

การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์งานกลึงที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ไทเทเนียม (Ti-6Al-4V)

Studying Influence of Turning Parameters on Characteristics of Machined Surface of Titanium (Ti-6Al-4V)

ชาตรี นูชนาง และ ไพรัตน์ พลบุตร

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

199 หมู่ 6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000

Chatree Nutnang and Phairat Pholbut

Department of Mechanical Engineering, Faculty
of engineering Chiang rai College,

199, Pa O Don Chai, Mueang Chiang Rai District, Chiang Rai 57000

*Corresponding author Email: Obb_april@hotmail.com

(Received: December 06, 2025 / Revised: December 27, 2025 / Accepted: December 28, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์สำหรับงานกลึงที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) โดยการทดลองกลึงปอกบนเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติด้วยเม็ดมีดแบบไม่เคลือบผิวภายใต้สภาวะการตัดเฉือนที่ปราศจากการใช้สารหล่อเย็น พารามิเตอร์สำหรับการตัดเฉือนที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกของการตัด (Depth of cut) ผลจากการทดลองการตัดเฉือน พบว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Rz) ลดลงเมื่อความเร็วตัดเพิ่มมากขึ้น โดยความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุดจะลดลงจาก 11.58 ไมโครเมตร เป็น 8.58 ไมโครเมตร จากการควบคุมความเร็วตัด 150.0 เมตรต่อนาที ถึง 262.5 เมตรต่อนาที การลดลงของความหยาบผิวชิ้นงานอาจเป็นผลมาจากความเร็วตัดที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้วัสดุชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนเป็นเหตุให้แรงที่ใช้ในกระบวนการตัดเฉือนลดลง ในขณะที่ความหยาบผิวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามอัตราป้อนเกิดจากอัตราการที่สูงขึ้นเป็นการเพิ่มความหนาของเศษวัสดุซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานจากการสัมผัสของขอบเครื่องมือคมตัด นอกจากนี้ความหยาบผิววัสดุชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของการตัด โดยที่ระดับความลึกของการตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ มีความหยาบผิวเฉลี่ย 16.7 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: ไทเทเนียม ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกการตัด

Abstract

This research aims to study the influence of turning parameters affecting on the machined surface characteristics of titanium grade Ti-6Al-4V. Experimental tests for longitudinal turning were carried on the automatic machine with uncoated cermet under the dry machining condition. A study of turning parameters consisted of cutting speed, feed rate and depth of cut. The results of the machining experiments showed that the ten-point average surface roughness (Rz) decreased with increasing cutting speed. The average surface roughness of ten points was reduced from 11.789 μm to 8.532 μm by controlling the cutting speed from 150.0 m/min to 262.5 m/min. The reduction in surface roughness of workpiece may result from increased cutting speeds causing the work material to soften due to heat, thus reducing the force required in the cutting process. The average surface roughness increased with feed rate due to the more distance of cermet moving was leading to higher chip thickness which directly affects the machined surface of workpiece due to the contact of the cutting edge tool. In addition, the roughness of the machined surface of workpiece was increased with the depth of cut. The average roughness of machined surface presented by 16.7 microns at a depth of cut of 0.3 mm/rev.

Keywords: Ti-6Al-4V, Cutting speed, Feed rate, Depth of cut

1. บทนำ

การกลึงเป็นการผลิตชิ้นงานทรงกระบอกที่มีความสมมาตรโดยการควบคุมเครื่องมือคมตัดเคลื่อนที่ตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานซึ่งจัดอยู่ในหมวดหมู่การแปรรูปโดยใช้เครื่องมือแบบของคมตัดเดี่ยว (Single point cutting tool) กระบวนการกลึงเป็นการแปรรูปวัสดุชิ้นงานในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เครื่องจักร และอากาศยาน เป็นต้น [1] งานกลึงเป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่นโดยการเคลื่อนที่ตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของวัสดุในบริเวณเริ่มต้น (Primary deformation zone) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุโดยความแข็งแรงของชิ้นงานจะส่งผลเป็นอย่างมากต่อความสามารถในการตัดเฉือน และในการตัดเฉือนเศษจะไหลตัวผ่านพื้นผิวของเครื่องมือคมตัด (Secondary deformation zone) โดยการไหลตัวของเศษจะเกิดบนพื้นผิวเครื่องมือคมตัด และการเปลี่ยนรูปบริเวณพื้นชิ้นงาน (Tertiary deformation zone) จะปรากฏเป็นลักษณะพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการตัดเฉือน [2] มีดำเนินการวิจัยที่หลากหลายในการศึกษาการแปรรูปวัสดุชิ้นงานโดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในกระบวนการกลึงประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ควบคุมเพื่อให้ทราบถึงความเร็วของเศษวัสดุที่ต้องจัดออกโดยมีหน่วยการวัดเป็นเมตรต่อนาที (เมตร/นาท) อัตราป้อน (Feed rate) เป็นการควบคุมความหนาของเศษก่อนการตัดโดยกำหนดเป็นระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือคมตัดต่อการหมุนในแต่ละรอบของวัสดุชิ้นงานมีหน่วยควบคุมเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ (มิลลิเมตร/รอบ) ความลึกในการตัด (Depth of cut) โดยความลึกในการตัดสำหรับการกลึงปอกแล้วจะทำให้ขนาดชิ้นงานเปลี่ยนแปลงเป็นสองเท่าของความลึกในการตัดซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร วัสดุชิ้นงาน (Work material) และเครื่องมือคมตัด (Cutting tool) ทั้งนี้ผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกลึงจะประกอบด้วย ขนาดของชิ้นงาน (Dimension) เศษกลึง (Chip) ความหยาบผิว (Surface roughness) และการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด (Tool wear) [3]

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์งานกลึงที่ส่งผลประสิทธิภาพการกลึงวัสดุชิ้นงานต่างๆ เช่น พืชยา พืชสุวรรณ และคณะ [3] ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกอะลูมิเนียมเกรด 2024 โดยใช้เมตต์คาร์ไบด์ และกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง เป็น ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด สำหรับการกลึงวัสดุชิ้นงานอะลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยผลจากการทดลอง พบว่า ความหยาบผิวชิ้นงาน (Arithmetical mean roughness, Ra) มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนและความลึกในการตัดที่ต่ำภายใต้ความเร็วรอบที่สูง จุฬาลักษณ์ วิจารณ์กุล และคณะ [4] พยากรณ์ค่าความขรุขระสำหรับการกลึงคว้านเหล็กหล่อเหนียวโดยการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองและการสึกหรอของเมตต์คาร์ไบด์ จากผลการทดลอง พบว่า ความหยาบผิวชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความลึกในการตัดต่ำ และเพิ่มความเร็วรอบรวมทั้งขนาดรัศมีปลายมีดของเครื่องมือคมตัด (Nose radius) ทั้งนี้ในการกลึงคว้านความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือคมตัดที่ปรากฏโดยส่วนใหญ่จะเป็นการแตกที่ปลายของขอบคมตัดเนื่องจากการกระแทก สัมผัส หน่วง และคณะ [5] ศึกษาการปรับปรุงค่าความหยาบเรียบผิวเหล็ก ST 37 ด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยใช้เทคนิคทาทุชิ โดยทางคณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความเรียบผิวงาน 0.984 ไมครอนเมตร โดยการควบคุมความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร พงศ์ธร จันทรสุขจำเริญ [6] ศึกษาความคุ้มค่าในการเลือกใช้เมตต์คาร์ไบด์สำหรับกลึงวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม โดยผลจากการศึกษาปรากฏให้เห็นว่า การใช้เมตต์คาร์ไบด์ชุบเคลือบผิวจะมีต้นทุนที่ถูกกว่าเมตต์คาร์ไบด์ที่เป็นเซอร์เมทโดยประมาณ 19.62 % Janmanee และคณะ [7] ศึกษาการเปลี่ยนรูปของเศษในการกลึงไทเทเนียมด้วยเมตต์คาร์ไบด์แบบเซอร์เมทและแบบชุบเคลือบเมตต์คาร์ไบด์ด้วยอลูมิเนียมโครเมียมซิลิกอนไทเทเนียมไนไตร (AlCrSiTiN) และไทเทเนียมอลูมิเนียมซิลิกอนไนไตร (TiAlSiN) โดยจากการทดลองพบว่าการใช้เมตต์คาร์ไบด์เซอร์เมทจะทำให้เกิดการบิดตัวของเศษมากกว่าการใช้เครื่องมือคมตัดแบบชุบเคลือบผิว โดยเมตต์คาร์ไบด์ชุบเคลือบผิวด้วย TiAlSiN จะมีการสึกหรอที่ต่ำ Lu และคณะ [8] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ความหยาบผิววัสดุชิ้นงาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการพยากรณ์จะมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นเมื่อพิจารณาถึงความหยาบผิวทางทฤษฎี (Theoretical roughness) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jia และคณะ [9]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการศึกษาพารามิเตอร์การกลึงที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยของวัสดุชิ้นงานต่างๆ อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยน้อยมากที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการควบคุมพารามิเตอร์ในการกลึงที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวสำหรับการกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกของการตัด ที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือคมตัดแบบไม่ชุบเคลือบผิว

2. วิธีการดำเนินการทดลอง

การทดลองกระทำบนเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น HAAS รุ่น TL1 ดังแสดงในรูปที่ 1 ก) และลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานภายหลังการกลึงจะถูกประเมินโดยใช้เครื่องทดสอบความหยาบผิวที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น Mahr รุ่น MarSurf PS1 ดังแสดงในรูปที่ 1 ข) ทั้งนี้วัสดุชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดลองเป็นไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ขนาด 25 มิลลิเมตร โดยวัสดุชิ้นงานจะถูกจับยึดบนเพลาหัวจับเครื่องกลึงด้วยปากจับแบบ 3 ฟันพร้อม และทำการกลึงปอกยาว 30 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขการตัดเฉือนโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น ทั้งนี้พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองจะทำการปรับ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกการตัดดังแสดงในตารางที่ 1 โดยในการทดลองจะทำการกลึงด้วยเม็ดมีดที่มีเครื่องหมายการค้า TNMG 160402R-S N9530 บนตัวมีดกลึงปอก รุ่น DTR BCSR202-K17



ก) เครื่องกลึงอัตโนมัติที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น HAAS รุ่น TL1 ข) เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS1
รูปที่ 1 เครื่องกลึงอัตโนมัติและเครื่องวัดความหยาบผิวที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลอง

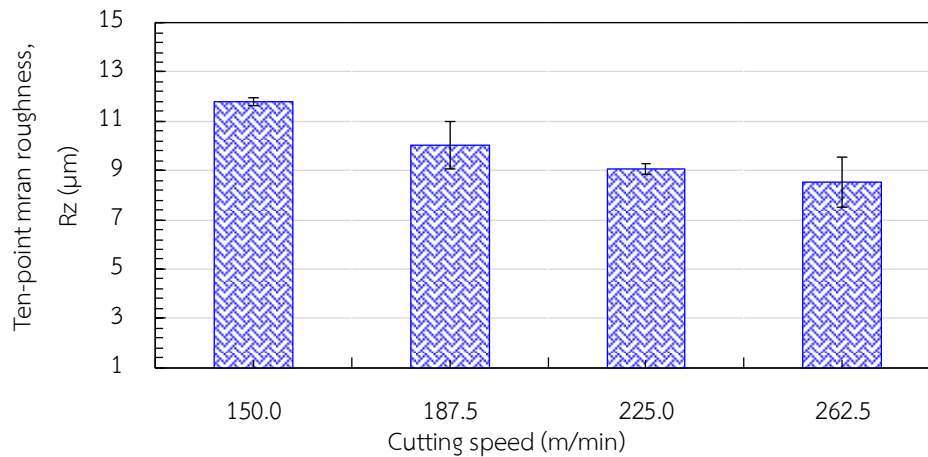
พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลอง	รายละเอียด
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	150.0, 187.5, 225.0, 262.5
อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.20, 0.25, 0.30
ความลึกการตัด (มิลลิเมตร)	0.5, 1.0, 1.2
เม็ดมีดกลึงปอก (Tungaloy)	TNMG 160402R-S N9530
ตัวมีดกลึงปอก (Tungaloy)	DTR BCSR202-K17

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานจะทำการทดลองและวัดความหยาบผิวซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่สอดคล้องของควบคุมสถานะแวดล้อมในการทดลองทางคณะผู้วิจัยได้ทำการกลึงปรับสภาพพื้นผิววัสดุชิ้นงานก่อนการกลึงเพื่อประเมินลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยเม็ดมีดใหม่สำหรับการทดลองในแต่ละเงื่อนไข

3.1 ความเร็วในการตัด (Cutting speed)

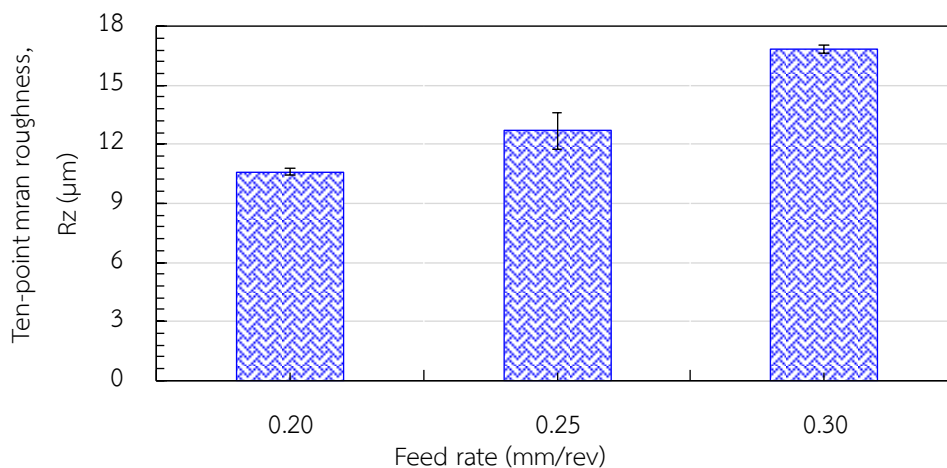
การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียมโดยการปรับพารามิเตอร์ความเร็วในการตัด 150.0, 187.5, 225.0 และ 262.5 เมตรต่อนาที ซึ่งคงที่อัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตร และความลึกของการตัด 0.5 มิลลิเมตร ทั้งนี้ในการทดลองจะทำการแปรผันความเร็วในการหมุนของเพลาหัวเครื่องเพื่อคงที่ความเร็วในการตัด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความหยาบผิวเฉลี่ยสปีซ (Rz) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วตัดเพิ่มมากขึ้น โดยแสดงค่าความหยาบผิวแบบสปีซอยู่ที่ระดับ 11.789, 10.040, 9.062 และ 8.532 ตามลำดับ โดยการลดลงของความหยาบผิวเฉลี่ยอาจเกิดจากความเร็วตัดที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนเป็นเหตุให้แรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดลดลง



รูปที่ 2 ผลการทดลองปรับความเร็วตัด (Cutting speed) ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz)

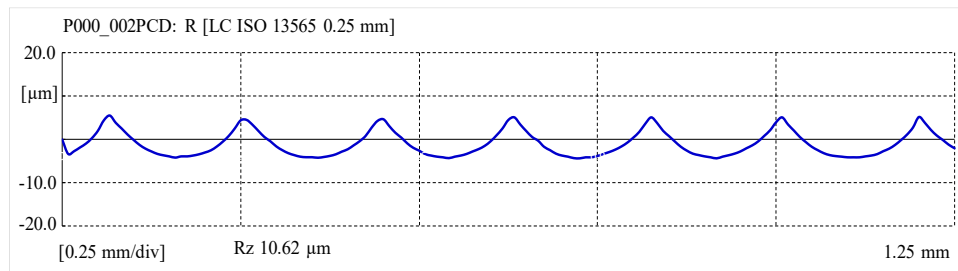
3.2 อัตราป้อน (Feed rate)

การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียมโดยการปรับพารามิเตอร์อัตราป้อน 0.20, 0.25 และ 0.30 มิลลิเมตรต่อรอบ โดยมีการคงที่ความเร็วตัด 150.0 เมตรนาที และความลึกของการตัด 0.5 มิลลิเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 ทั้งนี้ ความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Rz) จะเพิ่มขึ้นตามอัตราป้อน

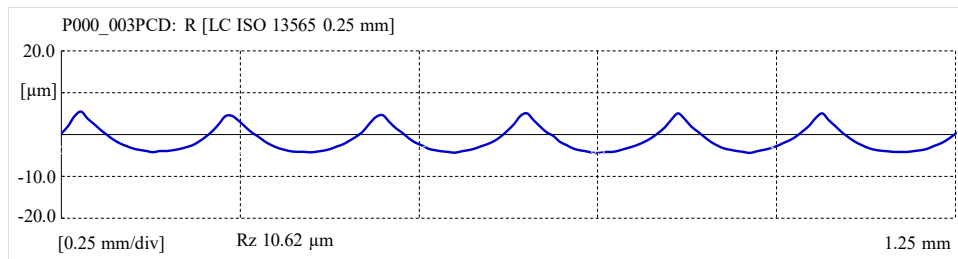


รูปที่ 3 ผลการทดลองปรับอัตราป้อน (Feed rate) ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz)

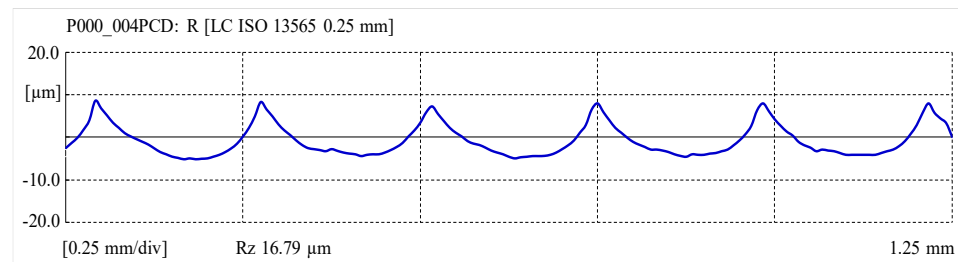
การเพิ่มขึ้นของความหยาบผิวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราป้อนเป็นผลมาจาก การเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนต่อรอบ หมายถึงการเพิ่มความหนาของเศษชิ้นงานก่อนการตัด (Uncut chip thickness) เปรียบเสมือนการสร้างระยะห่างสำหรับการเดินตัดของขอบคมตัดซึ่งจะประกบกับพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 ก), 4 ข) และ 4 ค) สำหรับอัตราป้อน 0.20, 0.25 และ 0.30 มิลลิเมตรต่อรอบ ตามลำดับ ทั้งนี้ในการทดลองนี้เลือกใช้เม็ดมีดที่มีรัศมีปลายมีด 0.4 มิลลิเมตร นั้นหมายถึงของคมตัดจะเกิดการเคลื่อนที่ตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานโดยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์ของรัศมีปลายมีดซึ่งลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ปรากฏจะอยู่ในบริเวณการเสียรูปในตำแหน่งที่สาม (Tertiary deformation zone)



ก) อัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ



ข) อัตราป้อน 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ

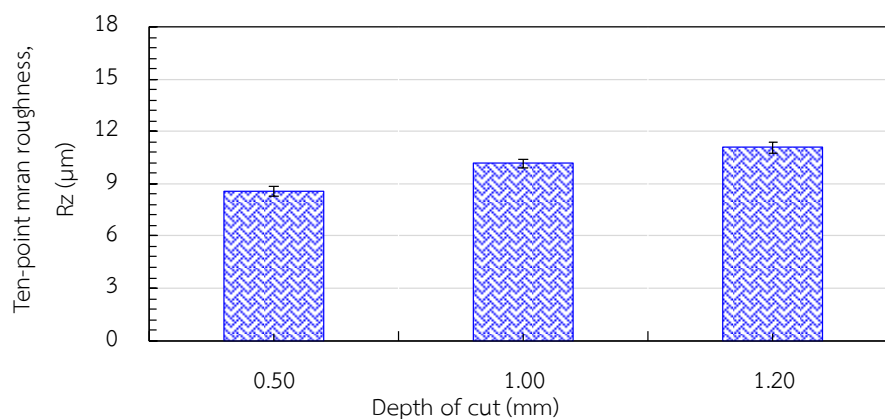


ค) อัตราป้อน 0.30 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ปรากฏจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว

3.3 ความลึกในการตัด (Depth of cut)

การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียมโดยการปรับความลึกในการตัด 0.50, 10.00 และ 1.20 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการความเร็วตัด 150.0 เมตรนาที และอัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการทดลองปรับความลึกในการตัด (Depth of cut) ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz)

จากรูปจะเห็นได้ว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยแบบลิบจุด (Rz) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึกในการตัด โดยค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามความลึกการตัดเป็น 8.567, 10.156 และ 11.086 ไมโครเมตร ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความหยาบผิวชิ้นงานเนื่องจากความเร็วตัดเป็นผลมาจากการกระโดดจากการจัดเนื้องานที่สูงขึ้นอาจทำให้ต้องใช้แรงที่ใช้ในการตัดเฉือนสูงอาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและการพอกผิวของเครื่องมือคมตัดซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงาน

4. สรุป

การทดลองปรับพารามิเตอร์สำหรับการกลึงวัสดุไทเทเนียมเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ภายหลังการกลึงปอก สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้ การประเมินความหยาบผิวเฉลี่ยแบบลิบจุด (Rz) แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบพื้นผิวมีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วง 11.789 ถึง 8.532 ไมโครเมตร เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจาก 150.0 เป็น 262.5 เมตรต่อนาที ในขณะที่ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานมีคุณภาพเพิ่มสูงขึ้นภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อนและความลึกการตัดที่ต่ำ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของความหยาบพื้นผิววัสดุชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากเมื่อมีการปรับค่าอัตราป้อนเนื่องจากอัตราป้อนต่อรอบมามากขึ้นเป็นการเพิ่มระยะทางในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือคมตัดในแต่ละรอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นการเพิ่มความหนาของเศษก่อนการตัด นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความลึกการตัดยังเป็นการสนับสนุนให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นซึ่งอาจการจากภาระโหนดในการตัดและการเกิดการพอกตัวของวัสดุชิ้นงานในบริเวณพื้นผิวขอบคมตัดของเม็ดมีด ทั้งนี้การตรวจสอบภาระแรงและการเกิดการพอกตัวของวัสดุชิ้นงานบนขอบคมตัดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงาน รวมทั้งการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการกลึงวัสดุไทเทเนียมเป็นหัวข้อที่ทางคณะผู้วิจัยให้ความสนใจสำหรับการศึกษาในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการสำหรับการทดลองในการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J. Lissaman, and S.J. Martin, Principles of Engineering Production, London, The English Universities Press LTD, 1964.
- [2] K. Jamkamon, "The effect of laser assisting for milling process of difficult-to-cut materials," D.Eng. dissertation, Dept. Graduate school of engineering. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima, Japan, 2019.
- [3] พิษญา พิศสุวรรณ, ปยวิทย์ สุวรรณ, ณัฐวิช ลิ้มสิริสกุล, และ อานาจ ชิวเมธาพันธ์, "ปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกอะลูมิเนียมเกรด 2024," วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, ฉบับที่ 4, 2022, pp. 184–191.
- [4] จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, และชาตรี หอมเขียว, "การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียวโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองและการสีกหระของเม็ดมีด," วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, ฉบับที่ 2, 2021, pp. 1-10.
- [5] สัมภาษณ์ หายุดัง, วรรณรพ ชันธิรัตน์, อามินท์ หล้าวงศ์, วราภรณ์ วโรส, และไทยทัศน์ สุดสวนสี, "การปรับปรุงค่าความเรียบผิวเหล็ก ST37 ด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยใช้เทคนิค ทาคูชิ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ฉบับที่ 5, 2023, pp. 27–39.
- [6] พงศธร จันทรสุขจำเริญ, "การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 และความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง," วศ.ม. การจัดการวิศวกรรม, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2016.
- [7] P. Janmanee, C. Thanadngarn, K. Jamkamon, R. Saodaen, T. Kumnorkaew, and C. Nutnang, "An investigation of chip formation in turning of titanium for cermet inserts coated with AlCrSiTiN and TiAlSiN," Archives of Materials Science and Engineering, vol. 127 no.1, 2024, pp. 32–41.
- [8] J. Lu, X. Wang, S. Chen, X. Liao, and K. Chen, "Surface roughness prediction for turning based on the corrected subsection theoretical model," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 124, no. 1, 2023, pp. 21-35.

- [9] J. Jia, L. Ma, Y. Sun, D. Li, W. Liu, Z. Han, and M. Li, "Study on the surface formation mechanism and theoretical model of brittle surface roughness in turning machinable ceramics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, no.7, 2024, pp. 3877-3889.