลหะ (f_a) ได้ดังนี้

ความเร็วป้อน (Feed Speed) ;

$$V_f = f \cdot N \quad (2.1-4)$$

โดย V_f = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)

f = อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)

N = ความเร็วรอบ (มิลลิเมตรต่อรอบ)

ความหนาของเศษโลหะ (f_a) ;

$$f_a = f \cdot \cos\theta_s \quad (2.1-5)$$

โดย f_a = ความหนาของเศษโลหะ (มิลลิเมตร)

f = อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)

θ_s = มุมข้างคมตัด (องศา)

4) ความลึกตัด (Depth of Cut) คือ ระยะลึกในการตัดชิ้นงานหรือความหนาของชิ้นงานที่ต้องการตัดในแนวรัศมีและตั้งฉากกับแกนหมุนของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) หรือ นิ้ว (in) ความลึกตัดสามารถคำนวณหาความกว้างของการตัด (b) ได้ดังนี้

$$d = \frac{D_o - D_f}{2} \quad (2.1-6)$$

โดย d = ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานก่อนตัด (มิลลิเมตร)

D_f = เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานหลังตัด (มิลลิเมตร)

ความกว้างของการตัด (b) ;

$$b = \frac{d}{\cos\theta_s} \quad (2.1-7)$$

โดย b = ความกว้างของการตัด (มิลลิเมตร)

d = ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

θ_s = มุมข้างคมตัด (องศา)

5) มุมคายเศษวัสดุ (Rake Angle) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ มุมคายเศษวัสดุเป็นบวก (Positive Rake Angle) และมุมคายเศษวัสดุเป็นลบ (Negative Rake Angle) โดยมุมคายเศษวัสดุเป็นบวกจะเกิดมุมเฉือนที่มาก ใช้แรงตัดที่น้อย มีผลสำเร็จชิ้นงานที่ได้จึงดี เนื่องจากเศษโลหะไหล

ออกจากชิ้นงานได้ดี ในขณะที่มุมคายเศษวัสดุเป็นลบจะเกิดมุมเฉือนที่น้อย ใช้แรงตัดที่มาก เศษโลหะไหลออกจากชิ้นงานได้ไม่ดี ผิวสำเร็จชิ้นงานที่ได้จึงไม่ดี

นอกจากนี้จากปัจจัยข้างต้นสามารถคำนวณหาอัตราการกำจัดโลหะ (Metal Removal Rate) และเวลาในการตัด (Cutting Time) ได้ดังนี้

อัตราการกำจัดโลหะ (Metal Removal Rate, Z_w) คือ ปริมาณวัสดุที่สามารถตัดได้ต่อหน่วยเวลา

$$Z_w = 1000 \cdot f \cdot d \cdot V \quad (2.1-8)$$

โดย Z_w = อัตราการกำจัดโลหะ (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที)

f = อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)

d = ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

V = ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)

เวลาในการตัด (Cutting Time, T_m) คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนมีดตัดจากตำแหน่งเริ่มต้นไปตำแหน่งสุดท้ายของการตัด มีหน่วยเป็น นาที (min)

$$T_m = \frac{L}{V_f} \quad (2.1-9)$$

โดย T_m = เวลาในการตัด (นาที)

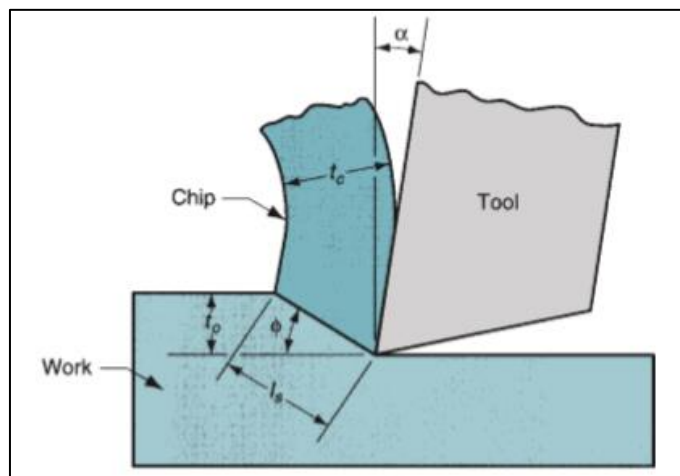
L = ความยาวของส่วนที่ตัด (มิลลิเมตร)

V_f = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)

ผลที่ได้จากการตัดมีดังนี้

- ขนาดของชิ้นงาน (Dimension)
- ผิวสำเร็จของชิ้นงาน (Surface Finish)
- เศษโลหะ (Chips)
- การสึกหรอของมีดตัด (Tool Wear)
- ลักษณะความถูกต้องของรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงาน (Geometrical Accuracy)

2.1.8 แบบจำลองกลไกการตัด (Orthogonal Cutting Model)



รูปที่ 2.5 การจำลองกลไกกระบวนการตัดรูป 2 มิติ [31]

การจำลองกลไกกระบวนการตัดในรูป 2 มิติ ที่คมตัด (Cutting Edge) อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วตัด (Cutting Speed) เมื่อมีดตัดลงในเนื้อวัสดุจะเกิดเศษโลหะ (Chips) ขึ้นตามแนวระนาบเฉือน (Shear Plane) ที่ทำมุมกับผิวชิ้นงาน มุมนี้เรียกว่า มุมเฉือน (Shear Angle, ϕ) ส่วนมุมคายเศษโลหะ (Rake Angle, α) จะเป็นมุมที่กำหนดทิศทางไหลของเศษโลหะที่เกิดจากการตัดชิ้นงาน และมุมหลบ (Relief Angle) เป็นมุมที่อยู่ระหว่างผิวหลบ (Flank Face) ของมีดตัดกับผิวใหม่

การตัดเกิดขึ้นเมื่อคมตัดสัมผัสกับชิ้นงานและเกิดเศษโลหะไหลออกจากชิ้นงาน บริเวณระนาบเฉือนวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) โดยระหว่างการตัดคมตัดจะอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าระดับผิวชิ้นงานเดิม โดยมีระยะเท่ากับความลึกของการตัดหรือความหนาเริ่มต้นของเศษโลหะ (t_0) และเศษโลหะใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาเพิ่มขึ้น (t_c) อัตราส่วนระหว่างความหนาเริ่มต้นกับความหนาใหม่เรียกว่า อัตราส่วนเศษโลหะ (Chip Ratio, r)

$$r = \frac{t_0}{t_c} \quad (2.1-10)$$

โดย r = อัตราส่วนระหว่างความหนาเริ่มต้นกับความหนาใหม่
 t_0 = ความลึกของการตัดหรือความหนาของเศษโลหะเริ่มต้น (มิลลิเมตร)
 t_c = ความหนาของเศษโลหะใหม่ (มิลลิเมตร)

ค่า r มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากความหนาของเศษโลหะใหม่มีขนาดมากกว่าความหนาของเศษโลหะเริ่มต้น กรณีค่า r มีค่าน้อยกว่า 1 มาก เช่น 0.3 – 0.4 แสดงว่ามุมเฉือนมีค่าน้อย ระบายเฉือนกว้างจากมุมคายเศษโลหะที่น้อย ใช้แรงตัดสูงและเกิดการสั่นสะเทือน เศษโลหะมีความหนามากจึงไหลออกได้ไม่ดี ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบต่ำ กรณีค่า r มีค่าน้อยกว่า 1 เล็กน้อย เช่น 0.7 – 0.8 แสดงว่ามุมเฉือนมีค่ามาก ระบายเฉือนแคบจากมุมคายเศษโลหะที่มาก ใช้แรงตัดต่ำและเกิดการสั่นสะเทือนน้อย เศษโลหะมีความบางและยาวจึงไหลออกได้ดี ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบสูง

ถ้ากำหนดให้ l_s คือ ความยาวของระนาบเฉือน มุมระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$l_s = \frac{t_0}{\sin \theta} \quad (2.1-11)$$

จะได้ $t_0 = l_s \cdot \sin \theta$

$$l_s = \frac{t_c}{\cos(\theta - \alpha)} \quad (2.1-12)$$

จะได้ $t_c = l_s \cdot \cos(\theta - \alpha)$

เมื่อแทนค่า $t_0 = l_s \cdot \sin \theta$ และ $t_c = l_s \cdot \cos(\theta - \alpha)$ ลงในสมการอัตราส่วนเศษโลหะ

$$\frac{t_0}{t_c} = \frac{l_s \cdot \sin \theta}{l_s \cdot \cos(\theta - \alpha)}$$

$$\frac{t_0}{t_c} = \frac{\sin \theta}{\cos(\theta - \alpha)} \quad (2.1-13)$$

จาก $\cos(\theta - \alpha) = \cos \theta \cdot \cos \alpha + \sin \theta \cdot \sin \alpha$

จะได้ $\tan \theta = \frac{\frac{t_0}{t_c} \cdot \cos \alpha}{1 - (\frac{t_0}{t_c} \cdot \sin \alpha)}$ (2.1-14)

จากอัตราส่วนเศษโลหะ $r = \frac{t_o}{t_c}$ แทนลงในสมการ 2.1-14

$$\text{จะได้} \quad \tan \phi = \frac{r \cdot \cos \alpha}{1 - (r \cdot \sin \alpha)} \quad (2.1-15)$$

โดย ϕ = มุมระนาบเฉือน (องศา)

α = มุมคายเศษโลหะ (องศา)

r = อัตราส่วนเศษโลหะ (มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ)

จากสมการ 2.1-15 เมื่อมุมคายเศษโลหะมากขึ้น มุมระนาบเฉือนจะมีค่ามากขึ้น เศษโลหะมีความหนาลดลง สรุปได้ว่ามุมคายเศษโลหะมีผลต่อมุมระนาบเฉือน

การหาพื้นที่ระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t_o \cdot b}{\sin \phi} \quad (2.1-16)$$

โดย A_s = พื้นที่ระนาบเฉือน (ตารางมิลลิเมตร)

t_o = ความลึกของการตัดหรือความหนาของเศษโลหะเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

b = ความกว้างของการตัด (มิลลิเมตร)

ϕ = มุมระนาบเฉือน (องศา)

2.1.9 การเกิดเศษโลหะ (Chip Formation)

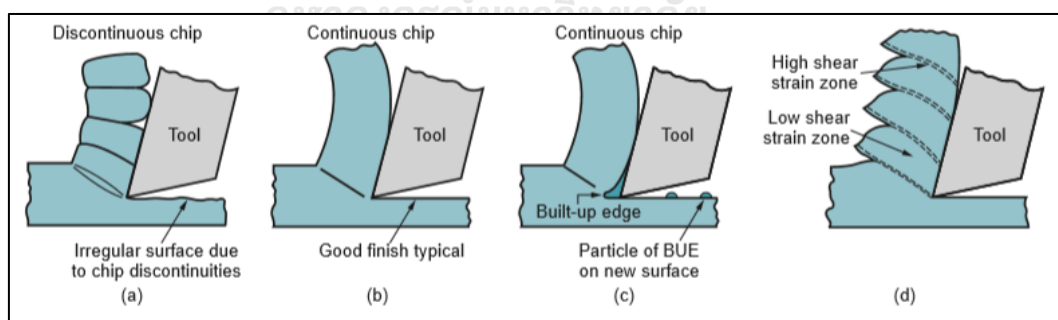
เศษโลหะเป็นผลที่ได้จากการตัดชิ้นงานโลหะ ซึ่งเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันและชนิดวัสดุชิ้นงานมีผลต่อลักษณะเศษโลหะที่เกิดขึ้น โดยเศษโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Chip) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานมีความแข็งและเปราะ (Hard and Brittle Materials) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่สามารถรองรับความเค้นเฉือนได้ เช่น เหล็กหล่อ (Cast Iron) ทองเหลือง (Brass) และบรอนซ์ (Bronze) เป็นต้น เมื่อถูกตัดด้วยความเร็วตัดต่ำ ความเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมีค่าสูง (High Tool-chip Friction) อัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูง เศษโลหะที่เกิดขึ้นจึงแตกเป็นส่วน ๆ (Separated Segments) ส่งผลให้ผิวชิ้นงานไม่เรียบ

2) **เศษโลหะแบบต่อเนื่อง** (Continuous Chip) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานมีความเหนียว (Ductile Materials) เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) อะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys) และสแตนเลส (Stainless) เป็นต้น เมื่อถูกตัดด้วยความเร็วตัดสูง มีดตัดมีความคมจึงมีความเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานต่ำ อัตราป้อนตัดและความลึกตัดต่ำ เศษโลหะที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะยาวต่อเนื่อง ส่งผลให้ผิวชิ้นงานเรียบ

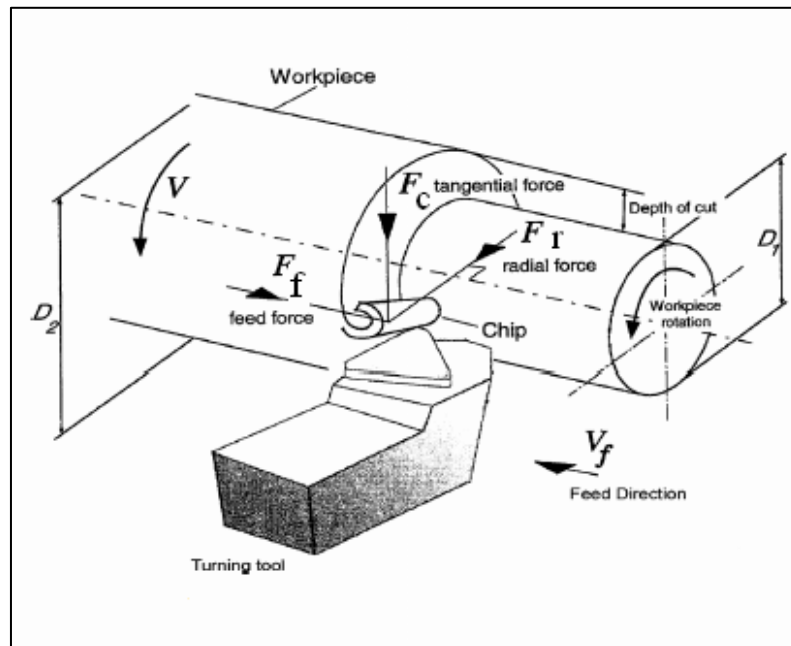
3) **เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่ห่อมติดคมตัด** (Continuous Chip with Built-up Edge) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานมีความเหนียวและตัดด้วยความเร็วตัดต่ำถึงปานกลาง ความเสียดทานระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานทำให้เศษโลหะบางส่วนห่อมติดผิวของมีดตัด (Rake Face) ลักษณะเรียกว่า Built-up Edge (BUE) ซึ่งส่วนนี้โดยทั่วไปจะถูกกำจัดออกไปกับเศษโลหะ แต่มีบางส่วนที่เหลืออยู่และเกาะติดกับผิวหน้าชิ้นงาน ส่งผลให้ผิวชิ้นงานขรุขระ ไม่เรียบ และทำให้อายุการใช้งานมีดตัดสั้นลง

4) **เศษโลหะแบบฟันเลื่อย** (Serrated Chip) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานมีความต้านทานอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความร้อนสูงขึ้น เช่น ไททาเนียมผสม (Titanium Alloys) โลหะผสมพิเศษที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลัก (Nickel-based Superalloys) และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steels) เป็นต้น เมื่อมีการตัดแบบวงจักรที่มีการสลับเปลี่ยนระหว่างความเครียดเฉือนสูงและความเครียดเฉือนต่ำ เศษโลหะที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะกึ่งต่อเนื่องคล้ายฟันเลื่อย



รูปที่ 2.6 ประเภทของเศษโลหะ: (a) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (b) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (c) เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่ห่อมติดคมตัด (d) เศษโลหะแบบฟันเลื่อย [31]

2.1.10 แรงในการตัดและสัญญาณแรงตัด



รูปที่ 2.7 แรงตัดในกระบวนการกลึง [35]

แรงในการตัดประกอบไปด้วย 3 แรงหลัก คือ

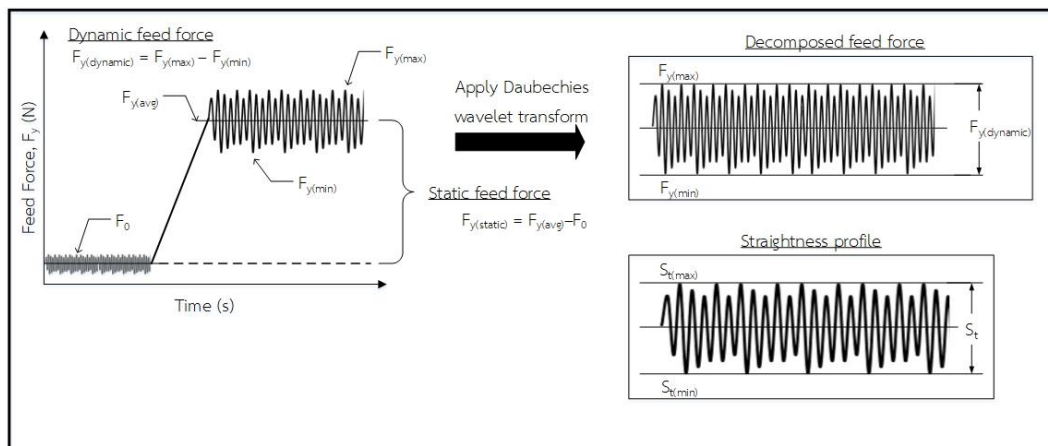
- 1) **แรงตัดรัศมี** (Radial Force, F_r หรือ F_x) เป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีที่มีทิศทางกระทำกับชิ้นงาน สามารถนำมาคำนวณหาระยะการชดเชยการแอ่นตัวของชิ้นงานขณะตัดได้
- 2) **แรงป้อนตัด** (Feed Force, F_f หรือ F_y) เป็นแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางกับการป้อนตัด สามารถนำมาคำนวณหากำลังในการป้อนตัดชิ้นงานของเครื่องจักรกลได้
- 3) **แรงตัดหลัก** (Main Force, F_c หรือ F_z) เป็นแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางกับความเร็วตัด สามารถนำมาคำนวณหากำลังในการตัดชิ้นงานของเครื่องจักรกลได้

เซนเซอร์วัดแรงที่ใช้คือ ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) และใช้เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) ในการขยายสัญญาณแรงตัดที่วัดได้ สามารถแบ่งแรงตัดที่วัดได้เป็น 3 แรง ดังนี้

- แรงตัดศูนย์ คือ แรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง อาจเกิดจากสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์
- แรงตัดพลวัต (Dynamic Force) คือ แรงที่เกิดขึ้นขณะตัดจริง

- แรงตัดสถิต (Static Force) คือ แรงตัดเฉลี่ยที่เป็นผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์

2.1.11 การประยุกต์ใช้แรงป้อนตัดสถิตและแรงป้อนตัดพลวัตสำหรับทำนายความตรงของชิ้นงาน



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงาน

ในการคำนวณจะพิจารณาค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ของแรงป้อนตัดพลวัตในโดเมนเวลา (Time Domain) โดยการนำค่าแรงป้อนตัดพลวัตมากที่สุด ($F_{y(max)}$) ลบด้วยค่าแรงป้อนตัดพลวัตน้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) ซึ่งสัมพันธ์กับการวัดความตรงผิวที่พิจารณาจากความสูงระหว่างความขรุขระผิวสูงที่สุด (Max) กับความขรุขระผิวดำที่สุด (Min) เนื่องจากเงื่อนไขการตัดมีผลต่อแรงตัดพลวัตและส่งผลกระทบต่อผิวชิ้นงาน ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงถูกประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัด โดยการนำผลต่างระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตมากที่สุด ($F_{y(max)}$) และแรงป้อนตัดพลวัตน้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) เทียบกับแรงป้อนตัดสถิต ($F_{y(static)}$) ดังสมการ 2.1-17

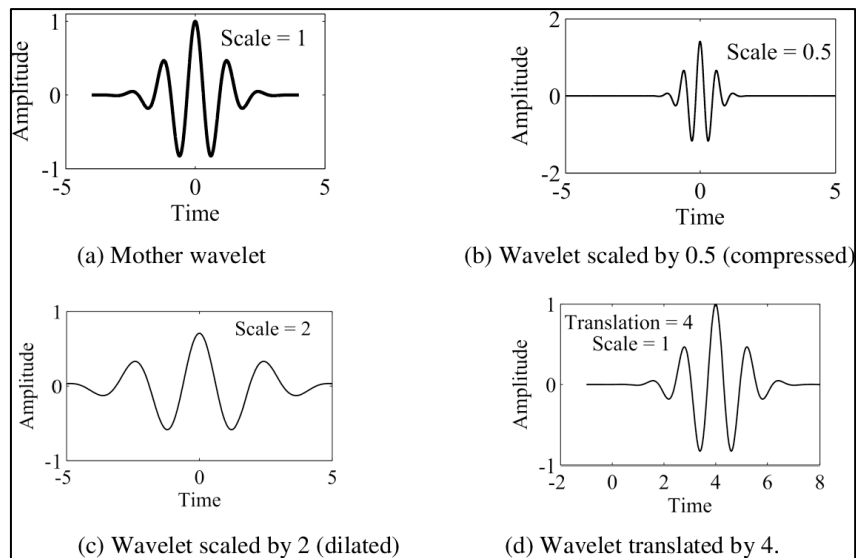
$$\text{อัตราส่วนแรงตัด} = \frac{F_{y(dynamic)}}{F_{y(static)}} = \frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(static)}} \quad (2.1-17)$$

2.1.12 การแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform)

สัญญาณแรงตัดที่วัดได้ในกระบวนการตัดจะประกอบไปด้วยสัญญาณแรงตัดจริงและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ (Noises) เช่น สัญญาณการแตกหักของเศษโลหะ สัญญาณการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ เป็นต้น ซึ่งสัญญาณรบกวนเหล่านี้ส่งผลต่อการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการนำสัญญาณแรงตัดไปทำนายความตรงในภายหลังได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการด้วยวิธีการแปลงเวฟเลทก่อนที่จะนำสัญญาณแรงตัดไปวิเคราะห์ต่อไป

การแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform) [10] เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์หรือสังเคราะห์สัญญาณโดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปสู่โดเมนความถี่ (Frequency Domain) และสามารถแปลงจากโดเมนความถี่ไปโดเมนเวลาได้โดยการแปลงย้อนกลับ (Inverse Transform) หลักการของทั้งสองวิธีคือฟังก์ชันสามารถแทนด้วยผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic Function) ในขณะที่การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) [24] สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้เฉพาะโดเมนความถี่เท่านั้น นอกจากนี้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วยังไม่เหมาะกับการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่คงที่ (Non-stationary Signal) ที่คุณสมบัติของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา แต่การแปลงเวฟเลทสามารถวิเคราะห์สัญญาณได้ทั้งสัญญาณที่คงที่และสัญญาณที่ไม่คงที่ (Stationary and Non-stationary Signals) โดยการกรองสัญญาณและสร้างสัญญาณใหม่ระหว่างสัญญาณที่คงที่และสัญญาณที่ไม่คงที่ที่มีการผสมกัน

ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic Function) หรือฟังก์ชันเวฟเลทแม่ (Mother Wavelet Function) มีคุณสมบัติในการหดเข้า (Compressing) และการขยายออก (Dilation) โดยการปรับสเกล (Scaling, a) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation/Shifting, b) โดยที่การหดเข้าหรือการขยายเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเลท ส่วนการเลื่อนตำแหน่งเป็นการเลื่อนตำแหน่งการเกิดของคลื่นเวฟเลทบนแกนเวลา ดังตัวอย่างการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่งรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง: (a) เวฟเลทแม่ (b) เวฟเลทที่หดเข้าที่ค่าสเกล , $a = 0.5$ (c) เวฟเลทที่ขยายออกที่ค่าสเกล, $a = 2$ (d) เวฟเลทที่ขยายออกที่ค่าสเกล, $a = 1$ และเลื่อนตำแหน่ง, $b = 4$ [36]

ฟังก์ชันเวฟเลท (Wavelet Function, $\psi(t)$) [25] คือ คลื่นขนาดเล็ก (Small Wave) ที่ใช้จำแนกความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกัน สามารถเขียนแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ [22] ได้ดังนี้

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.1-18)$$

โดย $\psi_{a,b}(t)$ = ฟังก์ชันของเวฟเลทแม่ที่มีการปรับสเกล

a = ค่าของการปรับสเกล (Scaling)

b = ค่าของการเลื่อนตำแหน่ง (Translation/Shifting)

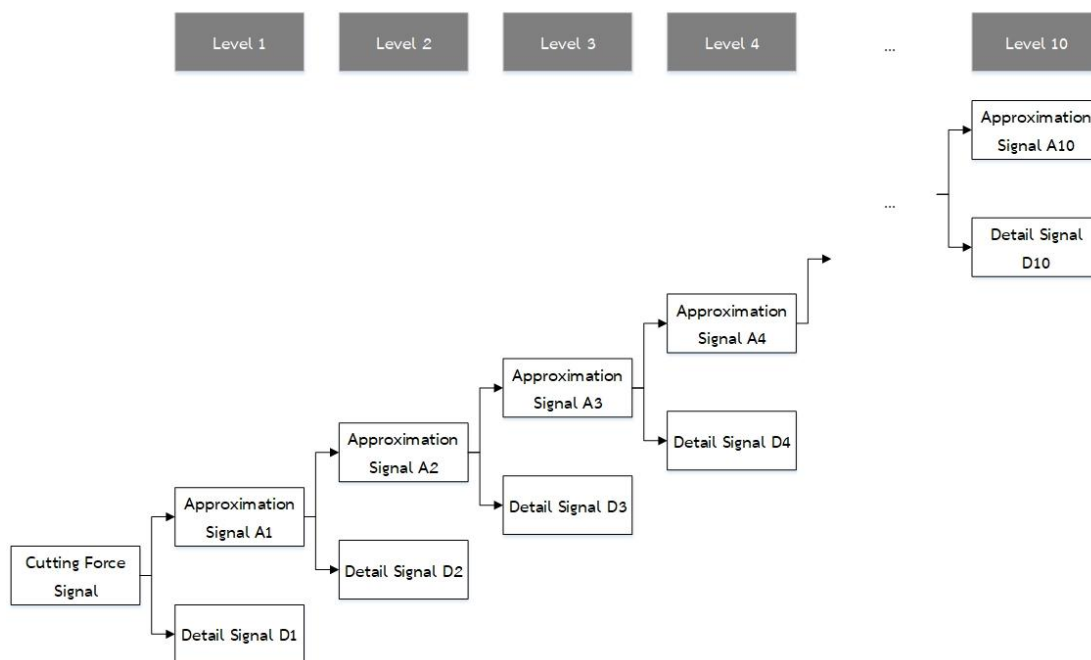
เวฟเลทที่ถูกปรับสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่าง ๆ พบว่ามีการปรับค่าเพื่อให้สัญญาณมีพลังงานเท่ากับเวฟเลทแม่ด้วยการคูณ $\frac{1}{\sqrt{a}}$

คุณสมบัติของฟังก์ชันเวฟเลท [37] ประกอบไปด้วย

- **จำนวนของโมเมนต์ที่หายไปหรือจำนวนของโมเมนต์ที่เป็นศูนย์** (The Number of Vanishing Moments or The Number of Zero Moments, NVM) ค่า NVM ที่เพียงพอในการวิเคราะห์เวฟเลทอย่างเป็นระบบจะช่วยให้การตรวจจับสัญญาณ ส่วนที่ผิดปกติและแยกสัญญาณออกจากส่วนที่ปกติออกได้ ซึ่งมีประโยชน์ในการประมวลผลชั่วคราว
- **ความสมมาตร (Symmetry)** เวฟเลทที่สมมาตร (Symmetric Wavelet) จะไม่มีการกำหนดทิศทางหรือตำแหน่งที่มุ่งเน้นที่ชัดเจน ขณะที่เวฟเลทที่ไม่สมมาตร (Asymmetric Wavelet) จะกำหนดน้ำหนักที่แตกต่างกันในทิศทางที่ต่างกันเพื่อช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณที่เร็วขึ้น
- **ความเป็นระเบียบ/ความสม่ำเสมอ (Regularity)** มีประโยชน์ในการประมาณคุณสมบัติของฟังก์ชันหรือสัญญาณ เมื่อเวฟเลทแม่มีความเป็นระเบียบหรือสม่ำเสมอ จะทำให้การสร้างสัญญาณใหม่มีความง่ายและราบรื่น
- **ขนาดการสนับสนุน (Supported Size)** เป็นตัวกำหนดความเร็วในการเข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาหรือความถี่เข้าใกล้อินฟินิตี้ ซึ่งเป็นการประมาณการการจำกัดเวลาและความถี่
- **การมีอยู่ของฟังก์ชันการปรับสเกล (Presence of Scaling Function)** มีความจำเป็นสำหรับการแทนค่าที่ความถี่ต่ำ

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลท [14] คือ กระบวนการแยกสัญญาณ (Wavelet Decomposition) ซึ่งสัญญาณตั้งต้น (Original Signal, $f(t)$) ที่จะนำมาวิเคราะห์จะถูกแยกสัญญาณออกเป็น 2 สัญญาณ คือ สัญญาณการประมาณ (Approximation Signal) และสัญญาณรายละเอียด (Detail Signal) โดยที่สัมประสิทธิ์การประมาณ (Approximation Coefficient) เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ $f(t)$ ที่มีความถี่ต่ำ ส่วนสัมประสิทธิ์รายละเอียด (Detail Coefficient) เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ $f(t)$ ที่มีความถี่สูง ในการแยกสัญญาณจะทำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงระดับที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณในระดับที่ 1 (Level 1) จะถูกแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณ A1 (Approximation Signal 1) และ D1 (Detail Signal 1) และในระดับที่ 2 (Level 2) สัญญาณ A1 จะถูกแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณ A2 และ D2 ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงระดับที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งการแยกสัญญาณในลักษณะนี้ทำให้สามารถแยกสัญญาณรบกวนที่ไม่

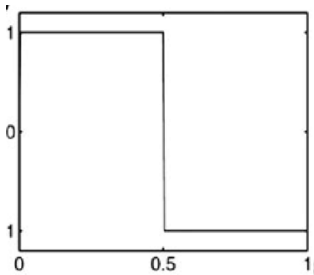
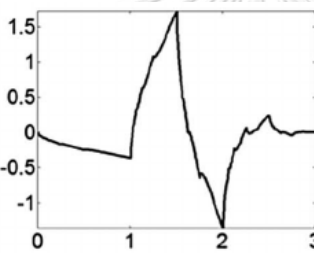
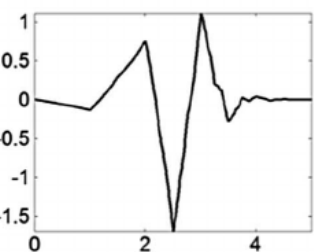
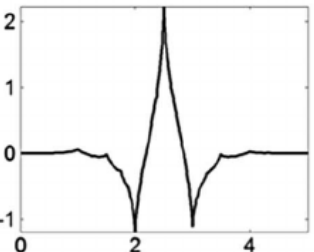
ต้องการออกจากสัญญาณเป้าหมายได้จากความถี่ที่ไม่เหมือนกัน ในขณะที่การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ไม่สามารถแยกได้

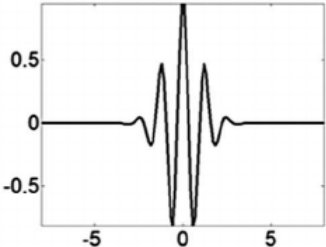
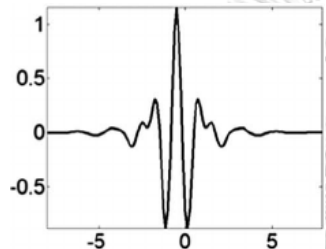


รูปที่ 2.10 กระบวนการแยกสัญญาณเวฟเลท 10 ระดับ

เวฟเลทสามารถแบ่งออกได้ลักษณะต่าง ๆ ที่เรียกว่า แฟมิลี (Family) โดยมีลักษณะคลื่นสัญญาณที่แตกต่างกัน เช่น Haar, Daubechies, Symlet, Coiflet, Morlet, Meyer เป็นต้น ซึ่งแต่ละแฟมิลีสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการแปลงได้เป็น 2 ประเภท [25] คือ การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform, CWT) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบหลายช่วงเวลาด้วยฟังก์ชันการหด (Contraction Function) และฟังก์ชันการขยาย (Dilatation Function) ตัวอย่างเวฟเลท เช่น Morlet, Meyer เป็นต้น มีลักษณะการใช้งานในการตรวจจบบระบบและการจำแนกข้อบกพร่องที่มีหลายตัว ส่วนการแปลงเวฟเลทแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform, DWT) จะเป็นการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองหลายจุดและตัวกรองพิเศษ ตัวอย่างเวฟเลท เช่น Haar, Daubechies, Symlet, Coiflet เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะการใช้งานในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข การวิเคราะห์สัญญาณ การควบคุมซ้ำ การจดจำเสียง การบีบอัดรูปหรือสัญญาณเสียง การกำจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น ทั้งนี้การเลือกใช้เวฟเลทในการวิเคราะห์สัญญาณจะต้องคำนึงถึงลักษณะของสัญญาณที่จะนำมาวิเคราะห์ว่ามีลักษณะคล้ายกับเวฟเลทแฟมิลีใด ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างลักษณะสัญญาณเวฟเลตแฟมิลีต่าง ๆ และลักษณะการใช้งาน [38]

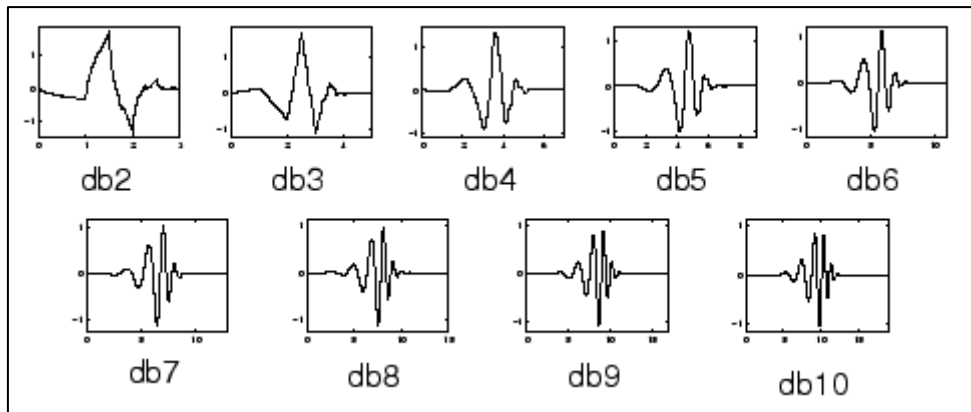
แฟมิลี	รูปสัญญาณ	ประเภทของ เวฟเลต	ลักษณะการใช้งาน
1. Haar	 <p>[26]</p>	การแปลงเวฟเลต แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform, DWT)	<ul style="list-style-type: none"> -การระบุระบบ (*เฉพาะ Haar เท่านั้น) (System Identification) -การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) -การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analysis) เช่น การบีบอัดสัญญาณเสียง (Audio Compression) การบีบอัดรูปและวิดีโอ (Image and Video Compression) -การจำแนกพื้นผิว (Texture Classification) -กำจัดสัญญาณรบกวน (Denoising) -การบีบอัดลายนิ้วมือ (Fingerprints Compression) -การตรวจติดตามแบบ ทันทีที่ (*เฉพาะ Daubechies เท่านั้น) (Real-time Feature Detection) -การควบคุมซ้ำ (Repetitive Control) -การจดจำเสียง (Speech Recognition)
2. Daubechies	 <p>[27]</p>		
3. Symlet	 <p>[27]</p>		
4. Coiflet	 <p>[27]</p>		

แฟมิลี	รูปสัญญาณ	ประเภทของ เวฟเลท	ลักษณะการใช้งาน
5. Morlet	 <p>[27]</p>	การแปลงเวฟเลท แบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform, CWT)	-การตรวจจ็บบระบบไม่เชิงเส้น (Detection of System Nonlinearities)
6. Meyer	 <p>[27]</p>		-ตัวกรองแบบปรับได้ (Adaptive Filters) -การจำแนกข้อบกพร่องหลาย ตัว (Multi-fault Classification)

2.1.13 เวฟเลทดอเบชีส์ (Daubechies Wavelet) [37]

เวฟเลทดอเบชีส์เป็นเวฟเลทที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงกล ถูกคิดค้นโดยนักวิจัย Ingrid Daubechies ซึ่งเป็นผู้บุกเบิกงานวิจัยในการแปลงเวฟเลท ชื่อสกุลของแฟมิลีนี้คือ 'db' มีจำนวนสมาชิก 9 สมาชิก ตั้งแต่ 'db2' ถึง 'db10' ส่วน 'db1' จะรู้จักในเวฟเลทแฟมิลีฮาร์ (Haar Wavelet) เลขที่ต่อท้ายชื่อสกุลคือ ลำดับ (Order, N) ซึ่งแสดงถึงค่า NVM ยิ่งมีลำดับที่สูงจะยิ่งทำให้การแยกสัญญาณที่ความถี่เฉพาะดีขึ้น สามารถเขียนชื่อทั่วไปของแฟมิลีนี้ได้คือ 'dbN'

แฟมิลีนี้มีคุณสมบัติเฉพาะคือ มีความเป็นเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) มีการสนับสนุนแบบกะทัดรัด (Compactly Supported) และมีค่า NVM สูง สมาชิกโดยส่วนใหญ่เป็นเวฟเลทแบบไม่สมมาตร



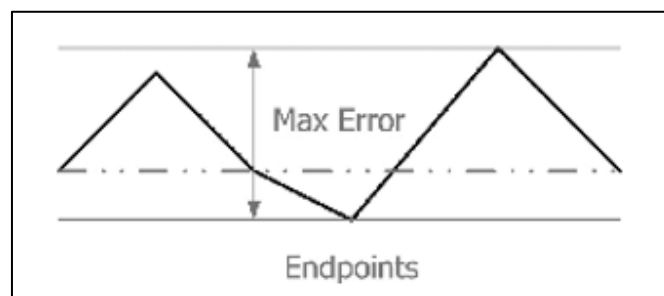
รูปที่ 2.11 สมาชิกของเวฟเลทตอเบชีส์ [39]

2.1.14 ความตรง (Straightness) [10]

ความตรง คือ ระยะระหว่างเส้นที่ขนานกันสองเส้นที่ครอบคลุมจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของเส้นที่พิจารณา ถ้ากำหนดให้แนวทางเดินในอุดมคติเป็นเส้นตรง การเกิดข้อผิดพลาดแนวตรงคือการเบี่ยงเบนใด ๆ จากแนวเส้นตรง เส้นตรงในแนวนอนเรียกว่า ความตรงแนวนอน (Horizontal Straightness) และเส้นตรงในแนวตั้งฉากเรียกว่า ความตรงแนวตั้งฉาก (Vertical Straightness)

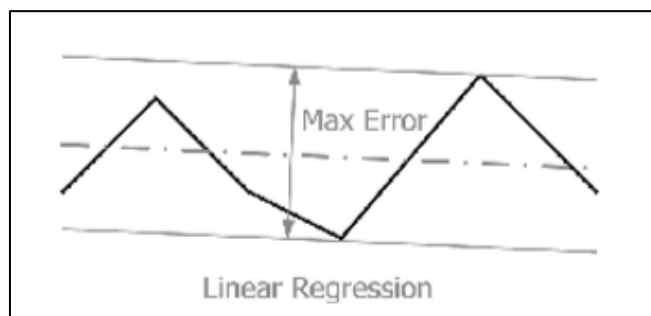
ความตรงสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

1) ความตรงแบบ Endpoints เกิดจากการลากเส้นตรง (เส้นประ) จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย ค่าความตรงแบบ Endpoints คือ ค่าระยะระหว่างเส้นคู่ขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านจุดสูงสุดและอีกเส้นลากผ่านจุดต่ำสุด

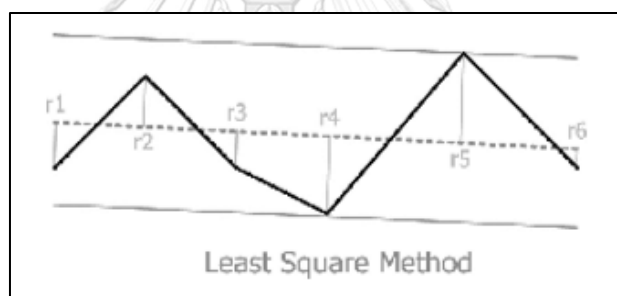


รูปที่ 2.12 ความตรงแบบ Endpoints [40]

2) ความตรงแบบ Linear Regression เกิดจากการลากเส้นตรง (เส้นประ) ด้วยวิธีการ Least Square โดยการสร้างเส้นตรงให้เป็นตัวแทนของข้อมูลจากการเฉลี่ย ตั้งสมมติฐานว่าเส้นตรง (เส้นประ) มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง (X แปรผันตรงกับ Y) ค่าความตรงแบบ Linear Regression คือ ระยะระหว่างเส้นขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านจุดสูงสุดและอีกเส้นลากผ่านจุดต่ำสุด

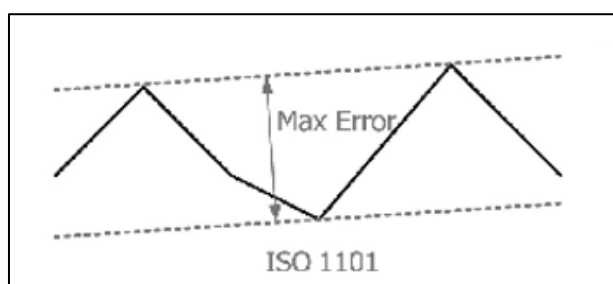


รูปที่ 2.13 ความตรงแบบ Linear Regression [40]



รูปที่ 2.14 วิธีการ Least Square [40]

3) ความตรงแบบ ISO 1101 หรือแบบ Minimum Zone เกิดจากการสร้างเส้นตรงคู่ขนาน (เส้นประ) โดยให้เส้นที่เราพิจารณานั้นอยู่ภายในเส้นคู่ขนาน ค่าความตรงแบบ ISO 1101 คือ ระยะระหว่างเส้นขนานที่สั้นที่สุด



รูปที่ 2.15 ความตรงแบบ ISO 1101 [40]

2.1.15 เครื่องจักรกลอัจฉริยะ (Intelligent Machines) [3]

เครื่องจักรกลอัจฉริยะถูกวิจัยและพัฒนาเพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตแบบอัจฉริยะ ซึ่งเครื่องจักรกลสามารถทำงานได้ด้วยตัวเองและสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรกล สิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ ในกระบวนการผลิตได้

วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะจากในอดีตถึงปัจจุบันมีนวัตกรรมทั้งหมด 3 ขั้นด้วยกัน ดังนี้

- **นวัตกรรมขั้นที่ 1** เกิดระหว่างยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรมโดยเครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะ และเครื่องไสแบบดั้งเดิมถูกพัฒนา
- **นวัตกรรมขั้นที่ 2** การพัฒนาการควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) โดยที่ความถูกต้องแม่นยำและการวัดซ้ำของเครื่องจักรกลแบบการควบคุมเชิงตัวเลขนี้มีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลที่เดินเครื่องด้วยคน ๆ เดียว การลดเวลาที่ไม่ได้ผลิตภาพ (Non-Productive Time) ในกระบวนการผลิตทำให้อัตราผลิตภาพสูงขึ้น ตัวอย่างเครื่องจักรกลซีเอ็นซี เช่น เครื่องกัด 5 แกน ที่ติดตั้งพร้อมเครื่องเปลี่ยนมีดตัดอัตโนมัติ (Automatic Tool Changer, ATC) และเครื่องเปลี่ยนพาเลตอัตโนมัติ (Automatic Pallet Changer, APC) เป็นต้น ทั้งนี้ความก้าวหน้าที่สำคัญคือ การควบคุมที่สามารถปรับค่าได้ในกระบวนการ (Adaptive Control, AC) และการควบคุมแบบป้อนกลับสารสนเทศได้ เช่น การติดตั้งเซนเซอร์เพื่อตรวจจับสถานะการทำงานต่าง ๆ ของเครื่องจักรกล เป็นต้น
- **นวัตกรรมขั้นที่ 3** การตระหนักถึงการควบคุมแบบอัจฉริยะที่เครื่องจักรกลอัจฉริยะสามารถตัดสินใจได้ด้วยตนเองบนพื้นฐานการตัดสินใจของเครื่องจักรกล ตอบสนองต่อคำสั่งที่ไม่ชัดเจนด้วยประสบการณ์และองค์ความรู้ที่ผ่านการรวบรวมมาเพื่อหาค่าสมรรถนะที่เหมาะสมได้



รูปที่ 2.16 วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ [3]

โครงสร้างของเครื่องจักรกลอัจฉริยะประกอบไปด้วย 4 ระดับ ดังนี้

ตารางที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ

ระดับที่	คำอธิบาย	วัตถุประสงค์	หมายเหตุ
1	การควบคุมตำแหน่ง	เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ในระบบแบบดั้งเดิม	
2	การแทรกคำสั่งหรืออินเทอร์โพลเตอร์	แนวแกนของเครื่องมือตัด	
3	การควบคุมแบบปรับได้	เพื่อตรวจติดตามสถานะภายในกระบวนการ	เพิ่มเข้ามาสำหรับระบบการควบคุมเครื่องจักรกล
4	ระดับการสั่งการ (Supervisory Level)	เพื่อประเมินผลการทำงานของเครื่องจักรกลและปรับปรุงผลการดำเนินการ	อัจฉริยะในอนาคต

2.1.16 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI)

ปัญญาประดิษฐ์ [41] เป็นแขนงหนึ่งของวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและสร้างระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งนำเสนอความอัจฉริยะรูปแบบต่าง ๆ เช่น ระบบที่สามารถเรียนแนวคิดและภาระหน้าที่ใหม่ ๆ ระบบที่สามารถให้เหตุผลและร่างข้อสรุปที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับสถานะของโลก ระบบที่สามารถเข้าใจภาษาทางธรรมชาติ การรับรู้ และตีความหมายตามทัศนวิสัยได้ และระบบที่สามารถทำงานที่ต้องอาศัยสติปัญญาเช่นเดียวกับมนุษย์ได้ เป็นต้น

สติปัญญา (Intelligence) เป็นผลรวมของการกระทำ ความสามารถ ความสำเร็จที่ผ่านมาซึ่งเกิดจากการจดจำจากเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน เป็นความสามารถที่

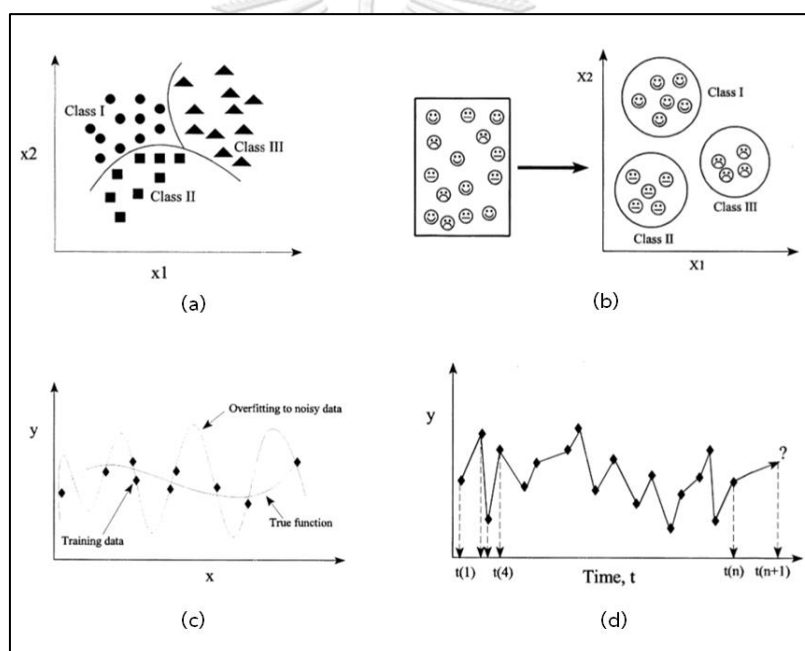
ทำให้มนุษย์แตกต่างจากสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ ประสบการณ์และความรู้จึงเปรียบเสมือนอาหารของสติปัญญา และสติปัญญานี้เองเป็นสิ่งที่นักวิจัยมากมายพยายามสร้างระบบขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานได้เสมือนกับสติปัญญาของมนุษย์ เช่น ระบบที่สามารถเรียนรู้จากตัวอย่าง ข้อมูลนำเข้า และจากประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง ระบบที่สามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ ปัญหาการจัดตารางงานที่หลากหลาย (Scheduling) ปัญหาการหาค่าตอบที่ดีที่สุด (Optimization) ปัญหาการวางแผนกลยุทธ์ที่ซับซ้อนทางทหาร (Complex Strategic Planning For The Military) และปัญหาการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ (Medical Disease Diagnosis) ระบบที่จดจำวัตถุจากรูปภาพ กล้องวิดีโอ และเซ็นเซอร์ต่าง ๆ และระบบที่สามารถให้เหตุผลภายใต้สถานการณ์จริงที่ไม่แน่นอนและไม่สมบูรณ์ได้ เป็นต้น จากตัวอย่างระบบต่าง ๆ ดังกล่าวการกำเนิดของคอมพิวเตอร์ดิจิทัลช่วยให้มนุษย์เราสามารถบรรลุผลได้อย่างมากมาย แต่อย่างไรก็ตามเรายังไม่สามารถสร้างระบบการประสานงานและการทำงานอย่างอัตโนมัติที่เป็นความสามารถพื้นฐานของมนุษย์ได้ จึงเป็นความท้าทายที่นักวิจัยต่าง ๆ ต้องศึกษาและพัฒนาต่อไป

เนื่องจากปัญญาประดิษฐ์มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาและการสร้างระบบของคอมพิวเตอร์ทั่วไปซึ่งอาจเกิดความสับสนได้ ดังนั้นการทำความเข้าใจขอบเขตของปัญญาประดิษฐ์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ปัญญาประดิษฐ์เป็นมากกว่าการแสดงให้เห็นถึงการทำงานของสติปัญญาระดับสูง แต่เป็นความสามารถที่เท่าเทียมหรือมากกว่าสติปัญญาของมนุษย์เมื่อปฏิบัติงานหนึ่ง ๆ ปัญญาประดิษฐ์ไม่ใช่การศึกษาจิตใจ ร่างกาย และภาษามนุษย์อย่างที่เห็นได้ในสาขาจิตวิทยา (Psychology) สาขาสรีรวิทยา (Physiology) สาขาวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับความรู้และความเข้าใจ (Cognitive Science) หรือสาขาภาษาศาสตร์ (Linguistics) แต่เป้าหมายคือการพัฒนาระบบการทำงานของคอมพิวเตอร์ที่สามารถปฏิบัติงานที่ต้องใช้สติปัญญาระดับสูงได้แตกต่างและดีกว่าความสามารถของมนุษย์อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล โดยขอบเขตของการศึกษาของปัญญาประดิษฐ์ประกอบไปด้วยหุ่นยนต์ (Robotics) การจัดระเบียบหน่วยความจำ (Memory Organization) การนำเสนอความรู้ (Knowledge Representation) การจัดเก็บและการเรียกคืน (Storage and Recall) แบบจำลองการเรียนรู้ (Learning Model) เทคนิคการอนุมาน (Inference Technique) การให้เหตุผลจากความคิดเบื้องต้น (Commonsense Reasoning) การจัดการกับความไม่แน่นอนในการให้เหตุผลและตัดสินใจ การเข้าใจภาษาทางธรรมชาติ (Natural Language) การจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) และวิธีการมองหาลำดับของเครื่องจักรกล (Machine

Vision Methods, Search and Matching) การจดจำเสียงและการสังเคราะห์ (Speech Recognition and Synthesis) เป็นต้น

2.1.17 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANNs)

โครงข่ายประสาทเทียม [28] เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองกระบวนการทำงานในสมองของมนุษย์เพื่อการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนต่าง ๆ โดยการพัฒนาอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะเรียนรู้การประมวลผลข้อมูลและความรู้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การสร้างแบบจำลอง (Modeling) การจัดกลุ่ม (Classification/Clustering) การจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) การหาคำตอบหรือการแก้ไขปัญหาที่ดีที่สุด (Optimization) การทำนาย (Forecasting/Prediction) และการควบคุม (Control) เป็นต้น

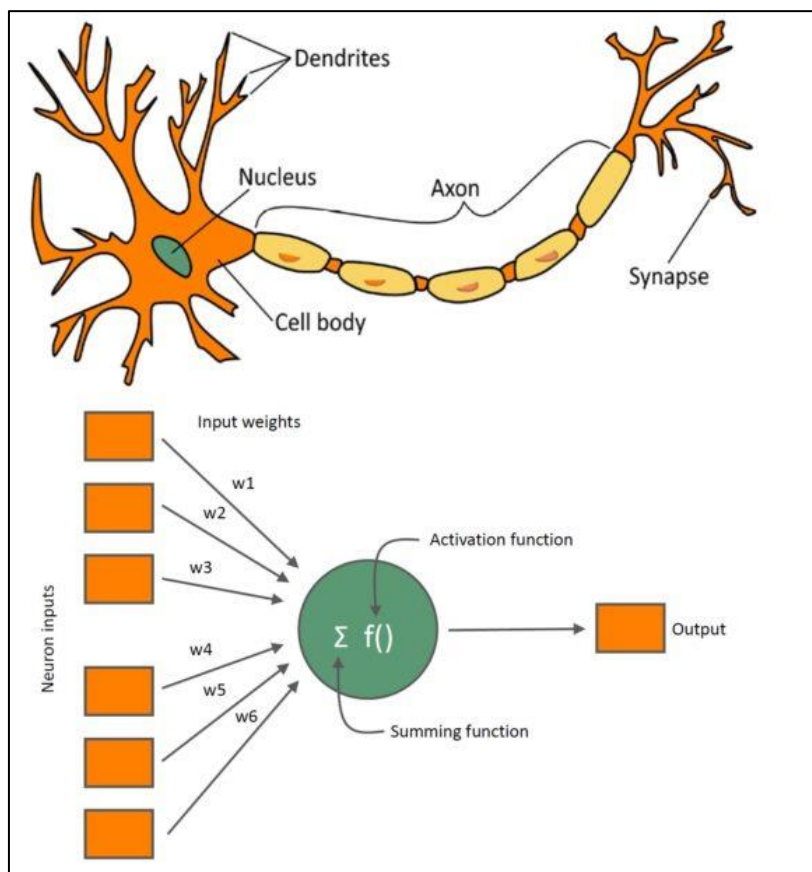


รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม (a) การจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) (b) การจัดกลุ่ม (Clustering) (c) การสร้างแบบจำลอง (Modeling) (d) การทำนาย (Forecasting)

[28]

โครงข่ายประสาทเทียมจำลองลักษณะการส่งผ่านสัญญาณประสาทในสมองของมนุษย์ การประมวลผลต่าง ๆ เกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อยที่เรียกว่า โหนด (Node) ซึ่งเปรียบเสมือนเซลล์ประสาท (Neurons) ที่มีการส่งสัญญาณ (Signal) ระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อกัน (Connection) โดยภายในโหนดมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณส่งออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น

(Activation Function) หรือฟังก์ชันการแปลง (Transfer Function) เปรียบเสมือนการส่งสัญญาณระหว่างเซลล์ประสาทที่เริ่มจากการรับสัญญาณที่ปลายประสาทเดนไดรต์ (Dendrites) ส่งสัญญาณผ่านเซลล์ประสาท (Cell body) ที่มีการกระตุ้นสัญญาณไปยังปลายประสาทแอกซอน (Axon) เพื่อส่งสัญญาณไปยังเซลล์ประสาทที่อยู่ถัดไป ค่าน้ำหนัก (Weight) เปรียบเสมือนไซแนปส์ (Synapse) ที่มีการปรับเปลี่ยนเมื่อมีการเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ [29]



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์และโหนดในโครงข่ายประสาท

เทียม [42]

- **ลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม**

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมได้ 2 ประเภท [29] คือ โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-Layer) โดยโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นเหมาะกับลักษณะของปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinear Problem) โครงข่ายประสาทเทียมประกอบ

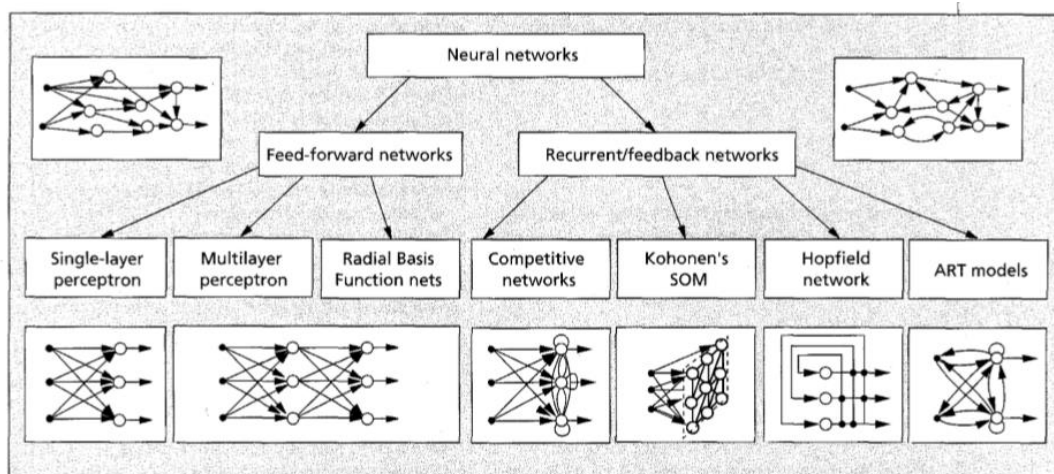
ไปด้วยชั้นข้อมูลนำเข้า (Input Layer) ชั้นข้อมูลส่งออก (Output Layer) และชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งเป็นชั้นระหว่างชั้นข้อมูลนำเข้าและชั้นข้อมูลส่งออก ชั้นซ่อนจะมีชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ ขึ้นกับลักษณะการนำไปใช้งาน ในโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวจะไม่มีชั้นซ่อนอยู่ในโครงสร้าง

- การเชื่อมต่อกันของโครงข่ายประสาทเทียม

ลักษณะรูปแบบการเชื่อมต่อกันของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท [30] คือ

1) แบบป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward Network) เป็นการเชื่อมต่อกันแบบไม่มีการวนกลับ (Loops) แต่ละโหนดจะถูกจัดระเบียบเป็นชั้นๆ (Layers) ที่มีทิศทางการเชื่อมต่อระหว่างกันทิศทางเดียว (Unidirectional Connections) รูปแบบลักษณะนี้มีความสถิต (Static) เนื่องจากจะให้ค่าข้อมูลส่งออก (a Set of Output Values) เพียงชุดเดียวแทนที่จะให้ค่าข้อมูลเป็นลำดับ (A Sequence of Values) ตามการป้อนค่าข้อมูลนำเข้า และมีคุณสมบัติของการไม่จดจำ (Memory-less Property) ที่การตอบสนองต่อค่าข้อมูลป้อนเข้าไม่ขึ้นกับสถานะของโครงข่ายก่อนหน้านี้

2) แบบการเกิดซ้ำหรือการป้อนกลับ (Recurrent or Feedback Networks) เป็นการเชื่อมต่อกันแบบมีการวนกลับ (Loops) เนื่องจากมีการป้อนกลับ รูปแบบลักษณะนี้มีความพลวัต (Dynamic) เมื่อมีค่าข้อมูลนำเข้าใหม่เข้ามา ค่าข้อมูลส่งออกจะมีการคำนวณโดยค่าข้อมูลนำเข้าในแต่ละโหนดจะถูกปรับเปลี่ยนตามการป้อนกลับ ซึ่งส่งผลให้สถานะของโครงข่ายเข้าสู่สถานะใหม่



รูปที่ 2.19 ประเภทการเชื่อมต่อกันของโครงข่ายประสาทเทียม [30]

- การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

ประเภทการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมมี 3 ประเภท [30] คือ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) และการเรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning) การเรียนรู้แบบมีผู้สอนจะป้อนข้อมูลนำเข้าที่ต้องการสอนและค่าเป้าหมายที่สอดคล้องตามรูปแบบของข้อมูลนำเข้าให้โครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้าและค่าเป้าหมาย ซึ่งค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ที่โครงข่ายคำนวณได้จะถูกนำมาปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่ายเพื่อให้ค่าผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ในขณะที่การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนจะป้อนข้อมูลนำเข้าเพียงอย่างเดียว การปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่ายจะปรับตามกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ส่วนการเรียนรู้แบบผสมผสานจะรวมการเรียนรู้ทั้งแบบมีผู้สอนและไม่มีผู้สอนไว้ด้วยกัน โดยการเรียนรู้แบบมีผู้สอนจะใช้ในการพิจารณาปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่าย ในขณะที่การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนจะใช้ในการพิจารณาส่วนอื่น ๆ ของโครงข่าย

ตัวอย่างการเรียนรู้แบบมีผู้สอน เช่น การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Learning) การเรียนรู้แบบเพอเซปตรอน (Perceptron Learning) เป็นต้น การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากง่ายต่อการทำความเข้าใจ สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย นอกจากนี้ยังเหมาะกับการแก้ปัญหาที่มีหลายมิติหรือหลายตัวแปรและลักษณะปัญหาไม่เป็นเชิงเส้นตรง การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับจะปรับค่าผิดพลาดระหว่างค่าผลลัพธ์กับค่าเป้าหมาย

โดยการแพร่ข้อมูลย้อนกลับจากชั้นข้อมูลส่งออกไปยังชั้นซ่อนและชั้นข้อมูลนำเข้าตามลำดับ ในขณะที่การเรียนรู้แบบเพอเซปตรอนจะเหมาะกับลักษณะปัญหาเชิงเส้นตรงเท่านั้น การเรียนรู้แบบเพอเซปตรอนจะปรับค่าน้ำหนักและเทรชโฮลด์ (Threshold) ก็ต่อเมื่อเกิดค่าผิดพลาดขึ้นในโครงข่าย

- กฎการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม [30] แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1) กฎการเรียนรู้แบบแก้ไขข้อผิดพลาด (Error-correction Learning Rules) เป็นกฎการเรียนรู้ในการเรียนรู้แบบมีผู้สอน โครงข่ายจะถูกป้อนค่าผลลัพธ์ที่ต้องการในแต่ละรูปแบบข้อมูลนำเข้า ในระหว่างกระบวนการเรียนรู้ค่าผลลัพธ์ที่โครงข่ายคำนวณได้ (y) อาจไม่เท่ากับค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ (d) โครงข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักเพื่อลดค่าผิดพลาดระหว่างค่าผลลัพธ์ที่ต้องการกับค่าผลลัพธ์ที่โครงข่ายคำนวณได้ ($d - y$)

2) กฎการเรียนรู้แบบบ็อลทซ์มัน (Boltzmann Learning Rules) เป็นกฎการเรียนรู้แบบแก้ไขข้อผิดพลาดแบบพิเศษอย่างหนึ่ง แต่มีลักษณะเป็นการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) โครงข่ายเป็นแบบการเกิดซ้อนที่สมมาตร ซึ่งค่าน้ำหนักระหว่างหน่วยย่อย i ไป j มีค่าเท่ากับค่าน้ำหนักระหว่างหน่วยย่อย j ไป i ($w_{ij} = w_{ji}$) มีการเรียนรู้แบบสุ่ม (Stochastic Learning) โดยแต่ละโหนดย่อยจะคำนวณผลลัพธ์ออกมาตามการกระจายของตัวของบ็อลทซ์มัน (Boltzmann Distribution) ตามหลักกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics) ค่าน้ำหนักจะถูกปรับตามค่าผิดพลาดระหว่างค่าผลลัพธ์ที่ต้องการกับค่าผลลัพธ์ที่โครงข่ายคำนวณได้และค่าความสัมพันธ์ระหว่างโหนด 2 โหนด ที่เป็นโหนดของข้อมูลส่งออกของโครงข่าย

3) กฎการเรียนรู้แบบเฮบบียาน (Hebbian Learning Rules) เป็นกฎการเรียนรู้ที่เก่าแก่ที่เกิดจากการสังเกตการทดลองของระบบประสาทวิทยา เมื่อเซลล์ประสาทสองเซลล์ที่เชื่อมต่อกันถูกกระตุ้นสัญญาณประสาทพร้อมกัน จะเกิดการเพิ่มกำลังของสัญญาณประสาทที่จุดเชื่อมต่อกัน (Synapse) ดังนั้นในการปรับค่าน้ำหนักของโครงข่ายจะเกิดขึ้นระหว่างโหนดสองโหนดที่เชื่อมต่อกัน และเกิดกิจกรรมระหว่างกันเท่านั้น เป็นการปรับค่าน้ำหนักเฉพาะจุดที่ถูกเลือกเท่านั้น โดยค่าน้ำหนักจะถูกปรับเข้าหาค่าน้ำหนักของข้อมูลที่มีความแปรปรวนสูงสุด

4) กฎการเรียนรู้แบบแข่งขัน (Competitive Learning Rules) เป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างหน่วยข้อมูลส่งออกที่ค่าน้ำหนักของหน่วยที่ชนะเท่านั้นที่จะได้ถูกปรับค่า โดยในขั้นเริ่มต้นข้อมูลนำเข้าทั้งหมดจะถูกจัดกลุ่มตามรูปแบบที่คล้ายคลึงกันและถูกกำหนดให้หนึ่งกลุ่มแทนหน่วยข้อมูลส่งออกหนึ่งหน่วย แต่ละหน่วยข้อมูลส่งออกจะเชื่อมต่อกัน ค่าข้อมูลนำเข้าที่

มากที่สุดหรือน้อยที่สุด ณ การพิจารณานั้น ๆ ของหน่วยข้อมูลส่งออกใด ๆ จะเป็นหน่วยที่ชนะและได้
ปรับค่าน้ำหนักใหม่ให้ใกล้เคียงกับรูปแบบของข้อมูลนำเข้า



ตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการเรียนรู้แบบต่าง ๆ และลักษณะการใช้งาน

ประเภทการเรียนรู้	กฎการเรียนรู้	โครงสร้างสถาปัตยกรรม	อัลกอริทึมการเรียนรู้	ลักษณะการใช้งาน
1. การเรียนรู้แบบมีผู้สอน(Supervised Learning)	แบบแก้ไขข้อผิดพลาด (Error-correction)	แบบพอลิเทรอนชั้นเดียวหรือหลายชั้น (Single- or multilayer Perceptron)	-แบบพอลิเทรอน (Perceptron)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification) การประมาณฟังก์ชัน (Function Approximation) การทำนาย (Prediction) การควบคุม (Control)
	แบบบ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann)	แบบการเกิดซ้ำ (Recurrent)	-แบบแพร่ย้อนกลับ (Back-propagation) -แบบบ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification)
	แบบเฮบบีเนียน (Hebbian)	แบบหลายชั้นป้อนไปข้างหน้า (Multilayer Feed-forward)	-แบบการวิเคราะห์จำแนกเชิงเส้น (Linear Discriminant Analysis)	การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification)
	แบบแข่งขัน (Competitive)	แบบแข่งขัน	-แบบการหาปริมาณเวกเตอร์ (Vector Quantization)	การจำแนกประเภทภายในกลุ่ม (Within-class Categorization) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression)
	แบบโครงข่ายอาร์ต (Art Network)	แบบโครงข่ายอาร์ต (Art Network)	-แบบแผนที่อาร์ต (ART Map)	การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification) การจำแนกประเภทภายในกลุ่ม (Within-class Categorization)

ประเภทการเรียนรู้	กฎการเรียนรู้	โครงสร้างสถาปัตยกรรม	อัลกอริทึมการเรียนรู้	ลักษณะการใช้งาน
2. การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)	แบบแก้ไขข้อผิดพลาด (Error-correction)	แบบหลายชั้นป้อนไปข้างหน้า (Multilayer Feed-forward)	-แบบการคาดการณ์ของแซมมอน (Sammon's Projection)	การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)
	แบบเฮบบียน (Hebbian)	แบบป้อนไปข้างหน้าหรือแบบแข่งขัน (Feed-forward or Competitive)	-แบบการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis) -แบบความจำเชื่อมโยง (Associative Memory)	การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression)
3. การเรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning)	แบบแข่งขัน (Competitive)	แบบโครงข่ายฮอปฟิลด์ (Hopfield Network)	-แบบการหาปริมาณแวกเตอร์ (Vector Quantization)	ความจำเชื่อมโยง (Associative Memory)
	แบบแก้ไขข้อผิดพลาดและแบบแข่งขัน (Error-correction and Competitive)	แบบโครงข่ายอาร์ต (Art Network)	-แบบแผนที่การจัดการตนเองของโกโฮเซนเนิน (Kohonen's SOM)	การจำแนก (Categorization)
	แบบแก้ไขข้อผิดพลาดและแบบแข่งขัน (Error-correction and Competitive)	แบบโครงข่ายอาร์ต (Art Network)	-แบบแผนที่การจัดการตนเองของโกโฮเซนเนิน (Kohonen's SOM)	การบีบอัดข้อมูล (Data Compression)
	แบบแก้ไขข้อผิดพลาดและแบบแข่งขัน (Error-correction and Competitive)	แบบโครงข่ายอาร์ต (Art Network)	-แบบแผนที่การจัดการตนเองของโกโฮเซนเนิน (Kohonen's SOM)	การจำแนก (Categorization)
	แบบแก้ไขข้อผิดพลาดและแบบแข่งขัน (Error-correction and Competitive)	แบบโครงข่ายอาร์ต (Art Network)	-แบบแผนที่การจัดการตนเองของโกโฮเซนเนิน (Kohonen's SOM)	การบีบอัดข้อมูล (Data Compression)
3. การเรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning)	แบบแก้ไขข้อผิดพลาดและแบบแข่งขัน (Error-correction and Competitive)	แบบโครงข่ายเรเดียลเบสิคฟังก์ชัน (Radial Basis Function Network, RBF Network)	-แบบเรเดียลเบสิคฟังก์ชัน (Radial Basis Function, RBF)	การจำแนกแบบ (Pattern Classification) การประมาณฟังก์ชัน (Function Approximation) การทำนาย (Prediction) การควบคุม (Control)

- **ขนาดฐานข้อมูลและการแบ่งเซตข้อมูล [28]**

ขนาดของข้อมูลที่ใช้สำหรับสอนโครงข่ายควรมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะครอบคลุมความผันแปรต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ของขอบเขตของปัญหาที่สนใจ โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็น 3 เซตย่อย ดังนี้

1) เซตข้อมูลย่อยสำหรับสอนโครงข่าย (Training Subset) ประกอบไปด้วยข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาที่สนใจเพื่อใช้ในการปรับค่าน้ำหนักของโครงข่าย

2) เซตข้อมูลย่อยสำหรับทดสอบโครงข่าย (Test Subset) ใช้สำหรับทดสอบการตอบสนองของโครงข่ายขณะที่อยู่ในกระบวนการเรียนรู้กรณีที่ใช้ข้อมูลไม่ใช่ข้อมูลเซตเดียวกับที่ใช้สอนโครงข่าย ดังนั้นข้อมูลเซตนี้จึงแตกต่างไปจากเซตข้อมูลที่ใช้สอน แต่ยังคงเป็นเซตข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตของปัญหา

3) เซตข้อมูลย่อยสำหรับตรวจสอบโครงข่าย (Validation Subset) ประกอบไปด้วยข้อมูลที่แตกต่างไปจาก 2 เซตข้างต้น ใช้ตรวจสอบโครงข่ายเมื่อโครงข่ายให้ผลลัพธ์ที่ดีตามที่ต้องการ เพื่อยืนยันความแม่นยำของโครงข่ายก่อนที่จะนำไปใช้งาน

- **อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate, η) [28]**

เป็นตัวกำหนดความเร็วในการสอนโครงข่าย ทั้งนี้หากกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ที่สูงเกินไปจะส่งผลให้การค้นหาค่าน้ำหนักของโครงข่ายไม่ลู่เข้าค่าที่เหมาะสมได้ และหากกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ที่ต่ำเกินไปจะส่งผลให้การค้นหาค่าน้ำหนักของโครงข่ายทำได้ช้า จึงมีงานวิจัยมากมายที่นำเสนออัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่นำเสนออัตราการเรียนรู้ต่าง ๆ

งานวิจัย	อัตราการเรียนรู้ (η)
Wythoff (1993)	0.1 - 10
Zupan and Gasteiger (1993)	0.3 - 0.6
Fu (1995)	0.0 - 1.0

- ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม (Momentum Coefficient, μ)

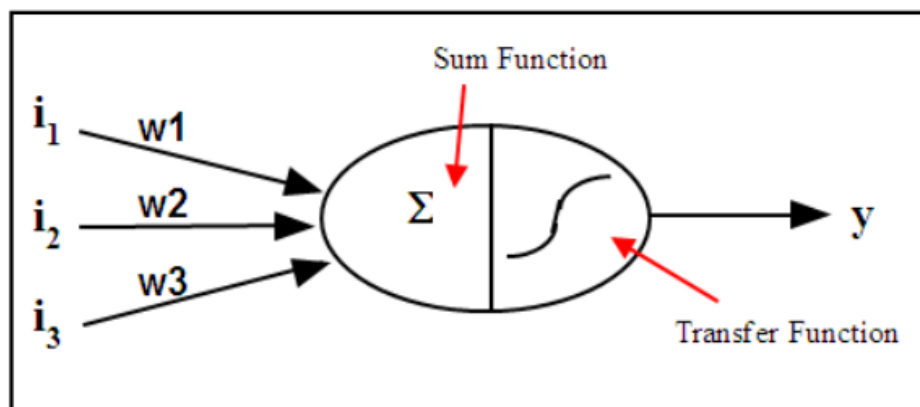
เป็นค่าที่มีส่วนช่วยในการปรับค่าน้ำหนักของโครงข่ายโดยค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัมที่สูงจะช่วยลดความเสี่ยงที่การค้นหาของโครงข่ายจะติดอยู่ที่ค่าเฉพาะจุด (Local) แต่ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัมที่สูงเกินไปอาจเพิ่มความเสี่ยงที่การค้นหาของโครงข่ายจะกระโดดข้าม (Overshooting) ค่าที่ดีที่สุดไป (Optimal) เหมือนกับการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ที่สูงเกินไป จึงมีงานวิจัยมากมายที่นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัมที่เหมาะสมดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.9 งานวิจัยที่นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัมต่าง ๆ

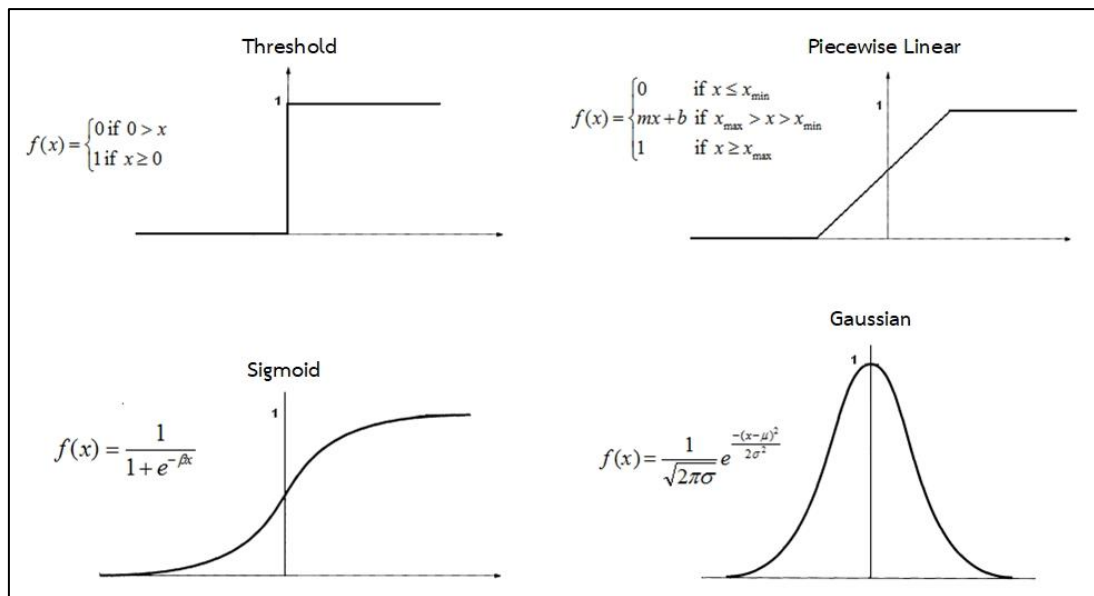
งานวิจัย	ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม (μ)
Wythoff (1993)	0.4 – 0.9
Hassoun (1995) and Fu (1995)	0.0 – 1.0
Henseler (1995) and Hertz (1991)	1.0
Zupan and Gasteiger (1993)	$\eta + \mu = 1$
Swingler (1996)	$\eta = 0.25, \mu = 0.9$

- ฟังก์ชันการแปลง (Transfer Function, σ)

เป็นฟังก์ชันที่อยู่ในชั้นซ่อน (Hidden Layer) ของโครงข่าย มีหน้าที่รวบรวมค่าน้ำหนักของทุก ๆ ค่าข้อมูลที่เข้ามาในโหนดเพื่อที่จะพิจารณาการส่งออกค่าต่อไป ฟังก์ชันการแปลงมีหลายประเภทดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.20 ฟังก์ชันการแปลง [43]



รูปที่ 2.21 ฟังก์ชันการแปลงประเภทต่าง ๆ [44]

ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Function) เป็นฟังก์ชันการแปลงที่นิยมใช้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความต่อเนื่องและอนุพันธ์บนช่วง $(-\infty, \infty)$ [28] การแปลงแบบซิกมอยด์ [29] จะบีบช่วงข้อมูลป้อนเข้าที่ไม่จำกัดให้เป็นช่วงของข้อมูลส่งออกที่จำกัดบนช่วง 0 ถึง 1

- จำนวนรอบของการสอน (Number of Training Cycle)

ไม่มีกฎที่ชัดเจนในการกำหนดจึงพิจารณาจากการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยตรวจติดตามจากค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของการสอนทั้งเซตข้อมูลสำหรับสอนและเซตข้อมูลสำหรับทดสอบ

- ขนาดชั้นซ่อน (Hidden Layer Size) [28]

ในลักษณะปัญหาการประมาณการฟังก์ชันโดยส่วนใหญ่การใช้หนึ่งชั้นซ่อน (One Hidden Layer) ก็เพียงพอแล้วในการประมาณฟังก์ชันต่อเนื่อง สองชั้นซ่อน (Two Hidden Layer) จะมีความจำเป็นก็ต่อเมื่อต้องการที่จะให้โครงข่ายเรียนรู้ฟังก์ชันที่ไม่ต่อเนื่อง ในการพิจารณาจำนวนโหนดในชั้นซ่อนนั้นการกำหนดจำนวนโหนดที่น้อยเกินไปจะไม่สามารถหาความแตกต่างระหว่างรูปแบบที่ซับซ้อนได้ นำไปสู่การประมาณการเชิงเส้นตรงเท่านั้นจากแนวโน้มที่เป็นจริง แต่ถ้าจำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่มากเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการสอนโครงข่ายนานขึ้น โครงข่ายอาจหลงไปตามสิ่งรบกวนในข้อมูลจากการมีพารามิเตอร์มากเกินไป (Overparameterization) ส่งผลให้โครงข่ายไม่มี

คุณสมบัติความเป็นทั่วไป (Generalization) เมื่อข้อมูลนำเข้าไม่ใช่ข้อมูลที่โครงข่ายเคยถูกสอน (Untrained Data) ทั้งนี้จำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออก ขนาดของเซตข้อมูลสำหรับสอนและเซตข้อมูลสำหรับทดสอบ ประเภทของปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง วิธีการกำหนดจำนวนโหนดโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากการลองผิดหรือลองถูก หรือเริ่มจากการกำหนดจำนวนโหนดน้อย ๆ แล้วจึงค่อย ๆ เพิ่มจำนวนโหนดเพื่อให้ผลลัพธ์ของโครงข่ายมีความแม่นยำตามที่ต้องการ

จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในโครงข่ายสามารถสรุปผลกระทบได้ดังตารางที่

2.9

ตารางที่ 2.10 ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ [28]

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่มากเกินไป	ค่าที่น้อยเกินไป
1. จำนวนโหนดของชั้นซ่อน	เกิด Overfitting	เกิด Underfitting
2. อัตราการเรียนรู้ (η)	โครงข่ายไม่เสถียร	เกิดการเรียนรู้ช้า
3. ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ (μ)	- ลดความเสี่ยงการเกิดจุดต่ำสุดเฉพาะจุด - เกิดการเรียนรู้เร็วขึ้น - เพิ่มความเสี่ยงที่จะข้ามค่าตอบที่ดีที่สุดไป	- เพิ่มความเสี่ยงที่จะติดอยู่กับจุดต่ำสุดเฉพาะจุด - เกิดการเรียนรู้ช้า
4. จำนวนรอบของการสอน	- เกิดการเรียนรู้เกินข้อมูลได้ดี - เป็นที่โครงข่ายที่ไม่สามารถใช้ได้ทั่วไปเมื่อเจอข้อมูลที่ไม่เคยเรียนมาก่อน - โครงข่ายเกิดการจำผลลัพธ์ตามรูปแบบของข้อมูลนำเข้า	- ไม่สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้
5. ขนาดเซตย่อยที่ใช้สอน	- เกิดการเรียนรู้เกินข้อมูลได้ดี - เป็นที่โครงข่ายที่สามารถใช้ได้ทั่วไป	- ไม่สามารถที่จะอธิบายปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ - เป็นที่โครงข่ายที่ไม่สามารถใช้ได้ทั่วไป
6. ขนาดเซตย่อยที่ใช้ทดสอบ	มีความสามารถในการยืนยันโครงข่าย	ความสามารถในการยืนยันโครงข่ายไม่เพียงพอ

- ความแตกต่างระหว่างวิธีทางสถิติและโครงข่ายประสาทเทียม [23]

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ใหม่ที่มีศักยภาพเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression Analysis) และวิธีทางสถิติแบบดั้งเดิม ซึ่งการวิเคราะห์เชิงถดถอยถูกใช้อย่างกว้างขวางในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยที่ความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลลัพธ์สัมพันธ์กันกับความสามารถของชุดตัวแปรตัวทำนาย (Predictor Variables) ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมเป็นอัลกอริทึมที่จำลองรูปแบบตามโครงสร้างของสมองมนุษย์ ประกอบไปด้วยชุดสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการกระตุ้นกระบวนการทางชีววิทยา เช่น การเรียนรู้และการจดจำ เป็นต้น ทั้งนี้ทั้งสองวิธีการมีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือ การทำนายผลลัพธ์จากค่าตัวแปรตัวทำนายที่ต้องการ เพียงแต่ทั้งสองวิธีการใช้หลักการในการพัฒนาแบบจำลองที่ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้การวิเคราะห์เชิงถดถอยจำเป็นที่จะต้องมีการตั้งข้อสมมติฐาน (Assumption) [45] ที่สำคัญ คือ การแจกแจงแบบปกติของตัวแปรตาม (Normality) ความเป็นอิสระของตัวแปรตาม (Independency) และความแปรปรวนของตัวแปรตามที่คงที่ (Homoscedasticity) ซึ่งหากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการพยากรณ์ นอกจากนี้หากมีข้อมูลที่มีค่าผิดปกติไปจากข้อมูลอื่น ๆ (Outlier) หรือตัวแปรอิสระบางตัวมีความสัมพันธ์กันเอง (Multicollinearity) จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแบบจำลอง

ตารางที่ 2.11 ศัพท์ทั่วไปที่คล้ายคลึงกันของวิธีทางสถิติและโครงข่ายประสาทเทียม [23]

วิธีทางสถิติ	โครงข่ายประสาทเทียม
Independent (Predictor) Variables	Input
Dependent (Outcome) Variables	Output
Regression Coefficients	Connection Weights
Intercept Parameter	Bias Weight
Residuals	Error
Parameter Estimation	Learning, Training
Observation	Training Case, Pattern
Maximum Likelihood Estimation	Cross-entropy

● ข้อดีและข้อเสียของโครงข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 2.12 ข้อดีและข้อเสียของโครงข่ายประสาทเทียม [23, 28]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถที่จะเรียนรู้และจดจำความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออกได้ แม้ว่าอาจจะไม่มีหลักการพิจารณาทางกายภาพที่ชัดเจน	1. ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณของข้อมูล
2. ต้องการการสอนทางสถิติอย่างเต็มรูปแบบในการพัฒนาแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่น้อย เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะเรียนรู้ผ่านข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออกที่เป็นข้อมูลแบบต่อเนื่องและข้อมูลแบบหมวดหมู่ได้	2. ไม่มีกฎหรือแนวทางที่ชัดเจนในการออกแบบโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
3. สามารถตรวจจับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรไม่อิสระที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงได้	3. ไม่มีแนวคิดทางกายภาพและการอธิบายการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ชัดเจน
4. สามารถตรวจจับปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ที่เป็นไปได้ระหว่างตัวแปรตัวทำนาย (Predictor Variables) ได้	4. กระบวนการตัดสินใจหรือผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากมีลักษณะเป็นกล่องดำ (Black Box)
5. สามารถพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้อัลกอริทึมการสอนที่แตกต่างแบบพหุคูณได้	5. บางปัญหาอาจยากที่จะนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้จริง
	6. ต้องการทรัพยากรในการคำนวณที่มาก เช่น ฮาร์ดแวร์ หน่วยประมวลผล หน่วยความจำ เป็นต้น
	7. มีแนวโน้มที่จะเกิด Overfitting ได้ง่าย
	8. การพัฒนาแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมยังต้องอาศัยการทดลอง ทั้งนี้ยังมีบางปัญหาทางวิธีการที่ต้องได้รับการแก้ไข

2.1.18 การวิเคราะห์ผลการทดลอง [46]

1) การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำ ให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value จึงแสดงถึง น้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับ นัยสำคัญอื่น ๆ ได้ โดยปกติการจะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อสมมติฐานหลักถูก ปฏิเสธ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ

2) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2)

R^2 เป็นตัววัดของจำนวนที่ลดลงในความแปรผันของ y เมื่อใช้ปัจจัย x_1, x_2, \dots, x_k ในแบบจำลอง ค่า R^2 ที่มากไม่ได้หมายความว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากการเพิ่มตัวแปร เข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เพิ่มเข้าไปในั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้น R^2_{adj} จึงเป็นที่นิยมมากกว่า โดยปกติการเพิ่มตัวแปรในแบบจำลองค่า R^2_{adj} จะไม่เพิ่มขึ้น แต่ถ้า หากเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลองค่า R^2_{adj} จะมีค่าลดลงเสมอ ทั้งนี้เมื่อมีการเปรียบเทียบค่า R^2 และ R^2_{adj} แล้วพบว่าค่าแตกต่างกันมาก จะหมายความว่ามีโอกาสสูงที่ตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญได้ถูก เพิ่มลงไปแบบจำลอง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความขรุขระผิว

D.R. Salgado, F.J. Alonso, I. Cambro and A. Marcelo (2008) [15] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวิธีการประมาณค่าความขรุขระผิวขณะถึงชิ้นงานเหล็กกล้า (AISI 8620) และพิจารณาสัญญาณการสั่นที่มีประโยชน์ต่อการประมาณค่าความขรุขระผิวโดยใช้แบบจำลอง LS-SVM ซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของ Machine Learning ที่เหมาะกับการแก้ไขปัญหาในกลุ่มที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง แบบจำลองจะเรียนรู้ผ่านคู่ข้อมูลนำเข้าและค่าเป้าหมายที่ป้อนให้แบบจำลอง ข้อมูลนำเข้าที่สนใจประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมิตัด และสัญญาณการสั่น ทั้งนี้มีการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงเดี่ยว (Singular Spectrum Analysis, SSA) ในการคัดแยกสัญญาณการสั่นขณะตัดที่สอดคล้องกับสัญญาณความขรุขระผิวออกจากสัญญาณอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องเพื่อให้ข้อมูลนำเข้ามีคุณภาพมากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลจำนวนสัญญาณการสั่นที่แตกต่างกันในการป้อนเข้าแบบจำลอง คือ 1 สัญญาณ 2 สัญญาณ และ 3 สัญญาณ มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.24%, 6.54% และ 5.74% ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าจำนวนของสัญญาณการสั่นมีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองในการประมาณค่าความขรุขระผิว เมื่อใช้จำนวนของสัญญาณการสั่นที่มาก ค่าความแม่นยำยิ่งมากขึ้น ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลจะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นควรพิจารณาการเลือกจำนวนของสัญญาณอย่างเหมาะสมเทียบกับค่าใช้จ่ายและความแม่นยำที่ได้รับ

Somkiat Tangjitsitcharoen and Angsumalin Senjuntichai (2010) [19] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานเหล็กขณะตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป สมการทำนายถูกพัฒนาด้วยฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลและใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของสมการ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พารามิเตอร์ในสมการประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมิตัด มุมคายเอชโลหะ และอัตราส่วนแรงป้อนตัดต่อแรงตัดหลัก จากผลการทดลองพบว่าสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดได้ที่ค่าความแม่นยำ 84.92% สำหรับการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย และที่ค่าความแม่นยำ 87.39% สำหรับการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด

Somkiat Tangjitsitcharoen, Kanyakarn Samanmit and Suthus Ratanakuakangwan (2014) [12] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสัมพันธ์ของความชรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัดชิ้นงานเหล็กบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพัฒนาเป็นสมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แบบถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาสมการประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมกมิตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตที่ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูในการคำนวณ จากผลการทดลองพบว่าสมการสามารถทำนายค่าความชรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดได้ที่ค่าความแม่นยำ 91.89% สำหรับการทำนายความชรุขระผิวเฉลี่ย และที่ค่าความแม่นยำ 91.97% สำหรับการทำนายความชรุขระผิวสูงสุด

Atitaya Chaijareenont and Somkiat Tangjitsitcharoen (2018) [18] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชรุขระผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมในขณะตัดกับค่าอัตราส่วนแรงตัดที่วัดได้ขณะตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซีในรูปสมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พารามิเตอร์ในสมการประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมกมิตัด และอัตราส่วนแรงตัดที่เป็นอัตราส่วนของแรงป้อนตัดต่อแรงตัดหลัก จากผลการทดลองพบว่าแรงตัดพลวัตมีความถี่ตรงกันกับความถี่ของความชรุขระผิวเมื่อใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์ความชรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดได้ สมการพยากรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถพยากรณ์ค่าความชรุขระผิวชิ้นงานที่ค่าความแม่นยำ 88.03% สำหรับการพยากรณ์ความชรุขระผิวเฉลี่ย และที่ค่าความแม่นยำ 89.35% สำหรับการพยากรณ์ความชรุขระผิวสูงสุด

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความตรง

Thararath Shasungnoen and Somkiat Tangjitsitcharoen (2015) [11] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิตที่เกิดขึ้นบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ และการศึกษาความสัมพันธ์นำไปสู่การพัฒนาสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้า (S45C) โดยสมการถูกพัฒนาในรูปสมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พารามิเตอร์ใน

สมการประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมิตตัด มุมคายเศษโลหะ และ อัตราส่วนแรงป้อนตัด จากการทดลองเมื่อพิจารณาความถี่ของแรงตัดพลวัตและความถี่ของความตรง ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วพบว่า ความถี่ทั้งสองเกิดขึ้นที่ค่าเดียวกัน ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงสามารถนำมาใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานขณะตัดได้ แม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความตรงได้ที่ค่าความแม่นยำ 91.85%

Mumin Sassantiwong and Somkiat Tangjitsitcharoen (2015) [10] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิตที่เกิดขึ้นบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ และพัฒนาเป็นสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้า (S45C) ขณะตัด ที่อยู่ในรูปสมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พารามิเตอร์ในสมการประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมิตตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงป้อนตัด โดยมีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลทตอเบซีสเพื่อแยกวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดออกจากสัญญาณเศษโลหะแบบแตกหักและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ จากการทดลองพบว่า ความถี่ของเศษโลหะแบบแตกหักมีความถี่ที่สูงและเกิดในชั้นเวฟเลทระดับที่ต่ำ ในขณะที่ความถี่ของแรงตัดที่สอดคล้องกับความถี่ของความตรงมีความถี่ที่ต่ำและเกิดในชั้นเวฟเลทระดับที่ 8 ดังนั้นจึงสามารถนำแรงตัดที่เกิดในชั้นเวฟเลทระดับที่ 8 มาใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานได้ สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความตรงได้ที่ค่าความแม่นยำ 92.14%

Pannipa Puangpad (2018) [8] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียม (Al 6063) กับอัตราส่วนแรงป้อนตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ และพัฒนาเป็นสมการสำหรับทำนายความตรงของชิ้นงานได้ในรูปสมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พารามิเตอร์ในสมการประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมิตตัด และอัตราส่วนแรงป้อนตัด จากการทดลองพบว่า ความถี่ของแรงตัดพลวัตและความถี่ของความตรงเกิดขึ้นที่ค่าเดียวกันเมื่อใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงถูกนำมาใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานขณะตัดได้ สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความตรงได้ที่ค่าความแม่นยำ 89.13%

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปลงเวฟเลข

Thongphannarai Maiyachote (2015) [14] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นออกจากสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ เพื่อใช้ในการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลขทอเบซีสที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงกล รวมถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงาน อัตราส่วนแรงตัดพลวัต และเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป เงื่อนไขการตัดที่สนใจประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมิตัด และมุมคายเศษโลหะ เพื่อพัฒนาเป็นสมการทำนายความขรุขระผิวที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองสามารถแยกสัญญาณความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานที่สัมพันธ์กับความถี่ของแรงตัดพลวัตออกจากความถี่ของสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะและความถี่ของสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ได้ที่เวฟเลขระดับที่ 5 จึงสามารถนำสัญญาณแรงตัดที่เวฟเลขระดับที่ 5 ไปพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวได้ สมการที่ได้คือ สมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลแบบถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งให้ค่าความแม่นยำที่ 92.78% สำหรับการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย และให้ค่าความแม่นยำที่ 93.46% สำหรับการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด

Somkiat Tangitsitcharoen, Prae Thesniyom and Suthus Ratanakuakangwan (2017) [22] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอแบบจำลองเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเหล็กกล้า (S50C) ในกระบวนการกัดหัวบอลโดยนำเสนอในรูปแบบสมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลแบบถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พารามิเตอร์ในสมการประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด เส้นผ่านศูนย์กลางมุมิตัด และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่คำนวณโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู จากการทดลองพบว่า โดเมนความถี่ค่าความถี่ของแรงตัดพลวัตและความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นเกิดที่ค่าเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถนำแรงตัดพลวัตมาใช้ในการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความขรุขระผิวที่ค่าความแม่นยำ 92.9% สำหรับการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย และให้ค่าความแม่นยำที่ 91.4% สำหรับการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด

Peyman Abbaszadeh, Atieh Alipour and Shahrokh Asadi (2017)[27] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอแบบจำลอง ELMNN (Evolutionary Levenberg-Marquardt Neural Network) เพื่อใช้ในการทำนายทางอุทกวิทยาโดยมีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลทในการวิเคราะห์และตรวจจับข้อมูลเฉพาะที่มีความไม่แน่นอนและเป็นฤดูกาลออกจากข้อมูลรวม ซึ่งจะทำให้คุณภาพของข้อมูลโดยรวมที่จะใช้วิเคราะห์ต่อไปมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค GA (Genetic Analysis) เพื่อสร้างและสอนโครงข่าย ทำให้โครงข่ายหาค่าตอบที่ดีที่สุดเร็วขึ้น เรียกแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ว่า W-ELMNN ข้อมูลนำเข้าที่สนใจคือ ปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำไหลบ่าบริเวณพื้นที่รับน้ำที่แตกต่างกัน 2 แห่ง โดยเก็บข้อมูลรายวันและรายเดือน เป็นระยะเวลา 12 ปี (1995 - 2007) จากผลการทดลองพบว่า เวฟเลทตอบเบสส์ให้ผลลัพธ์ในการทำนายแม่นยำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเวฟเลทแฟมิลี่อื่น ๆ โดยข้อมูลรายวันและรายเดือนที่เหมาะสมอยู่ที่เวฟเลทระดับที่ 4 และ 8 ตามลำดับ แบบจำลองให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรากที่สองระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าที่วัดได้เท่ากับ 0.017 ค่า PVC และ LVC ที่เป็นเกณฑ์วัดประสิทธิภาพการตรวจติดตามเหตุการณ์ต่าง ๆ เช่น น้ำท่วม ภัยแล้ง เป็นต้น เท่ากับ 0.021 และ 0.023 ตามลำดับ และค่าประสิทธิภาพ Kling-Gupta สำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลองทำนายทางอุทกวิทยา เท่ากับ 0.91

2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม

Seung-Chang Lee (2003) [47] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบการทำนายอัจฉริยะของค่าความแข็งแรงของคอนกรีต (I-PreConS) เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการรื้อถอนแบบการเชื่อมต่อของคอนกรีตและการจัดตารางเวลางานก่อสร้างโดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงสร้างพหุคูณที่ประกอบไปด้วยโครงข่ายประสาทเทียมเดี่ยวๆ 5 โครงข่าย มาทำงานร่วมกัน ซึ่งจะจำแนกแต่ละโครงข่ายตามระยาระยะเวลานับจากวันที่การเทคอนกรีตเสร็จสิ้น ดังนั้นค่าความแข็งแรงของคอนกรีตที่ต้องการทำนายจะขึ้นกับระยะเวลาที่ต้องการ นอกจากนี้ภายในโครงข่ายประสาทเทียมที่จะพัฒนาจะมีการใช้เทคนิคการควบคุมของพารามิเตอร์ในการพิจารณานิเวรอนนำเข้าของโครงข่าย และเทคนิคการกำหนดน้ำหนักของนิเวรอนนำเข้าเพื่อให้การทำนายผลลัพธ์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น การสอนภายในโครงข่ายจะใช้วิธีการแพร่ย้อนกลับและอัลกอริทึมแบบจดจำ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิมพบว่า โครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ค่าความแม่นยำของสัมประสิทธิ์การพิจารณาเฉลี่ยที่มากกว่า 0.9 ภายใต้รูปแบบการ

ทดสอบต่าง ๆ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าความแม่นยำที่มากกว่าวิธีทางคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิม

Chaiwat Phusanapakorn (2009) [48] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามการสึกหรอของมีดกลึงและสภาพการเกิดเศษโลหะและการสั่นแบบแฉดเตอร์ขณะตัดที่เกิดขึ้นบนกระบวนการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) โดยการใช้เซ็นเซอร์ร่วมที่ประกอบไปด้วย เซ็นเซอร์แรงตัด เซ็นเซอร์วัดความเร่ง เซ็นเซอร์เสียง และเซ็นเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่น ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากทุกเซ็นเซอร์จะถูกนำมาวิเคราะห์ในโดเมนความถี่และโดเมนเวลาด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นกับการสึกหรอของมีดกลึง การแตกหักของเศษโลหะ และการเกิดการสั่นแบบแฉดเตอร์ จากนั้นสัญญาณทั้งหมดจะถูกประมวลผลผ่านโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอเซพตรอนและแบบการใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบจดจำเพื่อใช้ในการพยากรณ์ต่อไป จากผลการทดลองพบว่า การประมาณขนาดการสึกหรอบนผิวหลบของมีดกลึงมีค่า R ซึ่งเป็นค่าวัดผลประสิทธิภาพของการพยากรณ์โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของระดับการสึกหรอของมีดกลึงที่ได้จากการทดลองและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลผ่านโครงข่ายประสาทเทียม มีค่าเท่ากับ 0.94465 และมีความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0.000595 นอกจากนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกรูปแบบของเศษโลหะโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันที่ค่าความแม่นยำ 95.31% สำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอเซพตรอน และค่าความแม่นยำ 97.5% สำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบการใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบจดจำ ระบบยังสามารถตรวจจับการเกิดการสั่นแบบแฉดเตอร์ค่าความแม่นยำ 91.89% สำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอเซพตรอน และค่าความแม่นยำ 99.7% สำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบการใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบจดจำ

Somkiat Tangjitsitcharoen and Channarong Rungruang (2011) [49] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอและพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะการเกิดเศษโลหะ ซึ่งประกอบไปด้วย เศษโลหะแบบต่อเนื่อง เศษโลหะแบบแตกหัก และการเกิดการสั่นแบบแฉดเตอร์ในกระบวนการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้า (S45C) โดยการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ร่วมประกอบไปด้วย เซ็นเซอร์แรงตัด เซ็นเซอร์วัดความเร่ง เซ็นเซอร์เสียง และเซ็นเซอร์อะคูสติก อิมิสชั่น สัญญาณทั้งหมดที่ได้จะถูกประมวลผลผ่านโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอเซพตรอน จากผลการทดลองพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุสถานะของเศษโลหะด้วยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ที่ค่า

4.69% และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ที่น้อยกว่า 8.11% สำหรับการระบุการเกิดการสั่นแบบแชนเตอร์

N. Senthilkumar and T. Tamizharasan (2015) [13] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการทำนายการสึกหรอของมีดตัดและความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงหนัก (Hard Turning) โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการใช้สมการพหุคูณแบบถดถอย ซึ่งปัจจัยที่สนใจประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด ชนิดวัสดุชิ้นงาน รูปร่างมีดตัด และมุมหลบของมีดตัด ที่ระดับปัจจัย 3 ระดับ จากผลการทดลองพบว่า ความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสึกหรอของมีดตัดและความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนขณะตัดที่สูงจากความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น อัตราป้อนตัดส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของมีดตัดและความขรุขระผิวที่น้อยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของความเร็วตัด ความลึกตัดที่มากจะทำให้อายุการใช้งานมีดตัดสั้นลง เนื่องจากผิวสัมผัสการเสียดสีที่มากขึ้นระหว่างผิวชิ้นงานกับมีดตัด ชนิดวัสดุชิ้นงานที่แข็งจะส่งผลให้ใช้แรงตัดมาก อุณหภูมิขณะตัดสูงขึ้น และเกิดการเสียดสีที่มากขึ้น มุมหลบของมีดตัดที่มากจะช่วยลดการสึกหรอของมีดตัดและความขรุขระผิวชิ้นงาน เมื่อนำข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองมาพัฒนาแบบจำลองพบว่าค่า R^2 ของสมการทำนายการสึกหรอของมีดตัดมีค่า 0.7223 และ 0.2914 สำหรับสมการทำนายความขรุขระผิว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ R^2 เท่ากับ 0.99762 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าการใช้สมการพหุคูณแบบถดถอย

S. Senthil Babu and B.K. Vinayagam (2015) [50] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอแบบจำลองทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการเจาะชิ้นงานโดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าและใช้อัลกอริทึม APSO ในการลดความแตกต่างระหว่างข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออกเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์น้อยที่สุด ปัจจัยนำเข้าที่สนใจประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และชนิดวัสดุมีดเจาะ จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ค่าผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) เนื่องจากปัจจัยที่สนใจมีมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งการออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ทำให้สามารถศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ได้ในเวลาเดียวกัน โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานและอัตราส่วนแรงบั่นตัดพลวัตต่อแรงบั่นตัดสถิตภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ จะถูกนำมาผ่านการแปลงเวฟเลทเพื่อคัดกรองข้อมูลที่ไม่สอดคล้องหรือสัมพันธ์กับค่าความตรงของชิ้นงานออก ก่อนจะป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมในกระบวนการกลึงต่อไป

3.1.1 การกำหนดปัจจัยในการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8, 10, 11] ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความตรงของชิ้นงาน คือ เงื่อนไขการตัดที่ประกอบไปด้วยความเร็วตัด อัตราบั่นตัด ความลึกตัด รัศมีงมูมิตัด และมุมคายเศษโลหะ ดังนั้นเงื่อนไขการตัดเหล่านี้จึงถูกกำหนดให้เป็นปัจจัยในการทดลองของงานวิจัยนี้

3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง

ระดับของปัจจัยในการทดลอง (Level) จะพิจารณาจากคู่มือแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัดและงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อให้ได้คุณภาพผิวชิ้นงานที่ดี สามารถแบ่งระดับของปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	เหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)	อะลูมิเนียม (Al 6063)
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	100, 150 และ 200	150, 200 และ 250
อัตราบั่นตัด (มิลลิเมตรตอร์อบ)	0.15, 0.20 และ 0.25	0.100, 0.125 และ 0.150
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.6 และ 0.8	0.1, 0.2 และ 0.3
รัศมีงมูมิต (มิลลิเมตร)	0.4 และ 0.8	
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6 และ +11	

1) **ความเร็วตัด** กำหนดระดับปัจจัยเป็น 3 ระดับ คือ 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที สำหรับชิ้นงานเหล็ก และ 150, 200 และ 250 เมตรต่อนาที สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม พิจารณาช่วงความเร็วตัดที่เหมาะสมของคู่มือแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด คือ ความเร็วตัด 140 – 320 เมตรต่อนาที ร่วมกับการศึกษาอิทธิพลของความเร็วที่มีต่อค่าความตรงของชิ้นงานในระดับต่าง ๆ กัน

2) **อัตราป้อนตัด** กำหนดระดับปัจจัยเป็น 3 ระดับ คือ 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ สำหรับชิ้นงานเหล็ก และ 0.100, 0.125 และ 0.150 มิลลิเมตรต่อรอบ สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม พิจารณาช่วงอัตราป้อนตัดที่เหมาะสมของคู่มือแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด คือ อัตราป้อนตัด 0.08 – 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ร่วมกับการศึกษาอิทธิพลของอัตราป้อนตัดที่มีต่อค่าความตรงของชิ้นงานในระดับต่าง ๆ กัน

3) **ความลึกตัด** กำหนดระดับปัจจัยเป็น 3 ระดับ คือ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานเหล็ก และ 0.1, 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม พิจารณาช่วงความลึกตัดที่เหมาะสมของคู่มือแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด คือ ความลึกตัด 0.50 – 2.00 มิลลิเมตร ร่วมกับการศึกษาอิทธิพลของความลึกตัดที่มีต่อค่าความตรงของชิ้นงานในระดับต่าง ๆ กัน ทั้งนี้การใช้ความลึกตัดที่น้อยจะได้ผิวชิ้นงานที่ดี แต่ความลึกตัดที่น้อยเกินไปจะถูกอิทธิพลของรัศมีงูมกัดตัดกลับได้

4) **รัศมีงูมกัดตัด** กำหนดระดับปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาอิทธิพลของรัศมีงูมกัดตัดที่เปลี่ยนไปต่อค่าความตรงของชิ้นงาน ทั้งนี้การใช้รัศมีงูมกัดตัดที่มากจะได้ผิวชิ้นงานที่ดี แต่รัศมีงูมกัดตัดที่มากเกินไปจะเกิดแรงสั่นสะเทือนขณะตัดและใช้แรงตัดมากขึ้น ส่งผลให้คุณภาพผิวชิ้นงานไม่ดี

5) **มุมคายเศษโลหะ** กำหนดระดับปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ -6 และ +11 องศา เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมคายเศษโลหะที่เปลี่ยนไปต่อค่าความตรงของชิ้นงาน ทั้งนี้มุมคายเศษโลหะที่เป็นบวกจะทำให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกง่าย แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของมิตัดน้อย ใช้แรงตัดน้อย ผิวชิ้นงานที่ได้จึงมีคุณภาพผิวที่ดีกว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นลบ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของมุมคายเศษโลหะที่เปลี่ยนไป

3.1.3 เงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุมุมมีดตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	100	0.15	0.6	0.8	+11
2	100	0.25	0.6	0.4	+11
3	200	0.15	0.8	0.4	+11
4	100	0.25	0.4	0.4	+11
5	200	0.15	0.4	0.8	+11
6	150	0.20	0.6	0.8	-6
7	150	0.15	0.8	0.8	+11
8	100	0.20	0.8	0.8	+11
9	150	0.15	0.4	0.8	-6
10	100	0.25	0.8	0.4	-6
11	200	0.25	0.8	0.8	-6
12	100	0.25	0.4	0.8	+11
13	100	0.15	0.4	0.8	-6
14	200	0.15	0.8	0.4	-6
15	150	0.15	0.4	0.8	+11
16	150	0.20	0.8	0.4	+11
17	200	0.20	0.6	0.8	+11
18	150	0.25	0.4	0.4	-6
19	200	0.20	0.4	0.4	+11
20	150	0.20	0.6	0.8	+11
21	100	0.25	0.8	0.8	-6
22	200	0.25	0.6	0.4	+11
23	200	0.20	0.6	0.4	+11
24	150	0.25	0.8	0.8	-6
25	150	0.25	0.4	0.8	+11
26	100	0.15	0.6	0.4	+11

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิตตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
27	200	0.25	0.6	0.4	-6
28	100	0.20	0.4	0.8	+11
29	100	0.15	0.8	0.8	-6
30	150	0.15	0.4	0.4	+11
31	150	0.25	0.6	0.4	+11
32	200	0.25	0.6	0.8	+11
33	150	0.15	0.4	0.4	-6
34	200	0.25	0.4	0.4	-6
35	200	0.20	0.6	0.8	-6
36	200	0.15	0.6	0.4	+11
37	100	0.20	0.6	0.4	-6
38	200	0.25	0.6	0.8	-6
39	150	0.20	0.6	0.4	-6
40	150	0.20	0.4	0.8	-6
41	100	0.20	0.8	0.8	-6
42	200	0.25	0.8	0.4	-6
43	100	0.15	0.8	0.4	+11
44	200	0.25	0.8	0.4	+11
45	100	0.15	0.4	0.4	+11
46	150	0.20	0.8	0.4	-6
47	100	0.25	0.4	0.4	-6
48	150	0.20	0.4	0.4	+11
49	100	0.15	0.6	0.4	-6
50	150	0.25	0.6	0.4	-6
51	200	0.15	0.4	0.4	-6
52	150	0.25	0.8	0.8	+11
53	200	0.20	0.4	0.8	+11
54	200	0.25	0.4	0.4	+11

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิตตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
55	200	0.15	0.8	0.8	+11
56	200	0.20	0.4	0.8	-6
57	200	0.20	0.8	0.4	-6
58	200	0.25	0.8	0.8	+11
59	150	0.25	0.8	0.4	+11
60	100	0.15	0.4	0.8	+11
61	150	0.20	0.8	0.8	-6
62	150	0.25	0.6	0.8	-6
63	150	0.15	0.6	0.8	-6
64	150	0.20	0.8	0.8	+11
65	150	0.15	0.6	0.4	+11
66	200	0.20	0.8	0.4	+11
67	100	0.25	0.8	0.8	+11
68	150	0.15	0.8	0.4	+11
69	100	0.25	0.4	0.8	-6
70	150	0.15	0.6	0.4	-6
71	150	0.25	0.4	0.4	+11
72	100	0.15	0.8	0.4	-6
73	100	0.20	0.4	0.4	+11
74	100	0.20	0.4	0.8	-6
75	200	0.15	0.8	0.8	-6
76	200	0.15	0.4	0.8	-6
77	100	0.25	0.8	0.4	+11
78	100	0.20	0.6	0.4	+11
79	150	0.25	0.4	0.8	-6
80	100	0.25	0.6	0.8	+11
81	100	0.15	0.8	0.8	+11
82	200	0.20	0.4	0.4	-6

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิตตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
83	100	0.25	0.6	0.4	-6
84	200	0.20	0.6	0.4	-6
85	150	0.15	0.6	0.8	+11
86	150	0.25	0.6	0.8	+11
87	100	0.20	0.8	0.4	+11
88	200	0.25	0.4	0.8	+11
89	200	0.20	0.8	0.8	-6
90	100	0.20	0.6	0.8	+11
91	200	0.15	0.6	0.8	+11
92	150	0.20	0.6	0.4	+11
93	200	0.15	0.4	0.4	+11
94	200	0.20	0.8	0.8	+11
95	150	0.20	0.4	0.8	+11
96	150	0.15	0.8	0.8	-6
97	200	0.15	0.6	0.8	-6
98	100	0.20	0.4	0.4	-6
99	200	0.25	0.4	0.8	-6
100	100	0.15	0.6	0.8	-6
101	150	0.25	0.8	0.4	-6
102	200	0.15	0.6	0.4	-6
103	150	0.15	0.8	0.4	-6
104	100	0.20	0.6	0.8	-6
105	100	0.25	0.6	0.8	-6
106	100	0.15	0.4	0.4	-6
107	150	0.20	0.4	0.4	-6
108	100	0.20	0.8	0.4	-6

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองของชิ้นงานอะลูมิเนียม (Al 6063)

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุมกมีดตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	200	0.150	0.1	0.8	-6
2	200	0.100	0.3	0.8	-6
3	250	0.125	0.2	0.8	-6
4	250	0.150	0.3	0.4	-6
5	200	0.125	0.1	0.4	-6
6	200	0.150	0.1	0.8	+11
7	150	0.150	0.3	0.8	+11
8	200	0.125	0.1	0.8	-6
9	150	0.100	0.3	0.4	+11
10	200	0.100	0.1	0.4	-6
11	200	0.100	0.2	0.4	+11
12	250	0.100	0.1	0.8	-6
13	150	0.100	0.1	0.4	+11
14	200	0.150	0.3	0.8	-6
15	250	0.125	0.1	0.8	-6
16	200	0.150	0.2	0.4	-6
17	150	0.150	0.2	0.8	-6
18	200	0.100	0.2	0.4	-6
19	150	0.125	0.2	0.4	+11
20	150	0.150	0.3	0.4	-6
21	250	0.125	0.1	0.4	-6
22	250	0.150	0.2	0.4	-6
23	200	0.125	0.1	0.4	+11
24	150	0.100	0.2	0.8	+11
25	250	0.125	0.3	0.4	+11
26	250	0.100	0.3	0.4	+11

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิตตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
27	250	0.150	0.2	0.8	+11
28	250	0.150	0.1	0.8	-6
29	150	0.125	0.3	0.8	-6
30	250	0.150	0.3	0.8	-6
31	150	0.125	0.1	0.8	+11
32	200	0.150	0.3	0.4	-6
33	150	0.100	0.2	0.4	+11
34	200	0.150	0.1	0.4	-6
35	150	0.100	0.1	0.8	-6
36	150	0.125	0.2	0.8	+11
37	200	0.125	0.3	0.8	+11
38	250	0.100	0.2	0.4	+11
39	200	0.100	0.1	0.8	-6
40	250	0.150	0.1	0.8	+11
41	250	0.150	0.1	0.4	-6
42	150	0.100	0.1	0.8	+11
43	250	0.100	0.2	0.8	-6
44	150	0.150	0.3	0.4	+11
45	200	0.100	0.2	0.8	-6
46	250	0.125	0.3	0.8	+11
47	200	0.125	0.1	0.8	+11
48	150	0.125	0.1	0.4	-6
49	150	0.125	0.2	0.8	-6
50	200	0.150	0.3	0.4	+11
51	150	0.125	0.3	0.4	-6
52	250	0.100	0.3	0.8	+11
53	150	0.150	0.2	0.4	-6
54	250	0.125	0.3	0.4	-6

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิตตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
55	250	0.125	0.2	0.4	+11
56	150	0.100	0.1	0.4	-6
57	250	0.100	0.1	0.4	+11
58	200	0.150	0.1	0.4	+11
59	250	0.100	0.2	0.4	-6
60	150	0.100	0.3	0.8	-6
61	200	0.100	0.3	0.4	-6
62	150	0.150	0.2	0.4	+11
63	200	0.150	0.2	0.4	+11
64	200	0.100	0.1	0.4	+11
65	250	0.125	0.1	0.8	+11
66	200	0.150	0.3	0.8	+11
67	150	0.150	0.1	0.8	-6
68	200	0.100	0.2	0.8	+11
69	250	0.125	0.1	0.4	+11
70	200	0.100	0.1	0.8	+11
71	250	0.125	0.3	0.8	-6
72	150	0.125	0.1	0.4	+11
73	250	0.100	0.2	0.8	+11
74	150	0.125	0.3	0.8	+11
75	150	0.150	0.1	0.4	+11
76	250	0.150	0.2	0.8	-6
77	150	0.125	0.2	0.4	-6
78	200	0.100	0.3	0.8	+11
79	150	0.100	0.2	0.4	-6
80	200	0.150	0.2	0.8	-6
81	250	0.100	0.3	0.8	-6
82	250	0.100	0.1	0.4	-6

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีงูมิตัด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
83	150	0.150	0.1	0.4	-6
84	250	0.125	0.2	0.8	+11
85	150	0.150	0.3	0.8	-6
86	200	0.125	0.3	0.8	-6
87	250	0.150	0.1	0.4	+11
88	250	0.150	0.2	0.4	+11
89	250	0.100	0.1	0.8	+11
90	250	0.150	0.3	0.4	+11
91	150	0.100	0.3	0.8	+11
92	150	0.100	0.2	0.8	-6
93	200	0.125	0.2	0.8	-6
94	250	0.150	0.3	0.8	+11
95	150	0.150	0.2	0.8	+11
96	150	0.100	0.3	0.4	-6
97	200	0.125	0.3	0.4	-6
98	150	0.125	0.3	0.4	+11
99	150	0.150	0.1	0.8	+11
100	150	0.125	0.1	0.8	-6
101	200	0.125	0.3	0.4	+11
102	200	0.150	0.2	0.8	+11
103	250	0.125	0.2	0.4	-6
104	200	0.1	0.3	0.4	+11
105	250	0.1	0.3	0.4	-6
106	200	0.125	0.2	0.8	+11
107	200	0.125	0.2	0.4	+11
108	200	0.125	0.2	0.4	-6

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 ชิ้นงาน (Workpiece)

1) เหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 – 40 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร

2) อะลูมิเนียม (Al 6063) รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 – 50 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.2 เม็ดมีด (Insert)

เม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว ยี่ห้อ Kyocera แบ่งออกเป็น 2 มุมคายเศษโลหะ ดังตาราง

ตารางที่ 3.4 รหัสเม็ดมีด

มุมคายเศษโลหะ	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)	รหัสเม็ดมีด
+11	0.4	TPMR 160304HQ
	0.8	TPMR 160308HQ
-6	0.4	TNMG 160404HQ
	0.8	TNMG 160408HQ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเม็ดมีดมุมคายเศษโลหะ -6: (ซ้าย) รัศมีงมกมิต 0.4 (ขวา) รัศมีงมกมิต 0.8

3.2.3 ด้ามมีดกลึง (Tool Holder)

ด้ามมีดกลึง ยี่ห้อ Kyocera แบ่งออกเป็น 2 มุมคายเศษโลหะ ดังตาราง

ตารางที่ 3.5 รหัสด้ามมีดกลึง

มุมคายเศษโลหะ	รหัสด้ามมีดกลึง
+11	CTGPR 2525M-16N
-6	WTJNR 2525M-16N



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างด้ามมีด: (บน) มุมคายเศษโลหะ +11 (ล่าง) มุมคายเศษโลหะ -6

3.2.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine)

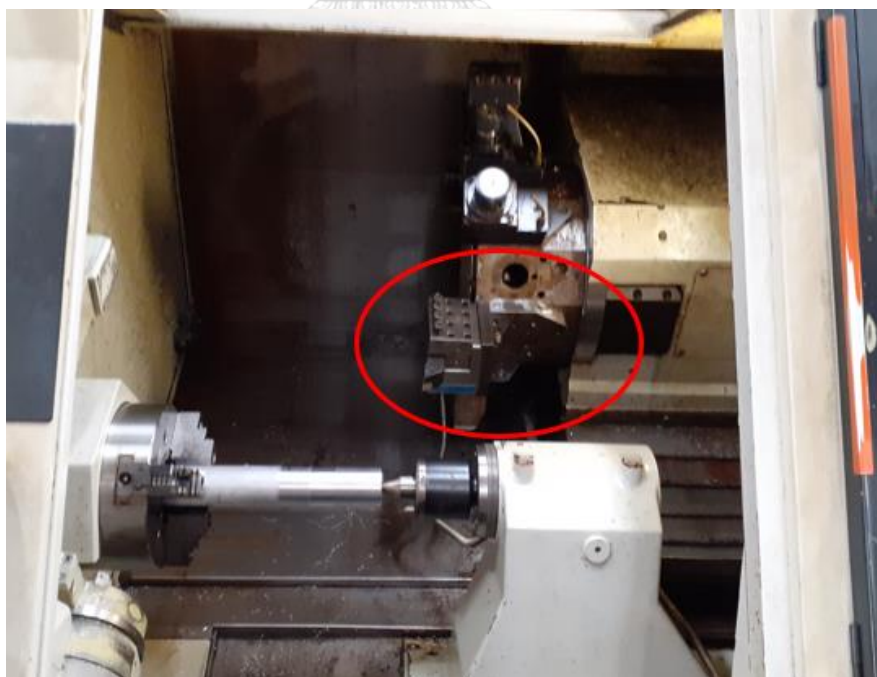
เครื่องกลึงซีเอ็นซีชนิด 4 แกน ยี่ห้อ Mazuk รุ่น NEXUS 200MY/MSY



รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซีชนิด 4 แกน

3.2.5 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ไดนาโมมิเตอร์ ยี่ห้อ Kister รุ่น 9121 สำหรับวัดแรงตัดแกน x, y, z



รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์ที่ติดตั้งบนป้อมมีด

3.2.6 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตืดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.6 ออสซิลโลสโคป

3.2.7 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)

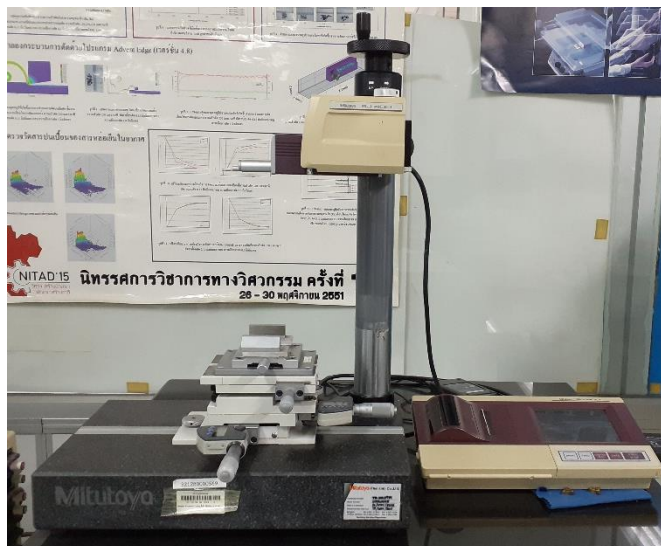
เครื่องขยายสัญญาณ ยี่ห้อ Kister รุ่น 5038 สำหรับขยายสัญญาณแรงตืด



รูปที่ 3.7 เครื่องขยายสัญญาณ

3.2.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Roughness Tester)

เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo สำหรับวัดค่าความตรงชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- 1) เปิดเครื่องกลิ้งซีเอ็นซี และตรวจสอบบวาล์วแรงดันให้มีค่าแรงดันที่ 0.5 MPa
- 2) ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับชุดป้อมมิต (Turret) ของเครื่องกลิ้งซีเอ็นซี เพื่อใช้วัดสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดชิ้นงาน ซึ่งประกอบไปด้วยแรงตัดแนวรัศมี (F_x) แรงป้อนตัด (F_y) และแรงตัดหลัก (F_z)
- 3) ติดตั้งเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) ที่ด้านข้างเครื่องกลิ้งซีเอ็นซี และเชื่อมต่อสายสัญญาณของเครื่องไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณแรงตัด
- 4) ติดตั้งเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ด้านข้างเครื่องขยายสัญญาณ และเชื่อมต่อสายสัญญาณของเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อแสดงผลและบันทึกค่าสัญญาณแรงตัดที่วัดได้ โดยสัญญาณแรงตัดจะถูกกรองด้วยความถี่ (Low-Pass Filter) 5,000 Hz และอัตราการเก็บข้อมูล (Sampling Rate) 10,000 ค่าต่อวินาที
- 5) ติดตั้งชิ้นงานรูปทรงกระบอกเข้ากับหัวจับ (Chuck) และยื่นศูนย์ (Tail Stock) เพื่อป้องกันชิ้นงานสั่นสะเทือนขณะตัดชิ้นงาน

6) เตรียมผิวชิ้นงานก่อนดำเนินการตัดจริงโดยการตั้งค่าโปรแกรมเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับ ปอกผิวชิ้นงาน เนื่องจากความสูงของผิวชิ้นงานอาจไม่เท่ากันและส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการ เก็บสัญญาณแรงตัดในการทดลองได้

7) ตั้งค่าโปรแกรมเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับกลึงปอกผิวชิ้นงานตามเงื่อนไขการทดลองดัง ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 และทำการกลึงชิ้นงานโดยกำหนดให้ 1 เงื่อนไขการทดลอง กลึงที่ ความยาว 30 มิลลิเมตร และเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดทุก ๆ ระยะการตัด

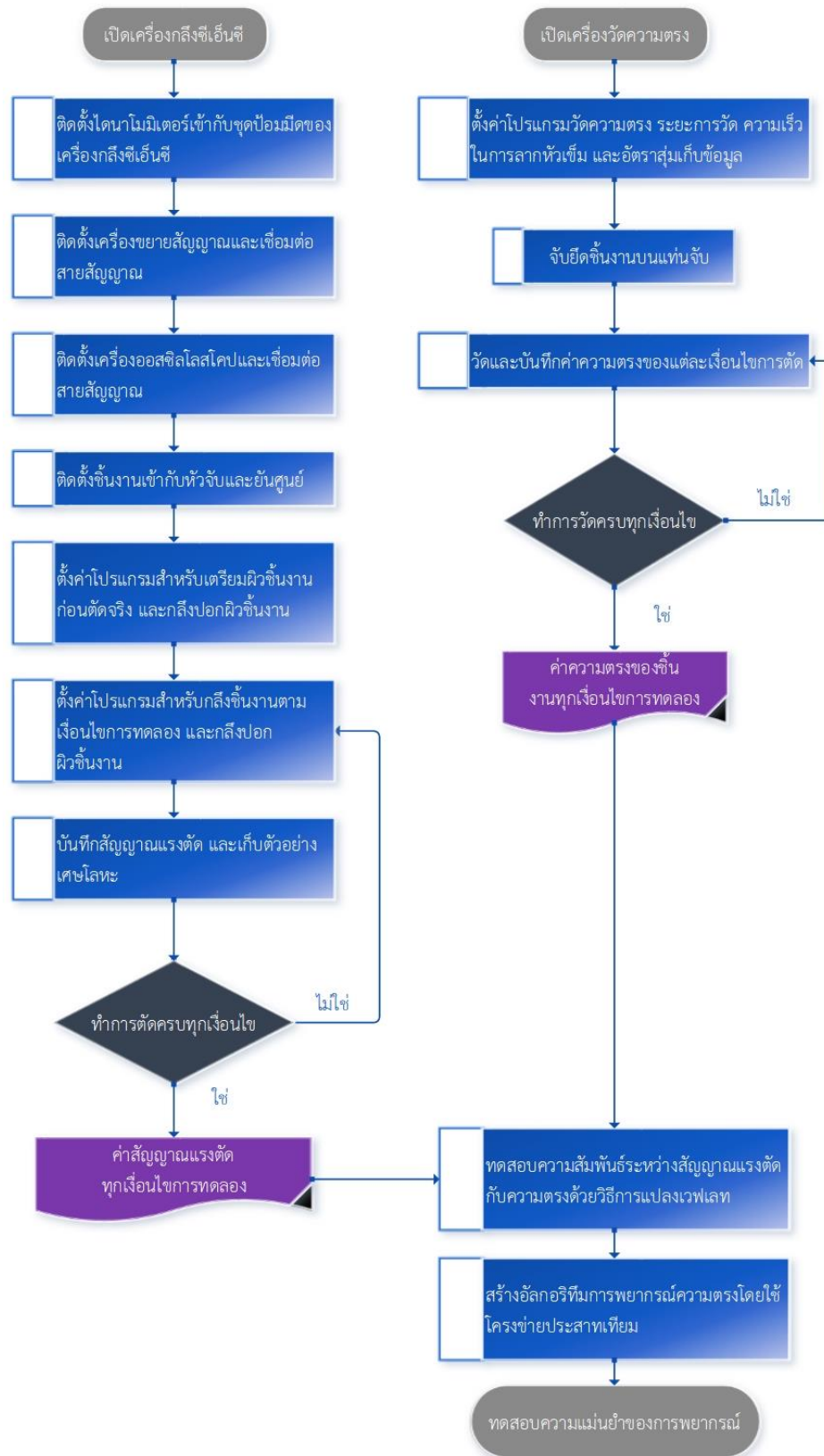
8) บันทึกค่าแรงตัด เก็บตัวอย่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไข และตรวจสอบสภาพ การสึกหรอของเม็ดมีดตัด

9) วัดค่าความตรงของชิ้นงานโดยใช้เครื่องวัดความตรง ตั้งค่าระยะการวัด (Evaluation Length) เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ความเร็วในการลากหัวเข็มเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที Sampling Length เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร และอัตราสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที

10) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดกับความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform)

11) ป้อนข้อมูลนำเข้าลงในโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อสร้างอัลกอริทึมการ พยากรณ์ความตรง

12) ทดสอบความแม่นยำของการพยากรณ์ความตรงของโปรแกรมเทียบกับค่าความตรงจริง ที่วัดได้ และเปรียบเทียบกับวิธีการการพยากรณ์ความตรงแบบอื่น ๆ



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.4 การพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

พัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้า (Two-layer Feed Forward Neural Network) ซึ่งใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดต์ (Levenberg-Marquardt's Back Propagation) ที่ใช้ฟังก์ชันการส่งถ่ายข้อมูลแบบซิกมอยด์ (Sigmoid Transfer Function) ในชั้นซ่อนของโครงข่าย และใช้ฟังก์ชันการแปลงแบบเชิงเส้น (Linear Transfer Function) ในชั้นแสดงผล

ข้อมูลนำเข้าประกอบไปด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิตตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัต โดยแบบจำลองจะถูกพัฒนาผ่านกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB และพิจารณาความแม่นยำจากค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percent Error, MAPE) ระหว่างค่าความตรงจริงที่วัดกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของแบบจำลอง

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1) แปลงข้อมูลสัญญาณแรงตัดที่อยู่ในหน่วยโวลต์ (Volt, V) ให้เป็นหน่วยนิวตัน (Newton, N) ตามค่า Sensitivity ของไดนาโมมิเตอร์ ดังนี้

- แรงตัดหลัก (F_z, N) = $V_z (V) \times -1200 (N/V)$
- แรงป้อนตัด (F_y, N) = $V_y (V) \times -600 (N/V)$
- แรงตัดแนวรัศมี (F_x, N) = $V_x (V) \times -600 (N/V)$

2) แปลงข้อมูลสัญญาณแรงตัดจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเลทและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสัญญาณแรงตัดกับค่าความตรงของชิ้นงานที่วัดได้จริง

$$3) \text{ คำนวณอัตราส่วนแรงป้อนตัด } \frac{F_y(\max) - F_y(\min)}{F_y(s)}$$

4) ป้อนข้อมูลนำเข้าให้โครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลนำเข้าประกอบไปด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิตตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงป้อนตัดภายใต้

เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับในการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง

5) เปรียบเทียบค่าการพยากรณ์ความตรงที่คำนวณได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกับค่าความตรงที่วัดได้จริงและค่าความตรงที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุคูณกำลังสองน้อยที่สุด

3.5.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Residual Analysis, e_{ijk}) เป็นตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของผลการทดลองและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากในการทดลองมีปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ควรมีลักษณะเป็น NID ($0, \sigma^2$) ค่าคำนวณได้จากผลต่างระหว่างค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนโดยส่วนใหญ่นิยมพิจารณาจากกราฟหรือค่า P-Value ซึ่งสามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Minitab ดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Test) เพื่อทดสอบการกระจายตัวความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Residual) ว่ามีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ จากกราฟ Normal Probability Plot หากข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดข้อมูลจะมีแนวโน้มการเรียงตัวเป็นเส้นตรง ไม่จับกลุ่ม และระยะการกระจายตัวมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ค่า P-Value จะมีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนด

2) การทดสอบความเป็นอิสระ (Independent Test) เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Independent Error) จากกราฟ Scatter Plot ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองในแนวแกนตั้งกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation Order) ในแนวแกนนอน ซึ่งการทดลองที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลาสั้นหรือปัจจัยอื่น ๆ ที่ควบคุมไม่ได้ในการทดลองอาจส่งผลต่อความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ ข้อมูลที่มีความเป็นอิสระจุดของข้อมูลจะมีการกระจายตัวแบบไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ

3) การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability Test) เพื่อทดสอบการกระจายตัวและความสม่ำเสมอของความผันแปรตลอดช่วงของปัจจัย (Homoscedasticity) ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นของค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง จากกราฟ Scatter Plot ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) การกระจายตัวควรมีลักษณะของจุดข้อมูลที่ไม่เป็นแนวโน้มหรือการจับกลุ่มของข้อมูล



บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) และอะลูมิเนียม (AL 6063) จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของความตรงของชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดโดยการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลทตอเบซีส์ในการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตออกเป็น 10 ระดับ เพื่อหาสัญญาณแรงตัดพลวัตที่สอดคล้องกับสัญญาณความตรงของชิ้นงาน นำไปสู่การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง และการเปรียบเทียบผลการพยากรณ์กับสมการถดถอยพหุคูณ

4.1 ผลการทดลอง

จากเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) และอะลูมิเนียม (AL 6063) ตามลำดับ สัญญาณแรงตัดในแต่ละเงื่อนไขการทดลองได้ถูกเก็บบันทึกเพื่อนำไปคำนวณหาอัตราส่วนแรงตัด และนำชิ้นงานสำเร็จในแต่ละเงื่อนไขการทดลองไปวัดค่าความตรงจริงที่ได้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 โดยมีปัจจัยในการทดลอง และผลลัพธ์ที่ต้องการ ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัยในการทดลอง	หน่วย
1. ความเร็วตัด (V)	รอบต่อนาที (rev/min)
2. อัตราป้อนตัด (f)	มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)
3. ความลึกตัด (D)	มิลลิเมตร (mm)
4. รัศมีจุมุมิตัด (R_n)	มิลลิเมตร (mm)
5. มุมคายเศษโลหะ (γ)	องศา (degree)

ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่ต้องการ

ผลลัพธ์ที่ต้องการ	หน่วย
1. อัตราส่วนแรงตัด ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$)	-
2. ความตรงของชิ้นงาน (St)	ไมโครเมตร (μm)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุมก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
1	100	0.15	0.6	0.8	+11	1.183	9.663
2	100	0.25	0.6	0.4	+11	0.702	25.592
3	200	0.15	0.8	0.4	+11	0.881	12.619
4	100	0.25	0.4	0.4	+11	0.599	23.999
5	200	0.15	0.4	0.8	+11	0.462	5.097
6	150	0.20	0.6	0.8	-6	0.480	15.609
7	150	0.15	0.8	0.8	+11	0.525	8.473
8	100	0.20	0.8	0.8	+11	1.268	13.093
9	150	0.15	0.4	0.8	-6	0.416	12.083
10	100	0.25	0.8	0.4	-6	0.809	32.141
11	200	0.25	0.8	0.8	-6	0.649	16.175
12	100	0.25	0.4	0.8	+11	0.475	15.317
13	100	0.15	0.4	0.8	-6	0.419	12.525
14	200	0.15	0.8	0.4	-6	0.885	13.54
15	150	0.15	0.4	0.8	+11	0.577	7.211
16	150	0.20	0.8	0.4	+11	2.343	20.362
17	200	0.20	0.6	0.8	+11	0.494	7.715
18	150	0.25	0.4	0.4	-6	1.195	24.107
19	200	0.20	0.4	0.4	+11	1.009	15.916
20	150	0.20	0.6	0.8	+11	0.454	10.236
21	100	0.25	0.8	0.8	-6	0.597	21.079
22	200	0.25	0.6	0.4	+11	1.014	24.069
23	200	0.20	0.6	0.4	+11	0.832	18.103
24	150	0.25	0.8	0.8	-6	0.891	19.563
25	150	0.25	0.4	0.8	+11	0.513	12.121
26	100	0.15	0.6	0.4	+11	0.917	14.922
27	200	0.25	0.6	0.4	-6	1.284	27.109
28	100	0.20	0.4	0.8	+11	0.604	10.262
29	100	0.15	0.8	0.8	-6	0.806	17.012
30	150	0.15	0.4	0.4	+11	0.782	12.11

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุมูก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
31	150	0.25	0.6	0.4	+11	1.979	24.426
32	200	0.25	0.6	0.8	+11	0.468	11.919
33	150	0.15	0.4	0.4	-6	1.453	13.436
34	200	0.25	0.4	0.4	-6	0.963	22.891
35	200	0.20	0.6	0.8	-6	0.460	11.431
36	200	0.15	0.6	0.4	+11	1.037	12.486
37	100	0.20	0.6	0.4	-6	0.878	21.616
38	200	0.25	0.6	0.8	-6	0.452	15.002
39	150	0.20	0.6	0.4	-6	1.726	18.341
40	150	0.20	0.4	0.8	-6	0.420	14.37
41	100	0.20	0.8	0.8	-6	0.625	18.965
42	200	0.25	0.8	0.4	-6	1.178	29.015
43	100	0.15	0.8	0.4	+11	1.097	16.456
44	200	0.25	0.8	0.4	+11	0.691	26.546
45	100	0.15	0.4	0.4	+11	0.633	13.982
46	150	0.20	0.8	0.4	-6	1.675	20.724
47	100	0.25	0.4	0.4	-6	1.275	26.171
48	150	0.20	0.4	0.4	+11	0.689	16.029
49	100	0.15	0.6	0.4	-6	1.063	14.08
50	150	0.25	0.6	0.4	-6	1.624	28.391
51	200	0.15	0.4	0.4	-6	0.847	12.217
52	150	0.25	0.8	0.8	+11	0.812	15.787
53	200	0.20	0.4	0.8	+11	0.479	6.165
54	200	0.25	0.4	0.4	+11	0.961	23.259
55	200	0.15	0.8	0.8	+11	0.529	6.06
56	200	0.20	0.4	0.8	-6	0.391	10.794
57	200	0.20	0.8	0.4	-6	1.056	17.631
58	200	0.25	0.8	0.8	+11	0.560	13.699
59	150	0.25	0.8	0.4	+11	1.794	27.332
60	100	0.15	0.4	0.8	+11	0.682	8.428
61	150	0.20	0.8	0.8	-6	0.958	16.09
62	150	0.25	0.6	0.8	-6	0.470	18.688

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุ่มก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
63	150	0.15	0.6	0.8	-6	0.528	13.634
64	150	0.20	0.8	0.8	+11	0.711	11.375
65	150	0.15	0.6	0.4	+11	1.007	13.25
66	200	0.20	0.8	0.4	+11	0.833	19.849
67	100	0.25	0.8	0.8	+11	0.608	17.167
68	150	0.15	0.8	0.4	+11	2.161	14.104
69	100	0.25	0.4	0.8	-6	0.408	18.812
70	150	0.15	0.6	0.4	-6	1.266	14.201
71	150	0.25	0.4	0.4	+11	0.678	23.708
72	100	0.15	0.8	0.4	-6	0.898	17.201
73	100	0.20	0.4	0.4	+11	0.634	17.009
74	100	0.20	0.4	0.8	-6	0.384	17.846
75	200	0.15	0.8	0.8	-6	0.863	9.744
76	200	0.15	0.4	0.8	-6	0.406	8.272
77	100	0.25	0.8	0.4	+11	1.145	27.514
78	100	0.20	0.6	0.4	+11	0.778	21.012
79	150	0.25	0.4	0.8	-6	0.345	17.72
80	100	0.25	0.6	0.8	+11	0.464	16.48
81	100	0.15	0.8	0.8	+11	1.882	11.656
82	200	0.20	0.4	0.4	-6	0.950	16.492
83	100	0.25	0.6	0.4	-6	1.077	30.556
84	200	0.20	0.6	0.4	-6	1.030	17.47
85	150	0.15	0.6	0.8	+11	0.492	8.122
86	150	0.25	0.6	0.8	+11	0.450	13.112
87	100	0.20	0.8	0.4	+11	0.793	21.895
88	200	0.25	0.4	0.8	+11	0.447	10.685
89	200	0.20	0.8	0.8	-6	0.709	12.552
90	100	0.20	0.6	0.8	+11	0.616	12.005
91	200	0.15	0.6	0.8	+11	0.407	5.775
92	150	0.20	0.6	0.4	+11	1.039	18.097
93	200	0.15	0.4	0.4	+11	0.963	11.23
94	200	0.20	0.8	0.8	+11	0.504	9.842

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุมูก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
95	150	0.20	0.4	0.8	+11	0.504	8.945
96	150	0.15	0.8	0.8	-6	0.787	14.24
97	200	0.15	0.6	0.8	-6	0.581	8.36
98	100	0.20	0.4	0.4	-6	1.375	19.5
99	200	0.25	0.4	0.8	-6	0.381	14.477
100	100	0.15	0.6	0.8	-6	0.563	13.943
101	150	0.25	0.8	0.4	-6	1.556	30.435
102	200	0.15	0.6	0.4	-6	1.067	12.643
103	150	0.15	0.8	0.4	-6	1.027	14.773
104	100	0.20	0.6	0.8	-6	0.489	18.335
105	100	0.25	0.6	0.8	-6	0.475	20.09
106	100	0.15	0.4	0.4	-6	1.365	13.801
107	150	0.20	0.4	0.4	-6	1.603	17.919
108	100	0.20	0.8	0.4	-6	0.816	22.581

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของชิ้นงานอะลูมิเนียม (Al 6063)

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุก มิตตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
1	200	0.150	0.1	0.8	-6	0.914	13.295
2	200	0.100	0.3	0.8	-6	2.306	13.922
3	250	0.125	0.2	0.8	-6	1.259	5.218
4	250	0.150	0.3	0.4	-6	1.506	14.170
5	200	0.125	0.1	0.4	-6	2.131	13.427
6	200	0.150	0.1	0.8	+11	1.854	12.345
7	150	0.150	0.3	0.8	+11	0.761	8.574
8	200	0.125	0.1	0.8	-6	2.256	8.654
9	150	0.100	0.3	0.4	+11	2.566	5.794
10	200	0.100	0.1	0.4	-6	0.540	10.158
11	200	0.100	0.2	0.4	+11	0.499	17.693
12	250	0.100	0.1	0.8	-6	2.647	5.823
13	150	0.100	0.1	0.4	+11	0.305	8.939
14	200	0.150	0.3	0.8	-6	1.216	15.215
15	250	0.125	0.1	0.8	-6	1.911	9.719
16	200	0.150	0.2	0.4	-6	2.563	18.597
17	150	0.150	0.2	0.8	-6	1.598	14.303
18	200	0.100	0.2	0.4	-6	1.923	13.565
19	150	0.125	0.2	0.4	+11	1.575	8.587
20	150	0.150	0.3	0.4	-6	2.834	22.946
21	250	0.125	0.1	0.4	-6	2.025	7.379
22	250	0.150	0.2	0.4	-6	1.663	21.892
23	200	0.125	0.1	0.4	+11	0.768	8.201
24	150	0.100	0.2	0.8	+11	0.235	7.175
25	250	0.125	0.3	0.4	+11	1.021	9.068
26	250	0.100	0.3	0.4	+11	0.648	9.430
27	250	0.150	0.2	0.8	+11	1.037	7.237
28	250	0.150	0.1	0.8	-6	2.538	5.501
29	150	0.125	0.3	0.8	-6	1.743	16.055
30	250	0.150	0.3	0.8	-6	0.941	12.330

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีงูมูก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
31	150	0.125	0.1	0.8	+11	0.689	6.572
32	200	0.150	0.3	0.4	-6	1.744	20.360
33	150	0.100	0.2	0.4	+11	0.087	14.332
34	200	0.150	0.1	0.4	-6	1.519	12.820
35	150	0.100	0.1	0.8	-6	2.596	13.696
36	150	0.125	0.2	0.8	+11	0.849	12.873
37	200	0.125	0.3	0.8	+11	0.773	10.149
38	250	0.100	0.2	0.4	+11	0.720	10.572
39	200	0.100	0.1	0.8	-6	2.798	5.785
40	250	0.150	0.1	0.8	+11	0.449	7.763
41	250	0.150	0.1	0.4	-6	0.557	10.498
42	150	0.100	0.1	0.8	+11	0.945	7.339
43	250	0.100	0.2	0.8	-6	1.955	9.323
44	150	0.150	0.3	0.4	+11	0.822	6.747
45	200	0.100	0.2	0.8	-6	1.627	6.824
46	250	0.125	0.3	0.8	+11	0.793	7.330
47	200	0.125	0.1	0.8	+11	0.907	7.971
48	150	0.125	0.1	0.4	-6	1.560	8.281
49	150	0.125	0.2	0.8	-6	1.496	6.682
50	200	0.150	0.3	0.4	+11	1.913	6.322
51	150	0.125	0.3	0.4	-6	2.293	18.733
52	250	0.100	0.3	0.8	+11	0.560	6.449
53	150	0.150	0.2	0.4	-6	1.445	24.807
54	250	0.125	0.3	0.4	-6	1.043	13.643
55	250	0.125	0.2	0.4	+11	0.605	4.156
56	150	0.100	0.1	0.4	-6	0.829	6.295
57	250	0.100	0.1	0.4	+11	0.156	6.732
58	200	0.150	0.1	0.4	+11	0.737	10.263
59	250	0.100	0.2	0.4	-6	0.757	5.498
60	150	0.100	0.3	0.8	-6	2.383	11.546
61	200	0.100	0.3	0.4	-6	2.349	17.198
62	150	0.150	0.2	0.4	+11	0.166	10.853

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีงูมก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
63	200	0.150	0.2	0.4	+11	1.375	7.846
64	200	0.100	0.1	0.4	+11	0.252	16.594
65	250	0.125	0.1	0.8	+11	0.793	9.494
66	200	0.150	0.3	0.8	+11	0.857	15.158
67	150	0.150	0.1	0.8	-6	0.722	8.076
68	200	0.100	0.2	0.8	+11	0.290	10.514
69	250	0.125	0.1	0.4	+11	1.037	8.823
70	200	0.100	0.1	0.8	+11	0.777	9.069
71	250	0.125	0.3	0.8	-6	1.160	12.111
72	150	0.125	0.1	0.4	+11	2.076	7.776
73	250	0.100	0.2	0.8	+11	0.692	11.880
74	150	0.125	0.3	0.8	+11	1.157	4.187
75	150	0.150	0.1	0.4	+11	0.184	5.938
76	250	0.150	0.2	0.8	-6	1.019	7.732
77	150	0.125	0.2	0.4	-6	0.449	10.325
78	200	0.100	0.3	0.8	+11	0.976	10.916
79	150	0.100	0.2	0.4	-6	1.659	14.263
80	200	0.150	0.2	0.8	-6	1.230	10.572
81	250	0.100	0.3	0.8	-6	1.703	14.331
82	250	0.100	0.1	0.4	-6	2.161	9.086
83	150	0.150	0.1	0.4	-6	0.755	12.930
84	250	0.125	0.2	0.8	+11	0.607	7.312
85	150	0.150	0.3	0.8	-6	1.794	20.245
86	200	0.125	0.3	0.8	-6	1.377	12.821
87	250	0.150	0.1	0.4	+11	0.366	9.976
88	250	0.150	0.2	0.4	+11	0.551	9.120
89	250	0.100	0.1	0.8	+11	1.198	6.446
90	250	0.150	0.3	0.4	+11	0.558	12.608
91	150	0.100	0.3	0.8	+11	1.118	6.928
92	150	0.100	0.2	0.8	-6	1.347	7.248
93	200	0.125	0.2	0.8	-6	1.056	9.346
94	250	0.150	0.3	0.8	+11	0.804	11.784

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุมก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (μm)
95	150	0.150	0.2	0.8	+11	0.392	6.790
96	150	0.100	0.3	0.4	-6	2.085	15.768
97	200	0.125	0.3	0.4	-6	0.872	12.492
98	150	0.125	0.3	0.4	+11	2.542	9.457
99	150	0.150	0.1	0.8	+11	0.884	7.940
100	150	0.125	0.1	0.8	-6	1.062	10.351
101	200	0.125	0.3	0.4	+11	2.091	6.730
102	200	0.150	0.2	0.8	+11	0.936	6.601
103	250	0.125	0.2	0.4	-6	0.984	9.018
104	200	0.100	0.3	0.4	+11	0.486	7.313
105	250	0.100	0.3	0.4	-6	1.744	10.568
106	200	0.125	0.2	0.8	+11	0.746	14.204
107	200	0.125	0.2	0.4	+11	1.438	6.346
108	200	0.125	0.2	0.4	-6	1.678	16.163

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่

ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดพลวัตจะสามารถวิเคราะห์หาความสอดคล้องได้ หลังจากการแยกพิจารณาสัญญาณความตรงและสัญญาณแรงตัดพลวัต โดยสัญญาณความตรงจะถูกแปลงด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) และสัญญาณแรงตัดพลวัตจะถูกแปลงด้วยการแปลงเวฟเลตแบบตอเบชีส์ (Daubechies Wavelet Transform) เพื่อแยกสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ออก

4.2.1 วิเคราะห์สัญญาณความตรง

จะต้องคำนวณหาระยะทางการกลิ้งใน 1 วินาที และจำนวนข้อมูลของความตรงเพื่อใช้ในการแปลงค่าความตรงด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ดังนี้

- การคำนวณหาระยะทางการกลิ้งใน 1 วินาที

เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความตรงและข้อมูลแรงตัดพลวัตในระยะทางการกลิ้ง 1 วินาที เนื่องจากการใช้อัตราการสุ่มของข้อมูลความตรงและข้อมูลแรงตัดพลวัตที่ไม่เท่ากัน โดยข้อมูลความตรงใช้อัตราการสุ่มที่ 400 ข้อมูลต่อวินาที ข้อมูลแรงตัดพลวัตใช้อัตราการสุ่มที่ 1,000

ข้อมูลต่อวินาที สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม และข้อมูลแรงตัดพลวัตใช้อัตราการสุมที่ 10,000 ข้อมูลต่อวินาที สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน

ระยะทางการกลึงใน 1 วินาที (S) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

$$S = \frac{V_f}{60} \quad (4.2-1)$$

โดย V_f = ความเร็วป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อนาที)

ความเร็วป้อนตัด (Feed Speed, V_f) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

$$V_f = f_n \times N_w \quad (4.2-2)$$

โดย f_n = อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)

N_w = ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)

ความเร็วรอบ (Spindle Speed, N_w) หรือจำนวนรอบที่ชิ้นงานหมุนในหนึ่งนาที มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rev/min หรือ rpm)

$$N_w = \frac{1,000 \times V}{\pi \times D} \quad (4.2-3)$$

โดย V = ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

ตัวอย่าง เงื่อนไขการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน 34.4 มิลลิเมตร

จะได้ $N_w = \frac{1,000 \times 200}{\pi \times 34.4} = 1850.64$ รอบต่อนาที

$V_f = 0.15 \times 1850.64 = 277.60$ มิลลิเมตรต่อนาที

$S = \frac{277.60}{60} = 4.63$ มิลลิเมตร

ดังนั้น ระยะทางการกลึงใน 1 วินาที ของเงื่อนไขการตัดนี้ คือ 4.63 มิลลิเมตร

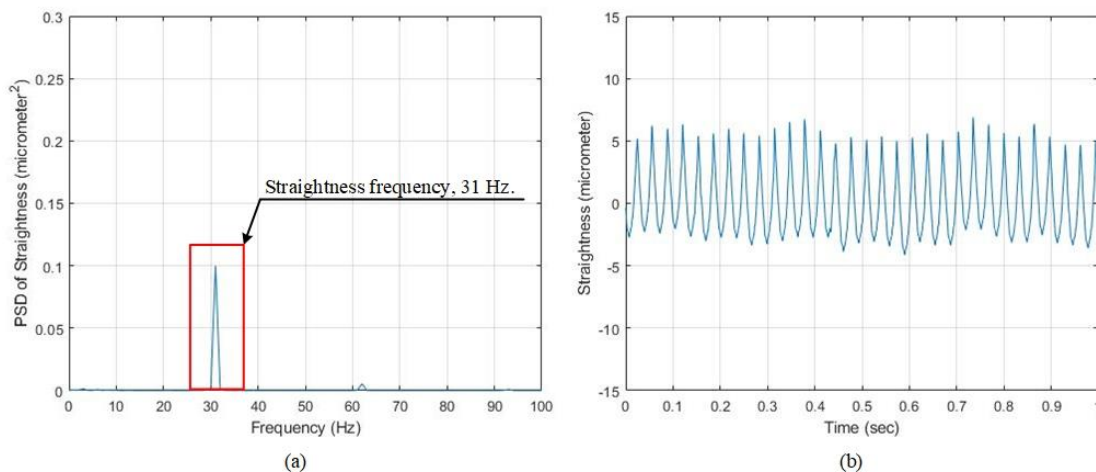
- การคำนวณจำนวนข้อมูลของความตรง

จากเครื่องวัดผิวชิ้นงานที่มีความเร็วสำหรับการวัดผิวที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ในช่วงระยะการวัดที่ 12.5 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการวัด 25 วินาที ที่อัตราสุมข้อมูล 400 ข้อมูลต่อวินาที จะสามารถคำนวณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในระยะทางการกลึง 1 วินาที ดังนี้

$$\text{จำนวนข้อมูล} = \frac{S}{0.5} \times 400 \quad (4.2-4)$$

ตัวอย่าง เงื่อนไขการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน 34.4 มิลลิเมตร ระยะทางการกลึงใน 1 วินาที เท่ากับ 4.63 มิลลิเมตร

จะได้ จำนวนข้อมูล = $\frac{4.63}{0.5} \times 400 = 3,702$ ข้อมูล

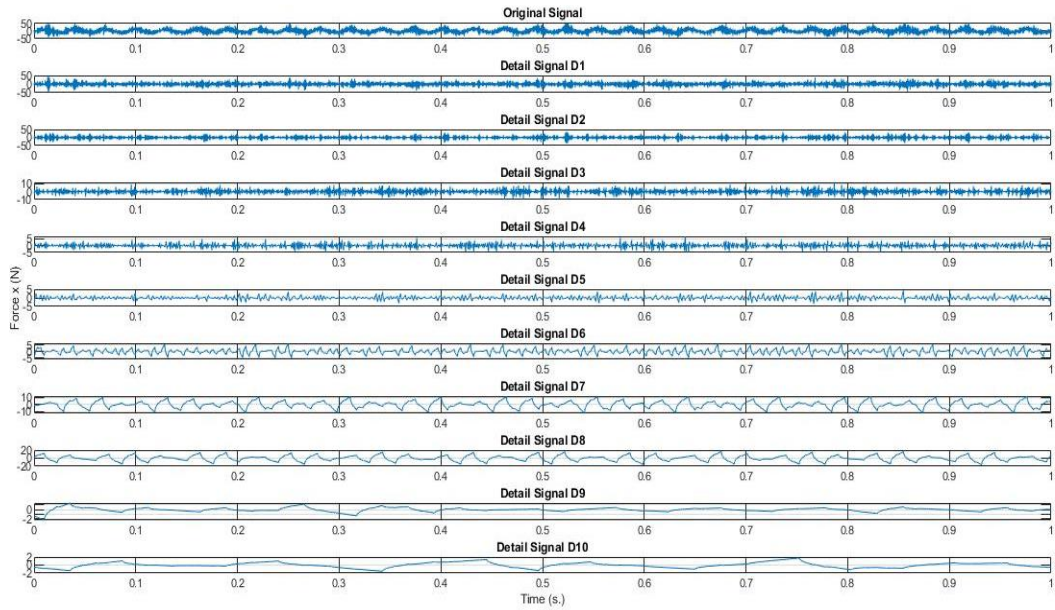


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการแปลงสัญญาณความตรงด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (a) ในโดเมนความถี่ (b) ในโดเมนความเวลา

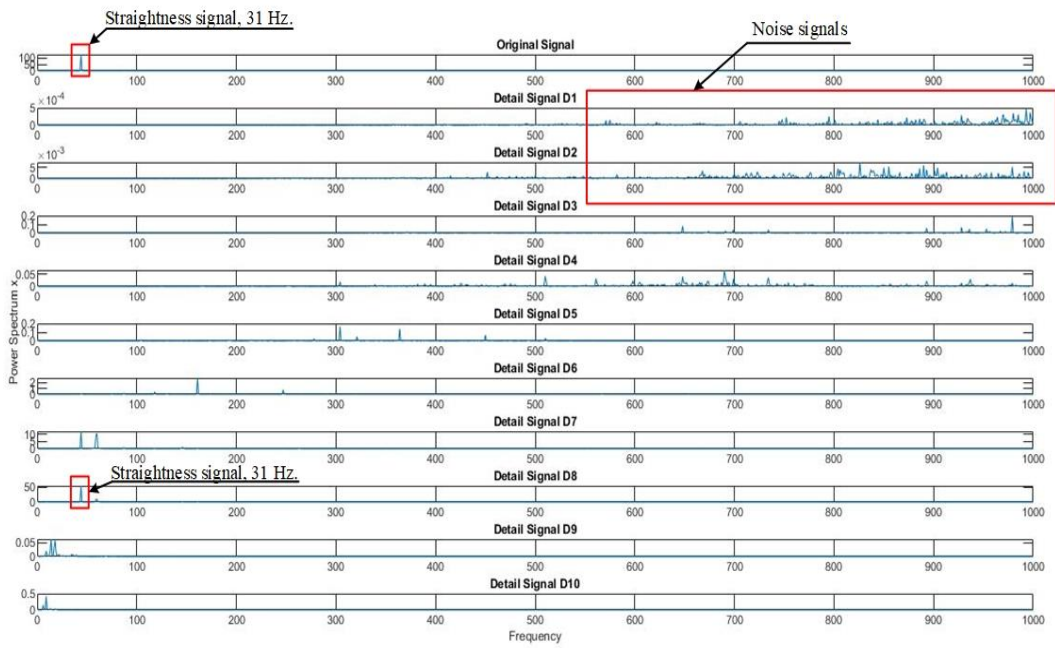
จากตัวอย่างการคำนวณข้างต้นเมื่อได้ระยะทางการกลึงใน 1 วินาที และจำนวนข้อมูลของความตรง จะสามารถแปลงสัญญาณความตรงด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วในโดเมนเวลาและความถี่ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสัญญาณความตรงที่ได้มีความถี่ที่ 31 Hz.

4.2.2 วิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัต

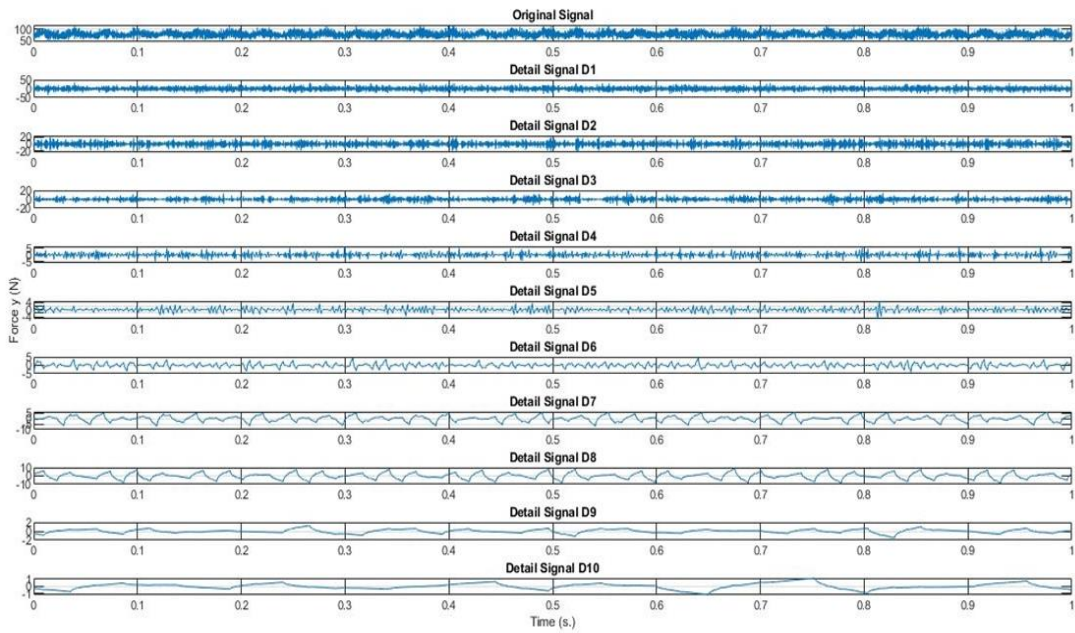
สัญญาณแรงตัดพลวัตของแกน x, y และ z จะถูกแปลงด้วยการแปลงเวฟเลทแบบคอปเบซีส์ทั้งในโดเมนเวลาและความถี่โดยแยกระดับสัญญาณออกเป็น 10 ระดับ ดังตัวอย่างเงื่อนไขการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



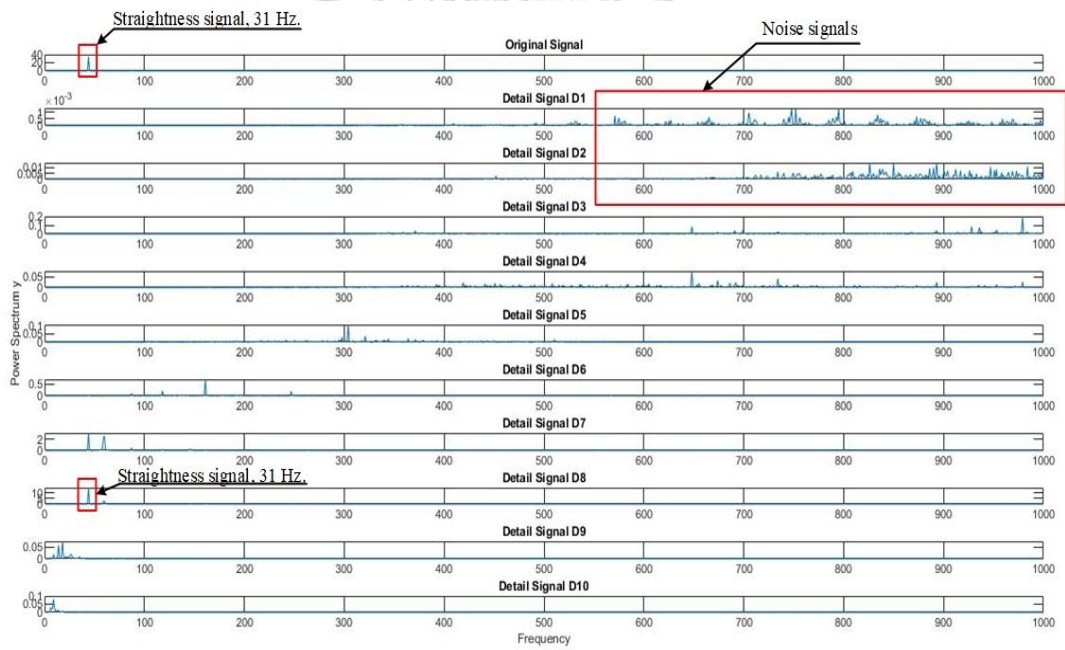
รูปที่ 4.2 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตของแกน x



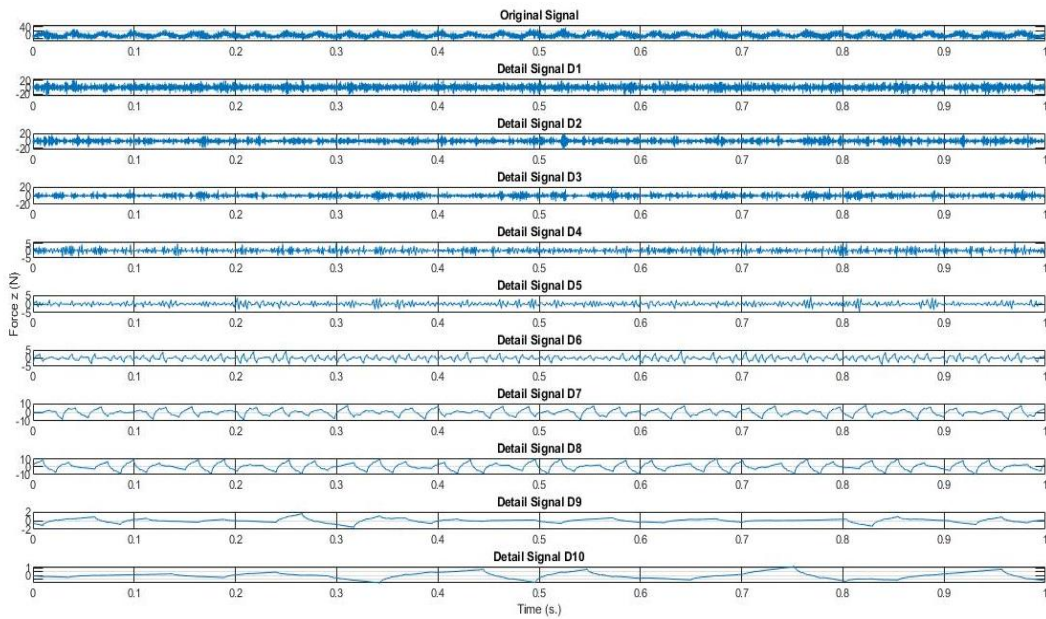
รูปที่ 4.3 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตของแกน x



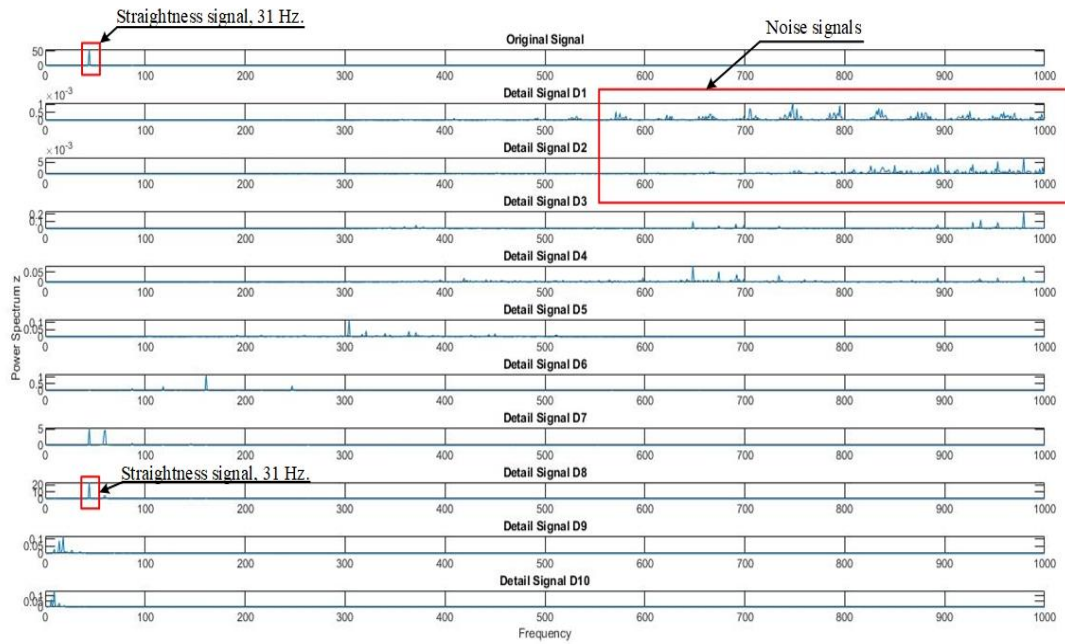
รูปที่ 4.4 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตของแกน y



รูปที่ 4.5 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตของแกน y



รูปที่ 4.6 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตของแกน z

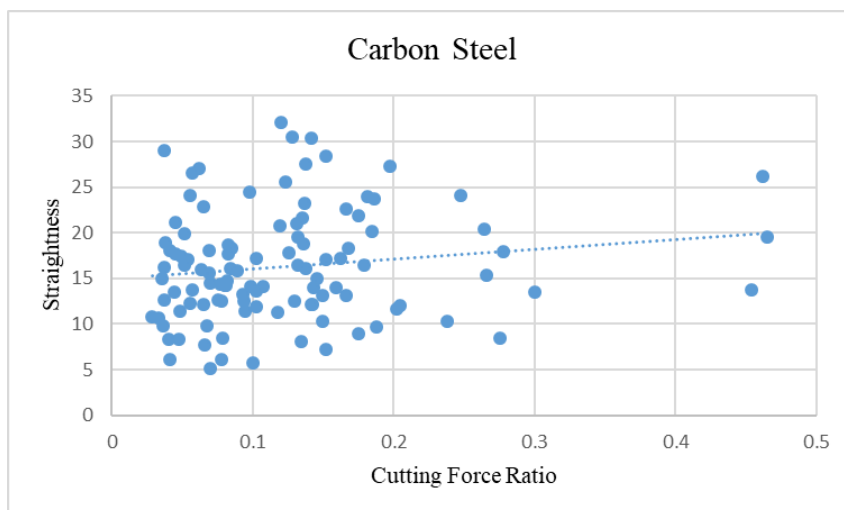


รูปที่ 4.7 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตของแกน z

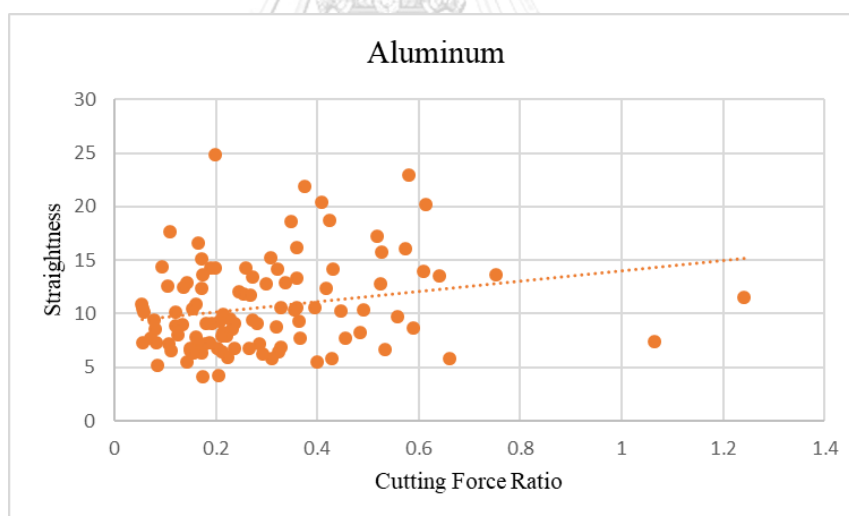
จากรูปที่ 4.2 – 4.7 จะสังเกตเห็นได้ว่า ความถี่ของสัญญาณแรงตัดพลวัตของแกน x, y และ z ที่การแปลงเวฟเลทระดับที่ 8 มีค่าเท่ากับ 31 Hz เมื่อพิจารณาร่วมกับความถี่ของสัญญาณความตรงจากรูปที่ 4.1 พบว่าความถี่ของทั้งสองสัญญาณมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถนำสัญญาณแรงตัดพลวัตที่การแปลงเวฟเลทระดับที่ 8 ไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงได้

4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราส่วนแรงตัด

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราส่วนแรงตัดของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมเพื่อดูแนวโน้มและทิศทางของกราฟ



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอัตราส่วนแรงตัด



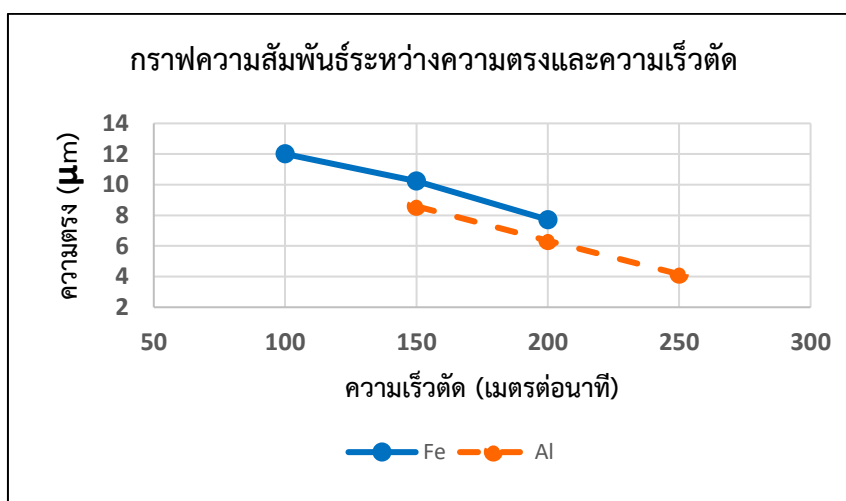
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมและอัตราส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.8 – 4.9 จะสังเกตได้ว่า ความตรงของชิ้นงานมีลักษณะแปรผันตามอัตราส่วนแรงตัด เมื่ออัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อัตราส่วนแรงตัดมีอิทธิพลต่อค่าความตรงของชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและเงื่อนไขการตัด

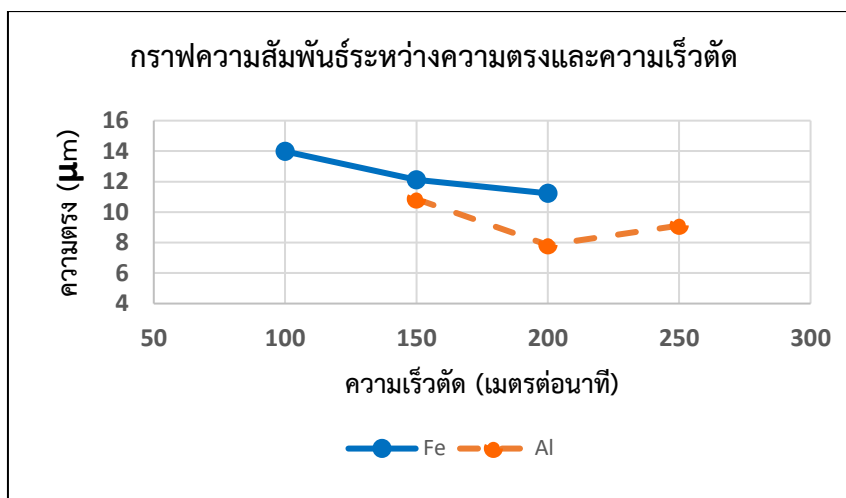
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ที่ประกอบไปด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมัดตัด และมุมคายเศษโลหะ โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ที่ระดับเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เพื่อคูอิทธิพล ทิศทางและแนวโน้มที่มีต่อความตรงทั้งชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัด



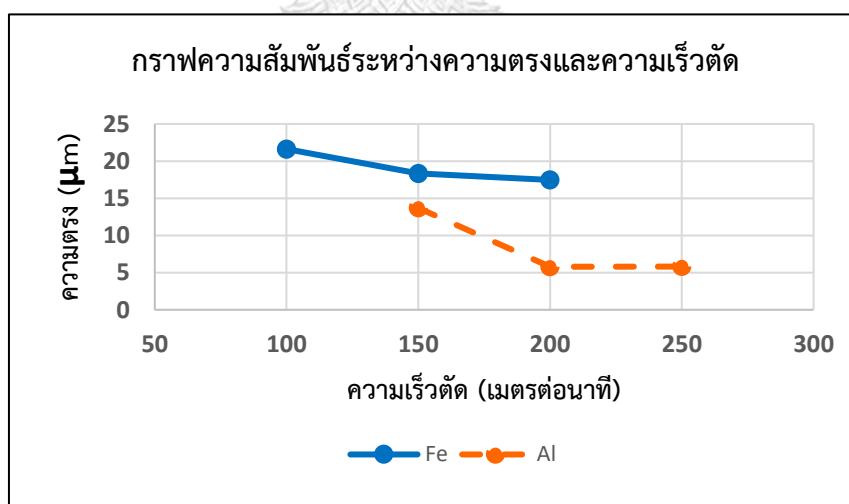
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1)

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมัดตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่อัตราป้อนตัด 0.125 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมัดตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



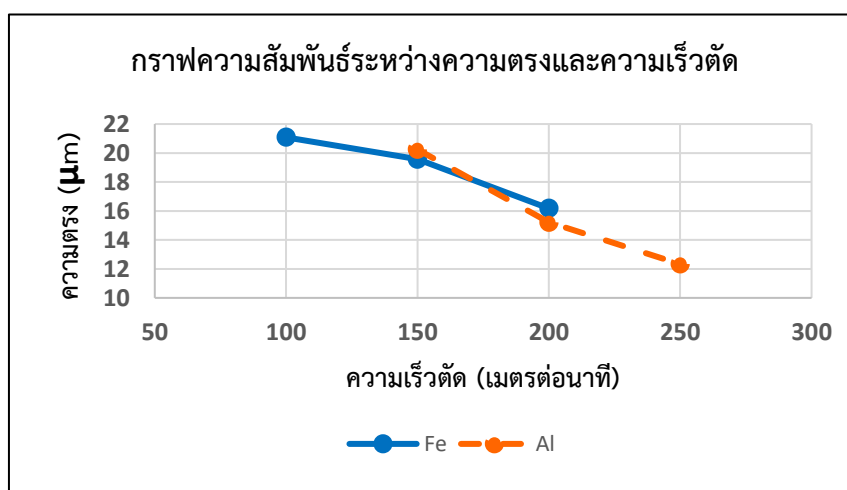
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2)

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมิตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมิตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3)

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนที่อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.1 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

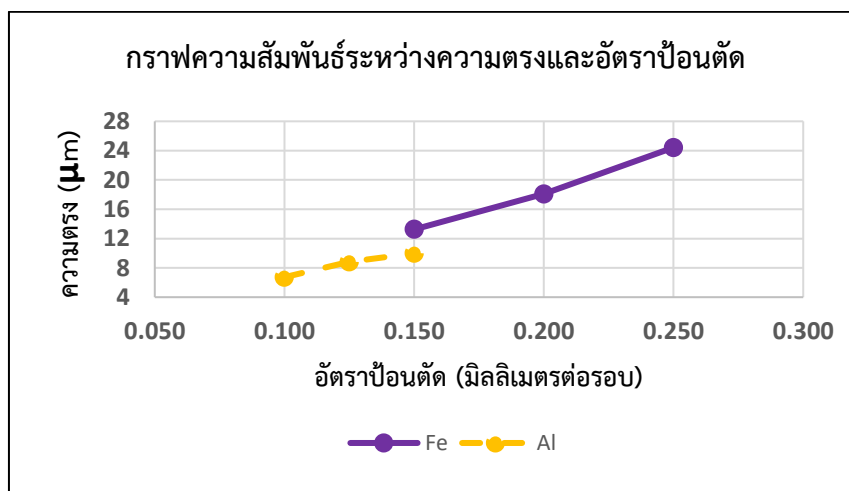


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4)

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความเร็วตัดต่าง ๆ ของชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนที่อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

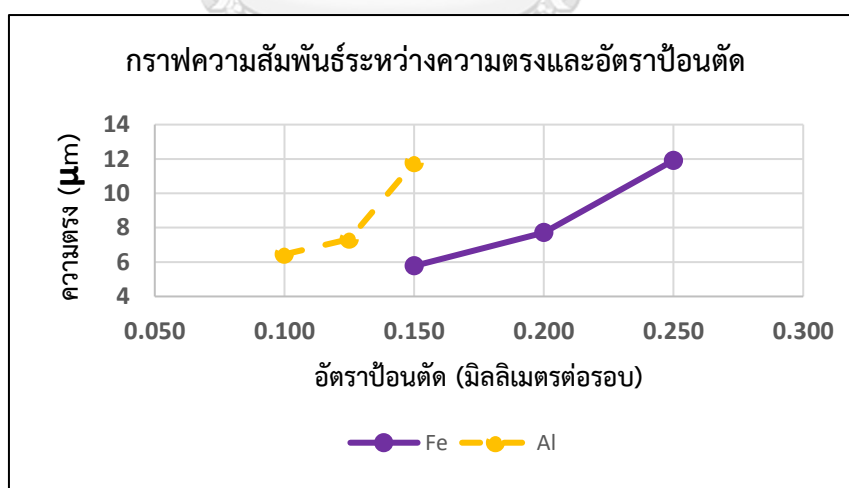
จากรูปที่ 4.10 - 4.13 พบว่า ค่าความตรงและความเร็วตัดแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงจะมีค่าน้อยลงหรือความตรงดีขึ้น เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิในการตัดสูงขึ้น ชิ้นงานจึงร้อนขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานอ่อนนุ่ม ง่ายต่อการตัดชิ้นงาน และใช้แรงในการตัดน้อยลง ในบางกรณีของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัดสูงขึ้น อุณหภูมิในการตัดสูงขึ้น ทำให้เศษโลหะเกิดการหลอมติดกับใบมีดตัด (BUE) ส่งผลให้ค่าความตรงจะมีค่ามากขึ้นหรือความตรงแย่งได้

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัด



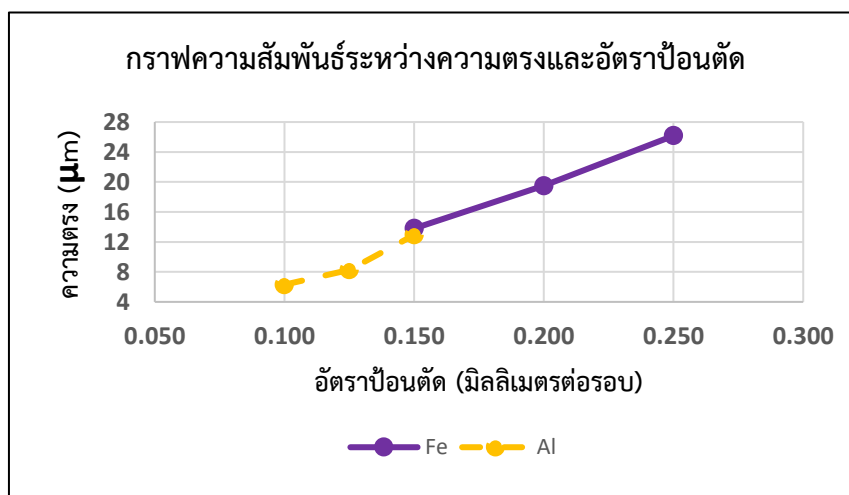
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1)

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมกัดตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.1 มิลลิเมตร รัศมีงูมกัดตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



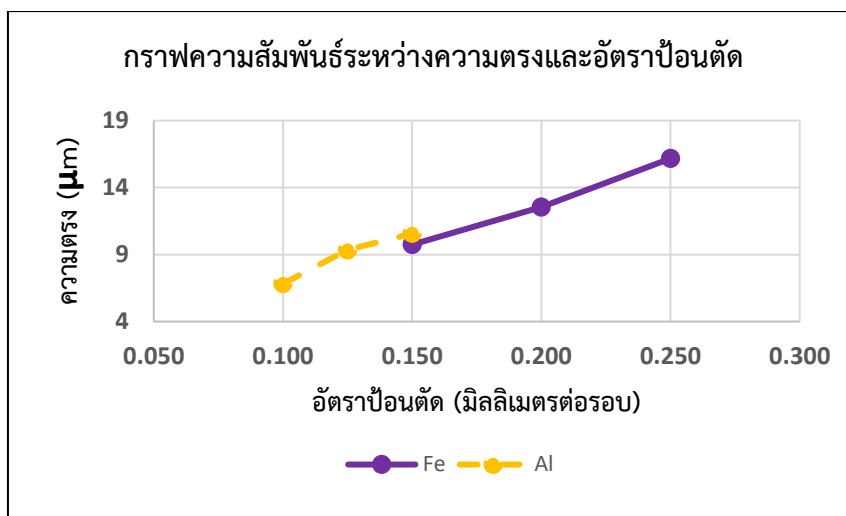
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2)

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3)

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.1 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

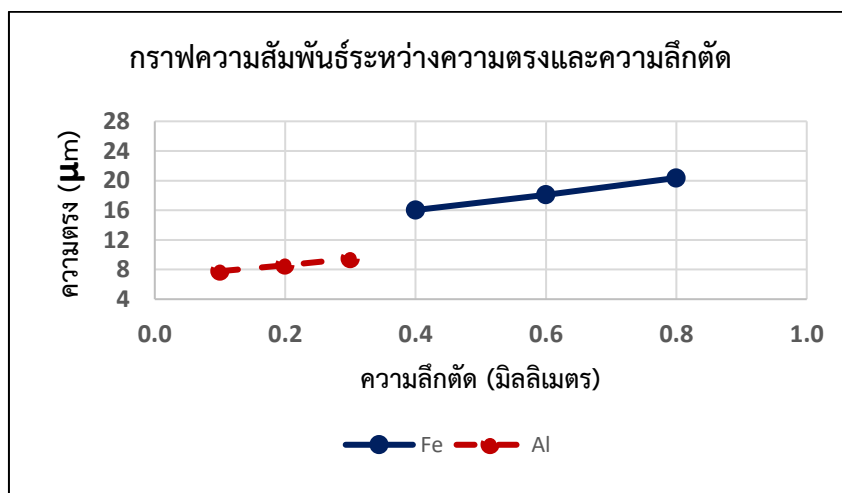


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4)

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

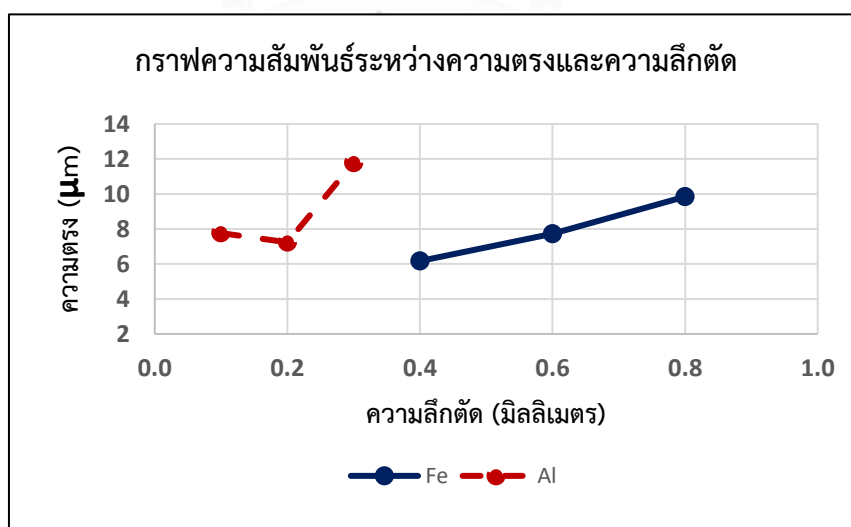
จากรูปที่ 4.14 - 4.17 พบว่า ค่าความตรงและอัตราป้อนตัดแปรผันตามกัน กล่าวคือ เมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือความตรงแย่ลง เนื่องจากอัตราป้อนตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ในการตัดมากขึ้น แรงในการตัดจึงมากขึ้น ส่งผลให้เครื่องมือตัดและชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือน กระทบต่อพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัด



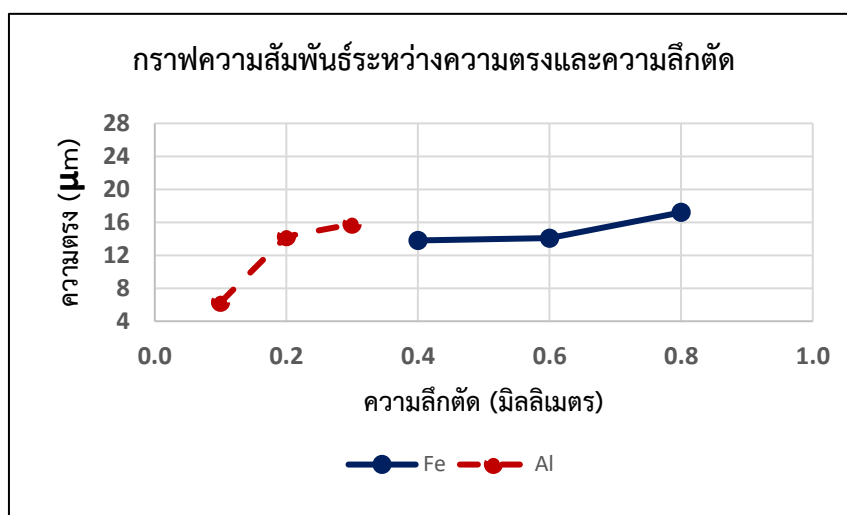
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1)

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.125 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



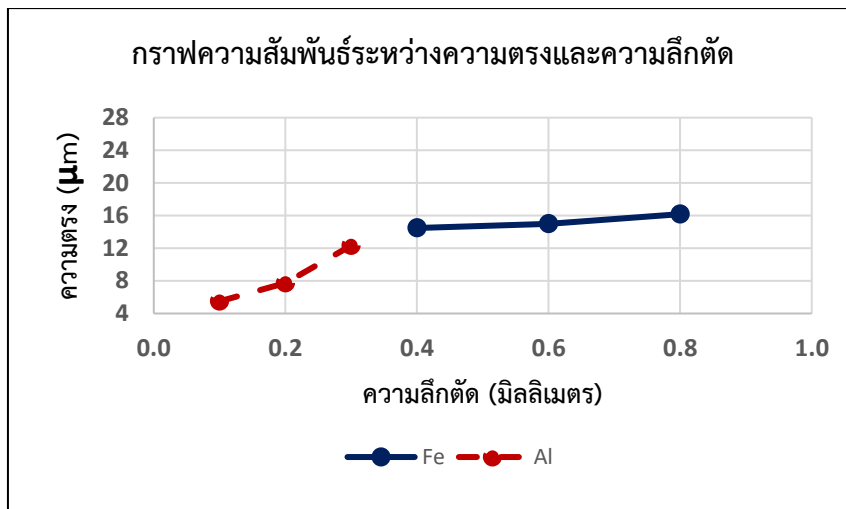
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2)

จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3)

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

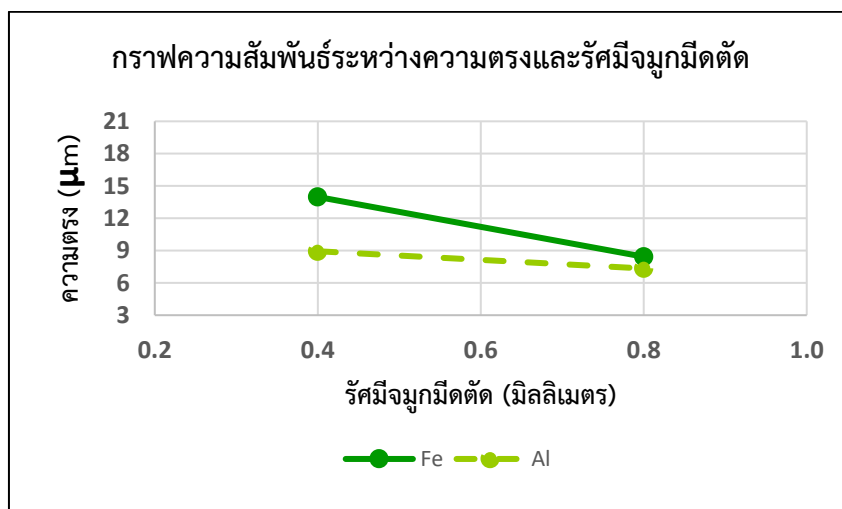


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4)

จากรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความลึกตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

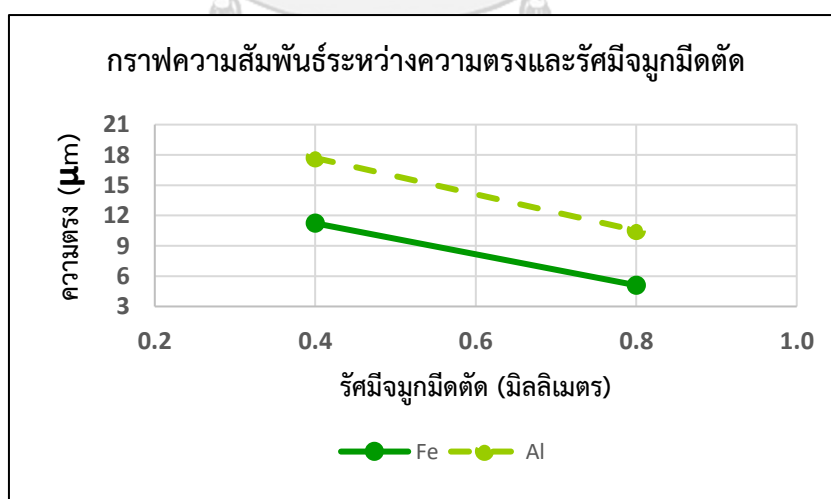
จากรูปที่ 4.18 - 4.21 พบว่า ค่าความตรงและความลึกตัดแปรผันตามกัน กล่าวคือ เมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือความตรงแยลง เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ในการตัดมากขึ้น แรงในการตัดจึงมากขึ้น ส่งผลให้เครื่องมือตัดและชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือนกระทบต่อพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน

4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมูกมีดตัด



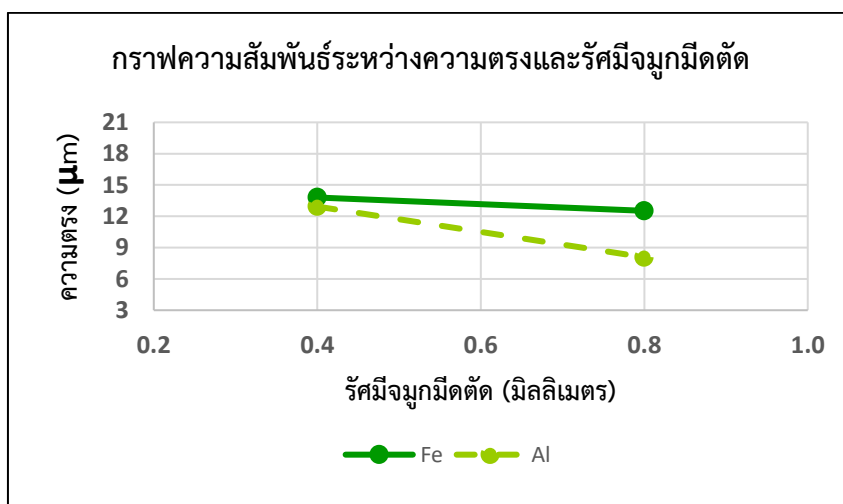
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมูกมีดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1)

จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมูกมีดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.1 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



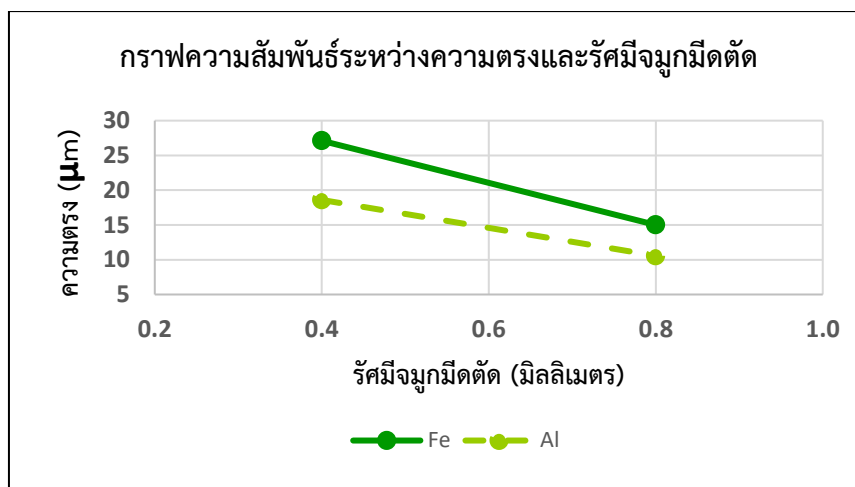
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุมูกมีดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2)

จากรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุกมิดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ +11 องศา



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุกมิดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3)

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุกมิดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.1 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

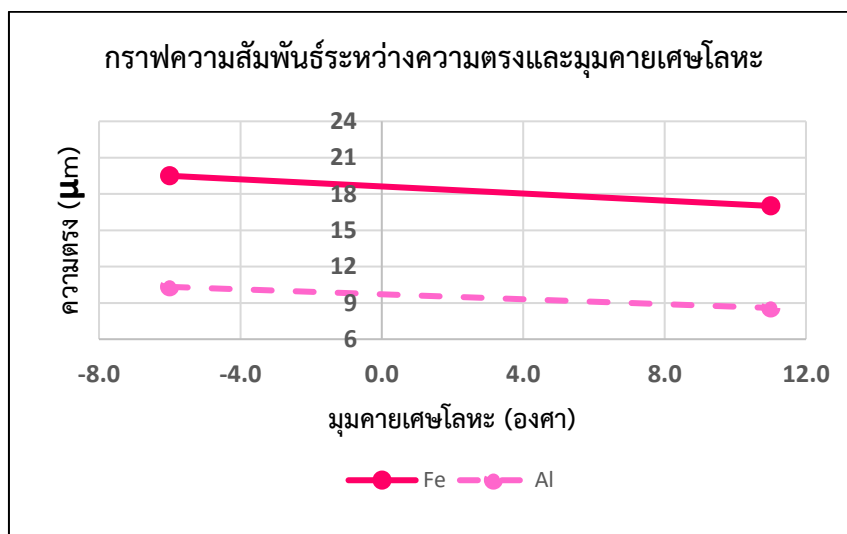


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุกมิดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4)

จากรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและรัศมีจุกมิดตัดต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

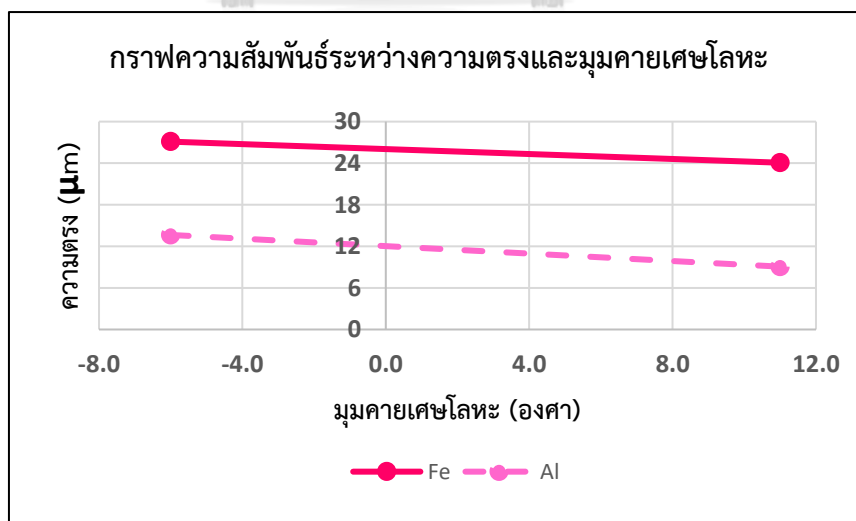
จากรูปที่ 4.22 - 4.25 พบว่า ค่าความตรงและรัศมีจุกมิดตัดแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อรัศมีจุกมิดตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงจะมีค่าน้อยลงหรือความตรงดีขึ้น เนื่องจากรัศมีจุกมิดตัดที่เพิ่มขึ้น ช่วยลดรอยป้อนตัด (Feed Mark) ที่เกิดจากการป้อนของมิดตัด

4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะ



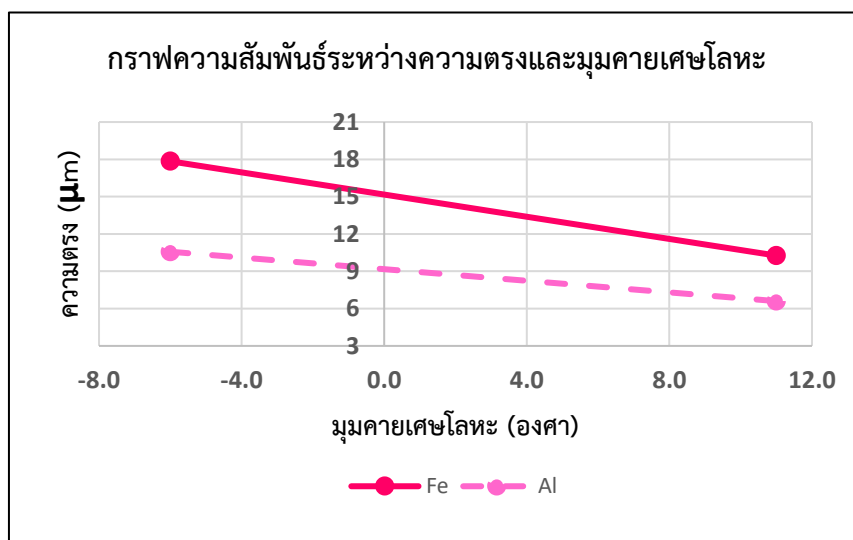
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 1)

จากรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.125 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร



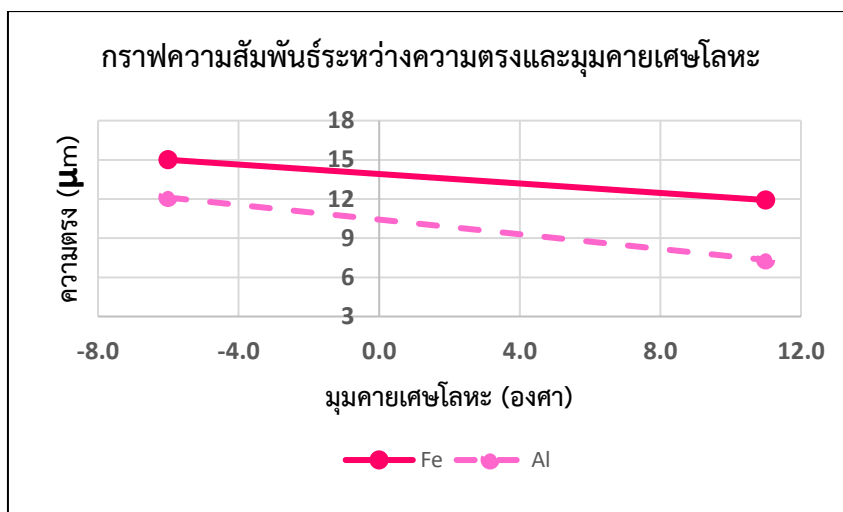
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 2)

จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุลายโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.125 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุลายโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 3)

จากรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุลายโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร



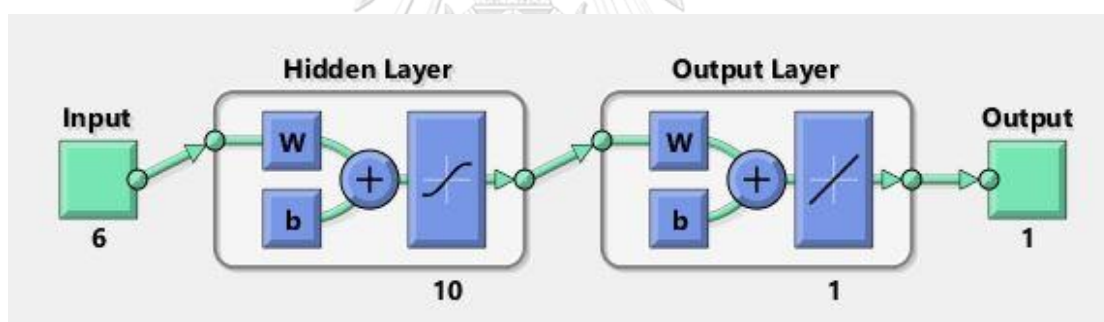
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุลายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม (ตัวอย่าง 4)

จากรูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและมุลายเศษโลหะต่าง ๆ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.125 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.26 - 4.29 พบว่า ค่าความตรงและมุลายเศษโลหะแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อมุลายเศษโลหะเพิ่มขึ้น ค่าความตรงจะมีค่าน้อยลงหรือความตรงดีขึ้น เนื่องจากมุลายเศษโลหะที่เพิ่มขึ้น ช่วยทำให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกง่ายขึ้น การต้านทางการเคลื่อนที่ของมีดตัดจึงน้อยลง ส่งผลให้ใช้แรงตัดน้อยลง

4.5 การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

พัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้า (Two-layer Feed Forward Neural Network) ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ด (Levenberg-Marquardt's Back Propagation) ซึ่งง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน รวดเร็ว และเหมาะสำหรับการพยากรณ์ในโจทย์ปัญหาที่ไม่ใช่เชิงเส้นตรงที่มีขนาดของปัญหาตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดปานกลาง โครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วย 3 ชั้น คือ ชั้นข้อมูลนำเข้า (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นข้อมูลส่งออก (Output Layer) ซึ่งชั้นข้อมูลนำเข้าประกอบไปด้วย 6 โหนด สอดคล้องตามจำนวนตัวแปรนำเข้า คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิตตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด ในส่วนของชั้นซ่อนประกอบไปด้วย 10 โหนด ที่ใช้ฟังก์ชันการส่งถ่ายข้อมูลแบบซิกมอยด์ (Sigmoid Transfer Function) สำหรับปรับค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) ชั้นข้อมูลส่งออกประกอบไปด้วย 1 โหนด ที่ใช้ฟังก์ชันการแปลงแบบเชิงเส้น (Linear Transfer Function) สำหรับส่งค่าการพยากรณ์ความตรง ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.30 แบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้า (Two-layer Feed Forward Neural Network)

ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมด 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองการพยากรณ์ความตรงสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม แบบจำลองการพยากรณ์ความตรงสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงสำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความแม่นยำของแต่ละแบบจำลอง ซึ่งนำไปสู่การหาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงที่ให้ความแม่นยำที่ดีที่สุด

ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงข้อมูลนำเข้าจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ข้อมูลสำหรับการสอน (Training Data) ข้อมูลสำหรับการยืนยันความถูกต้อง (Validation Data) และข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Test Data) โดยจะแบ่งส่วนข้อมูลเป็นเปอร์เซ็นต์จากข้อมูลนำเข้า

ทั้งหมด ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของการยืนยันความถูกต้อง (Validation Percentage) และเปอร์เซ็นต์ของการทดสอบ (Test Percentage) สามารถปรับเปอร์เซ็นต์ได้ 7 ค่า ดังตารางที่ 4.5 ดังนั้นการทดลองปรับค่าเปอร์เซ็นต์ทั้งหมด 49 การทดลอง จึงถูกดำเนินการเพื่อหาสัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ที่ให้ค่า R-value ที่สูงที่สุด และผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ระดับการปรับค่าเปอร์เซ็นต์ของข้อมูล

เปอร์เซ็นต์ของข้อมูล	ระดับการปรับค่า						
การยืนยันความถูกต้อง	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
การทดสอบ	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองปรับค่าเปอร์เซ็นต์ของข้อมูล

Run Order	%Training	%Validation	%Test	R-value ของโครงข่ายประสาทเทียม		
				สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม	สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม	สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน
1	65	5	30	0.94709	0.66933	0.99587
2	65	15	20	0.90602	0.72688	0.99748
3	70	20	10	0.93617	0.74744	0.99474
4	35	35	30	0.77468	0.69749	0.99276
5	45	35	20	0.91670	0.63579	0.99409
6	80	5	15	0.89791	0.92376	0.99414
Run Order	%Training	%Validation	%Test	R-value ของโครงข่ายประสาทเทียม		
				สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม	สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม	สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน
7	50	20	30	0.92867	0.77242	0.99460
8	70	5	25	0.95521	0.75806	0.99814
9	50	25	25	0.91927	0.78025	0.98861

10	75	5	20	0.94752	0.80660	0.99811
11	55	10	35	0.92370	0.66237	0.99267
12	60	35	5	0.93576	0.85785	0.99640
13	60	10	30	0.92947	0.60552	0.99651
14	45	25	30	0.89627	0.66881	0.98671
15	30	35	35	0.89658	0.68038	0.95612
16	55	15	30	0.89512	0.76980	0.99254
17	75	10	15	0.94081	0.77943	<u>0.99911</u>
18	70	25	5	0.88399	0.77826	0.99382
19	65	20	15	<u>0.95800</u>	0.77121	0.99596
20	55	30	15	0.90434	0.68555	0.99432
21	90	5	5	0.93583	<u>0.96222</u>	0.99797
22	50	35	15	0.90595	0.69702	0.99504
23	55	25	20	0.92138	0.76761	0.99819
24	55	35	10	0.93952	0.85637	0.99733
25	75	20	5	0.93966	0.86530	0.99630
26	70	15	15	0.94376	0.89794	0.99848
27	50	30	20	0.90561	0.68346	0.99372
28	45	30	25	0.91882	0.58141	0.99491
RunOrder	%Training	%Validation	%Test	R-value ของโครงข่ายประสาทเทียม		
				สำหรับชั้นงาน เที็กก้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม	สำหรับ ชั้นงาน อะลูมิเนียม	สำหรับ ชั้นงาน เที็กก้า คาร์บอน
29	40	25	35	0.93034	0.66379	0.99160
30	60	15	25	0.94273	0.84432	0.99337
31	70	10	20	0.86179	0.88982	0.99797

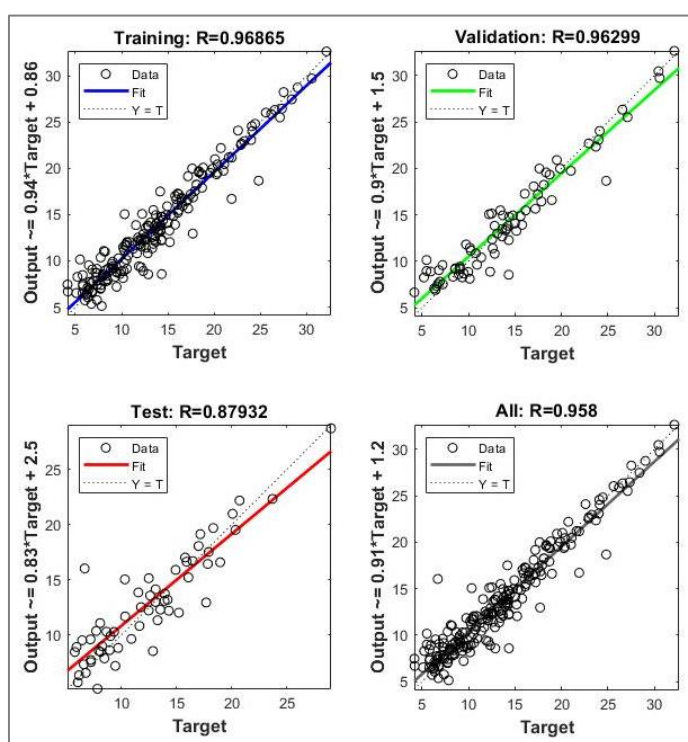
32	65	10	25	0.83974	0.73974	0.99449
33	50	15	35	0.90686	0.41443	0.99478
34	60	20	20	0.92445	0.60090	0.99202
35	60	25	15	0.88120	0.81851	0.99200
36	80	10	10	0.93149	0.82019	0.99477
37	85	10	5	0.92062	0.83355	0.99885
38	80	15	5	0.89792	0.93348	0.99654
39	45	20	35	0.90409	0.72733	0.98126
40	65	30	5	0.93793	0.88087	0.99583
41	65	25	10	0.92372	0.94935	0.99499
42	85	5	10	0.93207	0.86245	0.99708
43	60	30	10	0.91646	0.77843	0.99300
44	60	5	35	0.94185	0.61521	0.99648
45	55	20	25	0.90769	0.78442	0.99452
46	40	35	25	0.89797	0.78216	0.99181
47	75	15	10	0.89785	0.91876	0.99735
48	35	30	35	0.89284	0.75272	0.32789
49	40	30	30	0.91746	0.71973	0.99000

จากตารางที่ 4.6 สามารถสรุปเงื่อนไขสัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ที่ให้ค่า R-value ที่สูงที่สุดของแต่ละแบบจำลอง ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งค่า R-value ยิ่งใกล้ค่า 1 มากเท่าไร แสดงว่าความสัมพันธ์ของค่าการพยากรณ์กับค่าเป้าหมายมีค่าใกล้เคียงกันมากเท่านั้น และทั้งสามแบบจำลองที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการพยากรณ์ความตรงต่อไป

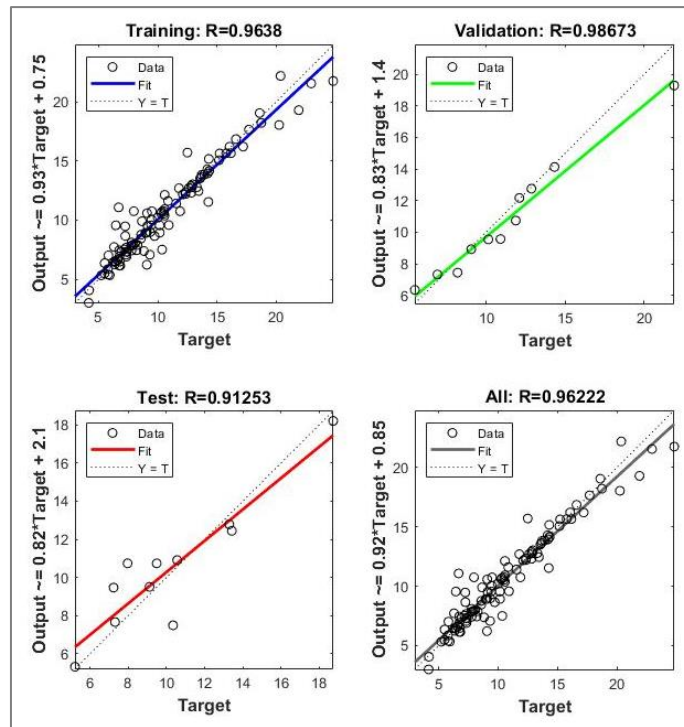
ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขสัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ที่ให้ค่า R-value ที่สูงที่สุดของแต่ละแบบจำลอง

โครงข่าย ประสาทเทียม	%Training	%Validation	%Test	R-value
-------------------------	-----------	-------------	-------	---------

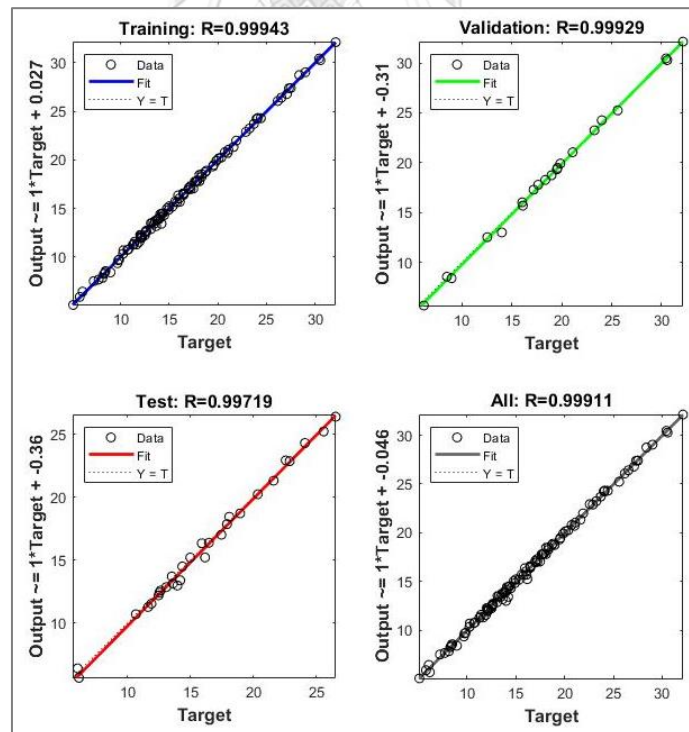
สำหรับชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม	65	20	15	0.95800
สำหรับชิ้นงาน อะลูมิเนียม	90	5	5	0.96222
สำหรับชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอน	75	10	15	0.99911



รูปที่ 4.31 ค่า R-value ของแบบจำลองสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.32 ค่า R-value ของแบบจำลองสำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.33 ค่า R-value ของแบบจำลองสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน

4.6 การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงที่พัฒนาขึ้นทั้งสามแบบจำลอง จะถูกนำมาตรวจสอบความแม่นยำของการพยากรณ์ด้วยชุดข้อมูลใหม่ ซึ่งสามารถแบ่งชุดข้อมูลเป็น 2 ชุด คือ ชุดข้อมูลใหม่ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง และชุดข้อมูลใหม่นอกขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

4.6.1 การตรวจสอบด้วยชุดข้อมูลใหม่ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

ชุดข้อมูลใหม่จะถูกเก็บจากการทดลองใหม่ที่อยู่ในขอบเขตการทดลองเดิม โดยเงื่อนไขการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 4.8 และผลการทดลองใหม่แสดงดังตารางที่ 4.9 – 4.10

ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลองเดิม

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	เหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)	อะลูมิเนียม (Al 6063)
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	100 และ 200	150 และ 250
อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรตอร์อบ)	0.15 และ 0.25	0.100 และ 0.125
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4 และ 0.8	0.1 และ 0.2
รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)	0.4 และ 0.8	0.4 และ 0.8
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6 และ 11	-6 และ 11

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลองเดิม

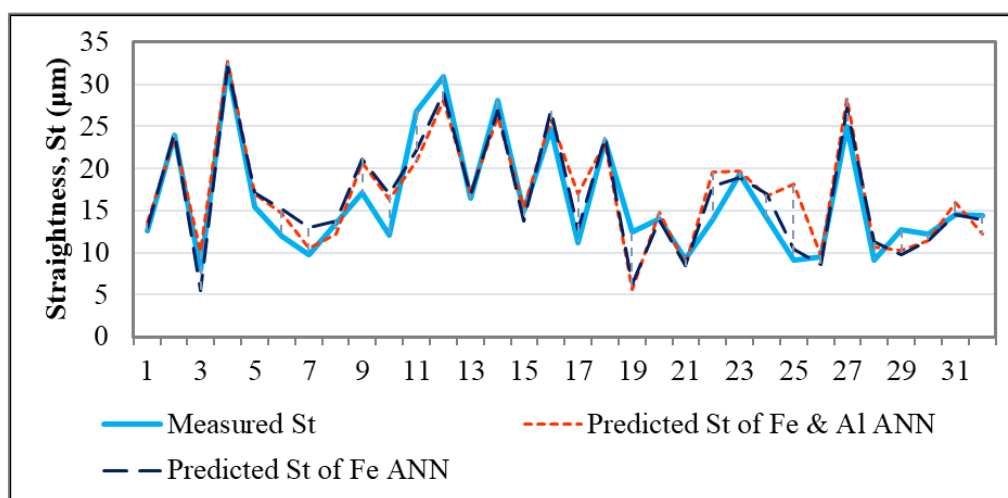
No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุกมีดตัด (mm)	มุมคายเศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์เหล็กและอะลูมิเนียม	พยากรณ์เหล็ก
1	200	0.15	0.8	0.4	+11	12.619	13.589	13.011
2	100	0.25	0.4	0.4	+11	23.999	23.618	24.227
3	200	0.15	0.4	0.8	+11	7.966	10.176	5.566
4	100	0.25	0.8	0.4	-6	32.141	32.682	32.139
5	200	0.25	0.8	0.8	-6	15.395	17.026	17.095

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตรา ป้อนตัด (mm/rev)	ความ ลึกตัด (mm)	รัศมีงมูก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์ เหล็กและ อะลูมิเนียม	พยากรณ์ เหล็ก
6	100	0.25	0.4	0.8	+11	11.908	14.663	15.149
7	100	0.15	0.4	0.8	-6	9.793	10.568	12.936
8	200	0.15	0.8	0.4	-6	13.541	12.215	13.801
9	100	0.25	0.8	0.8	-6	17.079	20.787	21.155
10	100	0.15	0.8	0.8	-6	12.106	16.374	16.955
11	200	0.25	0.4	0.4	-6	26.821	20.923	22.177
12	200	0.25	0.8	0.4	-6	30.941	28.055	28.964
13	100	0.15	0.8	0.4	+11	16.456	17.097	16.801
14	200	0.25	0.8	0.4	+11	28.063	26.215	26.956
15	100	0.15	0.4	0.4	+11	14.982	15.360	13.784
16	100	0.25	0.4	0.4	-6	24.738	25.843	26.887
17	200	0.15	0.4	0.4	-6	11.216	17.044	12.702
18	200	0.25	0.4	0.4	+11	23.259	23.036	23.724
19	200	0.15	0.8	0.8	+11	12.466	5.598	6.309
20	200	0.25	0.8	0.8	+11	14.066	14.831	13.862
21	100	0.15	0.4	0.8	+11	9.216	8.613	8.456
22	100	0.25	0.8	0.8	+11	13.916	19.579	17.843
23	100	0.25	0.4	0.8	-6	19.305	19.653	18.923
24	100	0.15	0.8	0.4	-6	14.201	16.675	16.994
25	200	0.15	0.8	0.8	-6	9.121	18.109	10.416
26	200	0.15	0.4	0.8	-6	9.462	9.686	8.575
27	100	0.25	0.8	0.4	+11	24.947	28.415	27.249
28	100	0.15	0.8	0.8	+11	9.127	10.668	11.300
29	200	0.25	0.4	0.8	+11	12.746	10.327	9.743
30	200	0.15	0.4	0.4	+11	12.230	11.501	11.464
31	200	0.25	0.4	0.8	-6	14.540	15.957	14.544
32	100	0.15	0.4	0.4	-6	14.438	12.195	13.943

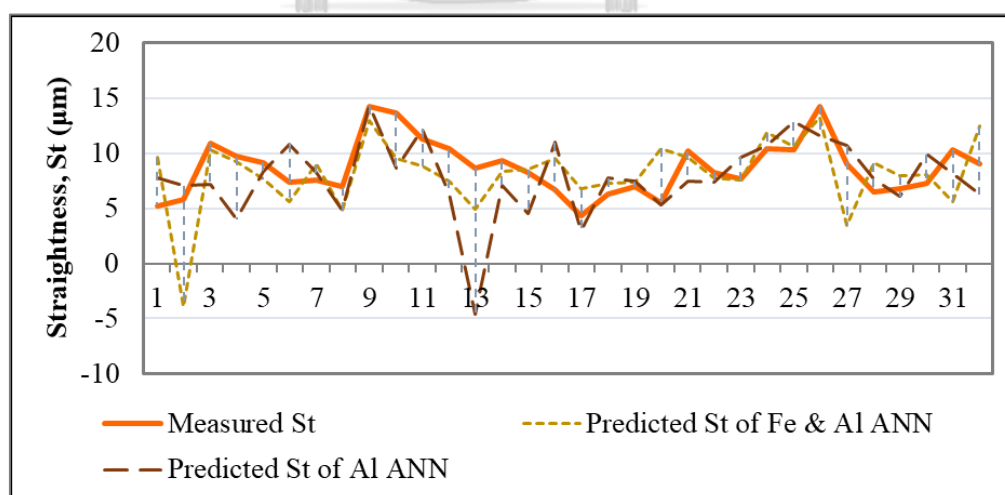
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลองเดิม

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตรา ป้อนตัด (mm/rev)	ความ ลึกตัด (mm)	รัศมีจุมก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์ เหล็กและ อะลูมิเนียม	พยากรณ์ อะลูมิเนียม
1	250	0.125	0.2	0.8	-6	5.218	9.683	7.789
2	250	0.100	0.1	0.8	-6	5.823	-3.957	7.071
3	150	0.100	0.1	0.4	11	10.920	10.363	7.201
4	250	0.125	0.1	0.8	-6	9.719	9.229	4.014
5	150	0.125	0.2	0.4	11	9.192	7.669	8.398
6	250	0.125	0.1	0.4	-6	7.379	5.602	10.856
7	150	0.100	0.2	0.8	11	7.560	9.031	8.298
8	150	0.125	0.1	0.8	11	6.956	4.787	4.775
9	150	0.100	0.2	0.4	11	14.257	12.947	14.312
10	150	0.100	0.1	0.8	-6	13.696	9.584	8.686
11	150	0.125	0.2	0.8	11	11.348	8.831	12.217
12	250	0.100	0.2	0.4	11	10.389	7.436	6.290
13	150	0.100	0.1	0.8	11	8.700	4.949	-4.648
14	250	0.100	0.2	0.8	-6	9.323	8.381	7.066
15	150	0.125	0.1	0.4	-6	8.281	8.506	4.531
16	150	0.125	0.2	0.8	-6	6.682	9.528	10.969
17	250	0.125	0.2	0.4	11	4.312	6.775	2.998
18	150	0.100	0.1	0.4	-6	6.295	7.284	7.760
19	250	0.100	0.1	0.4	11	6.968	7.352	7.453
20	250	0.100	0.2	0.4	-6	5.498	10.446	5.342
21	250	0.125	0.1	0.8	11	10.180	9.622	7.511
22	250	0.125	0.1	0.4	11	8.289	7.815	7.413
23	150	0.125	0.1	0.4	11	7.697	7.541	9.655
24	250	0.100	0.2	0.8	11	10.417	11.869	10.743
25	150	0.125	0.2	0.4	-6	10.325	10.597	12.840
26	150	0.100	0.2	0.4	-6	14.263	13.220	11.553
27	250	0.100	0.1	0.4	-6	9.086	3.481	10.700
28	250	0.125	0.2	0.8	11	6.532	9.121	7.666
29	250	0.100	0.1	0.8	11	6.777	7.928	6.075
30	150	0.100	0.2	0.8	-6	7.248	8.017	9.891

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตรา ป้อนตัด (mm/rev)	ความ ลึกตัด (mm)	รัศมีจุก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์ เหล็กและ อะลูมิเนียม	พยากรณ์ อะลูมิเนียม
31	150	0.125	0.1	0.8	-6	10.351	5.652	8.139
32	250	0.125	0.2	0.4	-6	9.018	12.442	6.258



รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง

4.6.2 การตรวจสอบด้วยชุดข้อมูลใหม่นอกขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

ชุดข้อมูลใหม่นี้จะถูกเก็บจากการทดลองใหม่ที่อยู่นอกขอบเขตการทดลองเดิม โดยเงื่อนไขการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 4.11 และผลการทดลองใหม่แสดงดังตารางที่ 4.12 – 4.13

ตารางที่ 4.11 เงื่อนไขการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลองเดิม

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	เหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)	อะลูมิเนียม (Al 6063)
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	120 และ 250	180 และ 260
อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.18 และ 0.30	0.10 และ 0.15
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.2 และ 0.5	0.1 และ 0.3
รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)	0.4 และ 0.8	0.4 และ 0.8
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6 และ 11	-6 และ 11

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนนอกขอบเขตการทดลองเดิม

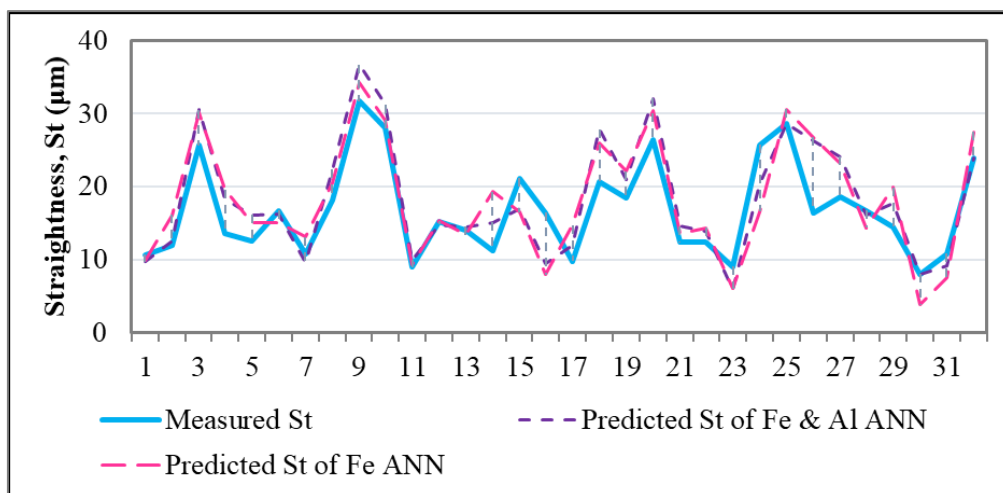
No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตราป้อนตัด (mm/rev)	ความลึกตัด (mm)	รัศมีจุกมีดตัด (mm)	มุมคายเศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์เหล็กและอะลูมิเนียม	พยากรณ์เหล็ก
1	120	0.18	0.5	0.8	11	10.688	9.738	9.937
2	120	0.18	0.5	0.8	-6	12.039	12.558	16.131
3	120	0.30	0.5	0.4	11	25.679	30.516	30.051
4	120	0.30	0.2	0.8	11	13.593	18.354	19.623
5	250	0.18	0.5	0.4	11	12.504	16.126	15.129
6	120	0.18	0.5	0.4	11	16.726	16.292	15.079
7	250	0.18	0.2	0.4	11	10.73	9.619	13.095
8	120	0.30	0.2	0.8	-6	18.177	22.310	20.530
9	120	0.30	0.5	0.4	-6	31.688	36.695	34.175
10	250	0.30	0.5	0.4	11	28.034	31.252	29.108
11	250	0.18	0.2	0.8	-6	9.007	9.974	9.369
12	120	0.18	0.2	0.4	-6	15.206	14.821	15.351

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตรา ป้อนตัด (mm/rev)	ความ ลึกตัด (mm)	รัศมีงมูก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์ เหล็กและ อะลูมิเนียม	พยากรณ์ เหล็ก
13	250	0.30	0.2	0.8	-6	14.09	14.515	13.420
14	250	0.30	0.2	0.8	11	11.212	15.004	19.282
15	120	0.18	0.5	0.4	-6	21.163	16.979	16.514
16	120	0.18	0.2	0.8	11	16.428	9.436	7.949
17	120	0.18	0.2	0.8	-6	9.835	11.998	14.750
18	250	0.30	0.2	0.4	-6	20.726	27.854	26.011
19	120	0.30	0.5	0.8	11	18.391	21.032	22.134
20	120	0.30	0.2	0.4	-6	26.499	32.075	30.394
21	120	0.18	0.2	0.4	11	12.391	14.608	13.618
22	250	0.18	0.2	0.4	-6	12.379	13.819	14.399
23	250	0.18	0.5	0.8	11	9.058	5.947	6.083
24	250	0.30	0.5	0.8	-6	25.746	20.322	16.585
25	250	0.30	0.5	0.4	-6	28.642	28.709	30.589
26	250	0.30	0.2	0.4	11	16.428	26.307	26.755
27	120	0.30	0.5	0.8	-6	18.538	24.087	23.218
28	250	0.18	0.5	0.4	-6	16.748	16.130	14.356
29	250	0.30	0.5	0.8	11	14.476	17.721	19.899
30	250	0.18	0.2	0.8	11	8.019	8.062	3.828
31	250	0.18	0.5	0.8	-6	10.837	9.209	7.602
32	120	0.30	0.2	0.4	11	23.983	23.862	27.481

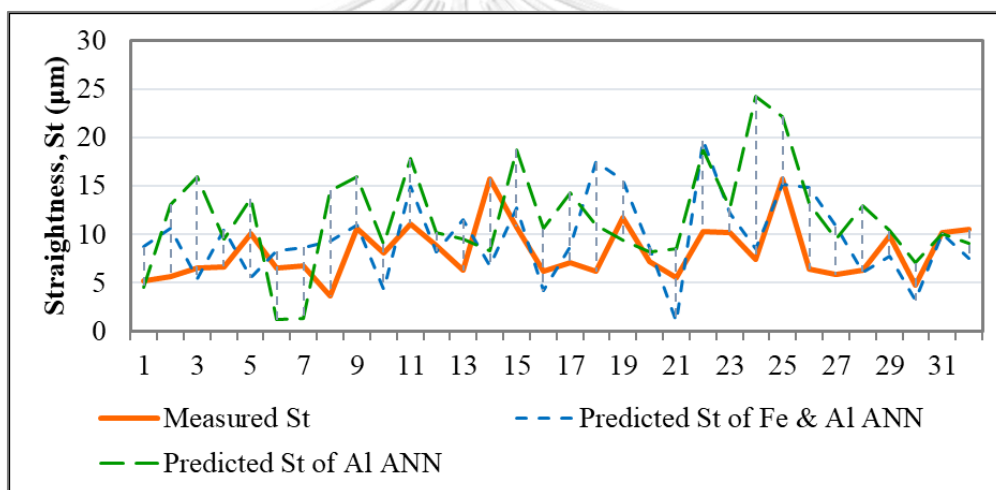
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองใหม่ของชิ้นงานอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลองเดิม

No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตรา ป้อนตัด (mm/rev)	ความ ลึกตัด (mm)	รัศมีงมูก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์ เหล็กและ อะลูมิเนียม	พยากรณ์ อะลูมิเนียม
1	260	0.10	0.1	0.8	11	5.182	8.699	4.511
2	180	0.10	0.1	0.8	-6	5.630	10.666	13.098
3	180	0.15	0.3	0.8	11	6.516	5.449	15.965
4	260	0.10	0.3	0.4	11	6.651	10.522	9.548

5	260	0.15	0.1	0.4	11	10.117	5.532	13.686
6	260	0.10	0.1	0.4	11	6.516	8.282	1.195
7	260	0.15	0.1	0.8	-6	6.798	8.661	1.335
8	180	0.10	0.1	0.8	11	3.653	9.269	14.552
9	180	0.10	0.3	0.4	-6	10.638	10.970	15.953
10	180	0.10	0.1	0.4	-6	8.054	4.332	8.974
11	180	0.15	0.1	0.4	-6	11.105	14.944	17.815
12	180	0.15	0.1	0.8	11	8.905	8.213	10.234
13	260	0.10	0.3	0.8	11	6.292	11.490	9.551
14	180	0.15	0.3	0.4	11	15.727	6.781	8.340
15	260	0.15	0.3	0.4	-6	10.751	12.769	18.709
16	260	0.10	0.1	0.4	-6	6.196	4.203	10.594
17	180	0.10	0.3	0.4	11	7.078	8.750	14.321
18	180	0.10	0.3	0.8	11	6.177	17.489	10.974
19	180	0.10	0.3	0.8	-6	11.763	15.598	9.368
20	260	0.10	0.3	0.8	-6	7.220	8.694	8.179
21	260	0.15	0.1	0.8	11	5.585	0.985	8.552
22	180	0.15	0.3	0.8	-6	10.351	19.671	18.663
23	260	0.15	0.3	0.4	11	10.215	12.129	12.706
24	180	0.10	0.1	0.4	11	7.381	8.481	24.272
25	180	0.15	0.3	0.4	-6	15.688	15.129	22.186
26	180	0.15	0.1	0.8	-6	6.379	14.782	13.209
27	260	0.15	0.3	0.8	11	5.867	10.849	9.489
28	260	0.10	0.3	0.4	-6	6.356	6.152	12.984
29	180	0.15	0.1	0.4	11	9.881	7.762	10.387
30	260	0.10	0.1	0.8	-6	4.733	3.172	7.070
No	ความเร็วตัด (rev/min)	อัตรา ป้อนตัด (mm/rev)	ความ ลึกตัด (mm)	รัศมีจุมุก มีดตัด (mm)	มุมคาย เศษโลหะ (degree)	ความตรง (μm)		
						วัดจริง	พยากรณ์ เหล็กและ อะลูมิเนียม	พยากรณ์ อะลูมิเนียม
31	260	0.15	0.3	0.8	-6	10.175	10.092	10.049
32	260	0.15	0.1	0.4	-6	10.506	7.589	9.102



รูปที่ 4.36 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนนอกขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.37 กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง

4.6.3 การคำนวณค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนและค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ

ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percent Error, MAPE) เป็นค่าดัชนีวัดความแม่นยำของการพยากรณ์ ซึ่งคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของค่าความคลาดเคลื่อน

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|f_t - a_t|}{a_t} \quad (4.9-1)$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ} = 100\% - \text{MAPE} \quad (4.9-2)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } f_t &= \text{ค่าความตรงที่ได้จากการพยากรณ์} \\ a_t &= \text{ค่าความตรงที่ได้จากการวัด} \\ n &= 1, 2, 3, \dots, t \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.14 สรุปการคำนวณค่า MAPE ของแต่ละแบบจำลอง

โครงข่ายประสาทเทียม	ภายใต้ขอบเขตการทดลอง				นอกขอบเขตการทดลอง			
	เหล็กกล้าคาร์บอน		อะลูมิเนียม		เหล็กกล้าคาร์บอน		อะลูมิเนียม	
	%MAPE	%ความแม่นยำ	%MAPE	%ความแม่นยำ	%MAPE	%ความแม่นยำ	%MAPE	%ความแม่นยำ
พยากรณ์เหล็กและอะลูมิเนียม	17.43	82.57	30.03	69.97	18.14	81.86	48.12	51.88
พยากรณ์เหล็ก	13.47	86.53	-	-	24.49	75.51	-	-
พยากรณ์อะลูมิเนียม	-	-	29.30	70.70	-	-	68.57	31.43

จากตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขภายใต้ขอบเขตการทดลอง พบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กและอะลูมิเนียมให้ค่าความแม่นยำที่น้อยกว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมที่ขึ้นงานชนิดเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาเงื่อนไขนอกขอบเขตการทดลองพบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กและอะลูมิเนียมให้ค่าความแม่นยำที่มากกว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมที่ขึ้นงานชนิดเดียวกัน

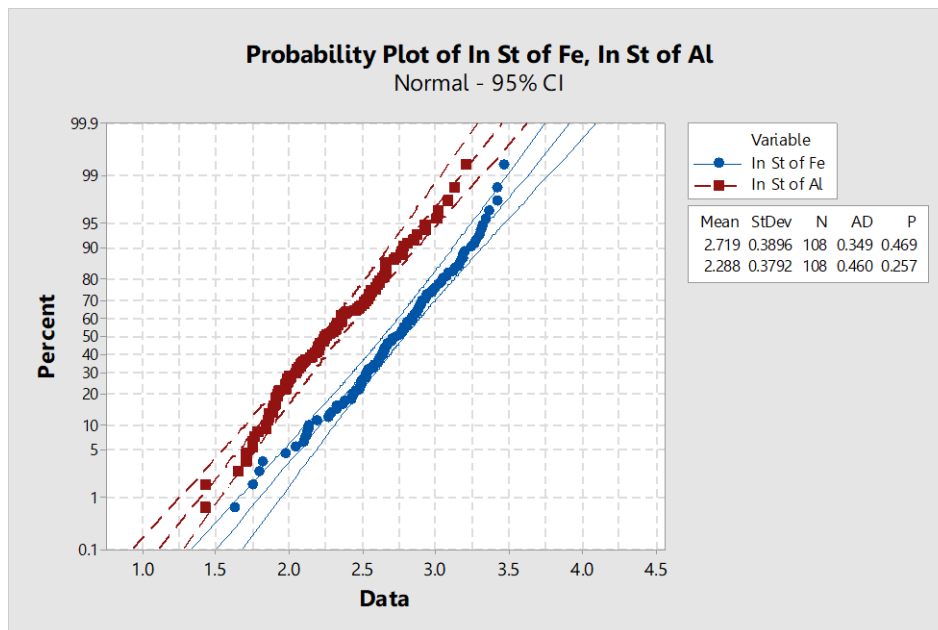
4.7 การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้สมการถดถอยพหุคูณ

4.7.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality Test)

เป็นการทดสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูลการทดลอง โดยการสร้างกราฟ Normal Probability Plot กำหนดสมมติฐานการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังนี้

H_0 : ข้อมูลการทดลองมีการกระจายแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลการทดลองมีการกระจายแบบไม่ปกติ



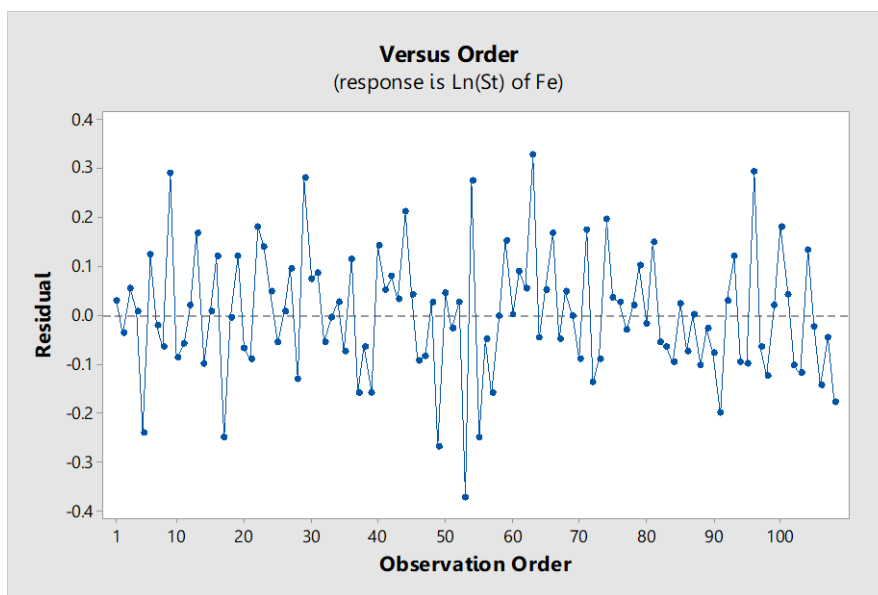
รูปที่ 4.38 กราฟ Normal Probability Plot ของข้อมูลความตรง (St) ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม

จากรูปที่ 4.30 พบว่า ข้อมูลมีการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง มีค่า P-value ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมเท่ากับ 0.469 และ 0.257 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักและสรุปได้ว่า ข้อมูลความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมมีการกระจายแบบปกติ

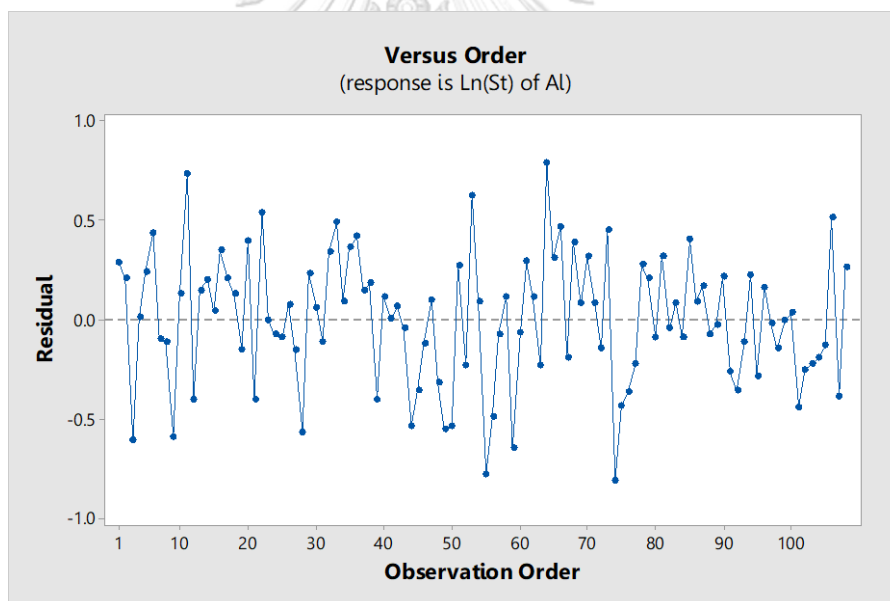
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.7.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test)

เป็นการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูล โดยการสร้างกราฟ Residual Versus Order



รูปที่ 4.39 กราฟ Residual Versus Order ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน

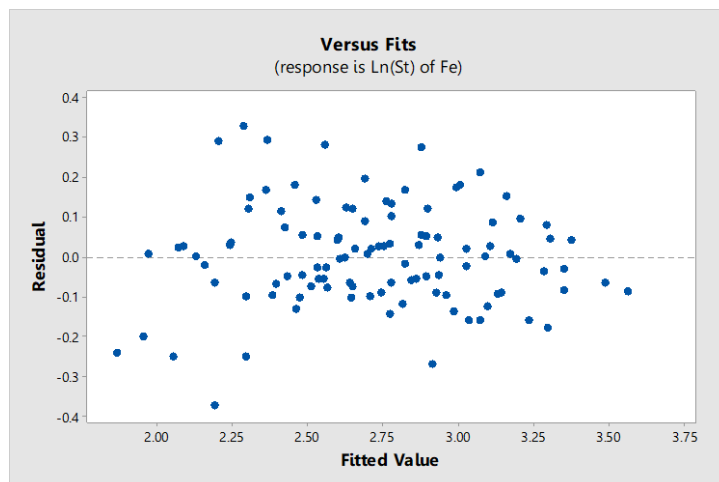


รูปที่ 4.40 กราฟ Residual Versus Order ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียม

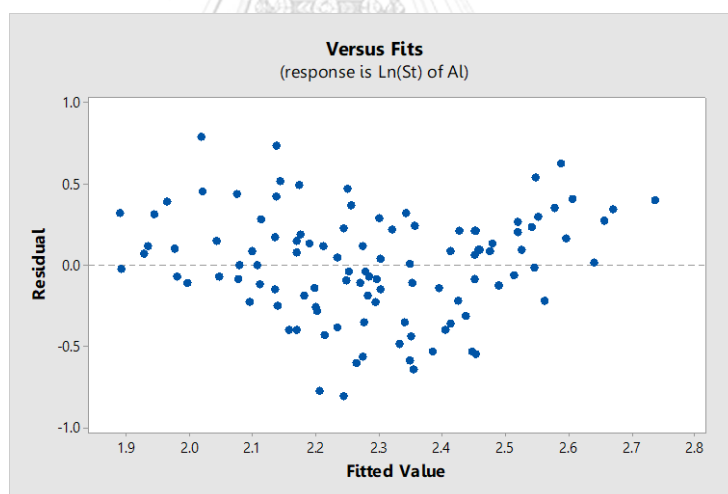
จากรูปที่ 4.31 – 4.32 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลความตรงมีการเรียงตัวที่เป็นอิสระ กระจายตัวขึ้นลงรอบเส้นศูนย์อย่างสม่ำเสมอ ไม่มีรูปแบบ (Pattern) ที่ชัดเจนที่แน่นอน ไม่มีแนวโน้ม (Trend) ที่สามารถคาดการณ์ได้ จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียมมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.7.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

เป็นการทดสอบการกระจายตัวและความสม่ำเสมอของค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยการสร้างกราฟ Residual Versus Fit



รูปที่ 4.41 กราฟ Residual Versus Fit ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน



รูปที่ 4.42 กราฟ Residual Versus Fit ของข้อมูลความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียม

จากรูปที่ 4.33 – 4.34 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีรูปแบบหรือวัฏจักร ไม่มีแนวโน้มไปทางทิศทางใดทิศทางหนึ่ง มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 จึงสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของข้อมูลมีความสม่ำเสมอ

จากผลการทดลองนำมาพัฒนาสมการสำหรับพยากรณ์ความตรงด้วยการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย

Regression Analysis: Ln(St) versus Ln(V), Ln(f), Ln(d), Ln(Rn), Rk, Ln(Fy)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	25.3139	4.21898	54.04	0.000
Ln(V)	1	0.4043	0.40430	5.18	0.024
Ln(f)	1	4.8232	4.82316	61.78	0.000
Ln(d)	1	1.0579	1.05790	13.55	0.000
Ln(Rn)	1	4.2495	4.24951	54.43	0.000
Rk	1	2.6715	2.67147	34.22	0.000
Ln(Fy)	1	0.5717	0.57173	7.32	0.007
Error	209	16.3170	0.07807		
Total	215	41.6309			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.279414	60.81%	59.68%	58.27%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	4.813	0.365	13.18	0.000	
Ln(V)	-0.1769	0.0777	-2.28	0.024	1.43
Ln(f)	0.6797	0.0865	7.86	0.000	1.84
Ln(d)	0.1550	0.0421	3.68	0.000	2.34
Ln(Rn)	-0.4054	0.0550	-7.38	0.000	1.00
Rk	-0.01327	0.00227	-5.85	0.000	1.03
Ln(Fy)	0.0866	0.0320	2.71	0.007	1.66

Regression Equation

$$\text{Ln(St)} = 4.813 - 0.1769 \text{Ln(V)} + 0.6797 \text{Ln(f)} + 0.1550 \text{Ln(d)} - 0.4054 \text{Ln(Rn)} - 0.01327 \text{Rk} + 0.0866 \text{Ln(Fy)}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Ln(St)	Fit	Resid	Std Resid
9	1.7568	2.3276	-0.5707	-2.08
11	2.8732	2.0958	0.7774	2.83
28	1.7049	2.2810	-0.5760	-2.11
44	1.9091	2.5517	-0.6425	-2.32
50	1.8440	2.4730	-0.6290	-2.27
55	1.4246	2.2477	-0.8231	-2.98
59	1.7044	2.3043	-0.5999	-2.18
64	2.8091	2.0237	0.7854	2.86
68	2.3527	1.7570	0.5957	2.18
73	2.4748	1.8481	0.6267	2.28
74	1.4320	2.1350	-0.7030	-2.54
75	1.7813	2.3762	-0.5949	-2.18
106	2.6535	2.0594	0.5941	2.15

R: Large residual

รูปที่ 4.43 ผลการสร้างสมการถดถอยพหุคูณด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.51 จะได้สมการถดถอยพหุคูณสำหรับการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมดังสมการที่ 4.10-1 โดยมีค่า R-sq เท่ากับ 60.81%

$$\text{Ln(St)} = 4.813 - 0.1769 \text{Ln(V)} + 0.6797 \text{Ln(f)} + 0.1550 \text{Ln(d)} - 0.4054 \text{Ln(Rn)} - 0.01327 \text{Rk} + 0.0866 \text{Ln}\left(\frac{Fy(\text{max}) - Fy(\text{min})}{Fy(s)}\right) \quad (4.10-1)$$

โดย	V	=	ความเร็วตัด (รอบต่อนาที)
	f	=	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)
	D	=	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
	R_n	=	รัศมีจุมกมิตัด (มิลลิเมตร)
	Y	=	มุมคายเศษโลหะ (องศา)

4.8 การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยใช้สมการถดถอยพหุคูณ

+ ตารางผลการทำนาย

ตารางที่ 4.15 ตารางสรุปการคำนวณ MAPE ของสมการถดถอยพหุคูณสำหรับการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม

แบบจำลอง	ภายใต้ขอบเขตการทดลอง				นอกขอบเขตการทดลอง			
	เหล็กกล้าคาร์บอน		อะลูมิเนียม		เหล็กกล้าคาร์บอน		อะลูมิเนียม	
	%ความแม่นยำ	%ความแม่นยำ	%ความแม่นยำ	%ความแม่นยำ	%ความแม่นยำ	%ความแม่นยำ	%ความแม่นยำ	
สมการถดถอยพหุคูณ (R-sq = 0.6081)	18.29	81.71	33.24	66.76	12.59	87.41	28.70	71.30

4.9 การเปรียบเทียบการพยากรณ์ความตรงระหว่างแบบจำลอง

จากแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงทั้งสามแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของแต่ละแบบจำลองโดยพิจารณาตามชนิดของชิ้นงาน คือ ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม และพิจารณาตามเงื่อนไขการทดลอง คือ เงื่อนไขการทดลองภายใต้ขอบเขตการทดลองและเงื่อนไขการทดลองนอกขอบเขตการทดลอง นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและสมการถดถอยพหุคูณ ซึ่งเป็นวิธีการพยากรณ์ความตรงของงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยจะพิจารณาในกรณีการพยากรณ์ความตรง

สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม ทั้งนี้จะไม่พิจารณาเปรียบเทียบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและสมการถดถอยพหุคูณสำหรับชิ้นงานชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงที่สามารถพยากรณ์ความตรงได้ทั้งชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมโดยใช้แบบจำลองเดียวกันได้

เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์ที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นนอกเหนือจากการเปรียบเทียบความแม่นยำจากค่า MAPE จะดำเนินการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากร (Test Concerning a Different Between Two Means: Paired t Test) เพื่อวิเคราะห์ให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญโดยพิจารณาจากความต่างกันของค่าพยากรณ์แต่ละคู่ กำหนดสมมติฐานการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังนี้

H_0 : ผลต่างของค่าความตรงของทั้งสองประชากรเท่ากัน

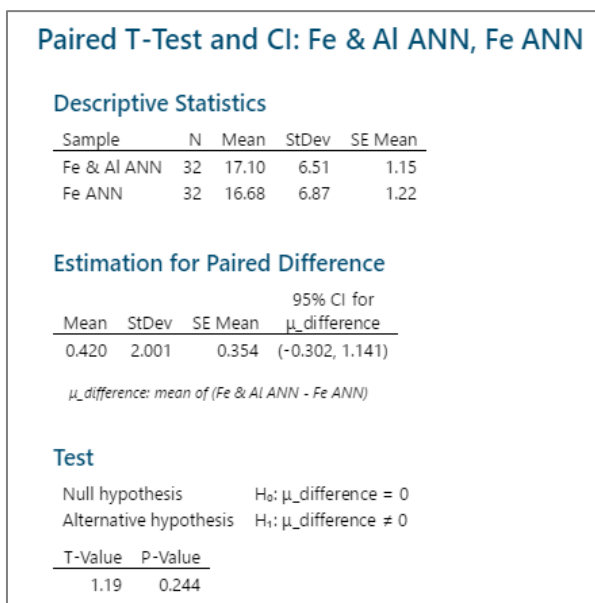
H_1 : ผลต่างของค่าความตรงของทั้งสองประชากรไม่เท่ากัน

4.10.1 การเปรียบเทียบการพยากรณ์ความตรงระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

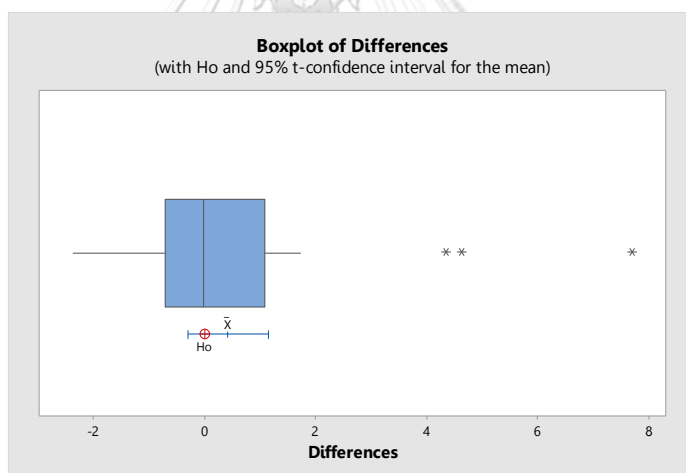
4.10.1.1 การเปรียบเทียบการพยากรณ์ความตรงระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- เงื่อนไขภายใต้ขอบเขตการทดลอง



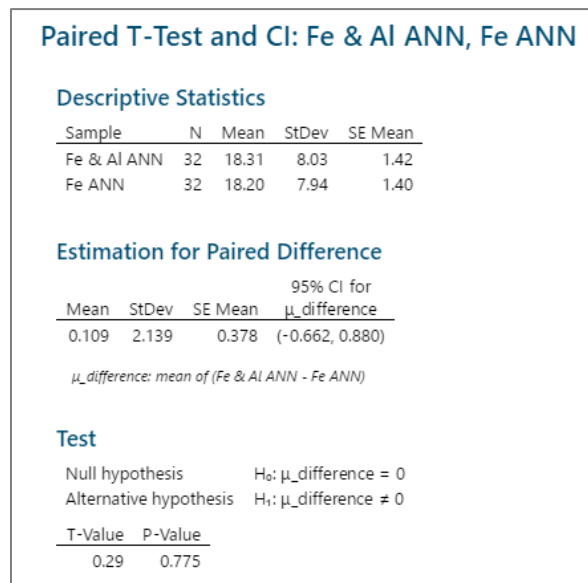
รูปที่ 4.44 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลอง



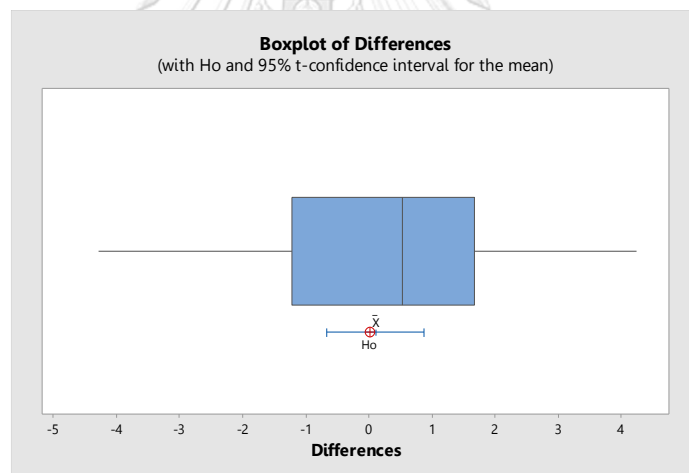
รูปที่ 4.45 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนภายใต้ขอบเขตการทดลอง

จากรูปที่ 4.43 พบว่า ค่า P-Value ของการทดสอบเท่ากับ 0.244 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักและสรุปได้ว่า แบบจำลองทั้งสองแบบจำลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

- เื่อนไขนอกขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.46 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนนอกขอบเขตการทดลอง

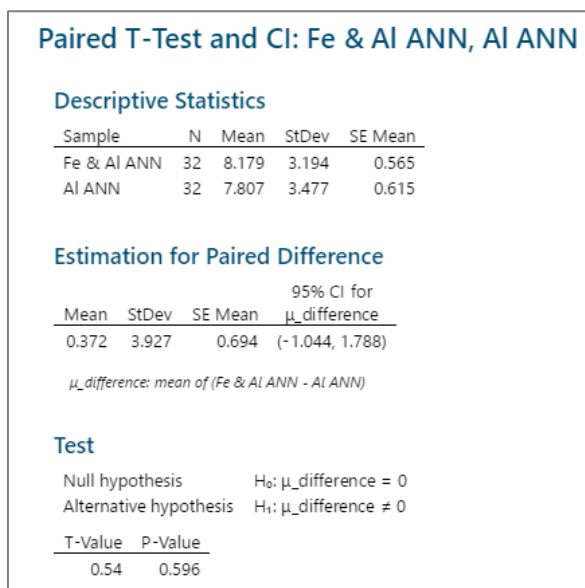


รูปที่ 4.47 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนนอกขอบเขตการทดลอง

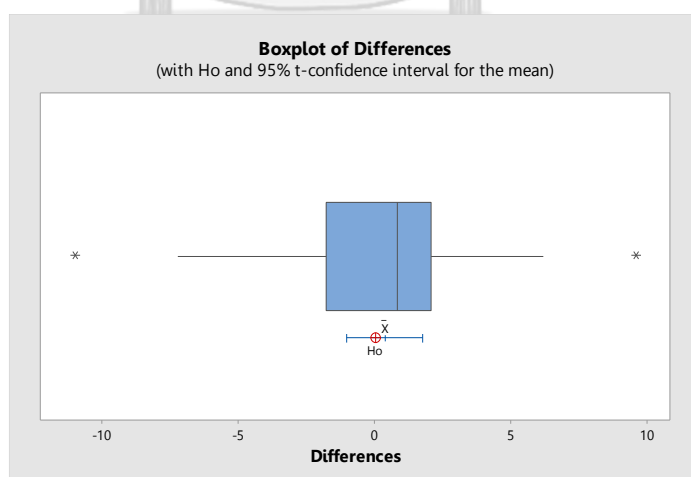
จากรูปที่ 4.45 พบว่า ค่า P-Value ของการทดสอบเท่ากับ 0.775 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักและสรุปได้ว่า แบบจำลองทั้งสองแบบจำลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

4.10.1.2 การเปรียบเทียบการพยากรณ์ความตรงระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียม

- เงื่อนไขภายใต้ขอบเขตการทดลอง



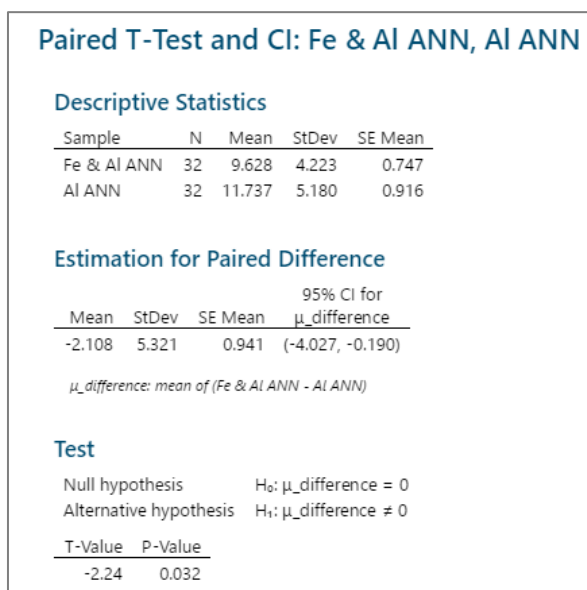
รูปที่ 4.48 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.49 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง

จากรูปที่ 4.47 พบว่า ค่า P-Value ของการทดสอบเท่ากับ 0.596 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักและสรุปได้ว่า แบบจำลองทั้งสองแบบจำลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

○ เงื่อนไขนอกขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.51 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง

จากรูปที่ 4.49 พบว่า ค่า P-Value ของการทดสอบเท่ากับ 0.032 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและสรุปได้ว่า แบบจำลองทั้งสองแบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.10.2 การเปรียบเทียบการพยากรณ์ความตรงระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมและสมการถดถอยพหุคูณสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม

- เงื่อนไขภายใต้ขอบเขตการทดลอง

Paired T-Test and CI: ANN, Regression				
Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
ANN	64	12.638	6.789	0.849
Regression	64	12.663	5.093	0.637
Estimation for Paired Difference				
Mean	StDev	SE Mean	95% CI for $\mu_{\text{difference}}$	
-0.025	3.474	0.434	(-0.893, 0.843)	
$\mu_{\text{difference}}$: mean of (ANN - Regression)				
Test				
Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$			
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$			
T-Value	P-Value			
-0.06	0.955			

รูปที่ 4.52 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.53 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมภายใต้ขอบเขตการทดลอง

จากรูปที่ 4.52 พบว่า ค่า P-Value ของการทดสอบเท่ากับ 0.955 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักและสรุปได้ว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

○ เงื่อนไขนอกขอบเขตการทดลอง

Paired T-Test and CI: ANN, Regression

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
ANN	64	13.969	7.721	0.965
Regression	64	12.852	4.702	0.588

Estimation for Paired Difference

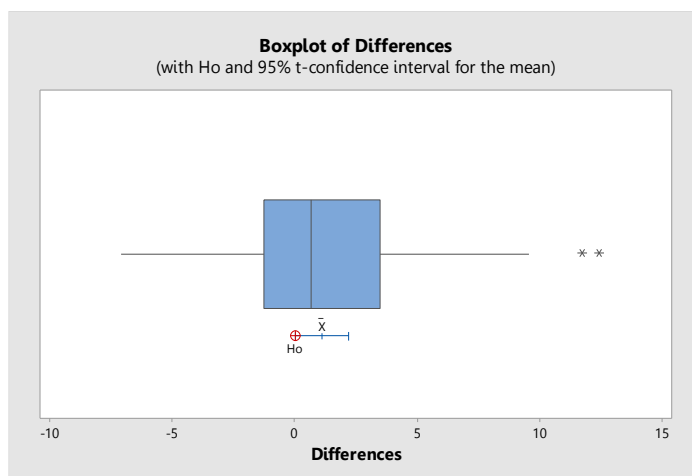
				95% CI for
Mean	StDev	SE Mean	$\mu_{\text{difference}}$	$\mu_{\text{difference}}$
1.117	4.424	0.553	(0.012, 2.223)	

$\mu_{\text{difference}}$: mean of (ANN - Regression)

Test

Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$
T-Value	P-Value
2.02	0.048

รูปที่ 4.54 ผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 4.55 กราฟ Boxplot ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมนอกขอบเขตการทดลอง

จากรูปที่ 4.54 พบว่า ค่า P-Value ของการทดสอบเท่ากับ 0.048 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและสรุปได้ว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.16 สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง

การเปรียบเทียบ	ความแม่นยำ		เงื่อนไขการทดลอง	ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ	
	(a)	(b)		ไม่ต่าง	ต่าง
โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กและอะลูมิเนียม (a) กับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็ก (b)	82.57	86.53	ภายใต้ขอบเขต	/	
	81.86	75.51	นอกขอบเขต	/	
โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กและอะลูมิเนียม (a) กับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียม (b)	69.97	70.70	ภายใต้ขอบเขต	/	
	51.88	31.43	นอกขอบเขต		/
โครงข่ายประสาทเทียม (a) และสมการถดถอยพหุคูณ (b)	76.27	74.23	ภายใต้ขอบเขต	/	
	66.87	79.36	นอกขอบเขต		/

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดจริงภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ และนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ค่าความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม โดยการใช้การแปลงเวฟเลตและการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบผลการพยากรณ์หรือความแม่นยำกับแบบจำลองอื่น ๆ ที่พัฒนาขึ้นและสมการถดถอยพหุคูณ ซึ่งเป็นวิธีการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองการพยากรณ์ความตรงถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้า (Two-layer Feed Forward Neural Network) ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ด (Levenberg-Marquardt's Back Propagation) ซึ่งง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน รวดเร็ว และเหมาะสำหรับการพยากรณ์ในโจทย์ปัญหาที่ไม่ใช่เชิงเส้นตรงที่มีขนาดของปัญหาตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดปานกลาง โครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วย 3 ชั้น คือ ชั้นข้อมูลนำเข้า (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นข้อมูลส่งออก (Output Layer) ซึ่งชั้นข้อมูลนำเข้าประกอบไปด้วย 6 โหนด สอดคล้องตามจำนวนตัวแปรนำเข้า คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิตตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัด ในส่วนของชั้นซ่อนประกอบไปด้วย 10 โหนด ที่ใช้ฟังก์ชันการส่งถ่ายข้อมูลแบบซิกมอยด์ (Sigmoid Transfer Function) สำหรับปรับค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) ชั้นข้อมูลส่งออกประกอบไปด้วย 1 โหนด ที่ใช้ฟังก์ชันการแปลงแบบเชิงเส้น (Linear Transfer Function) สำหรับส่งค่าการพยากรณ์ความตรง

ในงานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมด 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองการพยากรณ์ความตรงสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม แบบจำลองการพยากรณ์ความตรงสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงสำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพัฒนาสมการถดถอยพหุคูณสำหรับการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความแม่นยำของแต่ละแบบจำลอง ซึ่งนำไปสู่การหาแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงที่ให้ความแม่นยำดีที่สุด

ตารางที่ 5.1 สรุปค่า R-value ของแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลองการพยากรณ์ความตรง	R-value	
โครงข่ายประสาทเทียม	สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม	0.9580
	สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม	0.9622
สมการถดถอยพหุคูณ	สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน	0.9991
	สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม	0.6081

จากตารางที่ 5.1 จะสังเกตได้ว่าแบบจำลองการพยากรณ์ความตรงที่มีค่า R-value สูงสุด คือ โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ R-Value เท่ากับ 0.9991 ค่า R-value สูงสุดรองลงมา คือ โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ R-Value เท่ากับ 0.9622 และโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม ที่ R-Value เท่ากับ 0.9580 และสุดท้ายค่า R-value ต่ำสุด คือ สมการถดถอยพหุคูณสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียม ที่ R-Value เท่ากับ 0.6081

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง

การเปรียบเทียบ	ความแม่นยำ		ชิ้นงาน	เงื่อนไข การทดลอง	ความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ	
	(a)	(b)			ไม่ต่าง	ต่าง
โครงข่ายประสาทเทียม สำหรับพยากรณ์เหล็กและ อะลูมิเนียม (a) กับโครงข่าย ประสาทเทียมสำหรับ พยากรณ์เหล็ก (b)	82.57	86.53	เหล็กกล้า คาร์บอน	ภายใต้ขอบเขต	/	
	81.86	75.51		นอกขอบเขต	/	
โครงข่ายประสาทเทียม สำหรับพยากรณ์เหล็กและ อะลูมิเนียม (a) กับโครงข่าย ประสาทเทียมสำหรับ พยากรณ์อะลูมิเนียม (b)	69.97	70.70	อะลูมิเนียม	ภายใต้ขอบเขต	/	
	51.88	31.43		นอกขอบเขต		/
โครงข่ายประสาทเทียม (a) และสมการถดถอยพหุคูณ (b)	76.27	74.23	เหล็กกล้า คาร์บอนและ อะลูมิเนียม	ภายใต้ขอบเขต	/	
	66.87	79.36		นอกขอบเขต		/

จากตารางที่ 5.2 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอน พบว่า ในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแม่นยำที่มากกว่า คือ 86.53% ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมมีความแม่นยำที่ 82.57% แต่ในกรณีนอกขอบเขตการทดลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมมีความแม่นยำที่มากกว่า คือ 81.86% ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแม่นยำที่ 75.51% อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบผลต่างของการค่าพยากรณ์แต่ละคู่ของทั้งสองแบบจำลองในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลองและกรณีนอกขอบเขตการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมกับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียม พบว่า ในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมมีความแม่นยำที่มากกว่าเล็กน้อย คือ 70.70% ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมมีความแม่นยำที่ 69.97% แต่ในกรณีนอกขอบเขตการทดลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์เหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมมีความแม่นยำที่มากกว่า คือ 51.88% ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์อะลูมิเนียมมีความแม่นยำที่ 31.43% อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบผลต่างของการค่าพยากรณ์แต่ละคู่ของทั้งสองแบบจำลองในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อทำการทดสอบในกรณีนอกขอบเขตการทดลอง พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบโครงข่ายประสาทเทียมกับสมการถดถอยพหุคูณ พบว่า ในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลองโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำที่มากกว่า คือ 76.27% ในขณะที่สมการถดถอยพหุคูณมีความแม่นยำที่ 74.23% แต่ในกรณีนอกขอบเขตการทดลองสมการถดถอยพหุคูณมีความแม่นยำที่มากกว่า คือ 79.36% ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำที่ 66.87% อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบผลต่างของการค่าพยากรณ์แต่ละคู่ของทั้งสองแบบจำลองในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อทำการทดสอบในกรณีนอกขอบเขตการทดลอง พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ความตรงที่ให้ความแม่นยำที่ดีได้ทั้งชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมโดยให้ความแม่นยำที่สูง

ไม่ต่างจากความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนหรือแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญทั้งในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลองและกรณีนอกขอบเขตการทดลอง แต่มีความแม่นยำที่สูงกว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญกรณีนอกขอบเขตการทดลอง และให้ความแม่นยำที่ดีไม่ต่างไปจากสมการถดถอยพหุคูณในกรณีภายใต้ขอบเขตการทดลอง ส่วนในกรณีนอกขอบเขตการทดลองสมการถดถอยพหุคูณมีความแม่นยำที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานกับขอบเขตของข้อมูลที่โครงข่ายประสาทเทียมเคยได้รับการสอนมาแล้วและจะให้ความแม่นยำที่สูง ซึ่งกรณีนอกขอบเขตของข้อมูลโครงข่ายประสาทเทียมจะมีความแม่นยำที่สุงน้อยกว่าสมการถดถอยพหุคูณ เนื่องจากสมการถดถอยพหุคูณมีความเป็น Generalization ที่ดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียม สมการถดถอยพหุคูณจึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานกับข้อมูลที่มีการผสมกันระหว่างข้อมูลในขอบเขตและนอกขอบเขตที่สนใจ

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานอะลูมิเนียมมีความคลาดเคลื่อนที่มากกว่าชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิการตัดที่สูง ซึ่งอาจสูงกว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงานอะลูมิเนียมส่งผลให้ชิ้นงานหลอมหรือไปติดกับใบมีดตัด ทำให้ค่าความตรงไม่ดี และการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อลดผลกระทบจากความแข็งของวัสดุชิ้นงานในการพยากรณ์ก็ไม่สามารถใช้พยากรณ์ได้อย่างแม่นยำเท่าที่ควร

2. ความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับปรุงให้มีความแม่นยำที่มากขึ้นได้โดยการเก็บข้อมูลซ้ำในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเพื่อเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำของข้อมูลตัดจริงที่เก็บได้

3. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นมีการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนและกระบวนการเรียนรู้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งสามารถทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและกระบวนการเรียนรู้กฎอื่น ๆ ได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการวิจัย

1. ความคลาดเคลื่อนของความตรงและแรงตัดจากการทดลอง เนื่องจากมีเงื่อนไขการทดลองในปริมาณมากและใช้เวลานาน การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงใหม่ทุกครั้งที่มีการทดลอง รวมถึงการตั้งค่าตำแหน่งเริ่มตัดใหม่ในแต่ละการทดลอง ส่งผลต่อค่าความตรงและแรงตัดที่บันทึกได้

2. ความคลาดเคลื่อนของความตรงจากเครื่องวัดผิว เนื่องจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ไม่เหมาะสมต่อรูปทรงของชิ้นงาน ส่งผลต่อค่าความตรงที่ถูกต้องของชิ้นงาน

3. ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลความตรงและแรงตัดจากการทดลอง เนื่องจากอุปกรณ์ในการทดลองมีราคาสูง เช่น เครื่องกลึงซีเอ็นซี แมตมิต วัสดุชิ้นงาน เป็นต้น จึงไม่มีการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ส่งผลต่อความแม่นยำของข้อมูลที่ต้องการ

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพิจารณาเปลี่ยนชนิดวัสดุชิ้นงานและเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองการพยากรณ์

2. ควรพิจารณาเปลี่ยนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานให้มีความเหมาะสมต่อรูปทรงของชิ้นงานต่าง ๆ เพื่อให้การวัดค่าความตรงมีความแม่นยำ และลดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากการจับยึดชิ้นงานที่ไม่เหมาะสมได้

3. ควรพิจารณาชนิดของมีดตัดในการทดลองให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม เพื่อให้สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ได้

4. ควรพิจารณาทำการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

5. ควรพิจารณาทดลองเปลี่ยนจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเพื่อหาจำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่เหมาะสมกับแบบจำลองการพยากรณ์และให้ค่าความแม่นยำสูงสุด

บรรณานุกรม

1. Kumpirarusk, P. and K. Rohitratana, *Industry 4.0: Future Industries of Thailand*. WMS Journal of Management, 2018. 7(3): p. 52-64.
2. Sumipol. ยกระดับเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทยสู่ยุค 4.0. BLUE UPDATE [cited 2019; Available from: <https://www.sumipol.com/knowledge/เทคโนโลยีอุตสาหกรรม4-0/>].
3. ตั้งจิตสิดเจริญ, ส., วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2018: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก. อุตสาหกรรมที่ได้รับการส่งเสริม. การลงทุนอุตสาหกรรม [cited 2019; Available from: <https://www.eeco.or.th/การลงทุน/อุตสาหกรรมที่ได้รับการส่งเสริม>].
5. นิรัตติย์ ทูมวงษา, อุตสาหกรรมเหล็ก. Krungsri Research : แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-2563, 2018: p. 1-13.
6. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (*Non-ferrous metals*): อะลูมิเนียม. 2014, สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย.
7. กณิศ อ่ำสกุล. ล้างสีอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมกับปัจจัยที่ไม่ควรละเลย. 2018; Available from: <https://www.scbeic.com/th/detail/product/4551>.
8. Puangpad, P., *A study of relation between straightness and cutting force in aluminium turning in Industrial Engineering* 2018, Chulalongkorn University p. 173.
9. Tangjitsitcharoen, S. and H. Lohasiriwat, *Hybrid Monitoring of Chip Formation and Straightness in CNC Turning by Utilizing Daubechies Wavelet Transform*. Procedia Manufacturing, 2018. 25: p. 279-286.
10. Sassantiwong, M. and S. Tangjitsitcharoen. *In-process prediction of straightness in CNC turning by using wavelet transform*. in *2nd International Conference on Green Materials and Environmental Engineering*. 2015. Atlantis Press.
11. Shansungnoen, T. and S. Tangjitsitcharoen. *Investigation of relation between Straightness and Cutting Force in CNC Turning Process*. in *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Trans Tech Publ.

12. Tangjitsitcharoen, S., K. Samanmit, and S. Ratanakuakangwan. *Development of surface roughness prediction by utilizing dynamic cutting force ratio*. in *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Trans Tech Publ.
13. Senthilkumar, N. and T. Tamizharasan, *Flank wear and surface roughness prediction in hard turning via artificial neural network and multiple regressions*. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2015. 13(1): p. 31-45.
14. Maiyachote, T., *In process surface roughness prediction in turning process utilizing wavelet transform of dynamic cutting force.*, in *Industrial Engineering*. 2015, Chulalongkorn University. p. 221.
15. Salgado, D.R., et al., *In-process surface roughness prediction system using cutting vibrations in turning*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009. 43(1-2): p. 40-51.
16. Tangjitsitcharoen, S. and C. Rungruang, *Intelligent monitoring and statistical process control of surface roughness on CNC turning process*. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2011: p. 871-873.
17. Qehaja, N., et al., *MATHEMATICAL MODELLING OF SURFACE ROUGHNESS THROUGH MACHINING PARAMETERS AND MACHINING TIME DURING THE DRY MILLING PROCESS*. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2016. 27.
18. Chaijareenont, A. and S. Tangjitsitcharoen. *Monitoring of Surface Roughness in Aluminium Turning Process*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
19. Tangjitsitcharoen, S. and A. Senjuntichai, *Monitoring of surface roughness in CNC turning process*. 2010: na.
20. Xiao, M., et al., *Prediction of Surface Roughness and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Turning Based on RSM*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. 2018.
21. Sung, A., W. Loh, and M. Ratnam, *SIMULATION APPROACH FOR SURFACE ROUGHNESS INTERVAL PREDICTION IN FINISH TURNING*. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 2016. 15(1).
22. Tangjitsitcharoen, S., P. Thesniyom, and S. Ratanakuakangwan, *A wavelet approach to predict surface roughness in ball-end milling*. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017. 231(14): p. 2468-2478.
23. Tu, J.V., *Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes*. Journal of clinical epidemiology, 1996. 49(11): p. 1225-1231.
 24. Sifuzzaman, M., M. Islam, and M. Ali, *Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform*. 2009.
 25. Dhamija, A., *A brief study of various wavelet families and compression techniques*. Journal of Global Research in Computer Science, 2013. 4(4): p. 43-49.
 26. B, K. *Comparison of Wavelet-Based ANN and Regression Models for Reservoir Inflow Forecasting*. 2014; Available from: https://www.researchgate.net/figure/a-Coif1-wavelet-b-db2-wavelet-c-Meyer-wavelet-d-Sym3-wavelet-e-Morlet_fig1_263929587.
 27. Peyman Abbaszadeh, A.A.a.S.A. *Development of a coupled wavelet transform and evolutionary Levenberg-Marquardt neural networks for hydrological process modeling*. 2017; Available from: https://www.researchgate.net/figure/A-Haar-wavelet-B-db4-wavelet-C-sym3-wavelet-D-coif1-wavelet_fig4_318041778.
 28. Basheer, I.A. and M. Hajmeer, *Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application*. Journal of microbiological methods, 2000. 43(1): p. 3-31.
 29. ประกอบผล, ธ., *โครงข่ายประสาทเทียม*. วารสาร มจร. วิชาการ, 2009. 12(24): p. 73-87.
 30. Jain, A.K., J. Mao, and K. Mohiuddin, *Artificial neural networks: A tutorial*. Computer, 1996(3): p. 31-44.
 31. Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing : Materials, Processes, and Systems.*, ed. 4. 2010, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
 32. ชาญวิโรจน์กุล, ธ., *เหล็กกล้าผสมต่ำ*. MTEC, 2011: p. 8 - 12.
 33. ชาญวิโรจน์กุล, ธ., *การเลือกใช้งานโลหะอะลูมิเนียม*. MTEC, 2010: p. 38 - 44.
 34. Girsang, I.D., Jaspreet., *Machine Tools for Machining*. 2015.

35. Alhameedi, A.k.H., Kareem., *Coated Carbide Cutting Tools Performance in High Speed Machining Processes* The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 2012. 12.
36. Rajbhandari, S., *Application of wavelets and artificial neural network for indoor optical wireless communication systems*. 2010, Northumbria University.
37. Chourasia, V. and A. Mitra, *Selection of mother wavelet and denoising algorithm for analysis of foetal phonocardiographic signals*. Journal of medical engineering & technology, 2009. 33(6): p. 442-448.
38. Merry, R. and M. Steinbuch, *Wavelet theory and applications*. literature study, Eindhoven university of technology, Department of mechanical engineering, Control systems technology group, 2005.
39. MathWorks. *Introduction to Wavelet Families*. [cited 2019; Available from: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/introduction-to-the-wavelet-families.html>].
40. *Straightness*. TPA News Calibration, 2012. 182: p. 16-17.
41. Patterson, D.W., *Introduction to artificial intelligence and expert systems*. 1990: Prentice-hall of India.
42. Francois Marais, J.T. *Machine learning algorithms in boiler plant root cause analysis*. 2019.
43. Yong, S.-P., Y.Y. Chen, and C.E. Wan. *Seismic image recognition tool via artificial neural network*. in 2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI). 2013. IEEE.
44. Simplilearn. *Artificial Neural Network*. 2019; Available from: https://www.saedsayad.com/artificial_neural_network.htm.
45. ปิยะพิมลสิทธิ์, ผ.ด.ฉ. *Regression Analysis*. [cited 2020; Available from: www.watpon.com].
46. ชูติมา, ป., การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. Vol. 1. 2545: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
47. Lee, S.-C., *Prediction of concrete strength using artificial neural networks*. Engineering Structures, 2003. 25(7): p. 849-857.

48. Phusanapakorn, C., *Monitoring of mild steel cutting states on CNC turning machine utilizing sensor fusion*, in *Industrial Engineering*. 2009, Chulalongkorn University.
49. Tangjitsitcharoen, S. and C. Rungruang, *In-process monitoring of cutting states on CNC turning using sensor fusion via neural network*. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2011: p. 873-875.
50. Senthil Babu, S. and B. Vinayagam, *Surface roughness prediction model using adaptive particle swarm optimization (APSO) algorithm*. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2015. 28(1): p. 345-360.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วสำหรับวิเคราะห์สัญญาณความตรง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วสำหรับวิเคราะห์สัญญาณความตรง

```
clc;

samp=2948; %จำนวนข้อมูลในการสุ่มใน 1 วินาที

unsamp=10000-samp;

unsampplus=unsamp+1;

fname='st108'; % ชื่อไฟล์ที่ต้องการเปิด

ext='.txt'; % ชื่อสกุลไฟล์

filename=[fname,ext]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์

load(filename); % โหลดไฟล์

eval(['data=',[fname],'.']);

[N,n]=size(data); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล N คือจำนวนแถว n
                % คือจำนวนคอลัมน์

t=1/samp;

tt=(0:t*(N-unsampplus));

f=(0:N-unsampplus)/(N-unsamp)*samp;


freq=f(1:(N-unsamp)/2);

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

absStraightness =abs(Straightness(1:(N-unsamp)/2));

PabsStraightness=abs Straightness^2;

figure(1);
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
plot(freq,PabsSurfaceRoughness);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of  
Straightness (micrometer^2)');
```

```
axis([0 100 0 0.5])
```

```
figure(2);
```

```
plot(tt,data(1:samp,2));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Straightness  
(micrometer)');
```

```
axis([0 1 -40 40])
```



ภาคผนวก ข โปรแกรมการแปลงเวฟเลทสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตักพลวัต



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โปรแกรมการแปลงเวฟเลทสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัก

% นำเข้าข้อมูลแรงตักแกน x, y, z เข้าสู่โปรแกรม

```
force = textread('Xdef3.txt');
```

```
l_x1 = length(force);
```

```
fx = force(:,1); fy = force(:,2); fz = force(:,3);
```

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

```
samp = 10000;
```

% Fe → 10000, Al → 1000

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

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

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

```
freq1 = f(1:N/2);
```

% แปลงสัญญาณในรูป discrete wavelet transform โดยใช้การแปลงแบบคอปเบชีส์

```
[cAx1,cDx1] = dwt(force(:,1),'db2');
```

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

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

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

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

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

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

```
[cAx6,cDx6] = dwt(cAx5,'db2');
```

$$[cAx7, cDx7] = \text{dwt}(cAx6, 'db2');$$

$$[cAx8, cDx8] = \text{dwt}(cAx7, 'db2');$$

$$[cAx9, cDx9] = \text{dwt}(cAx8, 'db2');$$

$$[cAx10, cDx10] = \text{dwt}(cAx9, 'db2');$$

$$[cAy2, cDy2] = \text{dwt}(cAy1, 'db2');$$

$$[cAy3, cDy3] = \text{dwt}(cAy2, 'db2');$$

$$[cAy4, cDy4] = \text{dwt}(cAy3, 'db2');$$

$$[cAy5, cDy5] = \text{dwt}(cAy4, 'db2');$$

$$[cAy6, cDy6] = \text{dwt}(cAy5, 'db2');$$

$$[cAy7, cDy7] = \text{dwt}(cAy6, 'db2');$$

$$[cAy8, cDy8] = \text{dwt}(cAy7, 'db2');$$

$$[cAy9, cDy9] = \text{dwt}(cAy8, 'db2');$$

$$[cAy10, cDy10] = \text{dwt}(cAy9, 'db2');$$


$$[cAz2, cDz2] = \text{dwt}(cAz1, 'db2');$$

$$[cAz3, cDz3] = \text{dwt}(cAz2, 'db2');$$

$$[cAz4, cDz4] = \text{dwt}(cAz3, 'db2');$$

$$[cAz5, cDz5] = \text{dwt}(cAz4, 'db2');$$

$$[cAz6, cDz6] = \text{dwt}(cAz5, 'db2');$$

$$[cAz7, cDz7] = \text{dwt}(cAz6, 'db2');$$

```
[cAz8,cDz8] = dwt(cAz7,'db2');
```

```
[cAz9,cDz9] = dwt(cAz8,'db2');
```

```
[cAz10,cDz10] = dwt(cAz9,'db2');
```

```
% สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Detail coefficients
```

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

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

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

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

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

```
Dx6 = upcoef('d',cDx6,'db2',6,l_x1);
```

```
Dx7 = upcoef('d',cDx7,'db2',7,l_x1);
```

```
Dx8 = upcoef('d',cDx8,'db2',8,l_x1);
```

```
Dx9 = upcoef('d',cDx9,'db2',9,l_x1);
```

```
Dx10 = upcoef('d',cDx10,'db2',10,l_x1);
```

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

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

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

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

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

```
Ax6 = upcoef('a',cAx6,'db2',6,l_x1);
```


$$Ax7 = \text{upcoef}('a', cAx7, 'db2', 7, l_x1);$$

$$Ax8 = \text{upcoef}('a', cAx8, 'db2', 8, l_x1);$$

$$Ax9 = \text{upcoef}('a', cAx9, 'db2', 9, l_x1);$$

$$Ax10 = \text{upcoef}('a', cAx10, 'db2', 10, l_x1);$$

$$Dy1 = \text{upcoef}('d', cDy1, 'db2', 1, l_x1);$$

$$Dy2 = \text{upcoef}('d', cDy2, 'db2', 2, l_x1);$$

$$Dy3 = \text{upcoef}('d', cDy3, 'db2', 3, l_x1);$$

$$Dy4 = \text{upcoef}('d', cDy4, 'db2', 4, l_x1);$$

$$Dy5 = \text{upcoef}('d', cDy5, 'db2', 5, l_x1);$$

$$Dy6 = \text{upcoef}('d', cDy6, 'db2', 6, l_x1);$$

$$Dy7 = \text{upcoef}('d', cDy7, 'db2', 7, l_x1);$$

$$Dy8 = \text{upcoef}('d', cDy8, 'db2', 8, l_x1);$$

$$Dy9 = \text{upcoef}('d', cDy9, 'db2', 9, l_x1);$$

$$Dy10 = \text{upcoef}('d', cDy10, 'db2', 10, l_x1);$$

$$Ay1 = \text{upcoef}('a', cAy1, 'db2', 1, l_x1);$$

$$Ay2 = \text{upcoef}('a', cAy2, 'db2', 2, l_x1);$$

$$Ay3 = \text{upcoef}('a', cAy3, 'db2', 3, l_x1);$$

$$Ay4 = \text{upcoef}('a', cAy4, 'db2', 4, l_x1);$$

$$Ay5 = \text{upcoef}('a', cAy5, 'db2', 5, l_x1);$$



Ay6 = upcoef('a',cAy6,'db2',6,l_x1);

Ay7 = upcoef('a',cAy7,'db2',7,l_x1);

Ay8 = upcoef('a',cAy8,'db2',8,l_x1);

Ay9 = upcoef('a',cAy9,'db2',9,l_x1);

Ay10 = upcoef('a',cAy10,'db2',10,l_x1);

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

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

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

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

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

Dz6 = upcoef('d',cDz6,'db2',6,l_x1);

Dz7 = upcoef('d',cDz7,'db2',7,l_x1);

Dz8 = upcoef('d',cDz8,'db2',8,l_x1);

Dz9 = upcoef('d',cDz9,'db2',9,l_x1);

Dz10 = upcoef('d',cDz10,'db2',10,l_x1);

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

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

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

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



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

```
Az6 = upcoef('a',cAz6,'db2',6,l_x1);
```

```
Az7 = upcoef('a',cAz7,'db2',7,l_x1);
```

```
Az8 = upcoef('a',cAz8,'db2',8,l_x1);
```

```
Az9 = upcoef('a',cAz9,'db2',9,l_x1);
```

```
Az10 = upcoef('a',cAz10,'db2',10,l_x1);
```

```
% สร้างกราฟในโดเมนเวลา
```

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

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

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

```
max_TD = 100;
```

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

```
figure(1);
```

```
subplot(11,1,1);
```

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

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Original Signal');ylim('auto');
```

```
% ปรับค่าแกน Y
```

```
subplot(11,1,2)
```

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

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D1'); ylim('auto');
```



```
% 11 มาจาก 10 ระดับ + 1 ต้นกำเนิด
```

```
subplot(11,1,3)
```

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

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D2'); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,4)
```

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

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D3'); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,5)
```

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

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D4');ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,6)
```

```
plot(time,Dx5)
```

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal  
D5');ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,7)
```

```
plot(time,Dx6)
```

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D6');ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,8)
```

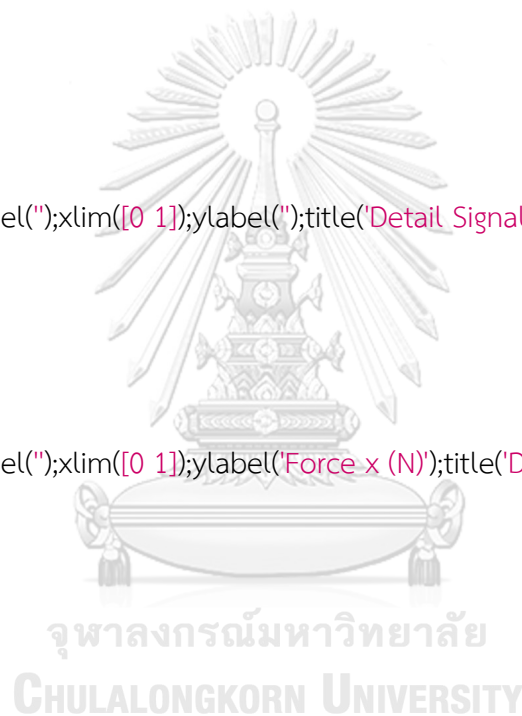
```
plot(time,Dx7)
```

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D7');ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,9)
```

```
plot(time,Dx8)
```

```
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D8');ylim('auto');
```



```

subplot(11,1,10)

plot(time,Dx9)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D9');ylim([-50 50]);

subplot(11,1,11)

plot(time,Dx10)

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D10');ylim([-50
50]);

figure(2);

subplot(11,1,1);

plot(time,force(:,2));

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Original Signal');ylim('auto');

subplot(11,1,2)

plot(time,Dy1)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D1'); ylim('auto');

subplot(11,1,3)

plot(time,Dy2)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D2'); ylim('auto');

subplot(11,1,4)

plot(time,Dy3)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D3'); ylim('auto');

subplot(11,1,5)

```



```

plot(time,Dy4)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D4');ylim('auto');

subplot(11,1,6)

plot(time,Dy5)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal
D5');ylim('auto');

subplot(11,1,7)

plot(time,Dy6)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D6');ylim('auto');

subplot(11,1,8)

plot(time,Dy7)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D7');ylim('auto');

subplot(11,1,9)

plot(time,Dy8)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D8');ylim('auto');

subplot(11,1,10)

plot(time,Dy9)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D9');ylim([-50 50]);

subplot(11,1,11)

plot(time,Dy10)

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D10');ylim([-50
50]);

```

```
figure(3);  
  
subplot(11,1,1);  
  
plot(time,force(:,3));  
  
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Original Signal'); ylim('auto');  
  
subplot(11,1,2)  
  
plot(time,Dz1)  
  
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D1'); ylim('auto');  
  
subplot(11,1,3)  
  
plot(time,Dz2)  
  
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D2'); ylim('auto');  
  
subplot(11,1,4)  
  
plot(time,Dz3)  
  
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D3'); ylim('auto');  
  
subplot(11,1,5)  
  
plot(time,Dz4)  
  
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D4'); ylim('auto');  
  
subplot(11,1,6)  
  
plot(time,Dz5)  
  
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D5');  
ylim('auto');  
  
subplot(11,1,7)
```



CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

plot(time,Dz6)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D6'); ylim('auto');

subplot(11,1,8)

plot(time,Dz7)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D7'); ylim('auto');

subplot(11,1,9)

plot(time,Dz8)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D8'); ylim('auto');

subplot(11,1,10)

plot(time,Dz9)

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D9'); ylim([-50 50]);

subplot(11,1,11)

plot(time,Dz10)

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D10'); ylim([-50
50]);

```

% สร้างสัญญาณในรูปโดเมนความถี่

```
[N1,M1] = size(Dx1);
```

```
[N2,M2] = size(Dx2);
```

```
[N3,M3] = size(Dx3);
```

```
[N4,M4] = size(Dx4);
```

```
[N5,M5] = size(Dx5);
```



```
[N6,M6] = size(Dx6);
```

```
[N7,M7] = size(Dx7);
```

```
[N8,M8] = size(Dx8);
```

```
[N9,M9] = size(Dx9);
```

```
[N10,M10] = size(Dx10);
```

```
sample = 10000;
```

```
% Fe → 10000, Al → 1000
```

```
t = 1/sample;
```

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

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

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

```
fx0 = fft(force(:,1))/N*2;
```

```
fx1 = fft(Dx1)/N*2;
```

```
fx2 = fft(Dx2)/N*2;
```

```
fx3 = fft(Dx3)/N*2;
```

```
fx4 = fft(Dx4)/N*2;
```

```
fx5 = fft(Dx5)/N*2;
```

```
fx6 = fft(Dx6)/N*2;
```

```
fx7 = fft(Dx7)/N*2;
```

```
fx8 = fft(Dx8)/N*2;
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$fx9 = \text{fft}(Dx9)/N*2;$

$fx10 = \text{fft}(Dx10)/N*2;$

$fx0abs = \text{abs}(fx0(1:N1/2));$

$fx1abs = \text{abs}(fx1(1:N1/2));$

$fx2abs = \text{abs}(fx2(1:N2/2));$

$fx3abs = \text{abs}(fx3(1:N3/2));$

$fx4abs = \text{abs}(fx4(1:N4/2));$

$fx5abs = \text{abs}(fx5(1:N5/2));$

$fx6abs = \text{abs}(fx6(1:N6/2));$

$fx7abs = \text{abs}(fx7(1:N7/2));$

$fx8abs = \text{abs}(fx8(1:N8/2));$

$fx9abs = \text{abs}(fx9(1:N9/2));$

$fx10abs = \text{abs}(fx10(1:N10/2));$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$fx0abs2 = fx0abs.^2;$

$fx1abs2 = fx1abs.^2;$

$fx2abs2 = fx2abs.^2;$

$fx3abs2 = fx3abs.^2;$

$fx4abs2 = fx4abs.^2;$

$fx5abs2 = fx5abs.^2;$

$$fx6abs2 = fx6abs.^2;$$

$$fx7abs2 = fx7abs.^2;$$

$$fx8abs2 = fx8abs.^2;$$

$$fx9abs2 = fx9abs.^2;$$

$$fx10abs2 = fx10abs.^2;$$

$$fy0 = \text{fft}(\text{force}(:,2))/N^2;$$

$$fy1 = \text{fft}(Dy1)/N^2;$$

$$fy2 = \text{fft}(Dy2)/N^2;$$

$$fy3 = \text{fft}(Dy3)/N^2;$$

$$fy4 = \text{fft}(Dy4)/N^2;$$

$$fy5 = \text{fft}(Dy5)/N^2;$$

$$fy6 = \text{fft}(Dy6)/N^2;$$

$$fy7 = \text{fft}(Dy7)/N^2;$$

$$fy8 = \text{fft}(Dy8)/N^2;$$

$$fy9 = \text{fft}(Dy9)/N^2;$$

$$fy10 = \text{fft}(Dy10)/N^2;$$

$$fy0abs = \text{abs}(fy0(1:N1/2));$$

$$fy1abs = \text{abs}(fy1(1:N1/2));$$

$$fy2abs = \text{abs}(fy2(1:N2/2));$$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

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

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

fy6abs = abs(fy6(1:N6/2));

fy7abs = abs(fy7(1:N7/2));

fy8abs = abs(fy8(1:N8/2));

fy9abs = abs(fy9(1:N9/2));

fy10abs = abs(fy10(1:N10/2));

fy0abs2 = fy0abs.^2;

fy1abs2 = fy1abs.^2;

fy2abs2 = fy2abs.^2;

fy3abs2 = fy3abs.^2;

fy4abs2 = fy4abs.^2;

fy5abs2 = fy5abs.^2;

fy6abs2 = fy6abs.^2;

fy7abs2 = fy7abs.^2;

fy8abs2 = fy8abs.^2;

fy9abs2 = fy9abs.^2;

fy10abs2 = fy10abs.^2;



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
fz0 = fft(force(:,3))/N*2;
```

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

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

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

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

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

```
fz6 = fft(Dz6)/N*2;
```

```
fz7 = fft(Dz7)/N*2;
```

```
fz8 = fft(Dz8)/N*2;
```

```
fz9 = fft(Dz9)/N*2;
```

```
fz10 = fft(Dz10)/N*2;
```

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

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

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

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

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

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

```
fz6abs = abs(fz6(1:N6/2));
```

```
fz7abs = abs(fz7(1:N7/2));
```

```
fz8abs = abs(fz8(1:N8/2));
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
fz9abs = abs(fz9(1:N9/2));
```

```
fz10abs = abs(fz10(1:N10/2));
```

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

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

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

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

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

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

```
fz6abs2 = fz6abs.^2;
```

```
fz7abs2 = fz7abs.^2;
```

```
fz8abs2 = fz8abs.^2;
```

```
fz9abs2 = fz9abs.^2;
```

```
fz10abs2 = fz10abs.^2;
```

```
% สร้างกราฟในโดเมนความถี่
```

```
figure(4);
```

```
subplot(11,1,1);
```

```
plot(fx0abs2);xlabel("");ylabel("");title('Original Signal'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,2);
```

```
plot(fx1abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D1'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,3);
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

plot(fx2abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D2'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,4);

plot(fx3abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D3'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,5);

plot(fx4abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D4'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,6);

plot(fx5abs2);xlabel("");ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5'); xlim([000
1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,7);

plot(fx6abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D6'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,8);

plot(fx7abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D7'); xlim([000 1000]); ylim([0 30]);

subplot(11,1,9);

plot(fx8abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D8'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,10);

plot(fx9abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D9'); xlim([000 1000]); ylim([0 50]);

subplot(11,1,11);

plot(fx10abs2);xlabel('Frequency');ylabel("");title('Detail Signal D10'); xlim([000 1000]);
ylim([0 20]);

figure(5);

subplot(11,1,1);

```

```
plot(fy0abs2);xlabel("");ylabel("");title('Original Signal'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,2);

plot(fy1abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D1'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,3);

plot(fy2abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D2'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,4);

plot(fy3abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D3'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,5);

plot(fy4abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D4'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,6);

plot(fy5abs2);xlabel("");ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5'); xlim([000
1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,7);

plot(fy6abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D6'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,8);

plot(fy7abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D7'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

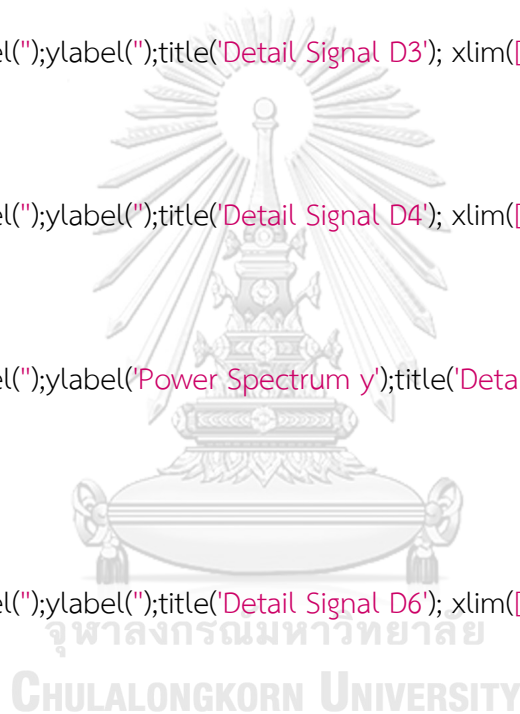
subplot(11,1,9);

plot(fy8abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D8'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,10);

plot(fy9abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D9'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,11);
```




```
plot(fy10abs2);xlabel('Frequency');ylabel("");title('Detail Signal D10'); xlim([000 1000]);
ylim('auto');
```

```
figure(6);
```

```
subplot(11,1,1);
```

```
plot(fz0abs2);xlabel("");ylabel("");title('Original Signal'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,2);
```

```
plot(fz1abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D1'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,3);
```

```
plot(fz2abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D2'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,4);
```

```
plot(fz3abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D3'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,5);
```

```
plot(fz4abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D4'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,6);
```

```
plot(fz5abs2);xlabel("");ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5'); xlim([000
1000]); ylim('auto');
```

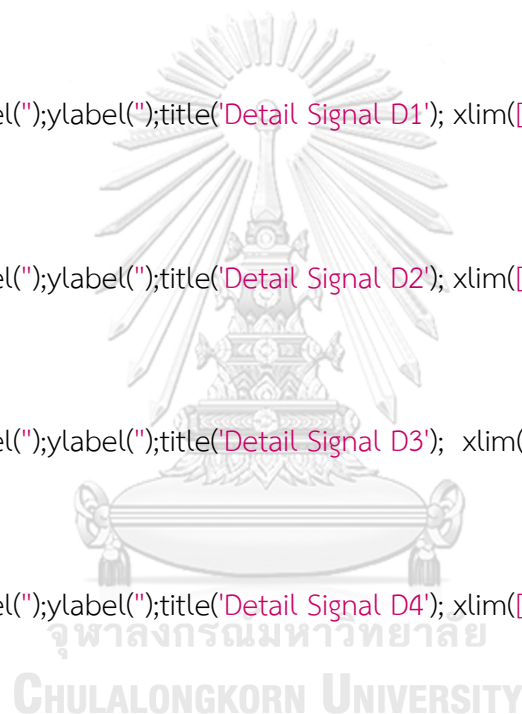
```
subplot(11,1,7);
```

```
plot(fz6abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D6'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
```

```
subplot(11,1,8);
```

```
plot(fz7abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D7'); xlim([000 1000]); ylim([0 30]);
```

```
subplot(11,1,9);
```



```

plot(fz8abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D8'); xlim([000 1000]); ylim('auto');

subplot(11,1,10);

plot(fz9abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D9'); xlim([000 1000]); ylim([0 20]);

subplot(11,1,11);

plot(fz10abs2);xlabel('Frequency');ylabel("");title('Detail Signal D10'); xlim([000 1000]);
ylim([0 20]);

```

```
% ตั้งค่ารูป
```

```

set(gcf,'PaperPosition',[0 0 20 22]);

t1 = [Xdef3 '-1'];

print(gcf,'-djpeg',t1);

t2 = [Xdef3 '-2'];

set(gcf,'PaperPosition',[0 0 20 22]);

print(gcf,'-djpeg',t2);

t3 = [Xdef3 '-3'];

set(gcf,'PaperPosition',[0 0 20 22]);

print(gcf,'-djpeg',t3);

t4 = [Xdef3 '-4'];

set(gcf,'PaperPosition',[0 0 20 22]);

print(gcf,'-djpeg',t4);

t5 = [Xdef3 '-5'];

set(gcf,'PaperPosition',[0 0 20 22]);

```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
print(figure(5),'-djpeg',t5);
```

```
t6 = [Xdef3 '-6'];
```

```
set(figure(6),'PaperPosition',[0 0 20 22]);
```

```
print(figure(6),'-djpeg',t6);
```



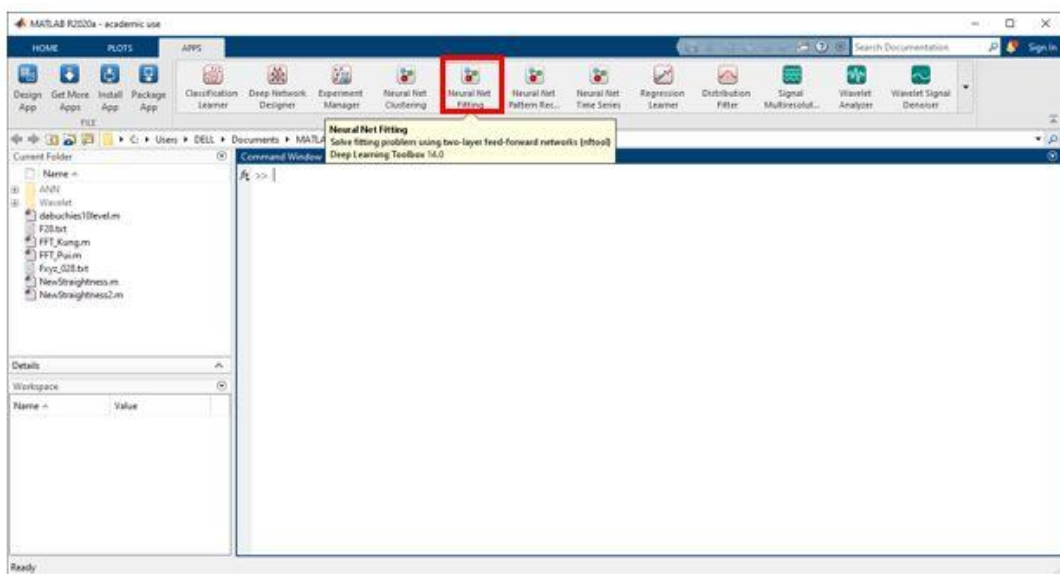
ภาคผนวก ค การใช้งานชุดเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมในโปรแกรม Matlab



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

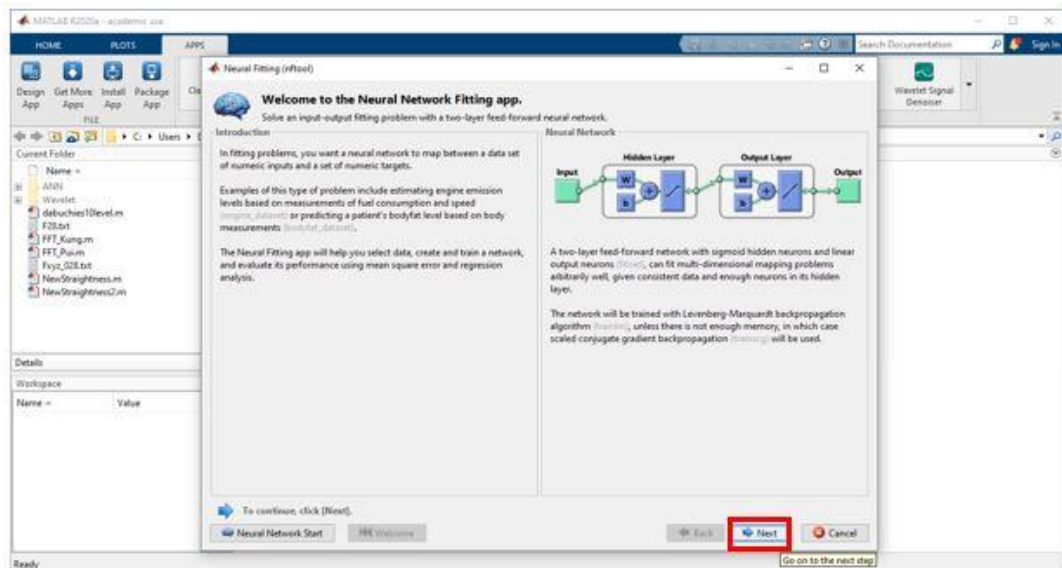
การใช้งานชุดเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมในโปรแกรม Matlab

- 1.) เปิดใช้งานโปรแกรม Matlab จากนั้นเปิดใช้งานชุดเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมโดยกดเลือก Neural Net Fitting ใน APPS ดังรูปที่ ค.1 สำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์จากชุดข้อมูลที่ต้องการ กรณีต้องการใช้งานรูปแบบอื่นให้พิจารณาชุดเครื่องมืออื่น ๆ เช่น Neural Net Clustering, Neural Net Pattern Recognition, Neural Net Time Series เป็นต้น



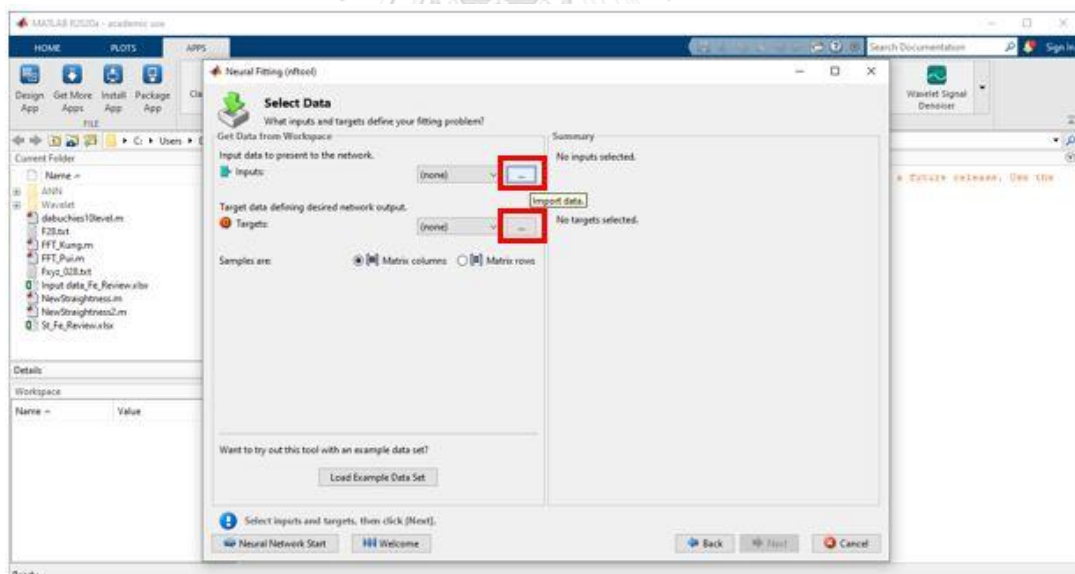
รูปที่ ค.1 หน้าต่างการกดเลือกชุดเครื่องมือ Neural Net Fitting ใน APPS

- 2.) เมื่อกดเลือกชุดเครื่องมือ Neural Net Fitting จะปรากฏหน้าต่างเริ่มต้นการใช้งาน ซึ่งจะมีรายละเอียดอธิบายเกี่ยวกับชุดเครื่องมือนี้ทั้งการใช้งานและโครงสร้างของแบบจำลอง ดังรูปที่ ค.2 เมื่อกด Next จะไปสู่ขั้นตอนถัดไป



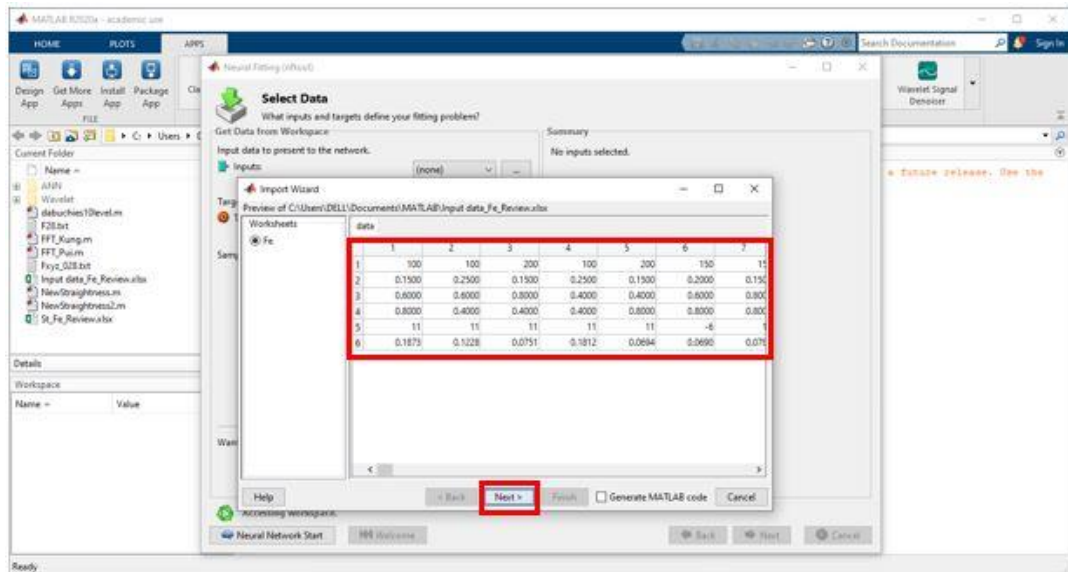
รูปที่ ค.2 หน้าต่างเริ่มต้นการใช้งาน

3.) ขั้นตอนต่อมาคือการเลือกชุดข้อมูลที่ต้องการจะหาความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลนำเข้าและชุดข้อมูลเป้าหมายดังรูปที่ ค.3 ให้กดเลือกไฟล์ข้อมูลที่อยู่ในรูป Excel



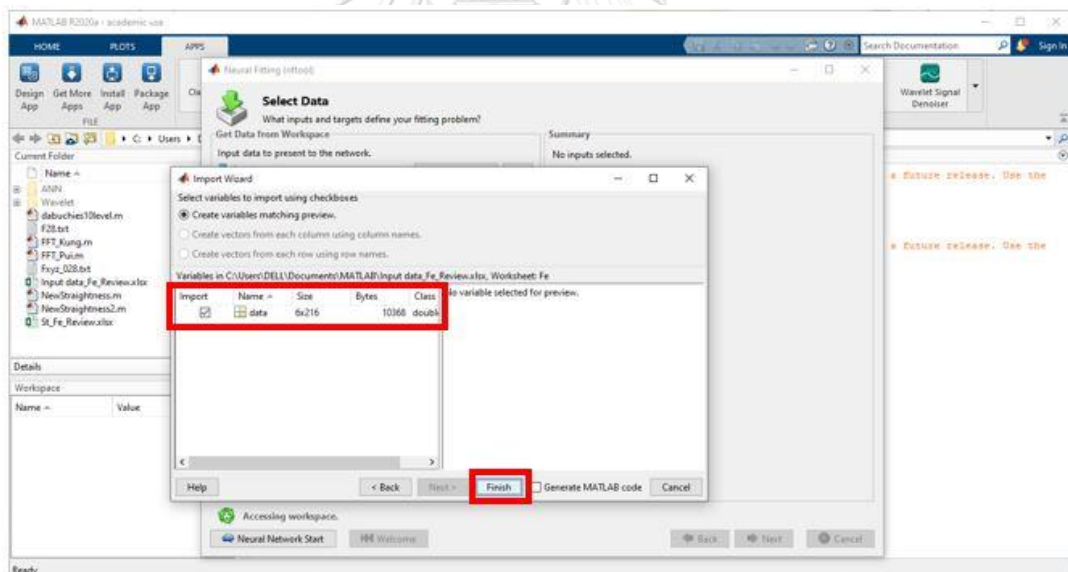
รูปที่ ค.3 หน้าต่างการกดเลือกชุดข้อมูล

4.) เมื่อกดเลือกชุดข้อมูลจะปรากฏหน้าต่างที่แสดงชุดข้อมูลที่ถูกเลือกเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของชุดข้อมูลดังรูปที่ ค.4 กด Next เพื่อไปสู่ขั้นตอนถัดไป



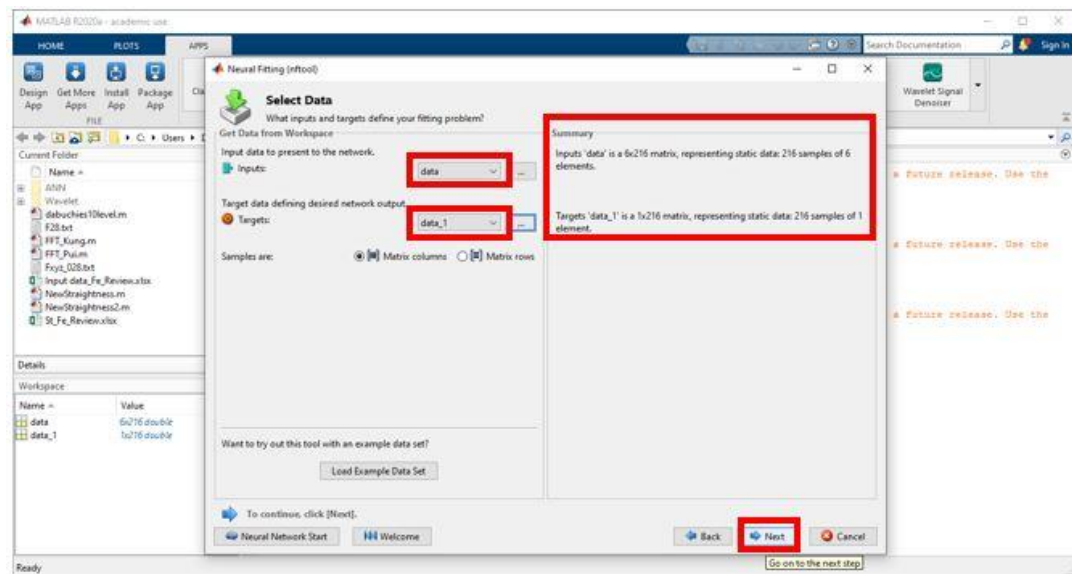
รูปที่ ค.4 หน้าต่างแสดงชุดข้อมูลที่เลือก

5.) หน้าต่างสรุปจำนวนข้อมูลที่เลือกจะปรากฏเพื่อให้ตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้งดังรูปที่ ค.5 กด Finish เพื่อเสร็จสิ้นการเลือกชุดข้อมูล



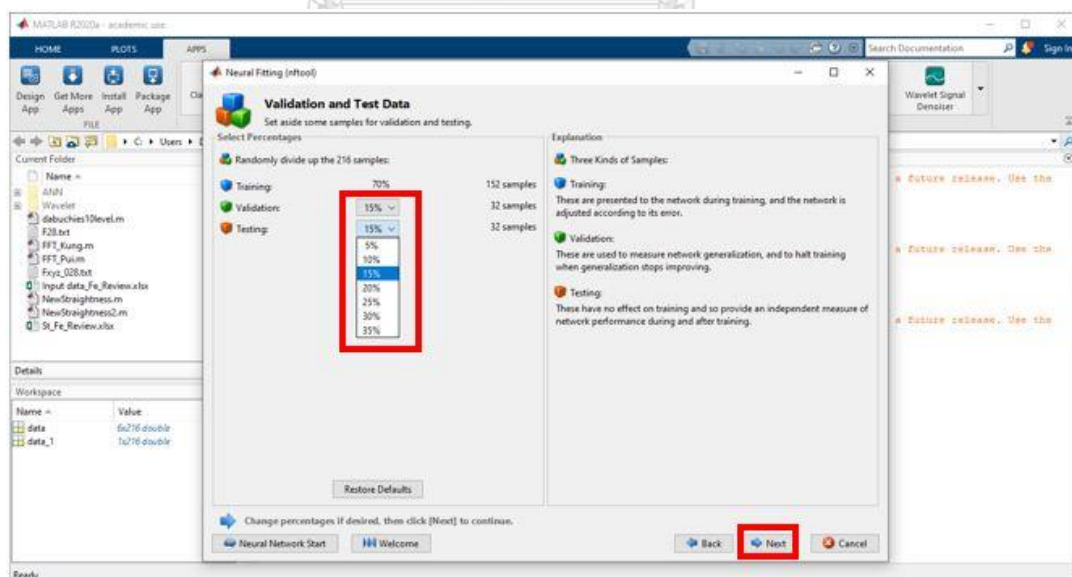
รูปที่ ค.5 หน้าต่างสรุปจำนวนข้อมูลที่เลือก

6.) เมื่อเลือกชุดข้อมูลเสร็จเรียบร้อยที่ด้านหลังของชุดข้อมูลที่เลือกจะสรุปจำนวนของข้อมูลอีกครั้งดังรูปที่ ค.6 กด Next เพื่อไปสู่ขั้นตอนถัดไป



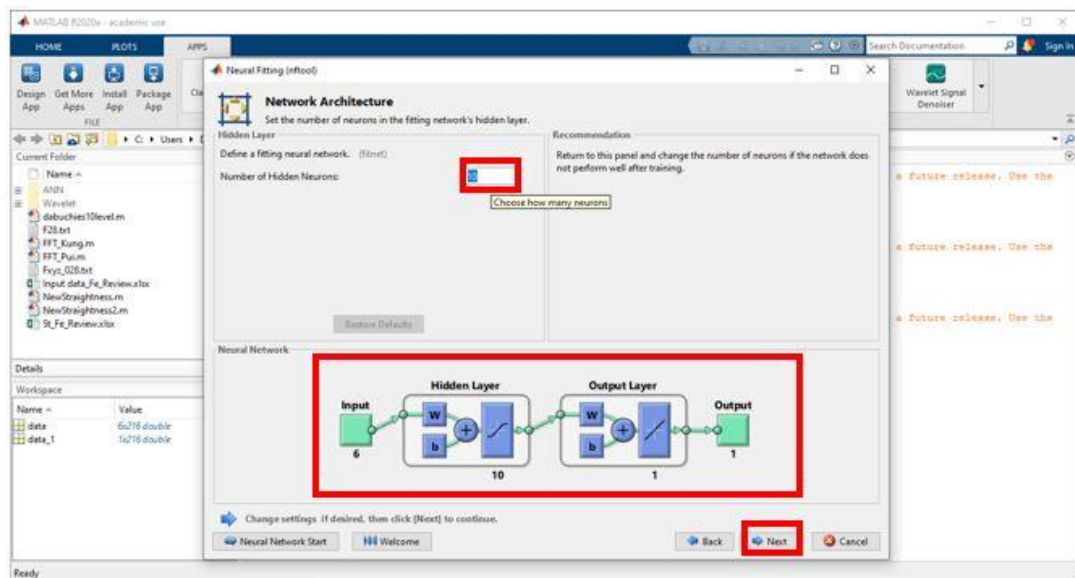
รูปที่ ค.6 หน้าต่างแสดงการเลือกชุดข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว

7.) ชุดข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อใช้สำหรับการฝึกสอน การยืนยันความถูกต้อง และการทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์สำหรับการยืนยันความถูกต้องและเปอร์เซ็นต์สำหรับการทดสอบสามารถแบ่งได้ 7 ค่า คือ 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 35% ดังรูปที่ ค.7 เมื่อเลือกค่าเปอร์เซ็นต์สำหรับการยืนยันความถูกต้องและค่าเปอร์เซ็นต์สำหรับการทดสอบเรียบร้อยแล้ว เปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์สำหรับการฝึกสอน กด Next เพื่อไปสู่ขั้นตอนถัดไป



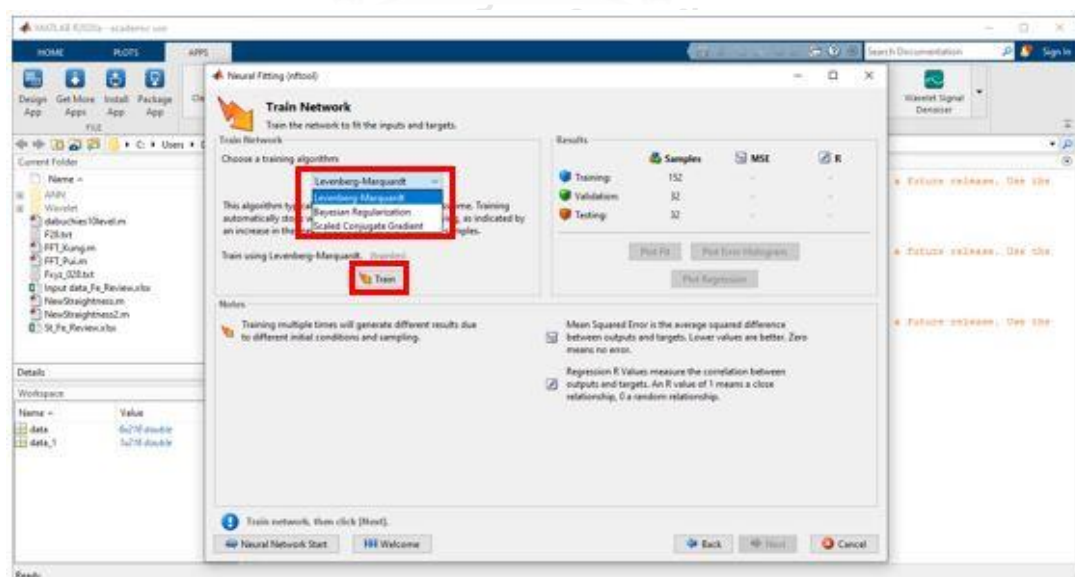
รูปที่ ค.7 หน้าต่างแสดงการแบ่งข้อมูลเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อใช้ในการฝึกสอน การยืนยันความถูกต้อง และการทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้น

8.) ขั้นตอนต่อมาคือการเลือกจำนวนโหนดในชั้นซ่อนของแบบจำลอง ด้านล่างหน้าต่างจะปรากฏโครงสร้างของแบบจำลองที่จะสร้างขึ้น ตัวเลขใต้ Input แสดงจำนวนปัจจัยนำเข้า ตัวเลขใต้ Hidden Layer แสดงจำนวนโหนดในชั้นซ่อน และตัวเลขใต้ Output แสดงจำนวนปัจจัยส่งออกที่ได้ดังรูปที่ ค. 8 กด Next เพื่อไปสู่ขั้นตอนถัดไป



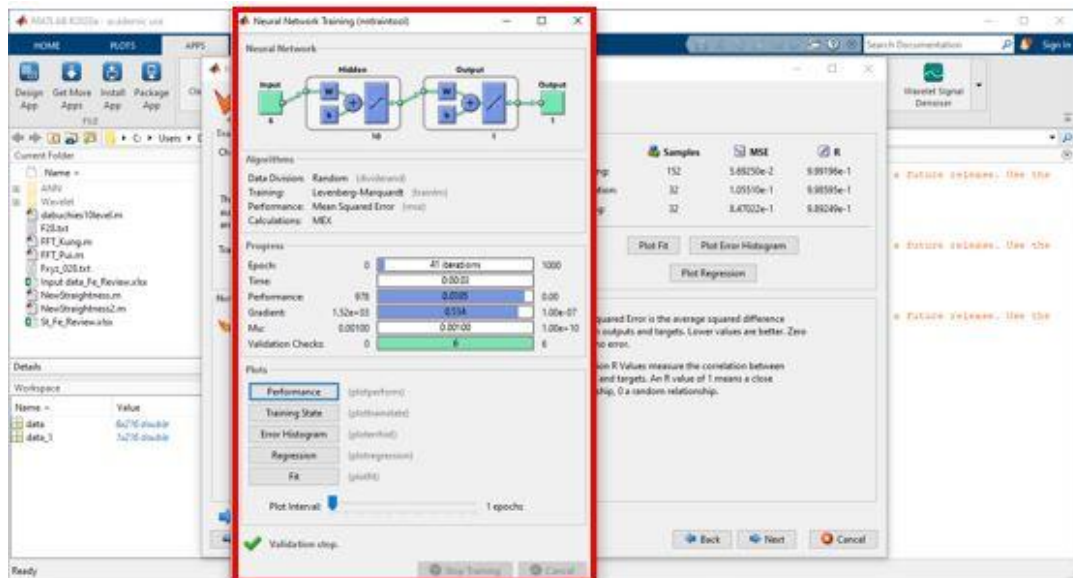
รูปที่ ค.8 หน้าต่างการเลือกจำนวนโหนดในชั้นซ่อนของแบบจำลอง

9.) หน้าต่างการฝึกสอนแบบจำลองจะปรากฏขึ้นดังรูปที่ ค.9 ให้เลือกประเภทอัลกอริทึมการฝึกสอนที่ต้องการและกด Train

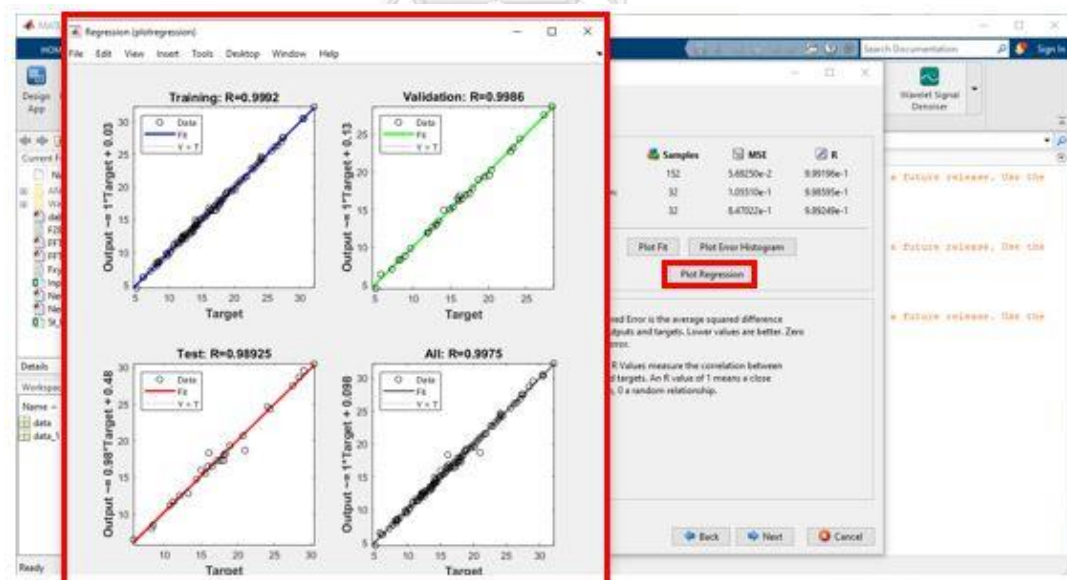


รูปที่ ค.9 หน้าต่างการเลือกประเภทอัลกอริทึมการฝึกสอนแบบจำลอง

10.) เมื่อกด Train หน้าต่างแสดงการฝึกสอนแบบจำลองจะปรากฏดังรูปที่ ค.10 เมื่อการฝึกสอนเสร็จสิ้นสามารถกดสร้างกราฟที่ต้องการเพื่อพิจารณาผลลัพธ์การฝึกสอนได้ เช่น Plot Fit, Plot Error Histogram, Plot Regression เป็นต้น ดังตัวอย่างรูปที่ ค.11

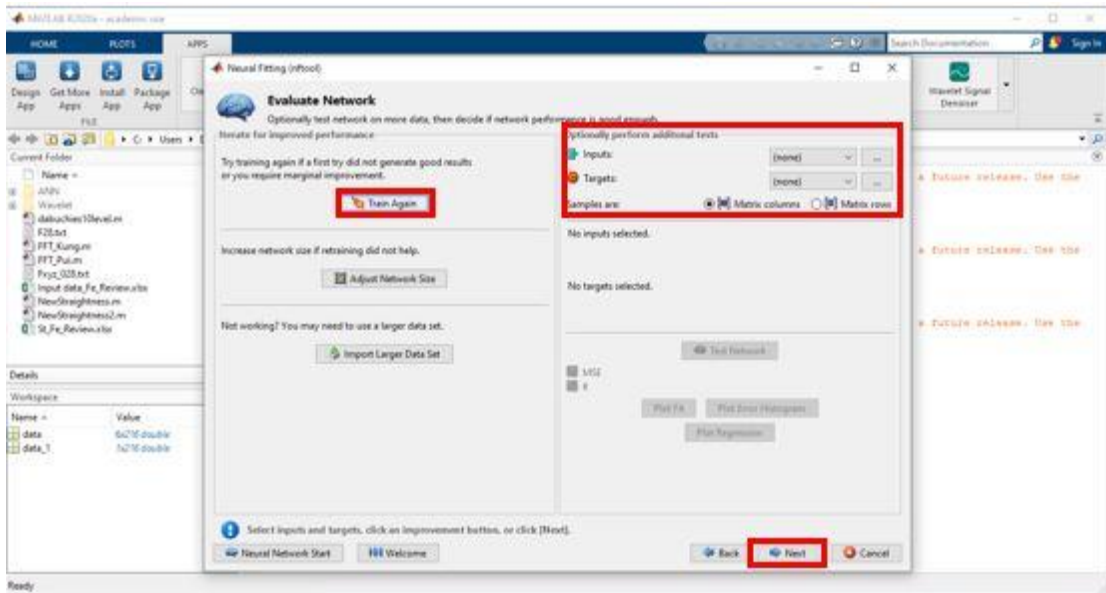


รูปที่ ค.10 หน้าต่างแสดงการฝึกสอนแบบจำลอง



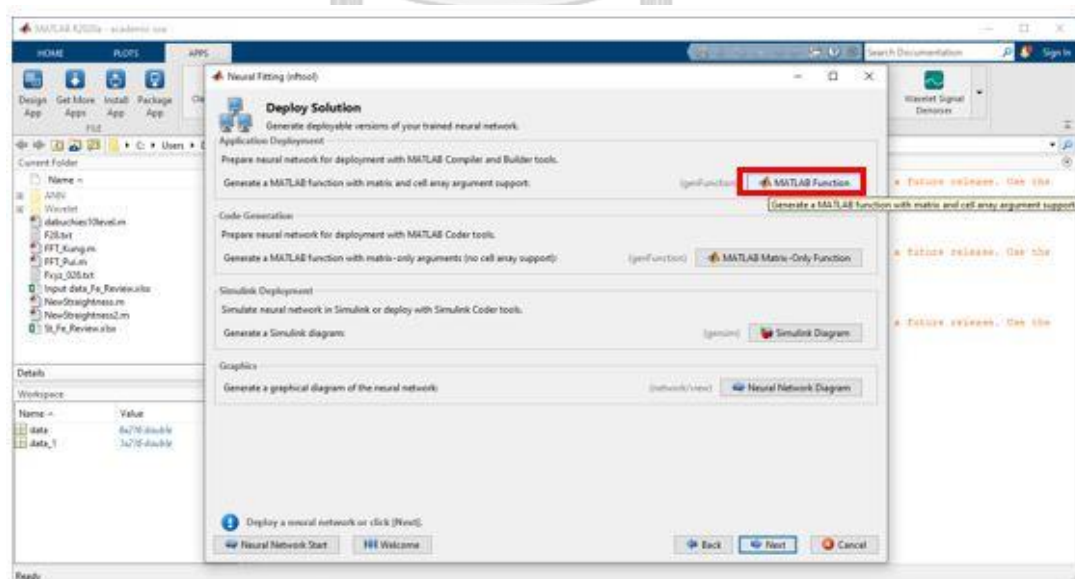
รูปที่ ค.11 หน้าต่างแสดงผลการ Plot Regression

11.) ขั้นตอนต่อมาคือการฝึกสอนซ้ำซึ่งสามารถเลือกชุดข้อมูลใหม่ในการฝึกสอนได้ดังรูปที่ ค.12 หรือใช้ชุดข้อมูลเดิมและกด Train Again เมื่อขั้นตอนนี้เรียบร้อย กด Next เพื่อไปสู่ขั้นตอนถัดไป

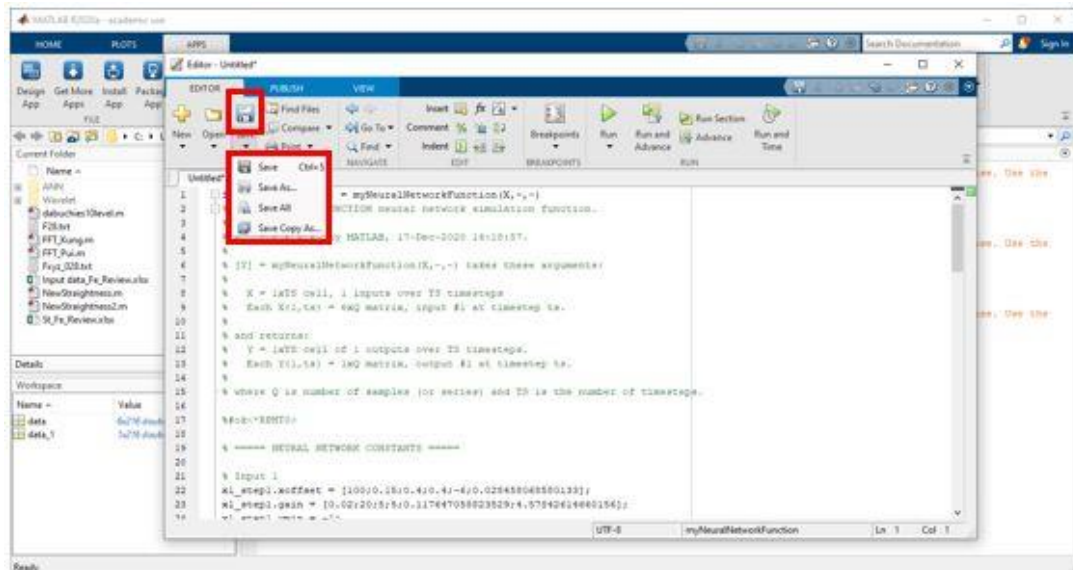


รูปที่ ค.12 หน้าต่างแสดงการฝึกสอนซ้ำ

12.) หน้าต่างแสดงฟังก์ชันและไดอะแกรมของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นจะปรากฏดังรูปที่ ค.13 สามารถกดเข้าไปดูฟังก์ชันหรือไดอะแกรมต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นได้ ดังตัวอย่างรูปที่ ค.14 ซึ่งสามารถกด Save เพื่อนำฟังก์ชันที่ได้ไปใช้งานต่อไปได้



รูปที่ ค.13 หน้าต่างแสดงฟังก์ชันและไดอะแกรมต่าง ๆ ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น



รูปที่ ค.14 หน้าต่างแสดงฟังก์ชันแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววิศรา หลายวัฒนไพศาล
วัน เดือน ปี เกิด	30 มกราคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556
ที่อยู่ปัจจุบัน	59/138 หมู่บ้าน Inizio 2 หมู่ 1 ถนนเลียบคลองสาม ตำบลคลองสาม อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY