

การพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับการกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้โครงข่าย
ประสาทเทียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREDICTION OF STRAIGHTNESS AND SURFACE ROUGHNESS FOR CNC TURNING BY
UTILIZING 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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

อริชยา เพื่อกหอม : การพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับการกลึง
ซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม. (PREDICTION OF STRAIGHTNESS
AND SURFACE ROUGHNESS FOR CNC TURNING BY UTILIZING ARTIFICIAL
NEURAL NETWORK) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน ภายใต้กระบวนการ
การควบคุมด้วยเงื่อนไขการตัดและอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะกลึงซีเอ็นซีของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน
S45C ด้วยมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยมีเงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 100 - 260 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.1
- 0.3 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการตัด 0.2 - 0.8 มิลลิเมตร รัศมีมีดตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร และมุม
คายเศษวัสดุ -6 และ +11 องศา การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วถูกใช้เพื่อพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและความ
ขรุขระผิวในโดเมนความถี่ โดยพบว่ามีความถี่ที่ตรงกัน อัตราส่วนแรงตัดจึงถูกประยุกต์ใช้เพื่อพยากรณ์ความ
ขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a), ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) และความตรงผิวชิ้นงาน (S_v) ในกระบวนการโดยที่
เงื่อนไขการตัดไม่เปลี่ยนแปลงไป ค่าความตรงและความขรุขระผิวถูกคำนวณด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบสอง
ชั้นป้อนไปข้างหน้า ซึ่งได้รับการฝึกฝนโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ด จากการ
เปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่าวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดให้การพยากรณ์ที่มี
ค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ 67.96%, 69.50% และ 59.29% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำสูง เมื่อทำ
การเปรียบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ 61.19%, 67.96% และ 40.71%
ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียม (Al 6063) อย่างไรก็ตาม การพยากรณ์ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C)
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วของค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ค่าความขรุขระ
ผิวชิ้นงานสูงสุด และค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ 88.78%, 92.51% และ 91.89%
ตามลำดับ ส่วนวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ
91.89%, 91.79% and 91.85% ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070374921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Surface roughness, Straightness, Cutting force ratio, Artificial Neural Network,
Back propagation

Arichaya Paukhom : PREDICTION OF STRAIGHTNESS AND SURFACE ROUGHNESS
FOR CNC TURNING BY UTILIZING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK. Advisor: Assoc. Prof.
Somkiat Tangjitsitcharoen

The objective of this research is to predict the in-process straightness and surface roughness by monitoring the in-process cutting forces during CNC turning of carbon steel (S45C) with coated carbide tools. The cutting conditions are the cutting speeds of 100 to 260 m/min, the feed rates of 0.1 to 0.3 mm/rev, the depths of cut of 0.1 to 0.3 mm, the tool nose radiuses of 0.4 and 0.8 mm with the rake angles of -6° and $+11^\circ$. The Fast Fourier Transform (FFT) is adopted to prove the relations among the cutting forces, the straightness and the surface roughness in frequency domain, which have the same frequency. The cutting force ratio is proposed and normalized to predict the in-process average surface roughness (R_a), maximum surface roughness (R_z) and straightness (S_t) regardless of the cutting conditions, which are calculated simultaneously by employing the two-layer feed-forward neural network. The neural network is trained by using the Levenberg-Marquardt back propagation algorithm. The experimentally obtained results are compared with the multiple regression analysis method. The verified tests showed that the multiple regression analysis can predict both surface roughness (R_a , R_z) and straightness (S_t) for aluminium (Al 6063) well with the higher accuracy of 67.96%, 69.50% and 59.29%, respectively as compared to the artificial neural network. While the prediction accuracy of those from the artificial neural network is 61.19%, 67.96% and 40.71%, respectively. However, the prediction accuracy for carbon steel (S45C) trained by artificial neural network of the average surface roughness, the maximum surface roughness and the straightness is 88.78%, 92.51% and 91.89%, respectively. While the prediction accuracy of those obtained from the multiple regression analysis is 91.89%, 91.79% and 91.85%, respectively.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ ที่เสียสละเวลาให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางการดำเนินงานที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขจุดบกพร่อง ด้วยความเอื้ออาทร เป็นผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์จรินทร์ เภาประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่อง ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความเรียบร้อยสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาองค์ความรู้ ในการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ รวมถึงคุณครูชำนาญการประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่ได้ความอนุเคราะห์ในการสอนใช้เครื่องมือ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านให้ความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมารดา และครอบครัวเฟือกหอม ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงรุ่นพี่ รุ่นน้องในแลป AMPE ที่คอยให้คำแนะนำ และให้การช่วยเหลืออย่างดีเสมอมา ทั้งนี้ขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อนๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อริชยา เฟือกหอม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.1.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมในประเทศไทย	1
1.1.2 การใช้งานเหล็กในอุตสาหกรรม	2
1.1.3 ความสำคัญของความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงตัด และเงื่อนไขการตัด	4
1.1.4 ความสำคัญของความตรงผิวชิ้นงาน แรงตัด และเงื่อนไขการตัด	6
1.2 กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	7
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	14
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
1.6 ขอบเขตงานวิจัย	14
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	17
2.1.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process).....	17

2.1.2 กระบวนการกลึง (Turning Process).....	19
2.1.3 คุณสมบัติของเครื่องมือตัด.....	24
2.1.4 แบบจำลองกลไกการตัดและการเกิดเศษโลหะ.....	31
2.1.5 ความสัมพันธ์และสมการของแรงในการตัด.....	34
2.1.6 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด.....	37
2.1.7 ลักษณะของพื้นผิว.....	40
2.1.8 โครงข่ายประสาทเทียม.....	46
2.1.9 การออกแบบการทดลอง.....	52
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	58
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	58
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความตรงผิวชิ้นงาน.....	59
2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม.....	60
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	62
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	62
3.1.1 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	62
3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	62
3.1.3 เงื่อนไขการทดลอง.....	64
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	73
3.2.1 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece Material).....	73
3.2.2 ด้ามมีดกลึง (Tool Holder).....	73
3.2.3 เม็ดมีด (Insert).....	74
3.2.5 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine).....	75
3.2.6 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer).....	75
3.2.7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	76

3.2.8 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier).....	76
3.2.9 เครื่องวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน (Straightness and Surface Roughness Tester)	77
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	78
3.4 การพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	80
3.5 วิเคราะห์ข้อมูล.....	81
3.5.1 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	81
3.5.2 วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง.....	82
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	84
4.1 ผลการทดลอง.....	84
4.2 การวิเคราะห์ความตรง ความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว.....	93
4.2.1 การวิเคราะห์ความตรงและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว.....	93
4.2.2 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว.....	94
4.2.3 การคำนวณระยะทางการกลิ้งใน 1 วินาที.....	96
4.3 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	99
4.3.1 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตของความตรงในโดเมนเวลา.....	99
4.3.2 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตของความขรุขระผิวในโดเมนเวลา.....	101
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงาน อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดและเงื่อนไขการตัด.....	102
4.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด.....	102
4.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัด.....	103

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับอัตราส่วนแรงตัดและเงื่อนไขการตัด	114
4.5.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับอัตราส่วนแรงตัด	114
4.5.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับเงื่อนไขการตัด	115
4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	125
4.6.1 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ	125
4.6.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล	127
4.6.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน	128
4.7 การสร้างอัลกอริทึมเพื่อพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	130
4.7.1 การสร้างอัลกอริทึมเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน	130
4.7.2 การสร้างอัลกอริทึมเพื่อพยากรณ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน	131
4.8 การทดสอบความแม่นยำของการพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	133
4.8.1 การทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง	133
4.8.2 การทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม	142
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล	155
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	157
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการวิจัย	157
5.4 ข้อเสนอแนะ	158
บรรณานุกรม	159
ภาคผนวก	163
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม	164
ภาคผนวก ข เงื่อนไขและผลการทดลองการทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม และวิเคราะห์ผลการทดลอง	172

ภาคผนวก ค เนื้อหาและผลการทดลองการการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของแรงตัดพลวัต ความตรง ผิวชิ้นงาน ความขรุขระผิวชิ้นงานและเศษวัสดุ ในชิ้นงานอะลูมิเนียม ที่มุมคายเศษ -6 องศา	177
ประวัติผู้เขียน.....	222



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ประเภทและวิธีการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน	5
ตารางที่ 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	13
ตารางที่ 1.3 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง	15
ตารางที่ 1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	16
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสัญญาณของโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....	40
ตารางที่ 2.2 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)	51
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลของการทดลอง 2 ปัจจัย.....	56
ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	63
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิวชิ้นงาน	64
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองความตรงเบี่ยงหนีศูนย์.....	69
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	85
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์	89
ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน	131
ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน.....	132
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการทดสอบของความขรุขระผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง	133
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเพื่อทดสอบของความขรุขระผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง	134
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแม่นยำของความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	136
ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขการทดสอบของความตรงผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง	138
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองเพื่อทดสอบของความตรงผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง	139
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความแม่นยำของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน.....	141

ตารางที่ 4.11 เงื่อนไขการทดสอบภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม.....	143
ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม	144
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความแม่นยำ.....	156



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ความต้องการใช้เหล็กในประเทศช่วงปี พ.ศ. 2556-2560.....	3
รูปที่ 1.2 แนวโน้มความต้องการในเหล็กทรงยาวในปี พ.ศ. 2561-2563.....	4
รูปที่ 1.3 เส้นที่พิจารณาในการวัดค่าความตรง.....	6
รูปที่ 1.4 กระบวนการกลึงชิ้นงานและการวัดความตรงผิวชิ้นงาน	8
รูปที่ 1.5 แรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดในแรงป้อนตัดชิ้นงานระหว่างตัด	8
รูปที่ 1.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า.....	11
รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการตัดเฉือน: (a) การกลึง, (b) การเจาะ, (c) การกัดข้างเรียบ และ (d) การกัดหน้าเรียบ.....	19
รูปที่ 2.2 ชนิดของการกลึง	21
รูปที่ 2.3 ความเร็วตัดในการกลึง	22
รูปที่ 2.4 มิตตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว.....	25
รูปที่ 2.5 เรขาคณิตของมิตตัดคมตัดเดี่ยว.....	28
รูปที่ 2.6 แบบจำลองกลไกการตัดและการเกิดเศษโลหะ	31
รูปที่ 2.7 แรงในการตัด: (a) แรงตัดที่เกิดขึ้นกับเศษตัด, (b) แรงตัดที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัด.....	34
รูปที่ 2.8 รูปหลายเหลี่ยมความสัมพันธ์ของแรง F , N , F_s , F_c , F_t และ F_n	36
รูปที่ 2.9 แรงตัดใน 3 มิติ.....	37
รูปที่ 2.10 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี.....	38
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของแรงตัดทั้ง 3 แกนในรูปของโดเมนเวลา	39
รูปที่ 2.12 การวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a).....	41
รูปที่ 2.13 การวัดค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z).....	41
รูปที่ 2.14 ความตรงแบบ Endpoints.....	44

รูปที่ 2.15 ความตรงแบบ Linear regression	44
รูปที่ 2.16 ความตรงแบบ ISO 1101.....	44
รูปที่ 2.17 โครงสร้างประสาท	47
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของการทำงานในโครงข่ายประสาทเทียม	48
รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	73
รูปที่ 3.2 ด้ามมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง.....	73
รูปที่ 3.3 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	74
รูปที่ 3.4 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	74
รูปที่ 3.5 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine).....	75
รูปที่ 3.6 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)	75
รูปที่ 3.7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	76
รูปที่ 3.8 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier).....	76
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน (Straightness and Surface Roughness Tester).....	77
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	78
รูปที่ 3.11 ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้พร้อมสำหรับการตัดชิ้นงาน.....	79
รูปที่ 3.12 แบบจำลองการทำงานของกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิว โดยที่ $W = \text{weight}$ และ $b = \text{bias}$	81
รูปที่ 3.13 แบบจำลองการทำงานของกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความตรง โดยที่ $W = \text{weight}$ และ $b = \text{bias}$	81
รูปที่ 4.1 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วระหว่างโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....	93
รูปที่ 4.2 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา.....	94

รูปที่ 4.3 แรงตัดในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา	94
รูปที่ 4.4 ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา.....	95
รูปที่ 4.5 แรงตัดในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา	95
รูปที่ 4.6 ความตรงของชิ้นงานโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา	97
รูปที่ 4.7 แรงตัดในโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา	98
รูปที่ 4.8 ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา	98
รูปที่ 4.9 แรงตัดในโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา	99
รูปที่ 4.10 การคำนวณแรงป้อนตัดที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลา.....	100
รูปที่ 4.11 การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู.....	101
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างพื้นที่แรงป้อนตัดและแรงตัดหลักที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	102
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัด.....	102

รูปที่ 4.42 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา	122
รูปที่ 4.43 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร	123
รูปที่ 4.44 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร	124
รูปที่ 4.45 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร	124
รูปที่ 4.46 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย	125
รูปที่ 4.47 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด	126
รูปที่ 4.48 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน	126
รูปที่ 4.49 กราฟการทดสอบความเป็นอิสระของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย	127
รูปที่ 4.50 กราฟการทดสอบความเป็นอิสระของความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด	127
รูปที่ 4.51 กราฟการทดสอบความเป็นอิสระของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน	128
รูปที่ 4.52 กราฟการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย	128
รูปที่ 4.53 กราฟการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด	129
รูปที่ 4.54 กราฟการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน	129
รูปที่ 4.55 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน	131
รูปที่ 4.56 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน	132
รูปที่ 4.57 ผลการทดสอบความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง	134
รูปที่ 4.58 ผลการทดสอบความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง	135

รูปที่ 4.59 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความ
 ชรุขระผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง 137

รูปที่ 4.60 ทดสอบความแตกต่างข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความ
 ชรุขระผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง 137

รูปที่ 4.61 ผลการทดสอบความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (S_c) ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง 140

รูปที่ 4.62 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความ
 ตรงผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง 141

รูปที่ 4.63 ทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความ
 ตรงผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง 142

รูปที่ 4.64 ผลการทดสอบความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้
 อะลูมิเนียม 148

รูปที่ 4.65 ผลการทดสอบความชรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้
 อะลูมิเนียม 148

รูปที่ 4.66 ผลการทดสอบความชรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้
 อะลูมิเนียม 149

รูปที่ 4.67 แรงตัดพลวัตที่โดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1
 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมัดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษ
 วัสดุ -6 องศา สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีเศษโลหะแบบแตกหัก 150

รูปที่ 4.68 แรงตัดพลวัตที่โดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1
 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมัดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษ
 วัสดุ -6 องศา สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียมที่มีเศษโลหะแบบต่อเนื่อง 150

รูปที่ 4.69 การพอกติดของเศษอะลูมิเนียมกับมีดตัดที่คมตัดและเศษอะลูมิเนียม 150

รูปที่ 4.70 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความ
 ตรงผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม . 151

รูปที่ 4.71 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความ
 ชรุขระผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม
 152

รูปที่ 4.72 ทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียม ในการ
ทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม 152



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

1.1.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมในประเทศไทย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทยมีการเติบโตที่รวดเร็วมากกว่าอดีต ทำให้ขณะนี้ผู้ผลิตจำนวนมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า ดังนั้นการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตและการแก้ไขปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตต้องเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เพื่อสร้างโอกาสทางธุรกิจและเป็นทางเลือกให้กับลูกค้า อีกทั้งอุตสาหกรรมยังเป็นตัวขับเคลื่อนเศรษฐกิจในประเทศให้เติบโตได้อย่างเข้มแข็งและมีความยั่งยืนได้ในอนาคต

นำไปสู่การพัฒนากระบวนการผลิตอัตโนมัติแบบไร้มนุษย์ในอนาคตเพื่อรองรับการผลิตในปริมาณน้อย แต่ตอบสนองได้หลากหลายผลิตภัณฑ์ รวมถึงการผลิตต้องมีความเป็นอัจฉริยะ ลักษณะคล่องแคล่ว มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงแต่ใช้ต้นทุนและเวลาให้การผลิตน้อย และคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นคือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System: IMS) เป็นระบบการผลิตที่มีการศึกษาและพัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะ (Intelligent Machine) กันอย่างกว้างขวาง เพื่อให้สามารถควบคุมและตรวจสอบด้วยตนเองได้ และให้ได้ผลิตภัณฑ์ปลายทางเป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เครื่องจักรกลอัจฉริยะในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการกลึง เพื่อนำไปผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมกระป๋อง อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมรถยนต์ และชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลเป็นต้น [1]

อุตสาหกรรมการกลึงในปัจจุบัน มีการนำเครื่องซีเอ็นซีมาใช้ในการกลึงชิ้นงาน (CNC Turning Center: TC) เพื่อช่วยในการผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดี เนื่องจากระบบมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการควบคุมส่วนต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด มีความเที่ยงตรงสูงในการปฏิบัติงานโดยเฉพาะชิ้นงานที่ต้องการขนาดที่แน่นอน สามารถคาดคะเนและวางแผนการผลิตได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็ว ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดี อัตราการผลิตสูง และสามารถที่จะผลิต

ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานโดยไม่ให้เกิดของเสียหรือเกิดของเสียน้อยที่สุด นอกจากการนำเครื่องกลึงซีเอ็นซีมาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียแล้ว ต้องมีการควบคุมความผิดพลาดของขนาดและรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงานและจำกัดขอบเขตให้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปร่างทรงกระบอก เช่น แกนล้อ, เพลา ซึ่งข้อจำกัดที่มีผลต่อความแม่นยำของรูปร่าง และขนาดของชิ้นงานเหล่านี้มากที่สุดคือ คือ ความตรง (Straightness) และความขรุขระผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) ในการออกแบบทางวิศวกรรมต้องมีการกำหนดข้อจำกัดของขนาด รูปร่างและค่าความเผื่อไว้ และสิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดให้ชิ้นงานที่ออกมาจากกระบวนการผลิตสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน [3, 4] ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ปัจจัยหลักคือ ปัจจัยภายในที่เกิดขึ้นในกระบวนการ อย่างเช่น แรงตัด ความสั่นสะเทือน อุณหภูมิ และเสียง ส่วนปัจจัยภายนอกที่สามารถควบคุมได้ เช่น เงื่อนไขการตัด อิทธิพลจากมีดตัด อิทธิพลของชิ้นงาน ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์ล้วนส่งผลต่อความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานที่แตกต่างกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการกลึงซีเอ็นซีเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาเรื่องความขรุขระผิวชิ้นงานและความตรงยังเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งในด้านต้นทุนทางตรงจากของเสียในการผลิต และต้นทุนทางอ้อมในการวัดชิ้นงานเสียหลังการผลิต เพราะการวัดค่าความตรงและความขรุขระผิวไม่สามารถทำได้ในขณะตัด รวมทั้งมีปัจจัยหลากหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้เองความตรงและความขรุขระผิวจึงถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่อุตสาหกรรมบางประเภท ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน ดังนั้นจึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาระบบที่สามารถตรวจติดตามและประมาณค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีขณะตัดได้

1.1.2 การใช้งานเหล็กในอุตสาหกรรม

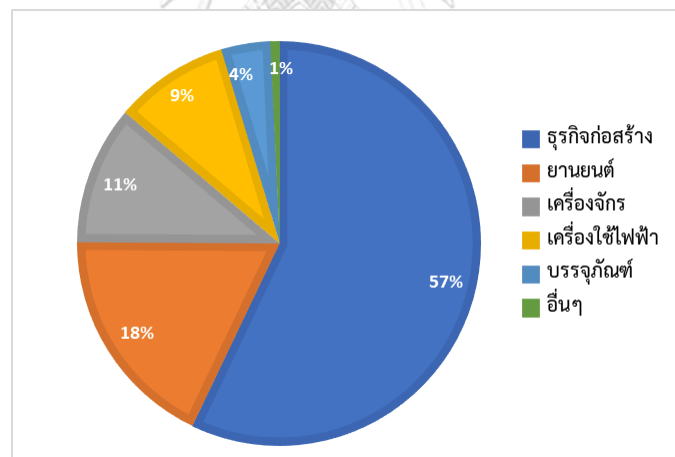
อุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศไทยก็คือ อุตสาหกรรมเหล็ก เนื่องจากเหล็กมีความจำเป็นต่อการผลิตอุตสาหกรรมต่อเนื้อที่มีส่วนสำคัญในการขยายตัวของเศรษฐกิจในหลายประเทศ อาทิเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น เพราะฉะนั้นทิศทางของอุตสาหกรรมเหล่านี้ จึงมีผลต่อความต้องการโดยตรงในการใช้เหล็กในประเทศ แต่ด้วยข้อจำกัดบางอย่าง เช่น ข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีที่ใช้

ในการผลิต การขาดกระบวนการผลิตเหล็กต้นน้ำ เป็นต้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่สูงตาม เพื่อรักษาคุณภาพและมาตรฐานในการผลิต [5]

หากจำแนกผลิตภัณฑ์เหล็กในไทยตามประเภทของเหล็กกึ่งสำเร็จรูปที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่

- 1) เหล็กทรงยาว (Long products) ประกอบด้วย เหล็กแท่งใหญ่และเหล็กแท่งยาวซึ่งเป็นเหล็กกึ่งสำเร็จรูป และผลิตภัณฑ์เหล็กที่ทำจากเหล็กทั้งสองประเภทนี้ เช่น เหล็กเส้นและเหล็กหลอด
- 2) เหล็กทรงแบน (Flat products) ผลิตภัณฑ์เหล็กที่แปรรูปจากเหล็กแท่งแบน เช่น เหล็กแผ่นรีดร้อนและเหล็กแผ่นรีดเย็นซึ่งอยู่ในรูปของเหล็กแผ่น (Plates) และเหล็กม้วน (Coils)

ความต้องการใช้เหล็กในประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2556-2560 มีปริมาณเฉลี่ย 17.5 ล้านตันต่อปี แบ่งตามความต้องการใช้ในธุรกิจที่เกี่ยวข้อง ส่วนมากมีความต้องการใช้เหล็กในธุรกิจก่อสร้าง 57.1% เช่น เหล็กเส้น เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ และตะปู/น็อต รองลงมาเป็นยานยนต์ 18% เครื่องจักร 11.1% เครื่องใช้ไฟฟ้า 9.2% บรรจุภัณฑ์ 3.9% และอื่น ๆ 0.7% ดังรูปที่ 1.1

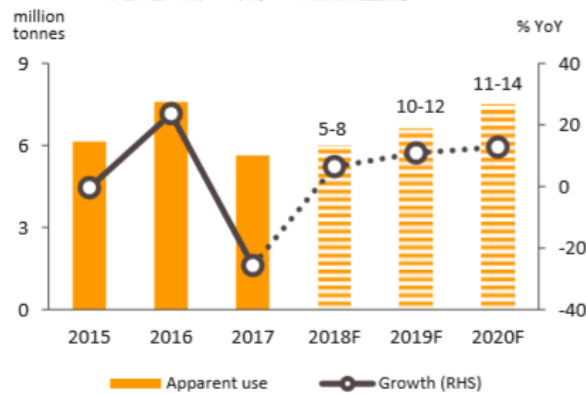


รูปที่ 1.1 ความต้องการใช้เหล็กในประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2556-2560

ด้านการผลิต มีปริมาณเฉลี่ย 7 ล้านตันต่อปี ในช่วงปี พ.ศ. 2556-2560 อุตสาหกรรมเหล็กในไทยมุ่งเน้นผลิตเพื่อใช้ใน ประเทศมากกว่าส่งออก โดยมีสัดส่วนความต้องการใช้เหล็กในประเทศต่อปริมาณเหล็กที่ส่งออกอยู่ที่ 91:9 ทั้งนี้ในปัจจุบันผู้ผลิตเหล็กในไทยสามารถผลิตเหล็กทรงยาวได้มากกว่าเหล็กทรงแบนในสัดส่วน 60:40 โดยเหล็กทรงยาวส่วนมากใช้ในภาคก่อสร้าง ได้แก่ เหล็กเส้นข้ออ้อย และเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ขณะที่การใช้เหล็กทรงแบนส่วนใหญ่อยู่ใน

ภาคอุตสาหกรรมที่เป็นธุรกิจต่อเนื่องของกลุ่มบริษัทในเครื่องต่างชาติที่เข้ามาตั้งฐานการผลิตในไทย เช่น ยานยนต์และเครื่องใช้ไฟฟ้า

ในส่วนของแนวโน้มความต้องการในเหล็กทรงยาวในปี พ.ศ. 2561 มีแนวโน้มเติบโต 5-8% YoY มีปริมาณ 5.9-6.1 ล้านตัน และขยายตัวเร่งขึ้นเป็น 10-12% และ 11-14% YoY ในปี พ.ศ. 2562 และ พ.ศ. 2563 ตามลำดับ อานิสงส์ หลักมาจากการขยายการลงทุนโครงการขนาดใหญ่ของภาครัฐ (เช่น รถไฟฟ้าทางคู่ และรถไฟฟ้า) ซึ่งในช่วงปี พ.ศ. 2562-2563 เป็นช่วงที่จะเกิดการลงทุนหลายโครงการ พร้อมกัน ทำให้ต้องการเหล็กก่อสร้างสูงขึ้น เช่น รางรถไฟ โครงสร้างทางยกระดับ และหมอนคอนกรีตเสริมเหล็ก ขณะเดียวกันการผลิตเหล็กทรงยาว ในระยะ 3 ปีข้างหน้ามีทิศทางเพิ่มขึ้นตามอุปสงค์ที่ขยายตัว โดยคาดว่า จะมีปริมาณเฉลี่ย 4-5 ล้านตันต่อปี [6]



รูปที่ 1.2 แนวโน้มความต้องการในเหล็กทรงยาวในปี พ.ศ. 2561-2563 [6]

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าประเทศไทยเน้นการผลิตเองในประเทศเพื่อใช้ในธุรกิจก่อสร้างมากกว่าครึ่ง กระบวนการผลิตเหล็กให้ได้ประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญมาก เพื่อรองรับความต้องการในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้เหล็กประเภทเหล็กทรงยาว ประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ในการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซี ด้วยรูปทรงที่เหมาะสมกับการจับกลึงได้ง่าย และสะดวกต่อการขนย้าย

1.1.3 ความสำคัญของความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงตัด และเงื่อนไขการตัด

การผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเพื่อง พลา ข้อต่อส่งกำลัง หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ต้องมีการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานโดยการกำจัดเนื้อโลหะที่ไม่ต้องการออกเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ รวมถึงผิวสำเร็จของชิ้นงานที่มีความแม่นยำและละเอียดสูง

จะต้องคำนึงถึงความขรุขระผิวของชิ้นงานเป็นสำคัญ เนื่องจากความขรุขระผิวชิ้นงานส่งผลต่อกระบวนการการประกอบ, ขนาดและค่าความเผื่อของชิ้นงาน

ความขรุขระผิวชิ้นงานหรือความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อมีความขรุขระของพื้นผิวมากแสดงว่ามีความเรียบผิวชิ้นงานน้อย หากมีความขรุขระพื้นผิวน้อยแสดงว่ามีความเรียบผิวชิ้นงานมาก แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังตารางที่ 1.1 โดยมีวิธีการหาค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย คัดจากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (l_m) และค่าความขรุขระผิวสูงสุดหาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) [7]

ตารางที่ 1.1 ประเภทและวิธีการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

ประเภทของความขรุขระผิว	การวัดค่าความขรุขระผิว
1. ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a)	
2. ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)	

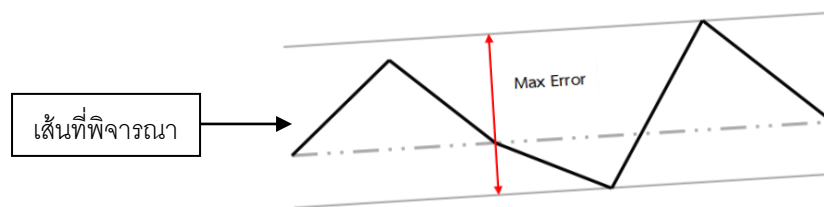
ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานหรือความขรุขระผิวชิ้นงานตามทฤษฎี [8] แล้วปกติจะเกิดจากรอยป้อนตัดและรัศมีงูมกมิตตัดที่ตกค้างอยู่บนผิวชิ้นงาน หากพิจารณาถึงแรงตัดแล้ว แรงตัดจะส่งผลกระทบต่อ การสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัด การสั่นนี้ทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานออกมาไม่ดีเท่าที่ควร จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดกับค่าอัตราส่วนแรงตัดที่วัดได้ในขณะตัดจริง ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงูมกมิตตัด ความลึกในการตัด และมุมคายเศษวัสดุ ล้วนแต่ส่งผลกับความขรุขระผิวชิ้นงานที่แตกต่างกัน [3, 9] ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิตัดสูงขึ้น ผิวชิ้นงานจึงอ่อนนุ่ม ตัดง่าย ใช้แรงตัดน้อย ส่งผลให้แรงสั่นสะเทือนลดลง เป็นผลให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพดี เช่นเดียวกับรัศมีงูมกมิต

ตัด เมื่อใช้มีดตัดที่มีรัศมีงมูกมีดตัดใหญ่ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากใช้รัศมีงมูกมีดตัดมีขนาดใหญ่มากเกินไปจะส่งผลให้มุมข้างคมตัดเพิ่มขึ้น พื้นที่สัมผัสของส่วนโค้งรัศมีงมูกมีดตัดกับชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำให้แรงตัดเพิ่มสูงขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดแซตเตอร์ ทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นในกรณีนี้

1.1.4 ความสำคัญของความตรงผิวชิ้นงาน แรงตัด และเงื่อนไขการตัด

ความตรงเพียงหนึ่งศูนย์หรือความตรงผิวชิ้นงาน (Straightness) มีความสำคัญในอุตสาหกรรมที่ต้องการงานชิ้นรูปความเที่ยงตรงสูง (Precision Machining Industry) เนื่องจากอุตสาหกรรมนี้ผลิตชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น เผลา, แกนล้อ, ลูกสูบ ฯลฯ เพื่อส่งไปยังอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วน ได้แก่ ฮาร์ดดิสก์, เมมโมรี่ สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า รวมถึงแม่พิมพ์บางประเภทสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น ซึ่งชิ้นส่วนที่ผลิตเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปนั้นล้วนแต่ต้องการความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรงสูง (Precision) หากความตรงของชิ้นงานไม่สมบูรณ์ อาจส่งผลต่อเวลาในกระบวนการประกอบที่เพิ่มมากขึ้นจากการปรับแก้งานที่ประกอบไม่เข้า ไม่ได้ระนาบเอียง และประสิทธิภาพในการใช้งานชิ้นส่วนนั้นลดลง จึงกล่าวได้ว่าความตรงของผิวชิ้นงานมีความสำคัญในกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก

ความตรง (S_z) คือ ระยะระหว่างเส้นที่ขนานกันสองเส้นที่ครอบคลุมจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของเส้นที่พิจารณา หากเกิดการเบี่ยงเบนใด ๆ จากเส้นที่ขนานกันสองเส้นนั้นเรียกว่าความตรงเพียงหนึ่งศูนย์ วัดจากเส้นที่พิจารณาถึงจุดที่ครอบคลุมของเส้นพิจารณา โดยที่ค่าของ S_z มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 1.3 เส้นที่พิจารณาในการวัดค่าความตรง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี [2] พบว่าเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงมูกตัด และมุมคายเศษวัสดุ มีผลต่อความตรงผิวชิ้นงาน และจาก

งานวิจัยอื่น ๆ [4] ได้มีการพิจารณาเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน ซึ่งมีผลไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อความลึกในการตัด อัตราการป้อนตัดและพื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ใช้แรงตัดสูง ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความตรงผิวชิ้นงานลดลง ส่วนความเร็วตัด รัศมีจุมุมิตัด และมุมคายเศษวัสดุเพิ่มขึ้น ทำให้ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานมีค่าลดลง ส่งผลให้ความตรงผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นต้น

1.2 กรอบแนวคิดงานวิจัย

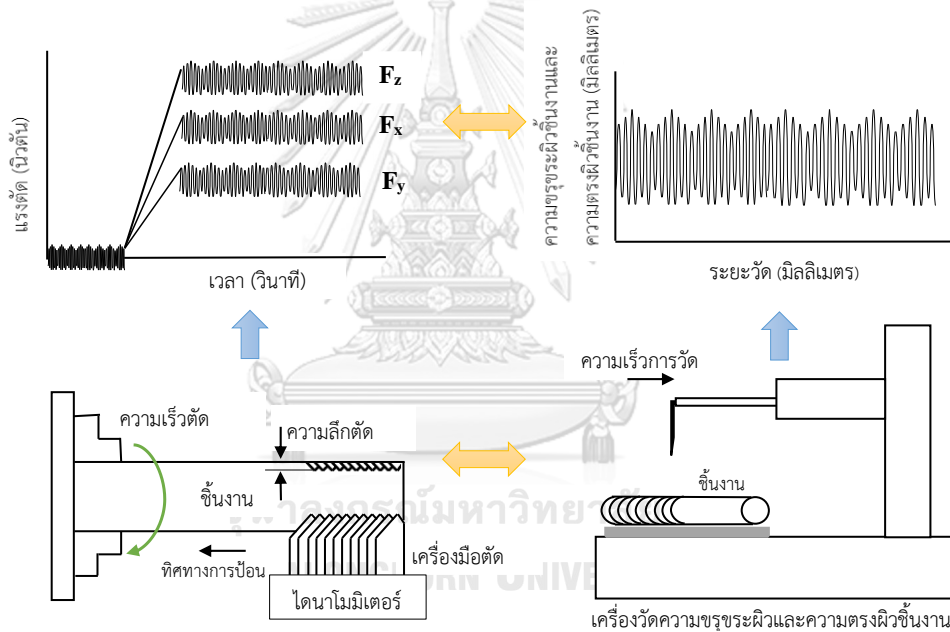
จากที่กล่าวมาข้างต้น ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานเกิดจากปัจจัยของเงื่อนไขการตัด ในกระบวนการกลึง ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีจุมุมิตัด มุมคายเศษ ปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยภายนอกที่สามารถควบคุมได้โดยตรง

ส่วนปัจจัยภายในที่เกิดขึ้น เช่น แรงตัด ความสั่นสะเทือน อุณหภูมิ และเสียง ล้วนเป็นปัจจัยที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างกระบวนการที่สามารถวัดได้อย่างทันท่วงทีด้วยเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาเครื่องกลึงอัจฉริยะในการตรวจติดตามและประมาณค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์และความขรุขระผิวชิ้นงานในงานกลึง เพื่อให้สามารถพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวในขณะตัดได้นั้น การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตจึงมีความเหมาะสมที่สุดในขณะทำการผลิต โดยส่วนมากเซ็นเซอร์ที่นิยมใช้คือ เซ็นเซอร์วัดแรง ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลอัจฉริยะ สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง และทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการวัดผิวชิ้นงาน โดยงานวิจัยนี้ได้นำเซ็นเซอร์วัดแรงมาใช้ในการวัดความขรุขระผิวชิ้นงานและความตรงในกระบวนการกลึง

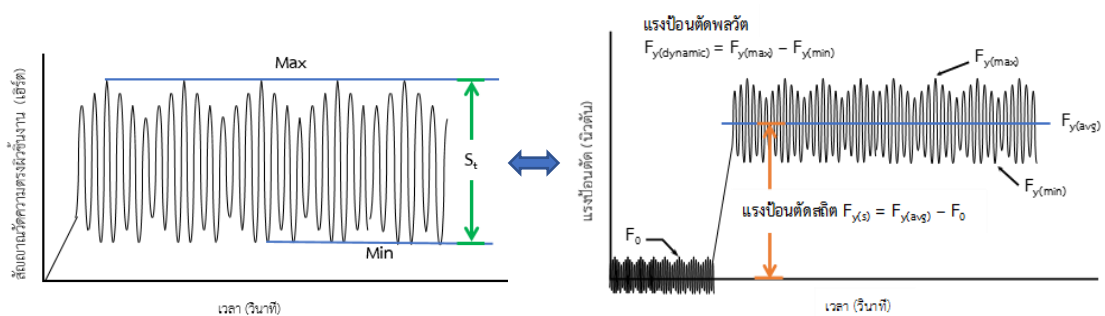
เซ็นเซอร์วัดแรงหรือไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) สามารถตรวจติดตามแรงตัดในกระบวนการกลึงที่เกิดขึ้นได้ 3 แรง คือ แรงตัดแนวรัศมี (Radial force: F_x) แรงตัดป้อน (Feed force: F_y) และแรงตัดหลัก (Main force: F_z) ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้า [3] ได้นำแรงตัดที่เกิดขึ้นนี้มาทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน เพราะแรงตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความขรุขระผิว โดยแรงป้อนตัดเป็นแรงที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ในขณะที่แรงตัดหลักเกิดจากเงื่อนไขการตัด [10] โดยเมื่อพิจารณาแรงตัดที่โดเมนเวลา จากรูปที่ 1.4 พบว่าลักษณะของสัญญาณแรงตัดพลวัต (Dynamic feed force: $F_{y(dynamic)}$) เกิดเป็นลูกคลื่นที่ซ้ำ ๆ กัน และมีความสอดคล้องกับอัตราการป้อนตัดชิ้นงาน สามารถอธิบายได้ว่าการตัดที่อัตราการป้อนตัดใด ๆ แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะมี

ลักษณะเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ ซึ่งพบว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับรอยของความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นด้วยจำนวนที่สอดคล้องกัน

อย่างไรก็ตามแรงตานั้นอาจแปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันออกไป อัตราส่วนของแรงตัดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากอัตราส่วนแรงตานั้นผู้สันนิษฐานว่าสามารถคำนวณความขรุขระผิวชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด [8] เพราะการใช้ข้อมูลที่เป็นการเฉลี่ยแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัด ด้วยเหตุนี้อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนและขาดความแม่นยำ ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดพลวัตระหว่างแรงตัดหลักและแรงป้อนตัด (AF_y/AF_z) โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดโดยไม่แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 1.4 กระบวนการกลึงชิ้นงานและการวัดความตรงผิวชิ้นงาน



รูปที่ 1.5 แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดในแรงป้อนตัดชิ้นงานระหว่างตัด

ในส่วนของความตรงของชิ้นงาน ได้นำแรงป้อนตัดมาทำนายความตรงของชิ้นงาน เนื่องจากแรงป้อนตัดเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดรอยป้อนตัด (feed mark) ขึ้นบนผิวชิ้นงานที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าของความตรง เนื่องจากพิจารณาที่โดเมนเวลาพบว่าสัญญาณของแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน และมีความสอดคล้องกับอัตราการป้อนตัดชิ้นงาน ซึ่งกล่าวได้ว่า การตัดที่อัตราการป้อนตัดใด ๆ แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะมีลักษณะเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน และพบว่าแรงที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกันกับรอยป้อนตัด (feed mark) ที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานที่เป็นค่าบ่งบอกความตรงของชิ้นงาน โดยมีลักษณะเป็นลูกคลื่นที่สอดคล้องกัน ดังรูปที่ 1.4

จากรูปที่ 1.5 สามารถอธิบายได้ว่าส่วนต่าง ๆ ของแรงตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_{y(max)}$) กับที่น้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) มีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความตรงที่เป็นส่วนต่าง ๆ ของความสูงของค่าความขรุขระผิวที่สูงที่สุด (Max) กับค่าที่น้อยที่สุด (Min) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตในทิศทางการป้อนตัด คำนวณได้จากผลต่างของแรงป้อนตัดพลวัตเทียบกับแรงป้อนตัดสถิต (Static feed force: $F_{y(s)}$) ในช่วงเวลาที่วัด ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$) จึงถูกนำมาใช้ในการทำนายค่าความตรงของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ เพื่อให้สามารถทำนายความตรงผิวชิ้นงานในขณะตัดแม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษางานวิจัย ดังตารางที่ 1.2 พบว่ามีการใช้ตัวแปรและวิธีการในการพยากรณ์แตกต่างกันออกไป จากวิจัย [3, 9] ได้พยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในการกลึง โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Multiple regression model) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เพื่อให้ได้สมการที่สามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดในทำนองเดียวกัน มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการพยากรณ์ความตรงผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกลึง [2] โดยใช้วิธีการดังกล่าว จากจุดนี้จะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยที่กล่าวมาได้สร้างสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานและความตรงโดยการสร้างสมการขึ้นมา ส่งผลให้มีต้นทุนและเวลาในการทดลองกระบวนการกลึงชิ้นงานสูง หากนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงอาจส่งผลกระทบต่อเวลาในการส่งมอบและต้นทุนในกระบวนการผลิตส่วนนี้ในระดับหนึ่ง ซึ่งการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั้น เป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งทางสถิติเพื่อวิเคราะห์จากตัวแปรอิสระของแต่ละปัจจัย เพื่อพยากรณ์ตัวแปรตามที่ต้องการ ซึ่งใช้เวลามากในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย แล้วนำมาวิเคราะห์ในกรณีที่มีหลายปัจจัย

จากการค้นคว้างานวิจัย [11] ได้ทำการเปรียบเทียบเทคนิคการพยากรณ์การถดถอยพหุคูณและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์เกรดเฉลี่ย พบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าพยากรณ์ใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณ และจาก

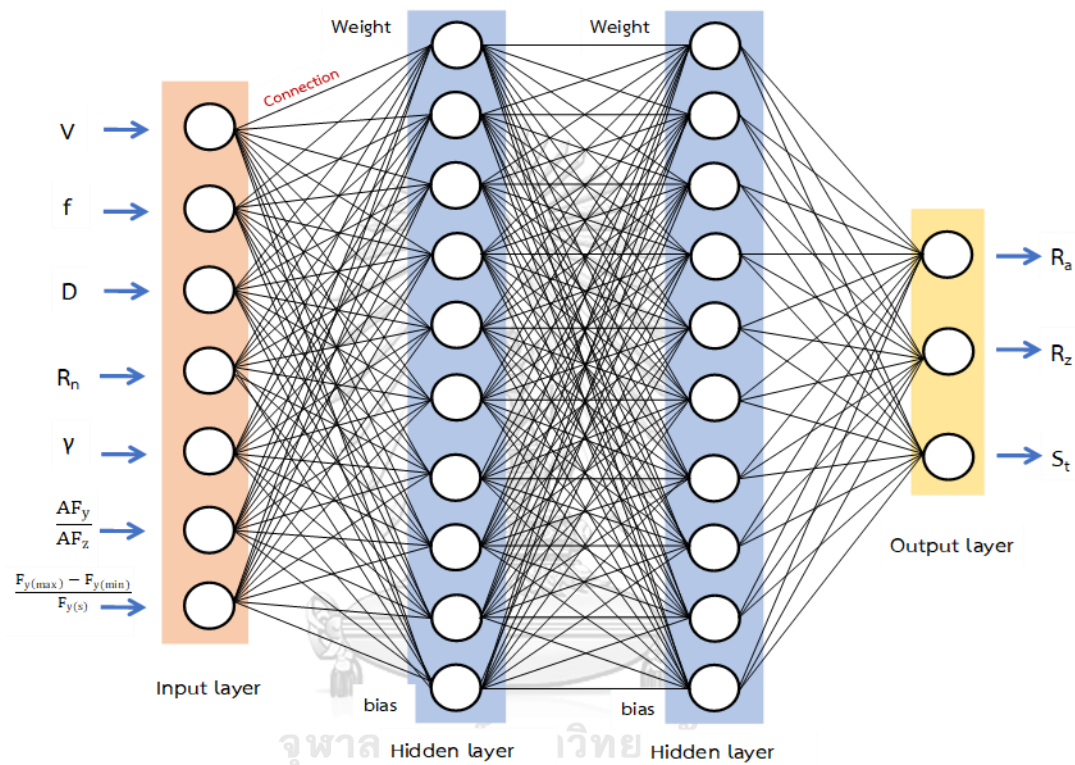
การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการตรวจติดตาม [12] พบว่ามีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ในการตรวจติดตามการสึกหรอของเครื่องมือตัด โดยใช้เซ็นเซอร์ร่วมกัน โดยงานวิจัยได้ใช้การฝึกสอน (Train) ข้อมูลการสึกหรอของเครื่องมือตัดเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้ระบบสามารถพยากรณ์ความสึกหรอในระหว่างกระบวนการตัดได้

เป็นผลให้ผู้วิจัยสนใจการพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากศาสตร์แขนงหนึ่งของทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มีรูปแบบโครงสร้างและการทำงานการประมวลผลเหมือนกับสมองของสิ่งมีชีวิต สามารถปรับเปลี่ยนตัวเองต่อการตอบสนองของข้อมูลป้อนเข้าตามสิ่งที่ได้จากการเรียนรู้ (Learning rule)

โครงข่ายประสาทเทียมเกิดขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ถือว่าเป็นยุคแรกที่มีการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ หากไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ยังไม่รวดเร็วและรองรับข้อมูลได้เพียงพอ แต่ในปัจจุบันได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง เนื่องจากคอมพิวเตอร์มีการประมวลผลได้ไว และมีความสามารถในการเรียนรู้ที่แม่นยำมากขึ้น อีกทั้งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเส้นตรง (Linear model) ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear model) และข้อมูลที่มีความซับซ้อนได้ เพราะผู้วิจัยสามารถกำหนดชั้นซ่อน (Hidden layer) ให้แก่โปรแกรม และโปรแกรมสามารถปรับเปลี่ยนน้ำหนักสัมประสิทธิ์ได้ด้วยตัวเอง เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ผลให้มีความถูกต้องมากขึ้น แต่น้ำหนักที่ได้จะไม่แสดงให้เห็นเหมือนดังสัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยพหุคูณ .การคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียมต่าง ๆ จะถูกเก็บไว้ในกล่องดำ (Black box) เป็นคำนิยามแทนกระบวนการประมวลผลภายในโปรแกรม ซึ่งในอนาคตอาจจะมีงานวิจัยบางงานได้พัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับอัลกอริทึมอื่น ๆ เพื่อปกปิดจุดด้อยนี้

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัย คือ โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า (Feed-forward neural network) โดยจะประกอบด้วย ชั้นรับข้อมูล (Input Layer) 7 ข้อมูล ได้แก่ ความเร็วตัด (V), อัตราป้อนตัด (f), ความลึกในการตัด (D), รัศมีจุมูกตัด (R_n), มุมคายเศษวัสดุ (γ), อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด (AF_1 / AF_2) สำหรับความขรุขระผิว และ $(F_{y(max)} - F_{y(min)}) / F_{y(s)}$ สำหรับความตรงเปียงหนีศูนย์ชิ้นงาน ส่วนชั้นซ่อน (Hidden Layer) มีหน้าที่ให้ค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเบี่ยงเบนเริ่มต้น (Bias) เพื่อให้มีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percent Error, MAPE) น้อยที่สุด และชั้นแสดงผล (Output Layer) จะให้ผลลัพธ์ คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a), ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) และความตรงผิวชิ้นงาน (S_t) ดังรูปที่ 1.6 โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า (Input) และผลลัพธ์ (Output) การเรียนรู้จะเริ่มจากการสุ่มค่าน้ำหนักและค่า

เบี่ยงเบนเริ่มต้นในชั้นซ่อน ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากค่าเริ่มต้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จริง ค่าที่แตกต่างจะถูกนำมาปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนโดยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงหรือตรงกับผลลัพธ์จริง ค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนสุดท้ายจะถูกนำมาใช้ในการพยากรณ์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากข้อมูล (Input) ใหม่หรือเรียกว่าการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back propagation learning) [13]



รูปที่ 1.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นไปข้างหน้าโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ด (The two-layer feed-forward neural network with Levenberg-Marquardt back propagation learning algorithm) ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมใช้ที่สุด เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาประเภทการประมาณค่า อีกทั้งเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและใช้เวลาไม่นานในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม [14] ใช้เพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a), ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) และความตรงผิวชิ้นงาน (S_t) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนกับวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด โดยใช้โดนาโมมิเตอร์ใน

การตรวจติดตามแบบทันที เพื่อประมาณค่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดระหว่างแรงตัดหลัก และแรงป้อนตัด และค่าผลต่างของแรงป้อนตัดพลวัตเทียบกับแรงป้อนตัดสถิต จากการกลึงชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ภายใต้เงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีจุ่มกัด และมุมคายเศษวัสดุ เพื่อเพิ่มอัตราผลิตภาพ ลดการผลิตของเสีย และลดเวลาการผลิตในกระบวนการกลึงเครื่องจักรกลซีเอ็นซี



ตารางที่ 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัย อ้างอิง	วัสดุที่ใช้ทดลอง	ตัวแปรตาม	ตัวแปรต้น						วิธีการการณ์	ข้อจำกัด
			ความเร็วตัด	อัตราการป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีมุมกัด	มุมคายเศษโลหะ	แรงตัด		
[1]	อะลูมิเนียม 6063	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว (F_r/F_c)	การวิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	ใช้อัตราส่วนแรงตัดโดยไม่มี คำนึงถึงอิทธิพลของมุมคาบ เศษโลหะที่แตกต่างกัน
		ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว/เสียด ($F_{Ymax}/F_{Ymin}/F_{Y0}$)	การวิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	-
[2]	เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	ความตราบผิวเชิงงาน (St)	✓	✓	✓	✓	✓	พื้นที่แรงตัดพลั่ว (AF/AF_c)	การวิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	วิเคราะห์เงื่อนไขที่เศษโลหะ ต่อเนื่อง
		แรงตัด	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดเสียด (F_r/F_c)		ไม่ได้อธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างเงื่อนไขของการตัด ความขรุขระผิว อัตราส่วน แรงตัดและอุณหภูมิได้
[3]	เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว (F_r/F_c)		
		ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดเสียด (F_r/F_c)		
[4]	เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว (F_r/F_c)		
		อัตราส่วนแรงตัด อุณหภูมิในการตัด	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัด F_x, F_y, F_z		
[10]	เหล็กกล้า AISI 1045	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว (F_r/F_c)	การวิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	
		ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัด F_x, F_y, F_z	วิเคราะห์จาก โปรแกรมอื่น	ต้องใช้เซ็นเซอร์ 4 ตัวในการ ทดสอบ
[12]	เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	ความลึกหระ	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว/เสียด ($F_{Ymax}/F_{Ymin}/F_{Y0}$)	การวิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	ใช้อัตราส่วนแรงตัดโดยไม่มี คำนึงถึงอิทธิพลของมุมคาบ เศษโลหะที่แตกต่างกัน
		ความตราบผิวเชิงงาน (St)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว/เสียด ($F_{Ymax}/F_{Ymin}/F_{Y0}$)	เปรียบเทียบการ วิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ และโครงสร้าง ประสานเทียม	โครงสร้างประสานเทียมให้ ความถูกต้องมากกว่า แต่ การทำงานจะอยู่ภายใน กล่องดำ (Black Box) เท่านั้น
[15]	อะลูมิเนียม 6063	ความตราบผิวเชิงงาน (St)	✓	✓	✓	✓	✓	พื้นที่แรงตัดพลั่ว (AF/AF_c)	การวิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	การทำงานภายในโครงสร้าง ประสานเทียมไม่สามารถ ทราบได้ (Black Box)
		แรงตัด	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว/เสียด ($F_{Ymax}/F_{Ymin}/F_{Y0}$)	เปรียบเทียบการ วิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	
[16]	เหล็กกล้า AISI 8620 และ อะลูมิเนียม 6061T	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	✓	✓	✓	✓	✓	ความแข็ง ชิ้นงาน		
		ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	✓	✓	✓	✓	✓	พื้นที่แรงตัดพลั่ว (AF/AF_c)		
ผู้วิจัย	เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	ความตราบผิวเชิงงาน (St)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว/เสียด ($F_{Ymax}/F_{Ymin}/F_{Y0}$)	วิเคราะห์การ ถดถอยพหุคูณ	
		ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	✓	✓	✓	✓	✓	แรงตัดพลั่ว/เสียด ($F_{Ymax}/F_{Ymin}/F_{Y0}$)		

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจติดตามและพยากรณ์ค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานเหล็ก โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

การตรวจติดตามและพยากรณ์ค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึงภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึงเครื่องจักรกลึงซีเอ็นซี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การตรวจติดตามแบบทันท่วงทีในกระบวนการกลึงสำหรับเครื่องจักรกลอัจฉริยะโดยใช้เซนเซอร์แรงและเทคนิคของโครงข่ายประสาทเทียม (อัลกอริทึม)
2. ระบบการประเมินอัจฉริยะของความขรุขระผิวและความตรงผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี
3. เพิ่มอัตราผลิตภาพและลดการผลิตของเสียในกระบวนการเครื่องจักรกลึงซีเอ็นซี

1.6 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) กระบวนการกลึงปอกผิวงานโดยการตัดแบบแห้ง (Dry cutting)
- 2) ทดลองบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
- 3) เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121 สำหรับตรวจติดตามแรงตัดในขณะกลึงปอกผิวชิ้นงาน
- 4) วัสดุทดสอบในการกลึงคือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร
- 5) เม็ดมีดตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide)
- 6) ด้ามมีดที่ใช้ในการกลึง (Tool Holder) เบอร์ CTGPR 2525M-16N และ WTJNR 2525M-16N
- 7) ปัจจัยและระดับปัจจัยการทดลอง ดังตารางที่ 1.2

8) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากอัลกอริทึมและวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด

ตารางที่ 1.3 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	100, 150, 180, 200, 260
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8
รัศมีจุกมีดตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.8
มุมคายเศษวัสดุ (องศา)	+11, -6

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลึงผิวชิ้นงาน รวมถึงศึกษาขั้นตอนการใช้เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์และทดลองใช้เครื่อง
- 2) ศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการกลึง การติดตั้งเซนเซอร์ และเครื่องวัดผิวชิ้นงาน รวมไปถึงพารามิเตอร์ในการกลึงต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน
- 3) กำหนดปัจจัยในการทดลอง รวมถึงออกแบบการทดลอง
- 4) ทำการทดลองและเก็บข้อมูลของผิวชิ้นงาน
- 5) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
- 6) ทดสอบโปรแกรมในการตรวจติดตามค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน
- 7) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง, ผลจากอัลกอริทึมและวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด
- 8) สรุปผลการดำเนินการวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะ
- 9) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	พ.ศ. 2562										
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ธ.ค.	พ.ย.
1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลึงผิวชิ้นงาน รวมถึงศึกษาขั้นตอนการใช้เครื่องซีเอ็นซีเมซซิ่งเซนต์อร์และทดลองใช้เครื่อง											
2) ศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการกลึง การติดตั้งเซนเซอร์ และเครื่องวัดผิวชิ้นงาน รวมไปถึงพารามิเตอร์ในการกลึงต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน											
3) กำหนดปัจจัยในการทดลอง รวมถึงออกแบบการทดลอง											
4) ทำการทดลองและเก็บข้อมูลของผิวชิ้นงาน											
5) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง											
6) ทดสอบโปรแกรมในการตรวจติดตามค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน											
7) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง, ผลจากอัลกอริทึมและวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด											
8) สรุปผลการดำเนินงานวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะ											
9) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์											

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีและนำเสนอแนวทางการตรวจติดตามแบบทันท่วงทีและประมาณค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี ซึ่งได้สำรวจทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังนี้

2.1.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process)

กระบวนการตัดเฉือนหรือกระบวนการกัดโลหะ หมายถึง กระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (Cutting tool) โดยอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative motion) ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ซึ่งการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ประกอบด้วย การเคลื่อนที่แบบปฐมภูมิ (Primary motion) ที่เรียกว่าความเร็ว (Speed) และการเคลื่อนที่แบบทุติยภูมิ (Secondary motion) ที่เรียกว่า การป้อน (feed) รูปร่างของเครื่องมือตัด และลักษณะการกัดผิวชิ้นงานประกอบกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่กล่าวถึง เพื่อการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานและวัสดุส่วนที่เหลือจะมีรูปร่างตามที่ต้องการ โดยขั้นตอนหลักในกระบวนการกัดเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือน (Shear deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (Chip) เมื่อเศษตัดถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวชิ้นงานใหม่ กระบวนการกัดนี้ใช้ในการผลิตชิ้นงานโลหะให้มีรูปร่างต่าง ๆ และถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง

เหตุผลที่กระบวนการกัดมีความสำคัญมากในเชิงพาณิชย์และเชิงเทคโนโลยีสามารถสรุปได้ดังนี้

- สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางกับวัสดุหลายประเภท โดยส่วนใหญ่ใช้ได้กับโลหะ แข็งรวมถึง พลาสติก และ พลาสติกผสม (Plastic composite) สำหรับเซรามิกการกัดทำได้ยาก เนื่องจากเซรามิกมีความแข็ง (Hardness) สูง และมีความเปราะ อย่างไรก็ตามเซรามิกสามารถกัดได้โดยใช้กระบวนการกัดด้วยผงขัด (Abrasive machining process)
- สามารถใช้ในการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย รวมถึงชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนโดยการใช้วิธีการกัดหลายๆ แบบและหลายๆ ขั้นตอนตามรายละเอียดชิ้นงาน
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดความคลาดเคลื่อนหรือพิสัยความเผื่อ (Tolerance) น้อยกว่า

0.001 นิ้ว (0.025 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่ากระบวนการผลิตส่วนใหญ่

- มีความสามารถผลิตผิวสำเร็จ (Surface finish) ของชิ้นงานให้มีความเรียบ $16 \mu\text{m}$ (0.4 μm) หรือดีกว่า

ด้วยคุณสมบัติข้างต้น กระบวนการกัดจึงมักนิยมใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบอื่น ๆ มาแล้ว เช่น งานหล่อ (Casting) หรือการขึ้นรูปขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การตีขึ้นรูป (Forging) โดยรูปร่างทั่วไปของชิ้นงานจะถูกผลิตโดยกระบวนการอื่นและใช้กระบวนการกัดในการผลิตชิ้นงานสำเร็จให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้องและมีผิวงานตามที่ต้องการ

2.1.1.1 ประเภทของกระบวนการตัดเฉือน

วิธีการตัดเฉือนมีหลายประเภทซึ่งแต่ละวิธีจะมีขีดความสามารถในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างและลักษณะผิวงานที่เฉพาะตัว ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมาก 3 วิธี ได้แก่ การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัดขึ้นรูป (Milling)

1) การกลึง

ใช้เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียว (Single cutting edge) ในการปอกเนื้อวัสดุจากชิ้นงานที่กำลังหมุนและทำให้เกิดชิ้นรูปทรงกระบอก (Cylindrical shape) ดังรูปที่ 2.1(a) ความเร็วในการกลึงถูกกำหนดโดยความเร็วของการหมุนชิ้นงาน ส่วนการป้อนคือการเคลื่อนที่เข้า ๆ ของมีดตัดในทิศทางขนาดกับแกนหมุน (Axis of rotation) ของชิ้นงาน

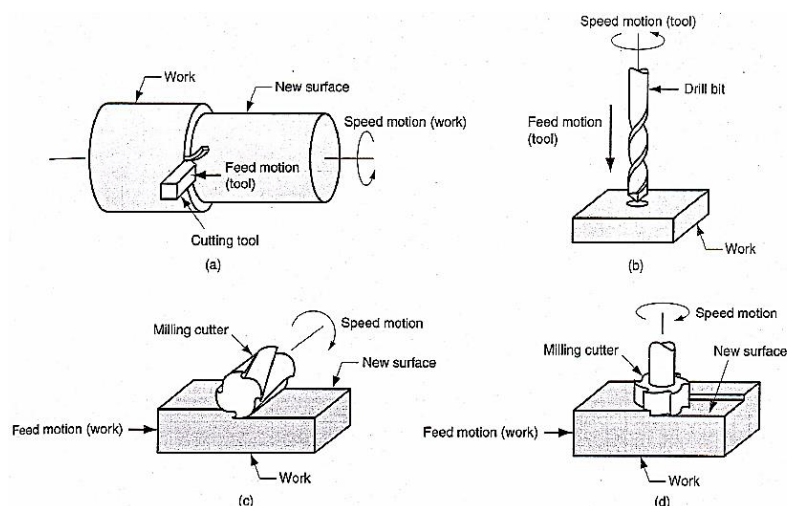
2) การเจาะ

ใช้ในการผลิตรูกลม (Round hole) ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องมือตัดที่มีสองคมตัด (Two cutting edges) เครื่องมือตัดจะเคลื่อนที่ในทิศทางที่ขนานกับแกนการหมุน (Rotation of axis) ของชิ้นงานและเจาะลงไปบนชิ้นงานทำให้เกิดรูกลวง ดังรูปที่ 2.1(b)

3) การกัดขึ้นรูป

จะใช้เครื่องมือตัดที่มีหลายคมตัด (Multiple cutting edges) มีดตัดจะหมุนและเคลื่อนที่เข้า ๆ สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานทำให้เกิดระนาบผิวงานใหม่ ทิศทางการป้อน (Feed direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัด ในขณะที่การหมุนของใบมีดตัดถูกกำหนดด้วยความเร็ว (Speed) การกัดขึ้นรูปมีหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 วิธีได้แก่ การกัดข้างเรียบ (Peripheral milling) และการกัดหน้าเรียบ (Face milling) ดังรูป 2.1(c) และ 2.1(d) ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการไส (Shaping and planing) การแทงขึ้นรูป (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) รวมถึงกระบวนการที่ใช้ผงขัด (Abrasive) ในการกัดวัสดุเช่น การเจียรระโน (Grinding) [17]



รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการตัดเฉือน: (a) การกลึง, (b) การเจาะ, (c) การกัดข้างเรียบ และ (d) การกัดหน้าเรียบ [17]

2.1.2 กระบวนการกลึง (Turning Process)

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการสร้างผิวหน้าใหม่ด้วยการกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากพื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอก (Cylindrical shape) ที่กำลังหมุนอยู่โดยใช้เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดี่ยว (Single cutting edge) เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน ส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานลดลง โดยกระบวนการกลึงเป็นกระบวนการตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous cut) ด้วยเหตุนี้ชนิดของงานกลึงจึงแบ่งออกตามลักษณะรูปร่างและการขึ้นรูปของงานกลึง ส่วนใหญ่ก็จะแบ่งออกเป็นการกลึงภายนอกและการกลึงภายใน แต่สามารถแบ่งย่อยออกได้ดังนี้

1) การกลึงปาดหน้า

การกลึงปาดหน้า เป็นลักษณะการกลึงปาดผิวหน้าตัดของชิ้นงานออก ชิ้นงานจะหมุน ส่วนมีดกลึงจะเคลื่อนที่เข้าออกในแนว Y (ด้านตั้งฉากกับแกนหมุน) เพื่อปาดผิวหน้า และเคลื่อนซ้าย-ขวาในแนวแกน Z (แนวเดียวกับแกนหมุน) เพื่อควบคุมความยาวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงปาดหน้า จะมีขนาดสั้นลง

2) การกลึงปอกนอก

การกลึงปอกภายนอกเป็นการกลึงเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกให้มีขนาดลดลง มีดกลึงจะเคลื่อนที่เข้าออกตามแนวแกน Z จะเป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน X จะเป็นความยาวหรือระยะที่ต้องการกลึงปอกออกไป

3) การกลึงปอกใน/กลึงคว้าน

การกลึงปอกในคล้ายกับการกลึงปอกภายนอก แต่จะต่างกันตรงที่เป็นการกลึงปอกภายในหรือการกลึงคว้านรู ขนาดของรูจะมีขนาดโตขึ้นหลังจากการกลึง

4) การกลึงเรียว

การกลึงเรียวเป็นการกลึงปอกชนิดหนึ่ง มีทั้งการกลึงเรียวภายนอกและการกลึงเรียวภายใน จะไม่ค่อยเจอมากนัก การกลึงเรียวเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดเริ่มต้นกับจุดสิ้นสุดจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับอัตราเรียวหรือขนาดที่กำหนดแต่ละตำแหน่ง

5) การกลึงเกลียว

การกลึงเกลียว เป็นกระบวนการขึ้นรูปเกลียวอย่างหนึ่งนอกจากกระบวนการต๊าป (Tap) สำหรับการทำเกลียวใน และกระบวนการตาย (Die) สำหรับการทำเกลียวนอก ซึ่งอาจจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป ลักษณะของการเคลื่อนที่ของมีดกลึงในงานกลึงกลึงคล้ายกับการกลึงปอกซึ่งจะมีทั้งการกลึงเกลียวภายนอกและการกลึงเกลียวภายใน แต่จะต่างกันตรงที่การเคลื่อนที่ของการกลึงปอกจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะเรียบ ส่วนการเคลื่อนที่ของการกลึงเกลียวเป็นการเคลื่อนที่ตามระยะ pitch ของเกลียวตามที่เรากำหนด ถ้าเป็นเครื่องกลึงแบบธรรมดาจำเป็นต้องมีชุดเฟืองสำหรับการกลึงเกลียวจึงจะสามารถกลึงเกลียวได้ ส่วนถ้าเป็นเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ (CNC machine) จะเป็นการเคลื่อนที่ตามโปรแกรมสามารถปรับขนาดของเกลียวได้ตามอิสระหลากหลายกว่า

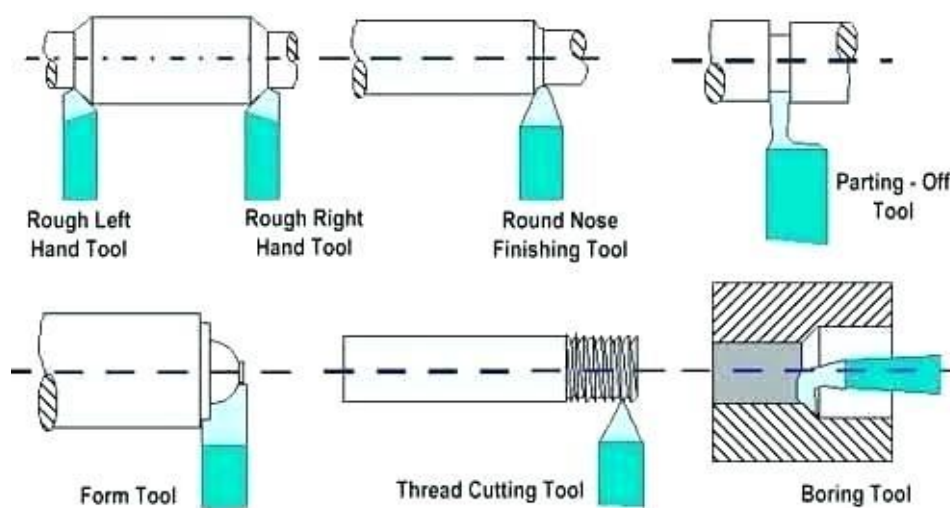
6) การกลึงตกร่อง

การกลึงตกร่องเป็นลักษณะของการกลึงปอกและกลึงปาดหน้าผสมผสานกันขึ้นอยู่กับขนาดของร่องและความเรียบผิวที่ต้องการในแต่ละด้าน บางครั้งจำเป็นต้องใช้มีดกลึงตกร่องชนิดพิเศษ

7) การกลึงตัด

การกลึงตัด เป็นการกลึงตัดให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน ในการกลึงจำเป็นต้องมีกระบวนการตัดเข้ามาเพื่อลดเวลาในการผลิตชิ้นงาน โดยเฉพาะการผลิตแบบจำนวนมาก.การกลึงตัด

ต้องใช้มีดที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเนื่องจากว่าขณะที่ตัดชิ้นงานจะเกิดแรงเสียดทานค่อนข้างสูง ตามขนาดของชิ้นงาน ยิ่งหน้าสัมผัสเยอะก็จะต้องรับโหลดสูง [17]



รูปที่ 2.2 ชนิดของการกลึง [18]

2.1.2.1 เงื่อนไขการตัด (Cutting conditions) [8]

กระบวนการตัดเฉือนในปัจจุบัน อาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative movement) ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ประกอบด้วยการเคลื่อนที่แบบปฐมภูมิ เรียกว่า ความเร็วการตัด (Cutting speed, v) และการเคลื่อนที่แบบหุติยภูมิ เรียกว่า การป้อน (Feed, f) และขนาดการตัด เรียกว่า ความลึกในการตัด (Depth of cut, d) ทั้งสามองค์ประกอบนี้ถูกเรียกว่า เงื่อนไขการตัดหรือภาวะการตัด (Cutting Conditions) ในกระบวนการตัดแต่ละวิธีจะมีการกำหนดภาวะการตัดแตกต่างกัน

ความเร็วตัด (Cutting Speed) หมายถึง ความเร็วที่คมมีดตัด (Cutting edge) ตัดหรือปาดผิวโลหะออกเมื่อชิ้นงานหมุนไปครบ 1 รอบ ซึ่งมีดตัดจะต้องปาดผิวโลหะออกเป็นเส้นยาวเท่ากับเส้นรอบวงของชิ้นงานพอดี หน่วยวัดความเร็วตัดคิดเป็นเมตรต่อนาที ความเร็วตัดสามารถกำหนดได้จากการคำนวณหรือตารางความเร็วตัดของวัสดุที่ต้องการขึ้นรูป

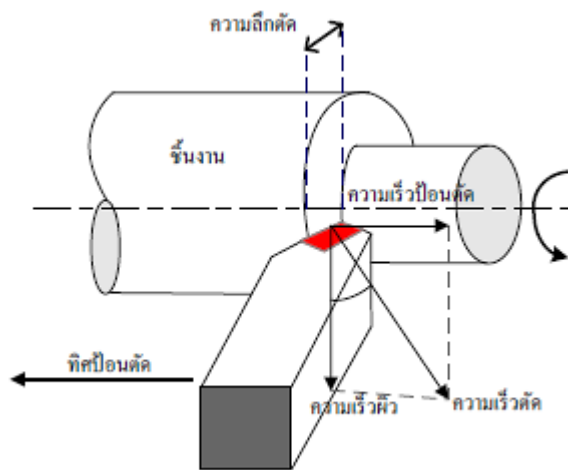
สูตร การคำนวณหาค่าความเร็วตัด (V_c) ได้จากสมการ (2.1)

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1,000} \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนดให้

$$V_c = \text{ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที: m/min)}$$

D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร: mm)
n	=	ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบต่อนาที: rpm)
π	=	3.1416
1,000	=	ตัวเลขคงที่สำหรับเปลี่ยนหน่วยมิลลิเมตร (mm) เป็นเมตร (m)



รูปที่ 2.3 ความเร็วตัดในการกลึง

ข้อจำกัดในการเลือกความเร็วตัด ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วตัดในกระบวนการตัดสามารถพิจารณาได้จาก

- 1) ความถูกต้องของรูปร่างและข้อกำหนดของชิ้นงาน เช่น ความเรียบผิวชิ้นงานที่ต้องการ
- 2) อุณหภูมิขณะตัดซึ่งส่งผลต่อการเสียรูปของชิ้นงานและมิตัด รวมทั้งแรงตัดที่เกิดขึ้น
ในขณะตัด
- 3) ความแข็งแรงของเครื่องจักรและความเสถียรในการตัด ซึ่งขึ้นอยู่กับความลึกในการตัดและความเร็วตัด
- 4) เศษโลหะที่ต้องการให้เกิดขึ้นในขณะตัด เช่น เศษโลหะแบบแตกหัก
- 5) ชนิดของวัสดุที่ตัดและอายุมีดตัด พบว่าความเร็วตัดที่เหมาะสมจะให้ค่าคงที่ C และ n สูงขึ้นในสมการอายุมีดตัดของเทย์เลอร์ ส่งผลให้อายุมีดตัดมาอายุที่ยาวนานขึ้นด้วย

ความเร็วรอบเพลาสปินเดิล (Spindle speed) หมายถึงจำนวนรอบที่ชิ้นงานหมุนต่อหนึ่งนาที มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (r/min หรือ rpm) ความเร็วตัดมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบในกระบวนการกลึงชิ้นงานทรงกระบอกที่กำลังหมุน ดังสมการ (2.1) ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

สูตร การคำนวณหาค่าความเร็วรอบ (n) ได้จากสมการที่ (2.2)

$$n = \frac{V_c}{1,000 \times \pi \times D} \quad (2.2)$$

อัตราป้อน (Feed rate) หมายถึง ความเร็วของการเดินของเครื่องมือตัด ไปตามความยาวของชิ้นงานในแต่ละรอบของการหมุนเพลลาหัวจับชิ้นงานในกระบวนการกลึง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/r)

อัตราป้อนต่อรอบ (Feed Rate per Revolution) ส่วนใหญ่จะใช้กับงานกลึงซีเอ็นซี โดยที่อัตราป้อนต่อรอบนั้นคือ ระยะทางที่เครื่องมือตัดเคลื่อนที่ไปในขณะที่ชิ้นงานหมุน 1 รอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/รอบ

สูตร การหาอัตราป้อนต่อรอบ ได้จากสมการ (2.3)

$$f_n = \frac{L}{n} \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้

f_n = อัตราป้อนต่อรอบ (มิลลิเมตรต่อรอบ: mm/r)

L = ระยะทางของเครื่องมือตัดที่เคลื่อนที่ (มิลลิเมตร: mm)

ความเร็วป้อน (Feed speed) หมายถึงความเร็วการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด ในกระบวนการกลึง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.4)

$$V_f = f_n \times n \quad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้

V_f = ความเร็วการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อนาที: mm/min)

เวลาในการตัด (Cutting time) หมายถึงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่เครื่องมือตัด จากตำแหน่งจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายของการตัด สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$T_m = \frac{L}{V_f} \quad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้

T_m = เวลาในการตัด (นาที: min)

โดยทั่วไปในวิธีการกัดด้วยมีดตัดคมเดียว สามารถคำนวณอัตราการกำจัดวัสดุ (Material removal rate) ได้จากสมการ (2.6)

$$MRR = V_c \times f_n \times d \quad (2.6)$$

เมื่อกำหนดให้

MRR = อัตราการกำจัดวัสดุ (มิลลิเมตร³ต่อนาที: mm³/min)

d = ความลึกของการตัด (มิลลิเมตร: mm)

2.1.3 คุณสมบัติของเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัด (Cutting tool) เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน เพื่อช่วยให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานมีคุณภาพที่ดี จึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเครื่องมือตัด ดังนี้

1) ความแข็ง (hardness) และความแข็งแรง (strength) ของเครื่องมือตัดต้องยังรักษาระดับความแข็งและความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง หรือที่เรียกว่าความแข็งร้อน (Hot hardness)

2) ความเหนียว เครื่องมือตัดที่มีความเหนียวจะต้านการเปลี่ยนรูป การแตกหักเสียหาย ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในกระบวนการตัดวัสดุที่มีความไม่ต่อเนื่องอยู่ในเนื้อวัสดุมาก เช่น วัสดุในกลุ่มเหล็กหล่อและอลูมิเนียม

3) ความต้านทานการสึกหรอ เครื่องมือตัดที่ดีต้องมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง นั่นหมายถึงอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดจึงต้องมีคุณสมบัติที่แข็งและเหนียว เพื่อรักษาความแข็งแรงแต่ยังคงความยืดหยุ่นเพื่อต้านทานการเสียรูปของเครื่องมือตัด ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้ และชิ้นงานที่ต้องการตัดเพื่อให้ได้ผิวสำเร็จตามที่ต้องการ [19]

2.1.3.1 วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด [8]

โดยทั่วไปมีดตัดที่ใช้กันนิยมทำมาจากวัสดุบางประเภท คาร์ไบด์ เซรามิก เพชร หรือซีบีเอ็น (Cubic Boron Nitride: CBN) ซึ่งจะถูกจัดยึดบนด้านมีดตัด ซึ่งปัจจุบันวัสดุมีดตัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) คาร์ไบด์ (Cemented or sintered carbide) มีค่าความแข็งที่สูงมากทำให้ทนต่อการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงได้ดี สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆคือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์

1.1) ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) จะขึ้นรูปด้วยวิธีการทางผงโลหะวิทยา โดยมีการผสมโคบอลต์เป็นตัวเชื่อมประสานผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ทำให้รับแรงกระแทกได้ดีขึ้นแต่ต่ำกว่าโคบอลต์หล่อเจือ โดยมีค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอลดลง แต่ยังสูงกว่าโคบอลต์หล่อเจือ หรือบางครั้งเรียกทั้งสแตนคาร์ไบด์นี้ว่า ซีเมนต์คาร์ไบด์หรือซินเตอร์คาร์ไบด์ ดังนั้น เมื่อต้องการเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ ทำได้ด้วยการเติมไทเทเนียมคาร์ไบด์และแทนทาลัมคาร์ไบด์ร่วมกับโคบอลต์ ซึ่งทั้งสแตนคาร์ไบด์นิยมใช้ตัดวัสดุประเภท อะลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง และวัสดุจำพวกโลหะนอกกลุ่มเหล็ก

1.2) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ คือการเติมไทเทเนียมคาร์ไบด์และแทนทาลัมคาร์ไบด์แทนที่ทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดนมิกกิลและโมลิบดีนัมเจือเป็นตัวเชื่อมประสาน เพื่อเพิ่มความต้านทาน

การสึกหรอที่สูงกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์ แต่ความแข็งแรงอาจจะต่ำกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์ เนื่องจากมีส่วนผสมของโคบอลต์ที่น้อยกว่า ซึ่งเหมาะกับการตัดเหล็กกล้าและสามารถลดการสึกหรอจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนในทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้ ทำให้ไทเทเนียมคาร์ไบด์เหมาะสำหรับการตัดเหล็กกล้า เหล็กหล่อ และสามารถใช้ความเร็วตัดที่สูงกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์

จากข้างต้น เมื่อเติมโคบอลต์ลงในวัสดุมีดตัด สามารถเรียงลำดับความแข็งแรงจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ เหล็กกล้ารอบสูง โคบอลต์หล่อเจือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ตามลำดับ

2) มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated carbide tools) การเคลือบผิวบนมีดตัดคาร์ไบด์เพื่อลดการสึกหรอของมีดตัดทำให้กระบวนการตัดสามารถใช้ความเร็วตัดที่สูงได้ ช่วยเพิ่มอัตราการผลิตและลดต้นทุนในการผลิต การเคลือบผิวบนมีดตัดคาร์ไบด์ยังช่วยยืดอายุมีดตัดให้นานขึ้น เนื่องจากสารเคลือบสามารถทนความร้อนได้สูงและทนการสึกหรอ สารที่ใช้เคลือบผิวบนมีดตัดคาร์ไบด์จะมีความหนาประมาณ 5-10 ไมโครเมตร สารเคลือบผิวที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่

2.1) ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นสารเคลือบที่ช่วยลดแรงเสียดทาน ทนความร้อนสูง ช่วยเพิ่มความแข็งแรงร้อน (Hot hardness) ทำให้สามารถใช้ความเร็วตัดที่สูงและอัตราการป้อนตัดที่สูง ดังนั้น จึงนิยมใช้มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบไทเทเนียมไนไตรด์กับกระบวนการตัดที่ต้องการความเร็วสูงมากกว่า

2.2) อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารเคลือบผิวที่สามารถทนอุณหภูมิการตัดได้สูง มีความเสถียรสูงต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี การนำความร้อนต่ำ ทนต่อการสึกหรอบนผิวหลบและผิวคายเศษวัสดุ

2.3) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เป็นสารเคลือบอยู่บนมีดตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ สามารถต้านทานการสึกหรอบนผิวหลบได้สูง



รูปที่ 2.4 มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว [20]

มีดตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีการใช้อยู่จะมีการเคลือบผิวสองหรือสามชั้น จะใช้ในการตัดเหล็กหล่อหรือเหล็กกล้าได้ดี ชั้นแรกจะเคลือบด้วยไทเทเนียมคาร์ไบด์ ตามด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์

และหลังจากนั้นจึงเคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ โดยทั่วไปชิ้นนอกสุดควรจะมี ความต้านทานการสึกหรอสูงและนำความร้อนต่ำ และชั้นในสุดควรจะมีคุณสมบัติจับยึดมีดตัดคาร์ไบด์ได้ดี ซึ่งก็คือไทเทเนียมคาร์ไบด์นั่นเอง

3) มีดตัดเซรามิก (Ceramics) มีดตัดเซรามิกมีมานานแล้ว โดยทำจากอะลูมินัมออกไซด์ มีเกรนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร) จึงนิยมใช้ในงานตัดละเอียดที่ต้องการความเรียบผิวชิ้นงานสูง มีดตัดเซรามิกมีความแข็งที่สูงกว่ามีดตัดคาร์ไบด์ และมีความต้านทานการสึกหรอที่สูง โดยมีค่าความแข็งร้อนที่สูง ทำให้ตัดงานที่ความเร็วตัดที่สูงกว่ามีดตัดคาร์ไบด์ได้มาก มีความเสถียรสูงต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี โอกาสเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่มีการพอกตัวของเศษโลหะต่ำ เนื่องจากเซรามิกมีความต้านทานการเคลื่อนที่เศษโลหะต่ำ ทนต่อการเสียดสีสูง ทำให้ความเรียบผิวชิ้นงานสูง แต่มีดตัดเซรามิกจะมีคุณสมบัติทนแรงกระแทกได้ไม่ดีจึงถูกออกแบบให้มุมคายเศษวัสดุน้อย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับคมตัดในการรับแรงตัด เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงต่ำจึงมีโอกาสเกิดการแตกหักได้สูง ดังนั้น ในการช้มีดตัดเซรามิกจึงนิยมใช้กับกระบวนการตัดที่เป็นแบบต่อเนื่อง เช่น กระบวนการกลึง และไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้นบ่อยหรือแรงตัดสลับไปมาเหมือนกระบวนการกัด

มีดตัดเซรามิกแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามกระบวนการผลิต คือ

3.1) มีดตัดเซรามิกอัดเย็น (Cold-pressed ceramic) บางครั้งเรียกว่าเซรามิกขาว (White ceramics) นิยมใช้สำหรับการตัดเหล็กที่มีความแข็งน้อยกว่า 235 ของหน่วยความแข็งบริเนลล์ (Brinell hardness: BHN) และเหล็กที่มีความแข็งน้อยกว่า 34 ร็อกเวลล์

3.2) มีดตัดเซรามิกอัดร้อน (Hot-pressed ceramic) บางครั้งเรียกว่า เซรามิกดำ (Black ceramics) หรือเซอร์เมท (Cermets) นิยมใช้สำหรับการตัดเหล็กที่มีความแข็งมากกว่า 235 ของหน่วยความแข็งบริเนลล์ และเหล็กที่มีความแข็งระหว่าง 34-66 ร็อกเวลล์ ชี

4) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride: CBN) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ หรือที่เรียกว่า ซีบีเอ็น เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง มีความต้านทานความร้อนและการสึกหรอสูง มีดทรงสร้างเช่นเดียวกับเพชร แต่มีคุณสมบัติและความสามารถในการตัดโลหะจำพวกเหล็กได้ดีกว่า โดยอัตราการสึกหรอต่ำ และมีความเสถียรต่อปฏิกิริยาเคมีดีกว่าเมื่อเทียบกับเพชร

มีดตัดซีบีเอ็นโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ มีดตัดซีบีเอ็นเคลือบผิวบนคาร์ไบด์ (Polycrystalline cubic boron nitride) หรือเป็นมีดตัดซีบีเอ็นอย่างเดียวซึ่งจะมีขนาดเล็กโดยไม่มีคาร์ไบด์เป็นแกนกลางเหมือนกันมีดตัดซีบีเอ็นเคลือบผิวคาร์ไบด์ ซึ่งทั้งสองแบบจะมีความสามารถต้านทานแรงกระแทกต่างกัน มีดตัดซีบีเอ็นเคลือบผิวคาร์ไบด์จะให้ค่าความต้านทานการแตกหักหรือรับแรงกระแทกได้ดีกว่ามีดตัดซีบีเอ็นอย่างเดียว ดังนั้นในการใช้มีดตัดซีบีเอ็นจำเป็นต้องระวังการแตกหัก

ของคมตัด เนื่องจากการสั่นสะเทือนในขณะตัด เครื่องจักรที่ใช้ในการตัดควรมีค่าความแข็งแรงที่สูง กระบวนการตัดเป็นแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการกลึง และเป็นการตัดที่ไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้นตลอดเวลา เหมือนกระบวนการกัด มีดตัดซีบีเอ็นนิยมใช้ตัดเหล็กที่มีความแข็งสูงและโลหะผสมที่มีอุณหภูมิในการตัดสูง

5) มีดตัดเพชร (Diamond) เป็นวัสดุที่ใช้ขอบเกรนเดียวเป็นคมตัดที่มีรัศมีคมตัดเล็กมาก ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความเสียดทานต่ำ มีความต้านทานอุณหภูมิสูง ทำให้คมตัดสึกหรอยากจึงสามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงได้ แต่มีความแข็งแรงต่ำ รับแรงกระแทกได้ไม่ดี แดกหักง่าย มีดตัดเพชรใช้ตัดงานที่ต้องการความละเอียดและความเรียบผิวชิ้นงานสูง เหมาะสำหรับตัดพวกอลูมิเนียมและวัสดุที่มีความแข็งสูง แต่มีดตัดเพชรถูกออกแบบให้มีมุมคายเศษวัสดุขนาดเล็ก เพื่อลดการแตกหักของคมตัด เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงกระแทกต่ำ จึงเหมาะกับการตัดที่ใช้ความลึกในการตัดต่ำ เกิดแรงตึงน้อย ๆ หรือการตัดละเอียด (Finish cut) อัตราการป้อนตัดช้า และแรงตัดต่อเนื่อง เช่น กระบวนการกลึง มีดตัดเพชรไม่นิยมนำไปตัดโลหะจำพวกเหล็ก เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเหล็กกับคาร์บอนในมีดตัดเพชร ทำให้เกิดการสึกหรอได้ง่ายในขณะตัด แต่กรณีจำเป็นจะต้องตัดชิ้นงานจำพวกเหล็กควรใช้มีดตัดซีบีเอ็น

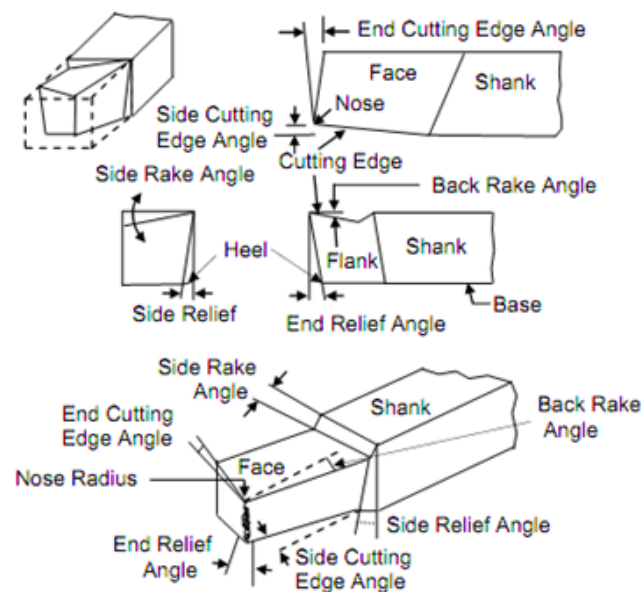
นอกจากนี้ มีดตัดเพชรยังไม่นิยมนำมาตัดไทเทเนียม นิกเกิล และโคบอลต์เจือ เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย ทำให้มีดตัดสึกหรอเร็ว มีดตัดเพชรยังออกแบบเหมือนกับมีดตัดซีบีเอ็น คือมีดตัดเพชรเคลือบผิวบนคาร์ไบด์ (Poly crystalline-diamond tool) โดยมีความหนาของเพชรประมาณ 500 ไมโครเมตร คล้ายกับมีดตัดซีบีเอ็นเคลือบผิวบนคาร์ไบด์ ซึ่งมีดตัดเคลือบผิวบนคาร์ไบด์นี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีความสามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่ามีดตัดเพชรชนิดเกรนเดียว เนื่องจากมีคาร์ไบด์เป็นแกนกลาง อย่างไรก็ตาม มีดตัดเพชรหรือเพชรยังนิยมนำมาใช้ในกระบวนการขัดสีและเจียรไนอีกด้วย โดยเฉพาะมีดตัดเพชรชนิดเกรนเดียวที่มีรัศมีคมตัดเล็กสามารถตัดงานละเอียดได้ดีและให้ความเรียบผิวชิ้นงานสูงมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการยากที่จะหาวัสดุที่มีคุณสมบัติครบทุกประการมาทำมีดตัดให้สามารถตัดชิ้นงานได้ทุกประเภท ตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีความแข็งสูง มักจะหยาบ ไม่เหมาะกับการตัดที่มีแรงกระแทกสูงและแรงตัดไม่ต่อเนื่อง และอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีกับชิ้นงานได้อีก สำหรับวัสดุที่มีความต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง แต่จำเป็นจะต้องมีส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ ทำให้มีราคาแพงขึ้นเป็นต้น

2.1.3.2 เรขาคณิตของมีดตัด (Tool geometry) [8, 19]

รูปทรงทางเรขาคณิตของเครื่องมือตัดถือได้ว่ามีความสำคัญมากในกระบวนการตัดวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการเกิดเศษตัด หรือลักษณะรูปทรงของเศษโลหะ (Chip formation) ที่เกิดขึ้นที่คมตัด โดยเฉพาะมุมต่าง ๆ ที่อยู่ด้านหน้าของมีดตัด นอกจากนี้ยังมี มุมหลบ (Relief angle) ที่อยู่ด้านหลังของเครื่องมือตัดในตำแหน่งที่ใกล้กับผิวชิ้นงานที่ต้องทำมุมเล็กน้อยกับผิวชิ้นงานเพื่อป้องกันการขัดสีของเครื่องมือตัดกับผิวงานตัด

มีดตัดต้องมีรูปทรงที่เหมาะสมต่อกระบวนการตัด ซึ่งมีดตัดสามารถถูกแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ มีดตัดคมตัดเดี่ยวและมีดตัดหลายคมตัด โดยมีดตัดคมตัดเดียวนั้นจะใช้ในกระบวนการกลึง (Turning) การคว้าน (Boring) การไสยาว (Planing) และการไส (Shaping) ในขณะที่มีดตัดหลายคมตัดส่วนมากจะใช้กับการตัดที่มีการหมุน เช่น การเจาะ (Drilling) การคว้านละเอียด (Reaming) การกัด (Milling) การแทงขึ้นรูป (Piercing) และการเลื่อย (Sawing)



รูปที่ 2.5 เรขาคณิตของมีดตัดคมตัดเดี่ยว [21]

มีดตัดคมตัดเดี่ยว (Single-Point Cutting Tools) ถือเป็นพื้นฐานของกระบวนการตัดเฉือนวัสดุทั่วไป เครื่องมือในการตัดจะใช้หลักการตัดเฉือนวัสดุออกมาในรูปของเศษตัด หรือ chips เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและรูปทรงตามต้องการ ซึ่งรูปทรงเรขาคณิตของมีดตัดคมตัดเดี่ยวจะมีการกำหนดสัญลักษณ์ 7 ส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ มุมคายเศษวัสดุหลัง (Back Rake Angle: α_b) มุมคายเศษวัสดุข้าง (Side Rake Angle: α_s) มุมหลบปลาย (End Relief Angle: ERA) มุมหลบข้าง (Side

Relief Angle: SRA) มุมข้างคมตัด (Side Cutting Edge Angle: SCEA) มุมปลายคมตัด (End Cutting Edge Angle: ECEA) และรัศมีจมูกมีดตัด (Tool Nose Radius: TNR) ซึ่งมีอิทธิพลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

มุมคายเศษวัสดุ (Rake Angle)

มุมคายถือเป็นเรขาคณิตพื้นฐานของเครื่องมือตัดโดยเป็นมุมที่อยู่ด้านหน้าของเครื่องมือตัด โดยมุมนี้จะเป็นมุมที่วัดจากผิวหน้าของเครื่องมือตัดไปยังแนวแกนที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน มุมคายสามารถแบ่งออกเป็น มุม 0 องศา มุมที่เป็นลบ และมุมที่เป็นบวก ซึ่งการปรับตั้งอาจอยู่ที่ตัวมีดตัดเอง หรือการปรับมุมของชุดยึดจับเครื่องมือตัด

มุมคายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 มุม ซึ่งอยู่ในแนวที่ได้ฉากกัน คือ มุมคายเศษวัสดุหลัง (Back Rake Angle: α_b) มุมคายเศษวัสดุข้าง (Side Rake Angle: α_s) ในกระบวนการกลึงโดยทั่วไป มุมคายเศษวัสดุข้าง ถือว่ามีความสำคัญมากในกระบวนการตัด เนื่องจากว่ามุมคายเศษวัสดุข้างนี้จะวางตัวอยู่ในแนวทิศทางการตัด หรือตามแนวทิศของการป้อนมีดตัด

มุมคายมีปัจจัยสำคัญอยู่ 2 ประการสำหรับกระบวนการตัดโลหะ ประการแรกคือมุมคายจะมีผลต่อความแข็งแรงของเครื่องมือตัด มุมคายที่มีค่าเป็นลบจะสามารถรองรับแรงในการตัดได้มากกว่า มุมคายที่เป็นบวก แรงในการตัดและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดจะถูกดูดซับด้วยขนาดของตัวมีดตัดที่หนาและใหญ่เมื่อใช้มุมคายที่เป็นลบ โดยปกติแล้วความแข็งแรงในการทนต่อแรงอัดของมีดตัด carbide จะมีค่าประมาณ 2.5 เท่าของความแข็งแรงที่ด้านทานการพังของวัสดุ ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือแรงดันที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัด (Cutting pressure) โดยมีดตัดที่มีมุมเป็นบวกช่วยลดแรงในการตัดลงได้โดยเศษตัดจะสามารถไหลตัวผ่านหน้ามีดออกไปได้ดีกว่ามุมคายที่เป็นลบ

มุมคายเศษวัสดุเป็นลบ (Negative Rake Angle)

ในกรณีของมุมคายที่เป็นลบนั้น จะนิยมใช้เมื่อต้องการตัดชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมาก อันเนื่องมาจากเรขาคณิตของตัวมีดเองที่สามารถทนต่อแรงในการตัดมาก ๆ ได้ โดยเฉพาะในกระบวนการตัดแบบหยาบ ที่ต้องการตัดเอาเนื้อวัสดุออกในปริมาณที่มาก ๆ ในระยะเวลาอันสั้น รวมไปถึงการใช้ในการตัดวัสดุที่มีความไม่ต่อเนื่องของเนื้อมาก อย่างเช่นเหล็กหล่อ นอกจากนี้ เครื่องมือตัดที่มีมุมคายเป็นลบนั้นไม่จำเป็นต้องมีตัวหักเศษโลหะ (Chip breaker) อย่างเช่น ในมีดตัดที่มีมุมคายเป็นบวก แม้ว่าการใช้เครื่องมือตัดที่มีมุมเป็นลบนั้น จะให้อายุการใช้งานของมีดที่นานมากกว่าแบบมุมที่เป็นบวก หากแต่มีดตัดที่มีมุมเป็นลบนั้นก็มีข้อเสียคือต้องการกำลังของเครื่องตัดที่สูงและเครื่องต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรองรับแรงในการตัดที่มากได้ นอกจากนี้คุณภาพผิวงานตัดที่ได้ยังถือว่าแย่กว่าการใช้มุมที่เป็นบวก การใช้มุมคายที่เป็นลบจะทำให้เศษที่เกิดขึ้นจากการตัดถูกอัดตัว

และเกิดความร้อนในระหว่างการตัดที่มาก ซึ่งสามารถแพร่เข้าไปยังชิ้นงานและตัวมีดตัดเองทำให้เกิดการเชื่อมติดของเศษตัดในระหว่างการตัดมาก

มุมคายเศษวัสดุเป็นบวก (Positive Rake Angle)

สำหรับมีดตัดที่มีมุมคายเป็นบวกมักจะเลือกใช้เมื่อมีดตัดแบบมุมคายเป็นลบไม่สามารถนำมาใช้ให้ได้งานตัดที่มีคุณภาพได้ ในกระบวนการตัดบางงานที่ใช้มุมคายเป็นบวกอาจให้ประสิทธิภาพการตัดที่ดีเมื่อใช้ในการตัดวัสดุผสมที่มีแนวโน้มที่จะเกิด work hardening อย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม และเมื่อใช้ในการตัดวัสดุที่อ่อนและเหนียว หรือเมื่อใช้ในการตัดชิ้นงานหรือกับโครงสร้างของเครื่องตัดที่ไม่แข็งแรงมาก เนื่องจากการใช้มุมคายที่เป็นบวกมักจะเกิดแรงในการตัดที่น้อยกว่าแบบที่เป็นลบ ข้อยกเว้นอย่างเดียวของการใช้มีดตัดที่มีมุมคายเป็นบวกคือการเกิดแชตเตอร์ (Chatter) หรือการสั่นของมีดตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตัดที่กินเนื้อวัสดุงานน้อย ๆ

มุมหลบปลาย (End Relief Angle: ERA) มุมหลบข้าง (Side Relief Angle: SRA)

มุมหลบ (Relief angles) ที่ด้านข้างของเครื่องมือตัดมีจุดประสงค์เพื่อลดโอกาสในการแตกหักและเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด โดยทั่วไปมุมหลบควรมีขนาดที่มากเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัด อย่างไรก็ตาม หากใช้มุมหลบที่ใหญ่มากเกินไปจะทำให้คมตัดมีโอกาสที่จะแตกร้าวหรือแตกหักได้ง่าย หากมุมที่ใช้มีน้อยเกินไปจะทำให้เครื่องมือตัดเกิดการขัดสีบนผิวชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนสูงบนเครื่องมือตัดซึ่งจะไปลดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดลง

มุมหลบที่มีค่าน้อย ๆ มักจะใช้ในกระบวนการตัดเนื้อวัสดุที่แข็งและมีความแข็งแรงมาก ๆ รวมไปถึงกระบวนการตัดที่มีอัตราการตัดเนื้อวัสดุสูง ๆ หรือมีความไม่ต่อเนื่องของการตัดมาก ๆ การใช้มุมหลบที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นมักใช้สำหรับการตัดวัสดุอ่อนทั่วไป และในกระบวนการตัดเพื่อให้ได้ผิวสุดท้าย อย่างพื้นผิวกึ่งสำเร็จ (Semi-finish) และพื้นผิวสำเร็จ (Finish cutting)

มุมข้างคมตัด (Side Cutting Edge Angle: SCEA) มุมปลายคมตัด (End Cutting Edge Angle: ECEA)

มุมของคมตัดบนมีดตัดคมตัดเดียวจะถูกแบ่งเป็นสองมุมคือมุมข้างคมตัดซึ่งช่วยลดแรงกระแทกขณะมีดตัดเข้าไปตัดชิ้นงาน และมุมปลายคมตัดที่ช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดจากพื้นที่สัมผัสระหว่างปลายมีดตัดกับชิ้นงาน

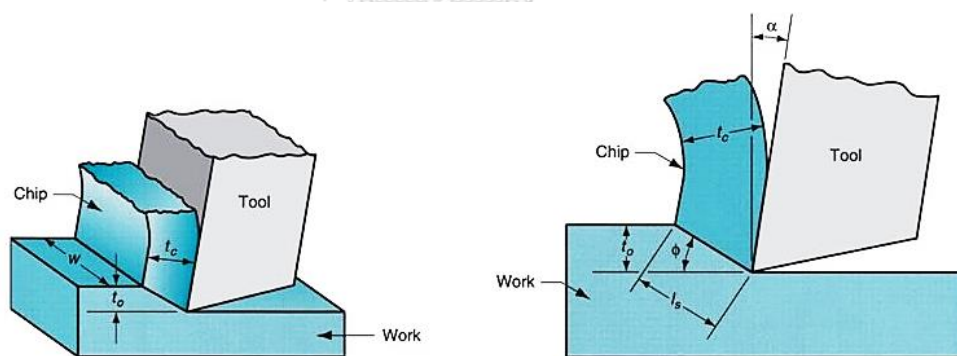
รัศมีจุมุมมิต (Nose Radius)

รัศมีจุมุมมิตถือว่ามีค่าสำคัญในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ โดยมีหน้าที่หลักคือช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ปลายคมตัด ขนาดรัศมีจุมุมมิตที่ใช้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการตัดและสภาวะการตัดที่เลือกใช้ในแต่ละงาน

รัศมีจุมุมมิตที่มากจะทำให้ปลายคมตัดมีความแข็งแรง อย่างไรก็ตามด้วยผลของขนาดรัศมีที่มากทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของมิตตัดและผิวชิ้นงานมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเพิ่มโอกาสการเกิดแซตเตอร์ที่คมตัดได้ง่าย นอกจากนี้แรงที่ใช้ในการตัดก็สูงขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกันนี้

สำหรับกระบวนการตัดที่คมตัดกินเนื้อวัสดุงานน้อย ๆ หรือมีความลึกในการตัดน้อยกว่าหรือเท่ากับรัศมีจุมุมมิต เราคาดคะเนของคมตัดจะมีลักษณะเดียวกับการที่ใช้มุมนำ (Lead angle) ที่เป็นบวกทำให้เกิดเศษตัดที่บาง และการที่ใช้รัศมีจุมุมมิตที่มาก ๆ ยังช่วยให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดสามารถถ่ายเทผ่านออกไปได้เร็วอีกด้วย ผลที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการใช้รัศมีจุมุมมิตขนาดใหญ่คือสามารถใช้อัตราป้อนได้เร็วขึ้น ในกรณีของการตัดแบบพื้นผิวสำเร็จ อัตราป้อนที่ไม่ควรเกินขนาดของรัศมีจุมุมมิตเพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่เรียบ

2.1.4 แบบจำลองกลไกการตัดและการเกิดเศษโลหะ [8]



รูปที่ 2.6 แบบจำลองกลไกการตัดและการเกิดเศษโลหะ [17]

แบบจำลองกลไกการตัด (Orthogonal cutting model) ใช้มีดตัดที่มีรูปร่างเหมือนลิ้ม (Wedge) ในการกัดชิ้นงานโดยมีคมตัด (Cutting edge) อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วการตัด (Cutting speed) เมื่อมีดตัดเฉือนลงไปวัสดุจะเกิดเศษตัด (Chip) ขึ้นตามแนวระนาบที่เรียกว่า ระนาบเฉือน (Shear plane) ซึ่งทำมุมกับผิวหน้าของชิ้นงานเท่ากับ ϕ เรียกมุมนี้ว่า มุมเฉือน (Shear angle) การกัดเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานและทำให้เกิดเศษจากชิ้นงานหลัก ในบริเวณระนาบเฉือนวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ดังรูปที่ 2.6 แสดง

แบบจำลองของกลไกการตัดและการเกิดเศษโลหะที่มีดัดกำลังตัดชิ้นงานที่ความเร็วตัดหนึ่งด้วยความลึกในการตัด (หรืออัตราการป้อนตัด) ซึ่งมีดัดถูกป้อนเข้าตัดเฉือนชิ้นงาน โดยที่หน้าของมีดตัดจะสัมผัสกับชิ้นงาน 2 ด้านคือด้านหน้ามุมคายเศษวัสดุข้างและด้านหน้ามุมหลบข้าง โดยที่หน้ามุมคายเศษวัสดุข้างจะทำหน้าที่ในการคายเศษโลหะให้ไหลไปตามทิศทางของมุมคายเศษวัสดุข้าง และหน้ามุมหลบข้างจะมีหน้าที่ลดพื้นที่สัมผัสหรือป้องกันการสัมผัสของหน้ามุมหลบข้างกับผิวชิ้นงานสำเร็จหลังจากการตัด

ระนาบเฉือนเป็นระนาบที่เกิดจากมุมเฉือนซึ่งมีความสำคัญมาก เนื่องจากกระบวนการตัดหรือกระบวนการเกิดเศษโลหะจะต้องผ่านระนาบนี้ เพื่อให้เนื้อวัสดุเปลี่ยนเป็นเศษโลหะ โดยในกระบวนการตัดจะใช้ความลึกในการตัด (d) เพื่อให้ได้ขนาดมิติของชิ้นงานตามต้องการ จะพบว่า เมื่อเนื้อวัสดุผ่านระนาบเฉือนไปแล้ว ความหนาของเศษโลหะ (t_c) จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจากความหนาของเศษโลหะนี้เอง ทำให้สามารถวิเคราะห์แรงตัดและความเรียบผิวชิ้นงานได้ รวมถึงประมาณขนาดของมุมเฉือนที่เกิดขึ้นในขณะตัดได้ โดยสามารถคำนวณจากอัตราส่วนเศษโลหะดังสมการที่ (2.7)

$$r_c = \frac{d}{t_c} \quad (2.7)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\begin{aligned} r_c &= \text{อัตราส่วนเศษโลหะ} \\ d &= \text{ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร: mm)} \\ t_c &= \text{ความหนาของเศษโลหะ (มิลลิเมตร: mm)} \end{aligned}$$

ในอดีตการวัดแรงตัดและการวัดความเรียบผิวชิ้นงานหรือความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดทำได้ยาก จึงทำให้นักวิจัยและวิศวกรต้องประมาณมุมเฉือน แรงตัด และความเรียบผิวชิ้นงานจากความหนาของเศษโลหะที่เกิดขึ้นเทียบกับความลึกในการตัด ปกติค่าอัตราส่วนเศษโลหะจะมีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากขนาดความหนาของเศษโลหะที่มากกว่าความลึกในการตัด แต่หากค่า r_c ที่น้อยกว่า 1 มาก ๆ เช่น มีค่าประมาณ 0.3-0.4 แสดงว่ามุมเฉือนมีค่าน้อย ระนาบเฉือนกว้างซึ่งเกิดมุมคายเศษโลหะที่ใช้จริงต่ำ ความหนาของเศษโลหะมาก การไหลของเศษโลหะจะไม่ดี ทำให้แรงตัดเกิดขึ้นสูงในขณะตัดจริง โอกาสเกิดการสั่นสะเทือนสูง ส่งผลให้ความเรียบผิวชิ้นงานต่ำหรือความขรุขระผิวชิ้นงานสูง ในทางกลับกัน ถ้าค่า r_c มีค่าน้อยกว่า 1 เพียงเล็กน้อย โดยมีค่าประมาณ 0.7-0.8 จะพบว่ามุมเฉือนมีค่ามาก ระนาบเฉือนแคบ เกิดจากมุมคายเศษวัสดุที่ใช้จริงสูง เศษโลหะจะยาวและเกิดการไหลได้ดี ทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดต่ำ แรงตัดที่เกิดขึ้นก็จะน้อย โอกาสเกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัดต่ำ ทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ดี

จากที่กล่าวข้างต้น มุมคายเศษวัสดุจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากส่งผลต่อมุมเฉือน ระบายเฉือน และทำให้เศษโลหะไหลได้ดี แล้วยังส่งผลต่อความหนาของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะด้วย รวมทั้งการควบคุมการแตกหักของเศษโลหะด้วยมุมคายเศษวัสดุ ดังนั้น อิทธิพลของมุมคายเศษวัสดุต่อการเกิดเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อเรขาคณิตของมีดตัด

มุมระบายเฉือนสามารถคำนวณค่าได้จากการทดลองหรือจากการคำนวณโดยกำหนดให้ ความลึกในการตัดหรือการป้อนตัด (d) และความหนาของเศษโลหะ (t_c) ความยาวของระบายเฉือน (t_s) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$t_s = \frac{d}{\sin \phi} = \frac{t_c}{\cos(\phi - \alpha_s)} \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้

t_c = ความยาวระบายเฉือน (มิลลิเมตร: mm)

d = การป้อนตัดหรือความลึกในการตัดแล้วแต่กรณี (มิลลิเมตร: mm)

ϕ = มุมระบายเฉือน (องศา)

α_s = มุมคายเศษวัสดุ (องศา)

จากสมการที่ (2.8) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{d}{t_c} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha_s)} \quad (2.9)$$

โดยที่

$$\cos(\phi - \alpha_s) = \cos \phi \cos \alpha_s + \sin \phi \sin \alpha_s \quad (2.10)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (2.9) จะได้

$$\tan \phi = \frac{(d/t_c \cos \alpha_s)}{1 - (d/t_c) \sin \alpha_s} \quad (2.11)$$

โดยที่กำหนดให้ d/t_c หมายถึงอัตราส่วนเศษโลหะ (Chip ratio, r_c) ดังสมการที่ (2.7) สามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha_s}{1 - r_c \sin \alpha_s} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.12) พบว่ามุมคายเศษวัสดุเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อมุมระบายเฉือน ถ้ามุมคายเศษวัสดุมีค่ามากขึ้น มุมระบายเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้ความหนาของเศษโลหะมีค่าลดลง โดยที่มุมระบายเฉือนสามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ระบายเฉือนได้ ซึ่งพื้นที่ของระบายเฉือนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_s = \frac{d \times w}{\sin \phi} \quad (2.13)$$

เมื่อกำหนดให้

A_s = พื้นที่ระนาบเฉือน (ตารางมิลลิเมตร: mm^2)

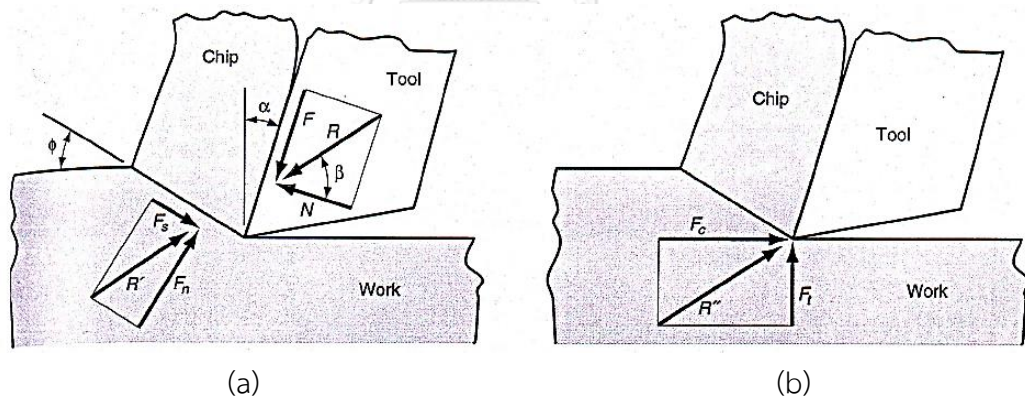
w = ความกว้างของระนาบเฉือน (มิลลิเมตร: mm)

2.1.5 ความสัมพันธ์และสมการของแรงในการตัด [8, 17]

2.1.5.1 แรงในการตัด (Forces in cutting)

เมื่อพิจารณาแรง (Forces) ที่เกิดขึ้นกับเศษตัดในกระบวนการตัดที่อธิบายในรูปสองมิติ (Orthogonal cutting) ในรูปที่ 2.7 (a) สามารถแยกแรงที่เกิดขึ้นกับเศษตัดอันเนื่องมาจากมีดตัดได้ 2 ส่วน ในแนวตั้งฉากกัน ได้แก่

- 1) แรงเสียดทาน (Friction force, F) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างมีดตัดกับเศษตัด เพื่อต้านการไหลของเศษตัด (Flow of the chip) ตามแนวหน้าคายเศษวัสดุ (Rake face) ของมีดตัด
- 2) แรงตั้งฉากกับแรงเสียดทาน (Normal force to friction, N) เป็นแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.7 แรงในการตัด: (a) แรงตัดที่เกิดขึ้นกับเศษตัด, (b) แรงตัดที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัด [17]

แรงทั้งสองนี้สามารถใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, μ ระหว่างมีดตัดและเศษตัด ดังนี้

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.14)$$

แรงเสียดทานและแรงตั้งฉากนี้สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์เพื่อหาแรงลัพธ์ (Resultant force), R ซึ่งทำมุมเบต้า, β ที่เรียกว่ามุมเสียดทาน (Friction angle) มุมนี้สามารถคำนวณได้จากค่า

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คือ

$$\mu = \tan \beta \quad (2.15)$$

นอกเหนือจากแรงที่กระทำต่อเศษตัดแล้ว ยังมีแรงอีกสองส่วนที่กระทำต่อเศษตัด ได้แก่

3) แรงเฉือน (Shear force, F_s) เป็นแรงเฉือนที่เกิดจากการตัด เกิดขึ้นในบริเวณระนาบเฉือน

4) แรงตั้งฉากกับแรงเฉือน (Normal force to shear, F_n) เป็นแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเฉือน

ความเค้นการเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานและเศษตัดตามแนวระนาบเฉือน สามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.16)$$

เมื่อ A_s = พื้นที่ของระนาบเฉือน (Area of the shear plane) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$A_s = \frac{t_0 W}{\sin \phi} \quad (2.17)$$

ค่าความเค้นเฉือนที่คำนวณโดยสมการที่ (2.16) แสดงถึงระดับความเค้นที่ต้องการในกระบวนการกัด โดยหลักการแล้วความเค้นเฉือนนี้มีค่าเท่ากับกำลังวัสดุ (Strength of the work) ที่เกิดขึ้นในขณะตัด เมื่อเขียนเวกเตอร์ที่เกิดจากแรง F_s และ F_n จะได้เวกเตอร์ลัพธ์ R' ซึ่งมีขนาดเท่ากับเวกเตอร์ R แต่มีทิศทางตรงกันข้าม

โดยปกติแรงย่อยทั้งสิ้น ได้แก่ F , N , F_s และ F_n ไม่สามารถวัดได้ในกระบวนการตัดเฉือน แต่มีความเป็นไปได้ในการติดตั้งเครื่องมือวัดขนาดของแรงที่เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับมีดตัด ซึ่งจะทำได้ค่าแรงย่อย 2 แรงที่ดำเนินการทำงานของมีดตัด ได้แก่

5) แรงตัดหลัก (Cutting force, F_c) เป็นแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางการตัด ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับความเร็วตัด

6) แรงรัศมี (Thrust force, F_t) เป็นแรงในแนวของความหนา (t_0) ซึ่งจะมีทิศทางตั้งฉากกับ Cutting force รูปที่ 2.7 (b) แสดง Cutting force และ Thrust force ร่วมกับแรงลัพธ์ R'' แรงย่อยสองแรงนี้สามารถวัดได้โดยไดนาโมมิเตอร์ และสามารถใช้ในการคำนวณแรงย่อยทั้งสิ้นแรงข้างต้นจากสมการ

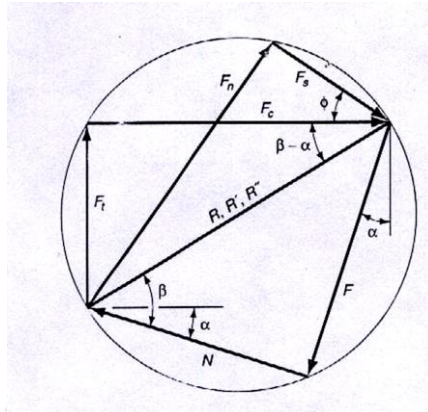
$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (2.18)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2.19)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (2.20)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2.21)$$

จะเห็นว่าในบางกรณีหากมุมคานาเศษวัสดุเป็นศูนย์ ($\alpha = 0$) สมการ (2.18) และ (2.19) จะลดรูปเหลือ $F = F_t$ และ $N = F_c$ ตามลำดับ ดังนั้นในกรณีนี้แรงเสียดทาน (Friction force) และ แรงตั้งฉาก (Normal force) จะสามารถวัดโดยตรงได้จากไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 2.8 รูปหลายเหลี่ยมความสัมพันธ์ของแรง F , N , F_s , F_c , F_t และ F_n [17]

2.1.5.2 สมการแรงในการตัด (Merchant Equation)

สมการสำคัญที่ใช้ในการพิจารณากระบวนการตัดโลหะเรียกว่า “Merchant Equation” ซึ่งพัฒนาโดย Eugene Merchant สมการดังกล่าวตั้งอยู่บนหลักการของ Orthogonal cutting เพียงแต่เพิ่มการพิจารณาในกรณีที่กระบวนการกัดเป็นสามมิติ (Three-dimensional machining operations) สมการดังกล่าวเริ่มจากการพิจารณาค่าแรงเฉือนจากการรวมความสัมพันธ์ในสมการ (2.16), (2.17) และ (2.20)

$$\tau = \frac{F_c \cos \phi - F_t \sin \phi}{(t_0 w / \sin \phi)} \quad (2.22)$$

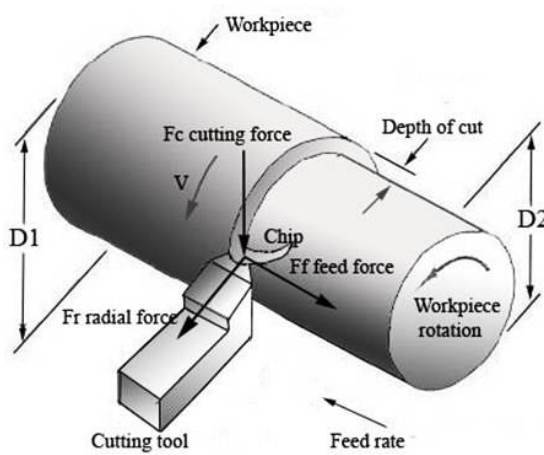
Merchant ให้เหตุผลว่าเมื่อพิจารณามุมต่าง ๆ ของคมมีดตัดที่ทำให้การเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนจะพบว่ามุมเฉือน (ϕ) นั้นมีความสำคัญที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนจะเกิดขึ้นได้เมื่อความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับกำลังของวัสดุ ดังนั้นในกระบวนการกัดความเค้นเฉือนจะมีค่าน้อยกว่ากำลังวัสดุไม่ได้เพราะการตัดจะไม่เกิดขึ้น กล่าวได้ว่าวัสดุแต่ละชนิดจะมีมุมเฉือนที่ใช้พลังงานการตัดน้อยที่สุดเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่ากำลังของวัสดุแตกต่างกัน การคำนวณค่ามุมเฉือนสามารถทำได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของความเค้นเฉือนในสมการ (2.22) เทียบกับมุมเฉือน (ϕ) แล้วกำหนดค่าสมการให้เท่ากับศูนย์ จะได้ค่าประมาณของมุมเฉือนตามสมการของ Merchant ดังนี้

$$\phi = 45 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (2.23)$$

สมมติฐานที่ใช้ในสมการข้างต้นคือค่ากำลังวัสดุจะมีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอัตราความเครียด (Strain rate) อุณหภูมิหรือตัวแปรอื่น ๆ แต่เนื่องจากในกระบวนการตัดเฉือนจริงไม่ได้เป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้จึงเป็นเพียงค่าโดยประมาณ

2.1.6 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด

2.1.6.1 แรงตัดใน 3 มิติ [8]



รูปที่ 2.9 แรงตัดใน 3 มิติ [22]

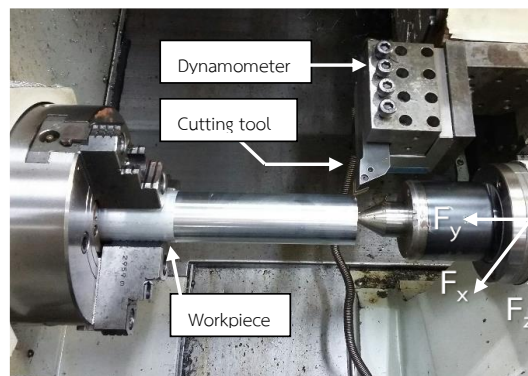
แรงตัด หมายถึง แรงที่กระทำบนคมตัดของมีดตัดในขณะที่เนื้อโลหะเกิดการตัดเฉือน โดยจะเปลี่ยนรูปเป็นเศษโลหะบนระนาบเฉือนและเคลื่อนที่ไหลผ่านหน้ามุมคายเศษวัสดุข้างหรือผิวคายเศษวัสดุออกจากพื้นที่การตัด ซึ่งแรงตัดที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ใน 3 มิติ (ดังรูป 2.9) ในทางทฤษฎีแรงตัดสามารถคำนวณได้จากสมการต่าง ๆ แต่ในทางปฏิบัติการหาแรงตัดใน 3 มิติ สามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดแรงที่เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์หรือเซนเซอร์วัดแรง โดยจะถูกติดตั้งบนป้อมเครื่องมือตัด ในขณะที่กำลังเพื่อวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยแรงป้อนตัด (F_f หรือ F_y) บอกถึงภาระในการป้อนตัดชิ้นงานเพื่อนำมาคำนวณหา กำลังในการป้อนตัดชิ้นงานของเครื่องจักรกล ส่วนแรงรุนหรือแรงรัศมี (F_r หรือ F_x) เป็นแรงที่ชิ้นงานทำกับมีดตัดในแนวรัศมีชิ้นงานซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาระยะการขดเซยกการแอ่นตัวของชิ้นงานในขณะที่ตัด และแรงตัดหลัก (F_m หรือ F_z) อยู่ในทิศทางเดียวกับความเร็วตัด ซึ่งบอกถึงภาระตัดชิ้นงานและกำลังของเครื่องจักรกลที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน

แรงตัดหลักจะเป็นแรงที่มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับแรงป้อนตัดและแรงรัศมี เนื่องจากเกิดในทิศทางของความเร็วตัดซึ่งแรงตัดหลักที่ได้นี้จะถูกนำมาประมาณกำลังในการตัดชิ้นงานที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ตัด เพื่อนำมาหาเครื่องกลึงที่มีกำลังที่เพียงพอต่อกำลังในการตัดสูงสุดที่คำนวณได้จากแรงตัด

หลัก มีเข็มนั้นอาจทำให้เครื่องกลึงเกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัดได้ เนื่องจากกำลังของเครื่องกลึงไม่เพียงพอกับกำลังในการตัดชิ้นงาน

2.1.6.2 การวัดแรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัต

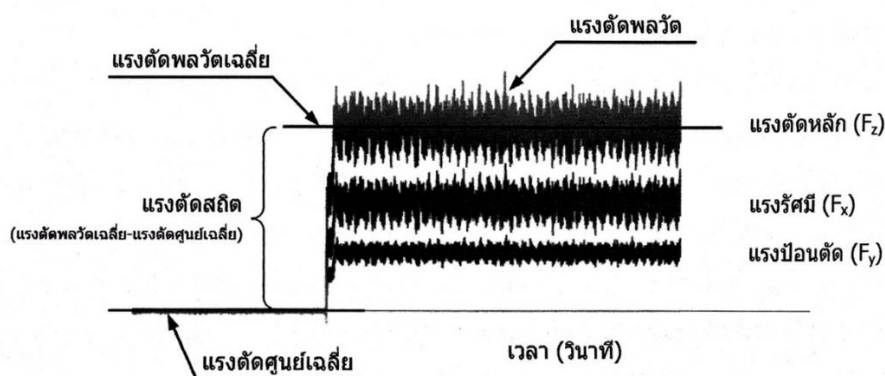
แรงตัดในกระบวนการกลึงสามารถวัดได้โดยไดนาโมมิเตอร์หรือเซนเซอร์วัดแรง โดยการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ไว้กับป้อมมิดและยึดค้ำจับมิดตัดบนไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 2.10 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

ไดนาโมมิเตอร์สามารถวัดแรงตัดในกระบวนการกลึงทั้ง 3 แรงตามแนวแกน X แกน Y และ แกน Z ซึ่งทิศทางของแรงตัดหลัก (F_m) จะอยู่ในทิศของความเร็วดัดแกน Z (F_z) สำหรับแรงป้อนตัด (F_f) จะอยู่ในทิศของการป้อนตัดแกน Y (F_y) ส่วนแรงร่นหรือแรงรัศมี (F_r) จะอยู่ในทิศของความลึกในการตัดหรือรัศมีของชิ้นงานแกน X (F_x) โดยแรงทั้งสามจะถูกเก็บด้วยไดนาโมมิเตอร์ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ดังรูปที่ 2.11 ได้แก่

- 1) แรงตัดศูนย์ คือ แรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง
- 2) แรงตัดพลวัต คือ แรงตัดที่เกิดขึ้นจริงขณะตัด
- 3) แรงตัดสถิต คือ แรงตัดเฉลี่ยที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของแรงตัดทั้ง 3 แกนในรูปของโดเมนเวลา [8]

การเก็บค่าแรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัตนั้นสามารถทำได้โดยกำหนดค่าความถี่สุ่ม (Sampling frequency) ปกติความถี่สุ่มสำหรับเก็บค่าแรงตัดจะขึ้นกับแรงตัดพลวัตที่สนใจ เนื่องจากความถี่ของแรงตัดพลวัตสามารถนำไปวิเคราะห์การแตกหักของโลหะ แซตเตอร์ และความขรุขระผิวชิ้นงานได้

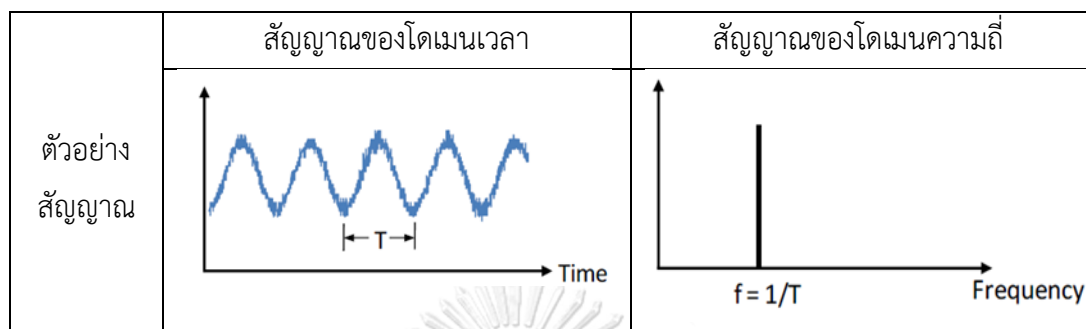
ในการตรวจจับแรงตัดบางครั้ง ตัวกรองสัญญาณต่ำผ่านถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับแรงตัดพลวัต แต่มีค่าสูงกว่าจึงต้องใช้ตัวกรองสัญญาณต่ำผ่าน ช่วยในการกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการออก โดยตัวกรองสัญญาณต่ำผ่าน ควรใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลมากกว่าหรือเท่ากับความถี่ของระบบแรงตัดที่สนใจ ทำให้ความถี่สุ่มที่ใช้ในการเก็บแรงตัดพลวัตจะเป็น 2 เท่าของความถี่ของตัวกรองสัญญาณต่ำผ่าน

2.1.6.3 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว [8, 23]

ในการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตนั้น บางครั้งการพิจารณาที่โดเมนเวลาของแรงตัดอย่างเดียว อาจจะสามารถให้ข้อมูลเพียงพอต่อการวิเคราะห์ได้ แต่ถ้าพิจารณาแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่จะสามารถช่วยวิเคราะห์สาเหตุได้ง่ายขึ้น ซึ่งการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ถูกนำมาใช้ในการแปลงแรงตัดพลวัตจากโดเมนเวลา (Time domain) ให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ (Frequency domain) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงความถี่จากข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาถูกนำมาแปลงเป็นค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum Density: PSD) ของแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เพื่อตรวจจับการแตกหักของโลหะ การเกิดแซตเตอร์ และการพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าข้อมูลความขรุขระผิวนี้อาจเกิดการแกว่งขึ้นลงเป็นรูปแบบซ้ำ ๆ โดยรูปแบบที่แกว่งขึ้นลงจบครบ 1 รอบใช้เวลา เรียกว่าคาบ (T) โดยมีความสัมพันธ์กับความถี่ (F)

คือจำนวนของคาบคลื่นใน 1 วินาที ($F = 1/T$) ข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ในเชิงความถี่ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสัญญาณของโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [23]



2.1.7 ลักษณะของพื้นผิว

ในการกลึงชิ้นงานเพื่อให้ได้รูปร่างที่ต้องการนั้น ลักษณะของพื้นผิว (Surface texture) มีความสำคัญอย่างมาก เพื่อให้ได้มาซึ่งผิวชิ้นงานที่เรียบตามที่ต้องการ จึงต้องมีการกำหนดกรรมวิธีการผลิต (Manufacturing method), ความหยาบของพื้นผิวที่ต้องการ (Required roughness) และลักษณะของพื้นผิวที่ต้องการอื่น ๆ เข้าไป อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการผลิตและเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตด้วย เพื่อเป็นการกำหนดลักษณะพื้นผิวที่จำเป็นต่อการทำงานจริงและเพื่อจำกัดต้นทุนทางด้านการผลิต

ในการผลิตสามารถจำแนกลักษณะความผิดพลาดในการผลิตพื้นผิวได้ 3 แบบคือ

1) ความผิดพลาดด้านขนาดและรูปร่าง เป็นความผิดพลาดที่มีผลต่อการใช้งานโดยรวมของชิ้นงาน ในเรื่องความพอดีในการสวมใส่และพิถีพิถันของขนาด (Fits and tolerance) และในเรื่องของพิถีพิถันของรูปทรง (Geometric tolerance)

2) ความเป็นคลื่น (Waviness) ความเป็นคลื่นเป็นความผิดพลาดที่ความยาวคลื่นมากบนพื้นผิวของชิ้นงาน ความเป็นคลื่นมักมีความสม่ำเสมอความเป็นคลื่นอาจเกิดจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ซึ่งทำให้เกิดความสม่ำเสมอ ความเป็นคลื่นนั้นวัดได้ค่อนข้างยาก และจะแบ่งแยกออกจากความผิดพลาดด้านรูปร่างได้ยากด้วย

3) ความขรุขระผิวชิ้นงาน (Surface roughness) ความหยาบของผิวเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการผลิตแบบหนึ่ง ความหยาบเกิดขึ้นจากรูปร่างของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน และกรรมวิธีการขึ้นรูป

โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ ลักษณะความผิดพลาดใน 3 ลักษณะข้างต้น มาวิเคราะห์ต่อในหัวข้อถัดไป

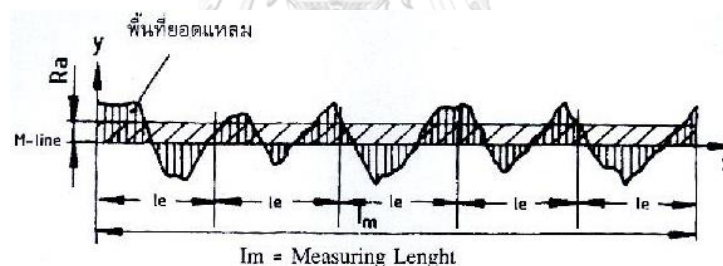
2.1.7.1 ความขรุขระผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) [7]

ความขรุขระผิวชิ้นงานหรือความเรียบผิวชิ้นงาน ในภาษาอังกฤษเรียกว่า "Surface Roughness" หากมีความขรุขระของพื้นผิวมากแสดงว่ามีความเรียบผิวชิ้นงานน้อย หากมีความขรุขระพื้นผิวน้อยแสดงว่ามีความเรียบผิวชิ้นงานมาก

ความขรุขระผิวชิ้นงานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

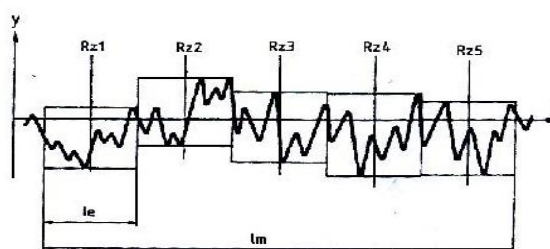
1) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Surface roughness Average: R_a) เป็นการแสดงความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐาน มักจะนิยมใช้ในการกำหนดมาตรฐานความขรุขระผิว

วิธีการหาความขรุขระผิว การหาความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (l_m) โดยค่าของ R_a มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 2.12 การวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) [7]

2) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) เป็นค่าความขรุขระผิวที่หาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ R_z มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 2.13 การวัดค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) [7]

2.1.1.7.2 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงตัด และเงื่อนไขในการตัด [24]

เป็นที่สังเกตว่าแรงตัดมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการตัด และแรงตัดนี้เองเป็นปัจจัยสำคัญต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงตัดที่สนใจในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท คือ แรงป้อนตัด ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานโดยตรง ส่วนแรงตัดอีกประเภทคือ แรงตัดหลักซึ่งมีค่าแปรผันกับเงื่อนไขการตัด วัสดุชิ้นงานและปริมาณเศษโลหะหรือการสึกหรอของมีดตัด ด้วยเหตุนี้การประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากแรงตัดนั้นต้องทำการพิจารณาโดยตัดลอคอิทธิพลจากตัวแปรที่มีผลต่อแรงตัดจากสภาวะการตัดออกไป เพื่อให้สามารถประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างแม่นยำมากขึ้น จากรูปที่ 1.1 งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัด (AF_y/AF_z) เกิดจากพื้นที่ใต้กราฟแรงป้อนตัด (AF_y) ส่วนด้วยพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดหลัก (AF_z) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งใช้ประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดชิ้นงาน โดยคาดว่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดนี้จะสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานที่กำลังตัดได้แม้ว่าค่าสภาวะการตัดจะแปรเปลี่ยนไปก็ตาม

อย่างที่ทราบกันดีว่าในกระบวนการกลึงนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานคือเงื่อนไขการตัด ได้แก่ อัตราการป้อนตัด ความเร็วตัด ความลึกในการตัด และรัศมีจุมุมมีดตัด ซึ่งค่าอัตราการป้อนตัดและรัศมีจุมุมมีดตัดนั้นสามารถวัดค่าได้ง่ายจึงมักนำมาใช้อ้างอิงถึงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้โดยตรงตามทฤษฎีแบบดั้งเดิม ค่ารัศมีจุมุมมีดตัดที่ใหญ่จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่น้อย แต่หากอัตราการป้อนตัดมีค่าสูง ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อมุมคายเศษมีค่าเป็นบวกจะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดและเศษโลหะจะน้อยลง ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ทำให้ผิวชิ้นงานมีความขรุขระน้อยกว่ามุมคายเศษวัสดุที่เป็นลบ

ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีจะต้องมีรอยร่องลึกจากกระบวนการกลึงบางและไม่ลึกนัก หากพิจารณาถึงแรงตัดแล้ว แรงตัดจะส่งผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัด การสั่นนี้จะทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานออกมาไม่เท่าที่ควร โดยทั่วไปแล้วแรงตัดจะเพิ่มขึ้นหากเพิ่มค่าอัตราป้อนและความลึกในการตัด แต่ในทางกลับกัน หากเพิ่มความเร็วตัดจะได้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น เนื่องจากความเร็วตัดที่สูงจะทำให้เกิดอุณหภูมิในการตัด ชิ้นงานที่สูงขึ้น อุณหภูมินี้ทำให้วัสดุของชิ้นงานอ่อนตัวลงและตัดได้ง่ายขึ้นเป็นผลทำให้ผิวสำเร็จของงานมีความขรุขระผิวชิ้นงานน้อย

เนื่องจากปัจจัยข้างต้นที่กล่าวมาล้วนมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน จึงมีการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยข้างต้นต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยจัดให้ภายในประกอบด้วยค่าอัตราส่วนแรงตัดและปัจจัยอื่น ๆ จากเงื่อนไขการตัดที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่ง

สามารถจัดรูปแบบของความสัมพันธ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) ได้ดัง (2.24) และ (2.25) ตามลำดับ

$$R_a \propto V, f, R_n, D, \gamma, \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right) \quad (2.24)$$

$$R_z \propto V, f, R_n, D, \gamma, \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right) \quad (2.25)$$

เมื่อกำหนดให้

R_a	=	ความขรุขระผิวเฉลี่ยของผิวชิ้นงานตัด
R_z	=	ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดของผิวชิ้นงานตัด
V	=	ความเร็วตัด
f	=	อัตราการป้อนตัด
R_n	=	ค่ารัศมีงูมมีดตัด
D	=	ความลึกในการตัด
γ	=	มุมคายเศษวัสดุ
$\left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)$	=	อัตราส่วนแรงตัด

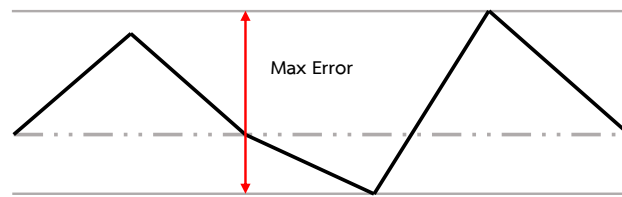
2.1.7.3 ความตรง [25]

ความตรง (Straightness: St) คือ สภาวะที่แต่ละแนวเส้นบนพื้นผิว (Each Line Element) หรือแต่ละตำแหน่งของแกนกลาง (Median Line) จัดวางอยู่บนแนวเส้นตรงในอุดมคติที่สมบูรณ์แบบ (Theoretical Line) กล่าวคือ ระยะระหว่างเส้นที่ขนานกันสองเส้นที่ครอบคลุมจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของเส้นที่พิจารณา

ความตรงมีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน เช่น เฟลาของมอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ที่มีลักษณะบิดงออาจทำให้เกิดการหมุนสั้นและแกว่งขณะใช้งาน ทำให้ไม่สามารถออกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ได้ รวมถึงอาจเกิดเสียงจากการหมุนที่ไม่สมดุลจากแกนมอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ ดังนั้นความตรงชิ้นงานจึงมีความสำคัญอย่างมาก

ลักษณะของความตรงที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 แบบ ดังนี้

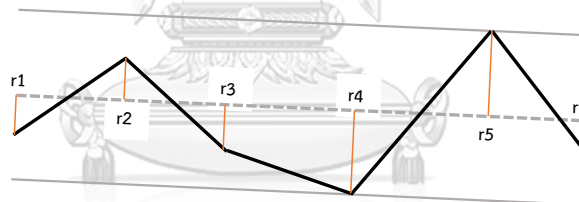
1) ความตรงแบบ Endpoints เกิดจากการลากเส้นตรง (เส้นประ) จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายดังรูป ค่าความตรงแบบ Endpoints คือ ค่าระยะระหว่างเส้นคู่ขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านจุดสูงสุดและอีกเส้นหนึ่งลากผ่านจุดต่ำสุด



รูปที่ 2.14 ความตรงแบบ Endpoints

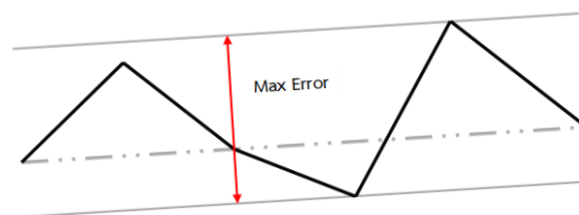
2) ความตรงแบบ Linear regression เกิดจากการสร้างเส้นตรง (เส้นประ) ด้วยวิธีการ Least Square ค่าความตรงแบบ Linear Regression คือ ค่าระยะระหว่างเส้นขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านจุดสูงสุดและอีกเส้นหนึ่งลากผ่านจุดต่ำสุด

โดยที่ Least Square method เป็นวิธีการสร้างเส้นตรงให้เป็นตัวแทนของข้อมูลโดยการเฉลี่ย โดย ตั้งสมมติฐานว่าเส้นตรง (เส้นประ) นั้นมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (X แปรผันตรงกับ Y) จากรูปที่ 2.16 สามารถอธิบายแบบง่ายๆ ว่าขนาดของ $(r1)^2 - (r2)^2 + (r3)^2 + (r4)^2 - (r5)^2 + (r6)^2$ มีค่าน้อยที่สุดถ้ากรณิค่าน้อยที่สุดมีค่าเป็นศูนย์จะได้ว่า $(r1)^2 - (r2)^2 + (r3)^2 + (r4)^2 - (r5)^2 + (r6)^2 = 0$ หรือ $(r1)^2 + (r3)^2 + (r4)^2 + (r6)^2 = (r2)^2 + (r5)^2$



รูปที่ 2.15 ความตรงแบบ Linear regression

3) ความตรงแบบ ISO 1101 (Minimum zone) เกิดจากการสร้างเส้นตรงคู่ขนาน (เส้นประ) โดยให้เส้นที่เราพิจารณานั้น อยู่ภายในเส้นคู่ขนาน ดังรูป ค่าความตรงแบบ ISO1101 คือ ค่าระยะระหว่างเส้นขนานที่สั้นที่สุด



รูปที่ 2.16 ความตรงแบบ ISO 1101

ปัจจัยที่มีผลการวัดความตรง

1. เครื่องมือมาตรฐาน แต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพและมีวิธีการทำงานที่มี ข้อดีและข้อด้อยต่างกันผู้ใช้ควรรู้จักคุณสมบัติดังกล่าว
2. การ Alignment เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการวัด ได้แก่ การจัดวางเครื่องมือ (Setup) ตำแหน่งการวัด ซึ่งมักต้องอาศัยทักษะของผู้ใช้งานเป็นหลัก
3. สภาวะแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความสั่นสะเทือน ฯลฯ โดยทั่วไปมักมีผลกับเครื่องมือมากกว่าผู้ทำการวัด

2.1.7.4 การวิเคราะห์ความตรงผิวชิ้นงาน แรงตัด และเงื่อนไขในการตัด

อย่างที่ทราบกันว่าแรงตัดที่งานวิจัยนี้สนใจมี 2 ประเภท คือ แรงป้อนตัด ซึ่งนอกจากจะส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงานแล้ว ก็ยังส่งผลกระทบต่อความตรงด้วยเช่นกัน และแรงตัดหลักแปรผันกับเงื่อนไขการตัด โดยที่แรงป้อนตัดที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับรอยป้อนตัด (Feed mark) ที่เกิดขึ้นบนผิวงาน ดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตในทิศทางการป้อนตัด คำนวณได้จากผลต่างของแรงป้อนตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_{y(max)}$) ลบด้วยแรงป้อนตัดที่น้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) เทียบกับแรงป้อนตัดสถิตในช่วงเวลาที่วัด ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$) เพื่อใช้ในการพยากรณ์ความตรงผิวชิ้นงานในขณะตัดแม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึง คือเงื่อนไขการตัด ได้แก่ อัตราการป้อนตัด ความเร็วตัด ความลึกในการตัด มุมคายเศษวัสดุและรัศมีจุมกมิตตัด โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัดและความลึกในการตัดจะทำให้ค่าความตรงมีแนวโน้มลดลง เพราะพื้นที่ในการตัดเพิ่มขึ้น แรงตัดสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัด แต่ถ้าหากมุมคายเศษวัสดุมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในขณะตัดสามารถเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมิตตัดและเศษโลหะน้อยลง แรงตัดจึงลดลง ทำให้ความตรงมีแนวโน้มดีขึ้น รัศมีจุมกมิตตัดที่ใหญ่ขึ้นก็ช่วยให้ความตรงดีขึ้น เพราะรัศมีจุมกมิตตัดที่ใหญ่ช่วยลบรอยป้อนตัดที่ตกค้างบริเวณผิวชิ้นงาน และสุดท้ายความเร็วดัดที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มดีขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วตัด ส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดเพิ่มขึ้น ชิ้นงานมีความอ่อนนุ่ม ง่ายต่อการตัด แรงตัดที่เกิดจึงน้อยลงอีกด้วย

จากปัจจัยข้างต้นที่กล่าวมาล้วนมีผลกระทบต่อค่าตรง ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและปัจจัยที่กล่าวมา โดยจัดให้ภายในประกอบด้วยค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตใน

ทิศทางการป้อนตัดและปัจจัยอื่น ๆ จากเงื่อนไขการตัดที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่งสามารถจัดรูปแบบของความสัมพันธ์ความตรงผิวชิ้นงาน ได้ดัง (2.26)

$$S_t \propto V, f, R_n, D, \gamma, \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right) \quad (2.26)$$

เมื่อกำหนดให้

S_t = ความตรงบนผิวชิ้นงาน

V = ความเร็วตัด

f = อัตราการป้อนตัด

R_n = ค่ารัศมีงูมกมิตจัด

D = ความลึกในการตัด

γ = มุมคายเศษวัสดุ

$\left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)$ = อัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตในทิศทางการป้อนตัด

2.1.8 โครงข่ายประสาทเทียม [13]

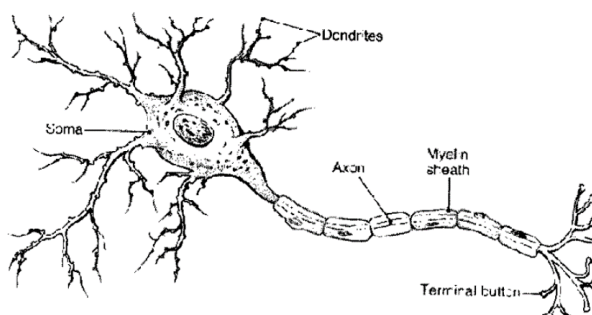
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) เป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ที่เน้นด้านการคำนวณ และได้รับแรงบันดาลใจจากโมเดลทางชีวภาพ โดยมีความพยายามที่จะลอกเลียนความสามารถของสมองมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น พัฒนาการด้านสมองของเด็กตั้งแต่แรกเกิดจนถึงสามปีที่ในระยะเริ่มต้นของวัยนี้ เด็กจะเรียนรู้ว่าผู้ใดคือพ่อ แม่ หรือคนแปลกหน้า ในระยะต่อมาจะเริ่มตอบสนองเมื่อถูกเรียกชื่อ รู้จักแยกแยะสี และสิ่งของต่าง ๆ เริ่มเปล่งเสียงพูดเป็นคำ และเริ่มแสดงความคิดเห็น เป็นต้น จากลักษณะดังกล่าวจะเห็นว่าความสามารถในการเรียนรู้ของสมองมนุษย์มีการพัฒนาขึ้นตามลำดับ และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์จะพบว่ามีการทำงานตามคำสั่งอย่างตรงไปตรงมาเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น เปิดแฟ้มข้อมูล การใช้อินเทอร์เน็ต และสืบค้นข้อมูล เป็นต้น การทำงานดังกล่าวไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะให้เครื่องแสดงความคิดเห็น หรือวิพากษ์วิจารณ์เกี่ยวกับข้อมูลต่าง ๆ ได้ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการทำงานของสมองมนุษย์มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ซึ่งนักประสาทวิทยาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันได้พยายามศึกษาค้นคว้ามาอย่างต่อเนื่องที่จะสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีลักษณะการประมวลผล คล้ายการทำงานของสมองมนุษย์และผลการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมา ส่วนหนึ่งก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาวิชาต่าง ๆ ได้อย่างเป็นประโยชน์อย่างมาก

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นความก้าวหน้าอย่างหนึ่งของความพยายามที่จะพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันให้สามารถทำนายสิ่งต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาความสัมพันธ์ของข้อมูลนำเข้า (input) และข้อมูลส่งออก (output) ได้ โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของข้อมูลที่เป็นข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออกมาก่อน

ความหมายและหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม

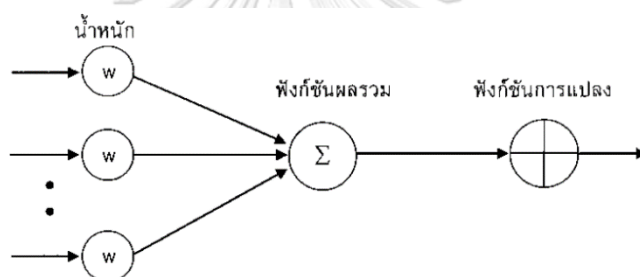
โครงข่ายประสาทเทียม คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทในสมองมนุษย์ โดยที่โครงข่ายประสาทของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neuron) และจุดประสานประสาทหรือไซแนปส์ (Synapses) โดยโครงสร้างของการส่งสัญญาณประสาทประกอบจากการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาทหลายพันล้านเซลล์ เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ประกอบด้วยแขนงรับสัญญาณประสาทซึ่งเป็นเสมือนหน่วยรับข้อมูลป้อนเข้า เรียกว่า “เดนไดรต์” (dendrites) และส่วนปลายของเซลล์ประสาทในการส่งสัญญาณประสาทซึ่งเป็นเสมือนหน่วยส่งข้อมูลออกของเซลล์ เรียกว่า “แอกซอน” (axon) โดยการส่งสัญญาณประสาทดังกล่าว อาจทำให้เกิดได้ทั้งการกระตุ้นและยับยั้ง ทั้งนี้นอกจากลักษณะดังกล่าวแล้ว วิธีการประมวลผลภายในเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ยังมีการขยายหรือลดขนาดของสัญญาณอีกด้วย โดยสัญญาณจากเดนไดรต์ต่าง ๆ จะรวมกันเข้าสู่เซลล์ประสาท และหากสัญญาณรวมมีความแรงเกินค่าระดับ (threshold) ของเซลล์ประสาทนั้น ๆ เซลล์ประสาทก็จะส่งสัญญาณออกทางแอกซอนต่อไป

กระบวนการเรียนรู้ในสิ่งมีชีวิตจะส่งผลให้เกิดการสร้างไซแนปส์ระหว่างเซลล์ประสาทขึ้นมาใหม่ หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของไซแนปส์ต่าง ๆ ในโครงข่ายของเซลล์ประสาท โครงข่ายประสาทของสิ่งมีชีวิตจึงไม่ได้ทำงานแบบเป็นลำดับขั้นตอน (sequential) แต่เพียงอย่างเดียว ลักษณะโดยทั่วไปของโครงสร้างระบบประสาทแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 โครงสร้างประสาท

โครงข่ายประสาทเทียมมีลักษณะคล้ายการส่งผ่านสัญญาณประสาทในสมองของมนุษย์นั่นคือโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการรวบรวมความรู้ (Knowledge) โดยผ่านกระบวนการเรียนรู้ (Learning process) และความรู้ที่ได้เหล่านี้จะจัดเก็บอยู่ในโครงข่ายในรูปแบบของค่าน้ำหนัก (Weight) ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ เมื่อเกิดการเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ เข้าไป ค่าน้ำหนักจะทำหน้าที่เหมือนความรู้ที่รวบรวมไว้เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาเฉพาะอย่างของมนุษย์ ซึ่งการประมวลผลต่าง ๆ เกิดขึ้นในส่วนของหน่วยประมวลผลย่อย เรียกว่า โหนด (Node) ซึ่งโหนดเป็นการจำลองลักษณะการทำงานมาจากเซลล์การส่งสัญญาณ (Signal) ระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อกัน (Connection) จำลองมาจากการเชื่อมต่อของเดนไดรต์และแอกซอนในระบบประสาทของมนุษย์ ภายในโหนดจะมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณส่งออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) หรือฟังก์ชันการแปลง (Transfer function) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนกระบวนการทำงานในเซลล์ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของการทำงานในโครงข่ายประสาทเทียม

โครงสร้างของการทำงานในโครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่ 5 องค์ประกอบ โดยประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลป้อนเข้า (Input) ต้องเป็นข้อมูลที่เป็นเชิงตัวเลข แต่หากข้อมูลเป็นเชิงคุณภาพนั้นจะต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปของเชิงปริมาณ เพื่อให้โครงข่ายสามารถยอมรับได้
- 2) ข้อมูลส่งออก (Output) คือผลลัพธ์จริงที่เกิดขึ้น (Actual output) จากการผ่านกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม
- 3) ค่าน้ำหนัก (Weights) นั่นคือ สิ่งที่ได้จากการผ่านกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยจะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบของทักษะ เพื่อใช้ในการจดจำข้อมูลอื่น ๆ ที่เหมือนกัน
- 4) ฟังก์ชันผลรวม (summation function: S) คือผลรวมของข้อมูลป้อนเข้า (a_i) และค่าน้ำหนัก (w_i)

$$S = \sum_{i=1}^n a_i w_i \quad (2.27)$$

5) ฟังก์ชันการแปลง (Transfer function) เป็นการคำนวณการจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม เช่น ซิกมอยด์ฟังก์ชัน (Sigmoid function) ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic tangent function) เป็นต้น

โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า

การจัดประเภทโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมตามทิศทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณแบ่งได้ 2 ชนิดคือ โครงข่ายแบบไปข้างหน้า (Feedforward Network) และ โครงข่ายแบบส่งค่ากลับ (Recurrent Network) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้าโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้าจะประกอบด้วยชั้นดังต่อไปนี้

1) ชั้นรับข้อมูล (Input Layer)

2) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งในโครงข่ายจะมีหรือไม่มีชั้นซ่อนก็ได้ ถ้าไม่มีชั้นซ่อนเรียกโครงข่ายว่า Single-Layer Feedforward Network ส่วนโครงข่ายที่มีชั้นซ่อนเรียกว่า Multilayer Feedforward Network ซึ่งจำนวนชั้นซ่อนอาจมีจำนวน 1 ชั้น หรือมากกว่า

3) ชั้นแสดงผล (Output Layer)

โดยในแต่ละชั้นจะประกอบด้วย หน่วย (Node) ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผล และเชื่อมต่อผลลัพธ์ไปยังชั้นถัดไป การเชื่อมต่อของแต่ละชั้นจะเป็นแบบถึงกันหมดจึงทำให้สัญญาณข้อมูลเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวคือเคลื่อนที่ไปข้างหน้า จากชั้นรับข้อมูลไปยังชั้นแสดงผล โดยจำนวนชั้นแฝง และหน่วยในแต่ละชั้นแฝงจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา ส่วนจำนวนหน่วยในชั้นรับข้อมูลจะขึ้นกับจำนวนตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าที่จะพยากรณ์ และจำนวนหน่วยในชั้นแสดงผลคือผลลัพธ์ที่ต้องการจากโครงข่าย

ประเภทของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) ข้อมูลจะประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลที่ต้องการสอน และผลลัพธ์ที่ต้องการให้โครงข่ายสร้าง เมื่อมีการนำข้อมูลในลักษณะเดียวกันมาเป็นข้อมูลป้อนเข้า โครงข่ายจะกำหนดค่าผลลัพธ์ที่เป็นเป้าหมายให้กับข้อมูลป้อนเข้าแต่ละตัวโครงข่ายจะนำค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ที่ได้ มาใช้ในการปรับค่าน้ำหนัก เพื่อให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด ถ้าหากเปรียบเทียบกับมนุษย์จะเหมือนกับการสอนนักเรียนโดยมีครูผู้สอนคอยให้คำแนะนำ ตัวอย่างแบบจำลองนี้ได้แก่ การแพร่ย้อนกลับ และเพอเซปตรอน (perceptron) เป็นต้น

2) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) การเรียนรู้แบบนี้จะสอนโครงข่ายโดยการนำข้อมูลป้อนเข้าอย่างต่อเนื่องเพียงอย่างเดียว ไม่มีการส่งค่าผลลัพธ์เป้าหมายให้กับข้อมูล

ป้อนเข้าแต่ละตัว การปรับน้ำหนักจะใช้ข้อมูลที่นำมาสอนเป็นตัวปรับค่า โดยค่าน้ำหนักจะปรับตามกลุ่มที่ข้อมูลป้อนเข้าที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกันถ้าหากเปรียบเทียบกับมนุษย์จะเหมือนกับการที่สามารถแยกแยะพันธุ์พืช พันธุ์สัตว์ ตามลักษณะรูปร่างของมันได้ด้วยตนเอง ตัวอย่างแบบจำลองนี้ได้แก่ เคาน์เตอร์พรองเพกชัน (counter propagation: CPN) แบบจำลองอะแดปทีฟรีโซแนนซ์เทียร์ (Adaptive Resonance Theory neural networks: ART) เป็นต้น

การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Backpropagation)

Werbos (1974) ได้เสนอแนวคิดของการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ จากนั้น Parker (1982) ได้นำเสนออีกครั้ง และเป็นที่ยอมรับมากขึ้นโดย Rumelhart และคณะ (1986) ในหนังสือ Parallel Distributed Processing ซึ่งได้กล่าวถึงศักยภาพของโครงข่ายประสาทเทียม และการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ

การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ สามารถแก้ปัญหาที่ต้องการรูปแบบ โดยการป้อนรูปแบบเข้าไป โครงข่ายประสาทเทียมจะให้รูปแบบผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกัน (Dayhoff. 1990) การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับเป็นวิธีการหนึ่งของโครงข่ายประสาทเทียมที่ง่ายต่อการเข้าใจ เนื่องจากกระบวนการเรียนรู้และปรับปรุงแก้ไขนั้นเป็นไปด้วยตนเอง ถ้าโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่ผิด ค่าน้ำหนักจะถูกปรับจนกว่าค่าความผิดพลาดจะน้อยลง หรืออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นั่นคือ ค่าที่ได้ในครั้งถัดไปจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ด้วยโครงสร้างประสาทเทียมที่มีลักษณะเป็นชั้น แต่ละชั้นเชื่อมโยงกันอย่างทั่วถึง เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมได้รับข้อมูลป้อนเข้า จะคำนวณค่าน้ำหนักของหน่วยรับข้อมูลป้อนเข้าไปยังชั้นแอบแฝง และจากชั้นแอบแฝงไปยังชั้นส่งข้อมูลออก เมื่อเกิดผลต่างระหว่างค่าผลลัพธ์จริงกับค่าผลลัพธ์เป้าหมาย โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าความผิดพลาดจากชั้นส่งข้อมูลออก และแพร่ย้อนกลับไปยังชั้นแอบแฝงจากนั้นจึงแพร่ย้อนกลับไปยังชั้นรับข้อมูลป้อนเข้าตามลำดับ

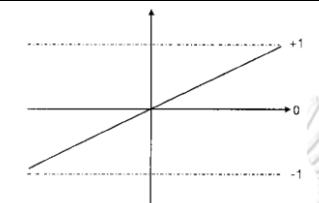
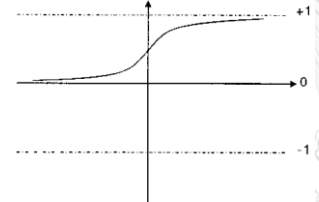
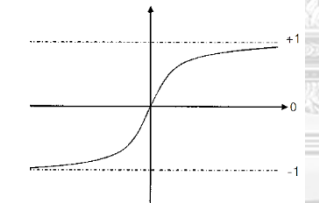
การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ เป็นกระบวนการในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนที่นิยมใช้ ซึ่งจะประกอบด้วยสัญญาณ 2 ส่วน ดังนี้

1) สัญญาณส่ง (Function Signals) คือ ข้อมูลหรือผลลัพธ์ของแต่ละหน่วยที่ถูกส่งเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

2) สัญญาณแก้ไข (Error Signals) คือ ค่าที่แตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและผลลัพธ์จริงที่ถูกส่งกลับสู่โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนขั้นตอนการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น Gradient Descent, Gradient Descent with Adaptive Learning Rate, Gradient Descent with Momentum, Gradient Descent with Momentum and Adaptive Learning Rate, Resilient, Bayesian Regularization และ

Levenberg-Marquardt เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี Levenberg-Marquardt Algorithm ในการปรับค่าน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบน เนื่องจากวิธีนี้เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาประเภทการประมาณค่า นอกจากนั้นยังเป็นวิธีที่มีความรวดเร็วที่สุดในการปรับค่า

ตารางที่ 2.2 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน	รูปแบบ	สมการฟังก์ชันถ่ายโอน	ขอบเขตของ $a(n)$
Linear Transfer Function		$a(n) = n$	$[-\infty, \infty]$
Log-Sigmoid Transfer Function		$a(n) = \frac{1}{1 + e^{(-n)}}$	$[0,1]$
Tan-Sigmoid Transfer Function		$a(n) = \frac{1 - e^{(-n)}}{1 + e^{(-n)}}$	$[-1,1]$

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) หรือ ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) จะเป็นตัวกำหนดค่าผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่หลายชนิด การที่จะเลือกฟังก์ชันชนิดใดขึ้นอยู่กับรูปแบบปัญหา, ลักษณะของผลลัพธ์ว่าเป็นค่าต่อเนื่องหรือไม่, ขอบเขตของผลลัพธ์ เป็นต้น แต่ในที่นี้จะเสนอเฉพาะฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการศึกษานี้เท่านั้นสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้น (Linear Transfer Function) สามารถเรียนรู้เพียงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออก ดังนั้น จึงไม่สามารถหาคำตอบได้สำหรับบางกรณี อย่างไรก็ตาม ถ้าคำตอบที่ได้ไม่ใช่คำตอบที่ดีพอ ฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้นจะหาค่าต่ำสุดของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง แต่ถ้าอัตราการเรียนรู้มีค่าน้อย โครงข่ายประสาทเทียมจะหาคำตอบที่ใกล้เคียงเท่าที่จะเป็นไปได้ที่แสดงลักษณะเชิงเส้นของลักษณะของโครงข่าย

ส่วนค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) เป็นค่าที่ได้จากกระบวนการเรียนรู้ โดยกระบวนการเรียนรู้ที่นิยมใช้กับโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้าคือการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Backpropagation Algorithm)

2.1.9 การออกแบบการทดลอง [26, 27]

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) คือการทดสอบ หรือชุดของการทดสอบ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ คุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) โดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้าอย่างตั้งใจตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้มีคำศัพท์ที่ต้องทราบคือ

- ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor หรือ Noise factor) แทนด้วย z_1, z_2, \dots, z_n และปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factor) แทนด้วย x_1, x_2, \dots, x_n โดยการออกแบบการทดลองจะมุ่งเน้นที่การศึกษา เพื่อหาผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response)

- จำนวนครั้งของการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำจากเงื่อนไขการทดลองที่เหมือนกัน ซึ่งในการทดลองครั้งหนึ่งจะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (Treatment combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนระดับและจำนวนปัจจัยของแต่ละปัจจัย ตัวอย่างเช่น การทำการทดลองที่มี 3 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับจะมีทั้งหมด 6 เงื่อนไขการทดลอง

- ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระ (Dependence) ต้องการศึกษา ควบคุม ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของ ทริตเมนต์ต่าง ๆ

- การสุ่ม (Randomization) ถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เกิดการกระจายอย่างสม่ำเสมอกับค่าของผลลัพธ์ที่สนใจที่ได้จากการทำการทดลอง

การออกแบบการทดลองถือว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญในระดับหนึ่งในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่น หากข้อมูลของการติดตามในกระบวนการหนึ่งด้วยแผนภูมิควบคุม (Control chart) บ่งชี้ว่ากระบวนการออกนอกการควบคุม (Out-of-control) ซึ่งอาจมีสาเหตุจากปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะมีความผิดปกติ ซึ่งการที่จะปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้กระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมอาจทำได้ยาก หากไม่รู้ว่าปัจจัยตัวใดที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจอย่างมีนัยสำคัญ

การออกแบบการทดลองจึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ ทั้งนี้หากมีการประยุกต์ใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง ตั้งแต่เริ่มต้นพัฒนาผลิตภัณฑ์จะนำไปสู่ผลประกอบการดำเนินการที่ดีขึ้น ดังนี้

- 1) จำนวนผลผลิตจะดีขึ้น
2. ความผันแปรลดลงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าคุณลักษณะทางคุณภาพอยู่ในช่วงที่กำหนด และใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ต้องการ
3. ลดเวลาการพัฒนาผลิตภัณฑ์
4. ลดต้นทุนโดยรวม

นอกจากนี้การออกแบบการทดลองยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้นดังนี้

- 1) ประเมินและเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบไว้แล้ว
2. ประเมินเลือกวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ
3. บ่งชี้พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อการปรับปรุงด้านความสามารถในการผลิต (Manufacturability), สมรรถนะ (Performance) และความน่าเชื่อถือ (Reliability), ต้นทุน (Cost) และ ระยะเวลาในการพัฒนา (Development Time) ของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลองมีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่ผู้วิเคราะห์ต้องมีเป้าหมายการศึกษา, ผลลัพธ์ที่สนใจ, ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์, วิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์ อย่างชัดเจน ซึ่ง Montgomery (2001) และ Montgomery (2005) ได้สรุปแนวทางการศึกษาด้วยการออกแบบการทดลอง ไว้ดังนี้

1) การศึกษาปัญหา: ในขั้นตอนนี้ ผู้วิเคราะห์ต้องตระหนักว่าปัญหาคืออะไร ต้องการข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง เพื่อกำหนดเป้าหมายของการศึกษาให้ชัดเจน การศึกษาในขั้นตอนนี้บ่อยครั้งที่พบว่ามีส่วนทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจกระบวนการได้ดียิ่งขึ้น และนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาในที่สุด

2) การกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา: เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องกำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเป็นสิ่งที่ต้องการปรับปรุงในกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ อาจมาจากการวิเคราะห์ในส่วนของควบคุมกระบวนการด้วยหลักการทางสถิติ (Statistical Process Control: SPC) ซึ่งต้องแน่ใจว่าระบบการวัด (Measure) ในกระบวนการมีความสามารถหรือ

เสถียรภาพเพียงพอ เนื่องจากระบบการวัดหากไม่มีความสามารถจะทำให้การบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ไม่ชัดเจน เพราะผลการทำการทดลองจะสามารถบ่งชี้ความแตกต่างของแต่ละปัจจัยได้เพียงปัจจัยที่ส่งผลสูง ๆ เท่านั้น แต่หากเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลระดับปานกลางถึงต่ำจะไม่สามารถแบ่งแยกได้

3) การกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และระดับของปัจจัย: โดยขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องเลือกปัจจัยที่สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ พร้อมทั้งระดับของแต่ละปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนได้ โดยต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสภาพการดำเนินการจริง ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ และ/หรือ ที่มีประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานในกระบวนการ หากกำหนดจำนวนปัจจัย และระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถครอบคลุมทุกปัญหาหรือกระบวนการที่ต้องการแก้ไข จะไม่ได้ผลที่สามารถแก้ไขปัญหาได้ ในขณะที่การกำหนดจำนวนปัจจัยมากเกินไปอาจส่งผลต่อเวลา และต้นทุนที่เกิดขึ้นในการทำการทดลอง ในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกันเป็นจำนวนมาก ผู้ทำการทดลองจะต้องคัดกรองปัจจัยเหล่านี้ในการทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment) ก่อนที่จะทำการทดลองร่วมกับปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างแท้จริงโดยละเอียดในขั้นตอนต่อไป

4) การกำหนดรูปแบบการทดลอง: เมื่อ 3 ขั้นตอนแรกทำอย่างถูกต้องขั้นตอนนี้จะไม่ยุ่งยากนัก ผู้ทำการทดลองต้องเลือกรูปแบบ (Design) ของการทดลอง ซึ่งรวมถึงขนาดตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (replication) การกำหนดลำดับการทดลองอย่างสุ่ม เป็นต้น

5) การทดลองและการเก็บข้อมูล: ผู้ทดลองต้องควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดทั้งจากการทดลองและการเก็บข้อมูล จะส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือ และไม่สามารถนำไปวิเคราะห์อะไรได้ เช่นการไม่ทำการทดลองตามหลักการของการสุ่มจะส่งผลให้อิทธิพลของปัจจัยรบกวน (Noise Factors) ไม่กระจายเฉลี่ย ทำให้ผลของการทดลองแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับผลการทดลองครั้งก่อนหน้า หรือครั้งอื่น ๆ (ไม่อิสระต่อกัน) หรือมีความสัมพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อน (Autocorrelation) ระหว่างข้อมูลจากการทดลอง เป็นต้น

6) การวิเคราะห์ข้อมูล: การวิเคราะห์ข้อมูลทำตามหลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) การวิเคราะห์ด้วยกราฟ การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์จริงผู้วิเคราะห์ที่มีซอฟต์แวร์ทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์หลากหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ควรเข้าใจหลักการทางสถิติเพื่อการแปลความหมายที่ถูกต้องด้วย

7) การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง: เมื่อทราบผลการวิเคราะห์ การสรุปผลและแนะนำการดำเนินการเพื่อปรับปรุงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิเคราะห์อาจใช้เครื่องมือเช่น กราฟ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่าง ๆ และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการปรับปรุงแก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ควรมีการ

ทดลองเพื่อยืนยันข้อแนะนำการปรับปรุงอีกครั้งก่อนการประยุกต์ใช้จริง นอกจากนี้ควรมีการตรวจติดตามผลการปรับปรุงด้วยเครื่องมือของกระบวนการทางสถิติที่เหมาะสมต่อไปด้วย

จากขั้นตอนทั้งหมด ขั้นตอนที่ 1) – 3) เป็นขั้นตอนการเตรียมการทดลอง ซึ่งต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดขึ้น และได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ นำไปสู่การปรับปรุงได้อย่างแท้จริง โดยการดำเนินการตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) – 7) สามารถทำเป็นรอบ ๆ ได้ จากการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Screening Experiment) การทดลองโดยละเอียดเพื่อปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์อย่างแท้จริง (Refining Experiment) และการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่มีผลอย่างเหมาะสม (Optimizing Experiment) ความผิดพลาดที่พบบ่อยในการนำการออกแบบการทดลองไปใช้กับงานจริงคือผู้ทดลองพยายามที่จะทำการทดลองขนาดใหญ่เพียงครั้งเดียว และสรุปผลให้ได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุของความผิดพลาดต่าง ๆ ที่ตามมาเช่น ข้อมูลที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกัน ความผันแปรของข้อมูลไม่คงที่ตลอดการทดลอง เป็นต้น

2.1.9.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design)

เป็นการกำหนดให้มีการออกแบบการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งสามารถประเมินอิทธิพลของปัจจัยต่อผลลัพธ์ที่สนใจได้ทั้งแบบอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้ ต้องใช้ทรัพยากรและเวลาในการทดลองมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนปัจจัยมีมากขึ้นการออกแบบการทดลองอาจแบ่ง ออกเป็นสองลักษณะตามจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย คือ

1) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมากกว่า 2 ระดับขึ้น

2) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ ในกรณีนี้ จะใช้สัญลักษณ์ 2^k

Design โดยเลข 2 แทนจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และ k แทนจำนวนปัจจัยที่ต้องการพิจารณาในการออกแบบการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ระดับของปัจจัย A สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., a แทนด้วย i

ระดับของปัจจัย B สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., b แทนด้วย j

ระดับของปัจจัย C สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., c แทนด้วย k

.....

จำนวนครั้ง ในการทำการทดลองซ้ำ แทนด้วย n

ผลการทดลองจากการทดลองที่ปัจจัย A, B และ C ระดับ i, j และ k ตามลำดับครั้งที่ n

แทนด้วย Y_{ijkn}

ข้อมูลจากการทดลองกรณี 2 ปัจจัย A จำนวน a ระดับ และ ปัจจัย B จำนวน b ระดับ จะได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลของการทดลอง 2 ปัจจัย

		ปัจจัย B			
		1	2	...	b
ปัจจัย A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$...	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$...	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

สิ่งสำคัญในการทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้จะต้องไม่ลืมว่าการทดลองแต่ละครั้งต้องทำตามลำดับการสุ่ม จากกระบวนการสุ่มที่เหมาะสม มิฉะนั้นอาจส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์และนำไปใช้ได้ที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากสมมติฐานของเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติไม่เป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลองสามารถสร้างลำดับการทดลองแบบสุ่มโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น Minitab เป็นต้น

2.1.9.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองผู้วิเคราะห์ต้องการทราบว่าปัจจัยใดบ้างส่งผลต่อผลลัพธ์ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประเมินได้จากเมื่อเปลี่ยนระดับของปัจจัยหรือทรีตเมนต์แล้วทำให้ผลลัพธ์ เปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การวิเคราะห์จึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย หรือกล่าวได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ เมื่อมีประชากรมากกว่า 2 กลุ่มนั่นเอง

1) การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

ในปัจจุบันมีการใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน หมายถึง การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือที่ค่าระดับนัยสำคัญ (α) ที่ถูกกำหนดไว้ โดย P-Value คือความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติ เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้นค่า P-Value จะแสดงถึงค่าที่ใช้ในการปฏิเสธ (H_0) และผู้ตัดสินใจสามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก

เมื่อสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ ส่งผลให้ค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญด้วย ดังนั้นอาจจะต้องพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดที่ทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ทดลองก็จะสามารถทราบว่าคุณสมบัติมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นการทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบเป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าจะสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจมีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จึงนิยมใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้วคือ R^2_{adj} แทน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ มีเนื้อหาเกี่ยวกับเงื่อนไขในการกลิ้งชิ้นงาน แรงตัดที่เกิดขึ้นขณะกลิ้ง ความตรงผิวชิ้นงาน ความขรุขระผิวที่เกิดขึ้น และโครงข่ายประสาทเทียม รวมถึงการวิเคราะห์ในรูปแบบที่แตกต่างกันไป

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความขรุขระผิวชิ้นงาน

Somkiat Tangjitsitcharoen (2010) [10] ได้นำเสนออัตราส่วนแรงตัดเพื่อใช้ในการตรวจสอบความขรุขระผิวระหว่างกระบวนการ เพื่อสร้างสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน สมการจากงานวิจัยนี้ได้พัฒนามาจากการทดลอง โดยอยู่ในรูปแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลที่ประกอบด้วยตัวแปร ห้าตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีจุมกมีดตัด และอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งผลจากการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเป็นที่ยอมรับได้

Somkiat Tangjitsitcharoen and Angsumalin Senjuntichai (2010) [28] ได้ทำการตรวจติดตามอัตราส่วนแรงตัดเพื่อที่จะพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกัดหัวบอลภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าอัตราส่วนแรงตัดสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานได้ โดยอัตราส่วนแรงตัดได้มาจากแรงป้อนตัดที่มีผลโดยตรงกับความขรุขระผิวส่วนด้วยแรงตัดหลักที่ส่งผลต่อเงื่อนไขการตัด ซึ่งใช้สมการเอ็กซ์โปเนนเชียลในการพยากรณ์ ประกอบด้วย ห้าตัวแปรคือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัด เมื่อนำไปทดสอบพบว่าผลที่ได้จากการพยากรณ์อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ มีความถูกต้องและเที่ยงตรงสูง แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเรขาคณิตของเครื่องมือตัดเพื่อให้ได้ความแม่นยำในการทำนายที่สูงขึ้น

Somkiat Tangjitsitcharoen and Channarong rungruang (2011) [29] ได้ทำการศึกษาการตรวจติดตามและการควบคุมกระบวนการทางสถิติของความขรุขระผิวในระหว่างกระบวนการตัด โดยใช้อัตราส่วนแรงตัด รวมถึงสร้างสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างการผลิต ด้วย 6 ปัจจัย ดังนี้ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีจุมกมีดตัด ความลึกตัด มุมคายเศษวัสดุ และอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองใช้สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการภายใต้การควบคุมเชิงสถิติพบว่า สมการสามารถตรวจสอบและควบคุมความขรุขระผิวได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

กัญยานต์ สมานมิตร (2556) [3] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความขรุขระผิวชิ้นงานโดยไม่คำนึงถึงการแตกหักของเศษโลหะและเงื่อนไขการตัด โดยใช้การตรวจติดตามแรงตัดพลวัต ในกระบวนการตรวจติดตามแรงตัดพลวัตได้จำแนกสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะเพื่อที่จะพยากรณ์ความขรุขระผิว ผู้วิจัยได้นำการแปลงเวฟเล็ตของ Meyer มาจำแนกแรงตัดพลวัตทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่เพื่อกำหนดระดับที่เหมาะสม สำหรับความถี่ของความขรุขระผิวและการแตกหักของเศษโลหะ พบว่าแรงตัดหลักและแรงป้อนตัดที่อยู่ในระดับที่ 5 สอดคล้องกับค่าความขรุขระผิวทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ จากการแปลงเวฟเล็ตทำให้สามารถแยกความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะออกจากความขรุขระผิวได้ ซึ่งสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะจะอยู่ระดับต่ำที่สุดของการแปลงเวฟเล็ต

ต่อไปผู้วิจัยได้ศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิว เงื่อนไขการตัดและแรงตัดที่เกิดขึ้นเพื่อพัฒนาแบบจำลองในการพยากรณ์ความขรุขระผิว โดยมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงูมิตตัด ความลึกในการตัดและมุมคายเศษวัสดุ ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ ใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การถดถอยพหุคูณของแบบจำลองเพื่อใช้ในการพยากรณ์ความขรุขระผิว ผลคือสามารถให้ความแม่นยำและความถูกต้องในการพยากรณ์ความขรุขระผิวได้สูง

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความตรงผิวชิ้นงาน

Thararath Shansungnone and Somkiat Tangjitsitcharoen (2015) [30] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและอัตราส่วนแรงตัดภายใต้เงื่อนการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าอัตราส่วนแรงตัดสามารถคำนวณได้จากผลต่างของแรงตัดสูงสุด ($F_{y(max)}$) กับต่ำสุด ($F_{y(min)}$) ของแรงป้อนตัดพลวัตส่วนด้วยแรงป้อนตัดสถิต ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความถี่ของแรงป้อนตัดพลวัตสอดคล้องกับความตรงบนผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่ ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนแรงตัดสามารถพยากรณ์เพื่อวัดความตรงในขณะที่ตัดได้ แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

ผู้ทำการทดลองได้นำอัตราส่วนแรงตัดมาทำนายความตรงของชิ้นงานในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล การวิเคราะห์พหุคูณถดถอยถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ เพื่อสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ และใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการพยากรณ์ พบว่าอยู่ใน $\pm 10\%$ ของค่าความตรงที่วัดได้

มูร์มิน ศาสน์สันติวงศ์ (2558) [9] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความกลมของชิ้นงานกับแรงตัด ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความ

ลึกในการตัด รัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษวัสดุ ในกระบวนการกลึง เพื่อสร้างสมการทำนายความตรง และความกลมของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ในการตัดวัดแรงที่เกิดขึ้น ขณะตัด และประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตตอบซีซีในการแยกวิเคราะห์แรงตัดพลวัตออกจากสัญญาณ จากเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ จากการทดลองพบว่า ความถี่ของแรงตัดจะมีความถี่ต่ำและ เกิดขึ้นในระดับชั้นเวฟเล็ตที่สูง นั่นคือระดับชั้นที่ 8 ดังนั้นจึงนำแรงตัดในระดับ 8 ของการแปลงเวฟ เล็ตมาใช้ในการสร้างสมการทำนายที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล และเมื่อทำการทดสอบผล พบว่า สมการทำนายที่พัฒนาขึ้นให้ผลที่มีความแม่นยำสูงกว่างานที่วิจัยที่ผ่านมาในอดีต

พรรณิภา พวงพัต (2561) [15] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบน ศูนย์กับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้น ในขณะกลึงอะลูมิเนียม 6063 โดยใช้เงื่อนไขการตัด คือ ความเร็ว ตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และอัตราส่วนแรงตัดที่คำนวณจากแรงป้อนตัด โดย พิจารณาความสัมพันธ์จากวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เพื่อแปลงโดเมน เวลาเป็นโดเมนความถี่ ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนแรงตัดสามารถนำมาทำนายความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ได้ จากการนำสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล มาวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของ สมการ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด พบว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำสูง และอัตราป้อนตัดเป็นปัจจัยที่ ส่งผลต่อความตรงมากที่สุด

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม

Somkiat Tangjitsitcharoen and Channarong Rungruang (2011) [12] ได้ ทำการศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการ โดยใช้เซนเซอร์ร่วมกัน ร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยใช้โครงข่าย ประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับในการประมาณค่าระดับการสึกหรอของมีดตัดในระหว่าง กระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) ผลการทดลองที่ได้พบว่าสัญญาณแรงตัด ความ แปรปรวนของสัญญาณความเร่งและเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงและอะคูสติกรีมีสชัน สามารถใช้ในการประมาณระดับความสึกหรอของมีดตัดได้ จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถปรับปรุง การตัดที่เกิดขึ้นจริง เพื่อประเมินความสึกหรอของเครื่องมือในระหว่างกระบวนการตัด ให้มีความ ถูกต้องและน่าเชื่อถือสูงขึ้น

Somkiat Tangjitsitcharoen, Channarong Rungruang and Narongsak Pongsathornwiwat (2011) [31] งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการพัฒนาและตรวจติดตามในกระบวนการโดยใช้เซ็นเซอร์ร่วมกัน ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อตรวจติดตามการสึกหรอของมิตตัดและสภาวะการตัดที่ทำให้เกิดเศษโลหะและแฮตเตอร์ขึ้นบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบพรัย้อนกลับในการประมาณค่าระดับการสึกหรอของมิตตัดในระหว่างกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) ผลการทดลองที่ได้พบว่าสัญญาณแรงตัด ความแปรปรวนของสัญญาณความเร่งและเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงและอะคูสติกอิมิตชันสามารถใช้ในการประมาณระดับความสึกหรอของมิตตัดได้

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาวะการตัดที่ทำให้เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก เศษโลหะแบบต่อเนื่องและแฮตเตอร์สามารถระบุได้โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดในขณะนั้น ซึ่งก็คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณอะคูสติกอิมิตชัน พาวเวอร์สเปกตรัมของทั้งสามแรงตัดพลวัต สัญญาณเสียงและสัญญาณความเร่ง วิธีการนี้สามารถใช้หาสภาวะการตัดได้ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบเทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ (pattern recognition) จากวิธีดังกล่าวทำให้สามารถปรับปรุงการตัดที่เกิดขึ้นจริง เพื่อประเมินความสึกหรอของเครื่องมือในระหว่างกระบวนการตัด ให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสูง

Somkiat Tangjitsitcharoen and Angsumalin Senjuntichai (2012) [32] ได้ทำการเปรียบเทียบระบบการตรวจจับในกระบวนการของสถานะการตัดของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เศษโลหะแบบแตกหัก และแฮตเตอร์สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) ในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้เซ็นเซอร์ร่วมกัน ซึ่งก็คือเซ็นเซอร์แรงตัด เซ็นเซอร์เสียง เซ็นเซอร์วัดความเร่ง และเซ็นเซอร์อะคูสติกอิมิตชัน โดยมี 6 พารามิเตอร์สำหรับนำไปวิเคราะห์ในโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมพลังงาน (Energy spectral densities) ของสามแรงตัดพลวัต สัญญาณเสียง สัญญาณความเร่ง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่แตกต่างกันไป โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบและแบบเพอร์เซพตรอนในการตรวจจับสถานะการตัด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบการตรวจจับโดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้การจดจำรูปแบบสามารถให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับสถานะการตัดได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือสูงมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เทคนิคแบบเพอร์เซพตรอน

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัย 2 ปัจจัยขึ้นไป ที่ต้องการจะศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียลจึงเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดใน การตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆปัจจัย (Factor) พร้อมกัน โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัด ความตรง และความขรุขระผิวชิ้นงาน รวมถึงเงื่อนไขในการตัดต่าง ๆ เพื่อนำไปเทรนตเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม สำหรับนำไปพัฒนาการพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึง

3.1.1 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ในกระบวนการกลึงชิ้นงานนั้น ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานคือ ความตรงและความเรียบผิวชิ้นงาน จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต แรงตัดและเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตรง [2, 9, 15] และความขรุขระผิวชิ้นงาน [1, 3, 10] จากการศึกษาความสัมพันธ์และรวบรวมข้อมูล พบว่าเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วรอบ ความลึกตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงูมกมิตตัด และมุมคายเศษวัสดุ รวมถึงแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด เป็นปัจจัยที่ล้วนส่งผลต่อความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังนั้นจากปัจจัยข้างต้นจะถูกพิจารณาเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ที่มีต่อความตรงและความขรุขระผิว ในงานวิจัยนี้

3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [2, 3, 9] ได้ทำการทดลองเบื้องต้นในการเลือกปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกลึงชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยอาศัยข้อมูลเชิงเทคนิคจากการศึกษาคู่มือแนะนำของบริษัทเคียวซีราผู้ผลิตเครื่องมือตัด [33] ในการกำหนดขอบเขตการทดลองและช่วยลดความเสี่ยงของเครื่องมือตัด เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง ประกอบกับพิจารณาผิวชิ้นงานสำเร็จอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	100, 150, 180, 200, 260
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8
รัศมีจุมกมิตตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.8
มุมคายเศษวัสดุ (องศา)	+11, -6

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ด้วยกัน 5 ปัจจัย ผู้วิจัยได้นำปัจจัยการทดลองที่มีการเก็บข้อมูลของงานวิจัยก่อนหน้า [2, 3] มาทำการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.1 แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย ระดับการทดลองที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่

- ความเร็วตัด

ทำการกำหนดระดับปัจจัยความเร็วตัดเป็น 5 ระดับ คือ 100 150 180 200 และ 260 เมตรต่อนาที อยู่ในช่วงความเร็วตัดที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม และเป็นไปตามคำแนะนำของบริษัทเคียวซีราที่เป็นผู้ผลิตเม็ดมิตตัด นอกจากนี้ยังเป็นช่วงความเร็วตัดที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] ที่พิสูจน์ว่าให้ผลการตัดสำหรับตัดเหล็กที่ดีที่สุด ที่ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที

- ความลึกตัด

เมื่อความลึกในการตัดสูง จะทำให้ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์และความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต่อคุณภาพของผิวสำเร็จไม่ดี จึงกำหนดระดับปัจจัยของอัตราป้อนตัดในระดับต่ำ เป็น 5 ระดับ คือ 0.2 0.4 0.5 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร เพื่อให้ผิวชิ้นงานที่ออกมามีคุณภาพดี

- อัตราการป้อนตัด

เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นของอัตราป้อนตัดในระดับต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน จึงทำการกำหนดระดับปัจจัยเป็น 5 ระดับ คือ 0.1 0.15 0.2 0.25 และ 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ และหากเพิ่มอัตราป้อนตัดให้สูงขึ้น อาจส่งผลให้ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์และความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น

- รัศมีจุมกมิตตัด

ทำการกำหนดปัจจัยสำหรับรัศมีจุมกมิตตัดเป็น 2 ระดับ คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากการใช้รัศมีจุมกมิตตัดขนาดใหญ่จะช่วยบรอยป้อยตัดที่ตกค้างบนผิวชิ้นงาน

ส่งผลให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพดี แต่หากใช้รัศมีงมูกมีดตัดที่ใหญ่มากเกินไป ทำให้ใช้แรงตัดที่มาก ท้ายที่สุดก็จะทำให้คุณภาพผิวของชิ้นงานหลังตัดออกมาไม่ดี

- มุมคายเศษวัสดุ

อย่างที่ทราบกันตามทฤษฎีว่า ถ้ามุมคายเศษวัสดุเป็นบวก จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้น ขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดและเศษโลหะจะน้อยลง ดังนั้นแรง ตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ผิวงานที่ได้จึงมีคุณภาพดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ แต่เนื่องจากผู้วิจัยต้องการ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของมุมคายเศษที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความตรงและความขรุขระผิว จึงกำหนด ระดับปัจจัยของมุมคายเศษออกเป็น 2 ระดับ คือ -6 และ +11 องศา

3.1.3 เงื่อนไขการทดลอง

จากตารางที่ 3.1 งานวิจัยนี้ใช้ปัจจัยในการทดลอง 5 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วตัด (V), อัตราการป้อนตัด (f), ความลึกตัด (D), รัศมีงมูกมีดตัด (R_n) และมุมคายเศษวัสดุ (γ) ใช้การทดลอง แบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial design) แบ่งเป็นเงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิว [3] ดังตารางที่ 3.2 และการทดลองความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ [2] ดังตารางที่ 3.3 ตามระดับของปัจจัยที่ ต่างกัน

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิวชิ้นงาน

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	รัศมีงมูกมีด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	180	0.2	0.2	0.8	11
2	180	0.2	0.2	0.8	11
3	180	0.2	0.3	0.4	11
4	180	0.8	0.1	0.8	-6
5	180	0.8	0.2	0.8	11
6	100	0.2	0.1	0.8	11
7	180	0.5	0.3	0.4	11
8	100	0.8	0.1	0.8	11
9	260	0.5	0.2	0.4	11
10	260	0.2	0.1	0.4	11
11	100	0.2	0.1	0.4	-6

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิวชิ้นงาน (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	รัศมีงูมมีต (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
12	100	0.2	0.2	0.8	11
13	180	0.2	0.1	0.4	-6
14	100	0.2	0.1	0.4	11
15	180	0.5	0.3	0.8	-6
16	260	0.8	0.1	0.4	-6
17	260	0.8	0.2	0.8	-6
18	260	0.2	0.1	0.4	-6
19	260	0.2	0.1	0.8	-6
20	260	0.2	0.1	0.8	11
21	180	0.5	0.3	0.4	-6
22	100	0.5	0.1	0.4	-6
23	100	0.5	0.1	0.4	11
24	100	0.2	0.3	0.8	-6
25	180	0.5	0.2	0.4	-6
26	260	0.5	0.2	0.4	-6
27	100	0.5	0.1	0.8	11
28	260	0.2	0.2	0.8	11
29	180	0.5	0.2	0.8	11
30	100	0.8	0.2	0.8	-6
31	100	0.2	0.2	0.4	-6
32	260	0.5	0.3	0.8	-6
33	180	0.8	0.1	0.4	11
34	260	0.8	0.3	0.4	-6
35	180	0.8	0.3	0.8	-6
36	260	0.2	0.3	0.8	-6
37	100	0.8	0.1	0.4	11
38	100	0.8	0.3	0.4	11

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิวชิ้นงาน (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
39	260	0.8	0.3	0.8	11
40	100	0.8	0.1	0.4	-6
41	100	0.5	0.2	0.4	11
42	180	0.2	0.3	0.8	11
43	260	0.8	0.1	0.8	-6
44	260	0.8	0.2	0.8	11
45	260	0.5	0.2	0.8	11
46	180	0.5	0.3	0.8	11
47	260	0.8	0.3	0.4	11
48	100	0.5	0.3	0.4	-6
49	260	0.8	0.2	0.4	-6
50	260	0.8	0.2	0.4	11
51	180	0.8	0.2	0.4	-6
52	260	0.5	0.1	0.8	-6
53	180	0.5	0.2	0.4	11
54	180	0.2	0.2	0.4	-6
55	100	0.5	0.2	0.8	-6
56	260	0.2	0.3	0.4	-6
57	180	0.2	0.3	0.8	-6
58	260	0.5	0.3	0.4	11
59	100	0.5	0.1	0.8	-6
60	180	0.2	0.2	0.4	11
61	180	0.5	0.1	0.8	-6
62	180	0.8	0.3	0.4	11
63	100	0.8	0.2	0.4	11
64	180	0.8	0.2	0.8	-6
65	100	0.2	0.2	0.4	11

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิวชิ้นงาน (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
66	260	0.5	0.3	0.4	-6
67	180	0.2	0.1	0.8	11
68	100	0.8	0.3	0.8	-6
69	180	0.2	0.1	0.8	-6
70	260	0.2	0.3	0.4	11
71	100	0.2	0.1	0.8	-6
72	260	0.5	0.3	0.8	11
73	100	0.8	0.3	0.8	11
74	260	0.5	0.1	0.8	11
75	260	0.5	0.1	0.4	11
76	260	0.8	0.1	0.8	11
77	180	0.5	0.1	0.8	11
78	100	0.2	0.3	0.4	-6
79	180	0.5	0.2	0.8	-6
80	180	0.8	0.1	0.4	-6
81	180	0.8	0.1	0.8	-6
82	260	0.2	0.3	0.8	11
83	260	0.8	0.1	0.4	11
84	100	0.8	0.3	0.4	-6
85	100	0.5	0.3	0.8	11
86	180	0.8	0.1	0.8	11
87	100	0.5	0.2	0.8	11
88	260	0.5	0.2	0.8	-6
89	180	0.2	0.2	0.8	-6
90	100	0.2	0.3	0.8	11
91	180	0.5	0.1	0.4	-6
92	180	0.2	0.3	0.4	-6

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิวชิ้นงาน (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
93	260	0.8	0.3	0.8	-6
94	180	0.2	0.1	0.4	11
95	100	0.8	0.2	0.8	11
96	100	0.8	0.2	0.4	-6
97	260	0.2	0.2	0.8	-6
98	180	0.5	0.1	0.4	11
99	180	0.8	0.3	0.4	-6
100	180	0.8	0.3	0.8	11
101	100	0.2	0.2	0.8	-6
102	100	0.2	0.3	0.4	11
103	260	0.5	0.1	0.4	-6
104	100	0.5	0.3	0.4	11
105	100	0.5	0.2	0.4	-6
106	100	0.5	0.3	0.8	-6
107	260	0.2	0.2	0.4	-6
108	260	0.2	0.2	0.4	11

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองความตรงเบี่ยงหนีศูนย์

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	รัศมีงูมมีต (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	200	0.4	0.15	0.8	-6
2	200	0.4	0.20	0.8	-6
3	200	0.4	0.25	0.8	-6
4	150	0.4	0.15	0.8	-6
5	150	0.4	0.20	0.8	-6
6	150	0.4	0.25	0.8	-6
7	100	0.4	0.15	0.8	-6
8	100	0.4	0.20	0.8	-6
9	100	0.4	0.25	0.8	-6
10	200	0.6	0.15	0.8	-6
11	200	0.6	0.20	0.8	-6
12	200	0.6	0.25	0.8	-6
13	150	0.6	0.15	0.8	-6
14	150	0.6	0.20	0.8	-6
15	150	0.6	0.25	0.8	-6
16	100	0.6	0.15	0.8	-6
17	100	0.6	0.20	0.8	-6
18	100	0.6	0.25	0.8	-6
19	200	0.8	0.15	0.8	-6
20	200	0.8	0.20	0.8	-6
21	200	0.8	0.25	0.8	-6
22	150	0.8	0.15	0.8	-6
23	150	0.8	0.20	0.8	-6
24	150	0.8	0.25	0.8	-6
25	100	0.8	0.15	0.8	-6
26	100	0.8	0.20	0.8	-6
27	100	0.8	0.25	0.8	-6

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (ต่อ)

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

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (ต่อ)

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

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	รัศมีงูมกมิต (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
82	200	0.4	0.15	0.4	11
83	200	0.4	0.20	0.4	11
84	200	0.4	0.25	0.4	11
85	150	0.4	0.15	0.4	11
86	150	0.4	0.20	0.4	11
87	150	0.4	0.25	0.4	11
88	100	0.4	0.15	0.4	11
89	100	0.4	0.20	0.4	11
90	100	0.4	0.25	0.4	11
91	200	0.6	0.15	0.4	11
92	200	0.6	0.20	0.4	11
93	200	0.6	0.25	0.4	11
94	150	0.6	0.15	0.4	11
95	150	0.6	0.20	0.4	11
96	150	0.6	0.25	0.4	11
97	100	0.6	0.15	0.4	11
98	100	0.6	0.20	0.4	11
99	100	0.6	0.25	0.4	11
100	200	0.8	0.15	0.4	11
101	200	0.8	0.20	0.4	11
102	200	0.8	0.25	0.4	11
103	150	0.8	0.15	0.4	11
104	150	0.8	0.20	0.4	11
105	150	0.8	0.25	0.4	11
106	100	0.8	0.15	0.4	11
107	100	0.8	0.20	0.4	11
108	100	0.8	0.25	0.4	11

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece Material)

วัสดุประเภทเป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จัดเป็นกลุ่มเหล็กคุณสมบัติปานกลาง สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ทั้งงานโครงสร้าง งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์ รวมทั้งชิ้นส่วนในเครื่องยนต์จัดเป็นกลุ่มเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งความแข็ง ความเหนียวและยังสามารถอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ [34]



รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 ด้ามมีดกลึง (Tool Holder)

- 1) ด้ามมีดกลึง ยี่ห้อ Kyocera เบอร์ CTGPR 2525M-16N
- 2) ด้ามมีดกลึง ยี่ห้อ Kyocera เบอร์ WTJNR 2525M-16N



- ก) ด้ามมีดกลึงเบอร์ CTGPR 2525M-16N ข) ด้ามมีดกลึงเบอร์ WTJNR 2525M-16N

รูปที่ 3.2 ด้ามมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 เม็ดมีด (Insert)

เม็ดมีดที่ใช้เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว ยี่ห้อ Kyocera

- 1) มุมคายเศษโลหะ -6 องศา
 - รหัสเม็ดมีด TNMG 160404HQ มีรัศมีงูมกมิตขนาด 0.4 มิลลิเมตร
 - รหัสเม็ดมีด TNMG 160408HQ มีรัศมีงูมกมิตขนาด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

- 2) มุมคายเศษโลหะ 11 องศา
 - รหัสเม็ดมีด TPMPR 160304HQ มีรัศมีงูมกมิตขนาด 0.4 มิลลิเมตร
 - รหัสเม็ดมีด TPMPR 160308HQ มีรัศมีงูมกมิตขนาด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

3.2.5 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine)

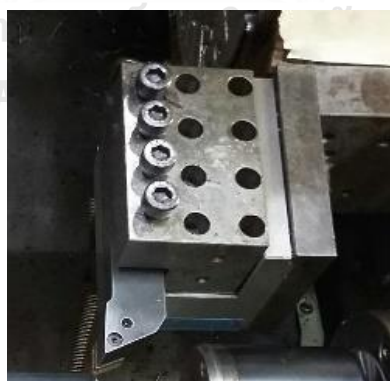
เครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY



รูปที่ 3.5 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine)

3.2.6 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ไดนาโมมิเตอร์หรือเซนเซอร์แรง ยี่ห้อ Kistler รุ่น 9121 ใช้วัดแรงตัดในขณะทำการ
กลึงชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

3.2.7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL750 ใช้สำหรับบันทึกและแสดงผลค่าแรงตักที่เกิดขึ้นขณะกึ่งขึ้นงาน



รูปที่ 3.7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

3.2.8 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)

เครื่องขยายสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง ยี่ห้อ Kistler รุ่น 5038 ใช้สำหรับขยายสัญญาณแรงตักจากไดนามิเตอร์ที่วัดแรงตักในขณะกึ่งขึ้นงาน

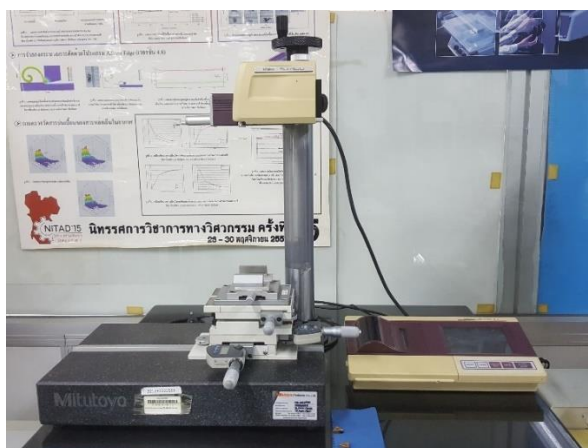


รูปที่ 3.8 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)

3.2.9 เครื่องวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน (Straightness and Surface

Roughness Tester)

เครื่องวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-400 ใช้สำหรับวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยตั้งค่าเครื่องให้เหมาะสมสำหรับการวัดแต่ละลักษณะก่อนทำการวัด

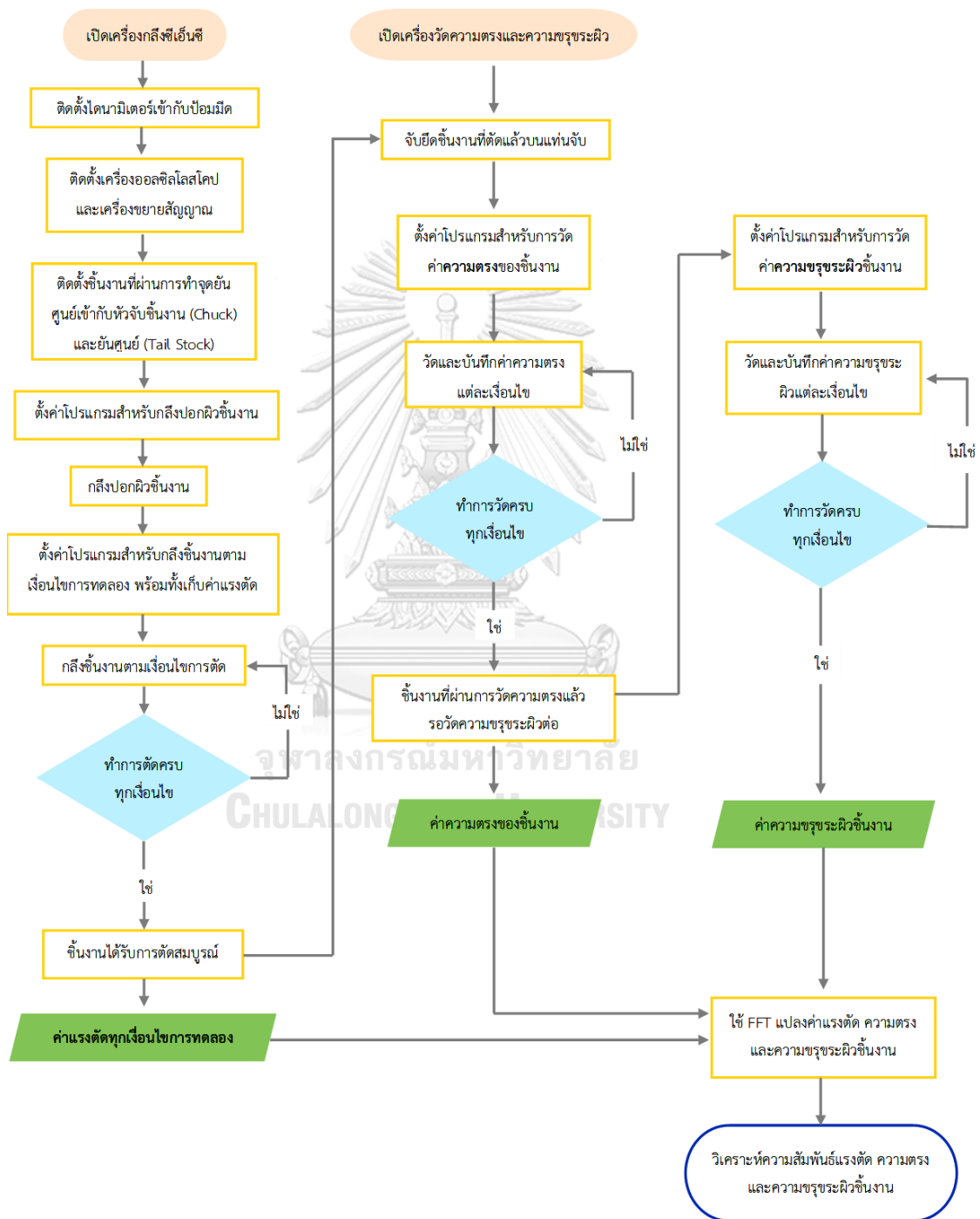


รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน (Straightness and Surface Roughness Tester)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

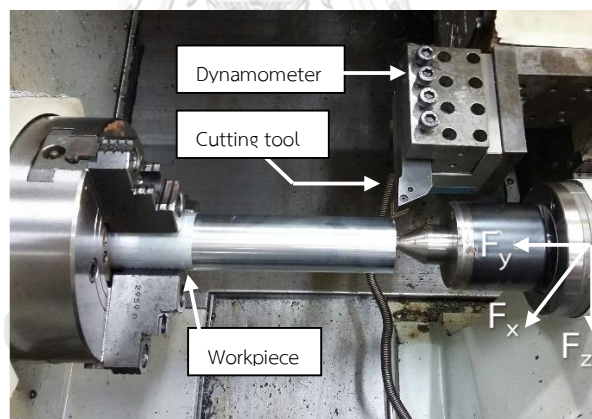
ขั้นตอนการดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการตัดแบบแห้ง มีขั้นตอนดังรูปที่

3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- 1) เปิดเครื่องกลึงซีเอ็นซี และตรวจสอบวาล์วแรงดัน
- 2) ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับชุดป้อมมีด (Turret) ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อทำการวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด
- 3) ติดตั้งเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) โดยวางไว้ข้างๆเครื่องกลึงซีเอ็นซี จากนั้นเชื่อมต่อสายสัญญาณของไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ เพื่อขยายสัญญาณแรงตัด (แรงตัดแนวรัศมี (F_x) แรงตัดป้อน (F_y) และแรงตัดหลัก (F_z)) โดยมีช่วงความถี่ใช้งานของไดนาโมมิเตอร์ ดังตารางที่ 3.
- 4) ติดตั้งเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) โดยตั้งเครื่องไว้ข้างๆ เครื่องขยายสัญญาณ เพื่อเชื่อมต่อสายสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณเข้าเครื่องออสซิลโลสโคป เพื่อเก็บสัญญาณแรงตัด ซึ่งปรับตั้งค่าเครื่องให้สัญญาณแรงตัดถูกกรองด้วยความถี่ 5,000 เฮิรท์ (H_z) โดยอัตราการเก็บข้อมูลเป็น 10,000 ค่าต่อวินาที
- 5) ติดตั้งชิ้นงานเหล็ก รูปทรงกระบอก ที่ผ่านการทำจุดยันศูนย์แล้ว เข้าหัวจับ (Chuck) และยันศูนย์ (Tail Stock) ชิ้นงาน เพื่อป้องกันชิ้นงานเกิดการสั่นคลอนในขณะทำการตัด



รูปที่ 3.11 ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้พร้อมสำหรับการตัดชิ้นงาน

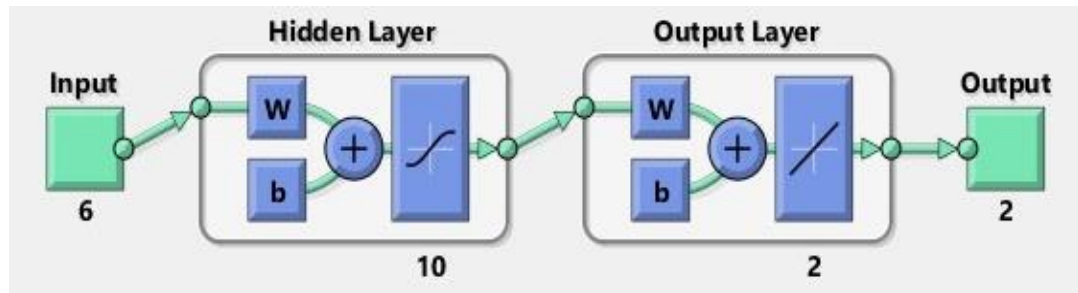
- 6) ตั้งค่าโปรแกรมเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับกลึงปอกผิวชิ้นงานเพื่อเตรียมผิวของชิ้นงานแล้วทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังกลึงปอกผิวเสร็จ ก่อนทำการทดลองตามเงื่อนไขการตัด
- 7) ตั้งค่าโปรแกรมเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับกลึงชิ้นงานตามเงื่อนไขการทดลอง ตามตารางที่ 3.1 โดยกลึงความยาว 30 มิลลิเมตรต่อ 1 เงื่อนไขการทดลอง และทำการเปลี่ยนเงื่อนไขในทุก ๆ ระยะการตัด

- 8) บันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้น ด้วยไดนาโมมิเตอร์ ผ่านเครื่องขยายสัญญาณ และถูกส่งต่อไปยังเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อเก็บค่าแรงตัด
- 9) จดบันทึกลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการตัดในแต่ละเงื่อนไข ตรวจสอบสภาพการสึกหรอของเม็ดมีด และเก็บตัวอย่างของเศษวัสดุที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง
- 10) ใช้เครื่องวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากความตรงและความขรุขระผิวใช้เครื่องเดียวกันในการวัดผิวชิ้นงาน อีกทั้งการตั้งค่าเครื่องก็อยู่ในขอบข่ายเดียวกัน คือตั้งค่าระยะทางการวัด (Evaluation length) เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร และความเร็วในการลากหัวเข็มของเครื่องเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ใช้ Sampling length เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร โดยที่เครื่องมีอัตราสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง
- 11) วิเคราะห์สัญญาณค่าแรงตัดที่ได้จากการตัด ความตรง และความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากเครื่องวัดผิวชิ้นงานของแต่ละการทดลองด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เพื่อดูความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

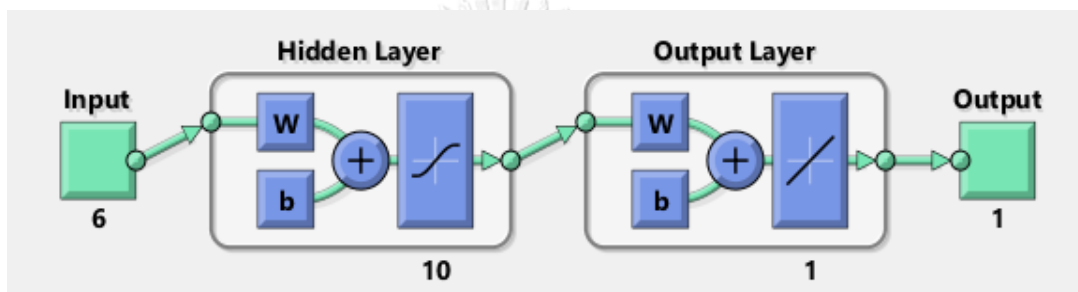
3.4 การพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้า (A two-layer feed forward neural network) และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ด (Levenberg-Marquardt's back propagation) โดยทั่วไปแล้วโครงข่ายของแบบจำลองประกอบด้วยชั้นจำนวน 3 ชั้น ชั้นข้อมูลนำเข้า ชั้นซ่อน และชั้นแสดงผลหรือส่งออก ประกอบด้วยฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Transfer Function) ในชั้นซ่อน และฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้น (Linear Transfer Function) ในชั้นแสดงผล ดังรูปที่ 1.4

และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [35] พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยชั้นซ่อน 1-2 ชั้น มีความสามารถเพียงพอที่จะแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้ โดยพารามิเตอร์ที่นำเข้าชั้นข้อมูล ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิตตัด มุมคายเศษวัสดุ อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดระหว่างแรงตัดหลักและแรงป้อนตัด (AF_y / AF_z) สำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิว (รูป 3.12) และอัตราส่วนแรงตัดระหว่างผลต่างของแรงป้อนตัดพลวัตเทียบกับแรงป้อนตัดสถิต ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$) สำหรับพยากรณ์ความตรง ดังรูป 3.13



รูปที่ 3.12 แบบจำลองการทำงานของกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความ
ขรุขระผิว โดยที่ W = weight และ b = bias



รูปที่ 3.13 แบบจำลองการทำงานของกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ความ
ตรง โดยที่ W = weight และ b = bias

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้งานแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเทคนิคแบบแพร่ค่าย้อนกลับ ผ่านกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network toolbox) ของโปรแกรม MATLAB และใช้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percent Error, MAPE) เป็นดัชนีชี้วัดความแม่นยำในการพยากรณ์ของระหว่างผลของการทดลองกับผลลัพธ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

3.5 วิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ในส่วนของสัญญาณแรงตัดซึ่งอยู่ในหน่วยโวลต์ ต้องนำมาทำการแปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยนิวตัน ตามค่า Sensitivity ของไดนาโมมิเตอร์ดังนี้

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

$$\text{- แรงรัศมี (Radial Force, N)} = V_x \text{ (Volt)} \times 600 \text{ (N/Volt)}$$

2) นำข้อมูลที่ได้ทำการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) โดยแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อดูความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

3) คำนวณอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัด (AF_y / AF_z) และอัตราส่วนแรงตัด ($F_{y(\max)} - F_{y(\min)} / F_{y(s)}$) ซึ่งจะใช้ในการบ่อนข้อมูลเข้าโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป

4) จากข้อมูลเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีดตัด และมุมคายเศษวัสดุ รวมถึงอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัด (AF_y / AF_z) สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิวและ ($F_{y(\max)} - F_{y(\min)} / F_{y(s)}$) สำหรับวิเคราะห์ความตรง นำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับของโครงข่ายประสาทเทียม ในการพยากรณ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางและความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง

5) นำข้อมูลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมาเปรียบเทียบกับวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด

3.5.2 วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Residual Analysis: e_{ijk}) เป็นดัชนีหนึ่งที่ยืนยันว่าผลการทดลอง และตัวแบบสมการเส้นถดถอย (Regression Model) ที่จะใช้เป็นตัวแทนทำนายพฤติกรรมของปัจจัยเชิงอิสระได้มากน้อยเพียงใด เนื่องจากในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมจำนวนมาก และปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนได้ โดยความคลาดเคลื่อนของการทดลองต้องมีลักษณะเป็น $NID(0, \sigma^2)$ สามารถคำนวณได้จาก ผลต่างระหว่างค่าผลลัพธ์จากการทดลองกับค่าที่ประมาณจากตัวแบบ ณ ที่นี้คือการประมาณจากโครงข่ายประสาทเทียม

ในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนนิยมพิจารณาจากกราฟ หรือค่า P-Value ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Minitab ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Test) เป็นการทดสอบความคลาดเคลื่อนของการทดลองว่ามีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ สังเกตจาก Normality plot หากข้อมูลกระจายตัวแบบปกติ จุดข้อมูลควรมีแนวโน้มการเรียงตัวกันในแนวเส้นตรง ไม่จับกลุ่ม และระยะการกระจายตัวสม่ำเสมอ นอกจากการดูจุดข้อมูลแล้ว ในงานวิจัยนี้จะยอมรับความผิดพลาด (α) เท่ากับ 5% หากได้ค่า P-Value > 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent Test) เป็นการตรวจสอบความอิสระของความคลาดเคลื่อนการทดลอง (Independence of Error) โดยดูจาก Scatter plot ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (แกนตั้ง) กับระยะเวลาการเก็บข้อมูล (แกนนอน) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเมื่อการทดลองต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานหรือมีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มารบกวนระหว่างการทดลอง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนควรมีอิสระต่อกัน จุดของข้อมูลจะมีลักษณะการกระจายตัวแบบไม่มีรูปแบบที่แน่นอน รวมถึงไม่มีแนวโน้มการกระจายตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

3) การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability Test) เป็นการทดสอบการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนการทดลอง โดยดูจาก Scatter plot ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของความผันแปรตลอดช่วงของปัจจัย (Homoscedasticity) ซึ่งการกระจายตัวควรมีลักษณะจุดข้อมูลที่ไม่เป็นแนวโน้ม หรือมีการจับกลุ่มข้อมูล



บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

สืบเนื่องมาจากวิธีและขั้นตอนการทดลองดังกล่าว ทำให้ได้ผลของการทดลองที่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงตัดกับความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน รวมถึงเงื่อนไขการตัดที่เกิดขึ้นบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อนำมาพยากรณ์ผิวชิ้นงานโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีจุมุมมีดตัด และมุมคายเศษวัสดุ รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์และความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด (AF_y / AF_z) และอัตราส่วนแรงตัด ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$) ตามลำดับ

4.1 ผลการทดลอง

ทำการทดลองตามเงื่อนไขการทดลองความขรุขระผิวชิ้นงาน (ตารางที่ 3.2) และความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (ตารางที่ 3.3) ประกอบด้วยปัจจัยและผลที่ใช้ในการทดลองที่ใช้ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1) ความเร็วตัด (V) | หน่วย รอบต่อนาที (m/min) |
| 2) อัตราการป้อนตัด (f) | หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev) |
| 3) ความลึกในการตัด (D) | หน่วย มิลลิเมตร (mm) |
| 4) รัศมีจุมุมมีดตัด (R_n) | หน่วย มิลลิเมตร (mm) |
| 5) มุมคายเศษวัสดุ (γ) | หน่วย องศา (degree) |

ผลที่ได้จากการทดลอง

- 1) อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงป้อนตัดส่วนแรงตัดหลัก (AF_y / AF_z)
- 2) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) หน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)
- 3) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) หน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)
- 4) อัตราส่วนของผลต่างแรงป้อนตัดพลวัตเทียบกับแรงป้อนตัดสถิต ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$)
- 5) ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน (S_r) หน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงาน

Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	Rake angle	AF _y /AF _z	R _a (μm)	R _z (μm)
1	180	0.2	0.2	0.8	11	0.955	1.521	5.804
2	180	0.8	0.2	0.4	11	6.859	2.782	9.402
3	180	0.2	0.3	0.4	11	0.578	5.116	21.459
4	100	0.8	0.1	0.8	-6	1.890	5.116	21.259
5	180	0.8	0.2	0.8	11	0.686	2.150	7.358
6	100	0.2	0.1	0.8	11	1.063	2.328	3.373
7	180	0.5	0.3	0.4	11	0.544	5.167	23.334
8	100	0.8	0.1	0.8	11	0.765	1.164	5.476
9	260	0.5	0.2	0.4	11	0.788	2.833	9.941
10	260	0.2	0.1	0.4	11	1.040	0.562	3.023
11	100	0.2	0.1	0.4	-6	0.825	1.825	6.194
12	100	0.2	0.2	0.8	11	0.764	1.572	6.707
13	180	0.2	0.1	0.4	-6	0.982	0.983	4.350
14	100	0.2	0.1	0.4	11	1.054	1.154	4.828
15	180	0.5	0.3	0.8	-6	0.781	2.332	12.061
16	260	0.8	0.1	0.4	-6	0.917	0.923	5.259
17	260	0.8	0.2	0.8	-6	1.085	1.723	6.364
18	260	0.2	0.1	0.4	-6	1.093	0.813	3.834
19	260	0.2	0.1	0.8	-6	0.987	0.833	2.163
20	260	0.2	0.1	0.8	11	1.121	0.415	2.109
21	180	0.5	0.3	0.4	-6	1.070	5.723	23.141
22	100	0.5	0.1	0.4	-6	0.674	3.155	12.525
23	100	0.5	0.1	0.4	11	0.978	1.452	6.089
24	100	0.2	0.3	0.8	-6	0.791	3.159	11.496
25	180	0.5	0.2	0.4	-6	1.104	2.850	10.430
26	260	0.5	0.2	0.4	-6	0.906	3.098	10.955
27	100	0.5	0.1	0.8	11	1.109	0.639	4.198

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงาน (ต่อ)

Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R_n (mm)	Rake angle	AF_y/AF_z	R_a (μm)	R_z (μm)
28	260	0.2	0.2	0.8	11	0.807	1.262	6.611
29	180	0.5	0.2	0.8	11	0.877	1.608	6.027
30	100	0.8	0.2	0.8	-6	1.026	2.159	9.258
31	100	0.2	0.2	0.4	-6	0.661	3.494	11.113
32	260	0.5	0.3	0.8	-6	0.789	3.104	11.482
33	180	0.8	0.1	0.4	11	0.940	0.776	3.745
34	260	0.8	0.3	0.4	-6	0.871	6.752	25.951
35	180	0.8	0.3	0.8	-6	0.991	3.659	12.465
36	260	0.2	0.3	0.8	-6	1.005	3.238	11.212
37	100	0.8	0.1	0.4	11	0.902	1.564	7.413
38	100	0.8	0.3	0.4	11	0.795	4.410	20.906
39	260	0.8	0.3	0.8	11	0.841	3.075	11.598
40	100	0.8	0.1	0.4	-6	0.930	1.366	7.060
41	100	0.5	0.2	0.4	11	0.645	3.114	10.136
42	180	0.2	0.3	0.8	11	0.691	2.917	11.881
43	260	0.8	0.1	0.8	-6	1.283	0.886	2.946
44	260	0.8	0.2	0.8	11	0.633	1.726	6.242
45	260	0.5	0.2	0.8	11	0.824	1.766	6.652
46	180	0.5	0.3	0.8	11	0.678	3.458	13.607
47	260	0.8	0.3	0.4	11	0.824	6.200	23.716
48	100	0.5	0.3	0.4	-6	1.114	5.767	24.036
49	260	0.8	0.2	0.4	-6	0.910	3.734	12.156
50	260	0.8	0.2	0.4	11	0.635	2.870	9.634
51	180	0.8	0.2	0.4	-6	1.081	3.113	10.980
52	260	0.5	0.1	0.8	-6	1.129	0.756	2.700
53	180	0.5	0.2	0.4	11	0.875	2.491	10.343
54	180	0.2	0.2	0.4	-6	0.684	3.182	10.364

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงาน (ต่อ)

Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	Rake angle	AF _y /AF _z	R _a (μm)	R _z (μm)
55	100	0.5	0.2	0.8	-6	0.807	2.323	11.051
56	260	0.2	0.3	0.4	-6	0.740	6.790	24.419
57	180	0.2	0.3	0.8	-6	0.827	3.227	11.489
58	260	0.5	0.3	0.4	11	0.483	5.382	23.962
59	100	0.5	0.1	0.8	-6	0.863	1.186	5.797
60	180	0.2	0.2	0.4	11	0.764	2.310	8.504
61	180	0.5	0.1	0.8	-6	1.158	0.883	5.556
62	180	0.8	0.3	0.4	11	0.731	5.638	21.133
63	100	0.8	0.2	0.4	11	0.629	2.310	8.548
64	180	0.8	0.2	0.8	-6	1.052	1.697	6.584
65	100	0.2	0.2	0.4	11	0.729	2.774	9.663
66	260	0.5	0.3	0.4	-6	0.806	6.343	23.872
67	180	0.2	0.1	0.8	11	1.230	1.209	1.186
68	100	0.8	0.3	0.8	-6	0.935	3.538	12.656
69	180	0.2	0.1	0.8	-6	0.889	2.063	2.033
70	260	0.2	0.3	0.4	11	0.597	4.325	21.883
71	100	0.2	0.1	0.8	-6	0.892	3.373	2.328
72	260	0.5	0.3	0.8	11	0.606	2.902	12.265
73	100	0.8	0.3	0.8	11	0.635	3.238	16.589
74	260	0.5	0.1	0.8	11	1.424	0.433	2.364
75	260	0.5	0.1	0.4	11	0.838	0.636	3.100
76	260	0.8	0.1	0.8	11	1.020	0.566	2.700
77	180	0.5	0.1	0.8	11	0.800	0.480	2.766
78	100	0.2	0.3	0.4	-6	0.542	6.597	23.535
79	180	0.5	0.2	0.8	-6	0.740	1.802	6.755
80	180	0.8	0.1	0.4	-6	0.917	0.923	5.259
81	180	0.8	0.1	0.8	-6	0.770	1.746	8.100

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงาน (ต่อ)

Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	Rake angle	AF _y /AF _z	R _a (μm)	R _z (μm)
82	260	0.2	0.3	0.8	11	0.728	2.444	11.212
83	260	0.8	0.1	0.4	11	0.825	0.785	3.588
84	100	0.8	0.3	0.4	-6	1.051	6.325	24.781
85	100	0.5	0.3	0.8	11	0.614	3.101	12.496
86	180	0.8	0.1	0.8	11	1.093	0.575	3.066
87	100	0.5	0.2	0.8	11	0.637	2.035	8.545
88	260	0.5	0.2	0.8	-6	0.881	1.820	6.851
89	180	0.2	0.2	0.8	-6	0.832	1.206	5.849
90	100	0.2	0.3	0.8	11	0.703	2.982	11.489
91	180	0.5	0.1	0.4	-6	0.777	0.926	4.651
92	180	0.2	0.3	0.4	-6	0.569	7.031	28.125
93	260	0.8	0.3	0.8	-6	0.753	3.428	11.773
94	180	0.2	0.1	0.4	11	1.042	0.684	3.256
95	100	0.8	0.2	0.8	11	0.739	1.796	6.896
96	100	0.8	0.2	0.4	-6	0.682	3.027	11.831
97	260	0.2	0.2	0.8	-6	0.826	1.675	7.101
98	180	0.5	0.1	0.4	11	1.170	0.703	4.328
99	180	0.8	0.3	0.4	-6	1.123	6.297	24.394
100	180	0.8	0.3	0.8	11	0.771	3.252	15.131
101	100	0.2	0.2	0.8	-6	0.800	1.820	8.540
102	100	0.2	0.3	0.4	11	0.794	4.631	19.458
103	260	0.5	0.1	0.4	-6	0.949	0.844	4.391
104	100	0.5	0.3	0.4	11	0.563	4.157	17.118
105	100	0.5	0.2	0.4	-6	1.102	4.740	10.335
106	100	0.5	0.3	0.8	-6	0.717	3.312	16.662
107	260	0.2	0.2	0.4	-6	0.801	3.127	10.335
108	260	0.2	0.2	0.4	11	0.874	2.040	7.852

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์

Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	Rake angle	$\left(\frac{F_{y(max)}-F_{y(min)}}{F_{y(s)}}\right)$	S _t (μm)
1	200	0.4	0.15	0.8	-6	0.558	8.272
2	200	0.4	0.20	0.8	-6	0.629	10.794
3	200	0.4	0.25	0.8	-6	0.841	14.477
4	150	0.4	0.15	0.8	-6	0.621	12.083
5	150	0.4	0.20	0.8	-6	0.856	14.370
6	150	0.4	0.25	0.8	-6	1.074	17.720
7	100	0.4	0.15	0.8	-6	0.702	12.525
8	100	0.4	0.20	0.8	-6	1.144	17.846
9	100	0.4	0.25	0.8	-6	1.210	18.812
10	200	0.6	0.15	0.8	-6	0.565	8.360
11	200	0.6	0.20	0.8	-6	0.673	11.431
12	200	0.6	0.25	0.8	-6	0.848	15.002
13	150	0.6	0.15	0.8	-6	0.664	13.634
14	150	0.6	0.20	0.8	-6	0.844	15.609
15	150	0.6	0.25	0.8	-6	1.142	18.688
16	100	0.6	0.15	0.8	-6	0.802	13.943
17	100	0.6	0.20	0.8	-6	1.103	18.335
18	100	0.6	0.25	0.8	-6	1.268	20.090
19	200	0.8	0.15	0.8	-6	0.571	9.744
20	200	0.8	0.20	0.8	-6	0.700	12.552
21	200	0.8	0.25	0.8	-6	0.941	16.175
22	150	0.8	0.15	0.8	-6	0.761	14.240
23	150	0.8	0.20	0.8	-6	0.957	16.090
24	150	0.8	0.25	0.8	-6	1.204	19.563
25	100	0.8	0.15	0.8	-6	0.891	17.012
26	100	0.8	0.20	0.8	-6	1.178	18.965
27	100	0.8	0.25	0.8	-6	1.346	21.079

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (ต่อ)

Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	Rake angle	$\left(\frac{F_{y(max)}-F_{y(min)}}{F_{y(s)}}\right)$	S _t (μm)
28	200	0.4	0.15	0.4	-6	0.666	12.217
29	200	0.4	0.20	0.4	-6	1.086	16.492
30	200	0.4	0.25	0.4	-6	1.342	22.891
31	150	0.4	0.15	0.4	-6	0.754	13.436
32	150	0.4	0.20	0.4	-6	1.210	17.919
33	150	0.4	0.25	0.4	-6	1.408	24.107
34	100	0.4	0.15	0.4	-6	0.755	13.801
35	100	0.4	0.20	0.4	-6	1.252	19.500
36	100	0.4	0.25	0.4	-6	1.734	26.171
37	200	0.6	0.15	0.4	-6	0.724	12.643
38	200	0.6	0.20	0.4	-6	1.013	17.470
39	200	0.6	0.25	0.4	-6	1.743	27.109
40	150	0.6	0.15	0.4	-6	0.777	14.201
41	150	0.6	0.20	0.4	-6	1.113	18.341
42	150	0.6	0.25	0.4	-6	1.893	28.391
43	100	0.6	0.15	0.4	-6	0.846	14.080
44	100	0.6	0.20	0.4	-6	1.315	21.616
45	100	0.6	0.25	0.4	-6	2.290	30.556
46	200	0.8	0.15	0.4	-6	0.803	13.540
47	200	0.8	0.20	0.4	-6	1.141	17.631
48	200	0.8	0.25	0.4	-6	1.979	29.015
49	150	0.8	0.15	0.4	-6	0.825	14.773
50	150	0.8	0.20	0.4	-6	1.254	20.724
51	150	0.8	0.25	0.4	-6	2.222	30.435
52	100	0.8	0.15	0.4	-6	0.903	17.201
53	100	0.8	0.20	0.4	-6	2.624	22.581
54	100	0.8	0.25	0.4	-6	32.141	32.141

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (ต่อ)

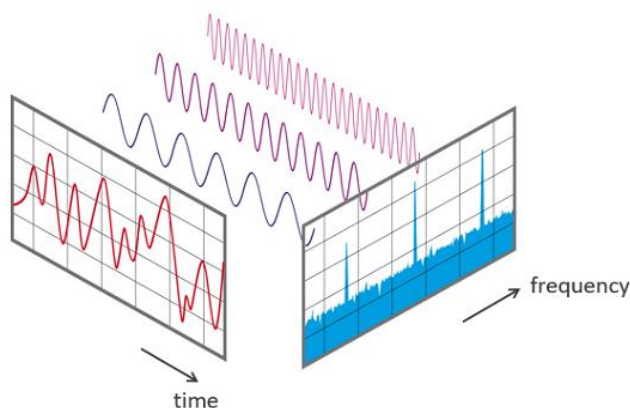
Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	Rake angle	$\left(\frac{F_{y(max)}-F_{y(min)}}{F_{y(s)}}\right)$	S _t (μm)
55	200	0.4	0.15	0.8	11	0.505	5.097
56	200	0.4	0.20	0.8	11	0.509	6.165
57	200	0.4	0.25	0.8	11	0.593	10.685
58	150	0.4	0.15	0.8	11	0.516	7.211
59	150	0.4	0.20	0.8	11	0.640	8.945
60	150	0.4	0.25	0.8	11	0.703	12.121
61	100	0.4	0.15	0.8	11	0.574	8.428
62	100	0.4	0.20	0.8	11	0.719	10.262
63	100	0.4	0.25	0.8	11	0.796	15.317
64	200	0.6	0.15	0.8	11	0.518	5.775
65	200	0.6	0.20	0.8	11	0.557	7.715
66	200	0.6	0.25	0.8	11	0.620	11.919
67	150	0.6	0.15	0.8	11	0.551	8.122
68	150	0.6	0.20	0.8	11	0.652	10.236
69	150	0.6	0.25	0.8	11	0.734	13.112
70	100	0.6	0.15	0.8	11	0.596	9.663
71	100	0.6	0.20	0.8	11	0.763	12.005
72	100	0.6	0.25	0.8	11	0.958	16.480
73	200	0.8	0.15	0.8	11	0.533	6.060
74	200	0.8	0.20	0.8	11	0.572	9.842
75	200	0.8	0.25	0.8	11	0.632	13.699
76	150	0.8	0.15	0.8	11	0.567	8.473
77	150	0.8	0.20	0.8	11	0.745	11.375
78	150	0.8	0.25	0.8	11	0.848	15.787
79	100	0.8	0.15	0.8	11	0.626	11.656
80	100	0.8	0.20	0.8	11	0.861	13.093
81	100	0.8	0.25	0.8	11	0.971	17.167

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (ต่อ)

Run Order	V (m/min)	D (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	Rake angle	$\left(\frac{F_{y(max)}-F_{y(min)}}{F_{y(s)}}\right)$	S _t (μm)
82	200	0.4	0.15	0.4	11	0.579	11.230
83	200	0.4	0.20	0.4	11	0.833	15.916
84	200	0.4	0.25	0.4	11	1.269	23.259
85	150	0.4	0.15	0.4	11	0.597	12.110
86	150	0.4	0.20	0.4	11	0.860	16.029
87	150	0.4	0.25	0.4	11	1.345	23.708
88	100	0.4	0.15	0.4	11	0.768	13.982
89	100	0.4	0.20	0.4	11	1.007	17.009
90	100	0.4	0.25	0.4	11	1.434	23.999
91	200	0.6	0.15	0.4	11	0.615	12.486
92	200	0.6	0.20	0.4	11	0.974	18.103
93	200	0.6	0.25	0.4	11	1.395	24.069
94	150	0.6	0.15	0.4	11	0.712	13.250
95	150	0.6	0.20	0.4	11	1.083	18.097
96	150	0.6	0.25	0.4	11	1.508	24.426
97	100	0.6	0.15	0.4	11	0.782	14.922
98	100	0.6	0.20	0.4	11	1.293	21.012
99	100	0.6	0.25	0.4	11	1.685	25.592
100	200	0.8	0.15	0.4	11	0.647	12.619
101	200	0.8	0.20	0.4	11	1.250	19.849
102	200	0.8	0.25	0.4	11	1.697	26.546
103	150	0.8	0.15	0.4	11	0.794	14.104
104	150	0.8	0.20	0.4	11	1.186	20.362
105	150	0.8	0.25	0.4	11	1.806	27.332
106	100	0.8	0.15	0.4	11	0.808	16.456
107	100	0.8	0.20	0.4	11	1.356	21.895
108	100	0.8	0.25	0.4	11	1.850	27.514

4.2 การวิเคราะห์ความตรง ความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

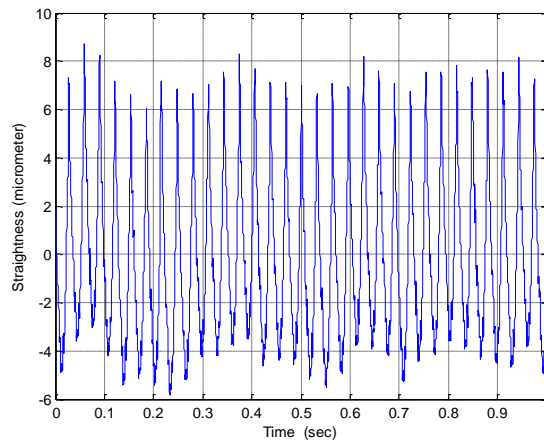
การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ถูกนำมาใช้ในการแปลงแรงตัดพลวัตจากโดเมนเวลา (Time Domain) ให้อยู่ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงความถี่จากข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง ด้วยหลักการที่ว่าเมื่อทราบความถี่และขนาดของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) ที่ความถี่และขนาดแอมพลิจูดต่างๆ ของแรงตัดพลวัตได้ หรือที่เรียกว่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum Density: PSD) ของแรงตัดพลวัตนั้น ทำให้ทราบถึงการกระจายความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตในย่านความถี่ต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานได้ [8] งานวิจัยนี้ใช้ค่าแรงตัดในโดเมนเวลาเป็นปัจจัยเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่อค่าความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด ซึ่งต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเชิงความถี่ก่อน



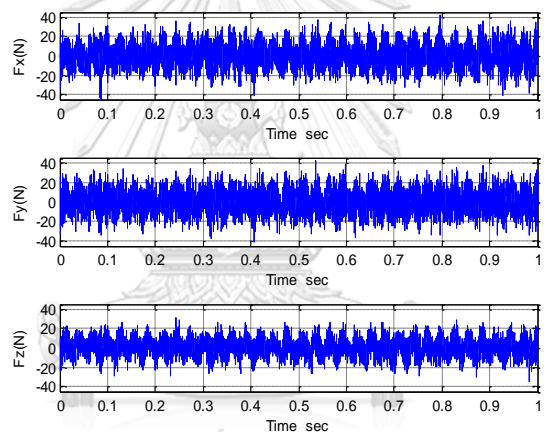
รูปที่ 4.1 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วระหว่างโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [36]

4.2.1 การวิเคราะห์ความตรงและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับข้อมูลความตรงของชิ้นงาน โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของแรงตัดพลวัตและข้อมูลความตรงของชิ้นงาน โดยยกตัวอย่างที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อ นาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา ในโดเมนเวลาสำหรับความตรงและแรงตัด ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความตรงเปียงหนีสุนัขในงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา



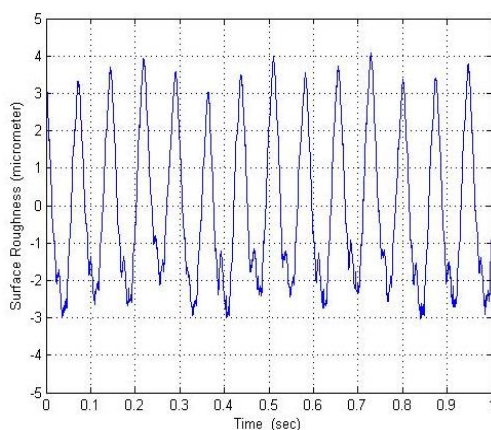
รูปที่ 4.3 แรงตัดในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลความตรงของชิ้นงาน และข้อมูลแรงตัดพลวัตเทียบกับเวลาในโดเมนเวลา พบว่าสัญญาณทั้งสองมีลักษณะเป็นลูกคลื่นเช่นเดียวกัน และยังมีจำนวนลูกคลื่นใกล้เคียงกันอีกด้วย

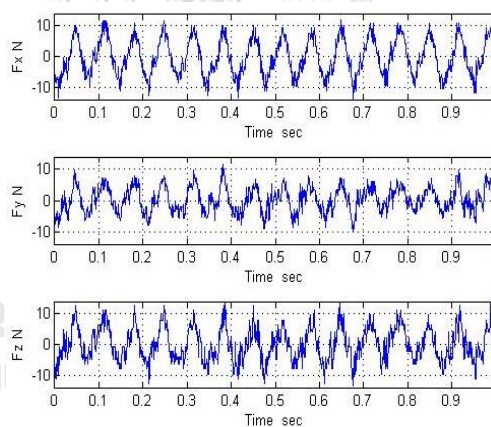
4.2.2 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของความตรง ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับข้อมูลความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของแรงตัดพลวัตและข้อมูลความตรงของชิ้นงาน โดยยกตัวอย่างที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อ

รอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีงมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา
 ในโดเมนเวลาสำหรับความตรงและแรงตัด ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีงมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา



รูปที่ 4.5 แรงตัดในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีงมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลความตรงของชิ้นงาน และข้อมูลแรงตัด พลวัตเทียบกับเวลาในโดเมนเวลา พบว่าสัญญาณทั้งสองมีลักษณะเป็นลูกคลื่นเช่นเดียวกัน และยังมีจำนวนลูกคลื่นใกล้เคียงกัน เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ที่จุดอ้างอิงเดียวกัน จากการหาระยะทางการตัดมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

4.2.3 การคำนวณระยะทางการกลึงใน 1 วินาที

การวิเคราะห์ข้อมูลในโดเมนเวลาเพื่อหาความสัมพันธ์ของความตรง ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัต เพื่อคำนวณระยะทางการกลึงใน 1 วินาทีในการอ้างอิงเปรียบเทียบ เนื่องจากความตรงและความขรุขระผิวขึ้นงานใช้อัตราสุมเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที แต่แรงตัดพลวัตใช้อัตราสุมเท่ากับ 1,000 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงตัดพลวัตจึงต้องแปลงข้อมูลของความตรงและความขรุขระผิวขึ้นงานในระยะทางการกลึง 1 วินาที

- ความเร็วรอบเพลาสปินเดิล (Spindle speed: n) หรือจำนวนรอบที่ขึ้นงานหมุนต่อหนึ่งนาที มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (r/min หรือ rpm)

$$n = \frac{1,000 \times V}{\pi \times D} \quad (4.1)$$

เมื่อกำหนดให้

V = ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที: m/min)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร: mm)

1,000 = ตัวเลขคงที่สำหรับเปลี่ยนหน่วยมิลลิเมตร (mm) เป็นเมตร (m)

$$n = \frac{1,000 \times 100}{\pi \times 35} = 909.46 \text{ รอบต่อนาที} \quad (4.2)$$

- ความเร็วป้อน (Feed speed: V_f) ในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด ในกระบวนการกลึง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

$$V_f = f_n \times n \quad (4.3)$$

เมื่อกำหนดให้

f_n = อัตราป้อนต่อรอบ (มิลลิเมตรต่อรอบ: mm/r)

$$V_f = 0.3 \times 909.46 = 272.84 \text{ มิลลิเมตรต่อนาที} \quad (4.4)$$

- ระยะทางการตัด (s) ในการคำนวณจำนวนข้อมูลในระยะเวลาการกลึง 1 วินาที มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

$$s = \frac{V_f}{60} \quad (4.5)$$

$$s = \frac{272.84}{60} = 4.55 \text{ มิลลิเมตร} \quad (4.6)$$

ดังนั้น ระยะเวลาในการกลึง 1 วินาที เท่ากับ 4.55 มิลลิเมตร

- คำนวณจำนวนข้อมูลเพื่อใช้ในการแปลงค่า

เครื่องวัดผิวขึ้นงานได้ทำการตั้งค่าความเร็วสำหรับการวัดผิว คือ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ในช่วงระยะการวัด 12.5 มิลลิเมตร นั่นคือการวัดผิวขึ้นงานแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการวัดทั้งหมด

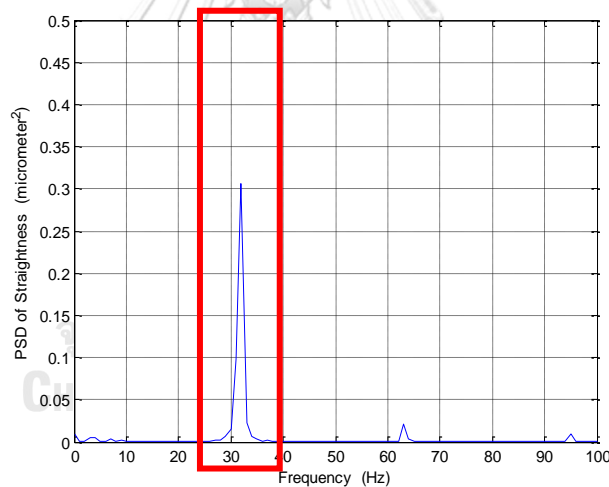
เท่ากับ 25 วินาที โดยมีอัตราสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นสามารถคำนวณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในระยะเวลาทางการกลึง 1 วินาทีของค่าความขรุขระผิวเพื่อใช้เทียบกับจำนวนข้อมูลของแรงตัดพลวัตได้ดังนี้

$$\text{จำนวนข้อมูล} = \frac{\text{ระยะทางการกลึง 1 วินาที}}{0.5} \times 400 = \frac{4.55}{0.5} \times 400 = 3,640 \text{ ข้อมูล}$$

1) การคำนวณจำนวนข้อมูลความตรงของชิ้นงาน

จากรูปความตรงและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาในระยะเวลาที่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จำนวนลูกคลื่นของสัญญาณความตรงของชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลามีจำนวนประมาณ 32 ลูกคลื่นซึ่งเป็นจำนวนที่สอดคล้องกัน และเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว จะได้กราฟดังรูปที่ 4.6 กับ 4.7 ซึ่งแสดงข้อมูลความตรงของชิ้นงาน และแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ตามลำดับ พบว่าสัญญาณความตรงของชิ้นงานและแรงตัดพลวัตเกิดขึ้นที่ความถี่ 32 เฮิร์ตซ์ (Hz) เหมือนกัน

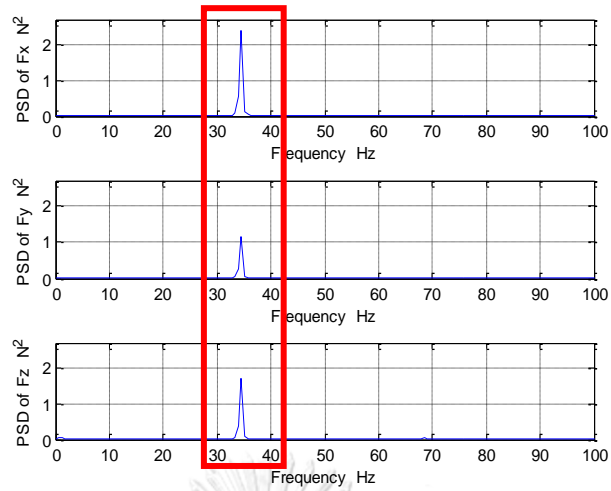
ความถี่ของความตรง



รูปที่ 4.6 ความตรงของชิ้นงานโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมกายเศษ

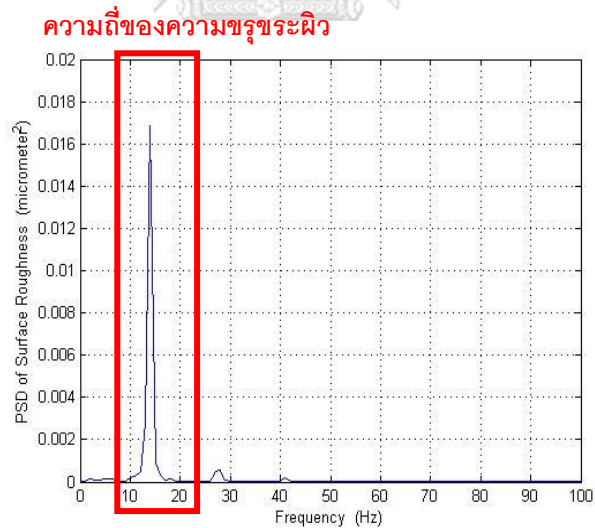
วัสดุ -6 องศา

ความถี่ของแรงตัดพลวัต

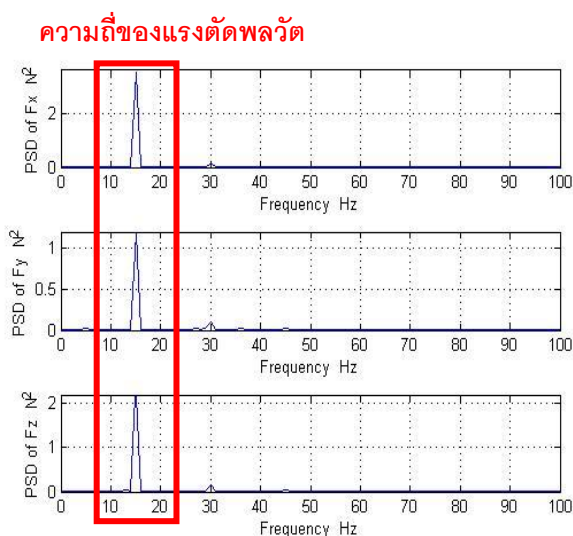


รูปที่ 4.7 แรงตัดในโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตร ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา

2) การคำนวณจำนวนข้อมูลความขรุขระผิวชิ้นงาน



รูปที่ 4.8 ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา



รูปที่ 4.9 แรงตัดในโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

จากรูปความความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาในระยะเวลาที่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ จำนวนลูกคลื่นของสัญญาณความตรงของชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลามีจำนวนประมาณ 15 ลูกคลื่นซึ่งเป็นจำนวนที่สอดคล้องกัน พร้อมทั้งนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว จะได้กราฟดังรูปที่ 4.8 กับ 4.9 ซึ่งแสดงข้อมูลความตรงของชิ้นงาน และแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ตามลำดับ พบว่าสัญญาณความตรงของชิ้นงานและแรงตัดพลวัตเกิดขึ้นที่ความถี่ 15 เฮิร์ตซ์ เช่นเดียวกัน

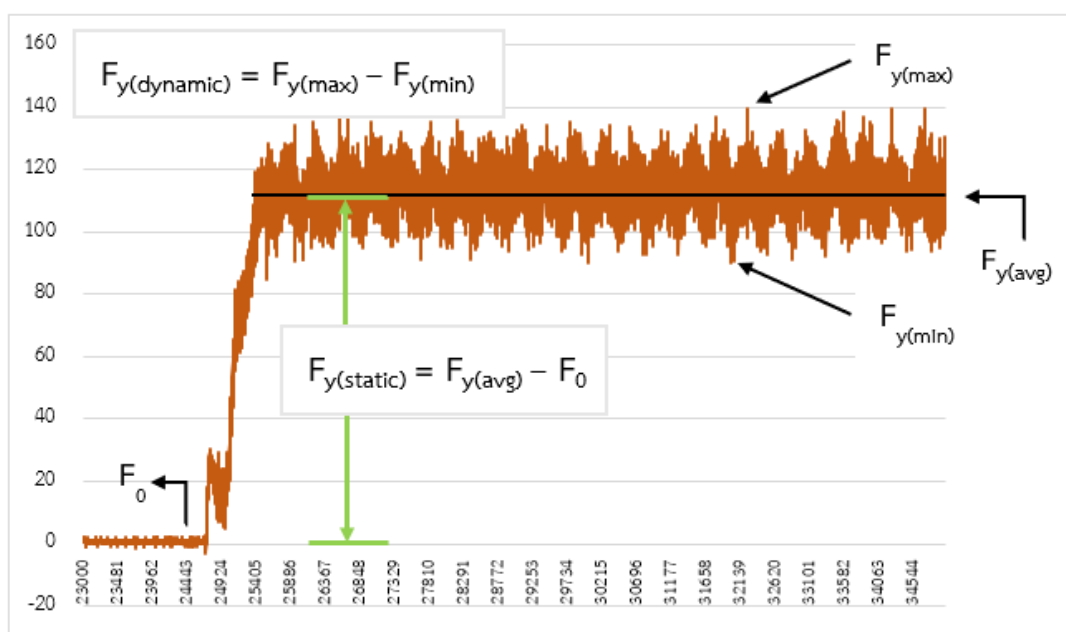
4.3 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

ผลจากการวิเคราะห์ความตรง ความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ พบว่าสัญญาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าทั้งค่าแรงตัดพลวัตและค่าความตรง รวมถึงค่าของแรงตัดพลวัตกับค่าความขรุขระผิวมีความสัมพันธ์สอดคล้องกันในโดเมนเวลาเช่นกัน เพราะเหตุนี้จึงนำแรงตัดพลวัตของแต่ละเงื่อนไขการตัดที่ทำการทดลองในโดเมนเวลา มาเป็นปัจจัยที่ใช้พยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับการกลึง โดยประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

4.3.1 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตของความตรงในโดเมนเวลา

การวิเคราะห์ความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลา ได้นำแรงป้อนตัด (F_y) มาพยากรณ์ความตรงผิว เพราะแรงป้อนตัดเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดรอยป้อนตัด (feed mark) ขึ้นบนผิวชิ้นงานที่ส่งผล

กระทบโดยตรงต่อค่าของความตรง เนื่องจากพิจารณาที่โดเมนเวลาพบว่าสัญญาณของแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน และมีความสอดคล้องกับอัตราการป้อนตัดชิ้นงาน ซึ่งกล่าวได้ว่า การตัดที่อัตราการป้อนตัดใด ๆ แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะมีลักษณะเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน และพบว่าแรงที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกันกับรอยป้อนตัด (feed mark) ที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานที่เป็นค่าบ่งบอกความตรงของชิ้นงาน โดยมีลักษณะเป็นลูกคลื่นที่สอดคล้องกัน

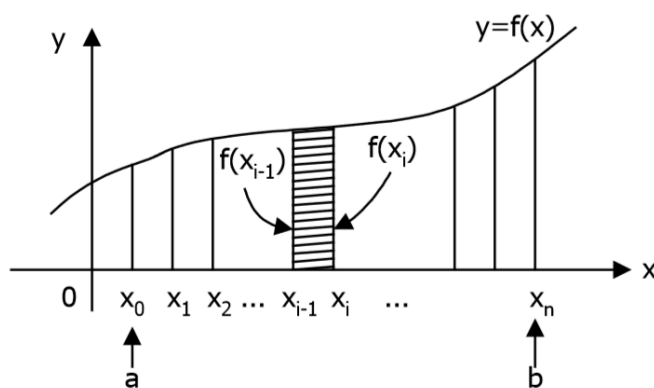


รูปที่ 4.10 การคำนวณแรงป้อนตัดที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลา

จากรูปที่ 4.10 สามารถอธิบายได้ว่าส่วนต่าง ๆ ของแรงตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_{y(max)}$) กับที่น้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) มีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความตรงที่เป็นส่วนต่าง ๆ ของความสูงของค่าความขรุขระผิวที่สูงที่สุด (Max) กับค่าที่น้อยที่สุด (Min) แต่แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นอาจแปรผันไปตามเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ดังนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตในทิศทางการป้อนตัด คำนวณได้จากผลต่างของแรงป้อนตัดพลวัตเทียบกับแรงป้อนตัดสถิต (Static feed force: $F_{y(s)}$) ในช่วงเวลาที่วัด ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$) จึงถูกนำมาใช้ในการทำนายค่าความตรงของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ เพื่อให้สามารถทำนายความตรงผิวชิ้นงานในขณะตัดแม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป

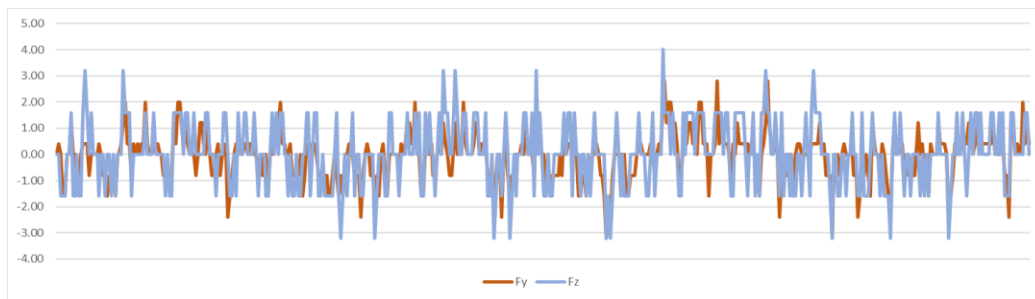
4.3.2 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตของความขรุขระผิวในโดเมนเวลา

ในส่วนของการวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลา ได้นำแรงป้อนตัด (F_y) และแรงตัดหลัก (F_z) มาทำนายความขรุขระผิว เพราะแรงตัดที่มากส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น โดยแรงป้อนตัดเป็นแรงที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิวมากที่สุด ในขณะที่แรงตัดหลักเกิดจากเงื่อนไขการตัด อย่างไรก็ตามแรงตัดนั้นอาจแปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันออกไป อัตราส่วนของแรงตัดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากอัตราส่วนแรงตัดนั้นถูกสันนิษฐานว่าสามารถคำนวณความขรุขระผิวชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด เพราะการใช้ข้อมูลที่เป็นการเฉลี่ยแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัด ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนและขาดความแม่นยำ ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดพลวัตระหว่างแรงตัดหลักและแรงป้อนตัด (AF_y / AF_z) โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดโดยไม่แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.11 การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู

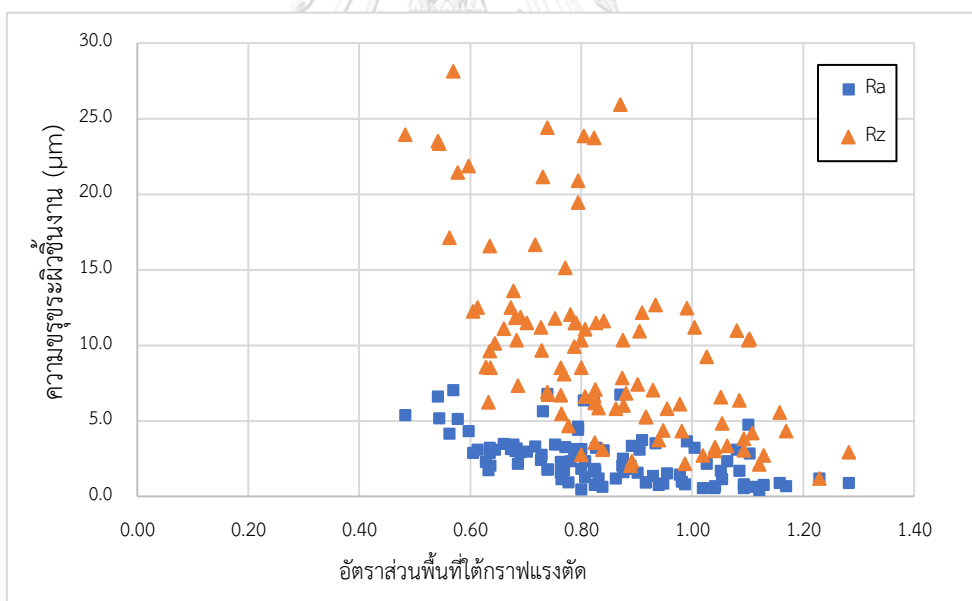
วิธีการประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Method) จากที่กล่าวมาในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องนั้น วิธีนี้สามารถหาพื้นที่ใต้โค้งโดยประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งได้จากการแบ่งพื้นที่ใต้โค้งออกเป็นส่วนย่อย n ส่วนเท่าๆ กัน ดังรูปที่ 4.11 โดยการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปแล้วนำพื้นที่ของแต่ละรูปมารวมกันจะได้คำตอบเป็นค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ ในช่วงตัวแปร x เปลี่ยนแปลงจาก a ถึง b เมื่อนำมาจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ 2.33



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างพื้นที่แรงป้อนตัดและแรงตัดหลักที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

4.4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงาน อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดและเงื่อนไขการตัด

4.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด

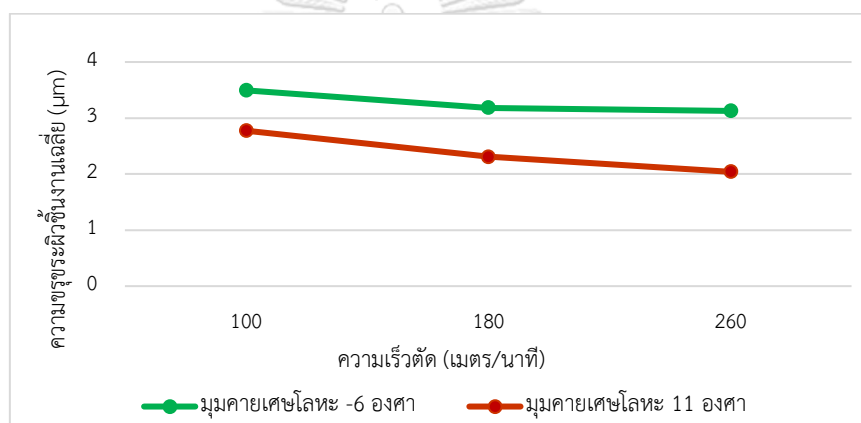
จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด พบว่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) แปรผกผันกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด เมื่ออัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงในทิศทางเดียวกัน กล่าวได้คือ ในขณะที่เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป ค่าอัตราส่วน

พื้นที่ใต้กราฟแรงตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)

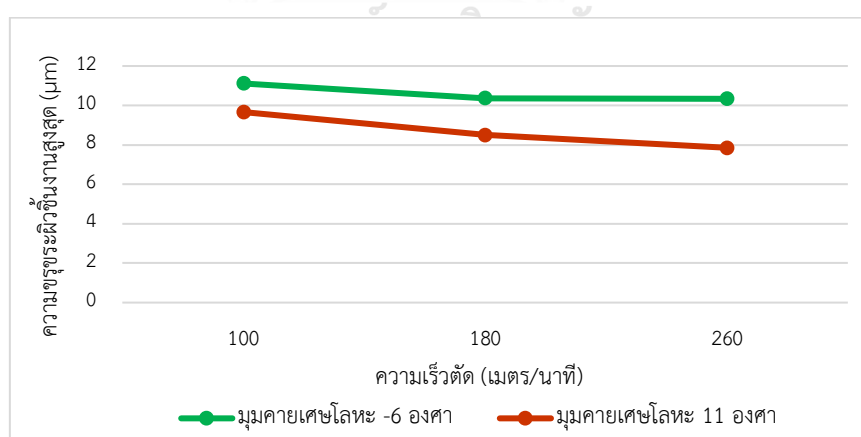
4.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัด

เป็นที่ทราบกันดีว่าเงื่อนไขการตัด อันได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รวมถึงรัศมีงมกมิตตัดและมุมคายเศษโลหะ ล้วนมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน จึงควรจะหาความสัมพันธ์ของปัจจัยข้างต้น (ตารางที่ 4.1) ต่อค่าความขรุขระผิวด้วย เพื่อการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดได้แม่นยำขึ้น

4.4.2.1 ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วตัด



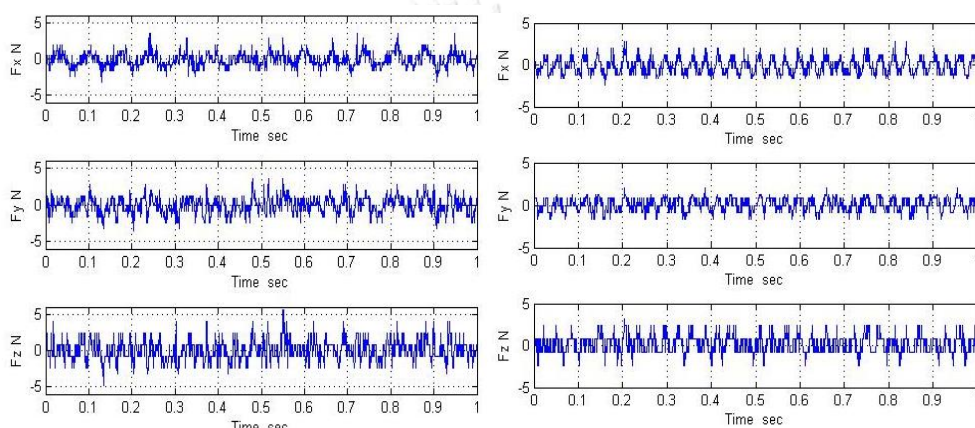
(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a)



(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.14 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีงมกมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา

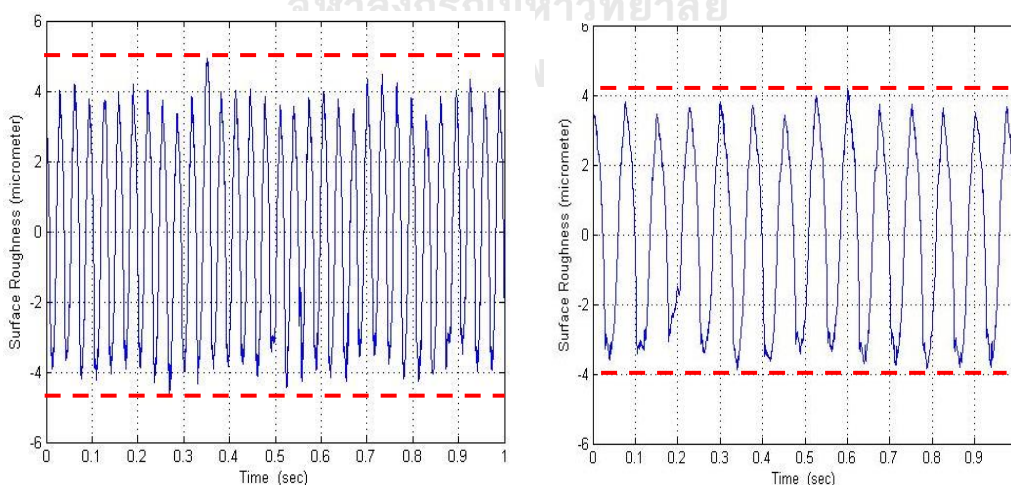
จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วตัดที่ 100, 180 และ 260 เมตรต่อนาทีตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันทั้งความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด นั่นคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Finish) ดีขึ้น และจากรูป 4.14 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ยและสูงสุด ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เพราะมุมคายเศษที่เป็นบวกจะให้เศษวัสดุที่เกิดขึ้นขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดและเศษวัสดุจะน้อยลง ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ผิวที่ได้จึงมีคุณภาพดี



(ก) ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที

รูปที่ 4.15 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีงูมมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา



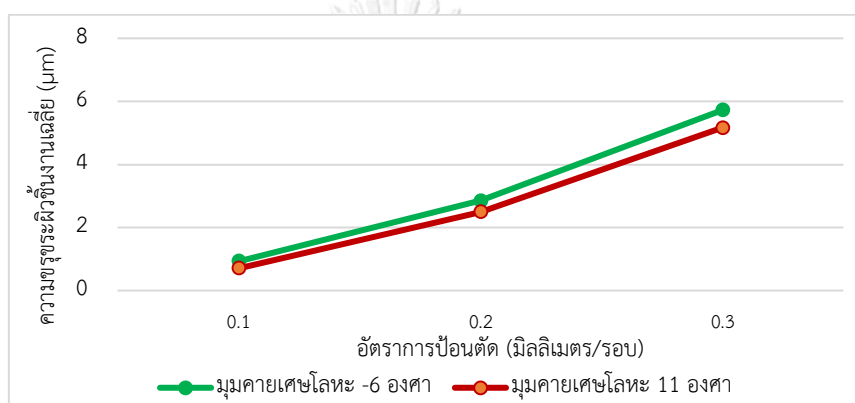
(ก) ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที

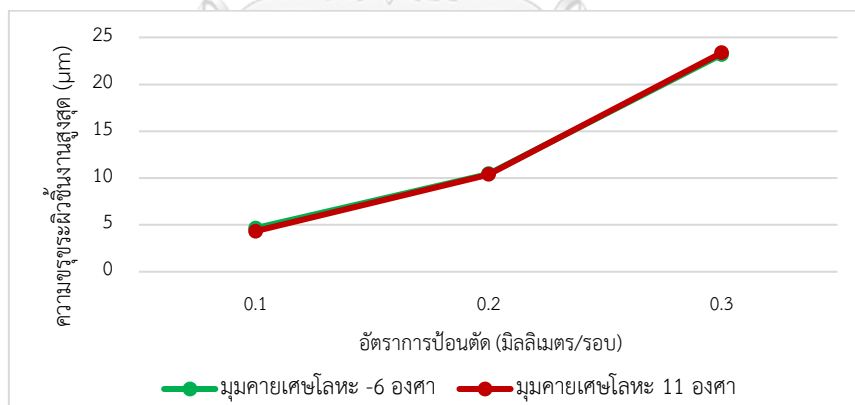
รูปที่ 4.16 แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีงูมมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

ซึ่งจากการวิเคราะห์การทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วตัดจะให้วัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มขึ้น เพราะเกิดความร้อนสะสมที่ชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานตัดง่าย ใช้แรงตัดไม่มาก แรงตัดจึงมีแนวโน้มลดลง ความขรุขระผิวจึงลดลง จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 เปรียบเทียบแรงตัดพลวัตที่ความเร็วตัด 100 และ 260 เมตรต่อนาที ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา เห็นได้ว่าที่ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที มีแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตน้อยกว่าที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที และส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานลดลงเมื่อใช้ความเร็วตัดที่ 260 เมตรต่อนาที

4.4.2.2 ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด



(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a)

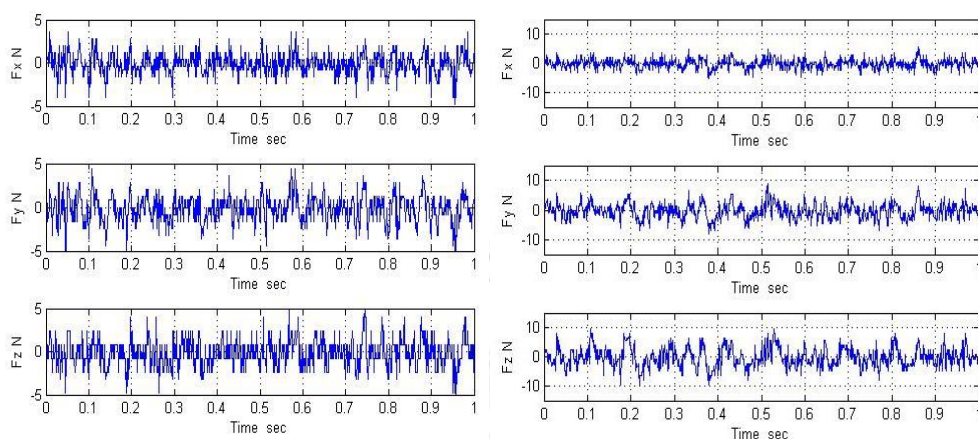


(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.17 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา

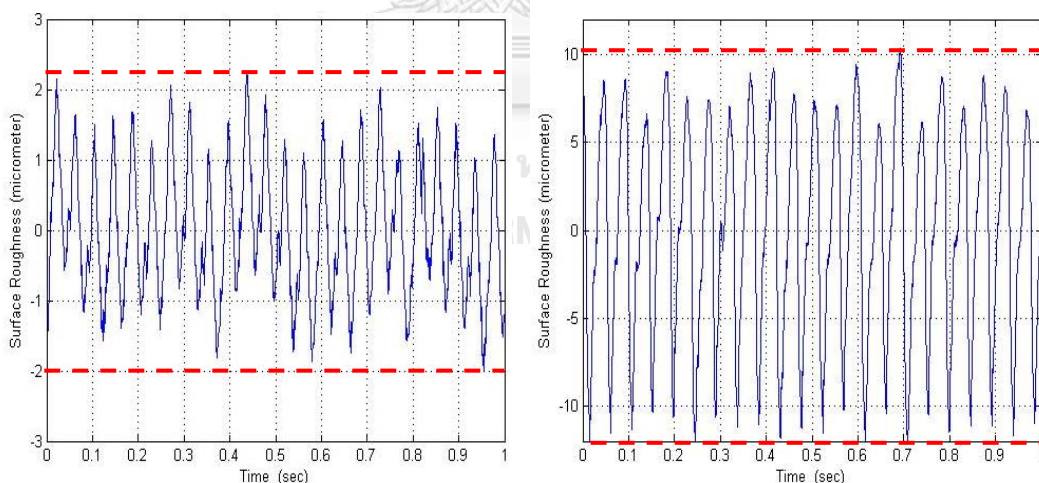
จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัดที่ 0.1, 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้ามกันทั้งความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด นั่นคือ เมื่ออัตราการป้อนตัด

เพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Finish) ลดลง และจากรูป 4.17 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ยและสูงสุด ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เพราะมุมคายเศษที่เป็นบวกจะให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของเศษวัสดุลดลง จึงใช้แรงตัดน้อย ผิวที่ได้จึงมีคุณภาพดี



(ก) อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ (ข) อัตราการป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4.18 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา



(ก) อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ

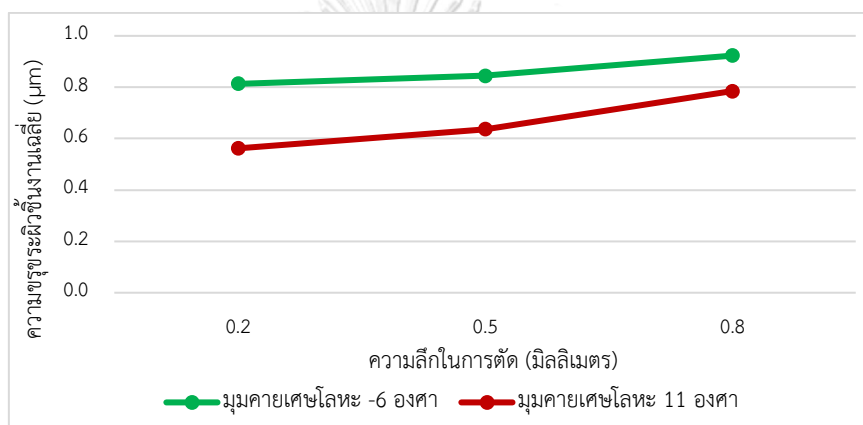
(ข) อัตราการป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4.19 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

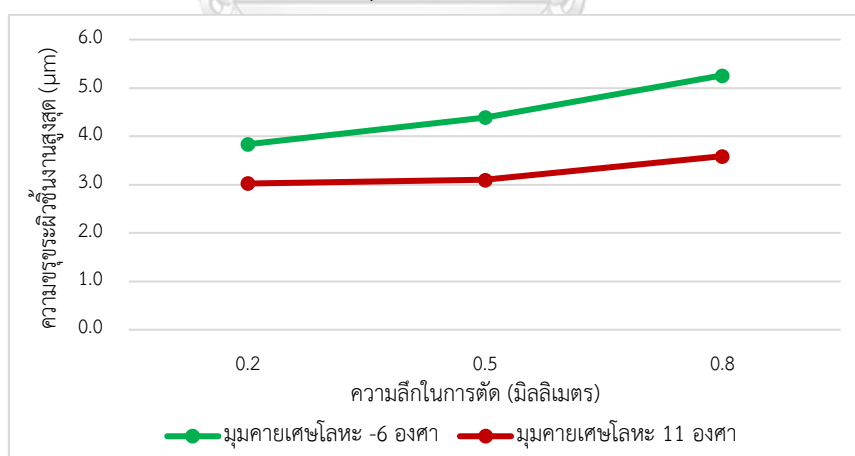
จากการวิเคราะห์การทดลองเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัดชิ้นงาน ส่งผลให้แรงตัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราการป้อนตัดที่สูงขึ้นทำให้พื้นที่การตัดมากขึ้น และเกิดแรงตัดในขณะตัดสูงขึ้น เป็น

สาเหตุให้ชิ้นงานมีความขรุขระผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.18 และ 4.19 เปรียบเทียบแรงตัดพลวัตที่อัตราการป้อนตัด 0.1 และ 0.3 ที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีงมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา เห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ มีแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตมากกว่าที่อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ เพราะจากการใช้พื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้น อาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัดและชิ้นงาน เป็นสาเหตุให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น

4.4.2.3 ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกในการตัด



(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a)

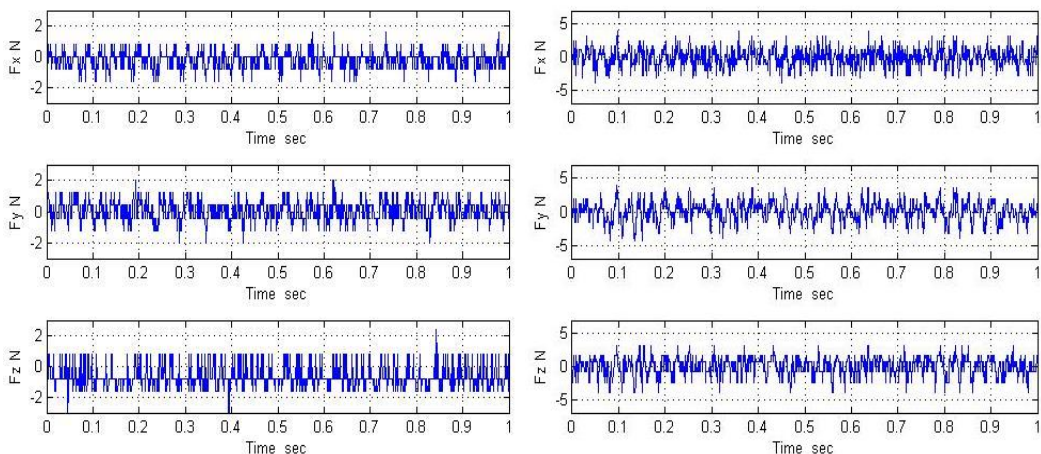


(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.20 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกในการตัดที่ 0.2, 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตรตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้ามกันทั้งความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด นั่นคือ เมื่อเพิ่มความลึกในการตัด ความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Finish) ลดลง และจากรูป 4.20 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ยและสูงสุด ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เพราะมุมคายเศษที่เป็นบวกจะให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีคุณภาพที่ดี เช่นเดียวกับความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัด และจากการวิเคราะห์การทดลองเมื่อความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงตัดเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพื้นที่การตัดระหว่างมีดตัดและชิ้นงานมากขึ้น แรงตัดที่เกิดขึ้นสูง จึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในการตัด เป็นสาเหตุให้ผิวชิ้นงานมีความขรุขระผิวมากขึ้น

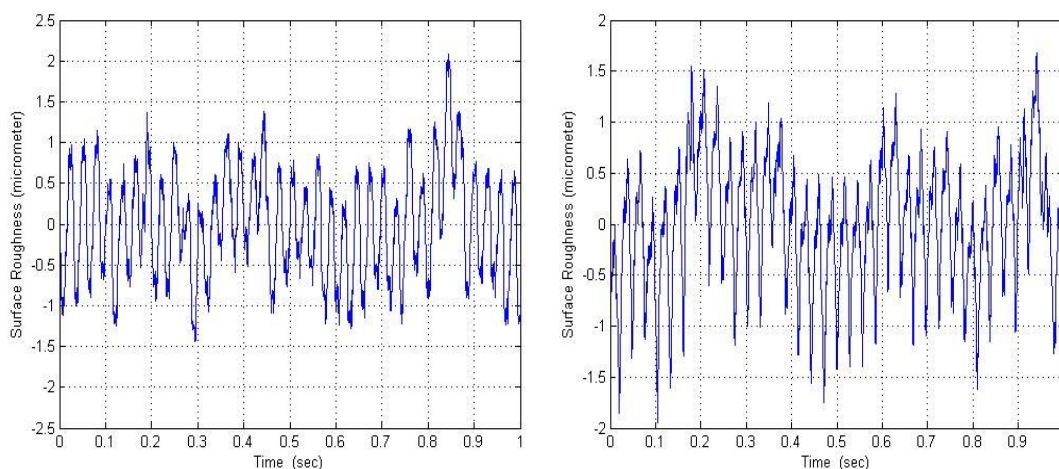
เมื่อนำแรงตัดพลวัตมาเปรียบเทียบกับที่ความลึกในการตัด 0.2, 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 เห็นได้ว่าที่ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร มีแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตมากกว่าที่ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับอัตราการป้อนตัด เพราะจากการใช้พื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้น อาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัดและชิ้นงาน เป็นสาเหตุให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น



(ก) ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร

(ข) ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.21 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่มีความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา



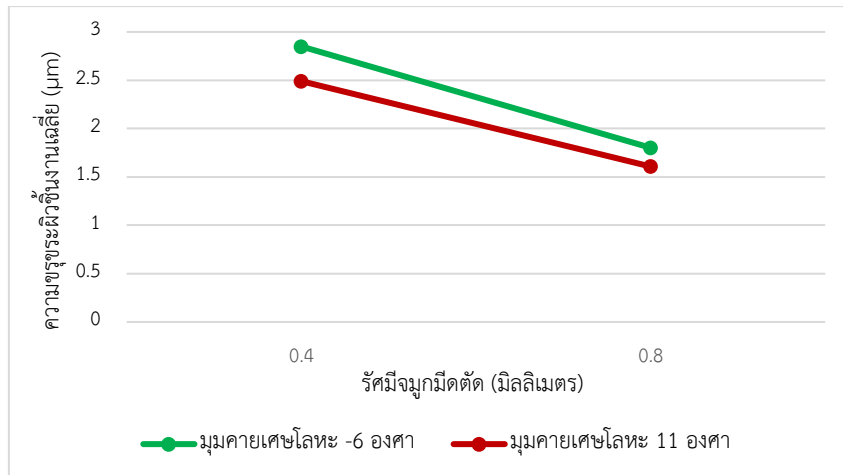
(ก) ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร

(ข) ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร

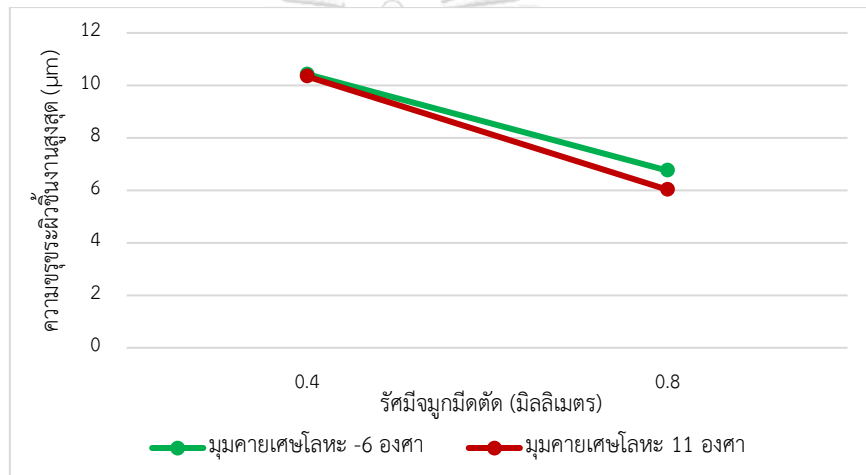
รูปที่ 4.22 แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา

4.4.2.4 ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับรัศมีจุมุกมีดตัด

ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและรัศมีจุมุกมีดตัดที่ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.23 พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้ามทั้งความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด นั่นคือ เมื่อรัศมีจุมุกมีดตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Finish) ดีขึ้น และจากรูป 4.23 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ยและสูงสุด ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เพราะมุมคายเศษที่เป็นบวกจะให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีคุณภาพที่ดี เช่นเดียวกับความเร็วตัด อัตราการป้อนตัดและความลึกในการตัด และจากการวิเคราะห์การทดลอง เมื่อเพิ่มรัศมีจุมุกมีดตัด จะช่วยลดรอยป้อนตัด (Feed mark) ที่ตกค้างบนผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.24 ทำให้ผิวชิ้นงานเรียบขึ้น

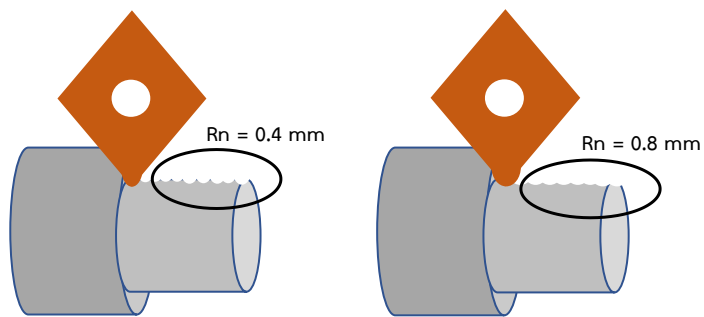


(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a)

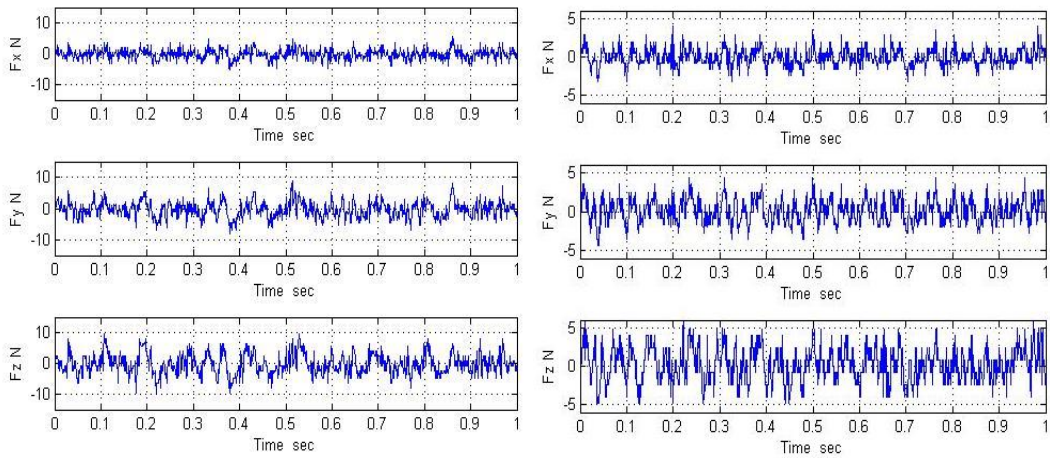


(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.23 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร ต่รอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร และมุมคายพิเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา



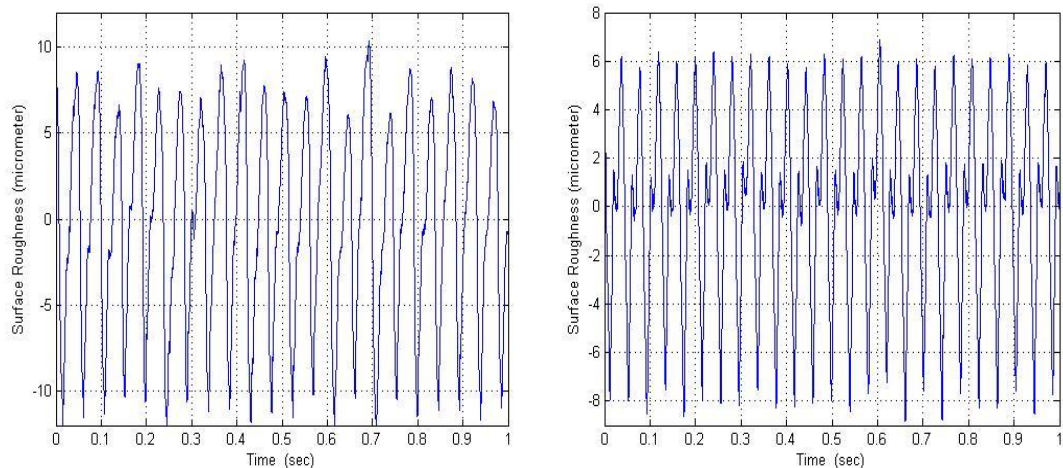
รูปที่ 4.24 อิทธิพลของรัศมีงูมิตตัดที่มีต่อคุณภาพของผิวชิ้นงาน



(ก) รัศมีจุมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร

(ข) รัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.25 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่มีความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา



(ก) รัศมีจุมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร

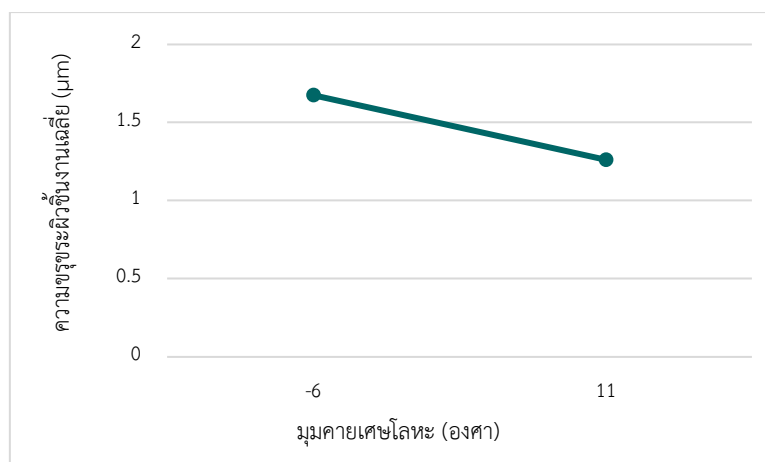
(ข) รัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.26 ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลาที่มีความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

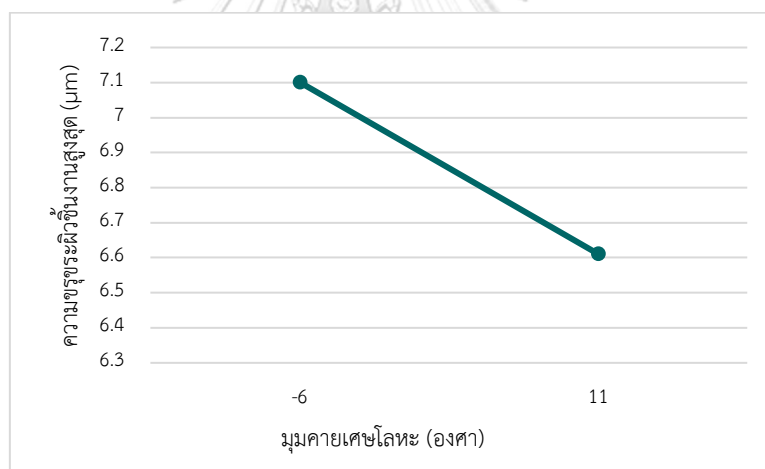
จากการเปรียบเทียบแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวในโดเมนเวลาที่รัศมีจุมกมีดตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 เห็นได้ว่าที่รัศมีจุมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร มีแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตที่มาก แสดงถึงการใช้แรงในการตัดที่มาก

ส่งผลให้มีความขรุขระผิวมากกว่าที่รัศมีงูมกมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกันกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากรูป 4.23

4.4.2.5 ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวขึ้นงานกับมุมคายเศษวัสดุ



(ก) ความขรุขระผิวขึ้นงานเฉลี่ย (R_a)



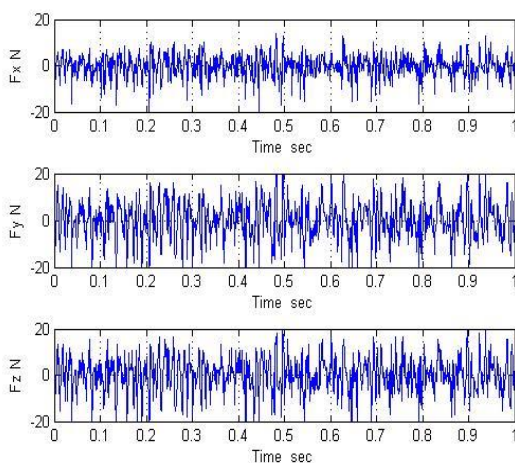
(ข) ความขรุขระผิวขึ้นงานสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.27 ความขรุขระผิวขึ้นงานที่ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร

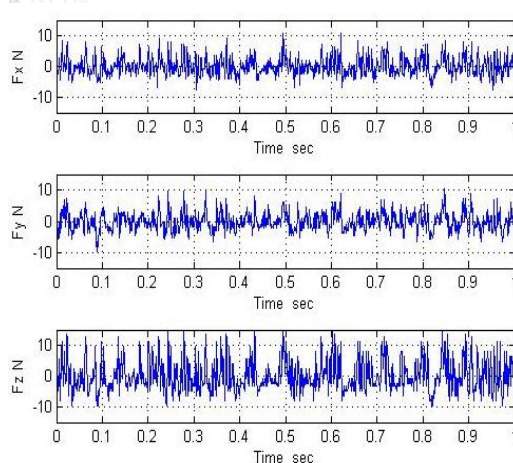
จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวขึ้นงานและมุมคายเศษวัสดุที่ -6, +11 องศาตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้ามกันทั้งความขรุขระผิวขึ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวขึ้นงานสูงสุด นั่นคือ เมื่อมุมคายเศษวัสดุเป็นบวก ความขรุขระผิวขึ้นงานมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ความเรียบผิวขึ้นงาน (Surface Finish) ดีขึ้น และจากรูป 4.14,

4.17 ,4.20 และ 4.23 ของความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด และรัศมีจุมุกมีดตัดตามลำดับ พบว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ยและสูงสุด ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เพราะมุมคายเศษที่เป็นบวกจะให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีคุณภาพที่

จากการวิเคราะห์การทดลองเมื่อมุมคายเศษวัสดุเพิ่มขึ้นหรือมุมคายเศษวัสดุเป็นบวกมากขึ้นจะทำให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดและเศษโลหะจะน้อยลง ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ผิวชิ้นงานที่ได้จึงดี เห็นได้จากการเปรียบเทียบแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวในโดเมนเวลาที่มุมคายเศษวัสดุ -6 และ +11 องศาที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตในมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา เล็กกว่าของมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา และในรูปที่ 4.29 แอมพลิจูดของมุมคายเศษ 11 องศา ก็เล็กกว่าของมุมคายเศษวัสดุ -6 องศาเช่นกัน เนื่องจากมุมคายเศษวัสดุที่เป็นบวกจะทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดน้อย ผิวชิ้นงานที่ได้จึงมีคุณภาพดี

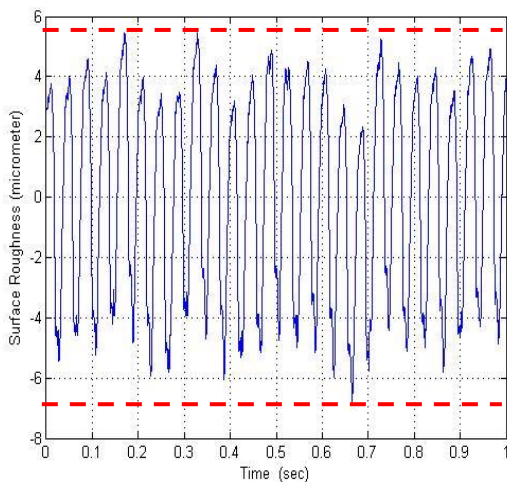


(ก) มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

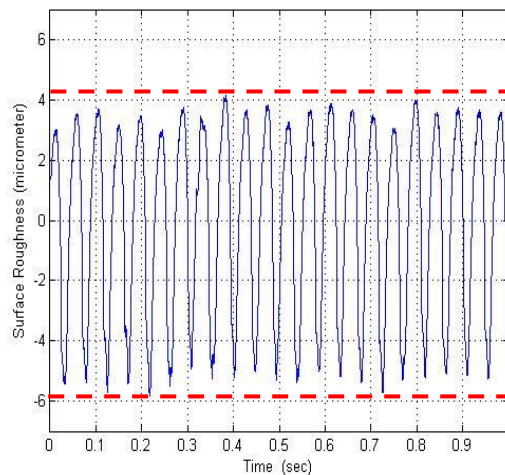


(ข) มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.28 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร



(ก) มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

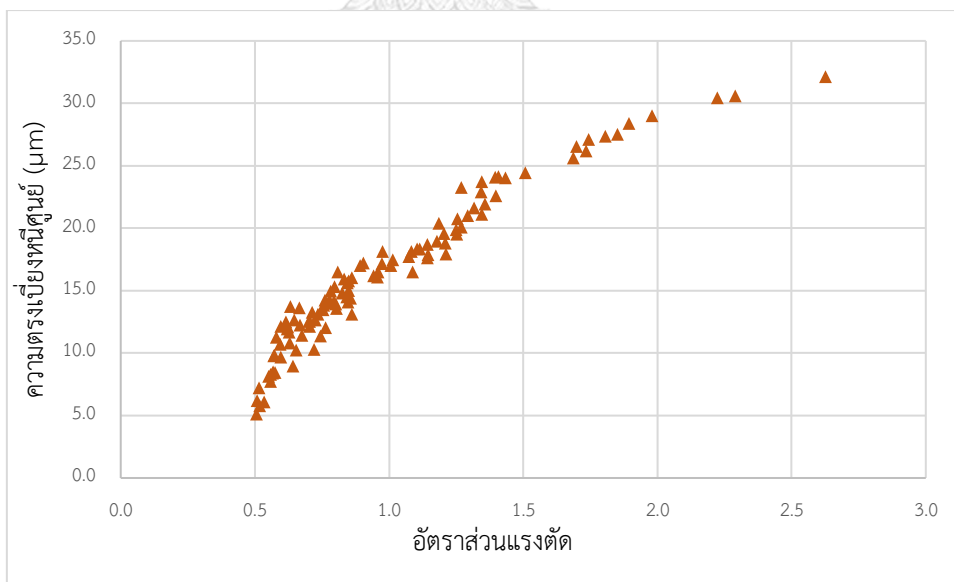


(ข) มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.29 ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับอัตราส่วนแรงตัดและเงื่อนไขการตัด

4.5.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับอัตราส่วนแรงตัด



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัด

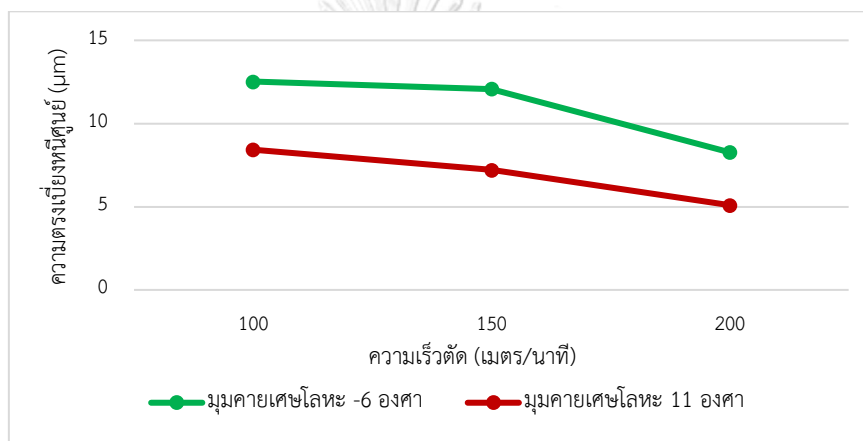
จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัด พบว่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน (S_e) แปรผันกับอัตราส่วนแรงตัด เมื่ออัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น

ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความตรงผิวชิ้นงานจึงลดลง จากความสัมพันธ์นี้ สรุปได้ว่า ในขณะที่เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป ค่าอัตราส่วนแรงตัดมีอิทธิพลต่อความตรงเบี่ยงหนีศูนย์

4.5.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับเงื่อนไขการตัด

เช่นเดียวกันกับความขรุขระผิวชิ้นงาน เงื่อนไขการตัด อันได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รวมถึงรัศมีงูมิตตัดและมุมคายเศษโลหะ ล้วนมีผลกระทบต่อค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ด้วยเช่นเดียวกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยข้างต้น (ตารางที่ 4.2) ต่อค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ เพื่อการทำนายความตรงผิวชิ้นงานในขณะตัดได้แม่นยำขึ้น

4.5.2.1 ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับความเร็วตัด

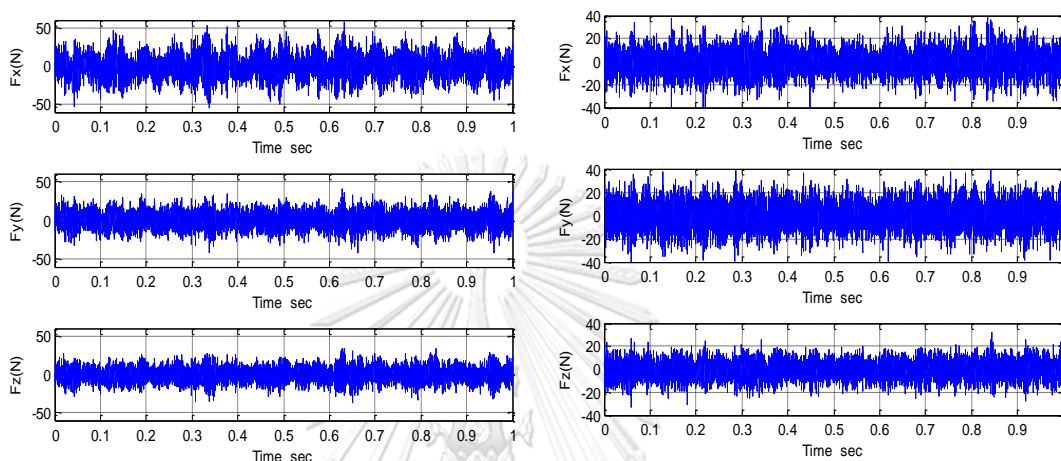


รูปที่ 4.31 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีงูมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา

จากรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานและความเร็วตัดที่ 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาทีตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง ความตรงผิวชิ้นงานจึงดีขึ้น และจากรูป 4.31 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์นั้น ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เพราะมุมคายเศษที่เป็นบวกจะให้เศษวัสดุที่เกิดขึ้นขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมิตตัดและเศษวัสดุจะน้อยลง ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ผิวที่ได้จึงมีคุณภาพดี

ซึ่งจากการวิเคราะห์การทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วตัดจะทำให้ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานลดลง แสดงว่าความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มดีขึ้น เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิในขณะตัดสูงขึ้น ชิ้นงานมีความอ่อนนุ่ม ทำให้ง่ายต่อการตัด แรงที่เกิดขึ้นขณะตัดจึงน้อยลง จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 เปรียบเทียบแรงตัดพลวัตและความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ในโดเมนเวลา

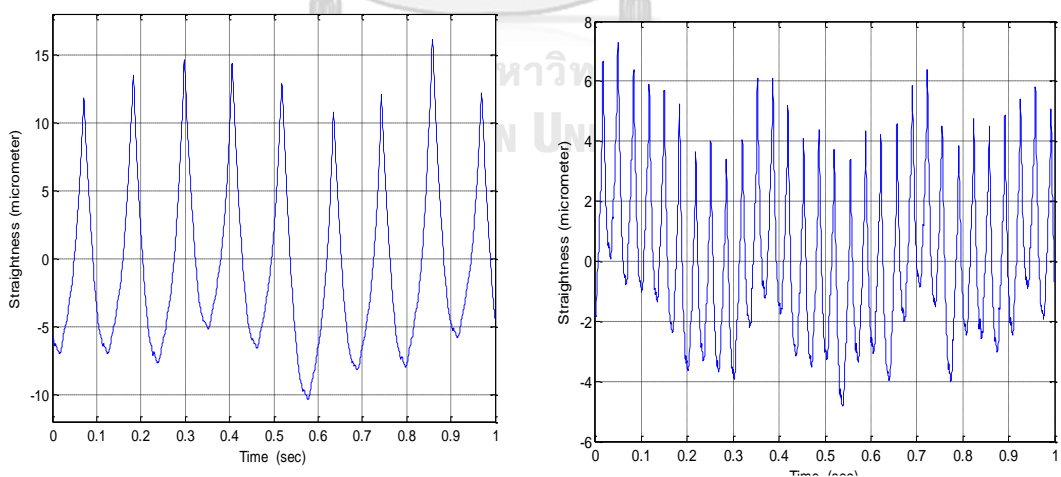
ที่ความเร็วตัด 100 และ 200 เมตรต่อนาที ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา เห็นได้ว่าการตัด 200 เมตรต่อนาที มีแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตและค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์น้อยกว่าที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที และส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานลดลงเมื่อใช้ความเร็วตัดที่ 200 เมตรต่อนาที



(ก) ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที

รูปที่ 4.32 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

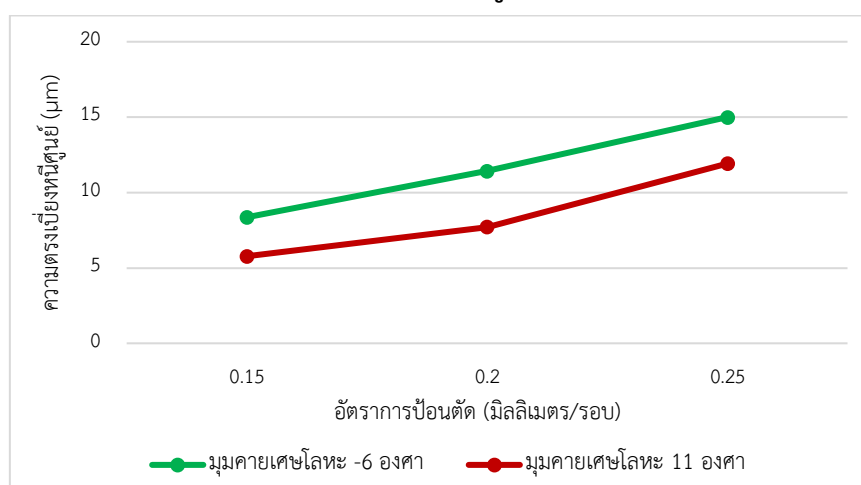


(ก) ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที

รูปที่ 4.33 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ในโดเมนเวลาที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

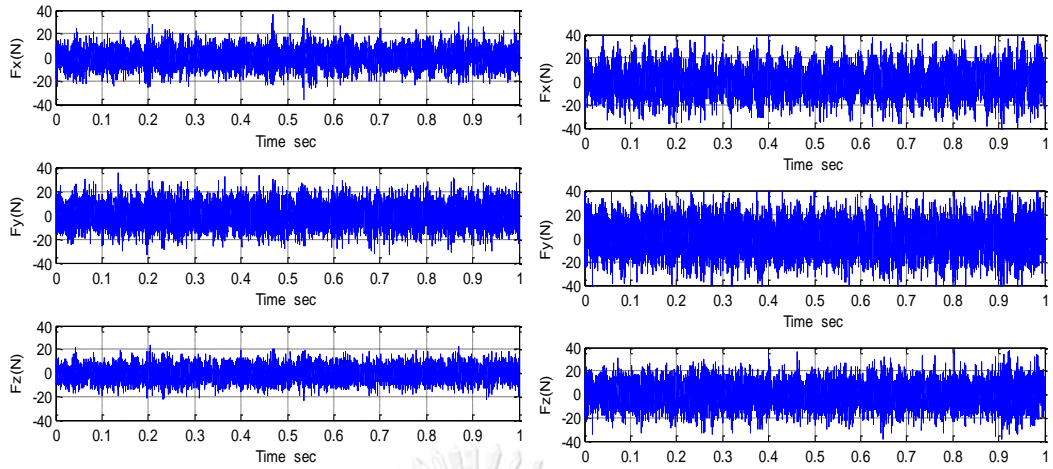
4.5.2.2 ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับอัตราการป้อนตัด



รูปที่ 4.34 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา

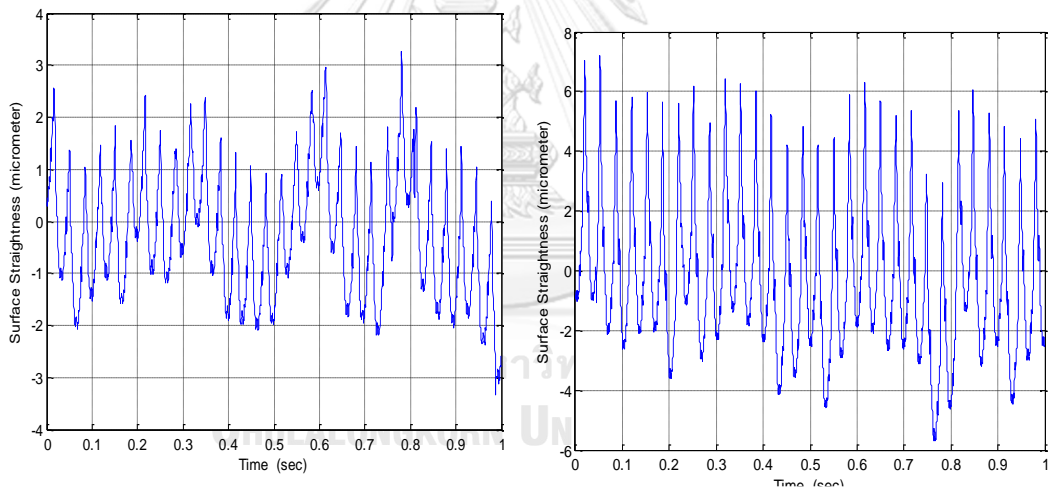
จากรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานและอัตราการป้อนตัดที่ 0.15, 0.2 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความตรงผิวชิ้นงานลดลง และจากรูป 4.34 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์นั้น ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความเร็วตัดใน ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน

และจากการวิเคราะห์การทดลองเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนตัดชิ้นงานจะทำให้ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงซึ่งจะเป็นเพราะ พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น แรงตัดจึงสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัด เป็นสาเหตุให้ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์สูง ซึ่งจากรูปที่ 4.35 และ 4.36 เปรียบเทียบแรงตัดพลวัตและค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่โดเมนเวลาที่อัตราการป้อนตัด 0.15 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา เห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ มีแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตมากกว่าที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ เพราะอัตราการป้อนตัดที่มากทำให้ใช้พื้นที่ในการตัดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัดและชิ้นงาน เป็นสาเหตุให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น



(ก) อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ (ข) อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ

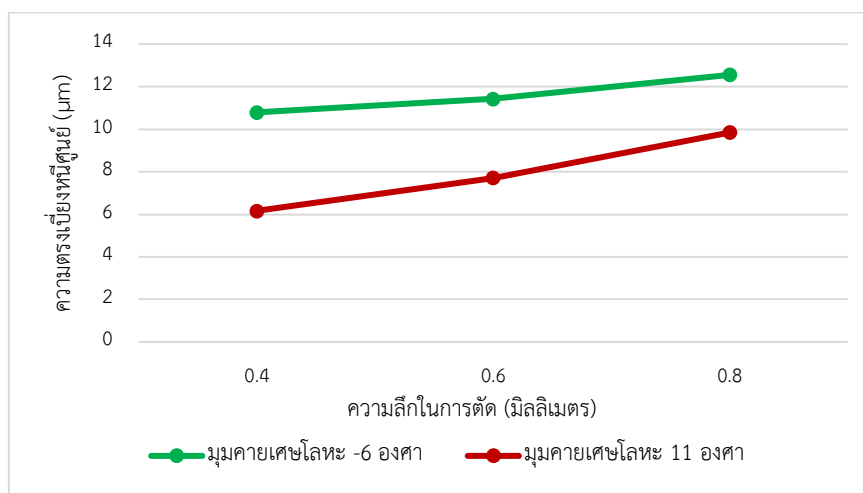
รูปที่ 4.35 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา



(ก) อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ (ข) อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4.36 ความตรงเปียงหน้าศูนย์ชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

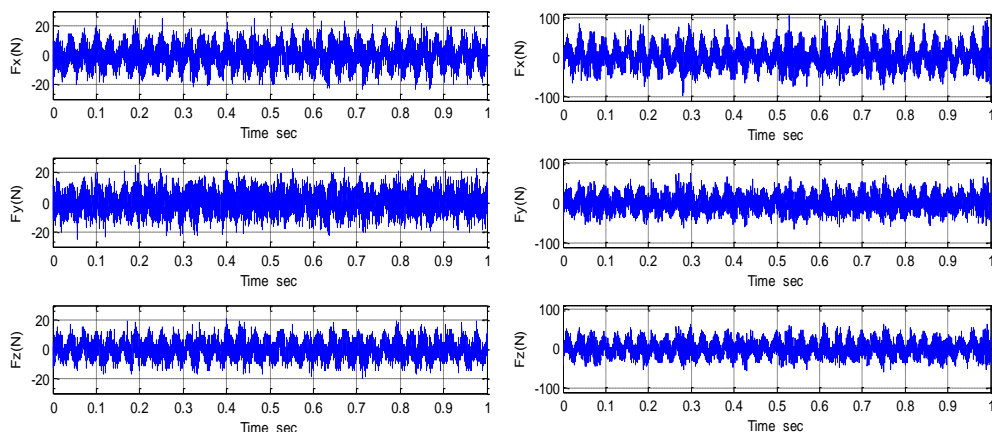
4.5.2.3 ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับความลึกในการตัด



รูปที่ 4.37 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร ต่อรอบ รัศมีงูมกมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา

จากรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานและความลึกในการตัดที่ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตรตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความตรงผิวชิ้นงานลดลง และจากรูป 4.37 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์นั้น ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดในความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน

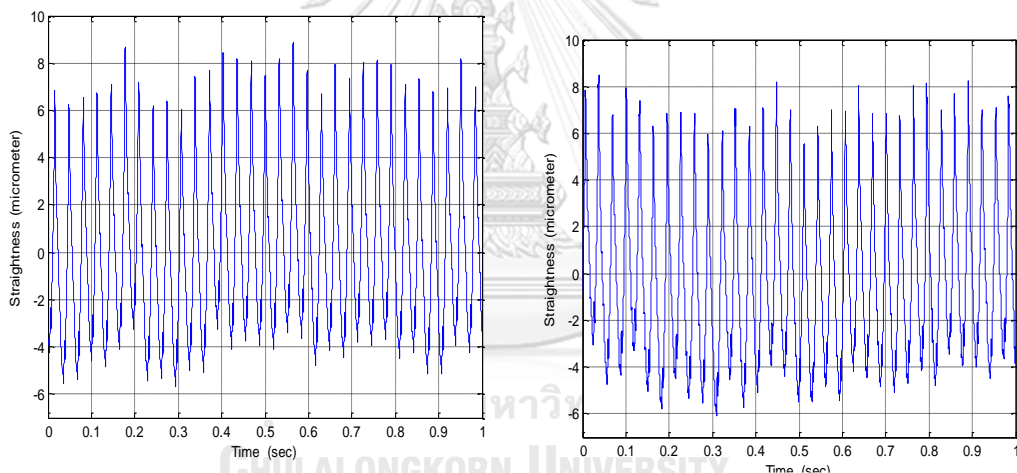
และจากการวิเคราะห์การทดลองเมื่อเพิ่มความลึกในการตัดชิ้นงานจะทำให้ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงซึ่งจะเป็นเพราะพื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับอัตราการป้อนตัด ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัด เป็นสาเหตุให้ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์สูง ซึ่งจากรูปที่ 4.38 และ 4.39 เปรียบเทียบแรงตัดพลวัตและค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่โดเมนเวลาที่ความลึกในการตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา เห็นได้ว่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตรมีแอมพลิจูดแรงตัดสูงกว่าที่ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร



(ก) ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร

(ข) ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.38 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา

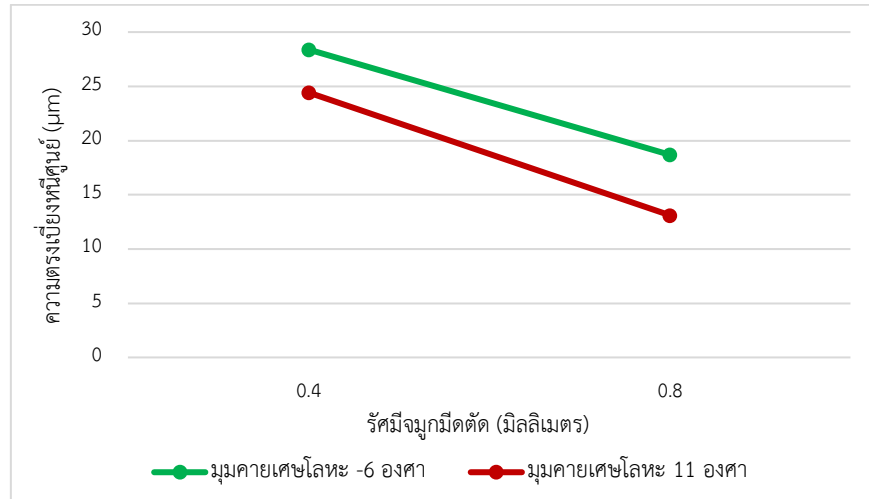


(ก) ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร

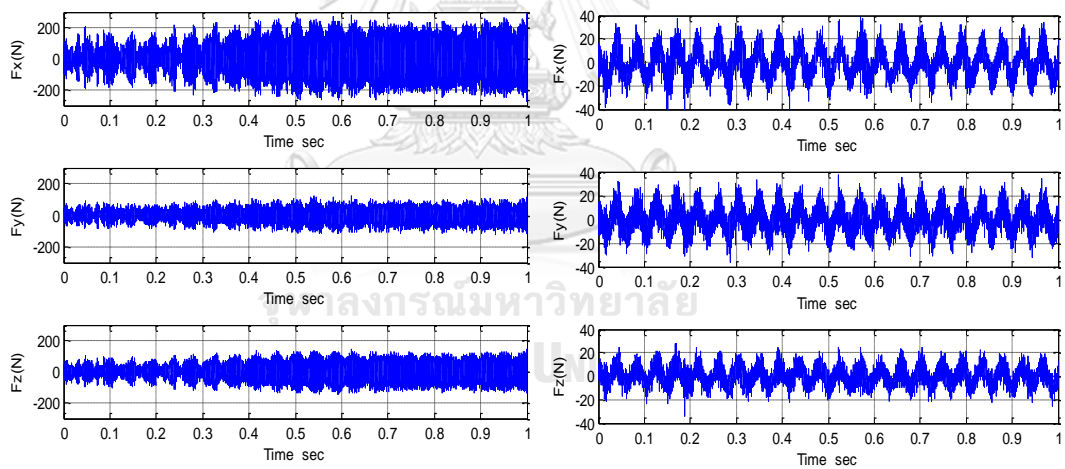
(ข) ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.39 ความตรงเพียงหนีศูนย์กลางในงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตัด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา

4.5.2.4 ความสัมพันธ์ของความตรงเชิงทฤษฎีกับรัศมีงูมกมิตัด



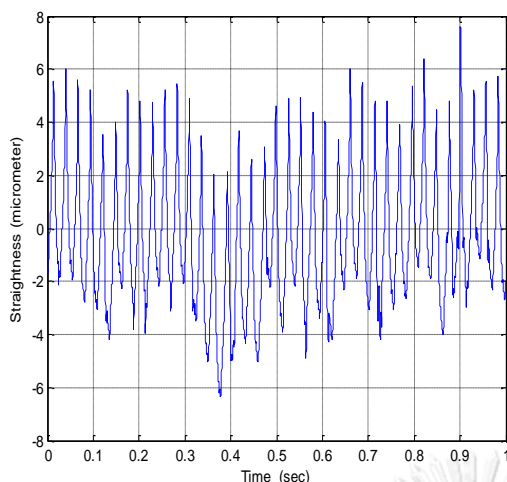
รูปที่ 4.40 ความตรงเชิงทฤษฎีที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตร ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 และ 11 องศา



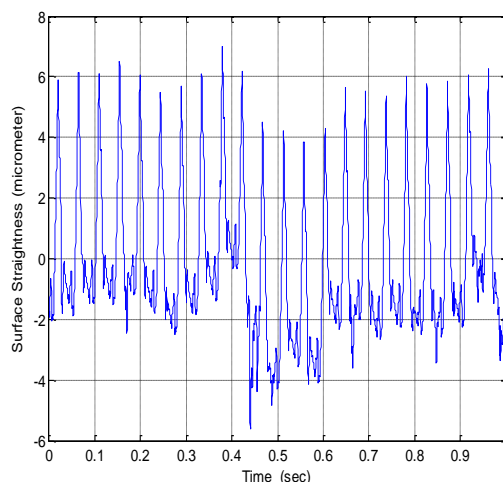
(ก) รัศมีงูมกมิตัด 0.4 มิลลิเมตร

(ข) รัศมีงูมกมิตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.41 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตร ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา



(ก) รัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร



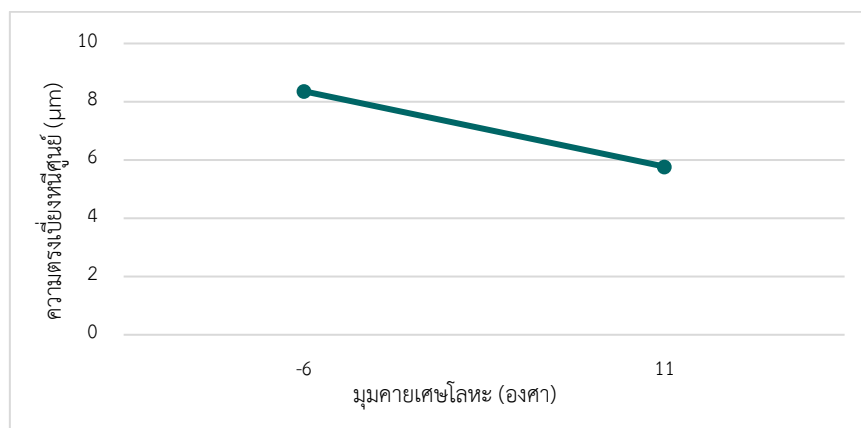
(ข) รัศมีจุมุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.42 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางชิ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา

จากรูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางและรัศมีจุมุกมีดตัดที่ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตรตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อรัศมีจุมุกมีดตัดเพิ่มขึ้น ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ความตรงผิวชิ้นงานดีขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.24 เมื่อเพิ่มรัศมีจุมุกมีดตัด จะช่วยลดรอยป้อนตัด (Feed mark) ที่ตกค้างบนผิวชิ้นงาน ทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพดี และจากรูป 4.40 จะเห็นได้ว่ามุมคายเศษที่เป็นบวกทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ยและสูงสุด ให้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่ามุมคายเศษที่เป็นลบ เพราะมุมคายเศษที่เป็นบวกจะให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีคุณภาพที่ดี เช่นเดียวกับความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกในการตัดของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางชิ้นงาน

จากการเปรียบเทียบแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวในโดเมนเวลาที่รัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ 11 องศา ดังรูปที่ 4.41 และ 4.42 เห็นได้ว่าที่รัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร มีแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตที่มากกว่ารัศมีจุมุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร แอมพลิจูดที่มาก แสดงว่ามีการใช้แรงตัดที่มากในขณะที่ตัด ส่งผลให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพลดลง

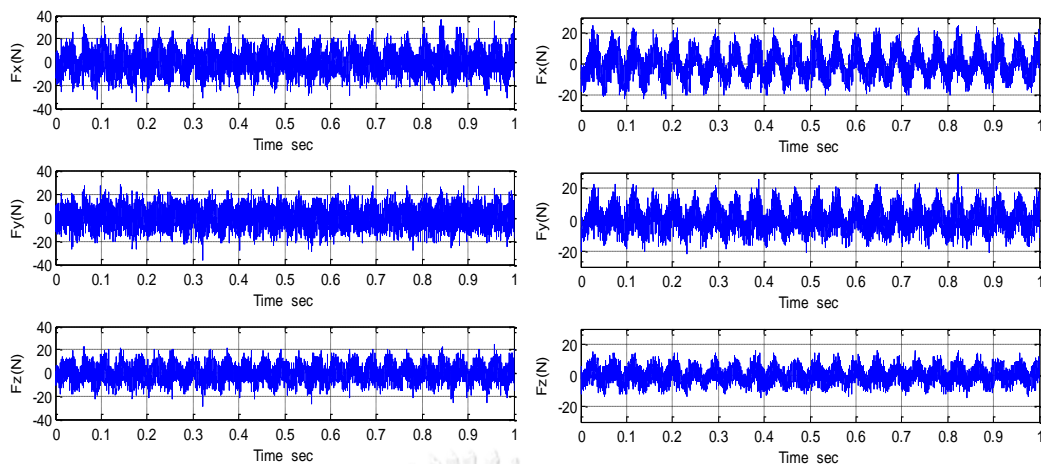
4.5.2.5 ความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กับมุมกายเศษโลหะ



รูปที่ 4.43 ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่ออนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานและมุมกายเศษวัสดุ ที่ -6, +11 องศาตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อมุมกายเศษวัสดุเป็นบวก ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ความตรงผิวชิ้นงานดีขึ้น และจากรูป 4.31, 4.34, 4.37 และ 4.40 ของความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด และรัศมีจุมกมีดตัดตามลำดับ พบว่ามุมกายเศษที่เป็นบวก ให้ผิวชิ้นงานมีความตรงดีกว่ามุมกายเศษที่เป็นลบ เพราะเศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ดี

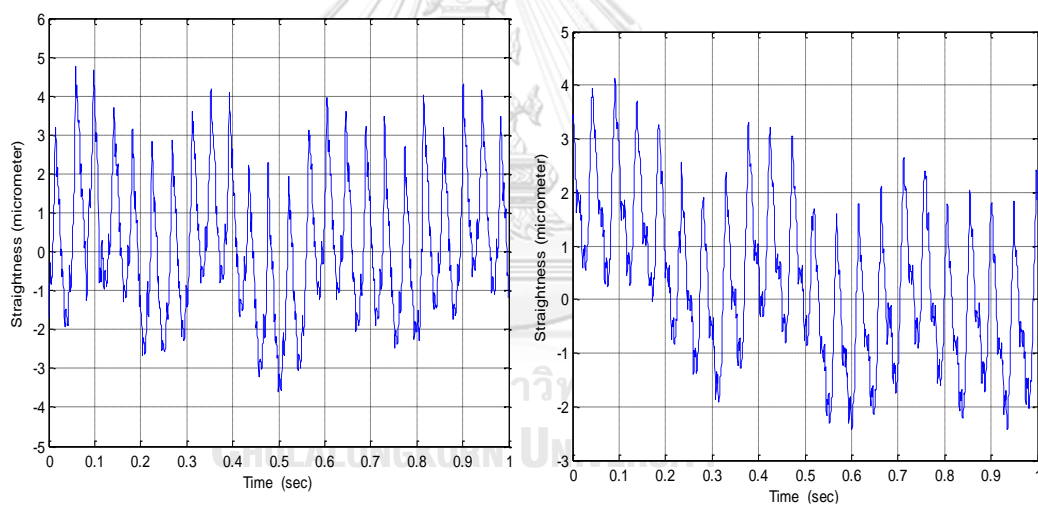
จากการวิเคราะห์การทดลองเมื่อมุมกายเศษวัสดุเพิ่มขึ้นหรือมุมกายเศษวัสดุเป็นบวกมากขึ้น จะทำให้เศษโลหะเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดและเศษโลหะจะน้อยลง ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ผิวชิ้นงานที่ได้จึงดี เห็นได้จากการเปรียบเทียบแรงตัดพลวัตและความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ในโดเมนเวลาที่มุมกายเศษวัสดุ -6 และ +11 องศาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่ออนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.44 จะเห็นว่าแอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตในมุมกายเศษวัสดุ 11 องศา เล็กกว่าของมุมกายเศษวัสดุ -6 องศา และในรูปที่ 4.45 แอมพลิจูดของมุมกายเศษ 11 องศา ก็เล็กกว่าของมุมกายเศษวัสดุ -6 องศาเช่นกัน



(ก) มุมคายนพิเศษโลหะ -6 องศา

(ข) มุมคายนพิเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.44 แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร



(ก) มุมคายนพิเศษโลหะ -6 องศา

(ข) มุมคายนพิเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.45 ความตรงเพียงหนีศูนย์ขึ้นงานในโดเมนเวลาที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีงูมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร

4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ ความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงตัด และเงื่อนไขการทดลองต่างๆ จึงนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อพยากรณ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

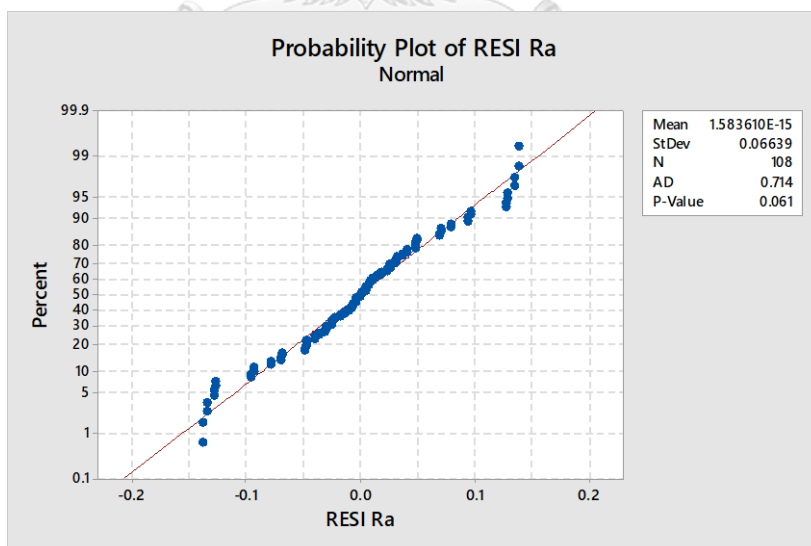
เนื่องจากการทดลองอาจจะมีปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมจำนวนมาก และปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Residual) ซึ่งการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) เป็นดัชนีหนึ่งที่ยืนยันว่าผลการทดลองที่จะใช้เป็นตัวแทนทำนายพฤติกรรมของปัจจัยเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด โดยในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจะพิจารณาดังต่อไปนี้

4.6.1 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

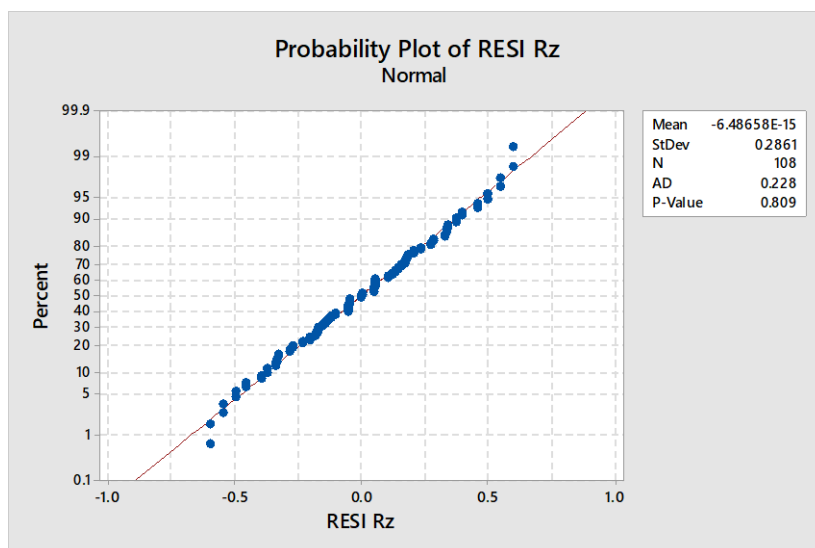
การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของความขรุขระผิวชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความเป็นปกติของการแจกแจงของความคลาดเคลื่อนของการทดลอง โดยสร้าง Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งกำหนดสมมติฐานการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังนี้

H_0 : ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานมีการแจกแจงแบบปกติ

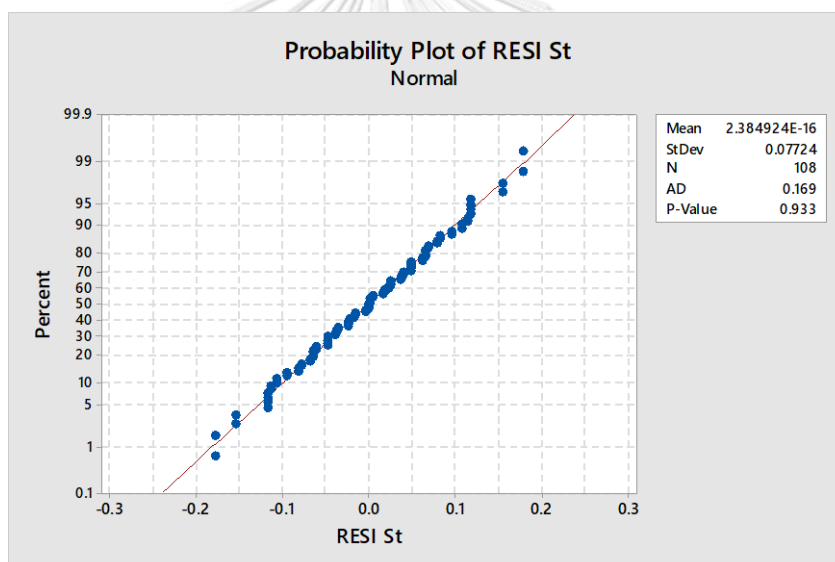
H_a : ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.46 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย



รูปที่ 4.47 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด



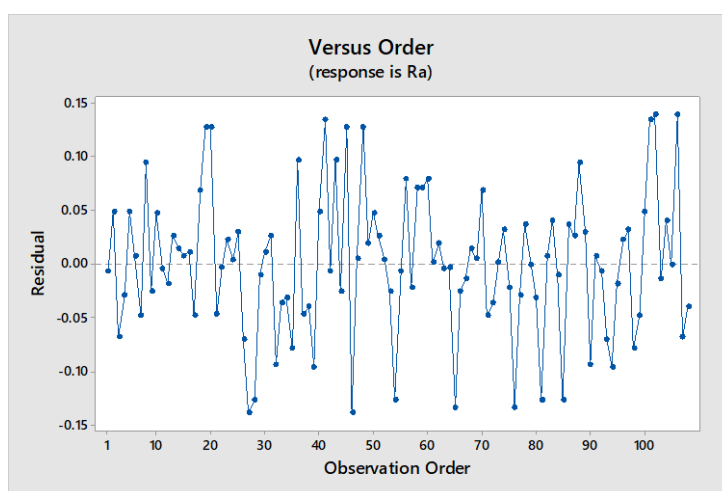
รูปที่ 4.48 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน

การทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูล พบว่ากราฟของค่าความคลาดเคลื่อนของความขรุขระผิวเฉลี่ย (รูปที่ 4.46) ความขรุขระผิวสูงสุด (รูปที่ 4.47) และความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (รูปที่ 4.48) มีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) จุดตัดเรียงติดกันเป็นแนวเส้นตรง และลักษณะการเกิดจุดไม่กระจุกเป็นกลุ่มๆ ความห่างระหว่างจุดแต่ละจุดมีความใกล้เคียงกัน และมีค่า P-value = 0.061, 0.809 และ 0.933 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่ปฏิเสธสมมติ

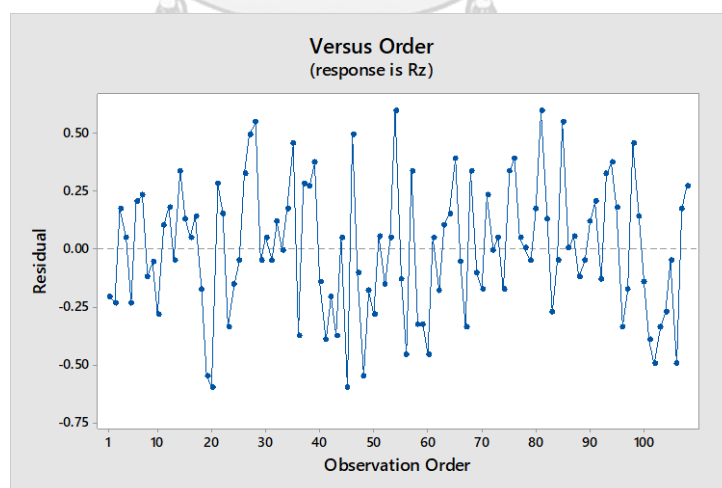
ฐานหลัก (Accept H_0) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรีปได้ว่าข้อมูลความความเคลื่อนไหวของความ
 ขรุขระผิวและความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีการแจกแจงแบบปกติ

4.6.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

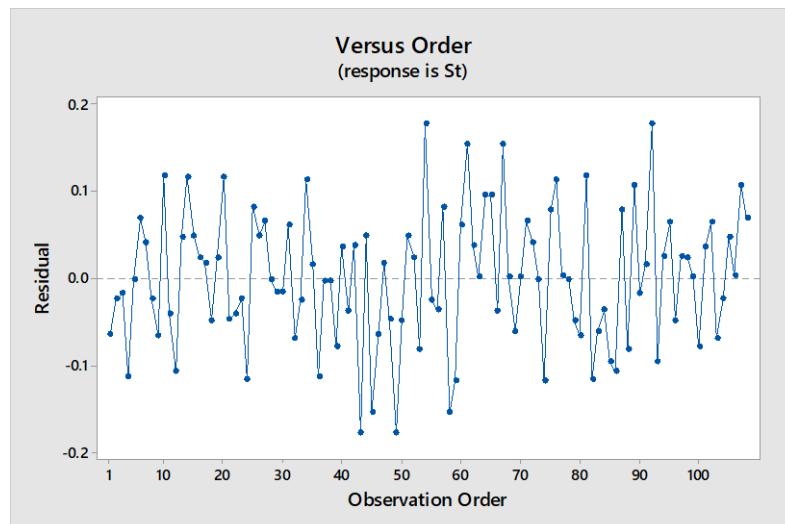
การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการทดสอบเพื่อวัดการกระจายตัวของข้อมูลมีการ
 คลาดเคลื่อนแบบเป็นรูปแบบหรือไม่ เนื่องจากในการทำการทดลอง ผู้วิจัยอาจมีความชำนาญในการ
 ทำการทดลองเมื่อทำการทดลองซ้ำเป็นเวลานาน โดยกราฟที่เห็นเป็นการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน
 กับจำนวนครั้งการทดลอง



รูปที่ 4.49 กราฟการทดสอบความเป็นอิสระของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย



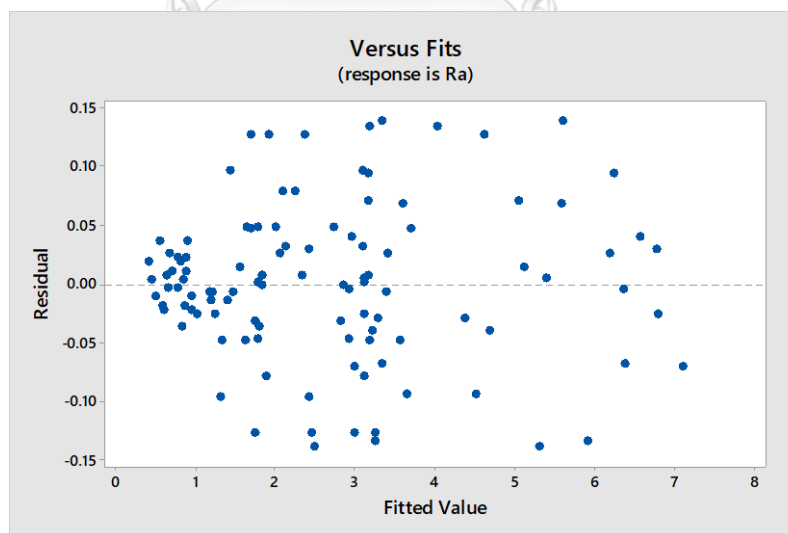
รูปที่ 4.50 กราฟการทดสอบความเป็นอิสระของความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด



รูปที่ 4.51 กราฟการทดสอบความเป็นอิสระของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.49 – 4.51 ค่าความคลาดเคลื่อนต่อการทดลองมีการกระจายตัวอย่างเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบการคลาดเคลื่อนที่แน่นอน ค่าความคลาดเคลื่อนกระจายตัวขึ้นลงบนเส้นศูนย์อย่างสม่ำเสมอ สรุปได้ว่ากราฟการทดสอบความเป็นอิสระของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด และความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานมีความเป็นอิสระของข้อมูลดี

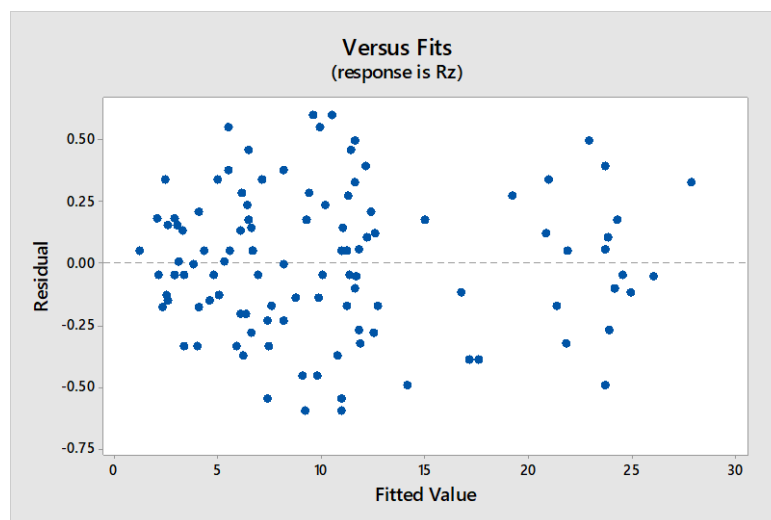
4.6.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



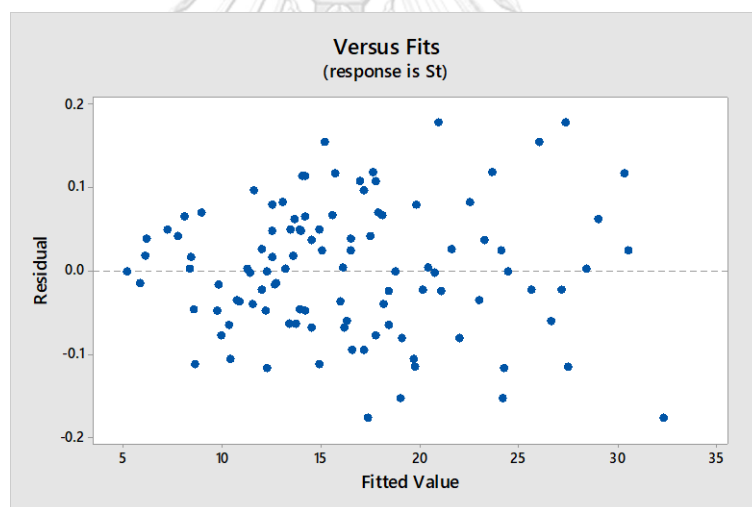
รูปที่ 4.52 กราฟการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูลว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและไม่มีรูปแบบการกระจายตัว ซึ่งเป็นการพล็อตกราฟค่าความ

คลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2



รูปที่ 4.53 กราฟการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด



รูปที่ 4.54 กราฟการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.52 – 4.54 พบว่าข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีรูปแบบการกระจายตัวที่แน่นอน และไม่มีแนวโน้มไปทางใดทางหนึ่ง การกระจายตัวใกล้เส้นศูนย์อย่างสม่ำเสมอ สรุปได้ว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด และความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอของแปรปรวนของข้อมูล

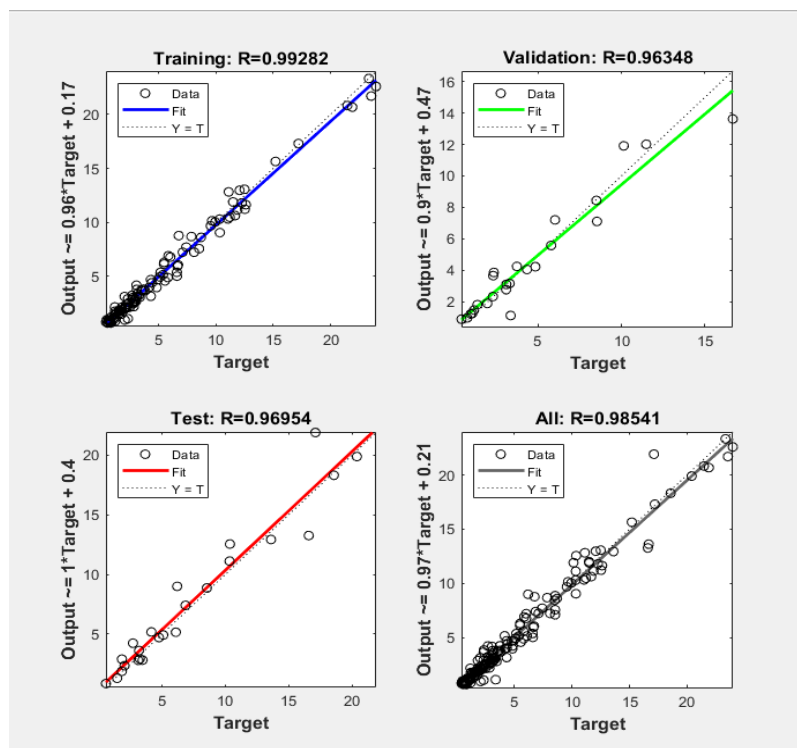
4.7 การสร้างอัลกอริทึมเพื่อพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัด และความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดแล้วนั้น จึงนำเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงูมกมิตตัด ความลึกในการตัด มุมคายเศษวัสดุ รวมถึงอัตราส่วนแรงตัด ใช้เป็นตัวแปรนำเข้าของโครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้าโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ด (The two-layer feed-forward neural network with Levenberg-Marquardt back propagation learning algorithm) ประกอบด้วย ชั้นรับข้อมูล (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นแสดงผล (Output Layer) ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมจะคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างชั้นรับข้อมูลและชั้นแสดงผล เพื่อหาน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนในชั้นซ่อน ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อใช้พยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม Matlab และผู้วิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนชั้นซ่อน จำนวนการทำซ้ำ รวมถึงเปอร์เซ็นต์ข้อมูลการทดสอบ ข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งมีวิธีการดังแสดงตามภาคผนวก ก

4.7.1 การสร้างอัลกอริทึมเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากเงื่อนไขการตัดที่นำเสนอเบื้องต้น สำหรับความขรุขระผิวชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงูมกมิตตัด ความลึกในการตัด มุมคายเศษวัสดุ รวมถึงอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด (AF_y / AF_z) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีชั้นแสดงผล 2 ชั้น คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และ ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) ดังแสดงรูปที่ 3.12

จากผลลัพธ์ของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.55 พบว่าค่า R^2 คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้รับจากการทดลอง (Target) กับผลลัพธ์ของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมาจากการนำหนึ่งลบด้วยค่าผลรวมของผลต่างระหว่างค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์กับค่า residual ยกกำลังสองหารด้วยผลรวมของผลต่างระหว่างค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง หากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากแสดงว่าการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเป็นไปในทางที่ดี ผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลที่ถูกใช้ในการฝึกสอน (Training), การยืนยันความถูกต้อง (Validation) , การทดสอบ (Test) และข้อมูลทั้งหมด (All) ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.55 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

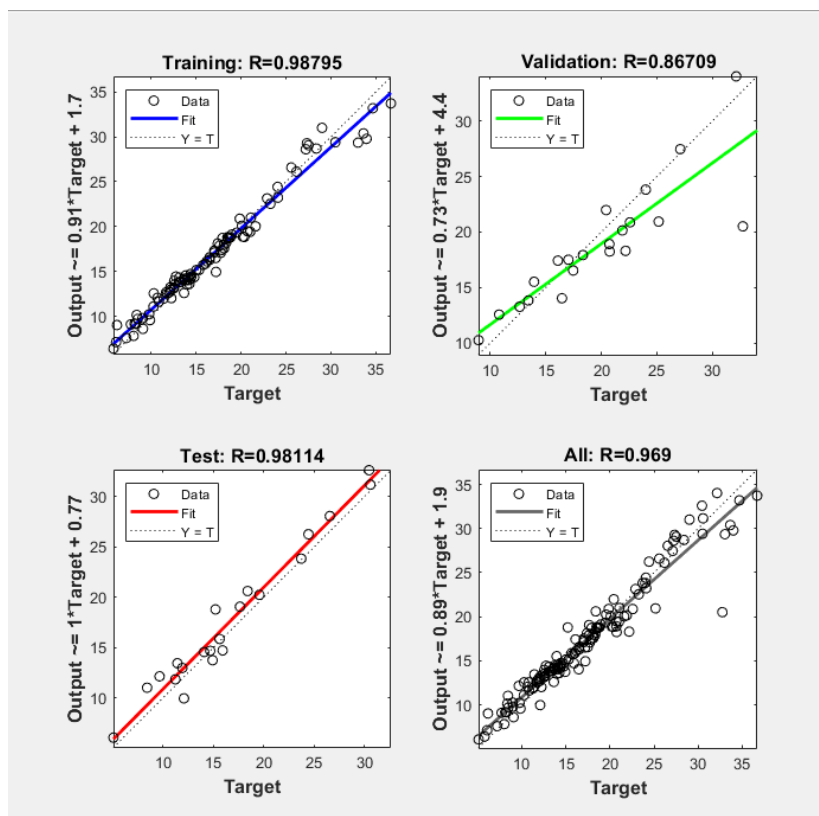
การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว	R^2
การฝึกสอน	0.99282
การยืนยันความถูกต้อง	0.96348
การทดสอบ	0.96954
ข้อมูลทั้งหมด	0.98541

4.7.2 การสร้างอัลกอริทึมเพื่อพยากรณ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน

สำหรับความตรงผิวชิ้นงานมีเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงูมูก มีดตัด ความลึกในการตัด มุมคายเศษวัสดุ รวมถึงอัตราส่วนแรงตัด ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีชั้นแสดงผล 1 ชั้น คือ ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (S_p) ดังแสดงรูปที่ 3.13

เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความขรุขระผิว ผลลัพธ์ของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์ความตรง แสดงในรูปที่ 4.56 พบว่าค่า R^2 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์

ของค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่ได้รับจากการทดลอง (Target) กับผลลัพธ์ของค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม และค่าเฉลี่ยของค่าสมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนของผลของการทดลองกับผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียม ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.56 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเพื่อการพยากรณ์ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน

การพยากรณ์ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์	R^2
การฝึกสอน	0.98795
การยืนยันความถูกต้อง	0.86709
การทดสอบ	0.98114
ข้อมูลทั้งหมด	0.96900

4.8 การทดสอบความแม่นยำของการพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

การทดสอบความแม่นยำของอัลกอริทึมที่พัฒนาจากโครงข่ายประสาทเทียม ทั้งความขรุขระผิวและความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน จึงต้องมีการทดสอบความแม่นยำของอัลกอริทึมที่ได้รับการฝึกสอนจากโครงข่ายประสาทเทียมแล้ว โดยคาดหวังว่าจะสามารถพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวได้ดี โดยเงื่อนไขการทดสอบความแม่นยำของอัลกอริทึมแบ่งเป็น 2 การทดสอบ ดังนี้

4.8.1 การทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

การทดสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้ว พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากอัลกอริทึม และวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง และวัสดุชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอน S45C โดยมีเงื่อนไขการทดสอบความแม่นยำดังนี้

4.8.1.2 การทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลองสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการทดสอบของความขรุขระผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ความเร็วตัด (V) หน่วย เมตรต่อนาที (m/min)	150 200
อัตราการป้อนตัด (d) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)	0.15 0.25
ความลึกในการตัด (f) หน่วย มิลลิเมตร (mm)	0.4 0.6
รัศมีงูมกมิตัด (R_n) หน่วย มิลลิเมตร (mm)	0.4 0.8
มุมคายเศษวัสดุ (γ) หน่วย องศา (°)	-6 11

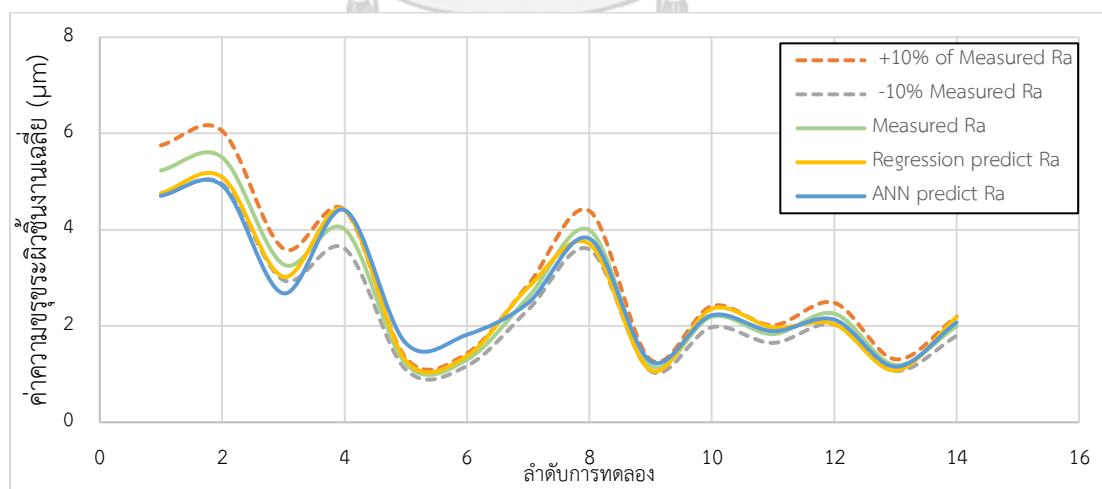
ผลการทดสอบความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน ค่าที่ได้จากการคำนวณสมการที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดซึ่งอยู่ในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียล ถูกพัฒนามาจากงานวิจัยก่อนหน้า [3] ดังสมการที่ 4.7 สำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย และสมการที่ 4.8 สำหรับความขรุขระผิวสูงสุด และค่าที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วจากโครงข่ายประสาทเทียม (หัวข้อ 4.7.1) ดังตารางที่ 4.5

$$R_a = 31.82 \cdot V^{-0.239} \cdot f^{1.22} \cdot D^{0.163} \cdot R_n^{-0.65} \cdot e^{-0.0158\gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{-0.82} \quad (4.7)$$

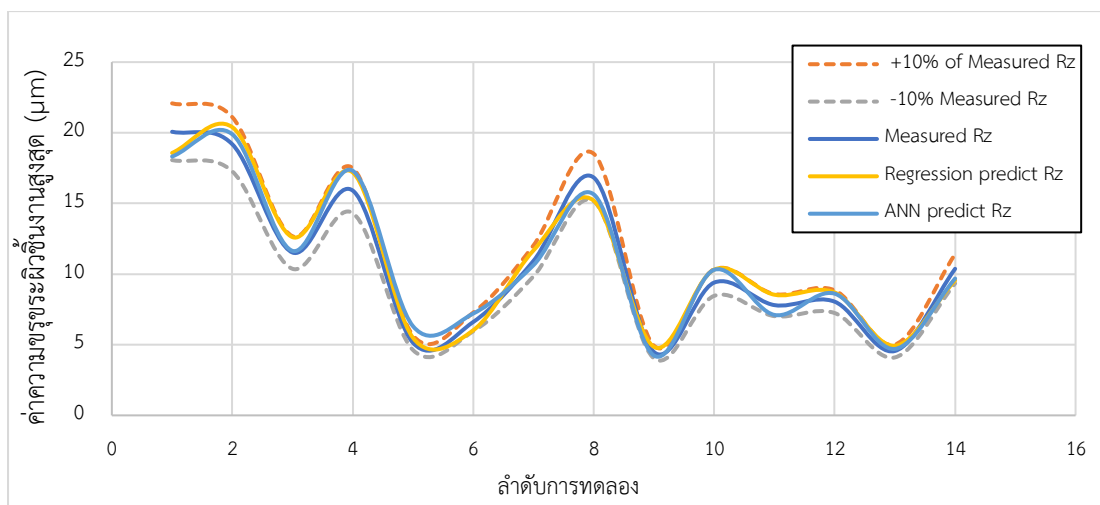
$$R_z = 146.94 \cdot V^{-0.249} \cdot f^{1.08} \cdot D^{0.226} \cdot R_n^{-0.612} \cdot e^{-0.0127\gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{-0.655} \quad (4.8)$$

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเพื่อทดสอบของความขรุขระผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

Run	v	d	f	R_n	γ	$\frac{AF_y}{AF_z}$	ความขรุขระผิวจาก					
							การวัด		สมการ		โครงข่ายประสาทเทียม	
							R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
1	150	0.4	0.25	0.4	-6	0.686	5.232	20.074	4.758	18.574	4.706	18.321
2	150	0.6	0.25	0.4	-6	0.684	5.503	19.185	5.094	20.394	4.920	19.891
3	150	0.6	0.25	0.8	-6	0.746	3.282	11.524	3.025	12.613	2.679	11.642
4	200	0.4	0.25	0.4	-6	0.692	4.012	15.907	4.410	17.191	4.409	17.306
5	200	0.4	0.15	0.8	-6	0.892	1.218	5.138	1.288	5.487	1.645	6.308
6	200	0.6	0.15	0.8	-6	0.889	1.301	6.61	1.379	6.025	1.819	7.208
7	200	0.6	0.25	0.8	-6	0.752	2.598	10.936	2.804	11.674	2.481	10.632
8	150	0.4	0.25	0.4	11	0.670	3.992	16.832	3.707	15.196	3.818	15.642
9	150	0.4	0.15	0.8	11	0.864	1.183	4.484	1.083	4.851	1.268	4.232
10	150	0.6	0.25	0.8	11	0.729	2.195	9.398	2.357	10.319	2.224	10.301
11	200	0.6	0.15	0.4	11	0.718	1.832	7.803	1.973	8.539	1.895	7.108
12	200	0.4	0.25	0.8	11	0.737	2.259	8.047	2.040	8.698	2.134	8.616
13	200	0.6	0.15	0.8	11	0.869	1.19	4.558	1.075	4.929	1.155	4.701
14	200	0.6	0.25	0.8	11	0.735	1.995	10.373	2.185	9.550	2.075	9.685



รูปที่ 4.57 ผลการทดสอบความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 4.58 ผลการทดสอบความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อทดสอบของความขรุขระผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง ค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงค่าที่ได้จากการวัดจริง มากกว่าค่าที่ได้จากสมการการทำนายความขรุขระผิวในบางค่า จะเห็นได้จากรูปที่ 4.57 ค่าพยากรณ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะออกนอกช่วงที่ยอมรับได้ในเงื่อนไขที่ 3, 5 และ 6 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากใช้ความลึกในการตัดสูง รวมทั้งแรงป้อนตัดที่น้อย รวมถึงมุมคายเศษวัสดุที่ติดลบ ทำให้เศษวัสดุออกได้ยาก อาจจะทำให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยที่สูงได้ ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนพยากรณ์เกินความเป็นจริงไปเล็กน้อย สมการที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดจึงเกาะกลุ่มอยู่ในช่วงการวัดที่ยอมรับได้มากกว่าโครงข่ายประสาทเทียมเล็กน้อย ในส่วนของค่าความขรุขระผิวสูงสุด ดังรูปที่ 4.58 พบว่าค่าที่ได้จากการพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เกาะกลุ่มกันอยู่ในช่วงการวัดที่ยอมรับได้ เช่นเดียวกับค่าที่ได้จากสมการ

จากผลการทดสอบความขรุขระผิวชิ้นงาน ภายใต้เงื่อนไขการตัดและวัสดุชิ้นงานเดิม ทำให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percent Error, MAPE) ได้ดังสมการที่ 4.7

$$\text{ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{F_t - A_t}{A_t} \right| \quad (4.7)$$

ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ = 100% - ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน [37] (4.8)

เมื่อกำหนดให้

$$A_t = \text{ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการพยากรณ์}$$

$$F_t = \text{ค่าความซรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการวัดจริง}$$

โดยที่ $t = 1, 2, 3, \dots, n$

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแม่นยำของความซรุขระผิวชิ้นงาน

การทดสอบความ แม่นยำที่ได้จาก	ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของ เปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน		ค่าเฉลี่ยความแม่นยำของการ ทดสอบ	
	R_a	R_z	R_a	R_z
สมการ	8.11%	8.21%	91.89%	91.79%
โครงข่ายประสาทเทียม	11.22%	7.49%	88.78%	92.51%

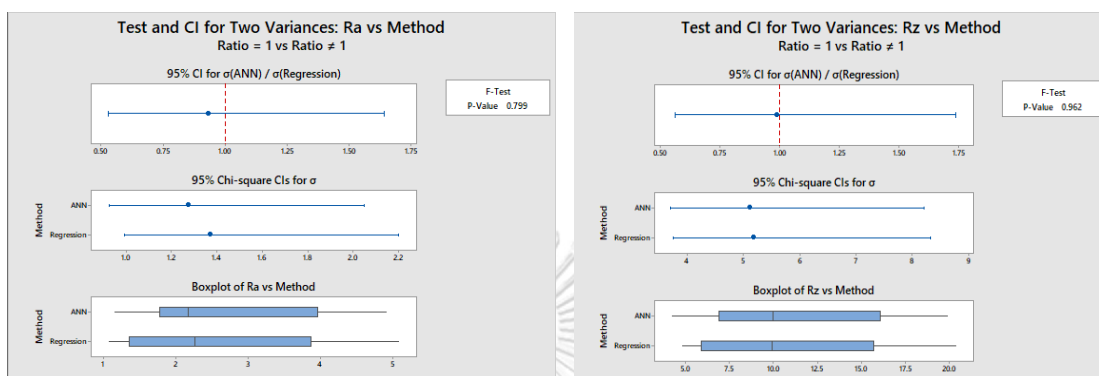
การคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความซรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และค่าความซรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) มีค่าเท่ากับ 11.22% และ 7.49% ตามลำดับ นั่นคือ การพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ 88.78% และ 92.51% ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัย [3] ที่ใช้การสมการที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด เพื่อพยากรณ์ความซรุขระผิวเช่นเดียวกันนั้น พบว่าค่าความซรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยของโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่ได้จากการสมการ เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมพยากรณ์พร้อมกันทั้งความซรุขระผิวเฉลี่ยและความซรุขระผิวสูงสุดในน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนอันเดียวกัน อีกทั้งค่าความซรุขระผิวเฉลี่ยเกิดจากการวัดเฉลี่ยของพื้นผิวชิ้นงานค่าที่โครงข่ายพยากรณ์อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งสมการมีค่าสัมประสิทธิ์สำหรับความซรุขระผิวเฉลี่ยและความซรุขระผิวสูงสุดอาจทำให้พยากรณ์ในค่าความซรุขระผิวเฉลี่ยได้แม่นยำมากกว่า และค่าความซรุขระผิวสูงสุดให้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่ได้จากสมการ

หากยังไม่สามารถสรุปความแม่นยำทั้งสองข้อมูลได้อย่างแท้จริง ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และสมการ (Regression) มาทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่ไม่อิสระต่อกัน (Test Concerning a Difference Between Two means: Paired t Test) เป็นการวิเคราะห์ให้เห็นถึงความแตกต่าง โดยกระทำถึงระดับความต่างของข้อมูลแต่ละคู่โดยตรง ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อทำการทดสอบว่าข้อมูลทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ แต่ก่อนจะทดสอบความแตกต่างของสองประชากร ต้องทดสอบความแปรปรวนของ

ข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมว่ามีความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ ซึ่งกำหนดการตั้งสมมติฐานการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังนี้

H_0 : ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้สมการเท่ากับข้อมูลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม

H_a : ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้สมการไม่เท่ากับข้อมูลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม



ความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a)

ความขรุขระผิวสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.59 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Regression	14	2.656	1.368	0.366
ANN	14	2.659	1.273	0.340

Estimation for Paired Difference				
Mean	StDev	SE Mean	95% CI for $\mu_{\text{difference}}$	
-0.0036	0.2280	0.0609	(-0.1353, 0.1281)	

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

Test	
Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$
Alternative hypothesis	$H_a: \mu_{\text{difference}} \neq 0$
T-Value	P-Value
-0.06	0.954

ความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a)

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Regression	14	11.00	5.18	1.38
ANN	14	10.83	5.11	1.36

Estimation for Paired Difference				
Mean	StDev	SE Mean	95% CI for $\mu_{\text{difference}}$	
0.175	0.718	0.192	(-0.240, 0.590)	

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

Test	
Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$
Alternative hypothesis	$H_a: \mu_{\text{difference}} \neq 0$
T-Value	P-Value
0.91	0.379

ความขรุขระผิวสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.60 ทดสอบความแตกต่างข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

การทดสอบความแปรปรวนของทั้งสองข้อมูล พบว่ากราฟของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) (รูปที่ 4.59) ทั้งสองข้อมูลมีส่วนความแปรปรวนที่อยู่ในช่วงความ

เชื่อมั่น 1 แสดงว่าข้อมูลทั้งสองมีความแปรปรวนที่เท่ากัน และมีค่า P-Value = 0.799 และ 0.962 ตามลำดับ (รูปที่ 4.59) ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Accept H_0) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่า ข้อมูลทั้งสองข้อมูลมีความแปรปรวนเท่ากัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำทั้งสองข้อมูลมาทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่ไม่อิสระต่อกัน ซึ่งสมมติฐานการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังนี้

H_0 : ผลต่างของค่าความขรุขระผิวของข้อมูลที่ได้จากสมการเท่ากับโครงข่ายประสาทเทียม

H_a : ผลต่างของค่าความขรุขระผิวของข้อมูลที่ได้จากสมการไม่เท่ากับโครงข่ายประสาทเทียม

จากการทดสอบพบว่า ได้ค่า P-Value = 0.954 และ 0.379 ตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Accept H_0) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่า ผลต่างของข้อมูลทั้งสองมีค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากันทั้งข้อมูลที่ได้สมการและโครงข่ายประสาทเทียม อย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรอิสระ ทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำอาจจะเท่ากัน อย่างมีนัยสำคัญ แต่โดยภาพรวมแล้วทั้งค่าเฉลี่ยความแม่นยำที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมให้ผลการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4.8.1.2 การทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลองสำหรับความตรงผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขการทดสอบของความตรงผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ความเร็วตัด (V) หน่วย เมตรต่อนาที (m/min)	120 250
อัตราการป้อนตัด (d) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)	0.18 0.30
ความลึกในการตัด (f) หน่วย มิลลิเมตร (mm)	0.2 0.5
รัศมีจุมุมมีดตัด (Rn) หน่วย มิลลิเมตร (mm)	0.4 0.8
มุมคายเศษวัสดุ (γ) หน่วย องศา (°)	-6 11

ผลการทดสอบความแม่นยำของค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน (S_v) มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน ค่าที่ได้จากการคำนวณสมการที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดซึ่งอยู่ในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียล ถูกพัฒนามาจากงานวิจัยก่อนหน้า [2] ดังสมการที่ 4.8 สำหรับทำนายความตรงผิวชิ้นงาน

$$S_t = 91.84 \cdot V^{-0.202} \cdot f^{0.53} \cdot D^{0.133} \cdot R_n^{-0.355} \cdot e^{-0.00672\gamma} \cdot \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)^{0.493} \quad (4.8)$$

ค่าที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วจากโครงข่ายประสาทเทียม (หัวข้อ 4.7.2) และค่าที่ได้จากสมการที่ 4.8 ดังตารางที่ 4.9

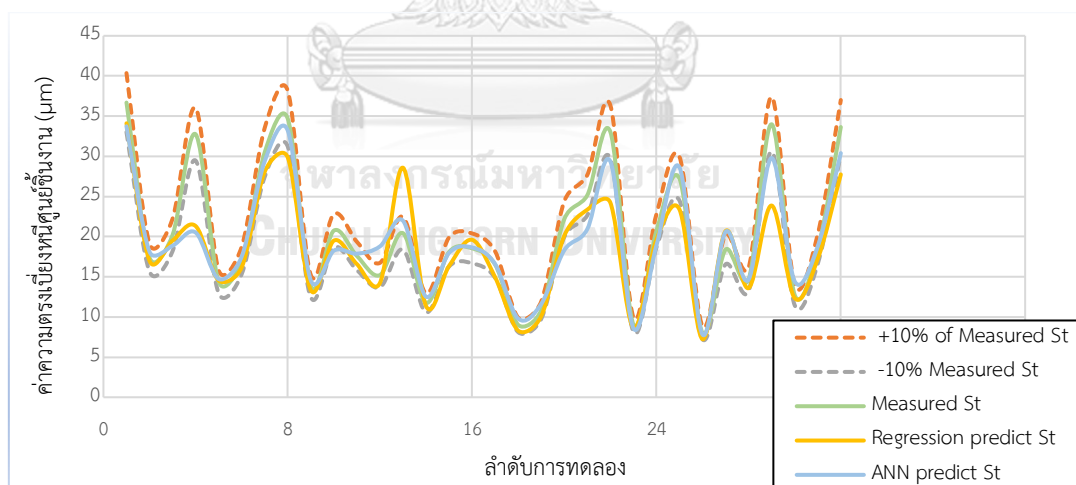
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองเพื่อทดสอบของความตรงผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

Run	v (m/min)	d (mm)	f (mm/ rev)	R _n (mm)	γ (°)	(F _{y(max)} - F _{y(min)})/ F _{y(s)}	ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์จาก		
							การวัด	สมการ	โครงข่าย ประสาทเทียม
1	120	0.5	0.3	0.4	-6	1.999	36.688	34.11	33.737
2	120	0.2	0.18	0.4	11	1.358	17.391	16.984	18.117
3	120	0.2	0.18	0.4	-6	1.427	20.206	19.507	18.876
4	250	0.5	0.3	0.8	-6	1.714	32.746	21.319	20.511
5	250	0.2	0.18	0.4	-6	1.061	14.379	14.536	14.723
6	120	0.5	0.18	0.8	-6	1.255	17.039	16.175	17.505
7	120	0.2	0.3	0.4	-6	1.725	30.499	28.084	29.403
8	120	0.5	0.3	0.4	11	1.922	34.679	29.846	33.200
9	120	0.2	0.18	0.8	-6	1.083	13.835	13.318	14.548
10	250	0.5	0.18	0.4	-6	1.504	20.748	19.502	18.253
11	120	0.2	0.3	0.8	11	1.23	17.593	16.578	17.879
12	250	0.2	0.3	0.8	11	1.219	15.212	14.229	18.782
13	250	0.2	0.3	0.4	11	31.753	20.428	28.577	21.976
14	120	0.2	0.18	0.8	11	0.989	11.759	11.359	12.522
15	250	0.2	0.3	0.8	-6	1.281	18.09	16.35	17.9633
16	120	0.5	0.3	0.8	-6	1.07	18.538	19.602	18.6537
17	250	0.5	0.18	0.4	11	1.102	16.504	14.923	16.579
18	250	0.2	0.18	0.8	-6	0.559	9.007	8.289	9.791
19	250	0.5	0.18	0.8	-6	0.652	10.837	10.097	11.625
20	120	0.2	0.3	0.8	-6	1.444	22.177	20.111	18.303
21	120	0.5	0.18	0.4	-6	1.605	25.163	23.354	20.940
22	250	0.5	0.3	0.4	11	1.7	33.034	24.221	29.361
23	250	0.5	0.18	0.8	11	0.599	9.058	8.638	8.590
24	120	0.5	0.18	0.4	11	1.421	20.726	19.621	18.912

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองเพื่อทดสอบของความตรงผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง (ต่อ)

Run	v (m/min)	d (mm)	f (mm/rev)	R_n (mm)	γ ($^{\circ}$)	$(F_{y(max)} - F_{y(min)}) / F_{y(s)}$	ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์จาก		
							การวัด	สมการ	โครงข่ายประสาทเทียม
25	250	0.2	0.3	0.4	-6	1.605	27.21	23.371	28.616
26	250	0.2	0.18	0.8	11	0.534	8.019	7.225	7.809
27	120	0.5	0.3	0.8	11	1.506	18.391	20.692	20.602
28	120	0.5	0.18	0.8	11	1.112	14.688	13.594	14.674
29	120	0.2	0.3	0.4	11	1.564	33.983	23.868	29.786
30	250	0.2	0.18	0.4	11	0.96	12.73	12.342	14.429
31	250	0.5	0.3	0.8	11	1.405	18.476	17.242	18.814
32	250	0.5	0.3	0.4	-6	1.776	33.642	27.744	30.394

จากผลการทดลองเพื่อทดสอบของความตรงผิวชิ้นงานภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง ค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงค่าที่ได้จากการวัดจริง มากกว่าค่าที่ได้จากสมการการทำนายความขรุขระผิวในบางค่า จะเห็นได้ดังรูปที่ 4.60



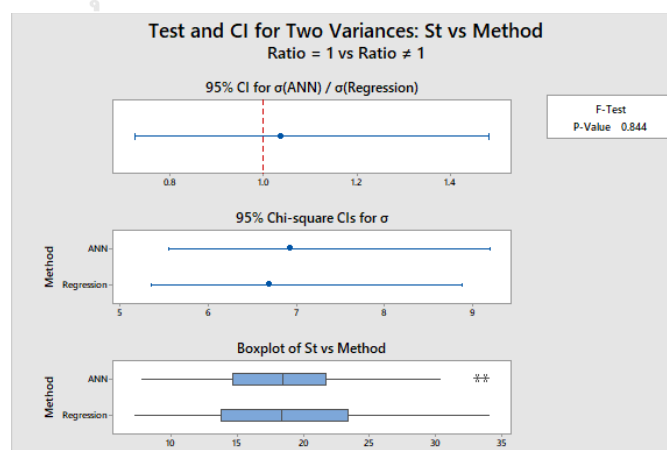
รูปที่ 4.61 ผลการทดสอบความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (S_p) ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

จากผลการทดสอบความขรุขระผิวชิ้นงาน ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง ทำให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนได้จากสมการที่ 4.1 ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความแม่นยำของความตรงเพียงหนึ่งศูนย์ของชิ้นงาน

การทดสอบความแม่นยำ ที่ได้จาก	ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของ เปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน	ค่าเฉลี่ยความแม่นยำของการ ทดสอบ
สมการ	8.15%	91.85%
โครงข่ายประสาทเทียม	8.11%	91.89%

การคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความตรงเพียงหนึ่งศูนย์ของชิ้นงานเท่ากับ 8.11% นั่นคือ การพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ 91.89% ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัย [2] ที่ใช้การสมการที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด เพื่อพยากรณ์ความตรงผิวชิ้นงานเช่นเดียวกันนั้น พบว่าค่าความความตรงเพียงหนึ่งศูนย์ของโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่ได้จากการสมการเล็กน้อย จึงมาทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่ไม่อิสระต่อกัน (Paired t test) เพื่อทำการทดสอบว่าข้อมูลค่าความตรงเพียงหนึ่งศูนย์ชิ้นงานทั้งสองที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งเมื่อทำการทดสอบความแปรปรวนของทั้งสองข้อมูลตั้งสมมติฐานที่ตั้งไว้ พบว่าความแปรปรวนของทั้งสองข้อมูลอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ 1 และมีค่า P-Value = 0.844 ซึ่งมากกว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 (รูปที่ 4.61) ดังนั้น จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Accept H_0) สรุปได้ว่าทั้งสองข้อมูลมีความแปรปรวนที่เท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.62 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความตรงผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

จากการทดสอบความแปรปรวนของทั้งสองข้อมูล ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่ไม่อิสระต่อกัน ซึ่งสมมติฐานการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังนี้

H_0 : ผลต่างของค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของข้อมูลที่ได้จากสมการเท่ากับโครงข่ายประสาทเทียม

H_a : ผลต่างของค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของข้อมูลที่ได้จากสมการไม่เท่ากับโครงข่ายประสาทเทียม

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Regression	32	18.61	6.68	1.18
ANN	32	19.56	6.92	1.22

Estimation for Paired Difference				
				95% CI for
Mean	StDev	SE Mean	$\mu_{\text{difference}}$	
-0.952	2.433	0.430	(-1.829, -0.075)	

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

Test	
Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$
T-Value	P-Value
-2.21	0.034

รูปที่ 4.63 ทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความตรงผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง

จากการทดสอบพบว่า ได้ค่า P-Value = 0.034 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Reject H_0) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่า ผลต่างของค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของข้อมูลที่ได้จากสมการไม่เท่ากับโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้น ค่าเฉลี่ยความแม่นยำที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมให้ผลการพยากรณ์ความตรงผิวชิ้นงานได้แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

4.8.2 การทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม

การทดสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้ว ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง แต่เปลี่ยนชนิดวัสดุของชิ้นงาน ในที่นี้คืออะลูมิเนียม (Al 6063) พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากอัลกอริทึม สืบเนื่องจากอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นทั้งความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนนั้นมากกว่าอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดจากอะลูมิเนียม จากที่ทราบกันดีว่าเหล็กแข็งกว่าอะลูมิเนียม จึงใช้แรงตัดที่

มากกว่าอะลูมิเนียม เพราะเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำอัลกอริทึมของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนมาจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) มาใช้ทำนายความตรงและความขรุขระผิวในวัสดุอะลูมิเนียม โดยใช้เงื่อนไขการทดลอง 54 การทดลองของงานวิจัยก่อนหน้านี้ทั้งความตรง [15] และความขรุขระผิว [1] ที่มุมคายเศษวัสดุ 11 องศา และทำการตัดชิ้นงานอะลูมิเนียมที่มุมคายเศษวัสดุ - 6 องศาเพิ่มอีก 54 เงื่อนไขการทดลอง รวมเป็น 108 เงื่อนไขการทดลอง เพื่อให้การทดลองตรงตามเงื่อนไขการทดลองของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งมีเงื่อนไขการทดสอบภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม ดังตารางที่ 4.10 โดยผลการทดลองได้แก่ อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด AF_y/AF_z ของความขรุขระผิวชิ้นงาน อัตราส่วนแรงตัด $F_{y(max)}-F_{y(min)}/F_{y(s)}$ ของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน (S_v) มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน และค่าที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วจากโครงข่ายประสาทเทียม ผลการทดลองที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงในภาคผนวก ข และผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัด ผลที่ได้จากสมการ (สมการที่ 4.6 – 4.8) และผลที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เงื่อนไขการทดสอบภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		
ความเร็วตัด (V) หน่วย เมตรต่อนาที (m/min)	150	200	250
อัตราการป้อนตัด (d) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)	0.100	0.125	0.150
ความลึกในการตัด (f) หน่วย มิลลิเมตร (mm)	0.10	0.20	0.30
รัศมีงูมกมิตัด (Rn) หน่วย มิลลิเมตร (mm)	0.4	0.8	
มุมคายเศษวัสดุ (γ) หน่วย องศา (°)	-6	11	

เมื่อใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนจากเงื่อนไขการตัดที่ใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน S45C มาพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในวัสดุอะลูมิเนียม พบว่าค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์และความขรุขระผิวที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการวัดดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม

Run	ผลที่ได้จากการวัด			ผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม			ผลที่ได้จากสมการ		
	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)
1	10.498	2.152	9.791	26.272	2.152	9.791	19.243	1.599	6.995
2	12.93	1.695	8.32	13.336	1.695	8.32	13.417	1.663	7.436
3	6.956	0.974	4.849	13.585	0.974	4.849	11.120	0.810	4.031
4	20.36	2.836	14.378	20.477	2.836	14.378	20.053	2.245	10.325
5	6.978	1.031	5.552	11.537	1.031	5.552	9.576	0.771	4.048
6	6.135	0.852	4.568	9.627	0.852	4.568	8.087	0.551	2.827
7	7.227	1.024	5.519	10.912	1.024	5.519	9.683	0.750	3.872
8	16.055	2.463	10.734	16.150	2.463	10.734	14.115	1.031	5.186
9	7.248	1.078	5.733	14.877	1.078	5.733	11.417	0.703	3.588
10	12.821	2.486	10.725	13.769	2.486	10.725	12.396	1.114	5.428
11	8.826	1.068	6.197	9.266	1.068	6.197	7.904	0.591	2.958
12	14.141	1.615	8.005	27.037	1.615	8.005	20.363	1.091	5.779
13	9.346	0.988	4.655	11.709	0.988	4.655	10.745	0.944	4.572
14	5.589	0.929	4.198	7.848	0.929	4.198	7.962	0.547	2.913
15	12.492	2.022	10.081	14.386	2.022	10.081	15.042	1.696	8.096
16	6.824	0.852	4.329	14.263	0.852	4.329	11.443	0.645	3.295
17	14.303	2.306	9.061	16.780	2.306	9.061	14.841	1.170	5.626
18	6.682	1.675	6.508	15.353	1.675	6.508	13.130	0.942	4.641
19	6.217	0.860	4.686	11.450	0.860	4.686	9.275	0.622	3.366
20	7.379	1.332	6.833	28.686	1.332	6.833	18.881	1.382	6.109
21	13.427	1.409	6.751	22.149	1.409	6.751	17.319	1.318	5.957
22	6.014	0.780	4.303	11.516	0.780	4.303	9.347	0.473	2.672
23	10.351	0.684	3.824	12.930	0.684	3.824	10.801	0.778	3.727
24	13.696	0.750	4.034	20.017	0.750	4.034	13.155	0.548	2.753
25	14.257	1.424	7.264	25.318	1.424	7.264	18.074	0.815	4.469
26	5.715	0.699	4.316	12.485	0.699	4.316	8.130	0.397	2.124
27	11.546	1.739	8.038	20.820	1.739	8.038	14.953	0.694	3.691
28	9.719	0.602	3.884	15.966	0.602	3.884	11.757	0.623	3.032
29	10.325	1.109	6.479	31.231	1.109	6.479	23.256	2.277	10.020

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (ต่อ)

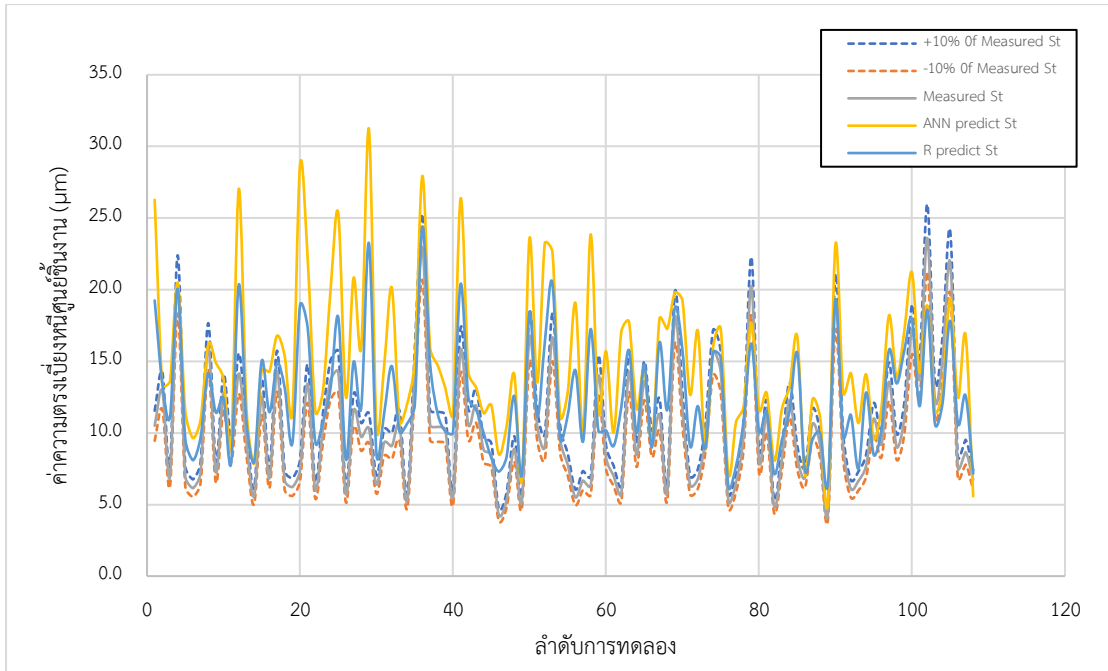
Run	ผลที่ได้จากการวัด			ผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม			ผลที่ได้จากสมการ		
	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)
30	6.390	0.645	3.251	10.368	0.645	3.251	8.481	0.519	2.651
31	9.323	1.043	5.232	14.702	1.043	5.232	11.368	0.570	2.947
32	9.086	1.135	6.109	20.130	1.135	6.109	14.659	0.765	3.718
33	10.494	1.286	6.394	10.807	1.286	6.394	10.104	0.797	4.227
34	5.218	0.749	3.978	12.014	0.749	3.978	10.645	1.523	6.615
35	14.331	2.084	9.775	15.007	2.084	9.775	11.936	0.713	3.662
36	22.946	2.363	11.547	27.938	2.363	11.547	24.388	1.884	9.126
37	10.568	1.869	10.18	15.984	1.869	10.18	14.852	1.341	6.470
38	10.421	1.373	6.982	14.723	1.373	6.982	11.317	0.655	3.605
39	10.202	1.603	7.585	13.119	1.603	7.585	10.091	1.281	6.441
40	5.498	0.728	4.079	11.309	0.728	4.079	9.996	0.969	4.800
41	15.768	1.583	8.186	26.369	1.583	8.186	20.407	1.168	5.969
42	10.572	1.723	7.411	14.257	1.723	7.411	12.501	1.206	5.670
43	11.906	1.776	8.135	13.208	1.776	8.135	11.650	1.040	5.069
44	8.826	1.196	6.377	11.377	1.196	6.377	9.998	0.953	4.491
45	8.434	1.013	5.491	11.937	1.013	5.491	8.269	0.641	3.549
46	4.265	0.443	2.584	8.502	0.443	2.584	7.298	0.411	2.150
47	5.296	0.852	4.130	10.454	0.852	4.130	8.319	0.499	2.533
48	8.881	1.144	6.106	14.115	1.144	6.106	12.583	1.006	5.125
49	5.265	1.086	5.570	6.722	1.086	5.570	7.047	0.623	3.330
50	16.706	1.517	7.869	23.575	1.517	7.869	18.444	1.029	5.422
51	10.553	1.249	5.847	13.504	1.249	5.847	11.129	0.915	4.530
52	9.035	1.152	5.612	23.237	1.152	5.612	16.314	0.854	4.277
53	16.668	2.653	12.74	22.606	2.653	12.74	20.433	1.638	8.006
54	9.581	1.008	5.425	11.210	1.008	5.425	9.590	0.648	3.401
55	7.784	1.281	6.218	12.844	1.281	6.218	11.253	1.032	4.941
56	5.501	1.088	5.607	19.071	1.088	5.607	14.377	0.865	4.016
57	6.674	0.925	4.300	10.125	0.925	4.300	9.399	0.571	3.134
58	6.295	0.731	4.411	23.855	0.731	4.411	17.252	0.933	4.491

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (ต่อ)

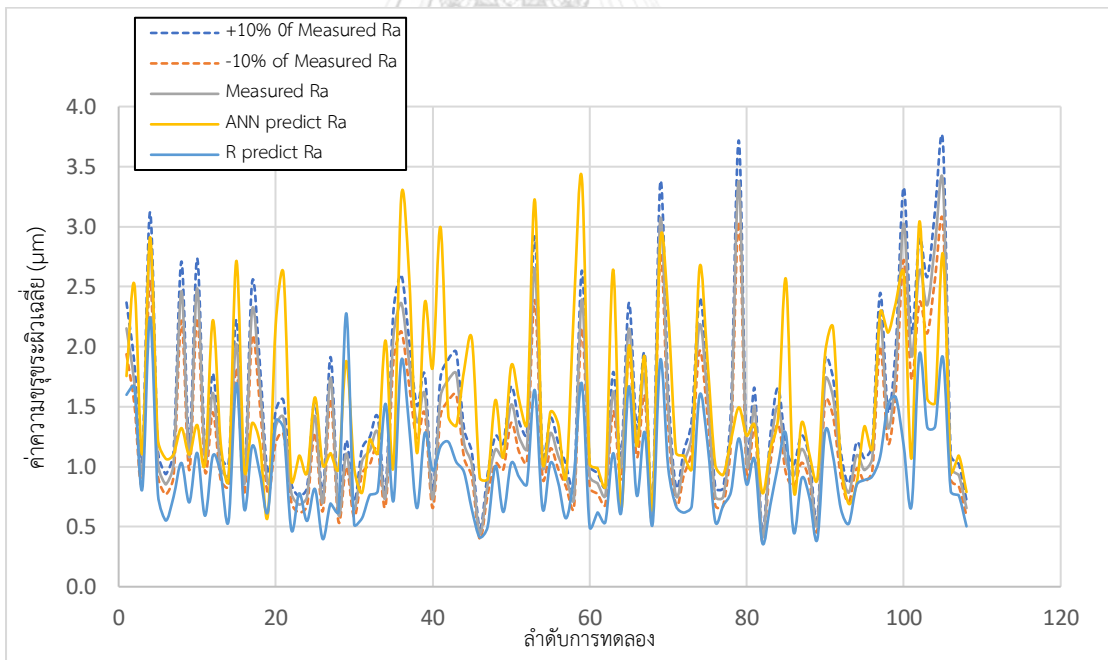
Run	ผลที่ได้จากการวัด			ผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม			ผลที่ได้จากสมการ		
	S _t (μm)	R _a (μm)	R _z (μm)	S _t (μm)	R _a (μm)	R _z (μm)	S _t (μm)	R _a (μm)	R _z (μm)
59	14.001	2.393	10.512	11.414	2.393	10.512	10.155	1.694	8.137
60	8.312	0.923	5.168	15.697	0.923	5.168	10.173	0.499	2.833
61	7.003	0.863	4.127	10.025	0.863	4.127	9.090	0.618	3.257
62	5.785	0.761	3.655	17.047	0.761	3.655	11.793	0.539	2.672
63	14.263	1.625	7.81	17.773	1.625	7.81	15.778	1.112	5.521
64	8.467	0.998	5.231	11.670	0.998	5.231	9.997	0.614	3.461
65	13.643	2.149	11.031	14.586	2.149	11.031	14.760	1.669	7.890
66	9.242	1.200	6.290	9.300	1.200	6.290	8.988	0.760	3.980
67	11.261	1.769	8.793	17.981	1.769	8.793	16.328	1.289	6.729
68	5.823	0.627	3.423	17.259	0.627	3.423	11.583	0.514	2.539
69	18.038	3.064	15.331	19.808	3.064	15.331	18.716	1.891	8.657
70	11.653	1.503	7.237	19.226	1.503	7.237	15.742	0.995	5.162
71	6.342	0.758	4.467	12.651	0.758	4.467	9.059	0.672	3.448
72	6.775	1.035	4.160	17.141	1.035	4.160	11.873	0.618	3.104
73	9.668	1.258	5.911	8.848	1.258	5.911	8.951	0.672	3.619
74	15.615	2.182	10.678	16.016	2.182	10.678	15.638	1.594	7.410
75	14.239	1.586	7.336	17.256	1.586	7.336	15.247	1.199	6.010
76	5.265	0.753	4.282	7.145	0.753	4.282	6.261	0.541	2.908
77	6.532	0.747	4.176	10.756	0.747	4.176	7.701	0.676	3.410
78	9.936	1.344	7.264	11.888	1.344	7.264	10.884	0.791	4.274
79	20.245	3.378	13.192	17.677	3.378	13.192	16.237	1.235	6.108
80	8.076	1.034	5.45	11.609	1.034	5.45	10.137	0.851	4.084
81	11.150	1.502	7.901	12.790	1.502	7.901	11.489	1.061	5.591
82	4.861	0.415	2.462	8.061	0.415	2.462	7.147	0.363	1.919
83	8.202	1.134	5.955	11.669	1.134	5.955	9.533	0.676	3.393
84	12.294	1.503	7.748	13.256	1.503	7.748	11.559	1.010	5.174
85	8.281	1.052	5.643	16.729	1.052	5.643	15.573	1.273	5.891
86	6.857	0.926	4.718	7.049	0.926	4.718	7.416	0.450	2.435
87	10.635	1.147	5.798	12.351	1.147	5.798	9.571	0.903	4.426

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (ต่อ)

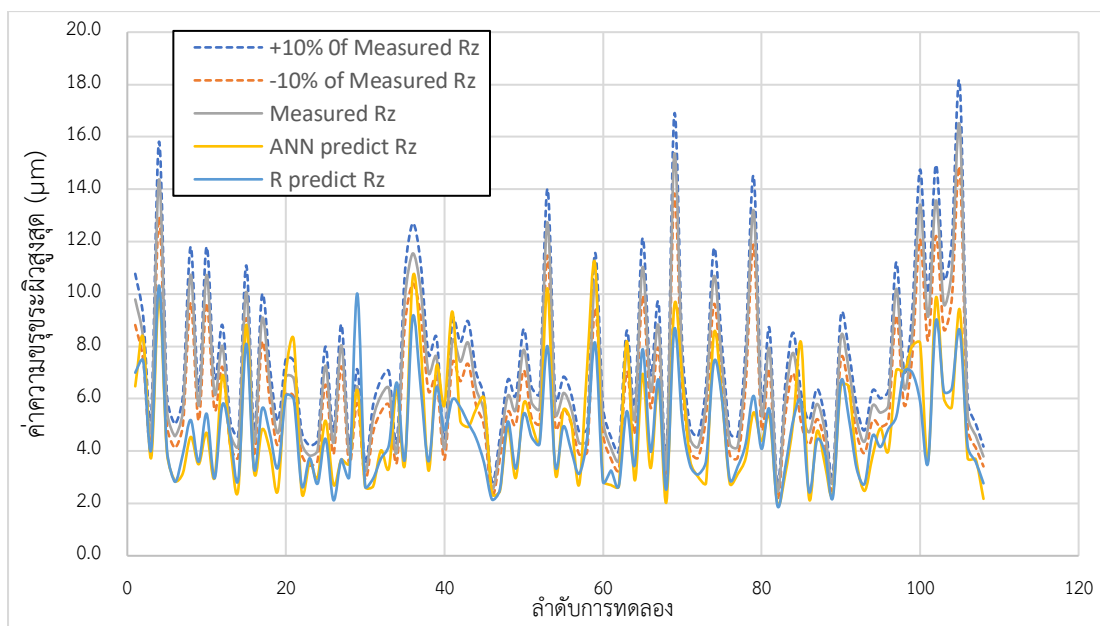
Run	ผลที่ได้จากการวัด			ผลที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม			ผลที่ได้จากสมการ		
	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	S_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)
88	9.107	0.974	4.777	11.038	0.974	4.777	9.987	0.742	3.942
89	4.312	0.522	2.849	5.080	0.522	2.849	6.412	0.395	2.225
90	19.130	1.725	8.325	23.194	1.725	8.325	19.316	1.292	6.633
91	9.085	1.581	7.133	12.812	1.581	7.133	9.757	1.086	5.284
92	6.108	1.017	5.200	14.177	1.017	5.200	11.269	0.648	3.332
93	6.647	0.784	4.359	10.694	0.784	4.359	7.496	0.525	2.748
94	7.697	1.093	5.733	14.086	1.093	5.733	12.818	0.846	4.580
95	10.983	0.972	5.466	9.578	0.972	5.466	8.458	0.889	4.156
96	9.207	1.073	5.747	11.727	1.073	5.747	10.167	0.920	4.845
97	13.565	2.224	10.194	18.214	2.224	10.194	15.795	1.083	5.315
98	9.018	1.326	6.389	13.883	1.326	6.389	13.448	1.519	7.039
99	11.019	1.816	8.434	17.124	1.816	8.434	15.749	1.577	7.009
100	17.198	3.024	13.41	21.219	3.024	13.41	17.926	1.176	5.900
101	13.842	1.921	9.128	14.214	1.921	9.128	11.862	0.672	3.540
102	23.604	2.633	13.571	18.879	2.633	13.571	18.582	1.938	8.978
103	12.330	2.346	9.608	11.522	2.346	9.608	10.629	1.331	6.292
104	15.215	2.852	10.88	13.009	2.852	10.88	12.075	1.335	6.391
105	21.892	3.364	16.415	19.383	3.364	16.415	17.819	1.910	8.616
106	7.571	0.996	5.388	12.449	0.996	5.388	10.669	0.795	4.192
107	8.654	0.933	4.605	16.834	0.933	4.605	12.612	0.762	3.606
108	6.724	0.655	3.794	5.575	0.655	3.794	7.155	0.503	2.769



รูปที่ 4.64 ผลการทดสอบความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม

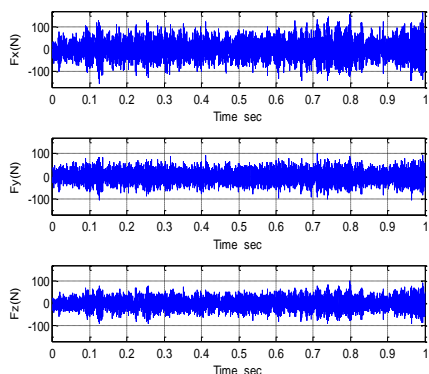


รูปที่ 4.65 ผลการทดสอบความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม

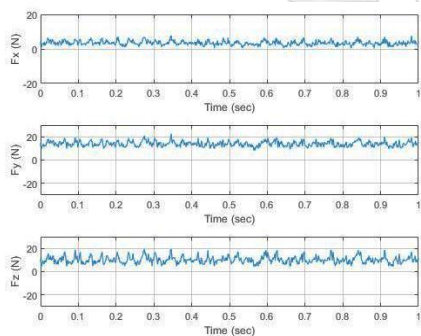


รูปที่ 4.66 ผลการทดสอบความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม

กราฟเปรียบเทียบความแม่นยำที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมและค่าที่ได้จากการวัดดังรูปที่ 4.62 – 4.64 พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเกินขอบเขตค่าที่ได้จากการวัด ค่าความตรง เบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงานและความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมากกว่าค่าที่ได้จากการวัด เนื่องจากการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้อัตราส่วนแรงตัดและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ แรงตัดของเหล็ก โดยเหล็กจะใช้แรงในการตัดมากกว่าอะลูมิเนียม เพราะอะลูมิเนียมเมื่อใช้ความเร็ว ตัดที่มากในระดับหนึ่ง ผิวจะอ่อนนุ่ม ทำให้ใช้แรงตัดน้อยกว่าเหล็ก ดังรูปที่ 4.65 – 4.66 และในการ ทดลองบางช่วงอยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง อาจเป็นเหตุให้โครงข่ายประสาทเทียมพยากรณ์ ผิดพลาดไปได้ นอกจากนี้ในบางกรณีอัตราส่วนแรงตัดของอะลูมิเนียมจะมากกว่าเหล็ก เพราะ อะลูมิเนียมเมื่อใช้ความเร็วตัดมาก หรืออัตราการป้อนตัดสูง หรือความลึกในการตัดมาก อาจทำให้เกิดการพอกติดของเศษวัสดุที่คมตัด (Built-Up Edge หรือ BUE) คือปรากฏการณ์ที่อะลูมิเนียม บางส่วนหลอมติดกับมีดตัดบริเวณคมตัดหรือหน้าคายเศษโลหะ (รูปที่ 4.67) ยิ่งใช้มุมคายเศษโลหะที่เป็นลบ ยิ่งมีการพอกติดที่มาก ทำให้มีผลต่อกลไกการตัด ในขณะที่ทำการกลึงอะลูมิเนียมที่พอกติด กับมีดตัดอยู่นั้นจะชูดกับผิวชิ้นงาน ส่งผลให้แรงที่ใช้ตัดเพิ่มมากขึ้น สัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นใน โดเมนเวลาจึงไม่สม่ำเสมอ อัตราส่วนแรงตัดที่คำนวณได้จึงมีความไม่แน่นอน



รูปที่ 4.67 แรงตัดพลวัตที่โดเมนเวลาที่มีความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุกมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีเศษโลหะแบบแตกหัก



รูปที่ 4.68 แรงตัดพลวัตที่โดเมนเวลาที่มีความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุกมิตตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษวัสดุ -6 องศา สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียมที่มีเศษโลหะแบบต่อเนื่อง



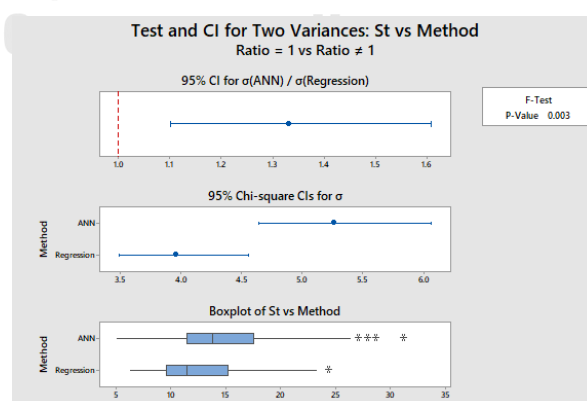
รูปที่ 4.69 การพอกติดของเศษอะลูมิเนียมกับมีดตัดที่คมตัดและเศษอะลูมิเนียม

จากผลการทดสอบความตรงและขรุขระผิวชิ้นงาน ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม ทำให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percent Error, MAPE) ได้จากสมการที่ 4.1 ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.12

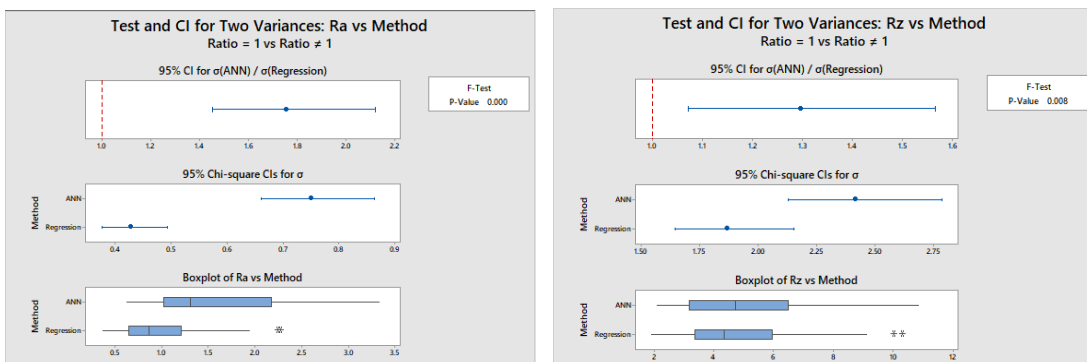
ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของความตรงและขรุขระผิวชิ้นงาน ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม

การทดสอบความแม่นยำที่ได้จาก	ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน			ค่าเฉลี่ยความแม่นยำของการทดสอบ		
	R_a	R_z	S_t	R_a	R_z	S_t
สมการ	32.04%	30.50%	34.46%	67.96%	69.50%	59.29%
โครงข่ายประสาทเทียม	38.81%	31.25%	59.29%	61.19%	67.96%	40.71%

การคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความตรงเพียงหนึ่งศูนย์ (S_t), ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) มีค่าเท่ากับ 59.29%, 38.81% และ 31.25% ตามลำดับ นั่นคือ การพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ 40.71%, 61.19% และ 67.96% ตามลำดับ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดได้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 34.46%, 32.04% และ 30.50% ตามลำดับ นั่นคือ ได้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับ 59.29%, 67.96% และ 69.50% ตามลำดับ



รูปที่ 4.70 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความตรงผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้อะลูมิเนียม



ความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a)

ความขรุขระผิวสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.71 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงาน ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ข้อมูลนิยาม

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Regression	108	12.472	3.950	0.380
ANN	108	14.928	5.258	0.506

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Regression	108	0.9682	0.4268	0.0411
ANN	108	1.5900	0.7491	0.0721

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Regression	108	4.772	1.866	0.180
ANN	108	5.141	2.415	0.232

ความตรงผิวชิ้นงาน (S_v)

ความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a)

ความขรุขระผิวสูงสุด (R_z)

รูปที่ 4.72 ทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียม ในการทดสอบความแม่นยำ ภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ข้อมูลนิยาม

จากนั้นทำการทดลองความแปรปรวนของทั้งข้อมูลที่ได้จากสมการและโครงข่ายประสาทเทียมในค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย และค่าความขรุขระผิวสูงสุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($\alpha = 0.05$) ซึ่งจากการตั้งสมมติฐานที่ผ่านมา ได้ค่า P-Value = 0.003, 0.000 และ 0.008 ตามลำดับ (รูปที่ 4.70 – 4.71) ซึ่งมีค่าทั้งสามน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Reject H_0) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่า ข้อมูลทั้งสองข้อมูลมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำทั้งสองข้อมูลทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่ไม่อิสระต่อกัน ซึ่งสมมติฐานการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) จากการทดสอบพบว่า ได้ค่า P-Value = 0.000, 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ (รูป 4.72) ซึ่งทั้งค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ค่าความขรุขระผิวสูงสุด และค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

0.05 ดังนั้น จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Reject H_0) สรุปได้ว่า ความแตกต่างของข้อมูลของค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ค่าความขรุขระผิวสูงสุดและค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีค่าไม่เท่ากันทั้งข้อมูลที่ได้สมการและโครงข่ายประสาทเทียม อย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่ไม่อิสระต่อกัน ทำให้ทราบว่าค่าเฉลี่ยความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ความขรุขระผิวสูงสุดและค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ทั้งสมการและโครงข่ายประสาทเทียมมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แม้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำจะใกล้เคียงกันก็ตาม

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าสมการให้ค่าความแม่นยำมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียม ทั้งความขรุขระผิวชิ้นงานและความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่ได้ไม่ดีเท่าที่คาดหวังไว้ เนื่องจากปัจจัยหลายๆอย่างเช่น เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไปแม้อยู่ในขอบเขตการทดลองเดิม แรงตัดพลวัตที่เกิดจากอะลูมิเนียมบางเงื่อนไขอาจเกิด BUE ขึ้น ทำให้การพยากรณ์คลาดเคลื่อนได้ ข้อมูลในการพยากรณ์อาจไม่เพียงพอ และปัจจัยในเรื่องของวัสดุ

เนื่องจากอะลูมิเนียม มีผิวชิ้นงานที่อ่อนนุ่มขึ้นในขณะที่ทำการตัด ทำให้เศษที่ได้เป็นแบบต่อเนื่อง (รูปเศษวัสดุของอะลูมิเนียมแสดงในภาคผนวก ค) แต่เหล็กเป็นวัสดุที่มีความแข็งกว่าอะลูมิเนียม เมื่อทำการตัดเศษที่ได้จะเป็นแบบแตกหักและต่อเนื่องปะปนกันไป (รูปที่ 4.63) ทำให้ส่งผลต่อแรงตัดพลวัตที่นำมาคำนวณอัตราส่วนแรงตัด และอาจมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งสมการที่ถูกพัฒนาขึ้นทั้งความขรุขระและความตรงผิวชิ้นงานของเหล็กนั้น อาจมีแรงที่เกิดจากการแตกหักของเศษวัสดุเหล็กปะปนเข้าไป ทำให้ค่าแรงที่ได้มาก และอาจไม่เหมาะนำมาพยากรณ์ผิวชิ้นงานของอะลูมิเนียม เพราะอะลูมิเนียมมีเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (รูปที่ 4.64) และด้วยเงื่อนไขการตัดที่อยู่ในขอบเขตเดิม แต่ไม่ใช่เงื่อนไขการตัดเดิมทั้งของความขรุขระผิวและความตรง ทำให้ค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมไม่ดีเท่าที่ควร จะเห็นได้จากภาคผนวก ค ที่มีสัญญาณแทรกของทั้งเศษโลหะ ความตรง และความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากที่กล่าวมาข้างต้น ในบางเงื่อนไขการตัดอาจไม่สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์หรือประมาณค่าความขรุขระผิวและความตรงได้ เนื่องจากเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่แล้วพบว่า ในบางเงื่อนไข ความถี่ของแรงตัดพลวัตไม่สอดคล้องกับความตรงและความขรุขระผิวที่ถูกวัดขึ้น เพราะการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วไม่สามารถแยกข้อมูลได้ดีเท่าวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) ซึ่งเป็นการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่เช่นเดียวกัน แต่สามารถแปลงได้หลากหลายความถี่ว่าการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถเห็นความถี่ของแรงตัดพลวัต

ความตรง ความซรุขระผิว เศษโลหะแบบแตกหัก ได้ชัดเจนขึ้น และทำให้สามารถทำนายค่าความซรุขระผิวและความตรงได้แม่นยำยิ่งขึ้นอีกด้วย



บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

ในการศึกษาระบบการผลิตแบบอัจฉริยะซึ่งเป็นระบบการผลิตที่มีความเป็นอัจฉริยะ สามารถเรียนรู้และควบคุมและตรวจสอบด้วยตนเองได้ โดยในงานวิจัยนี้คือเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อแก้ไขปัญหาในระบบการผลิตได้อย่างทันทั่วทั้งที่ และลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการและระบบการผลิต รวมถึงข้อผิดพลาดของขนาดและรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงาน ในที่นี้คือความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้าโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ด เพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย, ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด และความตรงผิวชิ้นงาน และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนกับวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด จากการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ภายใต้เงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีงมูกตัด และมุมคายเศษวัสดุ และอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผล อภิปรายผล ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลที่ได้การวิจัย

การพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบสองชั้นป้อนไปข้างหน้าโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ด ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรในชั้นนำเข้า ได้แก่ ความเร็วตัด ความลึกในการตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีงมูกมีดตัด มุมคายเศษวัสดุ อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด (AF_y / AF_z) สำหรับความขรุขระผิวและอัตราส่วนแรงตัด ($F_{y(max)} - F_{y(min)} / F_{y(s)}$) สำหรับความตรง และชั้นซ่อน 10 ชั้น เพื่อปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนให้มีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยสุด และชั้นแสดงผลได้แก่ ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a), ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) และความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน (S_v) และใช้ไดนามิเตอร์ในการตรวจติดตามแบบทันทั่วทั้งที่เพื่อตรวจจับและเก็บค่าแรงตัดในขณะตัด โดยต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ แปลงต่อไปแสดงผลบนหน้าจอของเครื่องออสซิลอโคป

ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมอยู่ในรูปแบบค่าค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลลัพธ์ที่ได้รับจากการทดลอง (Target) กับค่าผลลัพธ์ของที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ของ

ข้อมูลที่ถูกใช้ในการฝึกสอน (Training), การยืนยันความถูกต้อง (Validation) , การทดสอบ (Test) และข้อมูลทั้งหมด (All) เท่ากับ 0.99282, 0.96348, 0.96954 และ 0.98541 ตามลำดับสำหรับการฝึกสอนความขรุขระผิวชิ้นงาน และ 0.98795, 0.86709, 0.98114 และ 0.96900 ตามลำดับสำหรับการฝึกสอนความตรงผิวชิ้นงาน โดยทั้งสองให้ผลการฝึกสอนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

การทดสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้ว พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากอัลกอริทึมและวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง ในที่นี้คือเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) และการทดสอบความแม่นยำภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง แต่ใช้วัสดุชิ้นงานเป็นอะลูมิเนียม (Al 6063) ได้ผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความแม่นยำ

การทดสอบความแม่นยำที่ได้จาก		ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน			ค่าเฉลี่ยความแม่นยำของการทดสอบ		
		R_a	R_z	S_t	R_a	R_z	S_t
เหล็กกล้าคาร์บอน	สมการ	8.11%	8.21%	8.15%	91.89%	91.79%	91.85%
	โครงข่ายประสาทเทียม	11.22%	7.49%	8.11%	88.78%	92.51%	91.89%
อะลูมิเนียม	สมการ	32.04%	30.50%	34.46%	67.96%	69.50%	59.29%
	โครงข่ายประสาทเทียม	38.81%	31.25%	59.29%	61.19%	67.96%	40.71%

จากตารางที่ 5.1 พบว่าในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำในความขรุขระผิวสูงสุดและความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางที่ดีกว่าสมการ แต่ในความขรุขระผิวเฉลี่ย สมการให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำมากกว่า และเมื่อใช้วัสดุอะลูมิเนียม โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำน้อยกว่าสมการ โดยการทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่ไม่อิสระต่อกัน พบว่าในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน สมการและโครงข่ายประสาทเทียมให้ข้อมูลไม่แตกต่างกัน แต่ในวัสดุอะลูมิเนียมมีความแตกต่างกันของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ค่าความขรุขระผิวสูงสุดและค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลาง อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสมการที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดได้พัฒนามาจากวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ทั้งสมการสำหรับความตรงและความขรุขระผิว ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหักปะปนกันในแต่ละเงื่อนไขการตัด ทำให้แรงตัดพลวัตที่ได้มีสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะที่เกิดขึ้นร่วมอยู่ด้วย ส่งผลให้ในการคิดอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นมีค่ามาก ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนแรงตัดในสมการจึงเพิ่มขึ้น แต่อะลูมิเนียมให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องในเกือบทุกเงื่อนไขการตัด ทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจึง

น้อย ส่งผลให้แรงตัดพลวัตลดลง อัตราส่วนแรงตัดจึงน้อยกว่าของเหล็ก เป็นเหตุผลให้เมื่อนำเข้าโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนมาจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน S45C แล้วนำมาพยากรณ์ในวัสดุอะลูมิเนียม 6063 จึงมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการวัด

สำหรับการประยุกต์ใช้เซนเซอร์แรงในการตรวจติดตามแรงตัดในขณะตัดร่วมกับเครื่องจักรกลอัจฉริยะ ในอนาคตคาดหวังว่าจะทำให้ระบบการจัดการภายในอุตสาหกรรมทำงานได้อย่างทันท่วงทีขึ้น หากพัฒนาระบบเป็นแบบต่อเนื่องได้ เนื่องจากงานวิจัยเป็นงานวิจัยแบบไม่ต่อเนื่อง ต้องมีการนำผลและข้อมูลมาวิเคราะห์ร่วมกับอัลกอริทึมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน และหากนำไปศึกษาและพัฒนาต่อยอดร่วมกับเครื่องจักรกลอัจฉริยะหรืออัลกอริทึมต่างๆ จะช่วยลดปริมาณของเสีย เวลาในการผลิต ต้นทุนและเพิ่มคุณภาพให้แก่การผลิตได้เป็นอย่างดี

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. ในการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สัญญาณของแรงตัดพลวัตที่ได้ในโดเมนความถี่ อาจไม่สัมพันธ์กับสัญญาณความตรงและความขรุขระผิวในโดเมนความถี่ เนื่องจากมีสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะ และการพอกติดของเศษโลหะที่คมตัดร่วมอยู่ ทำให้สัญญาณที่ได้มีความซับซ้อนมาก หากใช้การแปลงเวฟเล็ต จะสามารถแยกสัญญาณได้ดีกว่าการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว และทำให้พยากรณ์ผิวชิ้นงานได้แม่นยำมากขึ้น

2. ในการทดสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งในเหล็กและอะลูมิเนียมอาจมีสาเหตุความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น องศาในการติดตั้งเซนเซอร์แรงและเม็ดมีดบนป้อมมีดตัดในแต่ละครั้งที่เปลี่ยนมีดตัด และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดผิวชิ้นงาน

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการวิจัย

1. เนื่องจากการทดลองมีจำนวนที่มาก ใช้เวลานานในการทำวิจัย ซึ่งในการทดลองแต่ละเครื่องต้องทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงใหม่ทุกครั้ง รวมถึงตั้งค่าตำแหน่งที่เริ่มตัด อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการตัด ส่งผลต่อค่าในการวัดความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงาน

2. จากการวัดความตรงและความขรุขระผิวอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เนื่องจากปากกาที่จับชิ้นงาน ไม่เหมาะสมกับจับชิ้นงานที่เป็นทรงกลม ทำให้ในบางเงื่อนไขการตัด ค่าความตรงที่ได้อาจเกินค่าที่ได้จริงจากการตัดไปเล็กน้อย

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีราคาสูง รวมถึงเม็ดมีด และวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง การทดลองในงานวิจัยนี้จึงไม่มีการทำซ้ำในแต่ละการทดลอง หากมีการทดลองมีการทดลองซ้ำในจำนวนการทดลองที่เหมาะสม อาจทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ปากกาที่ใช้จับในการวัดผิวชิ้นงานควรเปลี่ยนให้เหมาะสมในแต่ละรูปทรงเรขาคณิตของวัสดุ หรือนำผ้าหรือวัสดุอ่อนนุ่มมารองที่ปากกาจับก่อนจับชิ้นงานที่เป็นทรงกลม เพื่ออุบัติเหตุที่อาจทำให้เข็มวัดผิวชิ้นงานเสียหายได้
2. แนวทางงานวิจัยนี้ได้ใช้มิติตัดแบบคาร์โบได์เคลือบผิวในการตัดชิ้นงาน หากสามารถนำไปปรับใช้กับการทดลองที่ใช้มิติตัดอีกประเภท หรือกระบวนการอื่นๆได้
3. ควรเก็บข้อมูลที่ใช้ในการพยากรณ์ความตรงและความขรุขระผิวชิ้นงานในโครงข่ายประสาทเทียมให้มากกว่านี้ เพื่อให้การพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้น
4. การแปลงเวฟเล็ทสามารถแยกสัญญาณแรงตัด สัญญาณเศษโลหะแบบแตกหัก และสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เพราะสามารถแยกสัญญาณออกมาได้ในแต่ละชั้นสัญญาณ ซึ่งคาดหวังว่าการแปลงเวฟเล็ทจะให้ผลพยากรณ์ที่มีความแม่นยำมากกว่าการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

บรรณานุกรม

- [1] อาทิตยา ชัยจรีนนท์, การพยากรณ์ในกระบวนการสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานในการกลึง อะลูมิเนียม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2560, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- [2] ธารรัตน์ ชาญสูงเนิน, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการกลึง, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- [3] กันยگانต์ สมานมิตร, การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- [4] ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง, การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- [5] บริษัท ไชยเจริญเทค จำกัด. อุตสาหกรรมเหล็ก มีความสำคัญมากต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศไทย. 2562 [1 มกราคม 2019]; Available from: <https://www.chi.co.th/article/article-1427/>.
- [6] นิรัติศัย ทุมวงษา, อุตสาหกรรมเหล็ก. วารสารแนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-63, 2561.
- [7] Manufacture Overhaul Rapid and Optimal Co., L. สัญลักษณ์ความหยาบละเอียดของผิวงาน. 2559. [20 พฤษภาคม 2561]; Available from: <http://www.moro.co.th/%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%A9%E0%B8%93%E0%B9%8C%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%AB%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%9A%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%B5/>.
- [8] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. พิมพ์ครั้งที่ 2 ed, พิมพ์ครั้งที่ 2. 2561, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] มูร์มิน ศาสน์สันติวงศ์, การพัฒนาการทำนายค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้การแปลงเวฟเลข, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2558, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- [10] Tangjitsitcharoen, S., *In-process prediction of surface roughness by utilizing the cutting force ratio*. Trans NAMRI/SME, 2010. 38: p. 307-315.

- [11] อรรถรัตน์ บุญยะผลานนท์ และ สมชาย ปราการเจริญ, เปรียบเทียบการพยากรณ์เกรดเฉลี่ยของนักศึกษาคณะเทคโนโลยีสารสนเทศด้วยการวิเคราะห์การถดถอยและโครงข่ายประสาทเทียม. การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7, 2554.
- [12] Tangjitsitcharoen, S. and C. Rungruang. *In-process monitoring and estimation of tool wear on CNC turning by applying multi-sensor with back propagation technique*. in *Advanced Materials Research*. 2011. Trans Tech Publ.
- [13] ธนาวุฒิ ประกอบผล, โครงข่ายประสาทเทียม. วารสาร มฉก.วิชาการ 74, 2552. 24: p. 73-87.
- [14] Movagharnejad, K., M.J.C. Nikzad, and e.i. agriculture, *Modeling of tomato drying using artificial neural network*. 2007. 59(1-2): p. 78-85.
- [15] พรรณีภา พ่วงพัต, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดในกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2560, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- [16] Feng, C.-X., and Xian-Feng Wang, *Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression*. IIE Transactions, 2003. 35-1: p. 11-27.
- [17] Groover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing : materials, process, and system*. 4th ed. 2010, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [18] Rayon Johnson. *The centre lathe*. 2016. [2016 Nov 20]; Available from: <https://www.slideshare.net/rayonjohnson1/the-centre-lathe>.
- [19] Viboon. เทคโนโลยีตัดเฉือนวัสดุ: วัสดุเครื่องมือตัด. 2552. [3 พฤศจิกายน 2561]; Available from: <http://www.viboon.org/2009/11/14/เทคโนโลยีการตัดเฉือนวัสดุ/>.
- [20] JOOM. คาร์ไบด์แทรกกล่องสำหรับเครื่องกลึงกลึงเครื่องมือ. 2561. [30 พฤศจิกายน 2561]; Available from: <https://www.joom.com/th/products/1504173600052880313-73-1-709-1296055462>.
- [21] ExpertsMind.com. *Geometry of Turning Tools*. 2018 [1 Jan 2019]; Available from: <http://www.expertsmind.com/topic/geometry-of-turning-tools/cutting-tool-geometry-910705.aspx>.
- [22] Le Hieu Giang, M.D.D., Pham Minh Duc, *Investigation of Effects of Tool Geometry Parameters on Cutting Forces, Temperature and Tool Wear in Turning Using Finite Element Method and Taguchi's Technique*. International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 2016. 4(3): p. 109-114.
- [23] จักร จันทลักษณ์, การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และการประยุกต์ใช้เพื่อวินิจฉัยสภาพ

- เครื่องจักร ตอนที่ 1 : แกนอ้างอิงเทียบทางความถี่ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์. วารสารพัฒนาเทคนิค, 2545. 15: p. 17-22.
- [24] Tangjitsitcharoen, S., *In-process investigation of turning process applied with and without cutting fluid*. Journal of mechanical engineering, 2009. 6: p. 85-102.
- [25] สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, ความตรง. วารสาร Metrology, 2555. 13: p. 63.
- [26] ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [27] บรรหาญ ลีลา, เอกสารประกอบการสอนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น. 2559: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. p. 1-51.
- [28] Tangjitsitcharoen, S. and A. Senjuntichai, *In-process monitoring and prediction of surface roughness in ball-end milling process*. 2010.
- [29] 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.
- [30] Shansungnoen, T. and S. Tangjitsitcharoen, *Investigation of relation between Straightness and Cutting Force in CNC Turning Process*. Applied Mechanics and Materials, 2015. 789-790: p. 812-820.
- [31] Tangjitsitcharoen, S., C. Rungruang, and N. Pongsathornwiwat, *Advanced monitoring of tool wear and cutting states in CNC turning process by utilizing sensor fusion*. Trans Tech Public, 2011. 189: p. 377-384.
- [32] Tangjitsitcharoen, S. and A. Senjuntichai. *Comparison of in-process cutting state detection in cnc turning using different neural network systems*. in *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Trans Tech Public.
- [33] KYOCERA Asia Pacific(Thailand) Co., L., *KYOCERA มีดตัดเนื้อโลหะ*. 2008, Bangkok, Thailand.
- [34] บริษัท พีแอนด์เอ็ม เทคโนโลยี เซอร์วิส จำกัด. *คุณสมบัติเหล็ก S45C*. 2558 [7 มกราคม 2562]; Available from: <http://www.pandmtechnology.com/index.php?mo=3&art=42227701>.
- [35] Khumseekiew, J. and S. Lee, *Application of Neural Network in Prediction of the Percentage of Broken Rice in the Small Rice Mill*, in *The National Graduate Research Conference*. 2012: Khon Kaen University.

- [36] Terkhleb. *Fourier Transform*. 2018 [10 Oct 2019]; Available from: <https://github.com/trekhleb/javascript-algorithms/tree/master/src/algorithms/math/fourier-transform>.
- [37] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นวภัทรา หนูนาค. *Accuracy / ความถูกต้อง ความแม่นยำ*. 2555 [14 ธันวาคม 2562]; Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4289/accuracy-%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%96%E0%B8%B9%E0%B8%81%E0%B8%95%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%87-%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B9%88%E0%B8%99%E0%B8%A2%E0%B8%B3>.





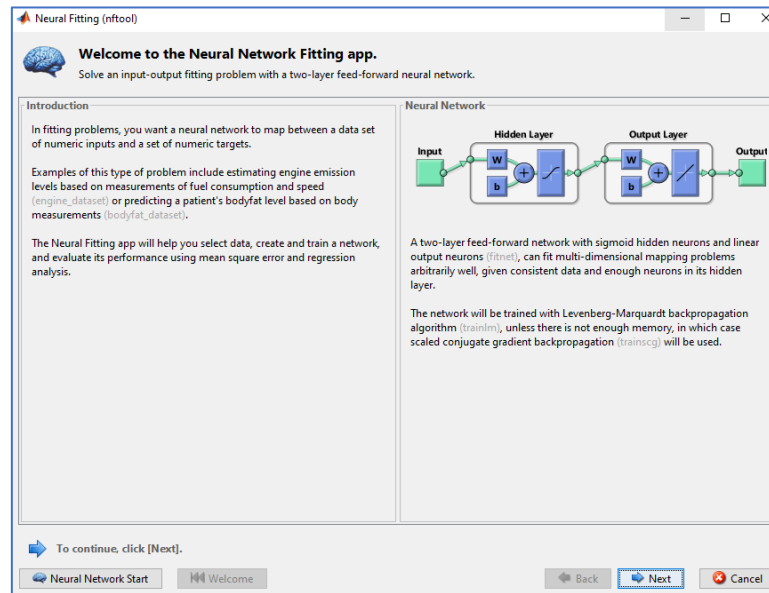
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

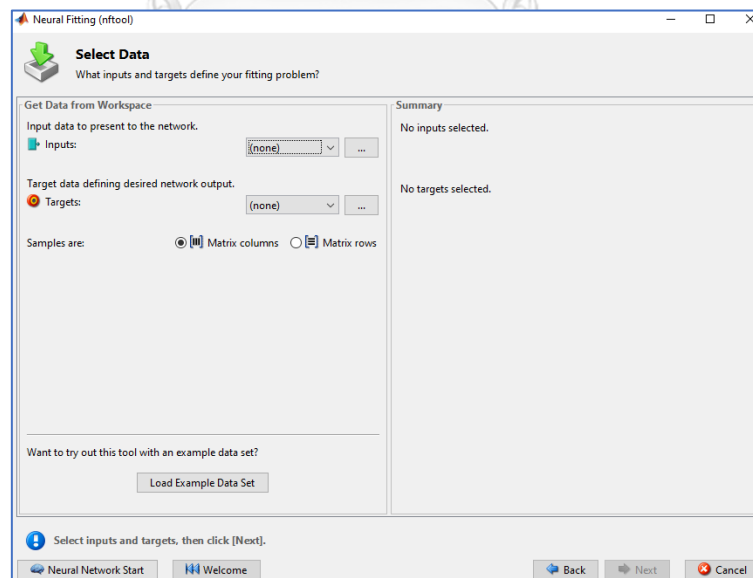


ขั้นตอนการพยากรณ์ความตรงและความชรุระผิวขึ้นงาน
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back propagation learning)

1) เปิดใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมที่มีในโปรแกรม matlab โดยใช้คำสั่ง nftool (รูป ก)



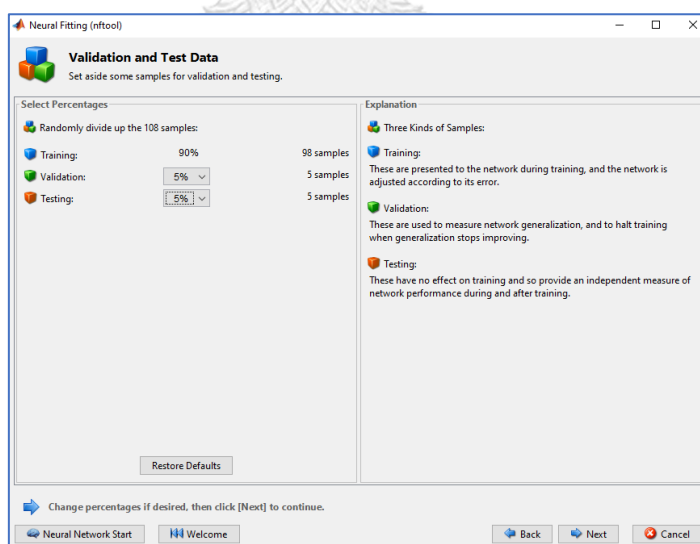
รูป ก.1 หน้าเริ่มต้นการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม



รูป ก.2 หน้าต่างโหลดข้อมูลสำหรับการฝึกสอน

2) ทำการโหลดไฟล์ของตัวแปรในขั้นนำเข้าข้อมูล (Inputs) ที่ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีจุกมีดตัด มุมคายเศษวัสดุ และอัตราส่วนแรงตัด และตัวแปรสำหรับชั้นแสดงผล (Targets) คือข้อมูลค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (2 ชั้นแสดงผลสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน) ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ชิ้นงาน (1 ชั้นแสดงผลสำหรับพยากรณ์ความตรงผิวชิ้นงาน) โดยทั้งสองโครงข่ายประสาทเทียมจะมีหน้าตาต่างโปรแกรมในการใส่ข้อมูลเหมือนกัน ดังรูป ก.2

3) กำหนดจำนวนเปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูลที่จะถูกนำมาใช้ในการฝึกสอน (training), การตรวจสอบความถูกต้อง (validation) และการทดสอบ (Test) รวม 100% ของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถออกแบบการทดลองเพื่อปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของการตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบดังตารางที่ ก.1 และได้ผลการทดลองดังตารางที่ ก.2 โดยการทดลองจะใช้ข้อมูลความตรงในการทดลองและตรวจสอบผล เนื่องจากมีชั้นแสดงผลแค่ชั้นเดียว ชั้นซ่อน 10 ชั้นซ่อนและไม่ใช้การฝึกสอนซ้ำ ซึ่งข้อกำหนดหลังเป็นการตั้งค่าพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม ยกตัวอย่าง การทดลองครั้งที่ 1 จากข้อมูลความตรง 108 ข้อมูล จะถูกแบ่งเป็น 98 ข้อมูล (90%) สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม, 5 ข้อมูล (5%) สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโครงข่ายประสาทเทียม และ 5 ข้อมูล (5%) สำหรับการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม ดังรูป ก.3



รูป ก.3 ขั้นตอนการกำหนดจำนวนของข้อมูลสำหรับการฝึกสอน การยืนยันความถูกต้องและการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ ก.1 การทดลองปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของการตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบ

เปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูล	ระดับปัจจัย						
การตรวจสอบความถูกต้อง (%)	5	10	15	20	25	30	35
การทดสอบ (%)	5	10	15	20	25	30	35

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของการตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบ

ครั้งที่	การตรวจสอบความถูกต้อง (%)	การทดสอบ (%)	ความแม่นยำในการทดสอบ
1	5	5	0.8807
2	5	10	0.8435
3	5	15	0.8258
4	5	20	0.8327
5	5	25	0.8437
6	5	30	0.8013
7	5	35	0.8448
8	10	5	0.8385
9	10	10	0.8211
10	10	15	0.9001
11	10	20	0.8117
12	10	25	0.8037
13	10	30	0.8440
14	10	35	0.8673
15	15	5	0.8365
16	15	10	0.8405
17	15	15	0.9189
18	15	20	0.8395
19	15	25	0.8059
20	15	30	0.7469
21	15	35	0.8489

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของการตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบ
(ต่อ)

ครั้งที่	การตรวจสอบความถูกต้อง (%)	การทดสอบ (%)	ความแม่นยำในการทดสอบ
22	20	5	0.8617
23	20	10	0.8559
24	20	15	0.8465
25	20	20	0.8041
26	20	25	0.8095
27	20	30	0.8081
28	20	35	0.8319
29	25	5	0.8369
30	25	10	0.7979
31	25	15	0.8209
32	25	20	0.8269
33	25	25	0.7787
34	25	30	0.8455
35	25	35	0.8186
36	30	5	0.8683
37	30	10	0.8358
38	30	15	0.8532
39	30	20	0.8239
40	30	25	0.7363
41	30	30	0.8451
42	30	35	0.8016
43	35	5	0.8359
44	35	10	0.8179
45	35	15	0.8261
46	35	20	0.8636
47	35	25	0.7815

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของการตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบ (ต่อ)

ครั้งที่	การตรวจสอบความถูกต้อง (%)	การทดสอบ (%)	ความแม่นยำในการทดสอบ
48	35	30	0.7963
49	35	35	0.8281

จากตารางที่ ก.2 พบว่าผลการทดสอบที่มีเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้อง 15% และข้อมูลของการทดสอบ 15% ให้ความแม่นยำในการทดสอบความตรงมากที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เปอร์เซ็นต์ของข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้อง 15% และข้อมูลของการทดสอบ 15% ในการทำวิจัยนี้

4) ในการกำหนดจำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งในที่นี้ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนการทำซ้ำ โดยใช้เงื่อนไขการทดลองเดิม และใช้เปอร์เซ็นต์ของข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ฝึกสอน 70% ข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้อง 15% ข้อมูลการทดสอบ 15% ซึ่งเป็นการกำหนดมาจากการทดสอบจากหัวข้อที่แล้ว โดยออกแบบการทดลองได้ดังตารางที่ ก.3 และผลการทดลองดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.3 การทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนการทำซ้ำ

การทดลองปรับเปลี่ยน	ระดับปัจจัย		
	จำนวนชั้นซ่อน	5	10
จำนวนการทำซ้ำ	1	3	5

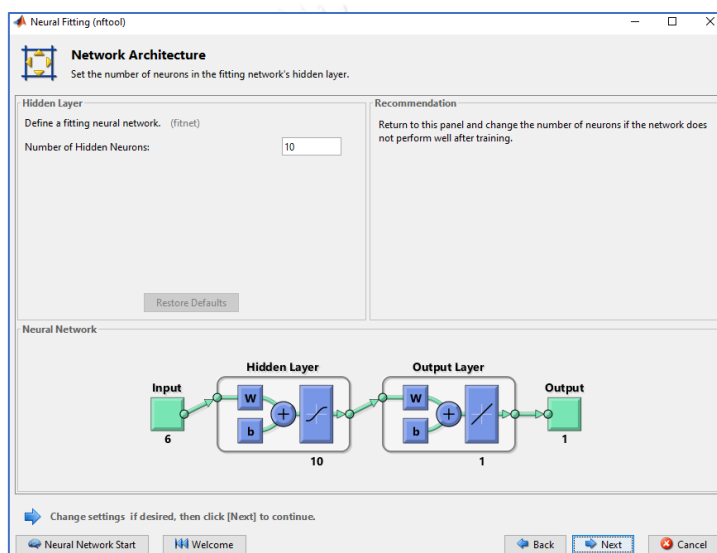
ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนการทำซ้ำ

ครั้งที่	จำนวนชั้นซ่อน	จำนวนการทำซ้ำ	ความแม่นยำ
1	5	1	0.8868
2	5	3	0.7958
3	5	5	0.8485
4	10	1	0.9189
5	10	3	0.8429
6	10	5	0.8465
7	15	1	0.8916
8	15	3	0.8328

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนการทำซ้ำ (ต่อ)

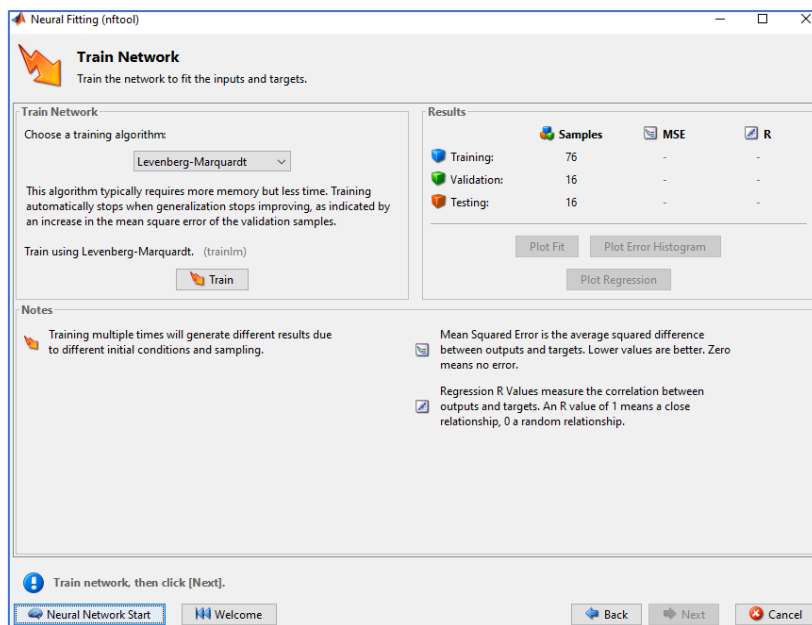
ครั้งที่	จำนวนชั้นซ่อน	จำนวนการทำซ้ำ	ความแม่นยำ
9	15	5	0.8215

จากผลการทดลองตารางที่ ก.4 เพื่อปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนการทำซ้ำพบว่า จำนวนการทำซ้ำที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความแม่นยำลดลง โดยจำนวนการทำซ้ำเท่ากับ 1 ครั้ง ให้ผลดีกว่า จำนวนการทำซ้ำ 5 ครั้ง และชั้นซ่อนที่โครงข่ายประสาทเทียมกำหนดให้เท่ากับ 10 ให้ผลดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ชั้นซ่อน 10 ชั้น และใช้จำนวนการทำซ้ำเท่ากับ 1 ครั้ง ตามรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ขั้นตอนการปรับชั้นซ่อนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

5) กดปุ่ม Train ดังรูปที่ ก.5 เพื่อทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Levenberg-Marquardt backpropagation (trainlm)



รูปที่ ก.5 ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Levenberg-Marquardt backpropagation



ตาราง ข.1 ผลการทดลองที่ได้จากเงื่อนไขการทดสอบภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม

Run	v (m/min)	d (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	γ (°)	F _{y(max)} F _{y(min)} F _{y(s)}	S _t (μm)	AF _y / AF _z	R _a (μm)	R _z (μm)
1	250	0.15	0.1	0.4	-6	2.749	10.498	0.670	2.152	9.791
2	150	0.15	0.1	0.4	-6	1.073	12.93	0.741	1.695	8.32
3	200	0.125	0.1	0.4	11	1.265	6.956	0.901	0.974	4.849
4	200	0.15	0.3	0.4	-6	2.028	20.36	0.588	2.836	14.378
5	200	0.1	0.2	0.4	11	0.985	6.978	0.787	1.031	5.552
6	150	0.125	0.1	0.8	11	0.971	6.135	0.904	0.852	4.568
7	200	0.15	0.2	0.8	11	1.073	7.227	0.860	1.024	5.519
8	150	0.125	0.3	0.8	-6	1.772	16.055	0.727	2.463	10.734
9	150	0.1	0.2	0.8	-6	1.634	7.248	0.768	1.078	5.733
10	200	0.125	0.3	0.8	-6	1.532	12.821	0.608	2.486	10.725
11	250	0.15	0.1	0.8	11	0.939	8.826	0.938	1.068	6.197
12	150	0.125	0.3	0.4	11	2.852	14.141	0.847	1.615	8.005
13	200	0.125	0.2	0.8	-6	1.279	9.346	0.687	0.988	4.655
14	250	0.125	0.2	0.8	11	0.962	5.589	0.903	0.929	4.198
15	200	0.125	0.3	0.4	-6	1.377	12.492	0.631	2.022	10.081
16	200	0.1	0.2	0.8	-6	1.847	6.824	0.784	0.852	4.329
17	150	0.15	0.2	0.8	-6	1.799	14.303	0.754	2.306	9.061
18	150	0.125	0.2	0.8	-6	1.707	6.682	0.749	1.675	6.508
19	250	0.1	0.2	0.4	11	1.012	6.217	0.958	0.860	4.686
20	250	0.125	0.1	0.4	-6	3.218	7.379	0.610	1.332	6.833
21	200	0.125	0.1	0.4	-6	2.465	13.427	0.690	1.409	6.751
22	200	0.1	0.3	0.8	11	1.385	6.014	0.893	0.780	4.303
23	150	0.125	0.1	0.8	-6	1.385	10.351	0.824	0.684	3.824
24	150	0.1	0.1	0.8	-6	2.626	13.696	0.906	0.750	4.034
25	150	0.1	0.3	0.4	11	2.847	14.257	0.868	1.424	7.264
26	150	0.1	0.1	0.8	11	1.247	5.715	0.968	0.699	4.316
27	150	0.1	0.3	0.8	-6	2.532	11.546	0.846	1.739	8.038
28	250	0.125	0.1	0.8	-6	2.028	9.719	0.930	0.602	3.884

ตาราง ข.1 ผลการทดลองที่ได้จากเงื่อนไขการทดสอบภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม (ต่อ)

Run	v (m/min)	d (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	γ (°)	F _{y(max)} - F _{y(min)} / F _{y(s)}	S _t (μm)	AF _y /AF _z	R _a (μm)	R _z (μm)
29	150	0.125	0.2	0.4	-6	3.304	10.325	0.442	1.109	6.479
30	200	0.125	0.1	0.8	11	1.203	6.390	0.894	0.645	3.251
31	250	0.1	0.2	0.8	-6	1.997	9.323	0.854	1.043	5.232
32	250	0.1	0.1	0.4	-6	2.448	9.086	0.901	1.135	6.109
33	200	0.15	0.3	0.8	11	1.049	10.494	0.865	1.286	6.394
34	250	0.125	0.2	0.8	-6	1.375	5.218	0.359	0.749	3.978
35	250	0.1	0.3	0.8	-6	1.976	14.331	0.705	2.084	9.775
36	150	0.15	0.3	0.4	-6	2.681	22.946	0.792	2.363	11.547
37	250	0.1	0.3	0.4	-6	1.869	10.568	0.565	1.869	10.18
38	150	0.125	0.3	0.8	11	1.427	10.421	0.911	1.373	6.982
39	150	0.15	0.2	0.4	11	0.630	10.202	0.843	1.603	7.585
40	250	0.1	0.2	0.4	-6	0.934	5.498	0.775	0.728	4.079
41	150	0.1	0.3	0.4	-6	2.888	15.768	0.776	1.583	8.186
42	200	0.15	0.2	0.8	-6	1.429	10.572	0.668	1.723	7.411
43	250	0.125	0.3	0.8	-6	1.48	11.906	0.62	1.776	8.135
44	200	0.1	0.1	0.4	-6	1.028	8.826	0.735	1.196	6.377
45	150	0.1	0.2	0.4	11	0.650	8.434	1.073	1.013	5.491
46	200	0.1	0.1	0.8	11	1.128	4.265	0.852	0.443	2.584
47	250	0.125	0.1	0.8	11	1.267	5.296	0.880	0.852	4.130
48	200	0.125	0.2	0.4	11	1.348	8.881	0.793	1.144	6.106
49	150	0.125	0.2	0.8	11	0.609	5.265	0.894	1.086	5.570
50	200	0.125	0.3	0.4	11	2.625	16.706	0.837	1.517	7.869
51	200	0.15	0.1	0.4	11	1.042	10.553	1.018	1.249	5.847
52	150	0.125	0.1	0.4	11	2.447	9.035	0.918	1.152	5.612
53	150	0.125	0.3	0.4	-6	2.278	16.668	0.716	2.653	12.74
54	250	0.15	0.2	0.8	11	1.153	9.581	0.963	1.008	5.425

ตาราง ข.1 ผลการทดลองที่ได้จากเงื่อนไขการทดสอบภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม (ต่อ)

Run	v (m/min)	d (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	γ (°)	F _{y(max)} / F _{y(min)} / F _{y(s)}	S _t (μm)	AF _y /AF _z	R _a (μm)	R _z (μm)
55	250	0.15	0.2	0.8	-6	1.265	7.784	0.757	1.281	6.218
56	250	0.15	0.1	0.8	-6	2.507	5.501	0.818	1.088	5.607
57	250	0.125	0.3	0.8	11	1.207	6.674	0.929	0.925	4.300
58	150	0.1	0.1	0.4	-6	2.763	6.295	0.82	0.731	4.411
59	250	0.15	0.3	0.4	-6	0.559	14.001	0.777	2.393	10.512
60	150	0.1	0.3	0.8	11	1.462	8.312	0.911	0.923	5.168
61	200	0.125	0.2	0.8	11	1.148	7.003	0.829	0.863	4.127
62	200	0.1	0.1	0.8	-6	2.367	5.785	0.85	0.761	3.655
63	150	0.1	0.2	0.4	-6	1.912	14.263	0.76	1.625	7.81
64	250	0.1	0.3	0.4	11	1.056	8.467	1.056	0.998	5.231
65	250	0.125	0.3	0.4	-6	1.452	13.643	0.603	2.149	11.031
66	150	0.15	0.2	0.8	11	0.820	9.242	0.920	1.200	6.290
67	150	0.15	0.3	0.4	11	1.498	11.261	0.907	1.769	8.793
68	250	0.1	0.1	0.8	-6	2.501	5.823	0.844	0.627	3.423
69	200	0.15	0.2	0.4	-6	1.967	18.038	0.669	3.064	15.331
70	150	0.125	0.2	0.4	11	1.888	11.653	0.875	1.503	7.237
71	150	0.1	0.1	0.4	11	0.943	6.342	0.883	0.758	4.467
72	200	0.15	0.1	0.8	11	1.957	6.775	0.949	1.035	4.160
73	200	0.125	0.3	0.8	11	0.998	9.668	0.812	1.258	5.911
74	200	0.125	0.2	0.4	-6	1.662	15.615	0.628	2.182	10.678
75	200	0.15	0.2	0.4	11	1.636	14.239	0.840	1.586	7.336
76	150	0.1	0.2	0.8	11	0.609	5.265	0.761	0.753	4.282
77	200	0.1	0.1	0.4	11	0.763	6.532	0.805	0.747	4.176
78	150	0.15	0.3	0.8	11	1.084	9.936	0.949	1.344	7.264
79	150	0.15	0.3	0.8	-6	1.935	20.245	0.765	3.378	13.192
80	150	0.15	0.1	0.8	-6	1.001	8.076	0.968	1.034	5.45
81	250	0.15	0.3	0.4	11	0.905	11.150	0.991	1.502	7.901
82	250	0.1	0.1	0.8	11	1.184	4.861	0.931	0.415	2.462
83	150	0.15	0.1	0.8	11	1.114	8.202	0.924	1.134	5.955

ตาราง ข.1 ผลการทดลองที่ได้จากเงื่อนไขการทดสอบภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ อะลูมิเนียม (ต่อ)

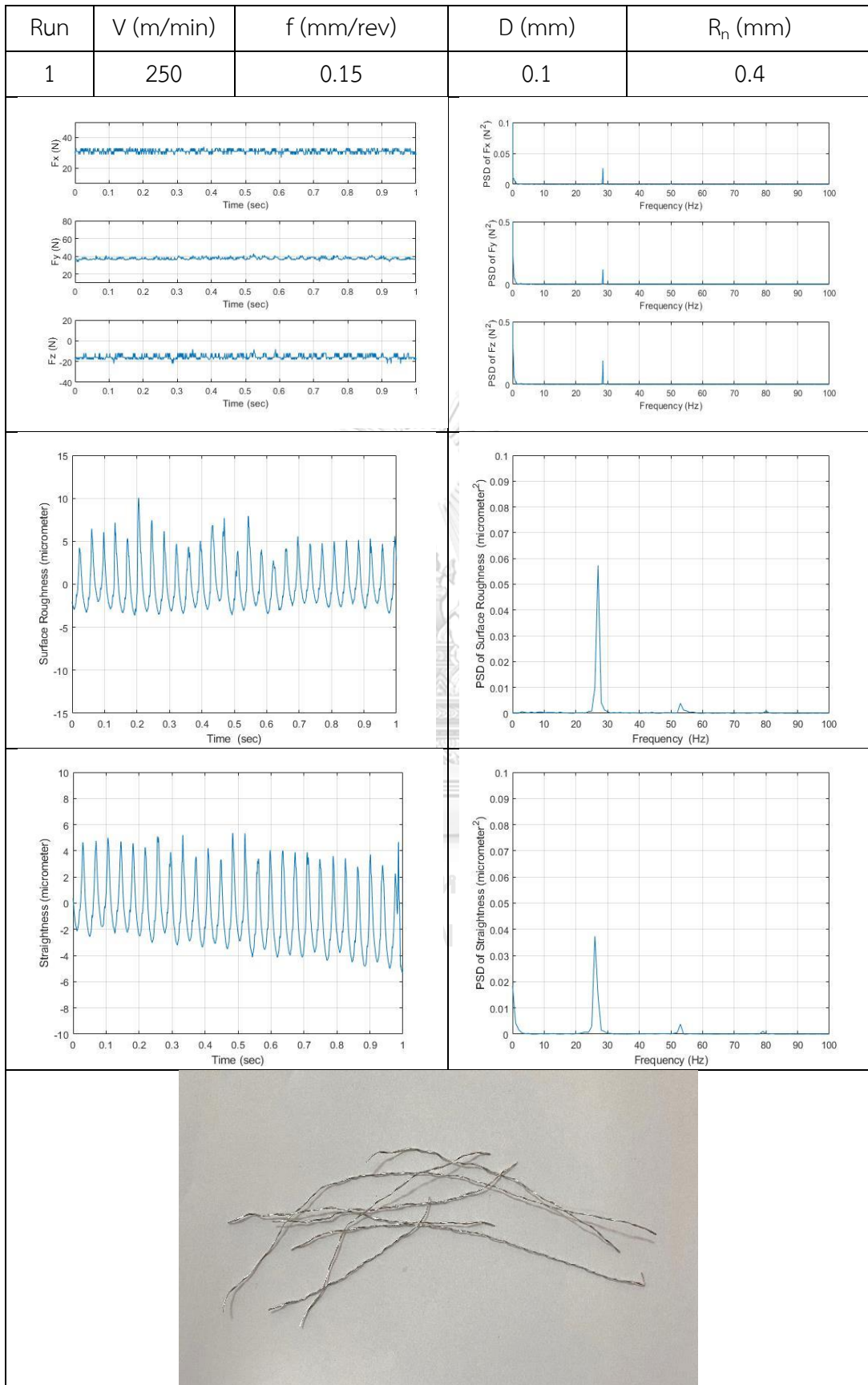
Run	v (m/min)	d (mm)	f (mm/rev)	R _n (mm)	γ (°)	F _{y(max)} - F _{y(min)} / F _{y(s)}	S _t (μm)	AF _y /AF _z	R _a (μm)	R _z (μm)
84	250	0.15	0.2	0.4	11	1.022	12.294	0.970	1.503	7.748
85	150	0.125	0.1	0.4	-6	1.766	8.281	0.783	1.052	5.643
86	250	0.1	0.2	0.8	11	1.059	6.857	0.822	0.926	4.718
87	250	0.15	0.1	0.4	11	0.841	10.635	0.969	1.147	5.798
88	250	0.15	0.3	0.8	11	1.122	9.107	0.884	0.974	4.777
89	200	0.1	0.2	0.8	11	0.719	4.312	1.027	0.522	2.849
90	200	0.15	0.3	0.4	11	2.370	19.130	0.831	1.725	8.325
91	150	0.15	0.1	0.4	11	0.709	9.085	0.898	1.581	7.133
92	250	0.125	0.1	0.4	11	1.424	6.108	1.107	1.017	5.200
93	250	0.1	0.1	0.4	11	0.792	6.647	1.028	0.784	4.359
94	250	0.125	0.3	0.4	11	1.375	7.697	0.995	1.093	5.733
95	200	0.15	0.1	0.8	-6	0.78	10.983	0.845	0.972	5.466
96	200	0.1	0.3	0.4	11	0.997	9.207	0.688	1.073	5.747
97	200	0.1	0.2	0.4	-6	2.156	13.565	0.722	2.224	10.194
98	250	0.125	0.2	0.4	-6	1.341	9.018	0.624	1.326	6.389
99	200	0.15	0.1	0.4	-6	1.671	11.019	0.727	1.816	8.434
100	200	0.1	0.3	0.4	-6	2.498	17.198	0.708	3.024	13.41
101	200	0.1	0.3	0.8	-6	1.781	13.842	0.808	1.921	9.128
102	150	0.15	0.2	0.4	-6	1.723	23.604	0.706	2.633	13.571
103	250	0.15	0.3	0.8	-6	1.01	12.33	0.602	2.346	9.608
104	200	0.15	0.3	0.8	-6	1.194	15.215	0.640	2.852	10.88
105	250	0.15	0.2	0.4	-6	1.951	21.892	0.619	3.364	16.415
106	250	0.125	0.2	0.4	11	1.057	7.571	0.990	0.996	5.388
107	200	0.125	0.1	0.8	-6	2.134	8.654	0.777	0.933	4.605
108	250	0.1	0.3	0.8	11	0.882	6.724	0.777	0.655	3.794

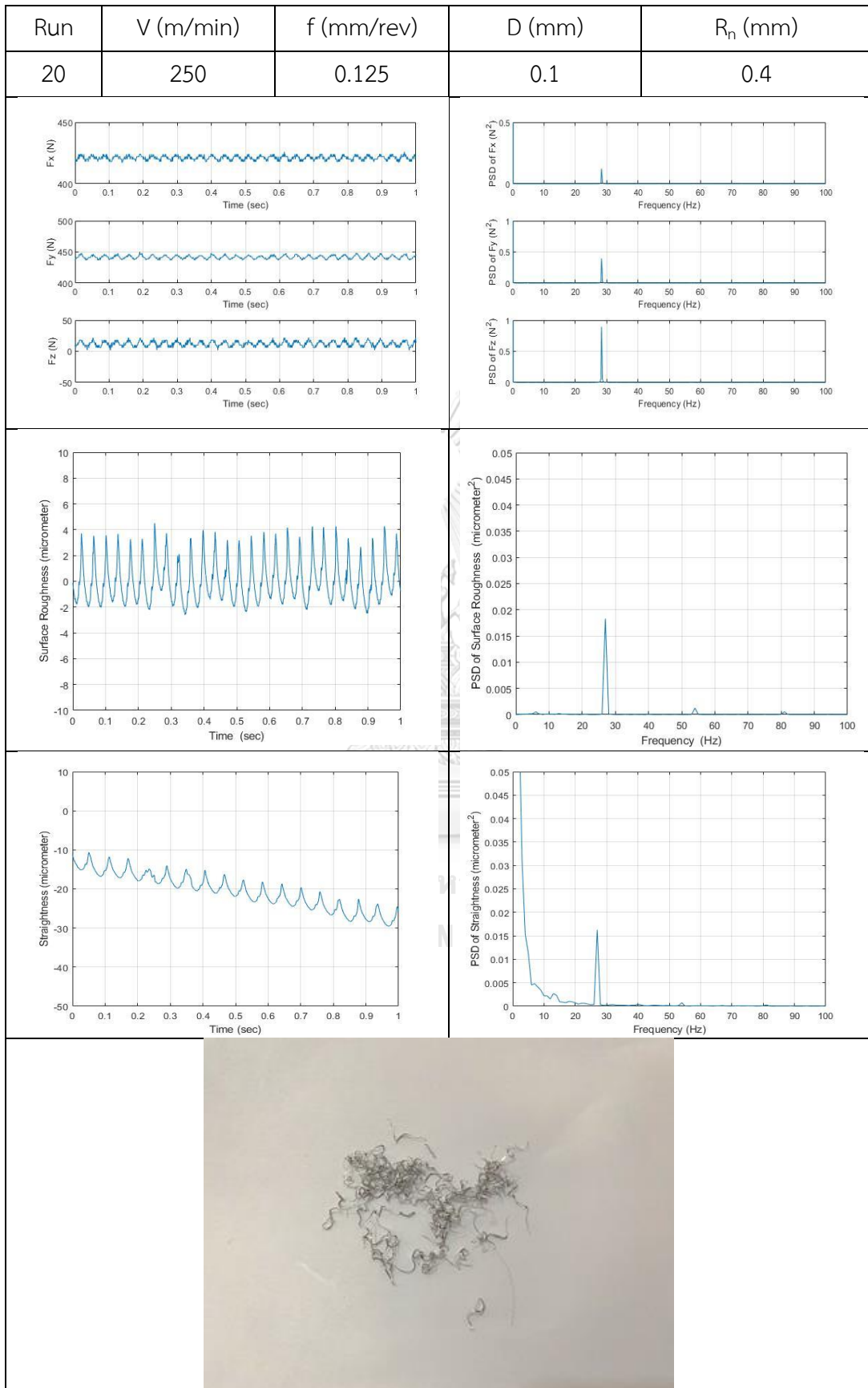


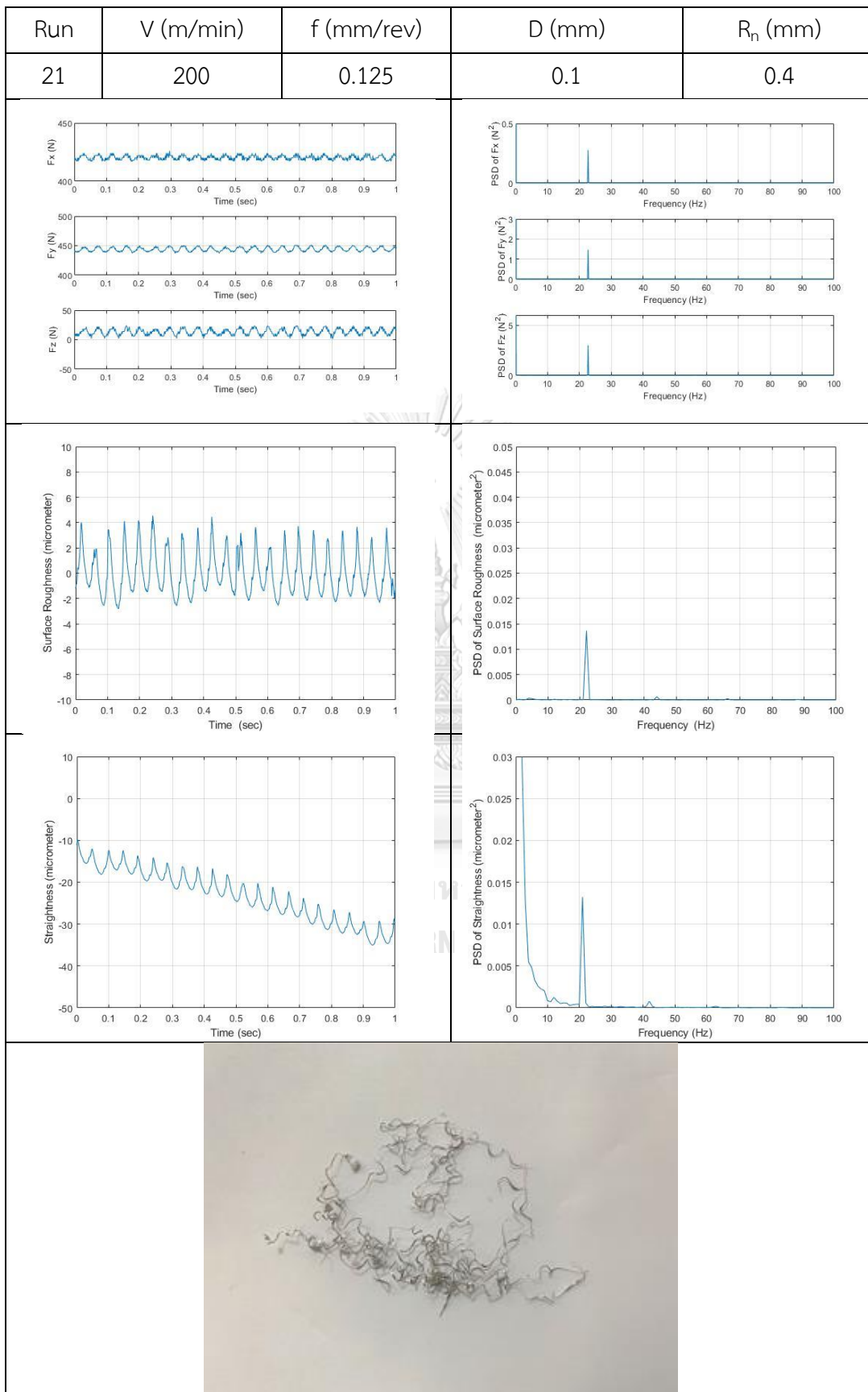
ภาคผนวก ค

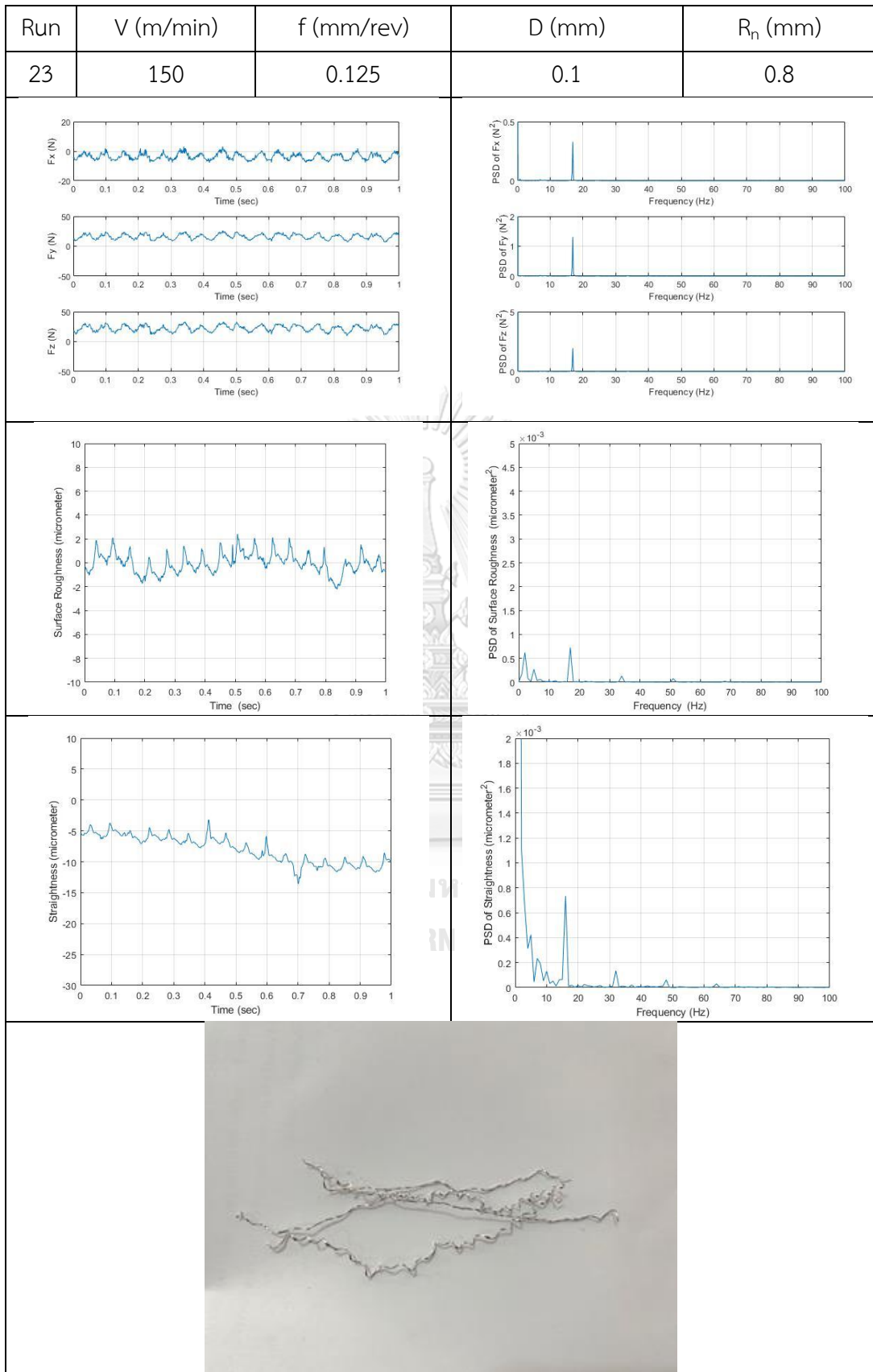
เงื่อนไขและผลการทดลองการการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของแรงตัดพลวัต ความตรงผิวชิ้นงาน
ความขรุขระผิวชิ้นงานและเศษวัสดุ ในชิ้นงานอะลูมิเนียม ที่มุมคายเศษ -6 องศา

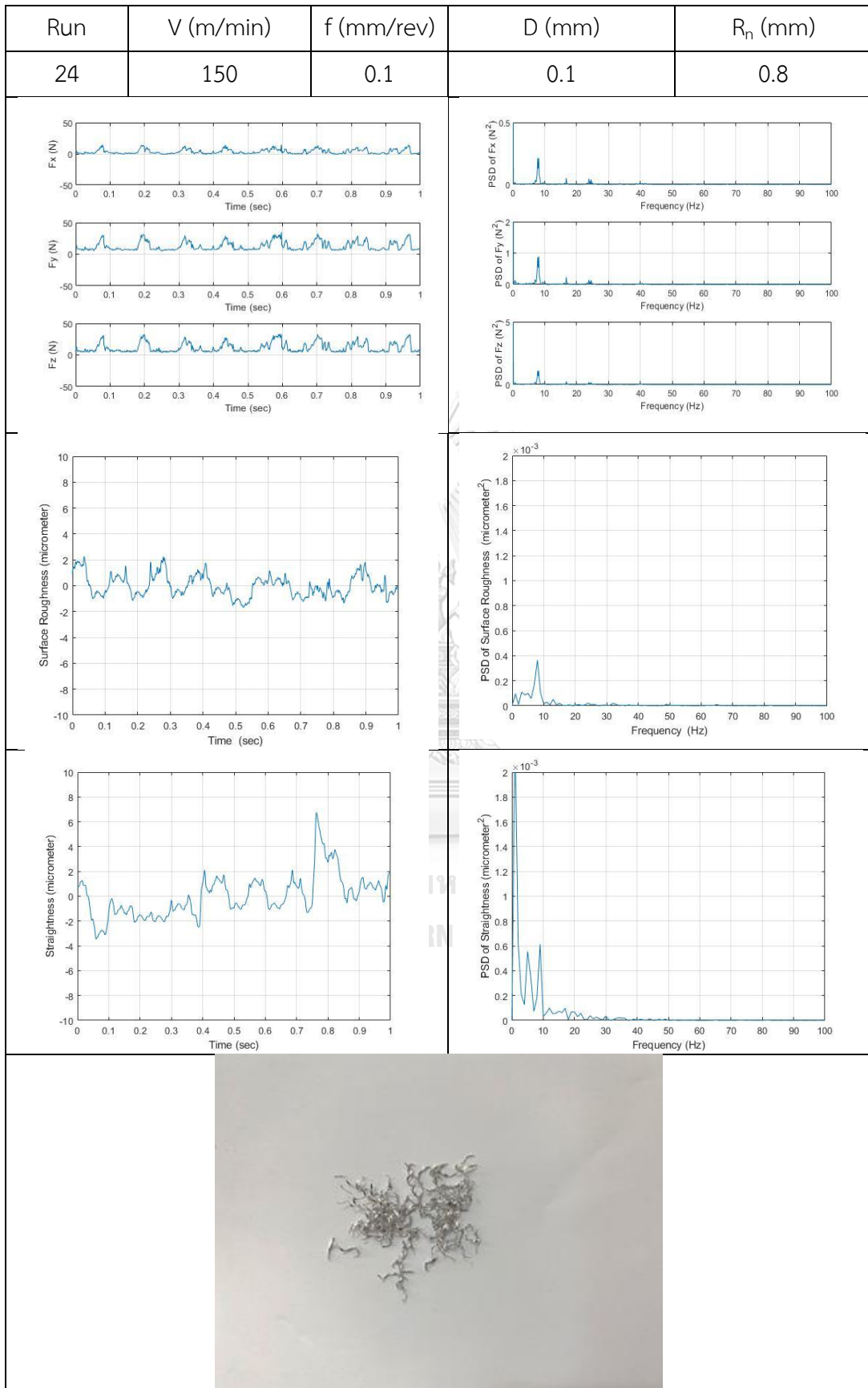
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

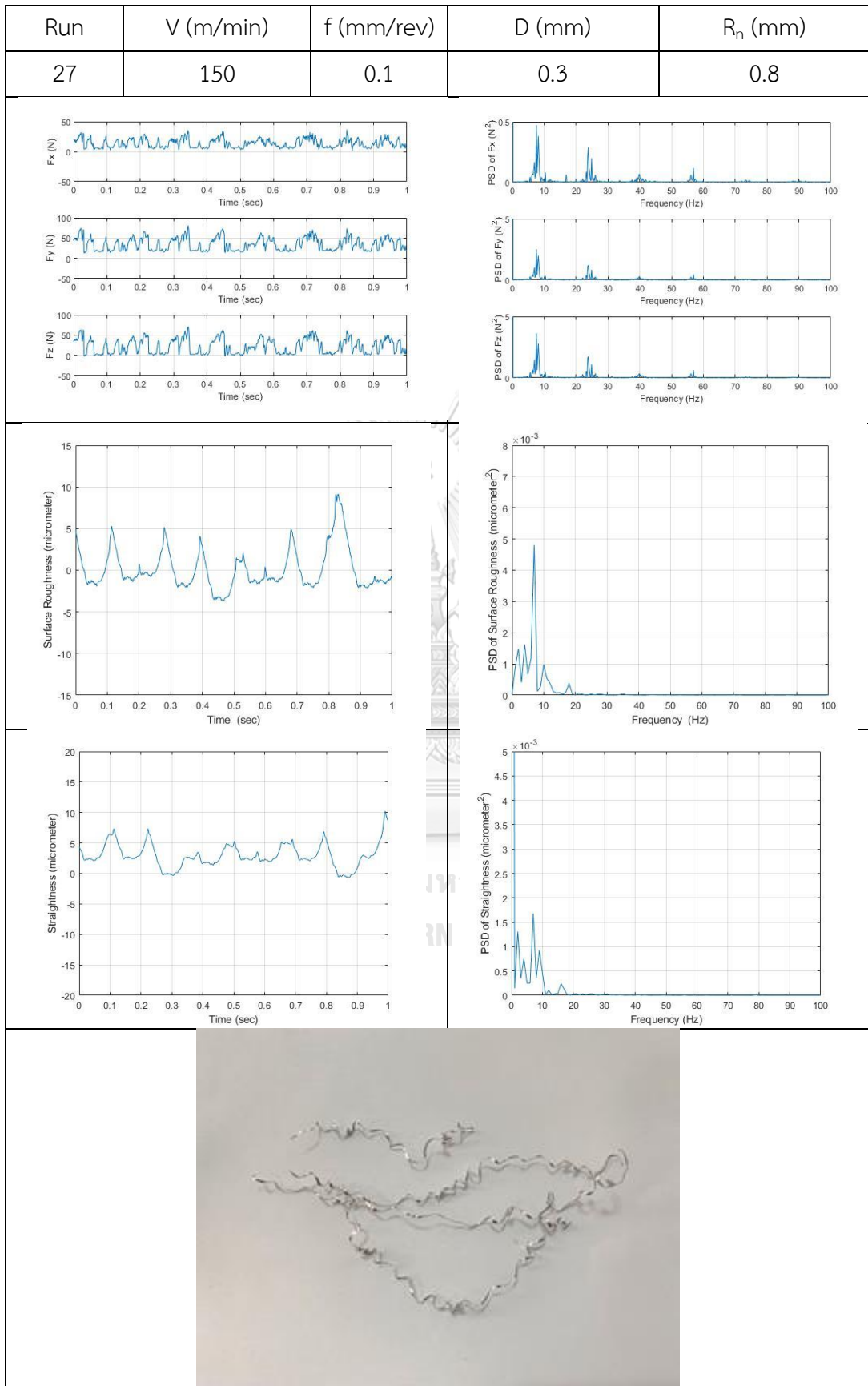


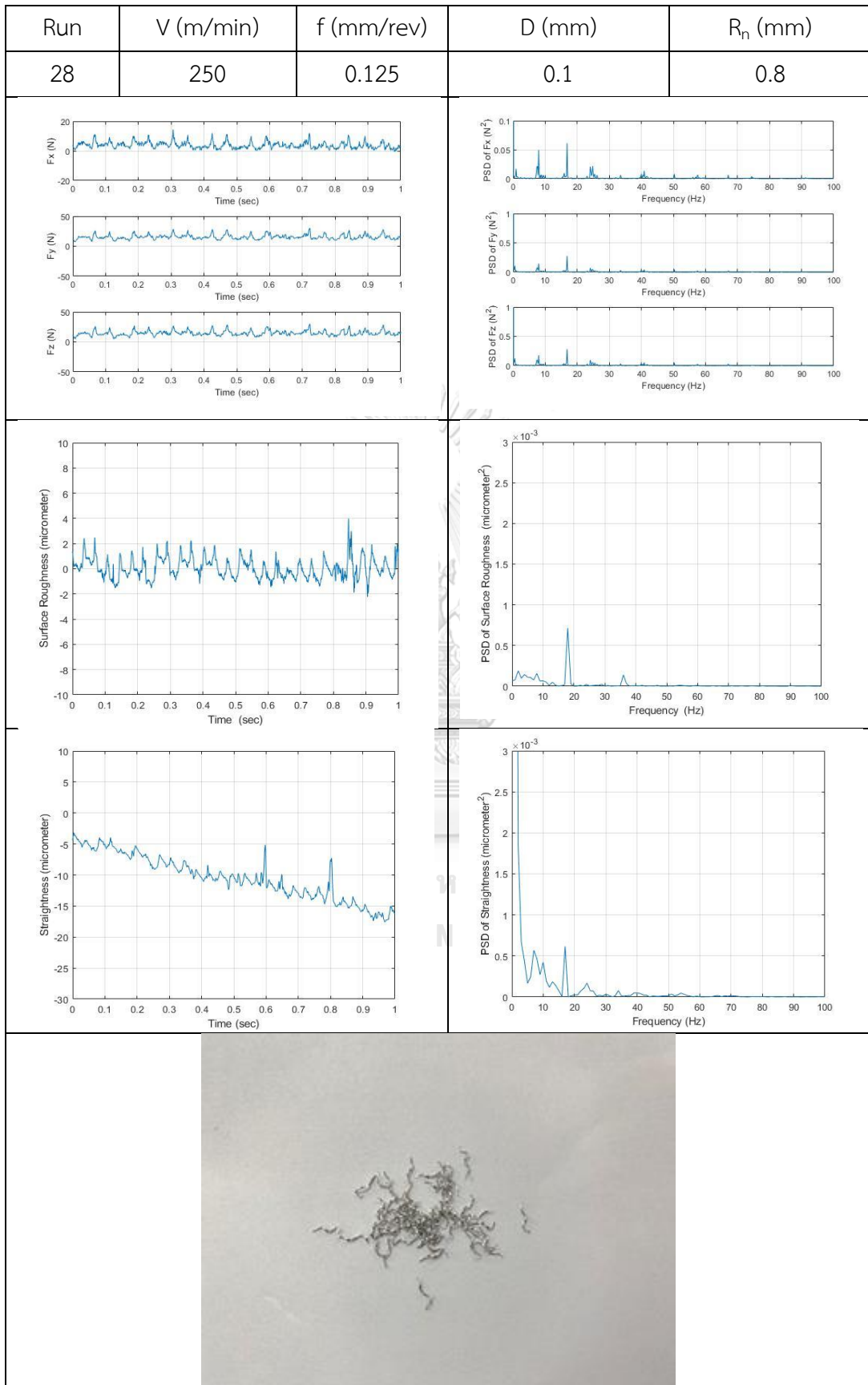


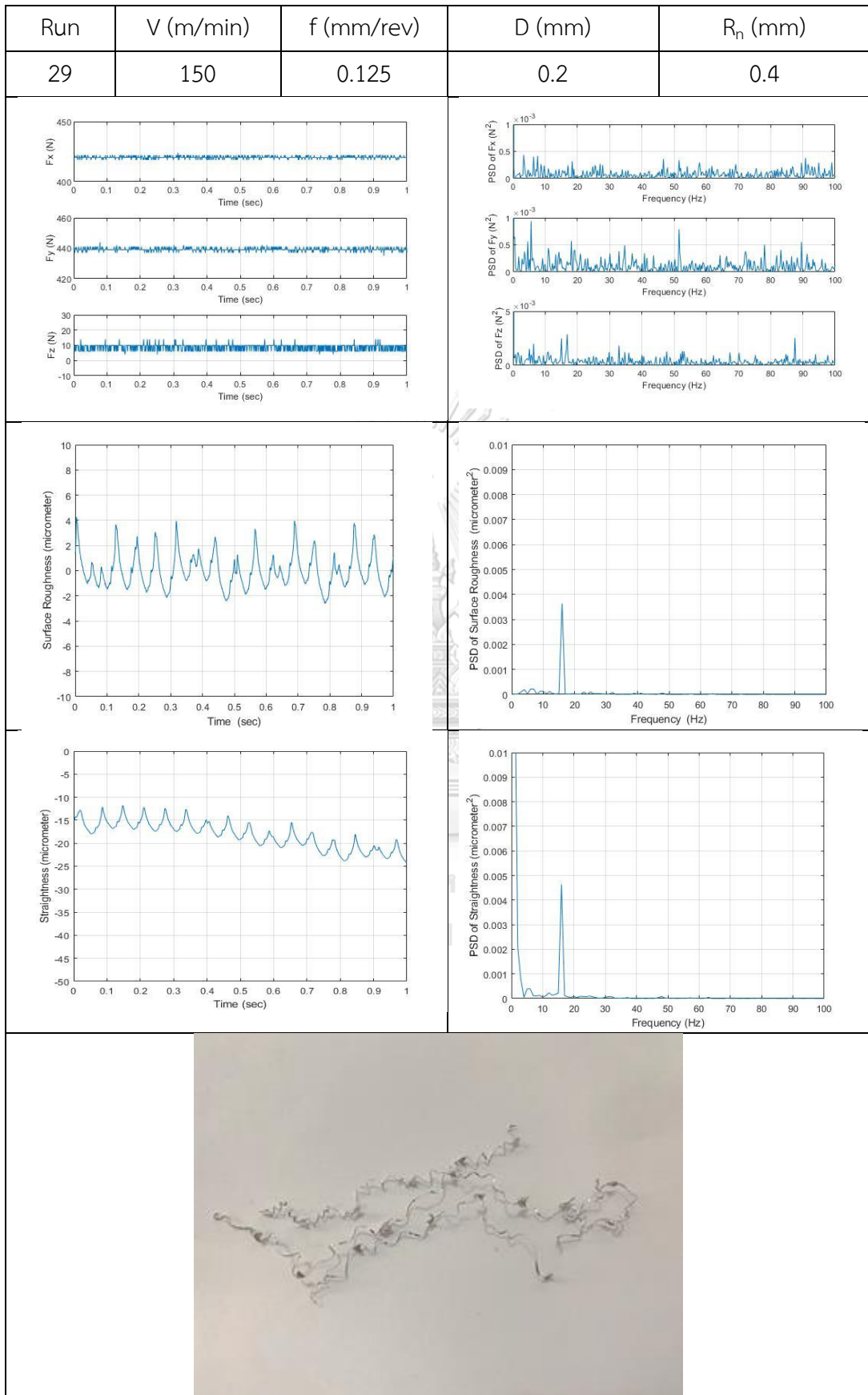


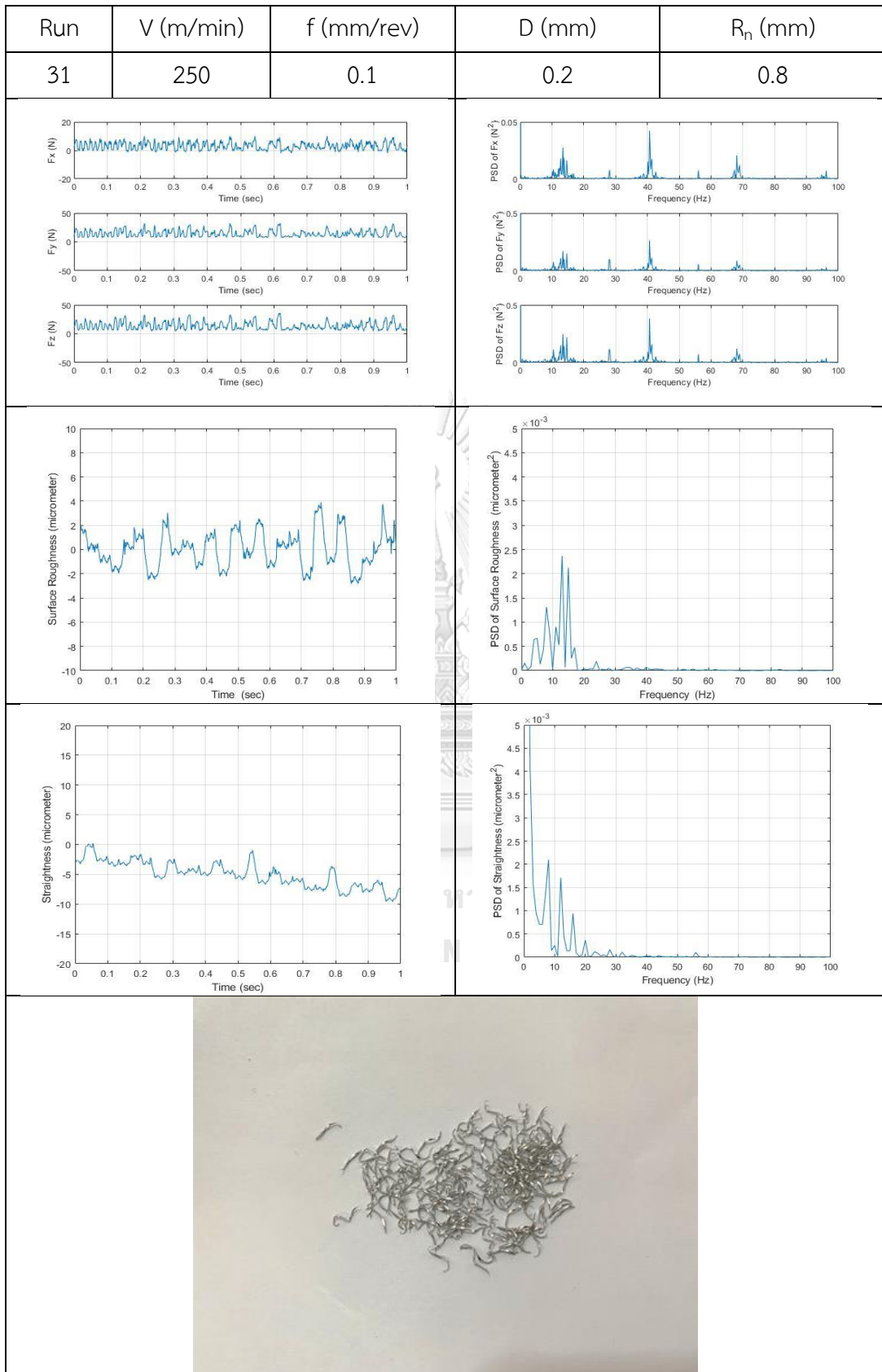


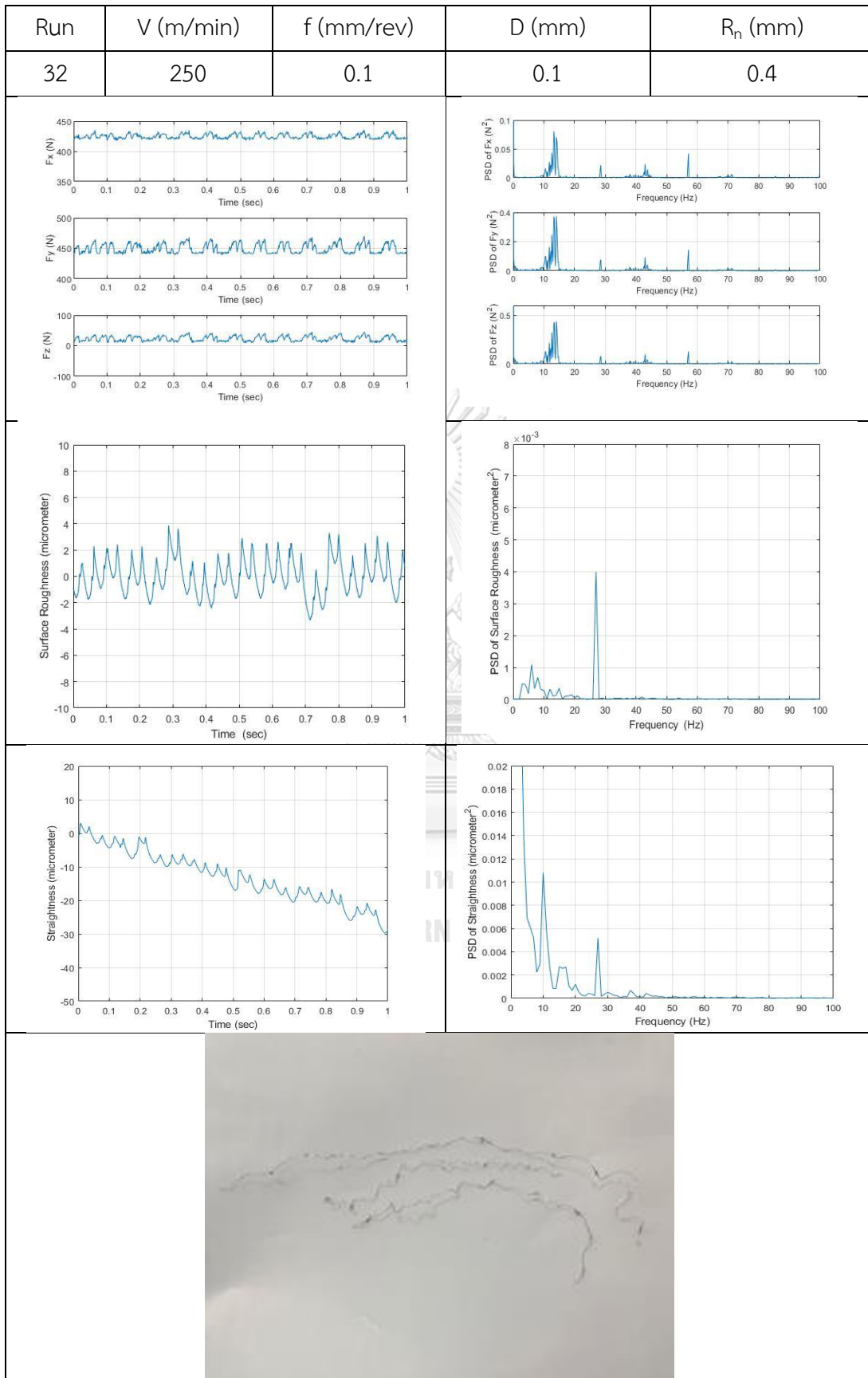


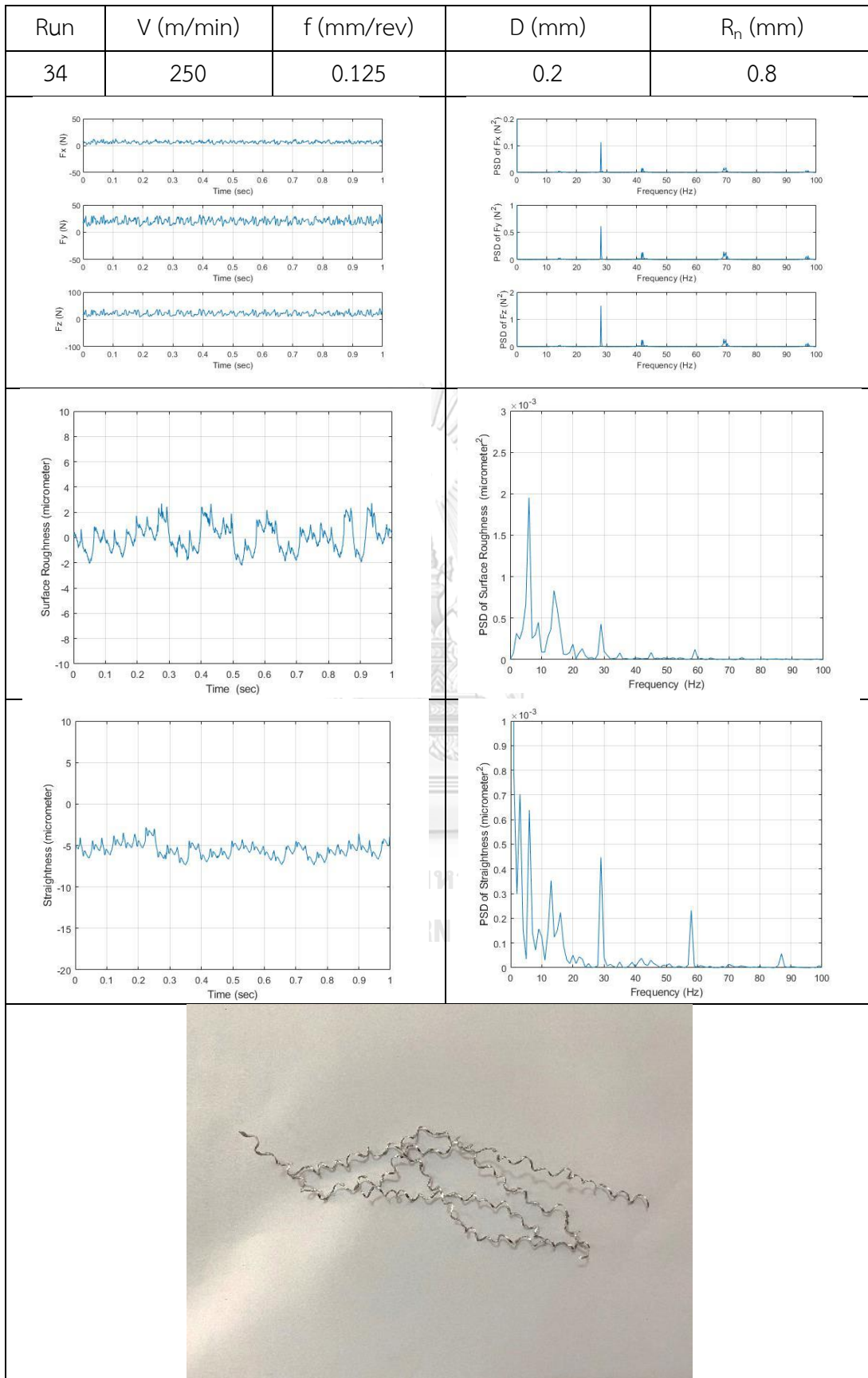


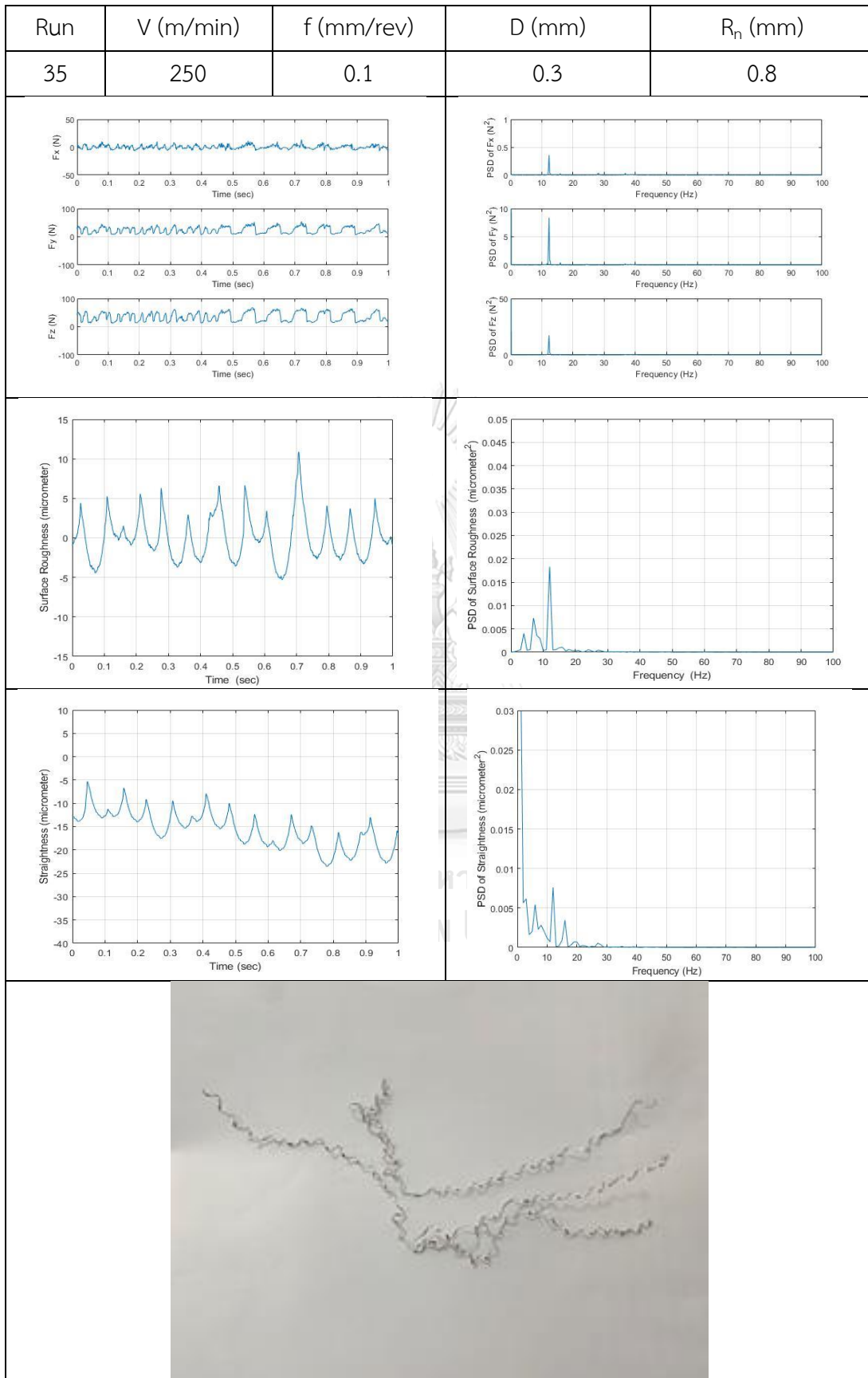


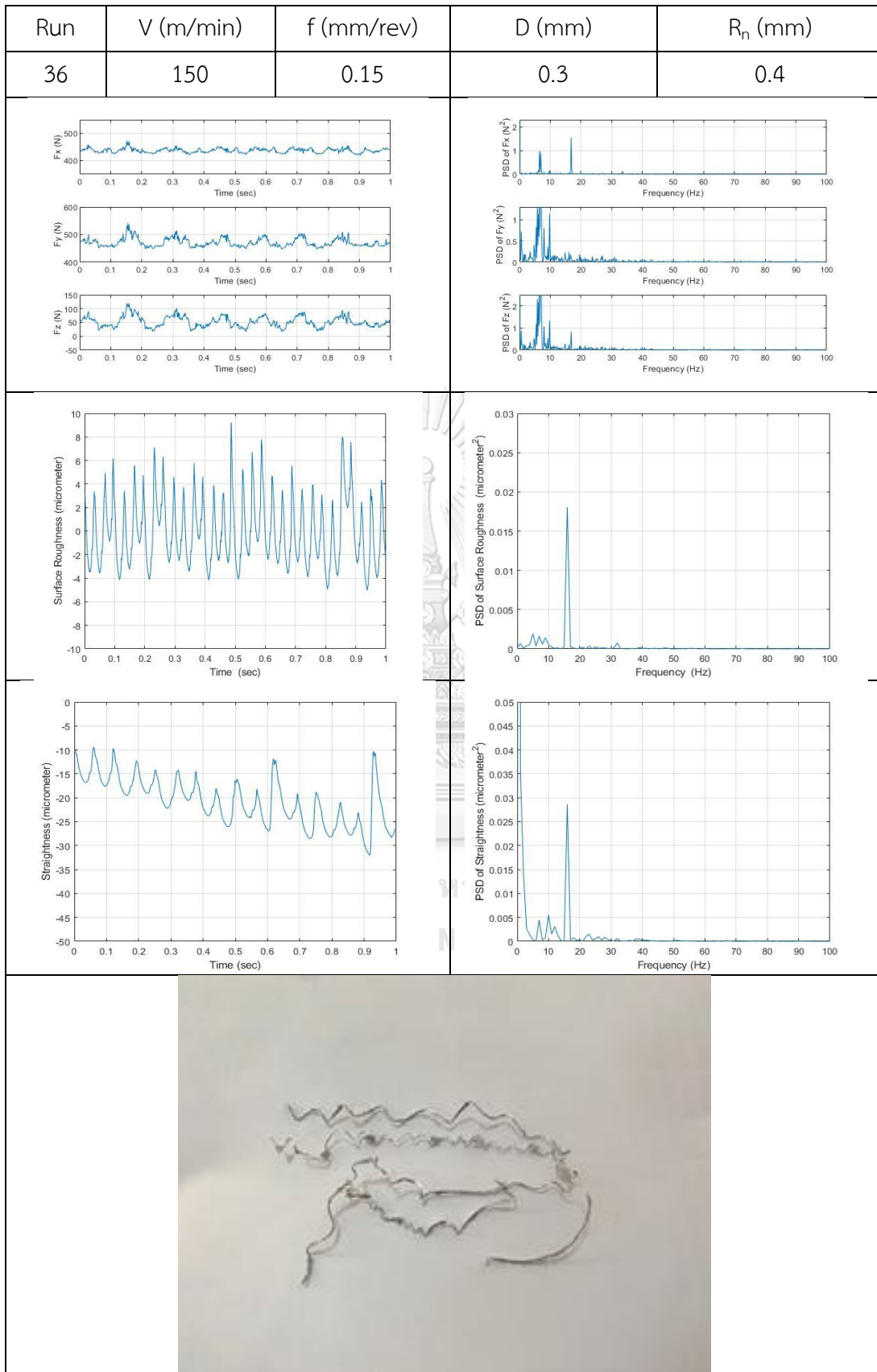




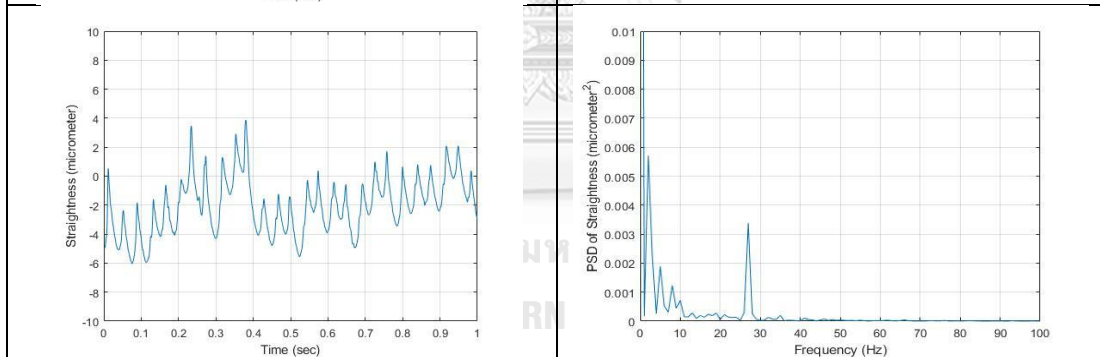
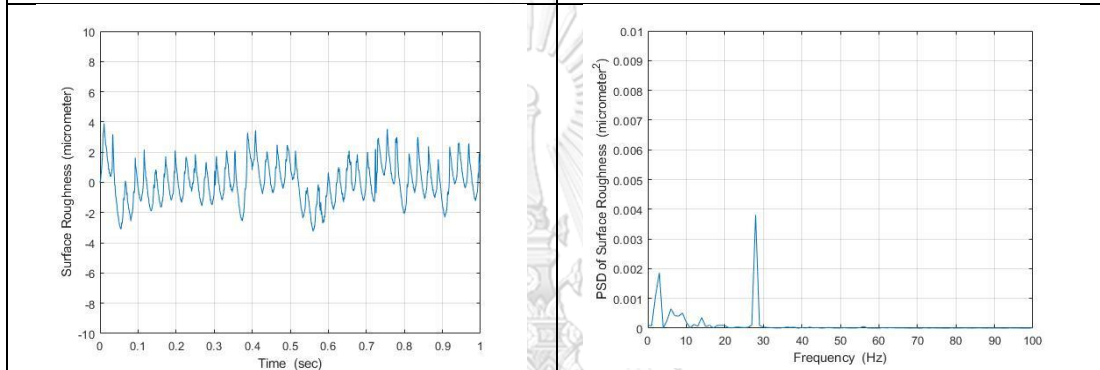
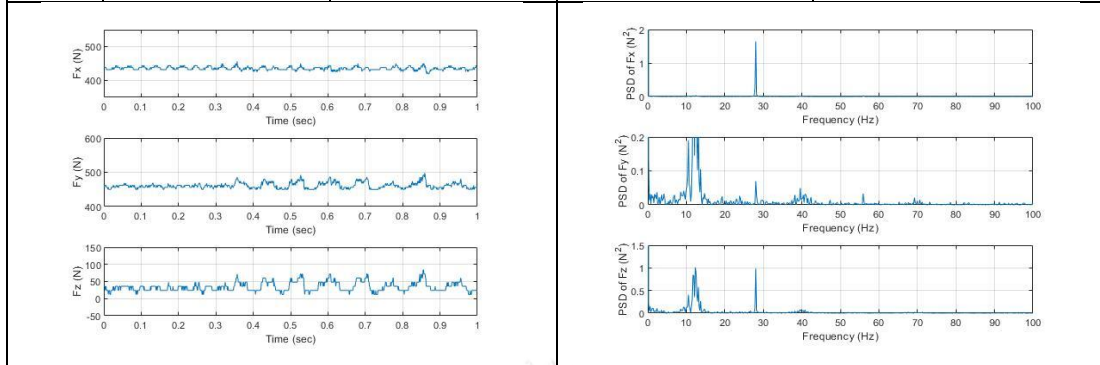


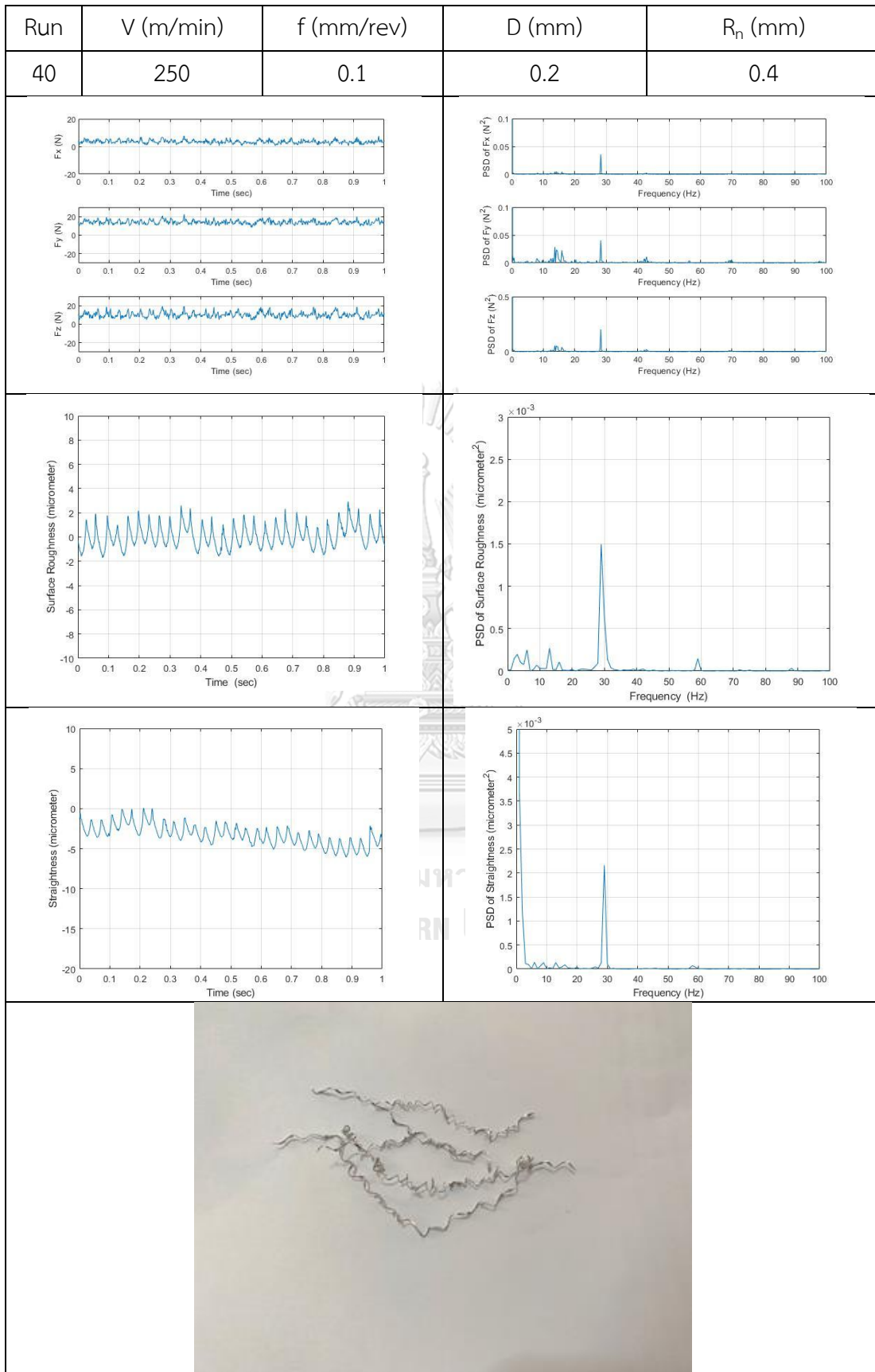


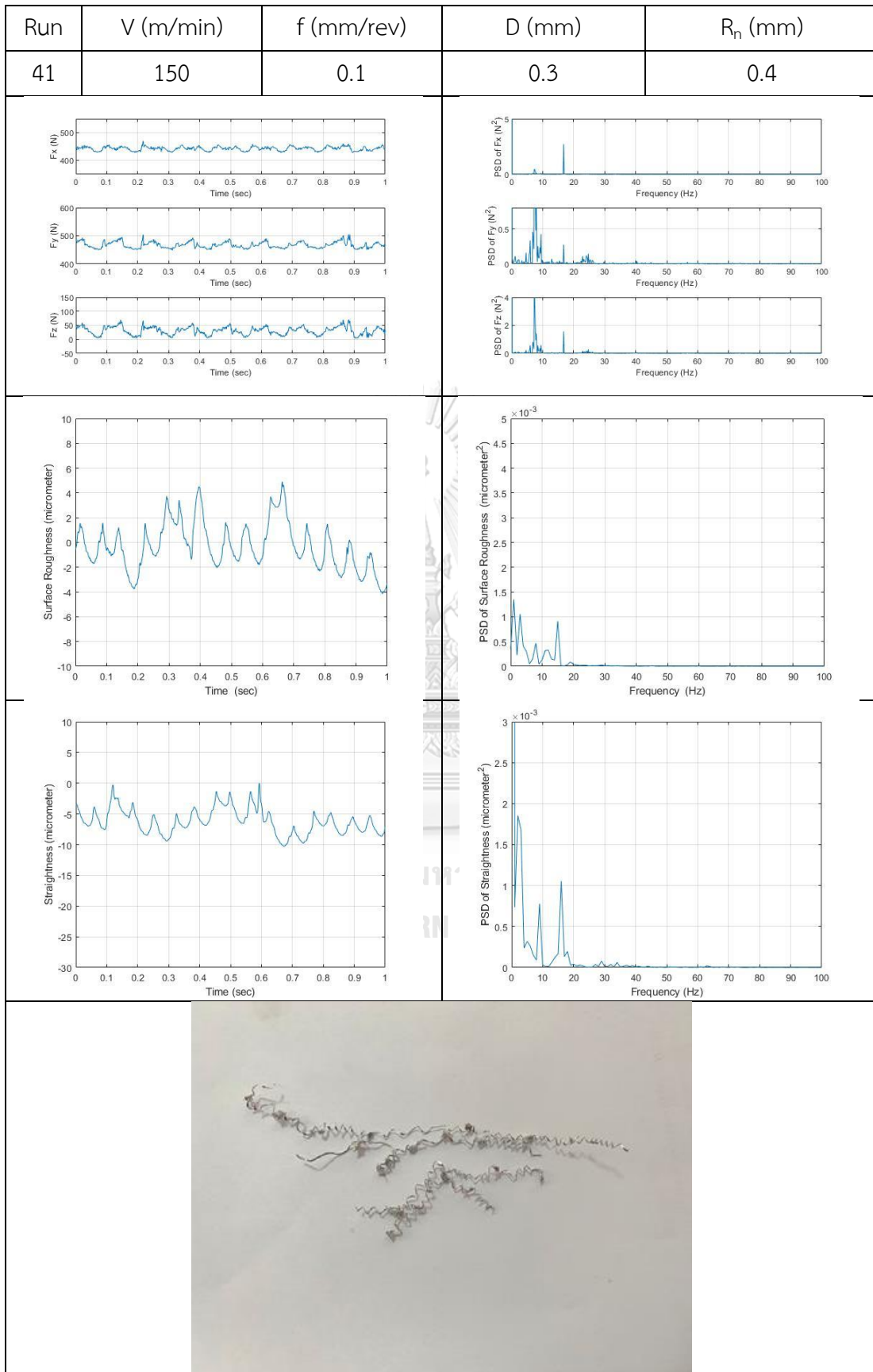


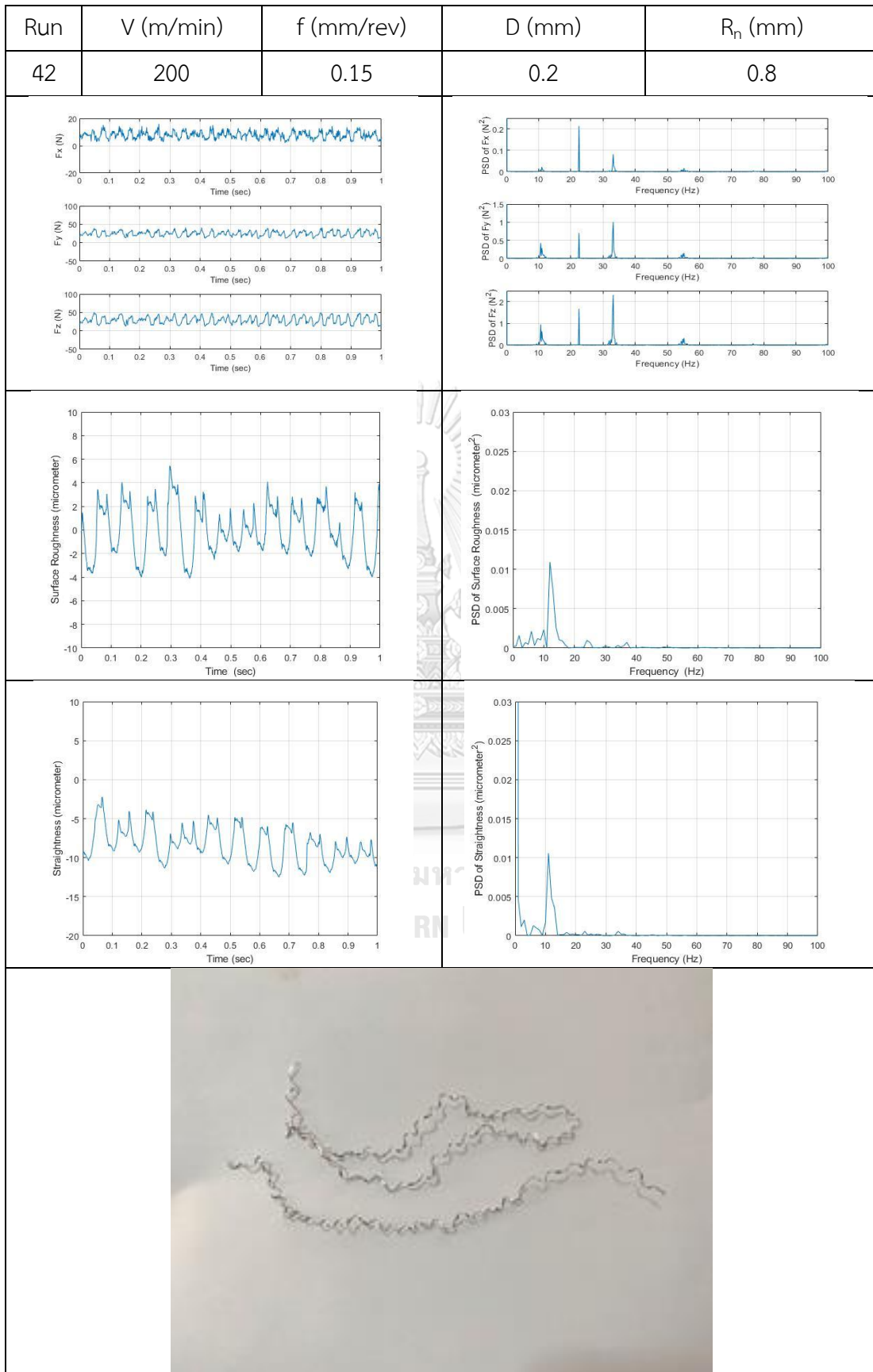


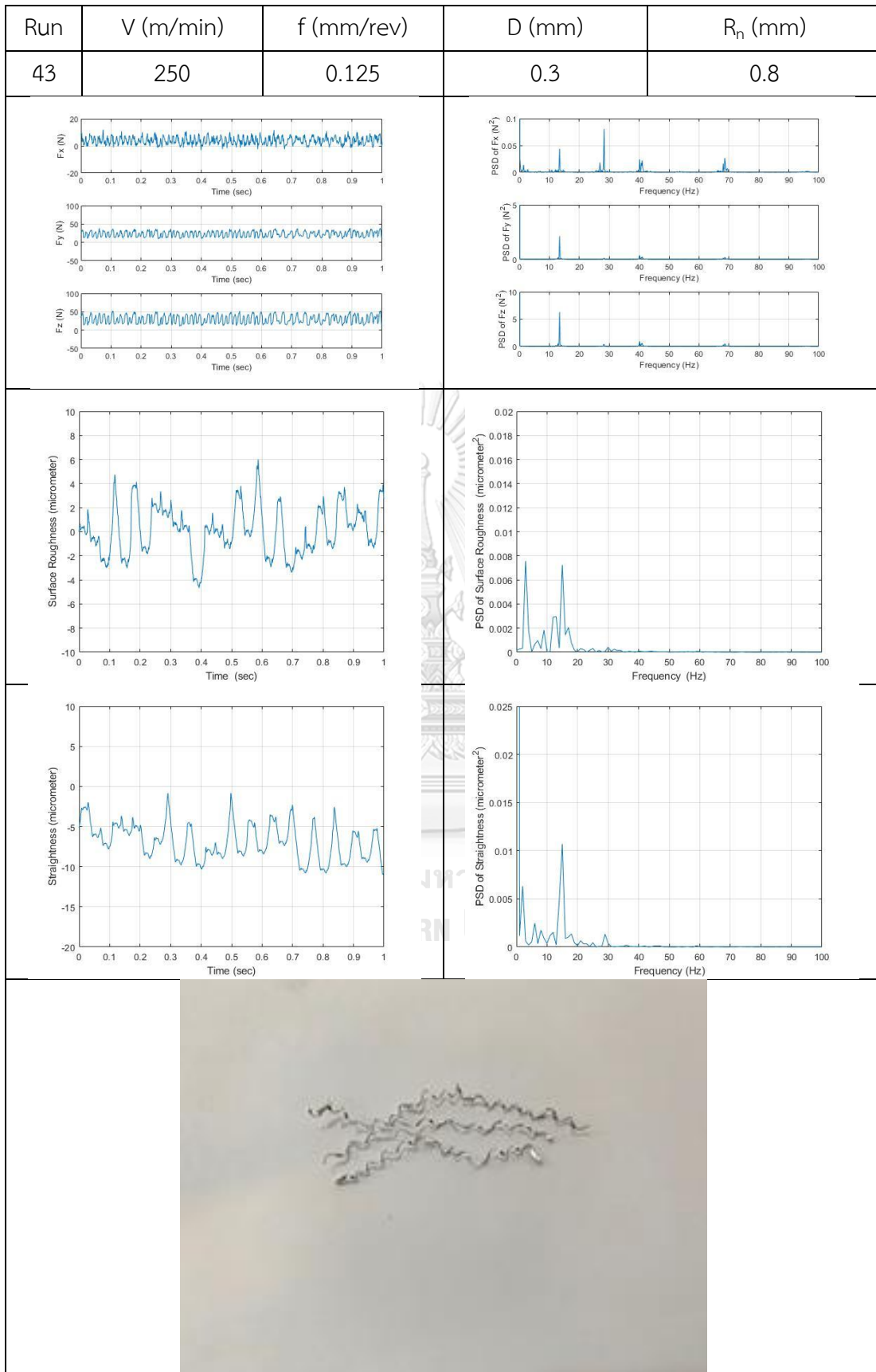
Run	V (m/min)	f (mm/rev)	D (mm)	R _n (mm)
37	250	0.1	0.3	0.4

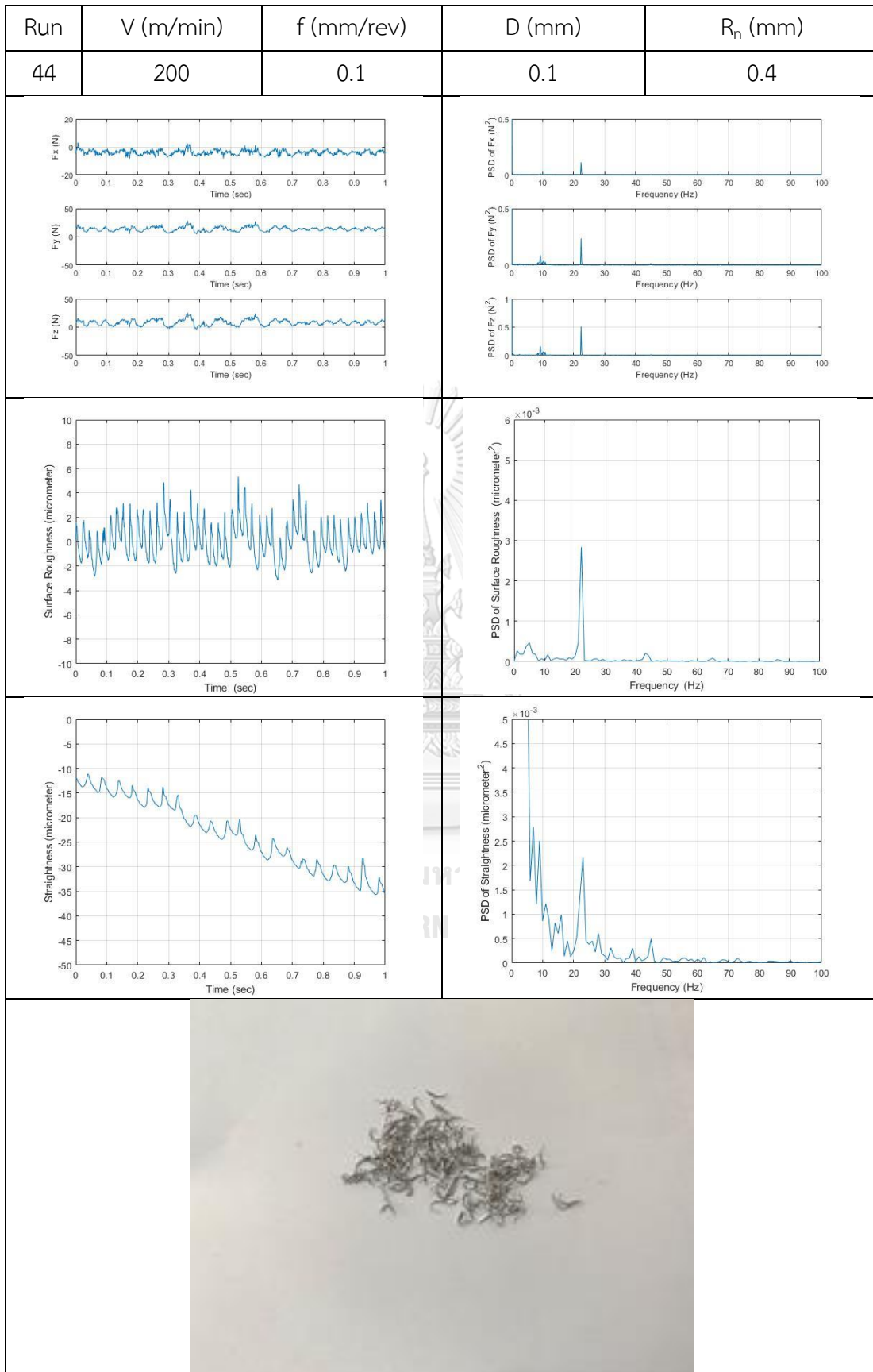


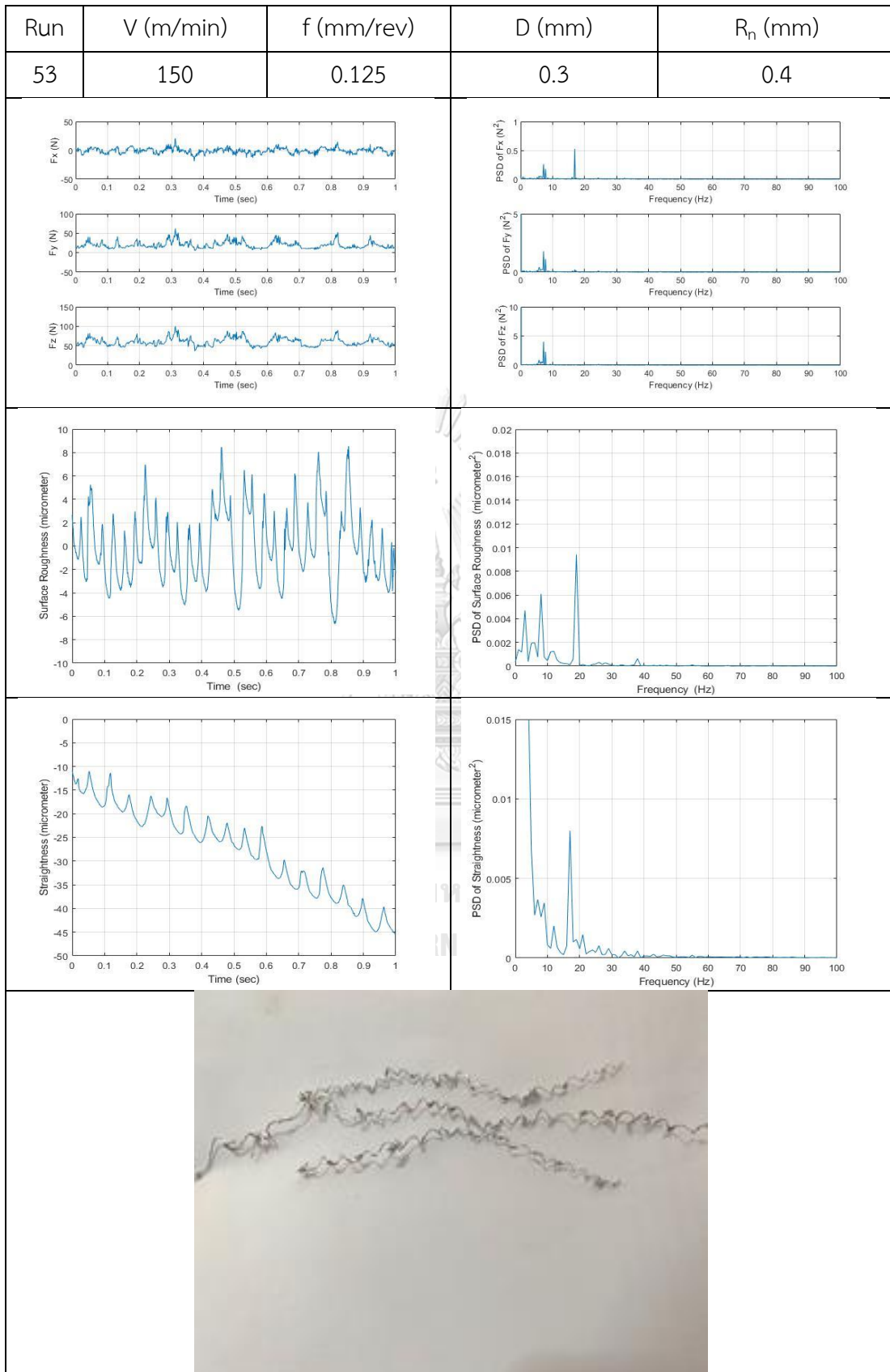


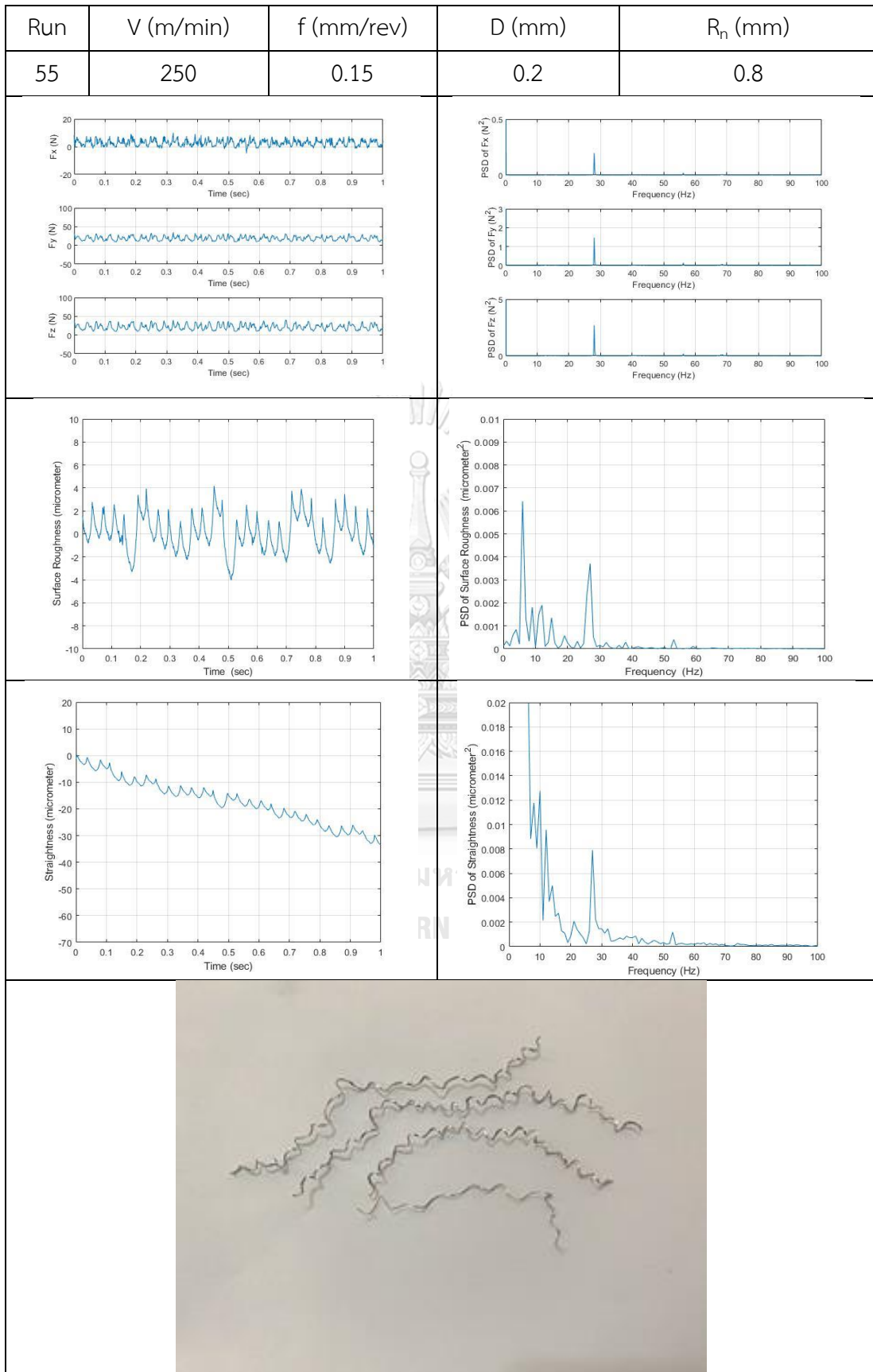


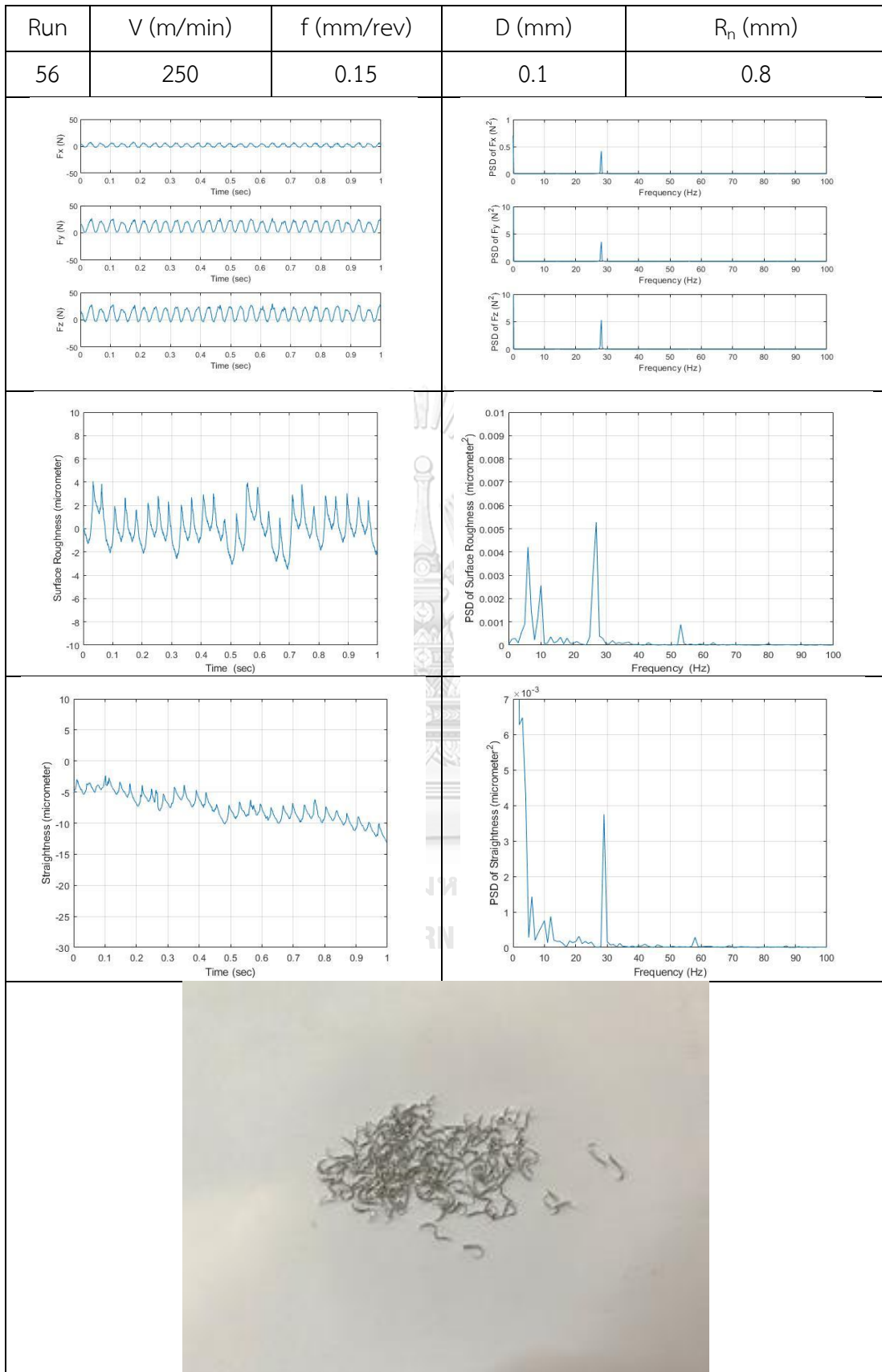


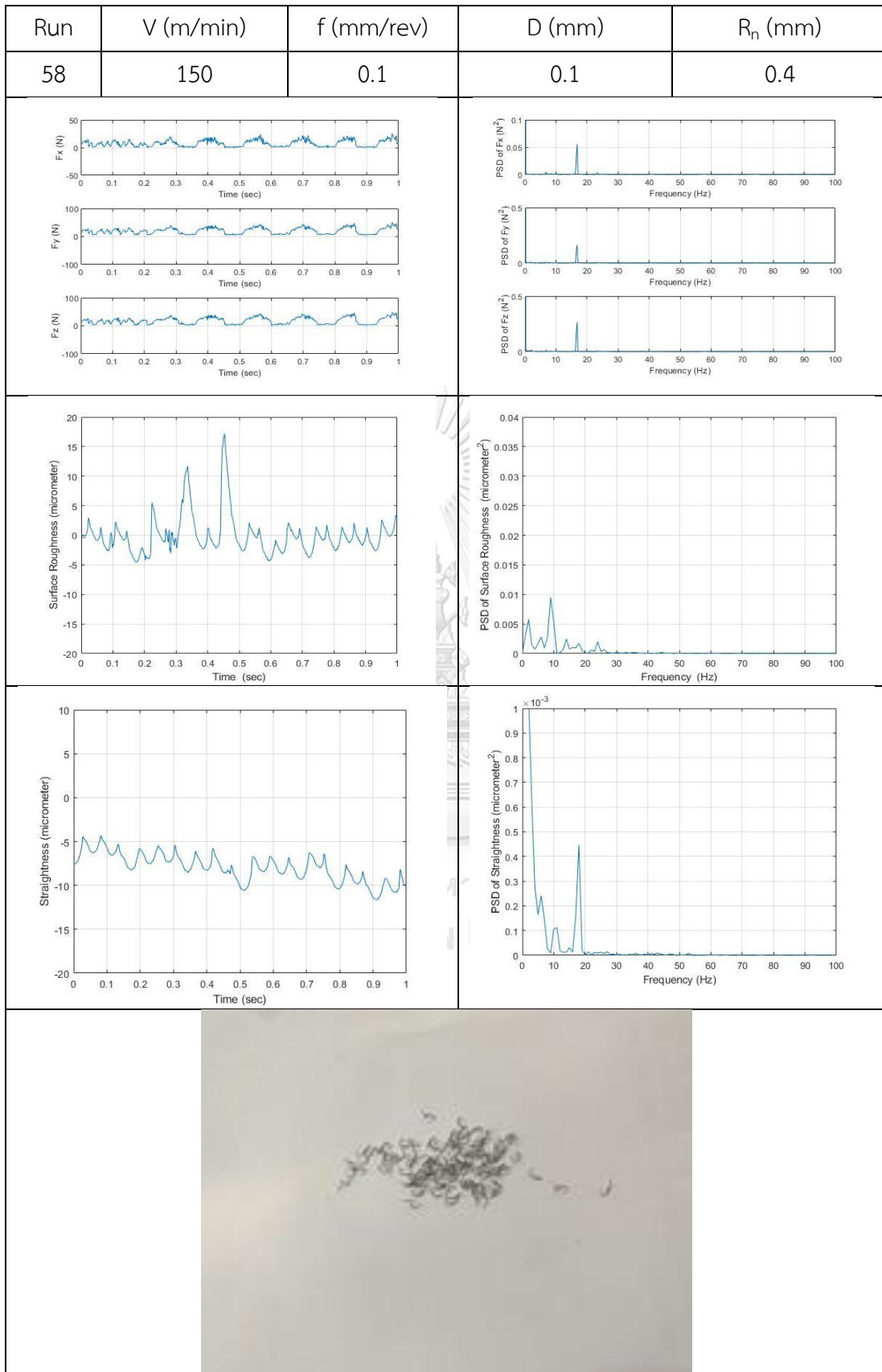


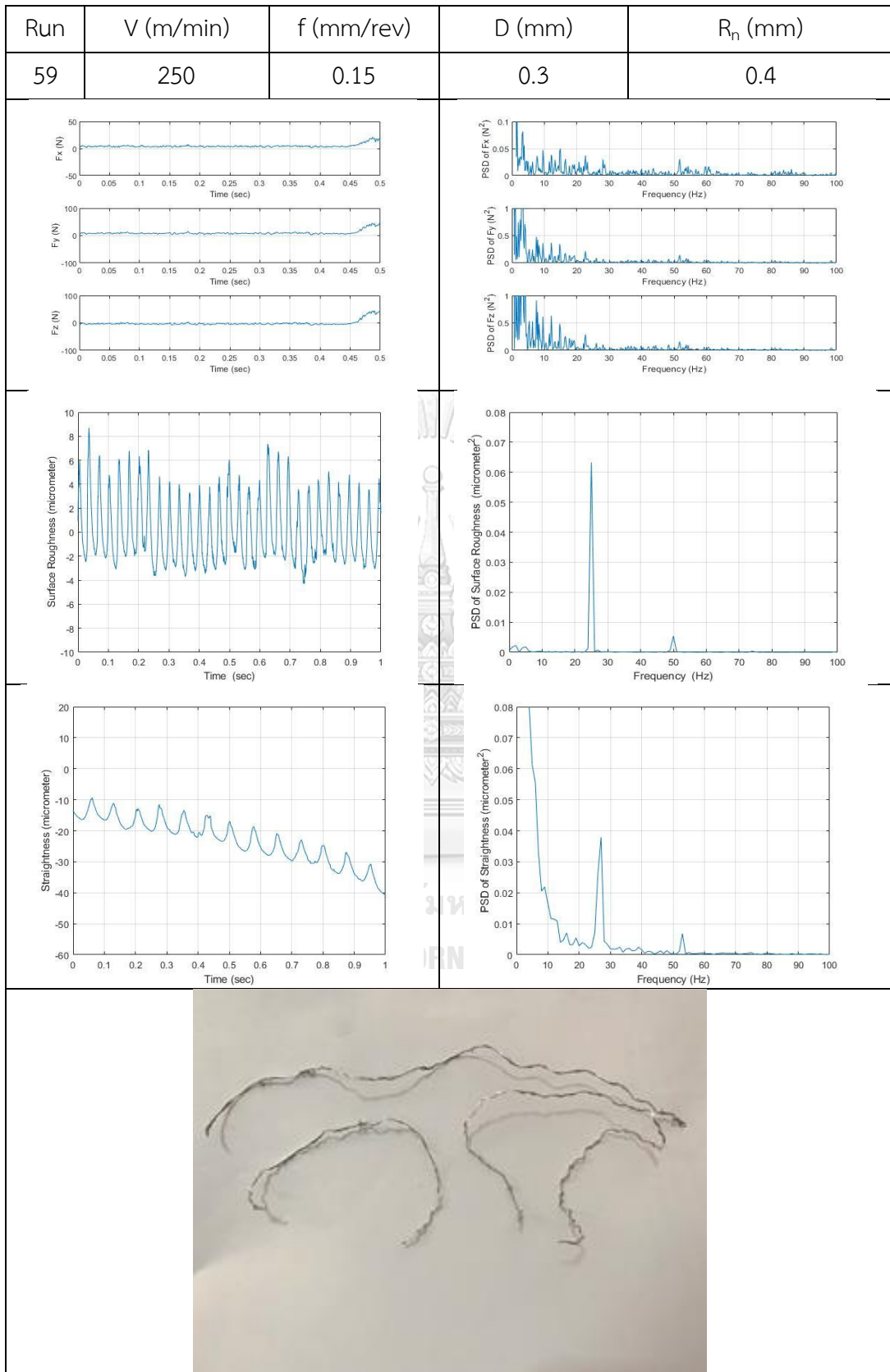


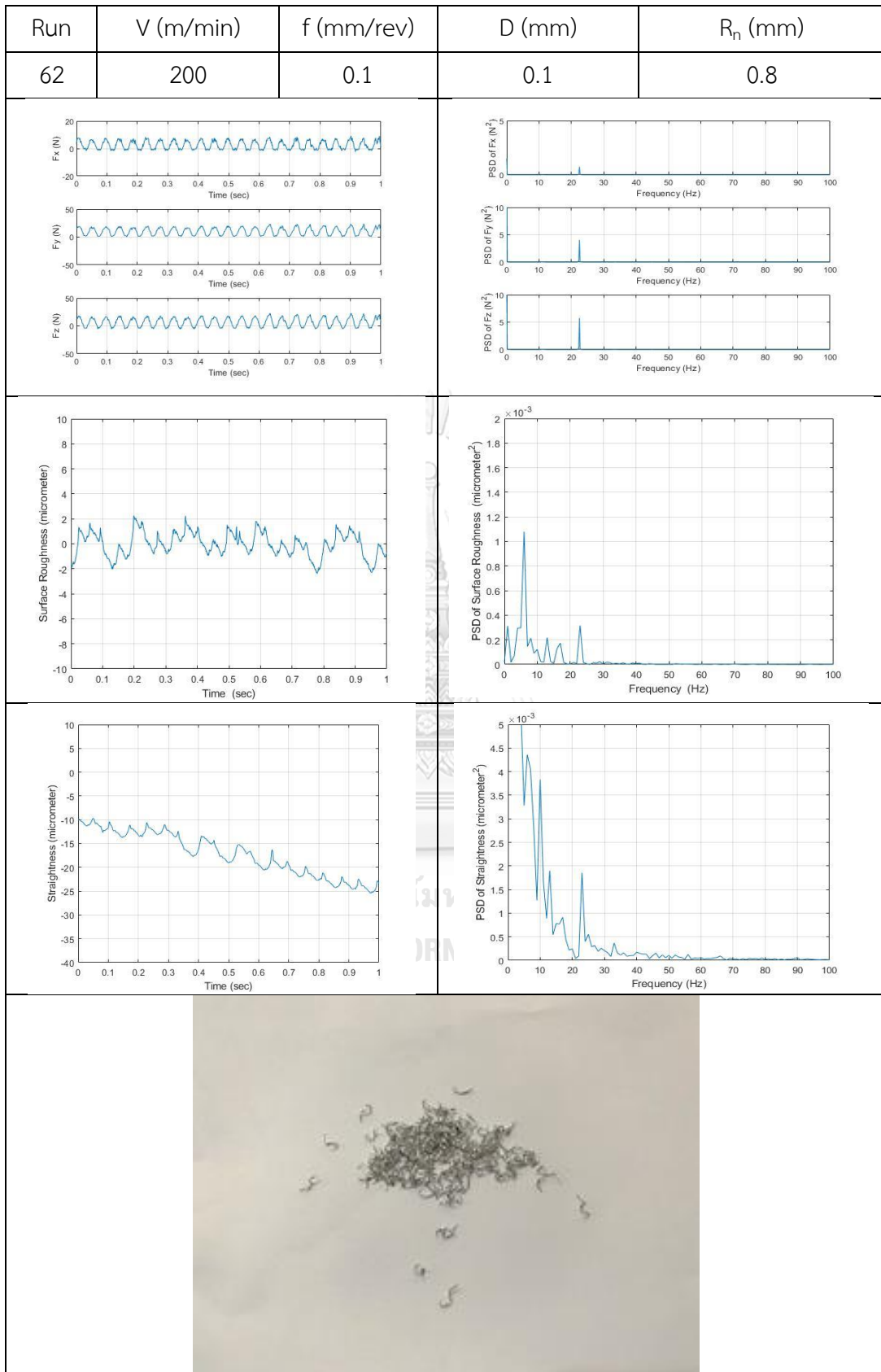


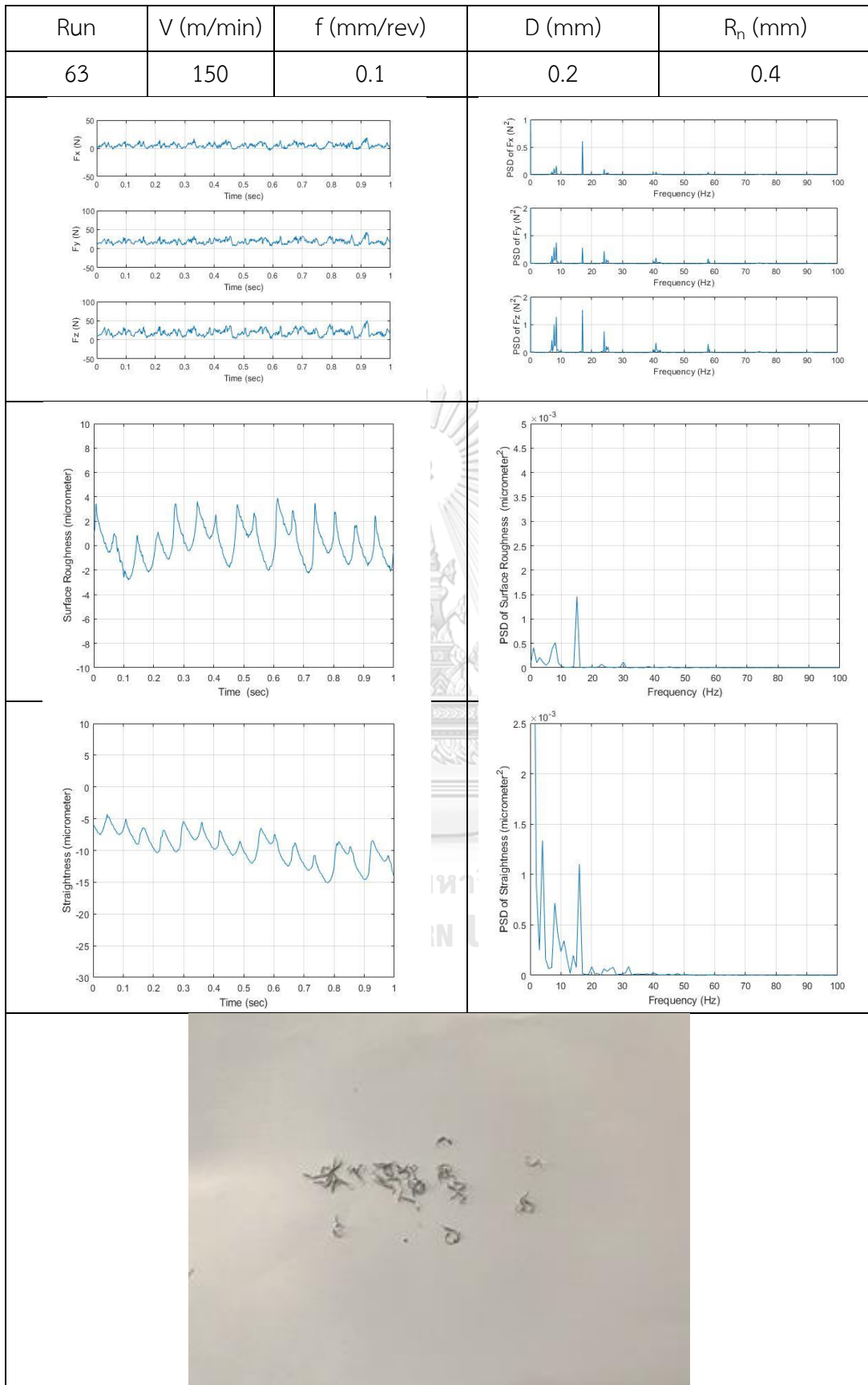


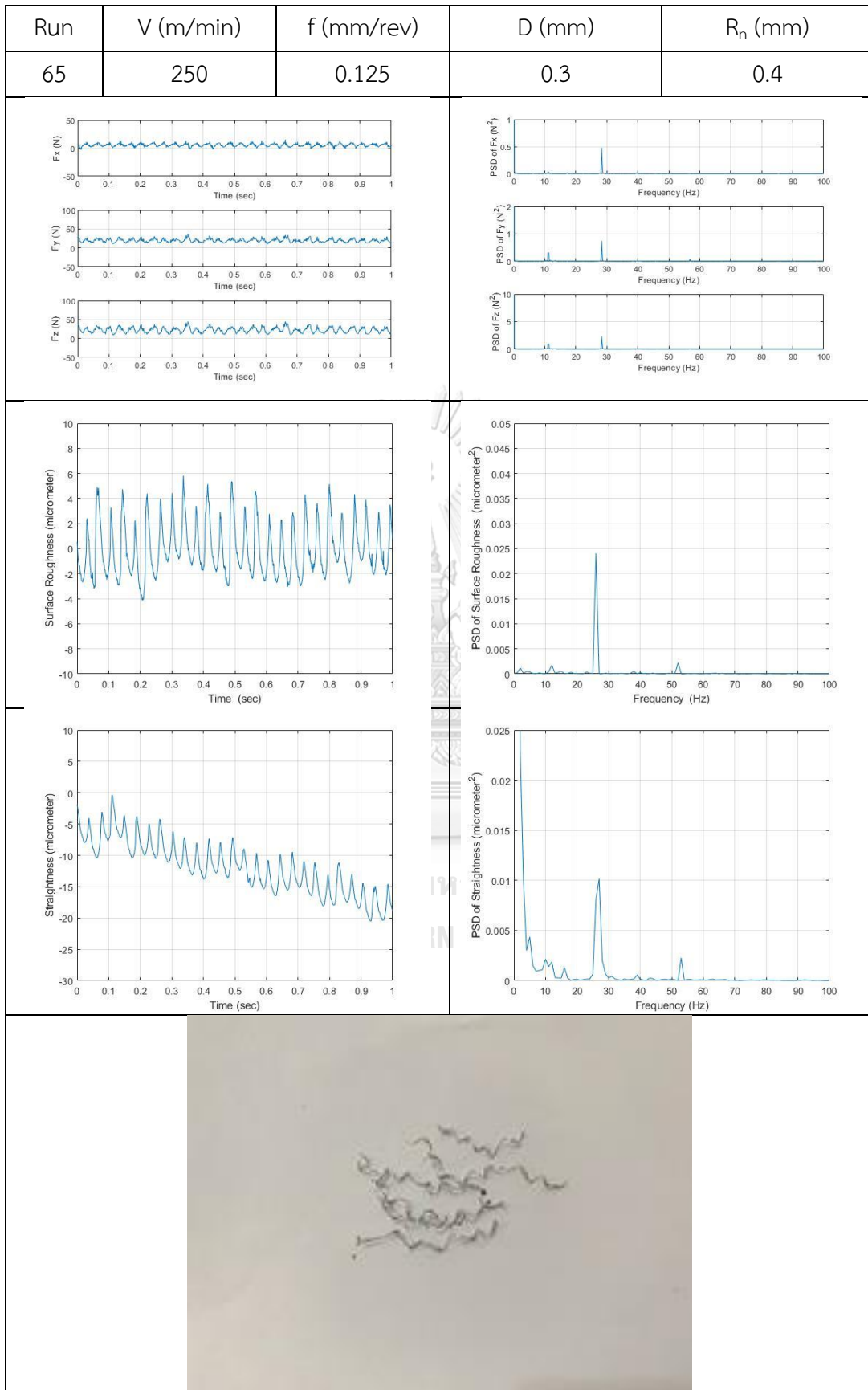


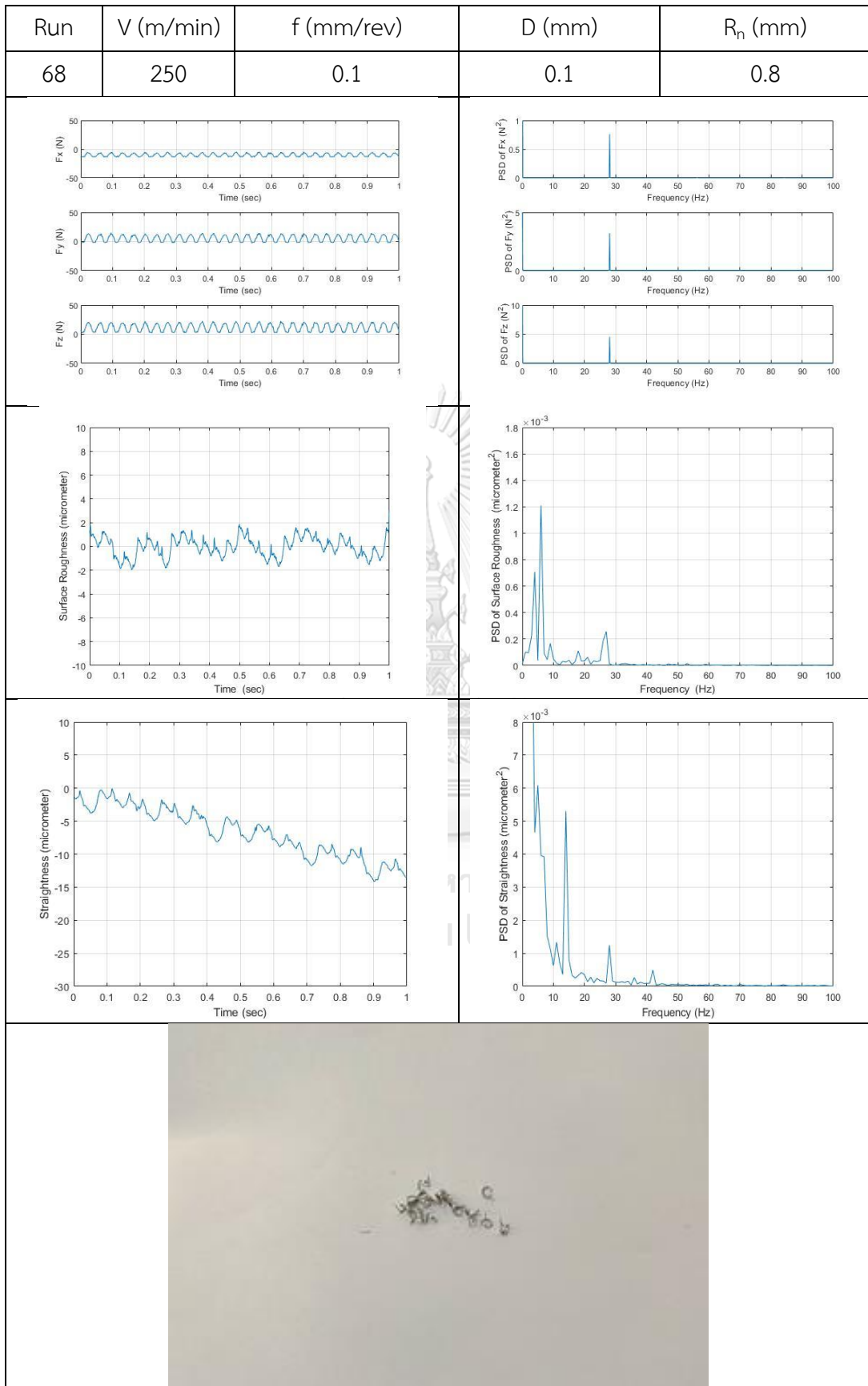


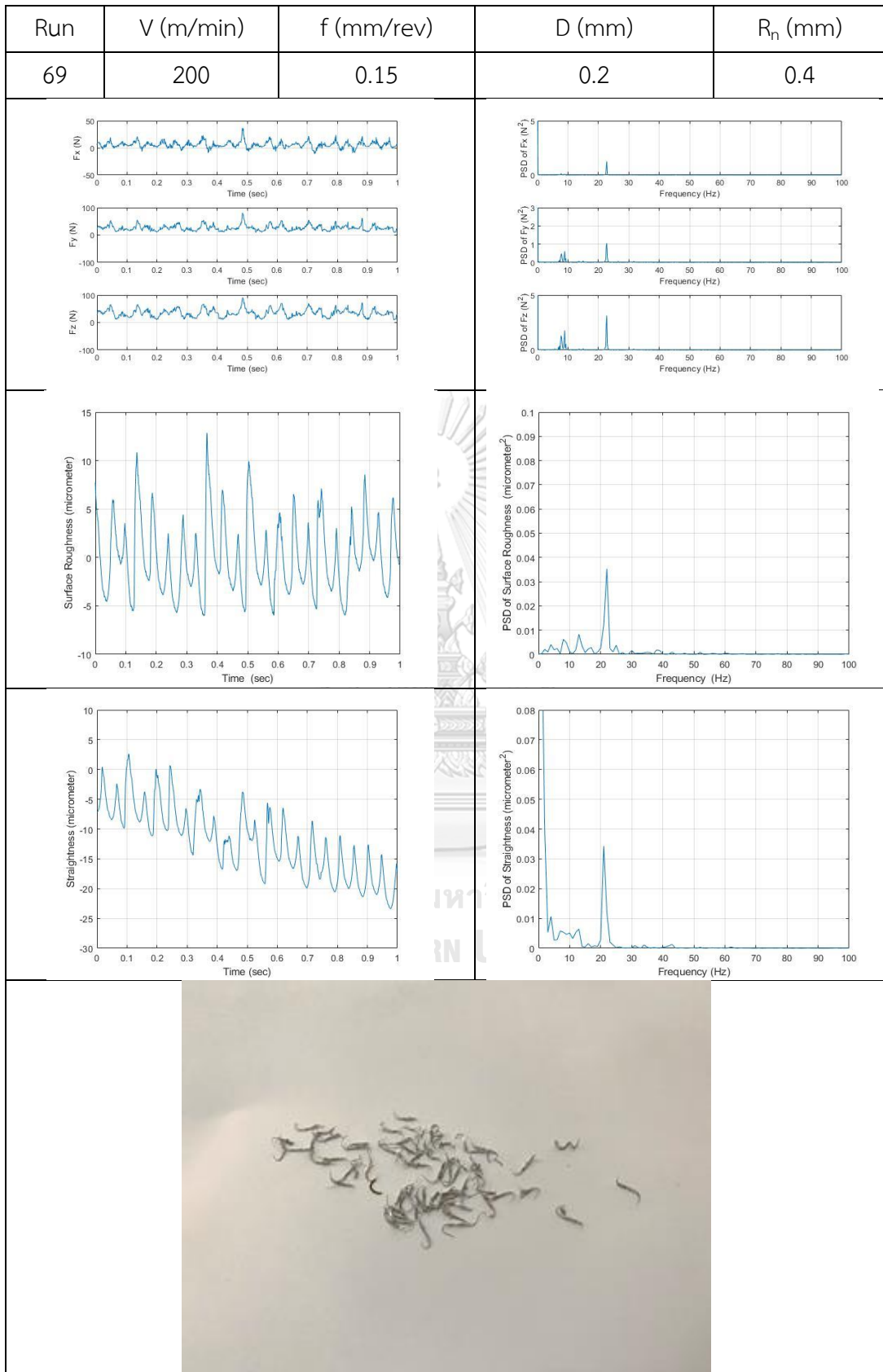


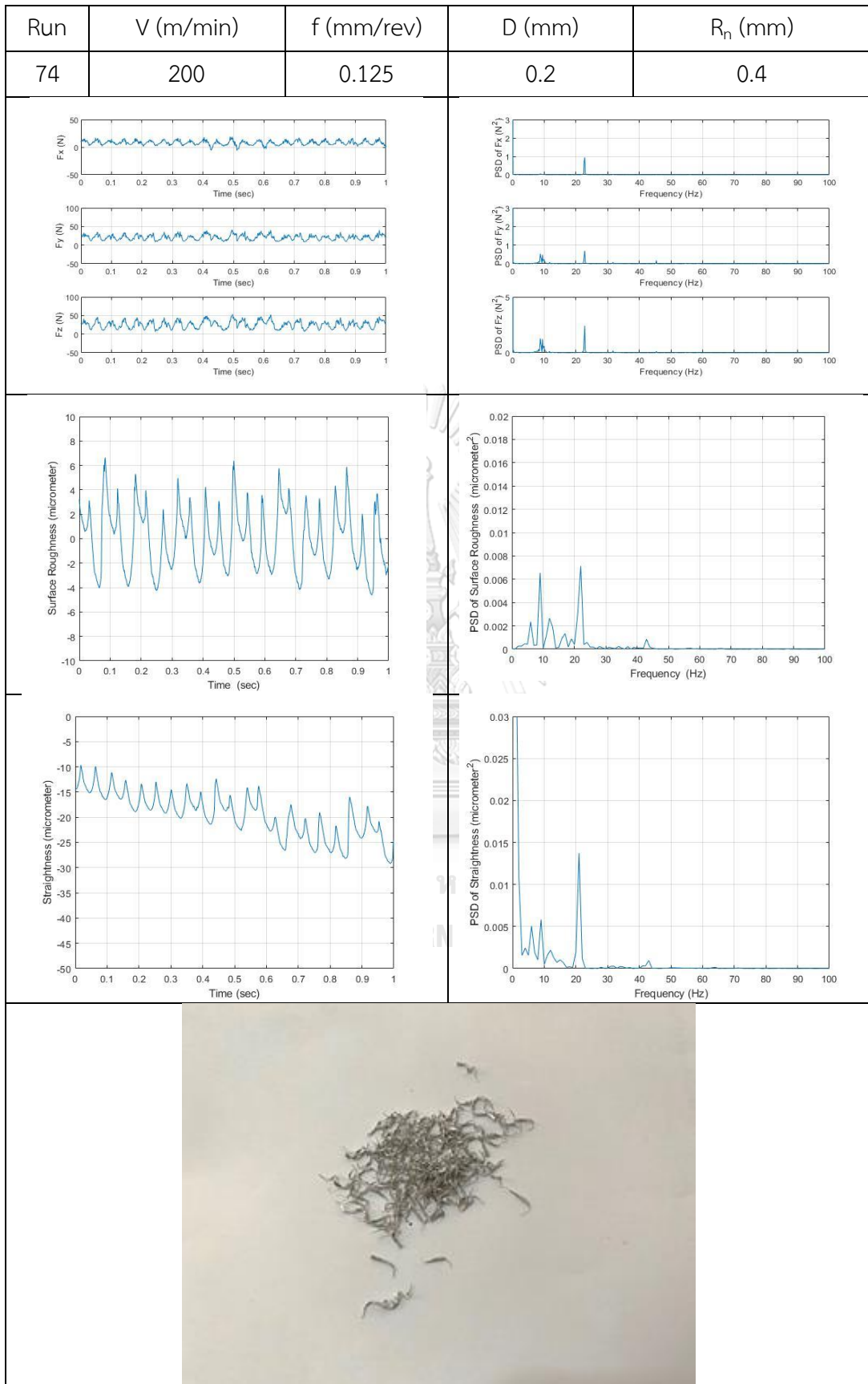


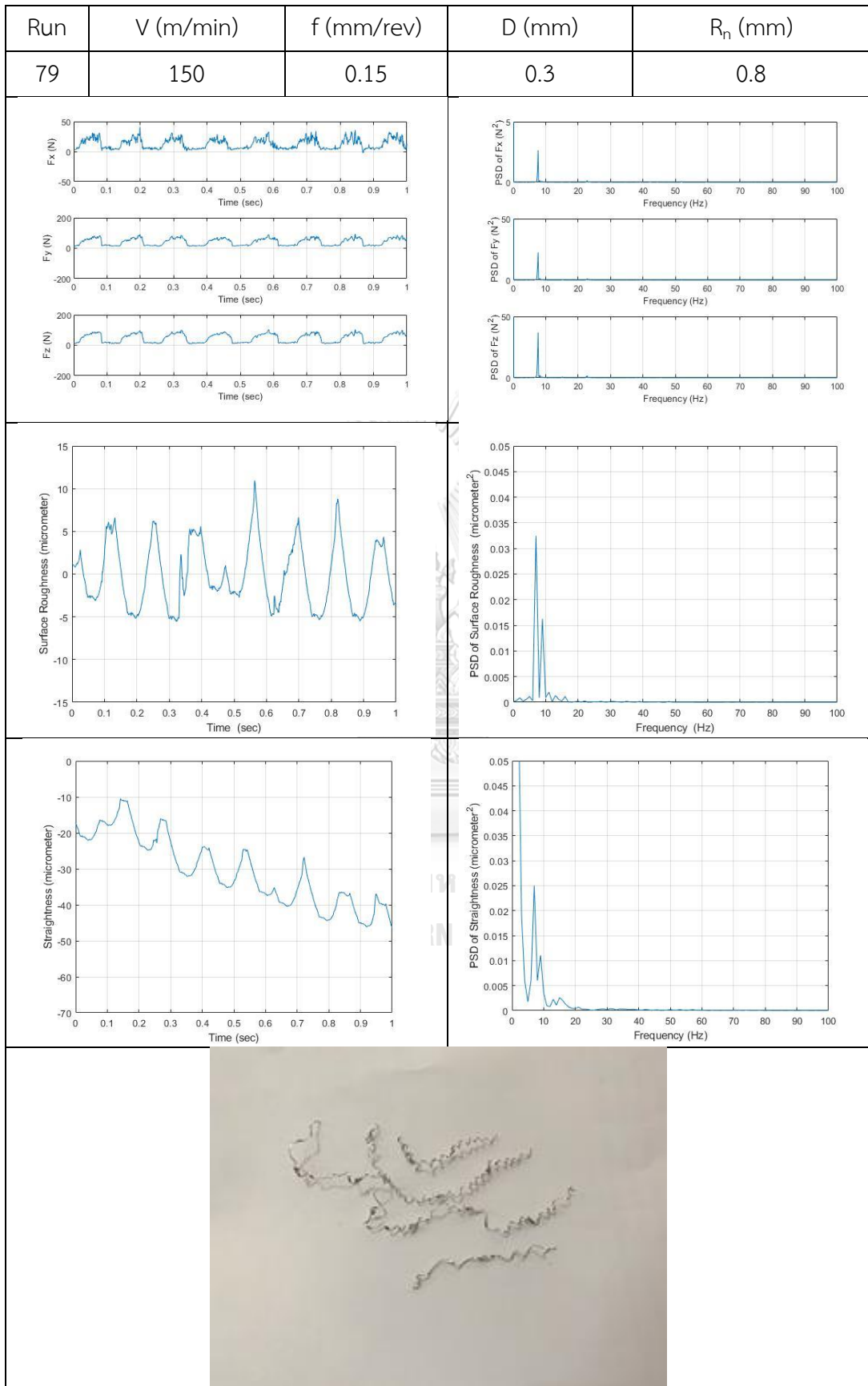


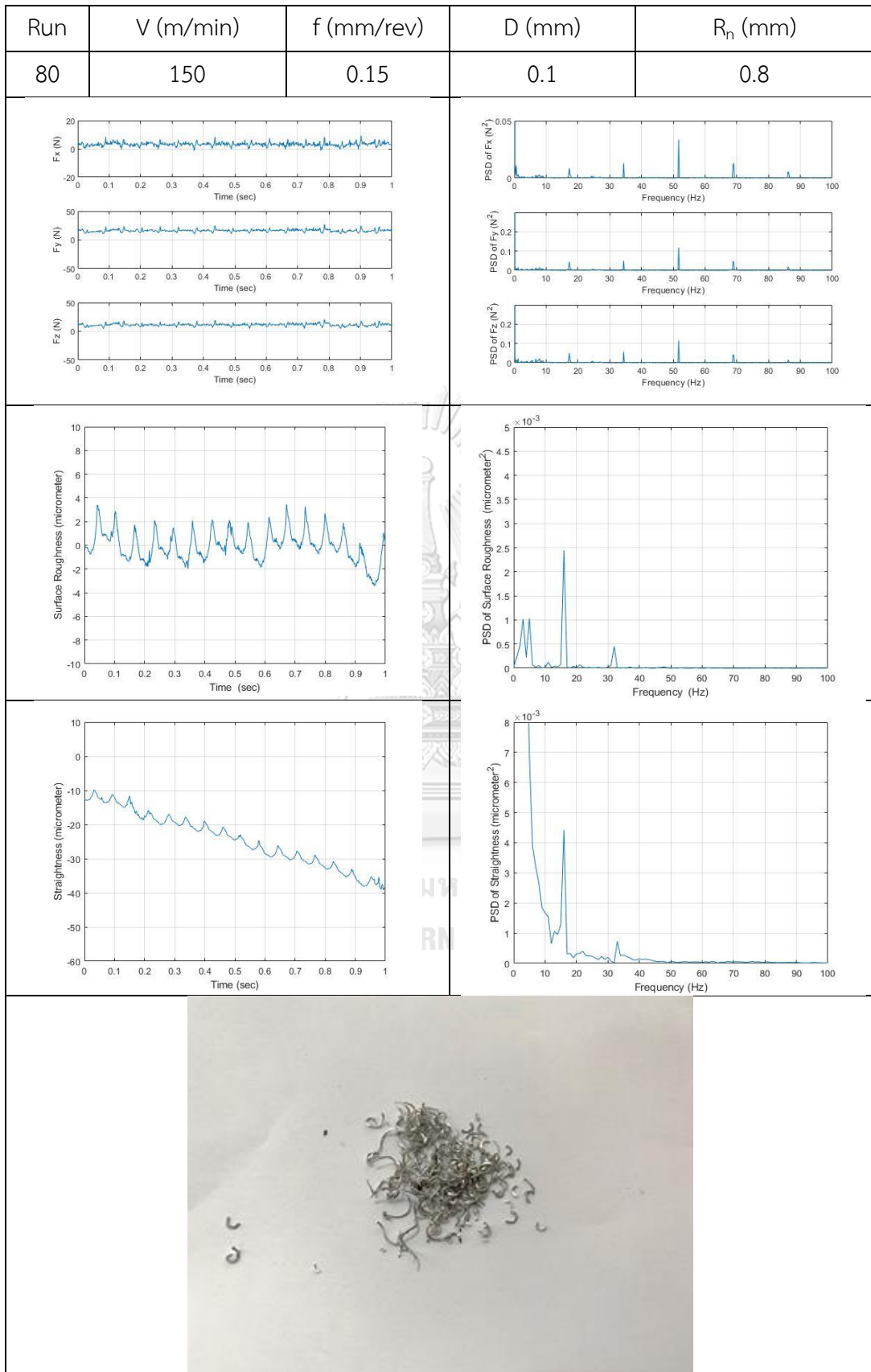


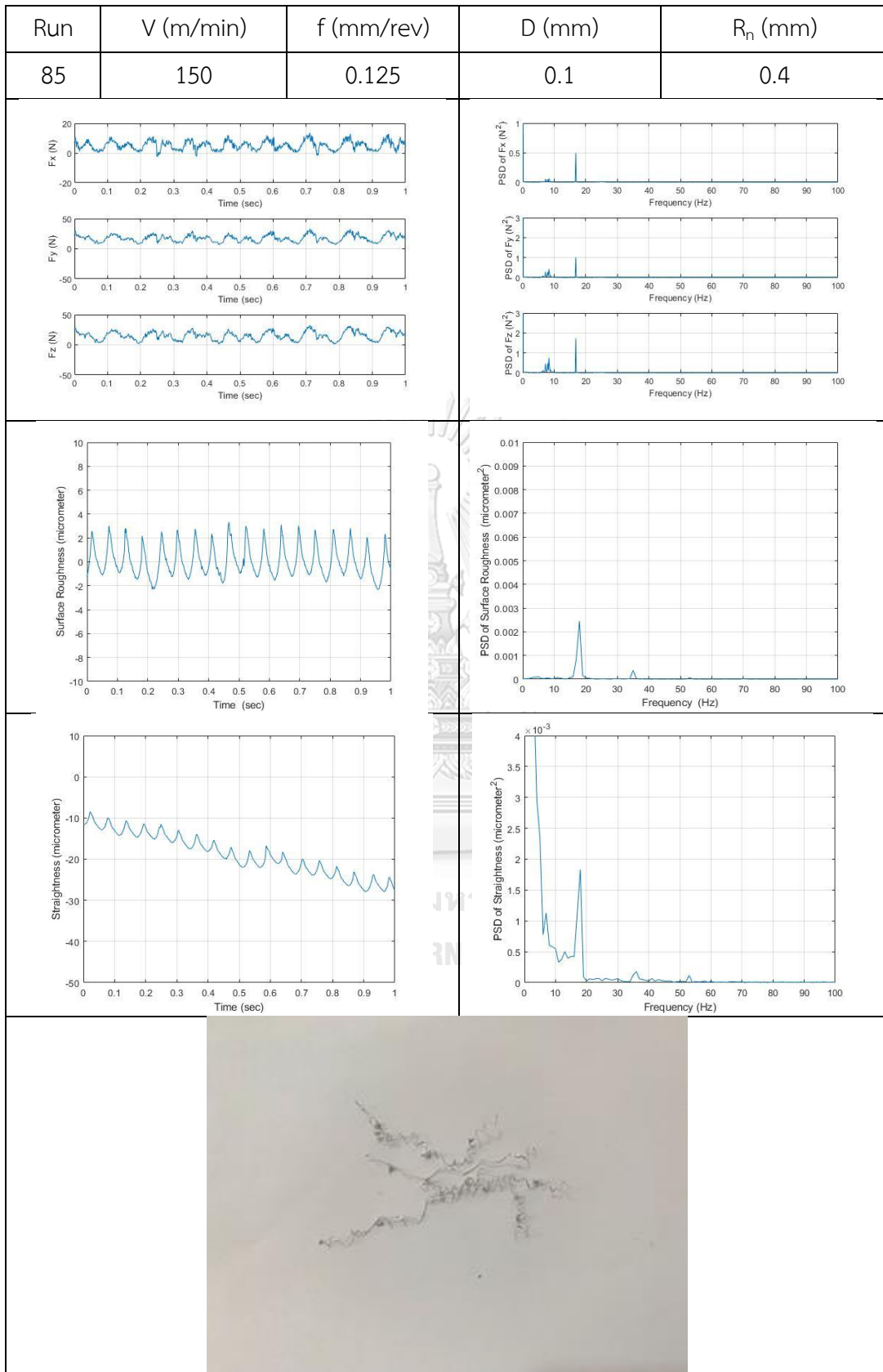


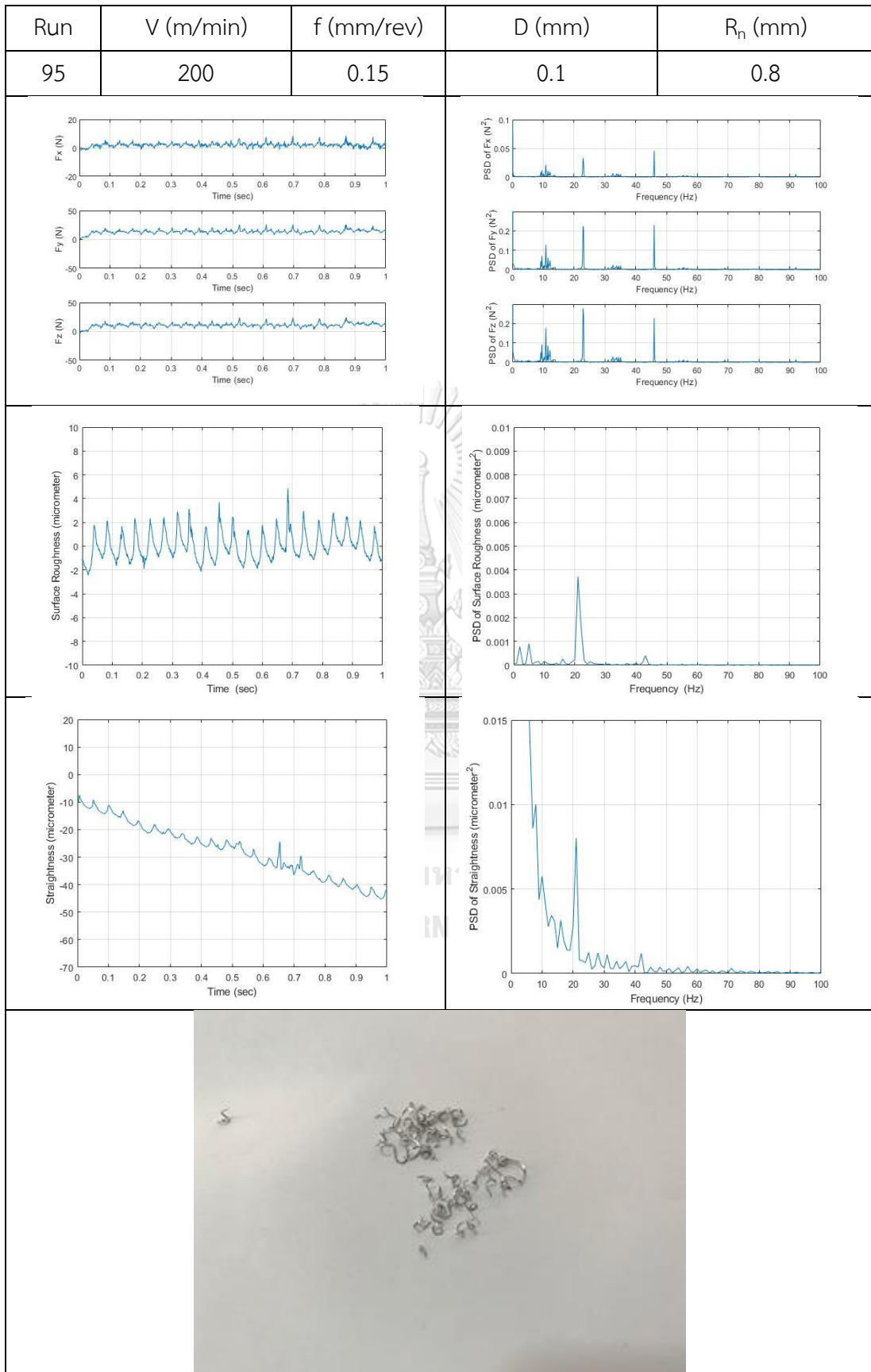


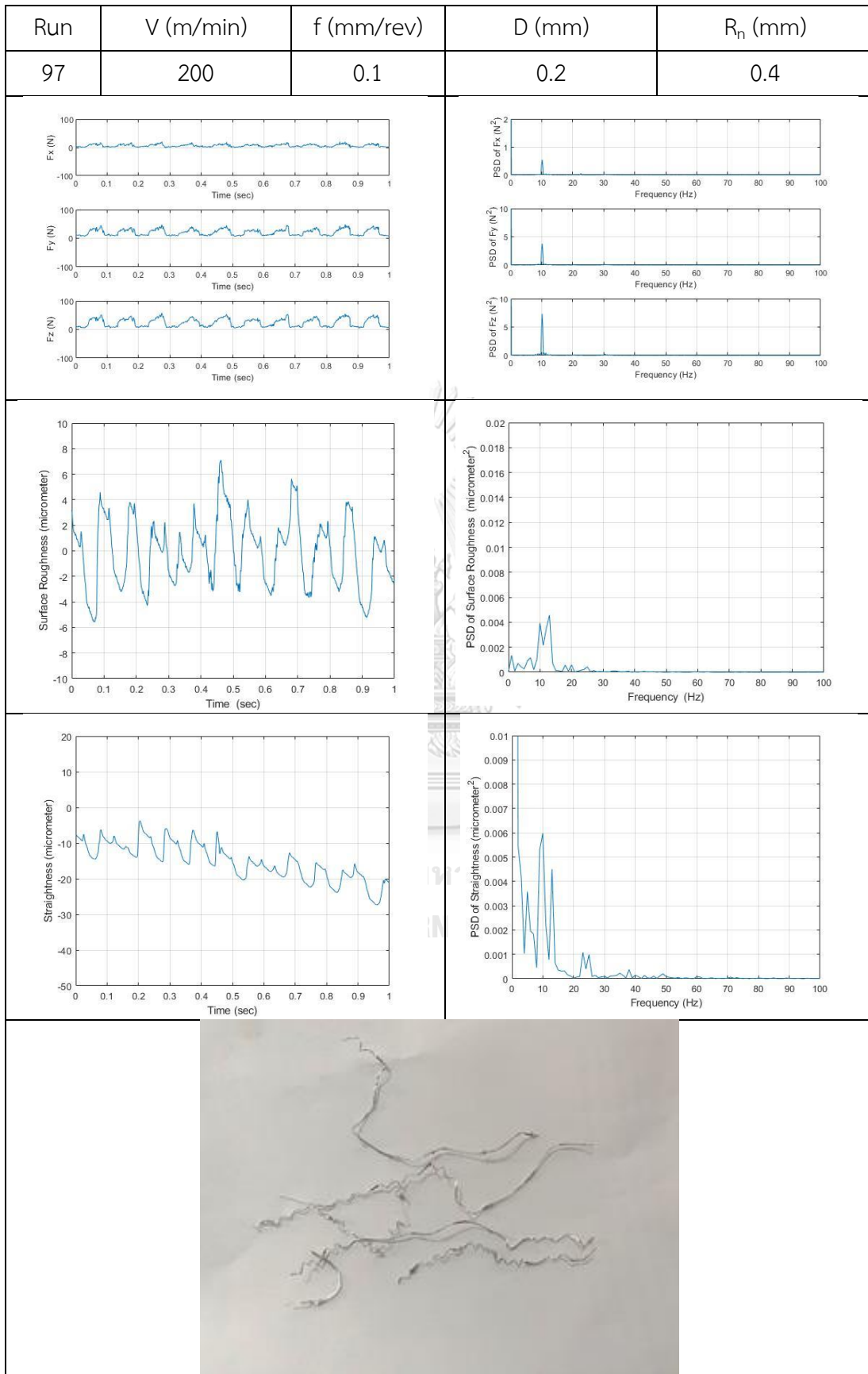


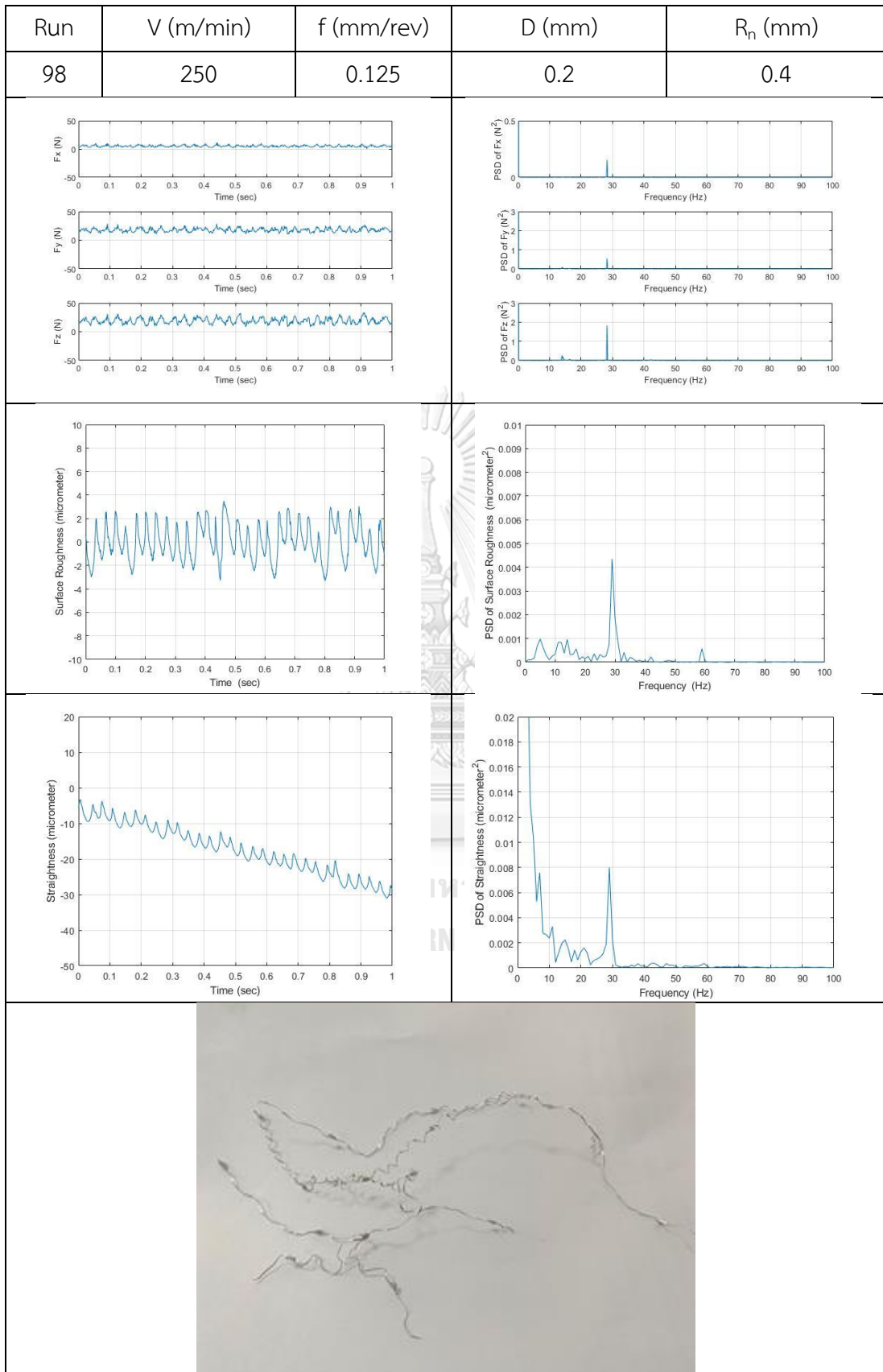


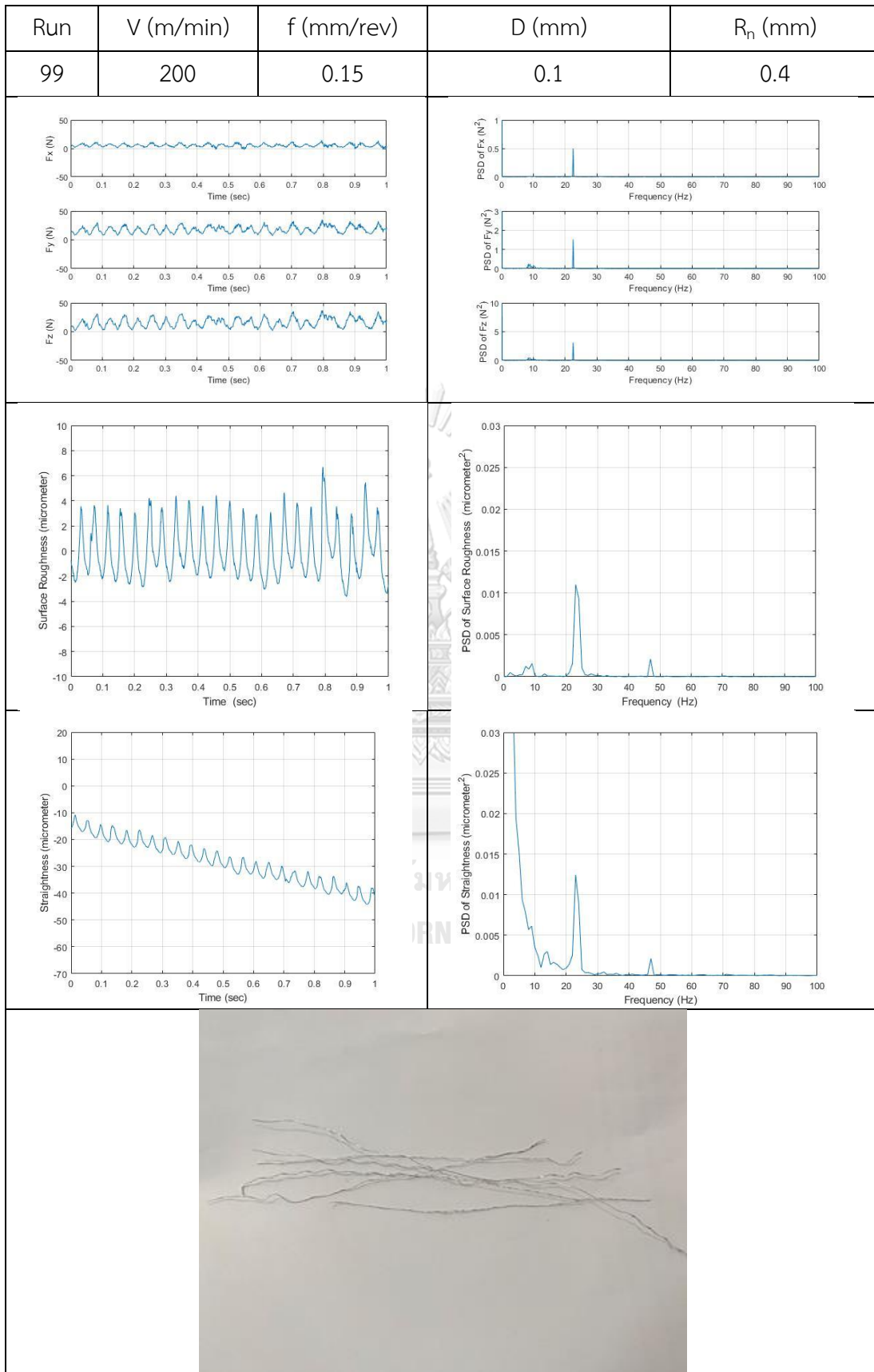


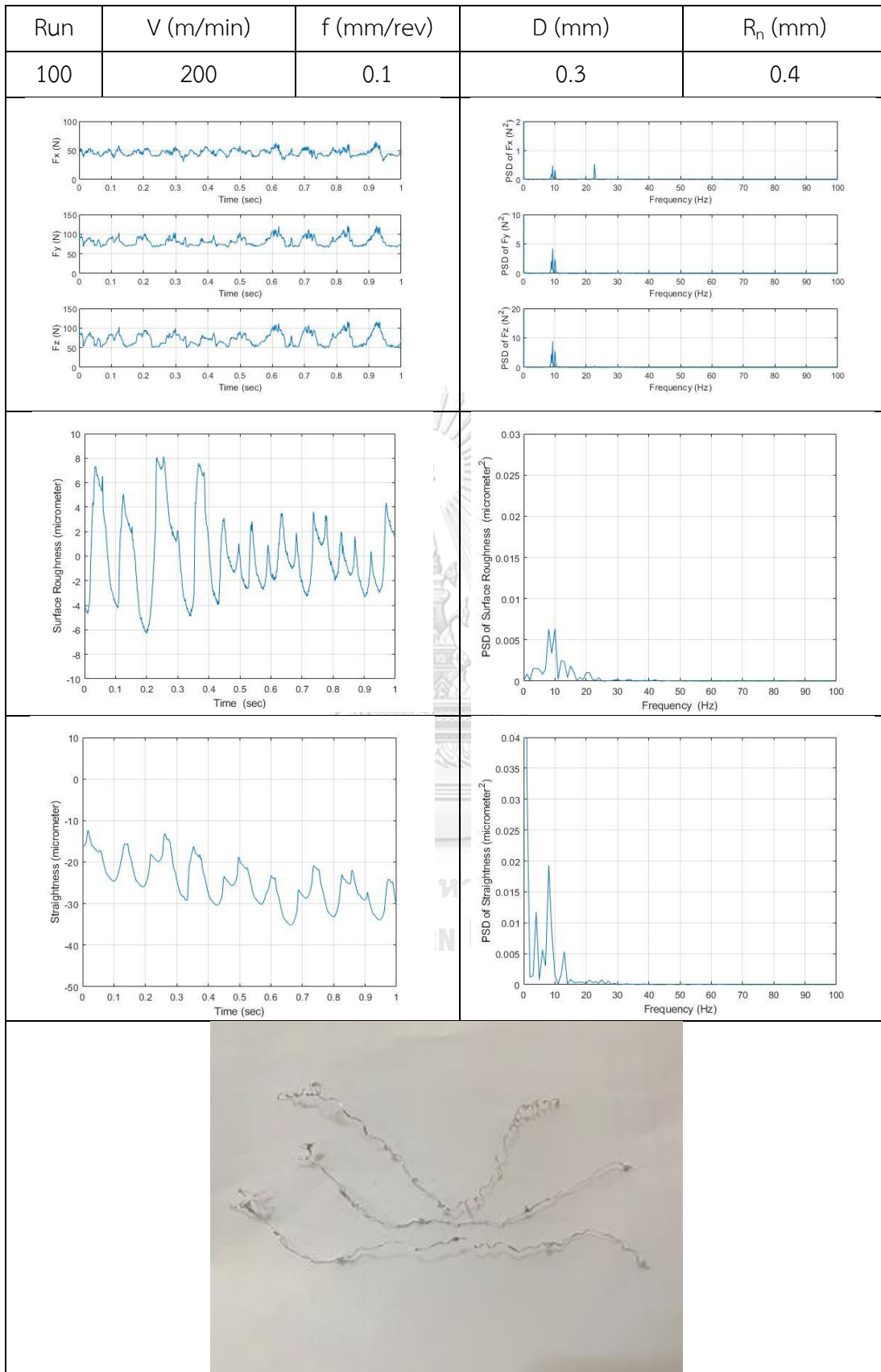


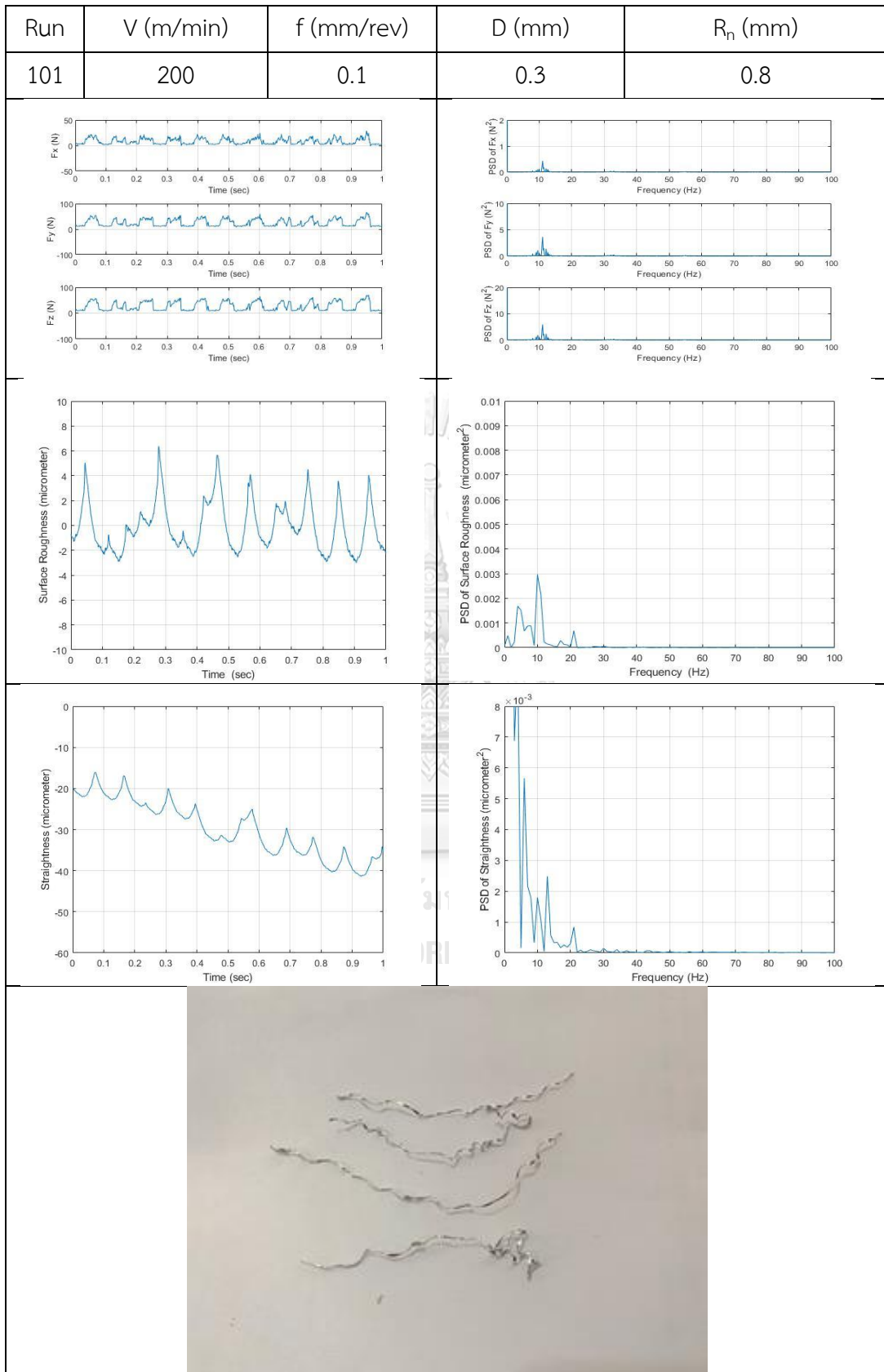


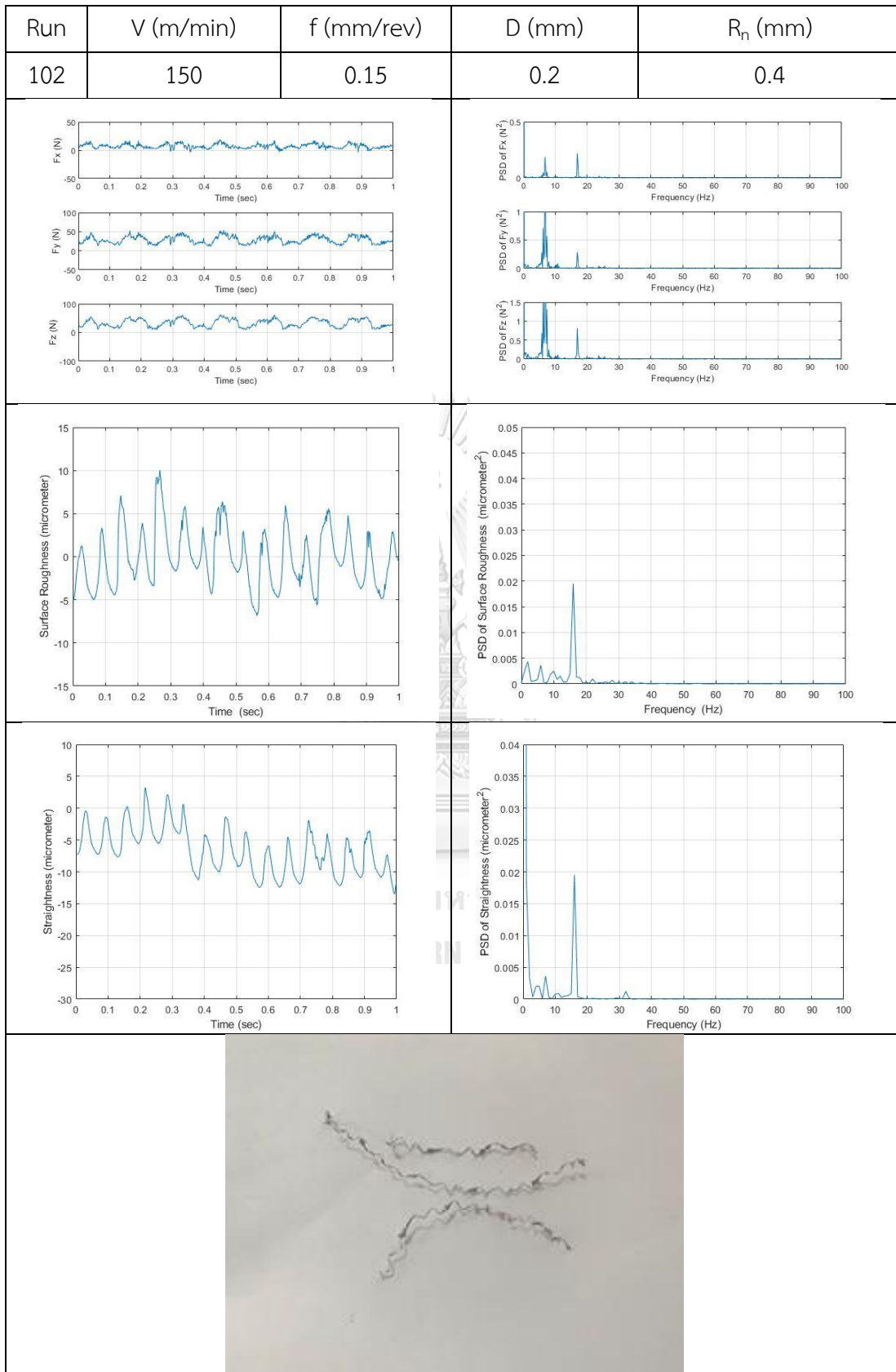


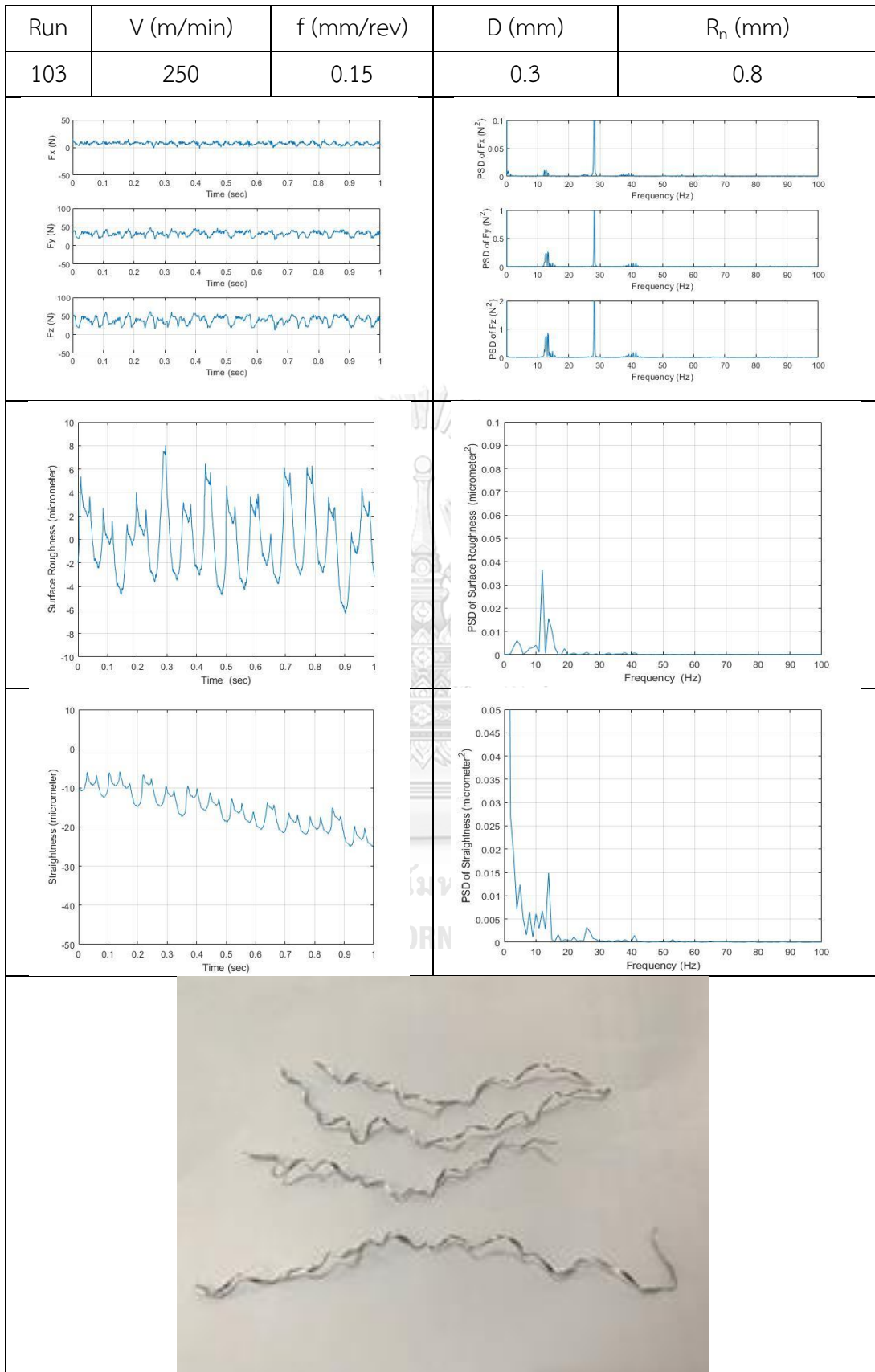


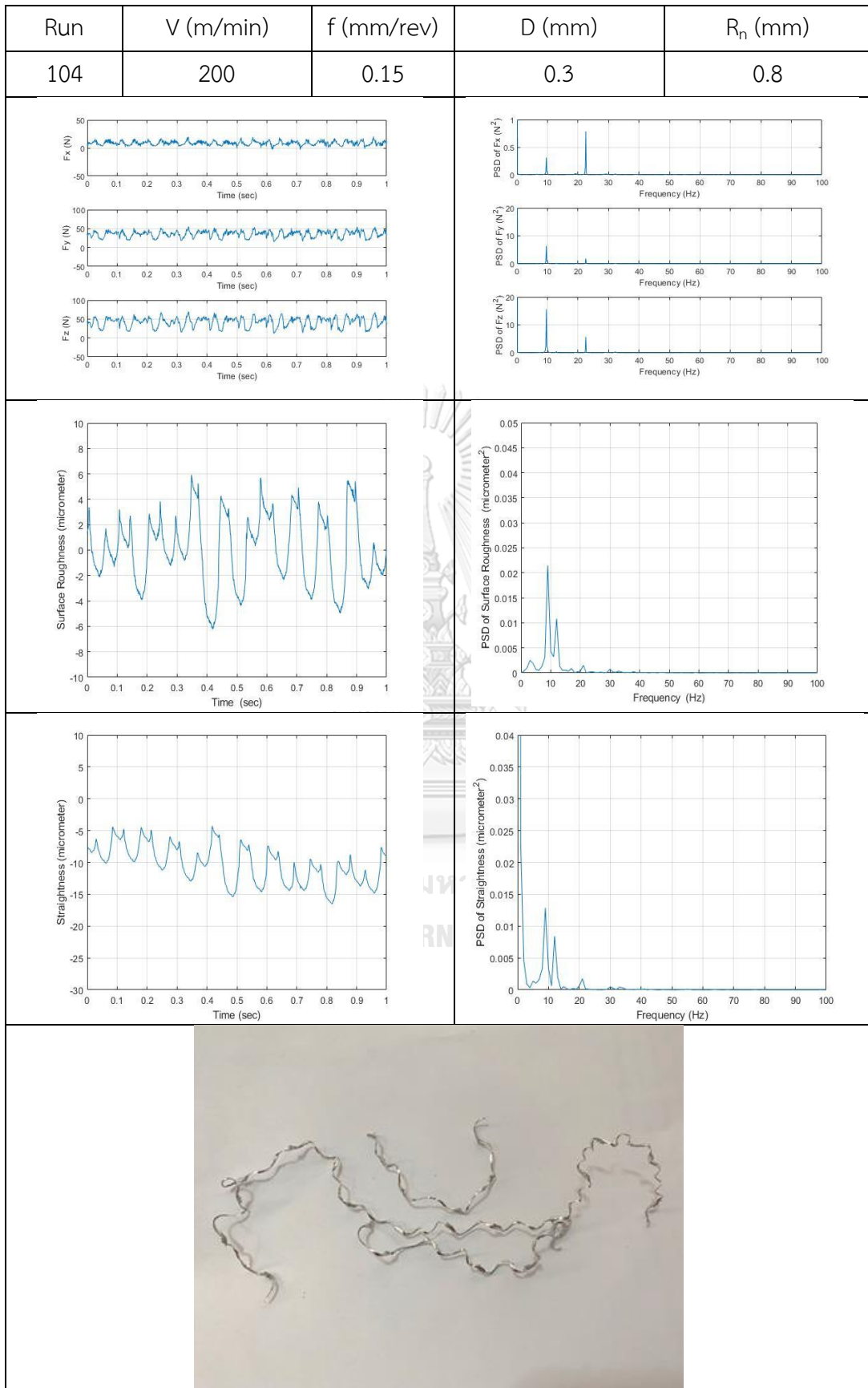


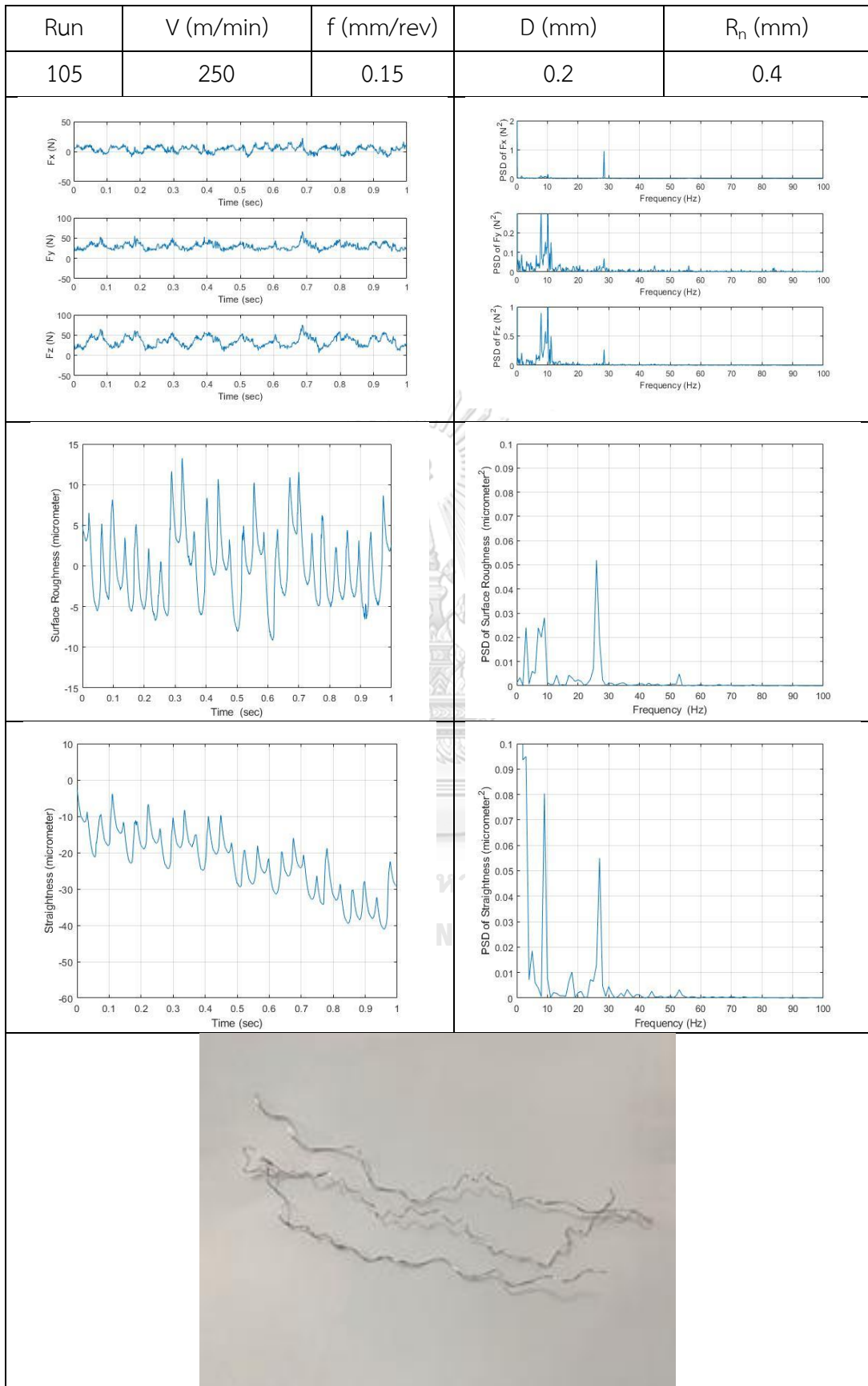


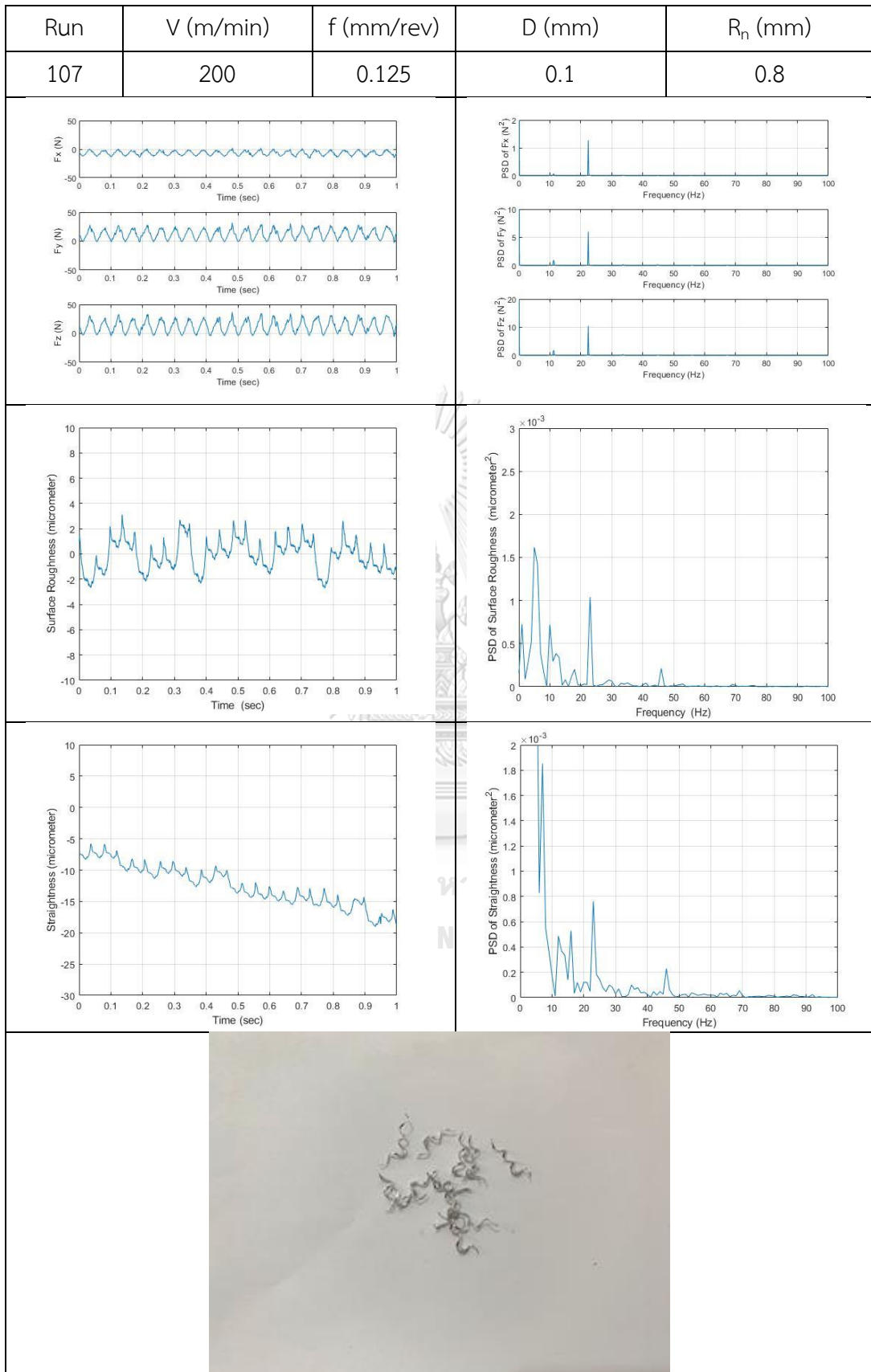












ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อริชยา เผือกหอม
วัน เดือน ปี เกิด	7 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	โรงเรียนเบญจมราชูทิศ ราชบุรี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยบูรพา
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 21/2 หมู่ 3 ตำบลปากช่อง อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี 70150
ผลงานตีพิมพ์	วารสารวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY