การศึกษาแรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการตัดอลูมิเนียมหล่อ

นายเศรษฐ์ อุดมบุญญานุภาพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

STUDY OFULTRASONIC VIBRATION ASSISTED MILLING OF CASTED ALUMINUM

Sed Udomboonyanupap

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Manufacturing Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การศึกษาแรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการตัดอลูมิเนียมหล่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)
ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.วรรณวนัช บุ่งสุด)
กรรมการ

(ผศ. ดร.กัญชลา สุดตาชาติ)
กรรมการ

(อ. ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)
กรรมการ

(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เศรษฐ์ อุดมบุญญานุภาพ : การศึกษาแรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการตัดอลูมิเนียมหล่อ (STUDY OF ULTRASONIC VIBRATION ASSISTED MILLING OF CASTED ALUMINUM) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, 168 หน้า

การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดได้รับการพิสูจน์ทราบว่าสามารถช่วยในการปรับปรุงลักษณะเฉพาะในการขึ้นรูปหลายๆ ด้าน เช่น แรงในการตัดเฉือน คุณภาพความหยาบผิวของชิ้นงาน อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดและความถูกต้องเที่ยงตรงของขนาด อย่างไรก็ตาม จำนวนงานวิจัยในด้านนี้ยังมีอยู่ไม่มากและส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในการขึ้นรูปวัสดุประเภทแข็งเปราะ ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ขยายขอบเขตการศึกษาประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อเกรด A356 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติอ่อนเหนียว โดยสร้างการสั่นสะเทือนความถี่ 19.74 กิโลเฮิรตซ์ ขนาดแอมพลิจูด 12 ไมโครเมตรส่งผ่านให้กับชิ้นงานในทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ full factorial design โดยกำหนดความเร็วรอบ 3,000 5,000 และ 7,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 100 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที งานกัดถูกทำขึ้นภายใต้เครื่องกัดซีเอ็นซีและดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร กัดแบบร่องโดยปราศจากการหล่อเย็น จากนั้นเปรียบเทียบแรงตัดแนวระนาบในแต่ละรอบของการหมุนตัด ความหยาบผิว ความแข็งผิวและลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน

ผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยแรงตัดในแนวระนาบของการประยุกต์การสั่นสะทือนอัลตร้าโซนิคมีค่าสูงกว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไปเมื่ออัตราป้อนต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงตัดในแนวระนาบของการใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีค่าน้อยกว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไปถึงร้อยละ 7 ลักษณะพื้นผิวงานหลังประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีความแตกต่างจากการกัดแบบทั่วไปเนื่องจากข้อบกพร่องของผิวชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงจากการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปของคมตัดที่กระทำต่อชิ้นงาน เมื่อกัดที่อัตราป้อนสูง ความเร็วรอบต่ำ การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคสามารถปรับปรุงค่าความหยาบผิวและความแข็งผิวของชิ้นงานได้ดีขึ้นร้อยละ 9.7 และ 12 ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถหาสมการพยากรณ์โดยวิเคราะห์การถดถอยในการประมาณค่าความหยาบผิวและความแข็งผิวที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยซึ่งระบุจากการทดลองยืนยันผล

ผลจากการศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบว่า การประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดวัสดุอะลูมิเนียม A356 ส่งผลให้เกิดผลกระทบทั้งเชิงบวกและเชิงลบต่อค่าเฉลี่ยแรงตัดในแนวระนาบ ค่าความหยาบผิวและค่าความแข็งผิวโดยขึ้นอยู่กับระดับอัตราป้อนและความเร็วรอบ การประยุกต์ใช้

การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อพื้นผิวและความแตกต่างจากกระบวนการกัดแบบทั่วไปอย่างชัดเจน

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2561 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SED UDOMBOONYANUPAP : STUDY OF ULTRASONIC VIBRATION ASSISTED MILLING OF CASTED ALUMINUM. THESIS ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG, D.Eng, 168 PP.

ULTRASONIC VIBRATION-ASSISTED MILLING/CUTTING FORCE/SURFACE ROUGHNESS/SURFACE MICROHARDNESS

Ultrasonic vibration-assisted milling (UAM) has been proven to improve machining characteristic such as cutting force, surface roughness quality, cutting tool life and dimension accuracy. However, a number of research studies in the field of UAM are very small and mainly focused on hard-brittle material machining processes. Accordingly, to expand UAM research into a wider variety of materials, a study of the influence of UAM on a ductile material, A356 Cast aluminum is presented in this research. In the experiment, ultrasonic vibration 19.74 kHz with an amplitude of 12 µm was applied to the workpiece along cutting feed direction. Full factorial design technique was applied to the experiment. The spindle speed was set at 3,000, 5,000 and 7,000 RPM. The feed rate was set at 50 100 200 300 and 400 millimeters per minute. In addition, CNC machining center and carbide end mill with a diameter of 6 millimeters were used for slot milling under dry cutting condition. Characteristic of cutting force magnitude in end mill revolution, surface roughness, surface hardness, and surface topography were compared between UAM and conventional milling (CM).

Experimental results showed that the average horizontal forces in cutting direction of UAM were higher than CM at small feed rate value, while the larger feed rate value, decreasing of cutting force by 7 % was observed. UAM surface

topography was different when comparing to CM because of ultrasonic vibration assistance made cutting blade movement change and contribute less surface defect. When using UAM at a high feed rate, surface roughness and surface hardness were improved by 9.7% and 12% respectively. Besides, the linearand quadratic regression analyses were applied to predict the experimental results with acceptable error value.

It was concluded that UAM application on A356 Cast aluminum material has both a positive and adverse effect on cutting force, surface roughness and surface hardness depending on level of spindle speed and feed rate. Surface topography change by UAM was noticeable.

School of Manufacturing Engineering Student's Signature

Academic Year 2018 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิดที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูส่งเสียให้ได้รับการศึกษาตลอดมา พร้องทั้งได้อบรมสั่งสอนแนวความคิดและการปฏิบัติตน ทำให้ผู้วิจัยได้ประสบผลสำเร็จในวันนี้ได้ รวมถึงหลาย ๆ กำลังใจจากญาติพี่น้อง เพื่อนร่วมงานครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจอย่างยิ่ง อีกทั้งผู้ที่เกียวข้องกับการวิจัยทุกๆท่านที่มิได้เอ่ยนาม ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้ความรู้คำแนะนำ ปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ อาจารย์ผู้เชียวชาญพิเศษจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้โอกาส แนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ คณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและทุกท่าน ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับการดำเนินการศึกษาและวิจัย

ขอขอบคุณ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้ามาศึกษา รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยจนสำเร็จได้ในวันนี้

เศรษฐ์ อุดมบุญญานุภาพ

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NC	=	Numerical control
n	=	ความเร็วรอบของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที)
V	=	ความเร็วตัดของเครื่องมือตัด (เมตร/นาที)
D	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด (มิลลิเมตร)
f	=	อัตราป้อน (มิลลิเมตร/นาที)
Z	=	จำนวนฟันของมีดกัด
Fz	=	อัตราป้อนต่อฟัน (มิลลิเมตร/ฟัน)
α	=	มุมคาย
Ø	=	มุมเฉือน
r	=	อัตราส่วนความหนาของเศษตัด
t_0	=	ความหนาในการตัด
t_c	=	ความหนาของเศษตัดหลังการตัดเฉือน
l_s	=	เป็นความยาวของระนาบเฉือน
γ	=	ความเครียดเฉือน
□	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
F	=	แรงเสียดทาน
N	=	แรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส
Fs	=	แรงเฉือน
Fn	=	แรงตั้งฉากกับแรงเฉือน
Fc	=	แรงตัด
Ft	=	ตามแนวเส้นรอบวง
β	=	มุมเสียดทาน
τ	=	ความเครียดเฉือน
w	=	ความกว้างของการตัด
As	=	พื้นที่ของระนาบเฉือน
Ra	=	ค่าความหยาบผิว
HV	=	Vicker hardness

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

EDM	=	Electrical Discharge Machining
VAM	=	Vibration Assisted Machining
CT	=	Conventional Turning
HCT	=	Hot Conventional Turning
HUAT	=	Hot Ultrasonic Assisted Turning
A	=	Amplitude
HAZ	=	Heat Effected Zone
DOE	=	Design of Experiment
ANOVA	=	Analysis of variance
FFT	=	Fast Fourier Transform
μm	=	Micrometer หรือ micron (1 micron = 1×10^{-6} m)
Mc	=	Milling Condition
CM	=	Conventional Milling
UAM	=	Ultrasonic Assisted Milling
SEM	=	Scanning Electron Microscope
Fx	=	แรงตัดในทิศทางแกน X
Fy	=	แรงตัดในทิศทางแกน Y

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในหลายปีที่ผ่านมา การพัฒนาความเที่ยงตรงในการตัดโลหะนั้นไม่ได้ให้ความสำคัญกับผิวสำเร็จที่ต้องการเพียงอย่างเดียว แต่ยังคำนึงถึงลักษณะของการนำไปใช้งานของชิ้นงานเช่น ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบออดิโอและอิเล็คทรอนิกส์ที่มีมากขึ้นชิ้นงานต้องการความละเอียดระดับไมโครเมตรและมีความซับซ้อนของรูปร่างมากขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นความต้องการในการขึ้นรูปที่มีความเที่ยงตรงสูงมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น(Liu and Cheng,2005)

การสั่นสะเทือนช่วยในการขึ้นรูปได้เริ่มเกิดขึ้นเมื่อก่อน ค.ศ. 1950 และกลายมาเป็นที่ยอมรับและรู้จักอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการตัดโลหะในปัจจุบันนักวิจัยหลายคนได้พัฒนาการออกแบบหลากหลายวิธีเพื่อการประยุกต์ใช้ที่เหมาะสม อาทิเช่น การใช้การสั่นสะเทือนเข้ามาช่วยในการตัดวัสดุแข็งเปราะซึ่งปัจจุบันกลายมาเป็นที่นิยมอย่างมาก ในขณะอุตสาหกรรมที่ทำการผลิตชิ้นส่วนเลนส์หรืออุปกรณ์เกี่ยวกับสายตา การใช้การสั่นสะเทือนช่วยในขึ้นรูปสามารถช่วยให้การตัดชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูงและแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดเฉือนมีค่าน้อย ดังจะเห็นได้ว่า ความต้องการในการลดอัตราการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน การสะดุดของเครื่องมือตัดเนื่องจากเศษวัสดุ การสะสมของเศษวัสดุที่ปลายคมตัด(Build-up-edge;BUE) และการเกิดเศษเสี้ยนที่หลงเหลือบนผิวชิ้นงานสิ่งเหล่านี้กลายมาเป็นความท้าทายที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดมากขึ้น(Isaev et al., 1961)

นักวิจัยหลายคนทำการขึ้นรูปวัสดุแข็งเปราะ เช่น แก้ว เซรามิก เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าผสม เพื่อศึกษาผิวสำเร็จของการขึ้นรูปโดยประยุกต์การสั่นสะเทือนในการตัดเฉือนในแต่ละรูปแบบที่แตกต่างกัน แต่กระนั้นการขึ้นรูปด้วยการสั่นสะเทือนยังไม่สามารถตัดเฉือนวัสดุแข็งและเปราะได้ดี เนื่องจากเกิดการสึกหรอที่สูงแม้จะใช้เครื่องมือคมตัดเพชร สาเหตุเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุ (Bonifacio et al., 1994) นอกเหนือจากนี้Matsumura (2005) ได้ทำการพัฒนาเครื่องกัดโดยใช้เอ็นมิลล์ขนาดเล็กเพื่อทำการขึ้นรูปวัสดุแก้ว แต่กระนั้น กระบวนการยังไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตที่มีปริมาณสูง เนื่องจากปัญหาของออกแบบเครื่องมือตัด ตัวจับยึดและเครื่องจักร อันส่งผลกระทบต่อการสึกหรอ มุมตัดเฉือน และรูปทรงของเครื่องมือตัด จากปรากฏการณ์เหล่านี้ นักวิจัยจึงได้พยายามหาหนทางที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การประยุกต์การ

สั่นสะเทือนที่มีความถี่อัลตร้าโซนิค รวมจนถึงการพัฒนาออกแบบเครื่องมือตัดและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพที่เหนือกว่าการตัดเฉือนแบบทั่วไป

การพัฒนาปรับปรุงการสั่นสะเทือนในการขึ้นรูปนั้นได้พัฒนามาอย่างต่อเนื่องและประสบความสำเร็จในการขึ้นรูปวัสดุแข็งเปราะเป็นอย่างแพร่หลาย แต่ในขณะเดียวกันจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การประยุกต์การสั่นสะเทือนในการขึ้นรูปวัสดุอ่อนเหนียวมีจำนวนน้อยและยังไม่เพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับความหลากหลายของวัสดุ ในทางตรงกันข้าม การใช้งานและขึ้นรูปวัสดุประเภทอ่อนเหนีวนั้นมีความต้องการมากขึ้นในหลายๆอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ โมล ดายน์ และในอุตสาหกรรมที่คำนึงถึงน้ำหนักของชิ้นงานเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้น การศึกษาวิจัยกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการขึ้นรูปวัสดุอ่อนเหนียว จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยเพิ่มขอบเขตของการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวางด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาการประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการตัดอลูมิเนียมหล่อ เพื่อเข้าใจลักษณะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด รวมจนถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ซึ่งจะนำไปสู่การใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคและปัจจัยร่วมที่มีต่อคุณลักษณะของผิว

2) เพื่อเปรียบเทียบความหยาบผิวและความแข็งผิวที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปวัสดุโดยการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคและการขึ้นรูปแบบทั่วไป

3) เพื่อหาสมการพยากรณ์ค่าความหยาบผิวและความแข็งผิวโดยมีการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคเป็นปัจจัยร่วมในการตัดเฉือนและยืนยันผลการทดลอง

4) เพื่อเปรียบเทียบแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่มีการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคและการขึ้นรูปแบบทั่วไป

1.3 ขอบเขตการวิจัย

องค์ประกอบและโครงสร้างของวิทยานิพนธ์นี้ได้ถูกวางแผนดังต่อไปนี้

1) งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัด ที่มีขอบเขตของพารามิเตอร์อยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

1.1)อัตราป้อน50 200และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที

1.2)ความลึกในการตัดปาดผิว 1 มิลลิเมตร

1.3) ความเร็วรอบ3000 5000 และ 7000 รอบต่อนาที

1.4)การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค 19กิโลเฮิรตซ์ และแอมพลิจูด 12ไมโครเมตร

1.5)ดอกกัดชนิดเอ็นมีลคาร์ไบด์สองคมตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6มิลลิเมตร

1.6)ชิ้นงานทดลอง วัสดุอลูมิเนียมหล่อ A356

1.7)การทดลองกระทำโดยปราศจากสารหล่อเย็น

2) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคที่ให้กับชิ้นงานและการสั่นสะเทือนมีทิศทางเดียวกับทิศการป้อนกัดเพียงทิศทางเดียวโดยทำการจำลองในการเดินตามแนวเส้นตรง

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1) สืบค้นวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคและการขึ้นรูปด้วยการกัด
3) วางแผนออกแบบชุดทดลองและกำหนดขอบเขตการทดลอง
4) การเตรียมอุปกรณ์วัสดุและติดตั้ง
5) ออกแบบแผนการทดลอง
6) ดำเนินการทดลองและการตรวจวัด
   - ทดสอบระบบกำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค
   - ทดลองตามแบบการทดลองแฟคทอเรียล
   - ตรวจวัดแรงตัด
   - ตรวจวัดความหยาบผิว
   - ตรวจวัดความแข็งผิว
7) วิเคราะห์ผลการทดลองและหาสมการพยากรณ์
8) การประเมินผล

- ประเมินความคลาดเคลื่อนผลการพยากรณ์ทางสมการและผลการทดลองจริงในระบบที่มีการใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคใช้ในกระบวนการกัด

- ประเมินร้อยละของแรงตัดในกระบวนการกัดที่มีการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการกัดแบบทั่วไป

- ประเมินร้อยละการปรับปรุงค่าความหยาบผิวและความแข็งชิ้นงานจากการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคแทนที่กระบวนการกัดแบบทั่วไป

9) วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

10) เผยแพร่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1) อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 6มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) อาคารศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์รังสิต

3) บริษัท เอชจีเอสที ประเทศไทย จำกัด

1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1) เครื่องมือสำหรับการทดลอง

-ชิ้นงานอลูมิเนียมหล่อA356 ขนาด10 x 50 x 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว x ความสูง)

- เครื่องกัดซีเอ็นซี

- ดอกกัดคาร์ไบด์ชนิดสองฟันตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6มิลลิเมตร

- เครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค

- เครื่องวัดความถี่และแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

2) เครื่องมือสำหรับสนับสนุนวิเคราะห์ผล

- เครื่องวัดความหยาบผิว

- เครื่องวัดความแข็งผิว

- เครื่องวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์

- กล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัด

2) เข้าใจถึงผลกระทบของการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในกระบวนการกัดขึ้นรูป

3) สามารถพยากรณ์ค่าความหยาบผิวและความแข็งผิวจากการกำหนดพารามิเตอร์ในกระบวนการกัดที่ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวโดยสรุปเกี่ยวกับการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาตำรา เอกสาร วารสาร และงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับการขึ้นรูปวัสดุด้วยกระบวนการกัด ลักษณะของแรงในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้น หลักการณ์ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการขึ้นรูป ความหยาบของผิวงานความแข็งผิว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการออกแบบการทดลอง

2.1 การขึ้นรูปวัสดุด้วยการกัด (Milling)

การกัดหมายถึงกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (Cutting tool) ที่มีคมตัดในการขจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงาน โดยให้วัสดุส่วนที่เหลือมีขนาดและรูปร่างตามต้องการ ในขณะที่แกนหมุนของเครื่องมือตัดนั้นจะมีลักษณะตั้งฉากหรือขนานไปกับทิศทางของการป้อน

การกัดนั้นจะมีการเคลื่อนที่คมตัดเข้าไปในเนื้อวัสดุและเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ตัดปาดผิวในแต่ละรอบการหมุน การเคลื่อนที่ของคมตัดในแต่ละครั้งทำให้เกิดแรงกระแทกและการสั่นสะเทือนในทุกๆรอบของการหมุน วัสดุและรูปทรงทางด้านเรขาคณิตของคมตัดจะถูกออกแบบเพื่อรองรับสภาวะเหล่านี้ ประเภทของกระบวนการกัดสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 ประเภทของกระบวนการกัดตามแกนหมุน

1) การกัดในแนวนอน (Peripheral Milling)

การกัดในแนวนอนแกนของดอกกัดขนานกับผิวที่ทำการตัดเฉือนดอกกัดจะหมุนอยู่กับที่และชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าหาคมตัดการตัดปาดผิววัสดุจะถูกกระทำด้วยปลายคมตัดที่อยู่ส่วนนอกของแนวเส้นรอบวงของดอกกัด ประเภทของการกัดในแนวนอน แสดงในรูปที่ 2.1 สามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

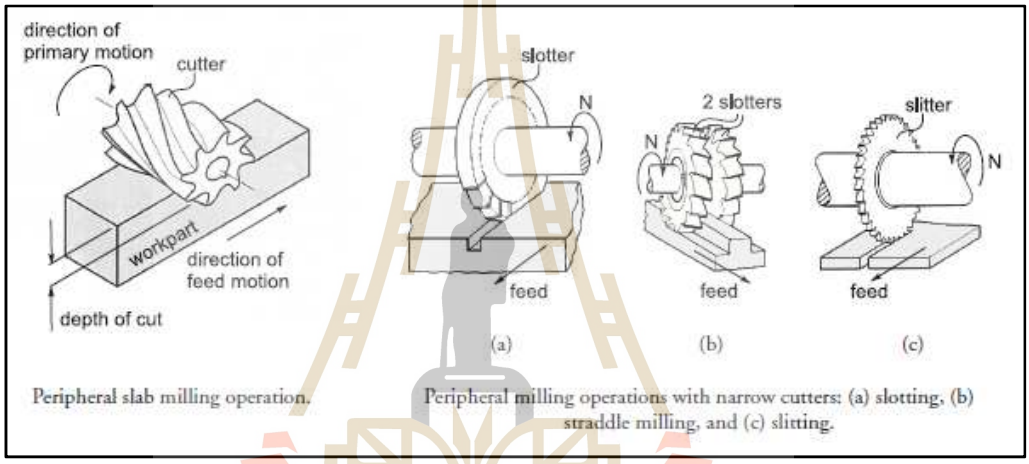
1.1) การกัดแบบเต็มหน้า (Slab milling)คือพื้นฐานในการกัดแนวนอนโดยทั่วไป ความกว้างของดอกกัดนั้นมีขนาดกว้างกว่าความกว้างของชิ้นงาน

1.2) การกัดแบบเซาะร่อง (Slotting)คือการกัดโดยความกว้างของเครื่องมือตัดเล็กกว่าความกว้างของชิ้นงาน โดยร่องจะเกิดบนชิ้นงานและมีขนาดเท่ากับความกว้างดอกกัด

คมตัดจะอยู่ที่บริเวณปลายเส้นรอบวงและด้านข้างของผิวดอกกัดเมื่อดอกกัดได้ทำการตัดเฉือนในบริเวณเพียงด้านใดด้านหนึ่งของชิ้นงาน จะเรียกกระบวนการกัดนี้ว่าการกัดข้าง (Side milling)

1.3) การกัดแบบคร่อม (Straddle milling)คือการตัดเฉือนที่มีลักษณะคล้ายกับการกัดข้าง (Side milling) แต่จะมีคมตัดคู่ทำการตัดเฉือนทั้งสองด้านของชิ้นงานโดยคร่อมบนชิ้นงาน

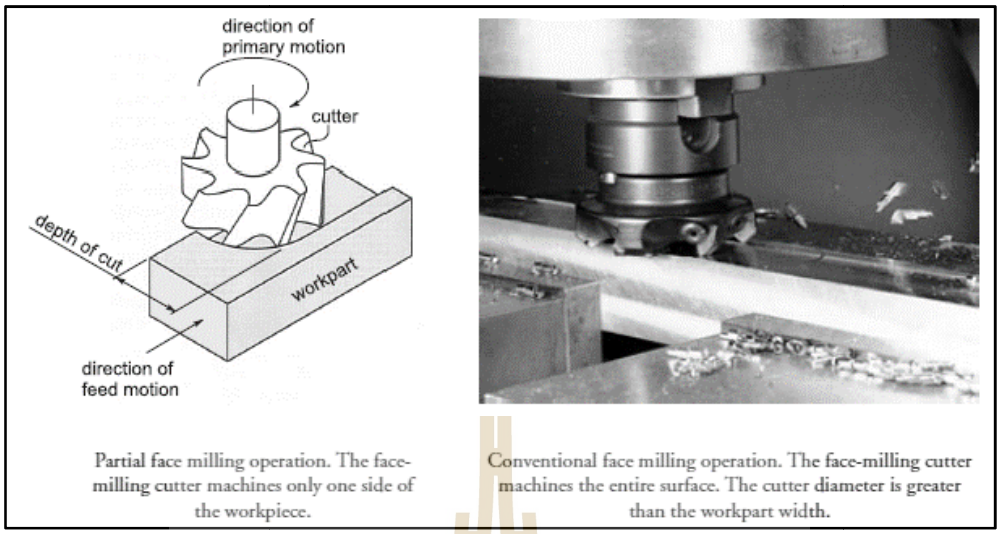
1.4) การกัดแบบตัดขาด (Slitting milling)คือการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องมือตัดแบบเซาะร่อง(Slotter) โดยที่ดอกกัดจะไม่มีคมตัดด้านข้าง ชิ้นงานมักจะความหนาไม่มากนัก



รูปที่ 2.1 ลักษณะงานกัดแนวนอนแต่ละประเภท(Valery Marinov, ManufacturingTechnology)

2) การกัดหน้าเรียบ(Face milling)

เป็นการกัดที่มีแกนหมุนของเครื่องมือตัดตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การตัดเฉือนจะเกิดขึ้นทั้งคมตัดที่อยู่แนวเส้นรอบวงและผิวหน้าชิ้นงาน การเลือกประเภทการกัดสวนหรือกัดตามสามารถกำหนดได้โดยขึ้นอยู่กับทิศทางของการป้อน การหมุนของคมตัดและอัตราการป้อนการกัดในแกนตั้งนั้นมักจะใช้ในงานกัดหยาบและชิ้นงานที่มีพื้นที่กว้าง ผิวสำเร็จจากการกัดหน้าเรียบนั้นมักจะมีความหยาบผิวที่มีค่ามากกว่าการกัดในแนวนอนและหลงเหลือร่องรอยที่เกิดจากการป้อนตัดซึ่งหลีกเลี่ยงได้ยาก ข้อดีของการกัดหน้าเรียบ คือมีอัตราการกินเนื้อวัสดุที่มากเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของคมตัดมีขนาดใหญ่และมีอัตราการคายเศษที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะงานกัดหน้าเรียบ (Valery Marinov, Manufacturing Technology)

3) การกัดเอ็นด์มิลลิ่ง (End milling)

คือการกัดที่ใช้เครื่องมือตัดที่เรียกว่า เอ็นด์มิลล์(End mill) ใช้สำหรับการกัดในแนวแกนตั้งดอกเอ็นด์มิลล์โดยส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าความกว้างของชิ้นงานที่ต้องการทำการกัด กระบวนการตัดเฉือนจะใช้คมตัดที่อยู่ปลายและคมตัดด้านข้างเคลื่อนที่เพื่อให้เกิดรูปร่างชิ้นงานตามต้องการ มักใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

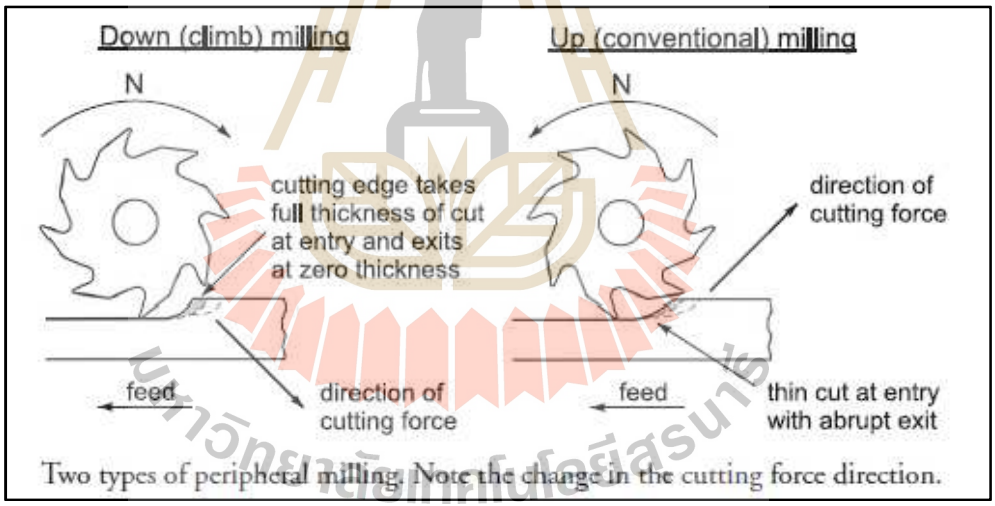
รูปที่ 2.3 ลักษณะงานกัดเอ็นด์มิลลิ่ง (Valery Marinov, Manufacturing Technology)

2.1.2) ประเภทกระบวนการกัดตามทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

1) การกัดตาม (Down milling (Climb)) ดอกกัดหมุนในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของการป้อนชิ้นงาน การตัดเฉือนเนื้อวัสดุมีลักษณะเริ่มจากหนาไปบางแรงตัดที่เกิดขึ้นมีทิศทางกระทำต่อโต๊ะงานหรือรางเลื่อนของเครื่องกัดในลักษณะกระแทกความเค้นเกิดที่คมตัดเกิดขึ้นสูง ส่งผลให้เครื่องมือตัดมีอายุการใช้งานที่สั้น แต่กระนั้นการกัดตามส่งผลให้ผิวของชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพที่ดี

2) การกัดสวน (Up milling (conventional)) ดอกกัดหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการป้อนของชิ้นงานการตัดเฉือนเนื้อวัสดุมีลักษณะบางไปหนา ชิ้นงานถูกแรงตัดเฉือนยกชิ้นงานตลอดจึงต้องใช้แรงจับยึดชิ้นงานที่สูง อายุการใช้งานของคมตัดนั้นยาวนานกว่าการกัดตาม แต่เนื่องจากการเริ่มต้นการตัดเฉือนโดยการกระแทกของคมตัดความเรียบผิวที่ได้นั้นจึงมีลักษณะเป็นคลื่น

การกัดตามและการกัดสวนสามารถแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะการตัดเฉือนแบบตามและแบบสวน(Valery Marinov, Manufacturing Technology)

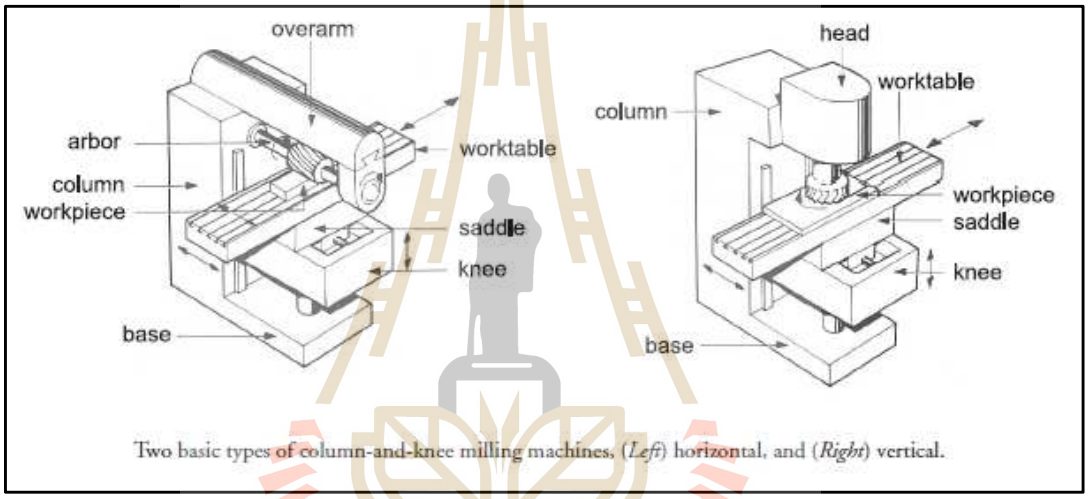
2.1.3) ประเภทของเครื่องกัด

เครื่องกัดโดยทั่วไปนั้นจะมีการหมุนของเครื่องมือตัดที่ยึดอยู่กับแกนหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ โดยมีชิ้นงานยึดกับแท่นเลื่อนของเครื่องกัดและทำการป้อนกัดในลักษณะเส้นตรงสำหรับชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ต้องใช้เครื่องกัดที่สามารถควบคุมเครื่องมือตัดให้เคลื่อนที่

ได้ตามรูปร่างลักษณะของชิ้นงานที่ออกแบบทั้งนี้ เครื่องกัดหลากหลายชนิดถูกออกแบบเพื่อรองรับความซับซ้อนของกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ โดยสามารถจำแนกลักษณะทั่วไปได้ดังต่อไปนี้

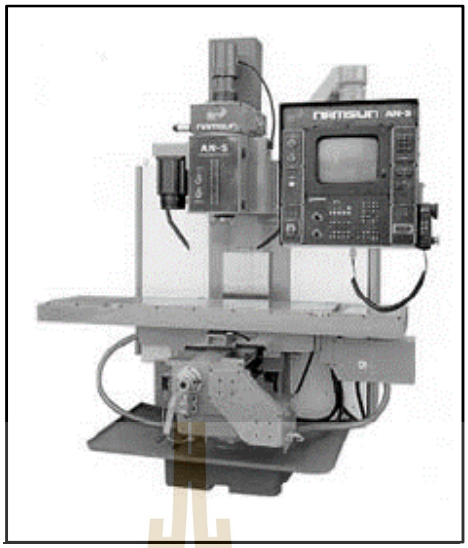
1) เครื่องกัดแท่นเลื่อน (Column-and-knee milling machines)

เครื่องกัดแท่นเลื่อนเป็นพื้นฐานของเครื่องกัดที่มีการใช้งานอยู่มากโครงสร้างเสาค้ำเพื่อรองรับแกนหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ และมีแท่นเลื่อนที่สามารถเลื่อนขึ้นลงเพื่อเคลื่อนชิ้นงานเข้าหาคมตัด โดยทั่วไปเครื่องกัดแท่นเลื่อนมีสองชนิดคือแกนหมุนของเครื่องมือตัดในแนวแกนนอนและแกนตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องกัดแท่นเลื่อนชนิดแกนนอนและแกนตั้ง(Valery Marinov, Manufacturing Technology)

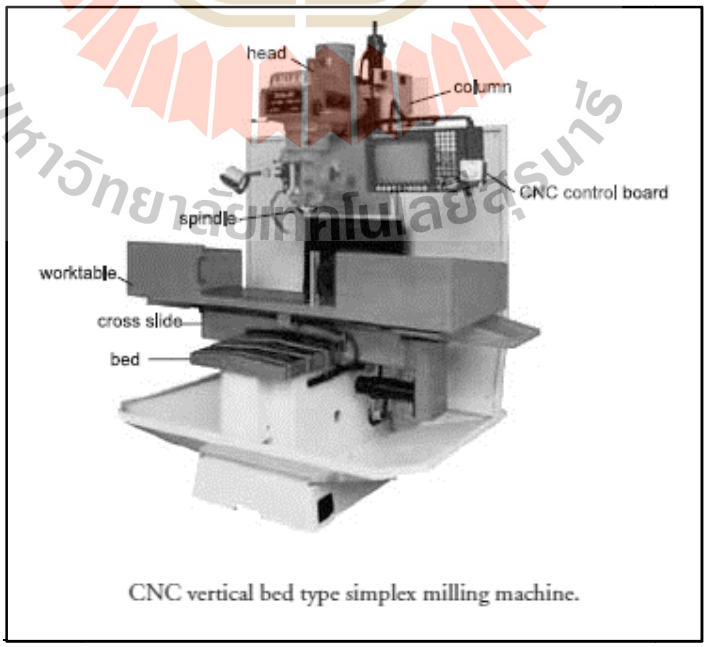
เครื่องกัดแท่นเลื่อนเป็นพื้นฐานของเครื่องจักรขึ้นรูปที่มีความยืดหยุ่นและเหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดอย่างกว้างขวางได้มีการปรับปรุงพัฒนาเพื่อการใช้งานหลายๆด้านบางชนิดสามารถที่จะปรับมุมของแท่นเครื่องได้เพื่อทำการตัดเฉือนงานในมุมต่างๆ โดยส่วนใหญ่เครื่องจักรอัตโนมัติ (NC) จะถูกออกแบบเป็นชนิดแท่นเลื่อนและใช้สำหรับงานที่มีความซับซ้อนแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องกัดแท่นเลื่อนระบบอัตโนมัติ

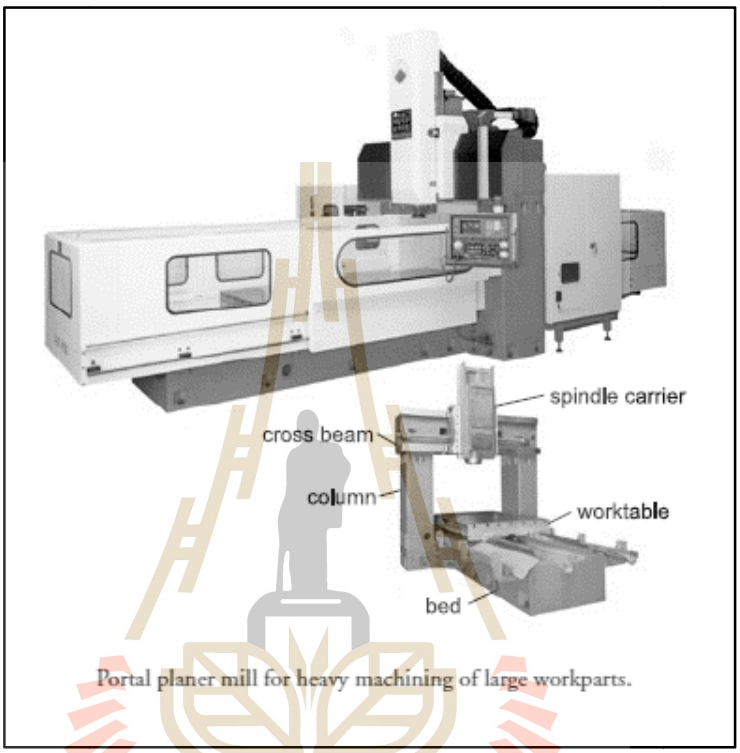
2) เครื่องกัดแบบฐานคงที่(Bed type machines)

เครื่องกัดชนิดนี้จะมีโต๊ะงานประกอบบนฐานแทนที่ชุดแท่นเลื่อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างสำหรับรองรับแรงตัดที่มีภาระโหลดสูงและประสิทธิภาพมากขึ้น เหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมากเครื่องกัดแบบฐานคงที่แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องกัดBed type ในระบบอัตโนมัติ(Valery Marinov, Manufacturing Technology)

การพัฒนาของ Bed type milling กลายมาเป็น Planer type mills ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับการขึ้นรูปงานที่มีขนาดของพื้นที่ผิวกว้าง โดยลักษณะโครงสร้างจะมีคานรองรับการเคลื่อนที่ของหัวกัดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องกัดPlaner type mills ที่พัฒนามาจาก Bed type mills(Valery Marinov, Manufacturing Technology)

3) เครื่องกัดอัตโนมัติ (Machining centers)

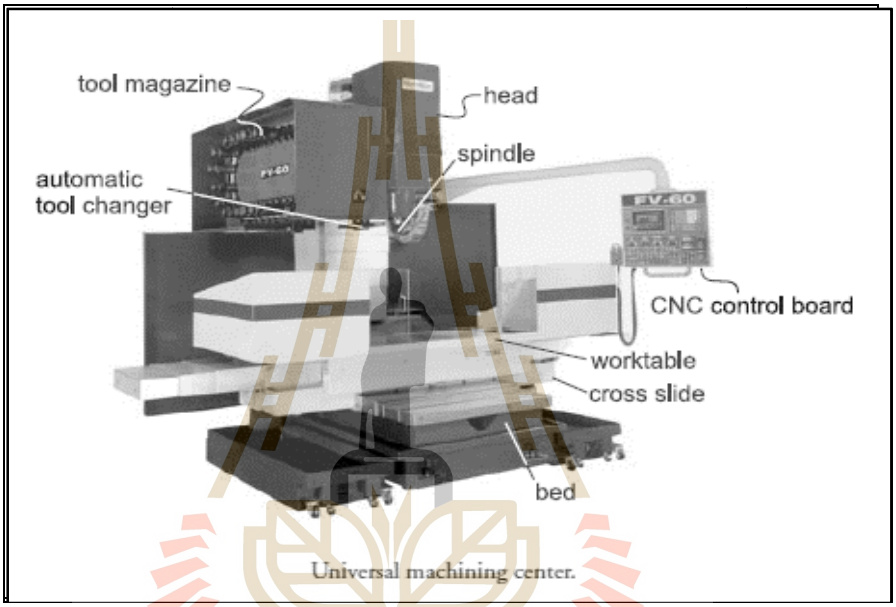
เครื่องกัดอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.9เป็นเครื่องกัดที่ควบคุมการทำงานด้วยด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control) จุดเด่นของเครื่อง Machining center ที่แตกต่างจากเครื่องกัดทั่วไปมีดังนี้

3.1) เครื่องจักรมีระบบจัดเก็บเครื่องมือตัด (Tool storage) สามารถจัดเก็บเครื่องมือตัดได้หลากหลายชนิด

3.2) เครื่องจักรสามารถเปลี่ยนเครื่องมือตัดได้เองโดยอัตโนมัติ โดยการเคลื่อนย้ายจากจุดเก็บเครื่องมือ (Tool storage) ไปเปลี่ยนที่แกนหมุนโดยการควบคุมด้วย

คอมพิวเตอร์ในบางเครื่องสามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชิ้นงานเพื่อการตัดปาดผิวทั้งสี่ด้านของชิ้นงาน

3.3) เครื่องจักรมีระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ไปในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานโดยอัตโนมัติ สามารถประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ต่างๆซึ่งสามารถทำให้เกิดการตัดเฉือนให้กับชิ้นงานได้หลายทิศทาง



รูปที่ 2.9 เครื่องกัดMachining center(Valery Marinov, Manufacturing Technology)

2.1.6 ประเภทของเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดโดยในปัจจุบันสามารถจำแนกตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 ประเภท

1) เอ็นด์มิลล์(End mil)

เป็นเครื่องมือตัดที่ใช้สำหรับเครื่องกัดเพลาตั้ง วัสดุที่ใช้ทำเอ็นด์มิลล์นั้นมีทั้งทำจากเหล็กกล้ารอบสูง (HSS) และ คาร์ไบด์ (Carbide) ในกระบวนการตัดเฉือนผิวชิ้นงานด้วยเอ็นด์มิลล์นั้นอาศัยคมตัดตรงปลายและคมตัดด้านข้าง ดอกเอ็นด์มิลล์สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้หลายลักษณะ เช่น การตัดส่วนที่เป็นเบ้าหรือร่อง การกัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและสภาวะที่มี

ความเร็วรอบสูง เนื่องจากสมบัติที่ต้านทานการเสียดสีและทนความร้อนที่ดีเอ็นมิลล์แสดงดังรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 ดอกกัดเอ็นด์มิลล์ (End mill)(Valery Marinov, Manufacturing Technology)

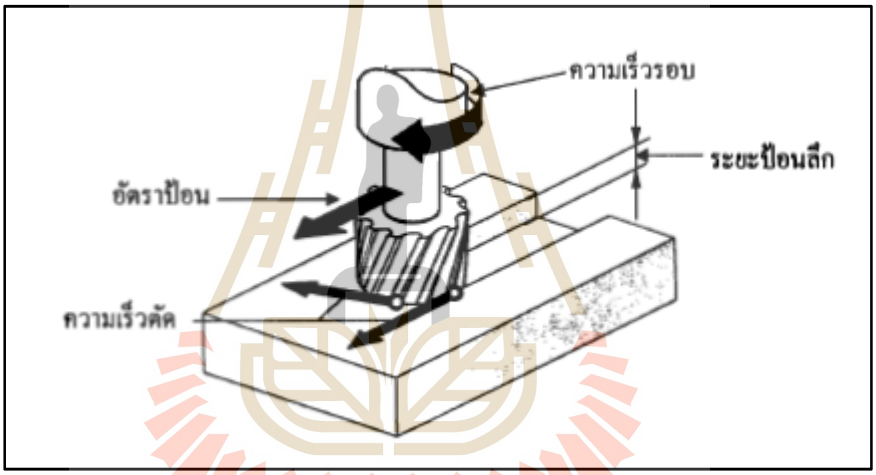
2) เฟซมิลล์ (Face mill)

เป็นเครื่องมือตัดที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานปาดผิวของชิ้นงาน เฟซมิลล์โดยส่วนมากจะใช้แบบอินเสริ์ท ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนได้ โดยเฟซมิลล์มีลักษณะและรูปทรงที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานในแต่ละรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.11

รูปที่ 2.11 ดอกกัดรูปแบบเฟซมิลล์โดยมีคมตัดคาร์ไบด์ยึดติดบริเวณปลายเครื่องมือตัด(Valery Marinov, Manufacturing Technology)

2.2) อิทธิพลที่ส่งผลต่อการตัดเฉือนโลหะ

ในการตัดเฉือนโลหะข้อมูลต่างๆที่ต้องนำมาพิจารณาคือ ความเร็วรอบ(Spindle speed) ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราการป้อน (Feed rate) ความลึกของการตัดเฉือน (Deep of cut)และเครื่องมือตัด (The cutting tool)โดยที่ค่าตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดสมรรถภาพของกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน ดังนั้น การพิจารณาเลือกค่าตัวแปร ต้องคำนึงความสามารถในการตัดเฉือนของเครื่องมือตัด กำลังม้าที่ใช้ในการขับเพลาเครื่องมือตัด ความแข่งแกร่ง (Rigidity) ของชิ้นงาน ตลอดจนสมบัติของวัสดุชิ้นงานและอุปกรณ์จับยึด(ชาลี ตระกูลการ, 2550)ข้อมูลต่างๆเหล่านี้มีส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือตัดและคุณภาพผิว ตัวแปรในกระบวนการกัดสามารถแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความเร็วรอบ ความเร็วตัด อัตราการป้อน และระยะป้อนลึก (ชาลี ตระกูลการ, 2550)

2.2.1) ความเร็วรอบ

ความเร็วรอบ (Speed) หมายถึงความเร็วรอบของมีดกัดที่หมุนได้ในเวลา 1 นาที มีหน่วยนับเป็นจำนวนรอบต่อนาที (Revolution Per Minute; RPM) การใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดยาวนานขึ้น และทำให้การตัดเฉือนชิ้นงานออกมามีคุณภาพผิวงานดี ใช้เวลาในการทำงานน้อยเนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการลับหรือเปลี่ยนมีดกัด โดยมีวิธีการคำนวณหาความเร็วรอบได้ดังนี้(Jonathan S.C., 1994)

$$n = \frac{1000\ x\ V}{\pi\ x\ D} \tag{2.1}$$

โดยที่ n= ความเร็วรอบของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที)

V= ความเร็วตัดของเครื่องมือตัด (เมตร/นาที)

D= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด (มิลลิเมตร)

2.2.2) ความเร็วตัด

ความเร็วตัด (Cutting Speed) ในกระบวนการขึ้นรูปทางกลด้วยเครื่องกัด หมายถึง ความเร็วรอบ ณ จุดที่เกิดการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดในขณะที่เครื่องมือตัดเดินตัดเฉือนชิ้นงาน ในการเลือกค่าเครื่องมือตัดนั้น ควรพิจารณาถึงองค์ประกอบดังนี้ เช่น ความสามารถในการขึ้นรูปวัสดุของชิ้นงาน วัสดุและรูปทรงทางเรขาคณิตของเครื่องมือตัด การหล่อเย็น อัตราการป้อน และความลึกของการตัดเฉือนและกำลังม้าในการขับเพลาจับยึดของเครื่องมือตัดเป็นต้น (Jonathan S.C., 1994) โดยมีการคำนวณการความเร็วได้ดังนี้

$$V = \frac{\pi x D x n}{1000} \tag{2.2}$$

โดยที่ n = ความเร็วรอบของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที)

V= ความเร็วตัดของเครื่องมือตัด (เมตร/นาที)

D= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด (มิลลิเมตร)

2.2.3) อัตราป้อน

อัตราป้อน (Feed) หมายถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของมีดตัดหรือการเคลื่อนที่ของงานต่อการหมุนของชิ้นงานหรือการหมุนของมีดตัดหนึ่งรอบ การเคลื่อนที่ของมีดตัดหรืองานจะมีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร ดังนั้น อัตราป้อนจะมีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ ถ้าป้อนกินที่ความลึกไม่มาก จะสามารถใช้อัตราป้อนได้เร็วกว่าการป้อนกินงานที่มีความลึกมาก โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (Jonathan S.C., 1994)

$$f = fz \times Z \times n \quad (2.3)$$

โดยที่ f =อัตราป้อน (มิลลิเมตร/นาที)

Z = จำนวนฟันของมีดกัด

n= ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

Fz= อัตราป้อนต่อฟัน (มิลลิเมตร/ฟัน)

ในทางปฏิบัตินั้นค่าความเร็วตัดและอัตราป้อนกัดที่เหมาะสม จะดูจากตารางคู่มือมาตรฐานซึ่งจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุชิ้นงานและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดดังแสดงในตารางที่2.1และ 2.2 (Jonathan S.C., 1994)

ตารางที่ 2.1แสดงค่าความเร็วตัดของวัสดุชนิดต่างๆ(ฟุต/นาที) (Jonathan S.C., 1994)

ชนิดของวัสดุ	ความเร็วตัด	
	มีดกัดเหล็กกล้ารอบสูง	มีดกัดคาร์ไบด์
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	90 - 120	270 - 450
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง	70 - 100	225 - 375
เหล็กกล้าคาร์บอนสูง	30 - 70	145 - 300
เหล็กหล่อ (ชนิดอ่อน)	100 - 150	325 - 500
เหล็กหล่อ (ชนิดปานกลาง)	70 - 120	225 - 400
เหล็กหล่อ (ชนิดแข็ง)	30 - 100	145 - 375
เหล็กกล้าผสม	30 - 90	145 - 350
อลูมิเนียมและทองเหลืองผสม	200 - 300	200 - 300
เหล็กกล้าไร้สนิม	65 - 90	200 - 300

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าอัตราป้อนของวัสดุชนิดต่างๆ (นิ้ว/ฟัน) (Jonathan S.C., 1994)

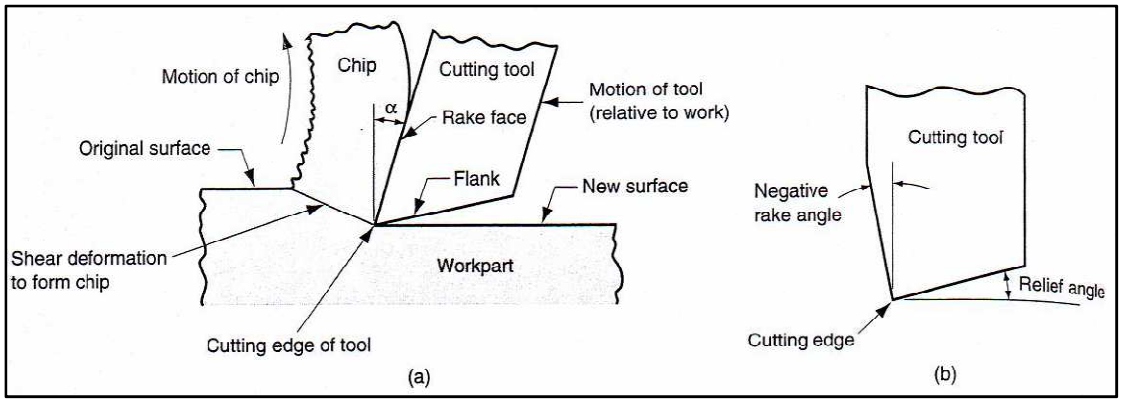
ชนิดของวัสดุ	ขนาดของมีดกัดชนิด End mill (นิ้ว)		
	1/2	3/4	1 นิ้ว ขึ้นไป
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	0.001	0.003	0.003
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง	0.001	0.002	0.003
เหล็กกล้าคาร์บอนสูง	0.001	0.002	0.002
เหล็กหล่อ (ชนิดอ่อน)	0.001	0.003	0.003
เหล็กหล่อ (ชนิดปานกลาง)	0.001	0.002	0.003
เหล็กหล่อ (ชนิดแข็ง)	0.001	0.002	0.002
เหล็กกล้าผสม	0.001	0.002	0.002
อลูมิเนียมและทองเหลืองผสม	0.003	0.004	0.005
เหล็กกล้าไร้สนิม	0.001	0.002	0.003

2.2.4) ความลึกของการตัดเฉือน

ความลึกในการตัดเฉือน (Deep of Cut) หมายถึง ระยะทางที่คมตัดของเครื่องมือตัดหยั่งลึกเข้าไปในชิ้นงานในทิศทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปความลึกของการกัดหยาบจะมีขนาดมากกว่าความลึกของการตัดละเอียด การกำหนดความลึกของการตัดเฉือนนี้จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ แรงม้าในการขับเพลาเครื่องมือตัดหรือชิ้นงานกับความแข็งแกร่งของเครื่องมือตัดหรือความแข็งแกร่งของเครื่องกัด(อำนาจ ทองแสน, 2544)

2.2.5) มุมเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดนั้นอาจจะมีหนึ่งหรือหลายคมตัดเพื่อใช้ในการกำจัดเศษตัดออกจากชิ้นงาน ในการเลือกใช้งานควรพิจารณาลักษณะผิวหน้ามีด 2 ส่วนได้แก่ผิวคาย (Rake face)และด้านข้าง (Flank)ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 (a) มุมมองภาคตัดขวางของกระบวนการกัด (b) คมตัดที่มีมุมเป็นลบเปรียบเทียบกับคมตัดในภาพ (a) ที่มีมุมเป็นบวก (ชาลี ตระกูลการ, 2550)

ผิวคายคือผิวหน้ามีดบริเวณที่ระบายหรือคายเศษตัดออกจากชิ้นงาน และอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุมกับระนาบที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นงานเท่ากับ α โดยเรียกมุมนี้ว่ามุมคาย(Rake angle)ซึ่งมุมนี้สามารถเป็นค่าบวก (Positive angle) ดังรูปที่ 2.12(a) หรือค่าลบ (Negative angle) ดังรูปที่ 2.12(b)

ด้านข้าง คือผิวหน้ามีดบริเวณที่ทำให้เกิดช่องว่าง (Clearance) ระหว่างมีดตัดกับผิวหน้างานที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งช่องว่างนี้จะป้องกันผิวงานจากการขัดถูกับมีดตัดอันจะเป็นผลให้คุณภาพของผิวงานเสียไป ผิวหน้ามีดส่วนด้านข้างนี้จะอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุมกับผิวหน้างานใหม่ด้วยมุมที่เรียกว่า มุมหลบ (Reliefangle)โดยมุมนี้ต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้ผิวหน้างานใหม่สัมผัสกับมีดตัด

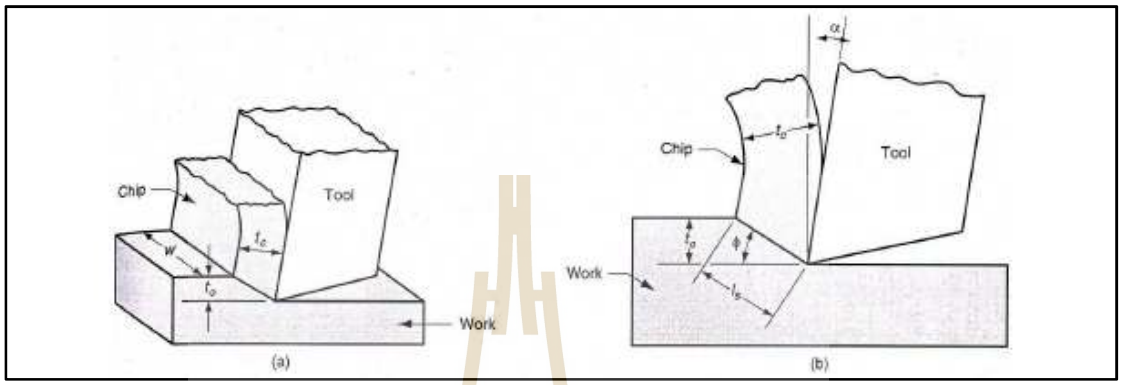
2.3) ทฤษฎีการไหลตัวของเศษโลหะ (Theory of Chip Formation in Machining)

การอธิบายรูปร่าง (Geometry) ของกระบวนการกัดโดยทั่วไปมักจะมีความซับซ้อนเนื่องจากในกระบวนการกัดจริงจะเป็นลักษณะสามมิติ อย่างไรก็ตามการอธิบายกลไก (Mechanics) ของกระบวนการกัดนิยมอธิบายในรูปแบบสองมิติที่เรียกว่า รูปแบบของการตัดฉาก (Orthogonal cutting model)

2.3.1) รูปแบบการตัดฉาก(Orthogonal Cutting Model)

โดยนิยามการตัดฉาก มีดตัดที่มีรูปร่างเหมือนลิ่ม (Wedge) เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานโดยมีคมตัด (Cutting edge) อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางความเร็วตัด (Cutting speed) เมื่อมีดตัดเฉือนลงไปในวัสดุจะเกิดเศษตัด (Chip) ขึ้นตามแนวระนาบที่เรียกว่า ระนาบเฉือน(Shear plane)ซึ่ง

ทำมุมกับผิวหน้าของชิ้นงานเท่ากับ Øเรียกมุมนี้ว่า มุมเฉือน (Shear angle) การกัดเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานและทำให้เกิดเศษตัดจากชิ้นงานบริเวณระนาบเฉือนวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) รูปที่2.14 แสดงภาวะการตัดแบบการตัดฉาก



รูปที่ 2.14 แสดงภาวะการตัดแบบการตัดฉาก

(a) กระบวนการกัดแบบสามมิติ

(b) ลดเหลือสองมิติในมุมมองด้านข้าง

(ชาลี ตระกูลการ, 2550)

มุมสำคัญอีกสองมุมของมีดตัดที่ควรพิจารณาในการตัดฉากได้แก่มุมคายเศษ (Rake angle) และมุมฟรี (Clearance angle)โดยมุมคาย (α) พิจารณาจากทิศทางการไหลของเศษวัสดุที่เกิดขึ้นจากชิ้นงาน และมุมฟรี เป็นมุมระหว่างผิวด้านข้าง (Flank)ของมีดตัดกับผิวหน้าใหม่ของชิ้นงานในระหว่างการตัดคมมีดตัดจะอยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าระดับผิวหน้าชิ้นงานเดิมเป็นระยะเท่ากับความหนาของการตัด t_0ส่วนเศษตัดใหม่ที่เกิดขึ้นตามระนาบเฉือนจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น t_cอัตราส่วนระหว่างความหนาเริ่มต้นและความหนาสุดท้ายนี้เรียกว่า อัตราส่วนความหนาของเศษตัด(Chip thickness ratio or Chip ratio, r)

$$r = \frac{t_0}{t_c} \tag{2.4}$$

เนื่องจากความหนาของเศษตัดจะมากกว่าความหนาเริ่มต้นเสมออัตราส่วนนี้จึงน้อยกว่า 1.0นอกจากความหนาเริ่มต้นแล้ว ในการตัดฉากจะพิจารณาความกว้างของการตัด(w)ดัง

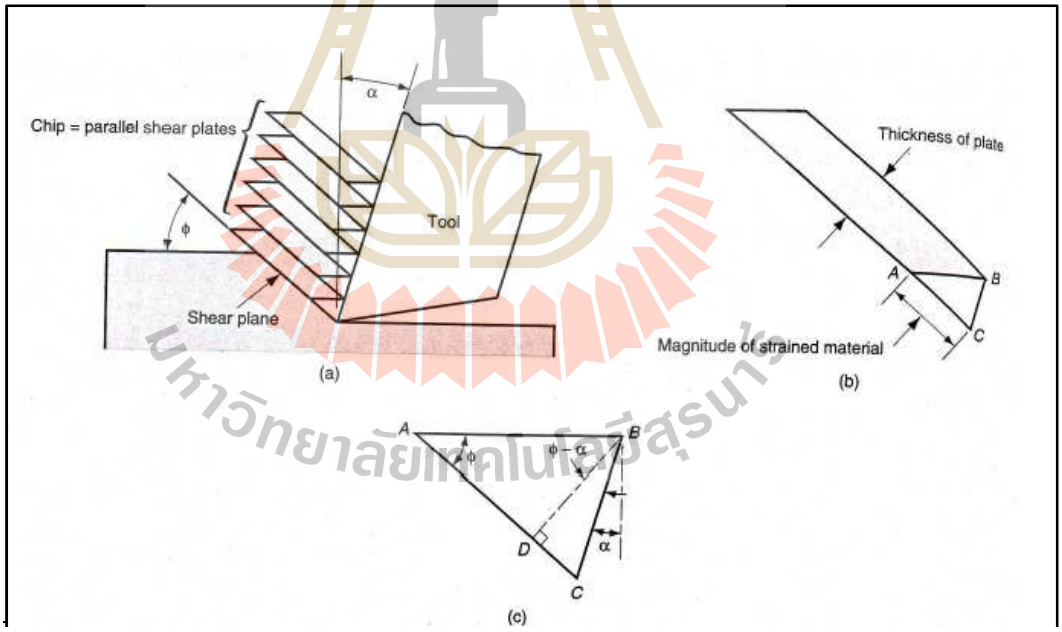
แสดงในรูป ที่ 2.14(a) ถ้ากำหนด l_s เป็นความยาวของระนาบเฉือน เมื่อแทนค่า $t_0 = l_s \sin \emptyset$ และ $t_c = l_s \cos(\emptyset - \alpha)$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนามุมคายและมุมฟรีจะเป็น

$$r = \frac{l_s \sin \emptyset}{l_s \cos(\emptyset - \alpha)} \tag{2.5}$$

สามารถคำนวณค่ามุมเฉือน $\emptyset$ ได้จาก

$$\tan\emptyset = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \tag{2.6}$$

ความเครียดเฉือน (Shear strain; γ) ที่เกิดขึ้นในแนวระนาบเฉือนสามารถพิจารณาได้จากรูปที่2.15



รูปที่ 2.15 แสดงค่าความเครียดเฉือนของเศษที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดเฉือน (ชาลี ตระกูลการ, 2550)

จากรูปที่ 2.15 (a) จะเห็นว่าการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนเกิดขึ้นกับชุดของระนาบที่ไถลต่อกันจนเกิดเป็นเศษตัด แต่ละระนาบจะเกิดความเครียดเฉือนดังแสดงในรูปที่2.15 (b) และจากรูปที่2.15 (c) จะได้ความสัมพันธ์ของความเครียดเฉือน ดังนี้

$$\gamma = \frac{AB}{AC} = \frac{AD+DC}{BC} \tag{2.7}$$

ดังนั้นความเครียดเฉือนสามารถประมาณได้จาก

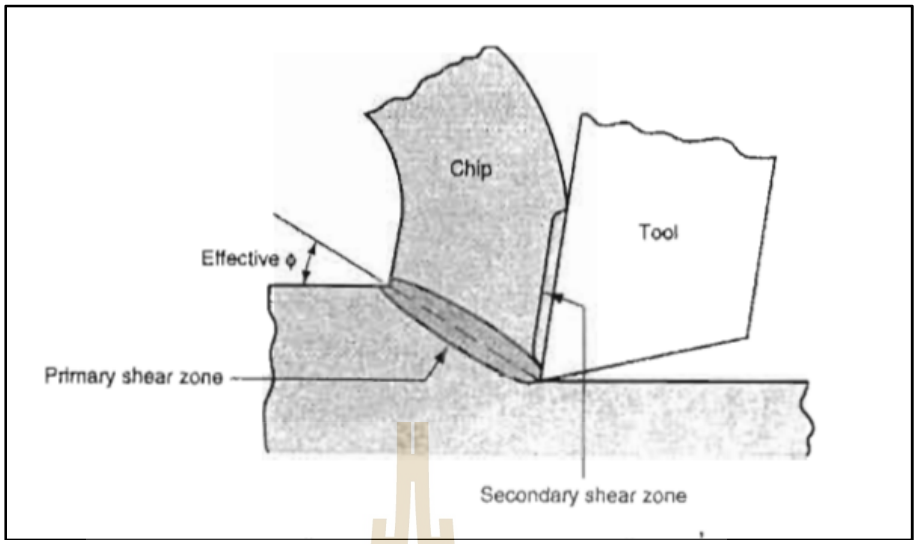
$$\gamma = tan(\emptyset - \alpha) + cot\,\emptyset \tag{2.8}$$

2.3.2) เศษโลหะที่เกิดขึ้นจริง (Actual Chip Formation)

ความแตกต่างของการพิจารณาการกัดโดยใช้รูปแบบการตัดฉากกับกระบวนการกัดที่เกิดขึ้นจริงมีอยู่3 ประการคือ

1) การเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนไม่ได้เกิดแค่ตามแนวระนาบเฉือนเพราะหากการเฉือนเกิดขึ้นผ่านแนวระนาบนั่นหมายความว่าการเฉือนนั้นเกิดขึ้นอย่างฉับพลันแต่ในสภาพความเป็นจริงการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนต้องอาศัยช่วงเวลาสั้นๆและเกิดขึ้นภายในโซนการเฉือน (Shear Zone)บางๆมากกว่าที่จะเป็นในระนาบเฉือนที่มีความหนาเท่ากับศูนย์ลักษณะการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติแสดงได้ดังรูปที่2.15จากการทดลองในงานตัดโลหะพบว่าความหนาของโซนเฉือนนั้นจะมีขนาดเล็กมากประมาณ 0.001 นิ้วดังนั้นการพิจารณาการเฉือนในแนวระนาบจึงไม่มีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณมากนัก

2) นอกเหนือจากมีการเฉือนเกิดขึ้นตามโซนเฉือนที่เรียกว่าการเฉือนหลัก (Primary shear)แล้ว ในการตัดจริงยังมีการพิจารณาการเฉือนหลังจากการเกิดขึ้นของเศษตัดที่เรียกว่าการเฉือนรอง(Secondary shear)การเฉือนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทาน (Friction) ระหว่างเศษตัดกับคมมีดตัดในขณะที่เศษตัดไถลไปตามแนวผิวด้านข้างของมีดตัด โซนการเฉือนทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่2.16



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโซนการตัดเฉือนจริงและโซนแรงเฉือนที่เกิดจากแรงเสียดทาน (ชาลี ตระกูลการ, 2550)

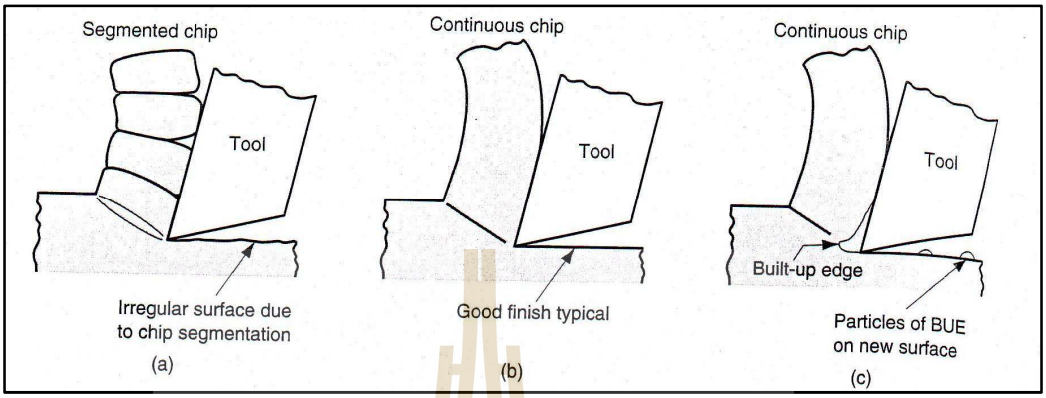
3) การเกิดขึ้นของเศษตัด (Formation of the chip) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ถูกกัดและภาวะการตัดโดยเศษตัดสามารถแยกได้เป็น 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.17

(a) การเกิดเศษที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous chip) เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเปราะ (Brittle materials) เช่น เหล็กหล่อ (Cast irons) ถูกกัดในภาวะการตัดที่มีความเร็วการตัดต่ำ เศษตัดที่เกิดขึ้นจะแยกตัวเป็นส่วนๆ (Separated segments) อันเป็นสาเหตุของความไม่เรียบของผิวสำเร็จของชิ้นงาน เศษตัดชนิดนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกรณีที่ความเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมีค่าสูง (High tool-chip friction) และกรณีที่ขนาดของการป้อนและความลึกการตัดมีค่าสูง

(b) การเกิดเศษที่ต่อเนื่อง (Continuous chip) เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเหนียว (Ductile materials) ถูกตัดด้วยความเร็วสูงและมีขนาดของอัตราการป้อนและความลึกการตัดค่อนข้างต่ำ เศษตัดจะมีลักษณะยาวต่อเนื่องกันและมีผิวสำเร็จของชิ้นงานที่เรียบ เศษตัดชนิดนี้มักเกิดขึ้นในกรณีที่มีดตัดมีความคม (Sharp cutting edge) และมีความเสียดทานระหว่างมีดตัดและชิ้นงานต่ำ

(c) การเกิดเศษเกาะติดอยู่ที่ปลายคมตัด (Continuous chip with built-up edge)เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุเหนียวถูกตัดด้วยความเร็วต่ำถึงปานกลาง ความเสียดทานระหว่างมีดตัดและชิ้นงานทำให้เนื้อวัสดุบางส่วนเกาะติดกับผิวคายของมีดตัดใกล้ๆ บริเวณคมตัด ลักษณะที่

เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Built-up edge (BUE) ซึ่ง BUE ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปกับเศษตัดแต่ส่วนที่เหลืออยู่และเกาะติดกับผิวหน้าของชิ้นงานจะทำให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ



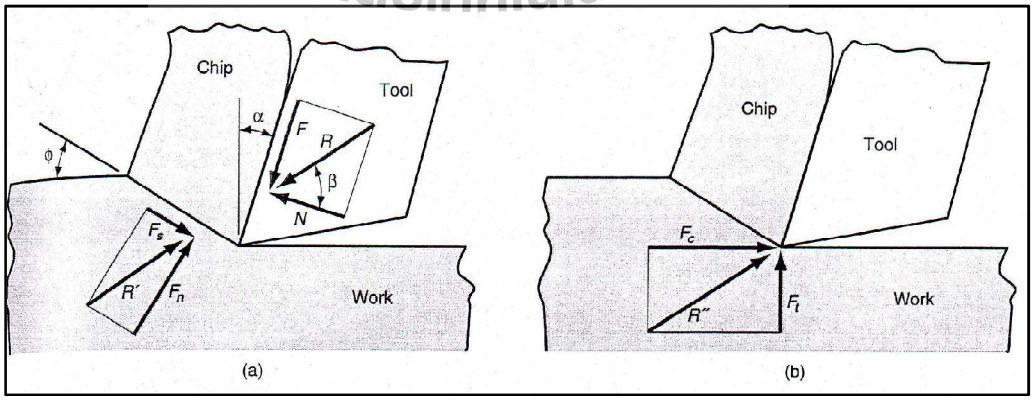
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะผลการตัดเฉือนแบบต่างๆ (ชาลี ตระกูลการ, 2550)

2.4) แรงที่เกิดขึ้นขณะทำการตัดเฉือนโลหะ (Forces in Metal Cutting)

เมื่อพิจารณาแรง (Forces) ที่เกิดขึ้นกับเศษตัดใน Orthogonal cutting ในรูปที่2.18 (a) สามารถแยกแรงที่เกิดขึ้นกับเศษตัดอันเนื่องจากมีดตัดได้2 ส่วนในแนวตั้งฉากกัน ได้แก่

1) แรงเสียดทาน(Friction force, F)เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างคมตัดกับเศษตัดเพื่อต้านการไหลของเศษตัด (Flow of the chip) ตามแนวผิวกายของมีดตัด

2) แรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส(Normal force to friction, N)เป็นแรงในแนวตั้งฉากกับแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.18 (a) แรงในการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับเศษวัสดุ
(b) แรงที่เกิดขึนกับเครื่องมือตัดและสามารถวัดได้
(ชาลี ตระกูลการ, 2550)

แรงทั้งสองนี้สามารถใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (□) ระหว่างมีดตัดและเศษตัด ดังนี้

$$\mu = \frac{F}{N} \tag{2.9}$$

แรงเสียดทานและแรงตั้งฉากนี้สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์เพื่อหาแรงลัพธ์ (Resultant force),Rซึ่งทำมุมเบต้า,βที่เรียกว่ามุมเสียดทาน (Friction angle) มุมนี้สามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คือ

$$\mu = tan\,\beta \tag{2.10}$$

นอกเหนือจากแรงที่กระทำต่อเศษตัดแล้ว ยังมีแรงอีกสองส่วนที่กะทำต่อเศษตัด ได้แก่

3) แรงเฉือน (Shear force, Fs)เป็นแรงเฉือนที่เกิดจากการตัด เกิดขึ้นในบริเวณระนาบเฉือน

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

ความเค้นการเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานและเศษตัดตามแนวระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = \frac{F_S}{A_S} \tag{2.11}$$

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

$$A_s = \frac{t_0 w}{\sin \emptyset} \tag{2.12}$$

ค่าความเค้นเฉือนที่คำนวณโดยสมการที่2.11 แสดงถึงระดับความเค้นที่ต้องการในกระบวนการกัด โดยหลักการแล้วความเค้นเฉือนนี้มีค่าเท่ากับกำลังวัสดุ(Strength of the work) ที่เกิดขึ้นในขณะตัดเมื่อเขียนเวกเตอร์ที่เกิดจากแรง Fs และ Fn จะได้เวกเตอร์ลัพธ์R' ซึ่งมีขนาดเท่ากับเวกเตอร์Rแต่มีทิศทางตรงกันข้ามโดยปกติแรงย่อยทั้งสี่ ได้แก่F, N, Fs , และ Fn ไม่สามารถวัดได้ในกระบวนการกัด แต่มีความเป็นไปได้ในการติดตั้งเครื่องมือวัดขนาดของแรงที่เรียกว่าไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับมีดตัด ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงย่อย 2 แรงที่ต้านการทำงานของมีดตัด ได้แก่

5) แรงตัด(Cutting force, Fc)เป็นแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางการตัด ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับความเร็วตัด

6) แรงตามแนวเส้นรอบวง(Thrust force, Ft)เป็นแรงในแนวของความหนา t_0ซึ่งจะมีทิศทางตั้งฉากกับแรงตัด(Cutting force,Fc)

รูปที่2.18 (b) แสดง Cutting force และ Thrust force ร่วมกับแรงลัพธ์R'' แรงย่อยสองแรงนี้สามารถวัดได้โดยไดนาโมมิเตอร์ และสามารถใช้ในการคำนวณแรงย่อยทั้งสี่แรงข้างต้นจากสมการ

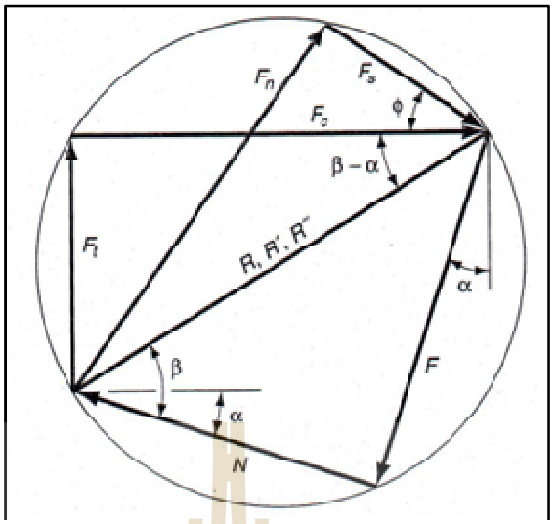
$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \tag{2.13}$$

$$N = F_c \sin \alpha - F_t \sin \alpha \tag{2.14}$$

$$F_s = F_c \cos \emptyset - F_t \sin \emptyset \tag{2.15}$$

$$F_n = F_c \sin \emptyset + F_t \cos \emptyset \tag{2.16}$$

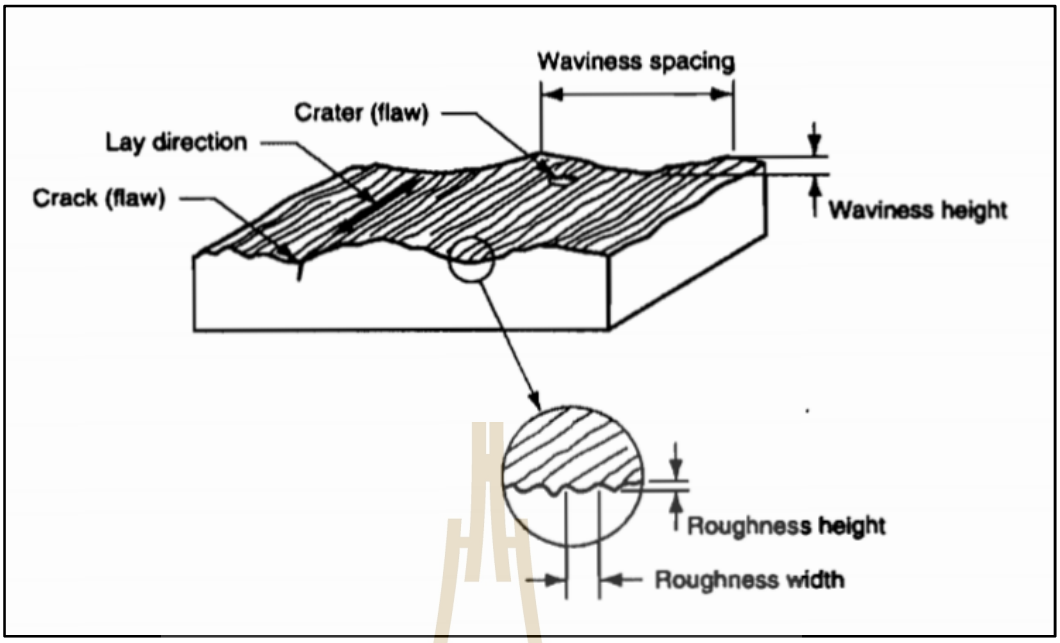
จะเห็นว่าในบางกรณีหาก Rake angle เป็นศูนย์(α= 0) สมการ (2.13) และ (2.14) จะลดรูปเหลือ $F = F_t$และ $N = F_c$ตามลำดับ ดังนั้นในกรณีนี้แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงตั้งฉาก (Normalforce) จะสามารถวัดโดยตรงได้จากไดนาโมมิเตอร์ส่วนประกอบของแรงทางเรขาคณิตที่เกิดขึ้นในการตัดเฉือน สามารถแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงทางเรขาคณิตประกอบด้วยแรง F , N , Fs , Fn , Fc และF (ชาลี ตระกูลการ, 2550)

2.5) ความหยาบผิว (Surface roughness)

ลักษณะทั่วไปของผิวงานที่ผ่านการแปรรูปและผ่านการตัดเฉือนจากกระบวนการผลิตด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น งานกัด งานกลึง และงานเจียระไนฯลฯเมื่อมองด้วยสายตาเราจะเห็นว่าผิวของชิ้นงานมีความเรียบแต่เมื่อนำมาขยายก็จะพบว่าผิวงานเหล่านั้นขรุขระเป็นคลื่นสูงต่ำไม่เท่ากัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.20) โดยเฉพาะถ้าผิวของชิ้นงานใดมีความสูงต่ำแตกต่างกันมาก ก็แสดงว่าผิวของชิ้นงานนั้นมีความหยาบของผิวมาก แต่ถ้าผิวของชิ้นงานใดมีความสูงต่ำ น้อยแสดงว่ามีความเรียบของผิวมากหรือละเอียดมากกว่า ซึ่งความเรียบของผิวนี้มีความสำคัญสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลบางชนิด เช่น ตลับลูกปืน ชิ้นส่วนประกอบงานเคลื่อนที่ความเที่ยงตรงสูง เป็นต้นแต่สำหรับชิ้นงานบางชนิดก็อาจจะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องระบุความหยาบละเอียดของผิวงานเพราะจะทำให้เสียเวลาในการผลิต(Mikell P.Groover, 1996)



รูปที่ 2.20 ภาพขยายของผิวชิ้นงาน(Mikell P.Groover, 1996)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบของผิวงานมีดังต่อไปนี้นี้

2.5.1) ผิวงาน (Surface) หมายถึง ขอบเขตหรือบริเวณที่แยกออกจากเนื้อวัสดุ รูปร่างและลักษณะผิวงานระบุได้ด้วยรูปภาพ (Drawing) หรือคำอธิบายจำกัดความ (Descriptive Specifications)

2.5.2) รูปทรงผิว (Profile) หมายถึงเส้นที่แสดงลักษณะพื้นผิวงานตลอดภาคหน้าตัดที่ถูกนำมาพิจารณา

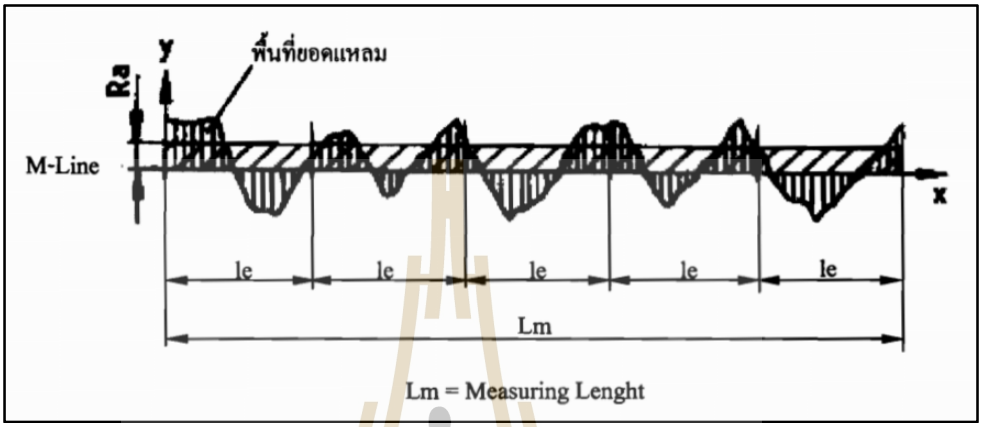
2.5.3) คลื่นของผิวงาน (Waviness) หมายถึง ความผิดปกติของผิวงานที่มีระยะในการพิจารณากว้างกว่าช่วงความหยาบผิว เกิดขึ้นจากการโก่งตัวของชิ้นงานและการหลวมคลอนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รวมทั้งการสั่นสะเทือนขณะทำการขึ้นรูป

2.5.4) ข้อบกพร่อง (Flaw) หมายถึง ความผิดปกติของผิวงานที่เกิดขึ้นจุดใดจุดหนึ่งบนผิวงาน เช่น รอยขีดข่วน รอยแตก และรูพรุนเป็นต้น

2.5.5) ความลาด Lay หมายถึง แนวทิศทางของรอยสัน ส่วนยอดความหยาบของผิวที่ทำการตรวจสอบ

การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวงานตามมาตรฐานของ ISO 4287 ประกอบด้วยค่า RtRaและ Rz ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)แต่ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้ค่า Ra ในการประเมินความหยาบผิว โดยสามารถอธิบายค่า Ra ได้ดังนี้ (มานพตันตระบัณฑิต, 2541)

ค่าความหยาบ Ra หมายถึง ค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตของผลรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง หารด้วยความยาวเฉลี่ย(Lm) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.21



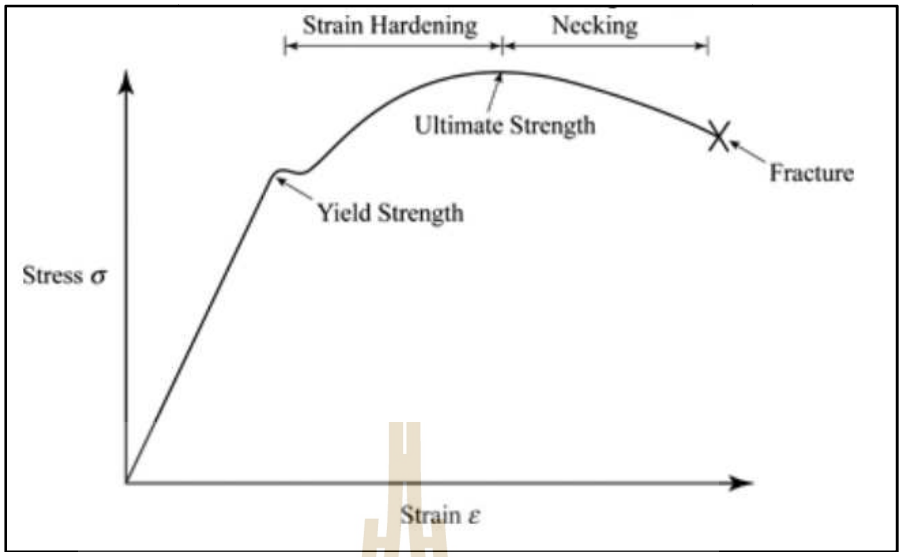
รูปที่ 2.21 การวัดค่า Ra (มานพตันตระบัณฑิต, 2541)

2.6) ความแข็งผิว (Surface Hardness)

ความแข็ง คือ สมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก จากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึง ความต้านทานต่อการดัด ขีด การตัด การสึกหรอ หรือแม้กระทั่งความต้านทานการกัดกร่อน

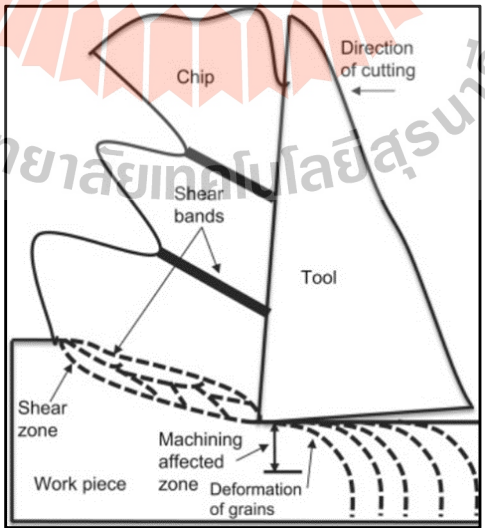
กลไกการเกิดความแข็งในโลหะจากความเครียด (Strain hardening)แสดงในรูปที่ 2.22เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุเหนียวกลายเป็นวัสดุที่แข็งมากขึ้นเมื่อวัสดุผ่านการเปลี่ยนรูปถาวร (หรือเลยจุด yield strength) เกิดการเคลื่อนที่ของระนาบอะตอม(dislocation)ทำให้ความหนาแน่นของอะตอมมากขึ้นหรือระยะห่างระหว่างอะตอมชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ระนาบอะตอมเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น

เมื่อวัสดุที่เสียรูปไปแล้วมีการกระทำเพื่อเปลี่ยนรูปซ้ำ จะแปรเปลี่ยนจุดครากให้สูงขึ้น ในขณะเดียวกันความสามารถในการเปลี่ยนรูปจะลดลง การใช้แรงเพื่อกระทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปซ้ำในครั้งต่อไป ต้องใช้แรงเพิ่มขึ้น (Askeland, D. R., 1996) เพราะระนาบอะตอมเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้นกว่าเดิม ทำให้วัสดุมีความแข็งมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.22 แผนภาพ Stress – Strain

กลไกการเกิดการเปลี่ยนแปลงของความแข็งผิวอันเนื่องจากการตัดเฉือน แรงตัดเฉือนจากคมตัดสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของเกรน (Deformation of grains) ดังแสดงในรูปที่ 2.23หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของระนาบอะตอม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรและการเพิ่มความแข็งอันเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น (strain hardening)



รูปที่ 2.23การเปลี่ยนแปลงของลักษณะผิวจากการตัดเฉือน

2.7) ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

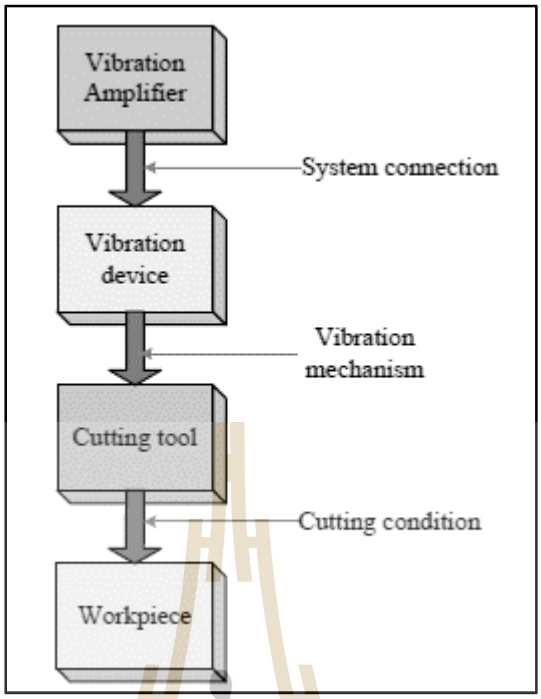
2.7.1) การสั่นสะเทือนช่วยในการขึ้นรูป

การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการขึ้นรูปนั้นมีการเริ่มศึกษาตั้งแต่ ค.ศ. 1950 การพัฒนาการวิจัยมีความหลากหลายและมีระยะเวลายาวนานเกิดความซับซ้อนและความแตกต่างในการนำไปประยุกต์ใช้งานโดยหลักการแล้วการสั่นสะเทือนช่วยในการขึ้นรูปนั้นเป็นการทำให้ชิ้นงานหรือเครื่องมือตัดมีการเคลื่อนที่แกว่งไปมาเป็นรอบโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการตัดเฉือน หลักการพื้นฐานของการสั่นสะเทือนช่วยการตัดเฉือนคือการทำให้เกิดการแยกตัวของผิวคมตัดและชิ้นงาน เทคนิคนี้ได้นำมาใช้ครั้งแรกในงานเจาะไม้และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ต้องการความแม่นยำสูง(Cemiway, 2005)

การตัดปาดผิวโดยใช้การสั่นสะเทือนเริ่มเกิดขึ้นในกลางปี 1970ในช่วงเริ่มแรกในการนำเทคนิคนี้ไปใช้ พบว่าเครื่องมือตัดเกิดการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งและมีการกระจัดในทิศทางแต่ละแกน (แกนX, Y หรือ Z) รวมไปถึงการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนที่มีความถี่มากกว่า 20 กิโลเฮิรตซ์ แต่กระนั้นผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูปด้วยการสั่นสะเทือนนั้นสามารถนำมาปฏิบัติได้จริงเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งเวลาผ่านไปสองทศวรรษเทคโนโลยีนี้จึงเริ่มพัฒนาขึ้นและเริ่มที่จะถูกนำมาศึกษาอีกครั้ง

ในท้ายที่สุดเมื่อปี ค.ศ. 1990 การวิจัยการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่ำและความถี่สูงในการขึ้นรูปแสดงให้เห็นผลที่ชัดเจนมากขึ้นจนกระทั่งเพียงพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม (Moriwaki, T and Shamoto,1991) กลายเป็นที่มาของการเริ่มต้นการขึ้นรูปวัสดุโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนช่วยในการตัดเฉือน (Vibration Assisted Machining , VAM)

เทคนิคการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนในการขึ้นรูปกลายเป็นสิ่งที่ต้องการในการพัฒนาทางด้านวิศวกรรมอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสัมพันธ์กับอัตราการนำพาเศษวัสดุออกจากจุดตัดเฉือน ความหยาบของผิวสำเร็จและการสึกหรอของคมตัด โดยทั่วไปแล้ว การตัดเฉือนด้วยการสั่นสะเทือนนั้นมีความคล้ายคลึงกันเพียงแตกต่างกันที่กระบวนการนำไปใช้ข้อสำคัญในการวิจัยนั้นให้ความสำคัญไปที่การสั่นสะเทือน โดยองค์ประกอบหลักคือระบบกำเนิดการสั่นสะเทือน ดังรูปที่2.24แสดงให้เห็นถึงหลักการของการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนในการขึ้นรูป



รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมของระบบการสั่นสะเทือนช่วยในการขึ้นรูปแบบทั่วไป

สิ่งที่เป็นพื้นฐานสำคัญขององค์ประกอบของการใช้การสั่นสะเทือนช่วยในการขึ้นรูปคือเปียโซแอ๊คทูเอเตอร์ (piezo actuator) การออกแบบของเปียโซแอ๊คทูเอเตอร์นั้นได้ถูกพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้หลายด้าน เช่น งานกลึง งานกัด งานเจาะ งานเจียรนัย และการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (EDM) (Endo et al.,2008)

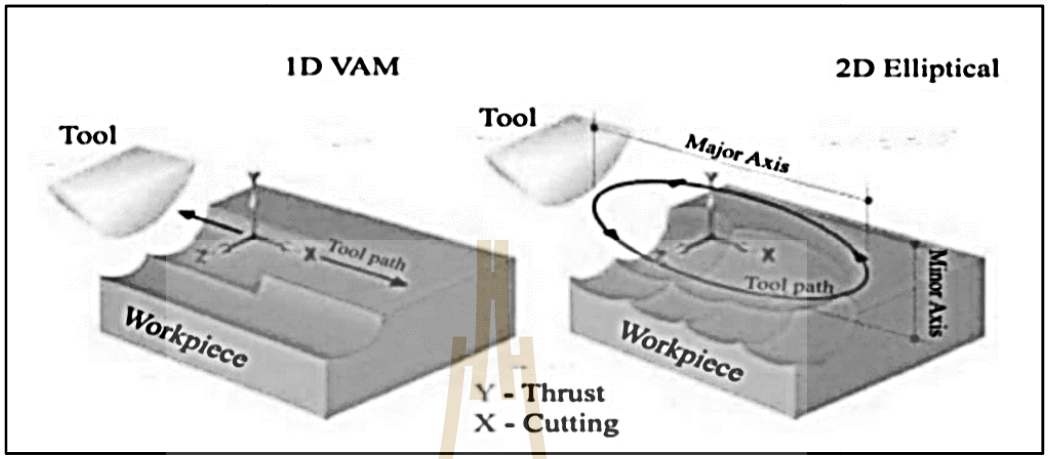
2.7.2) การจำแนกประเภทของการสั่นสะเทือนช่วยในการขึ้นรูป

ประเภทของการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนช่วยในการขึ้นรูปสามารถจำแนกได้สองประเภทตามลักษณะของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปสู่ชิ้นงานหรือเครื่องมือตัด(ดังแสดงรูปที่ 2.25) ได้แก่

1) การสั่นสะเทือนแบบหนึ่งมิติ (1D Dimension VAM) ระบบนี้จะใช้การสั่นสะเทือนในระนาบที่ขนานไปกับผิวชิ้นงานและจะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับการตัดเฉือน

2) การสั่นสะเทือนแบบสองมิติ (2D Dimension VAM) ระบบนี้จะมีการเคลื่อนที่ของคมตัดเป็นเส้นโค้ง เมื่อการสั่นสะเทือนในแกนหลักเคลื่อนที่ไปตามทิศทางเดียวกับแรงตัดเฉือนและมีการสั่นสะเทือนในแกนแนวตั้งฉากกับผิวงาน แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนในแต่ละ

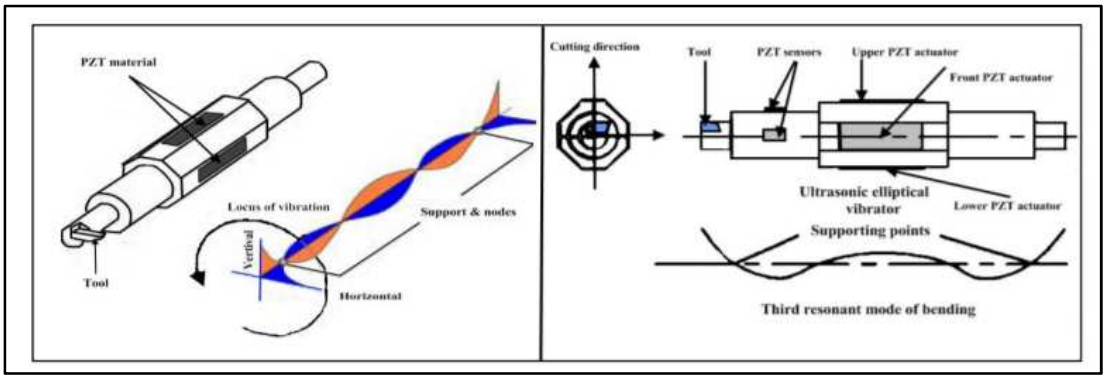
แกนอาจจะมีค่าที่เท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ โดยค่าแอมพลิจูดของระบบสามารถแสดงได้โดยผลคูณของแอมพลิจูดทั้งสองแกน



รูปที่ 2.25 ชนิดของการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามลักษณะการเคลื่อนที่คมตัด (a)แบบ 1 มิติ (b) แบบสองมิติ(Cerniway,2005)

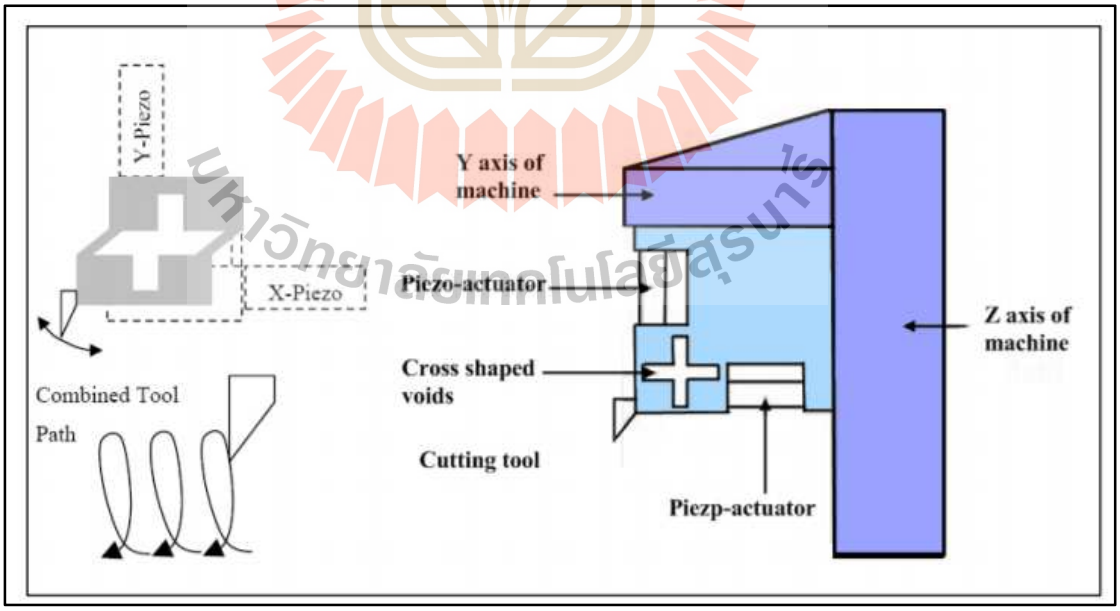
การสั่นสะเทือนในการขึ้นรูปที่มีเปียโซอิเล็คทริค (piezo-electric) เป็นส่วนประกอบนั้น สามารถจำแนกตามระบบได้ดังต่อไปนี้

1) ระบบที่มีการสั่นพ้อง (Resonant system) คือระบบที่มีความถี่การสั่นสะเทือนของคมตัดในความถี่เดียวกันกับความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนอื่น ๆ ในระบบและเกิดการสั่นพ้อง การสั่นพ้องส่งผลให้เส้นทางเคลื่อนที่คมตัดมีขนาดแอมพลิจูดหรือทิศทางที่เปลี่ยนไปรูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างระบบสั่นสะเทือนที่มีการสั่นพ้องโดยการติดตั้งเปียโซแอ๊คทูเอเตอร์ในทิศทางตรงกันข้าม90 องศา เกิดการรวมตัวของการสั่นสะเทือนสองทิศทางและเกิดการสั่นพ้องในระบบโดยทั่วไปแล้ว ระบบนี้จะเกิดผลดีต่อการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดเมื่อความถี่อยู่ในช่วงที่มากกว่า 20 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 2.26 ระบบสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคที่มีการสั่นพ้อง (Moriwaki,1999)

2) ระบบที่ไม่มีการสั่นพ้อง (Non-Resonant system) คือระบบที่ความถี่การสั่นสะเทือนของคมตัดไม่อยู่ในช่วงความถี่เดียวกันกับความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนอื่น ๆ และไม่เกิดการสั่นพ้อง ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.27ระบบการสั่นสะเทือนที่ไม่มีการสั่นพ้อง โดยการใช้กลไกเชื่อมต่อกับระบบเปียโซอิเล็คทริคแอ๊คทูเอเตอร์ (piezoelectric actuator) เพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านการขยายและหดตัวของเปียโซอิเล็คทริคแอ๊คทูเอเตอร์ไปเป็นการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด เปียโซแอ๊คทูเอเตอร์จะสั่นสะเทือนด้วยความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

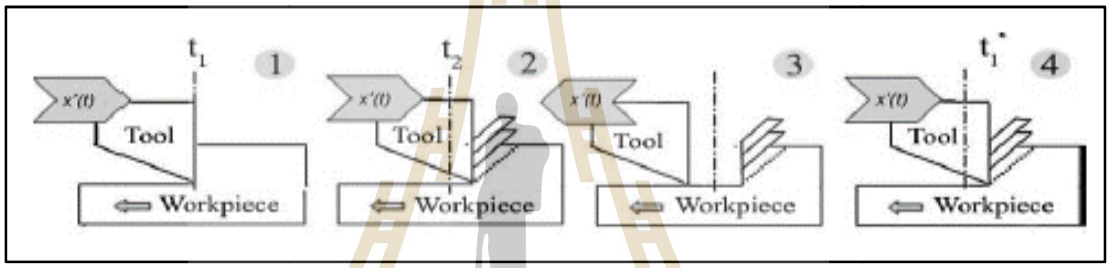


รูปที่ 2.27 ระบบสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคที่ไม่มีการสั่นพ้อง (Hwanetal., 1999)

2.7.3) จลศาสตร์ของการสั่นสะเทือนในการขึ้นรูป

1) จลศาสตร์การสั่นสะเทือนหนึ่งมิติ

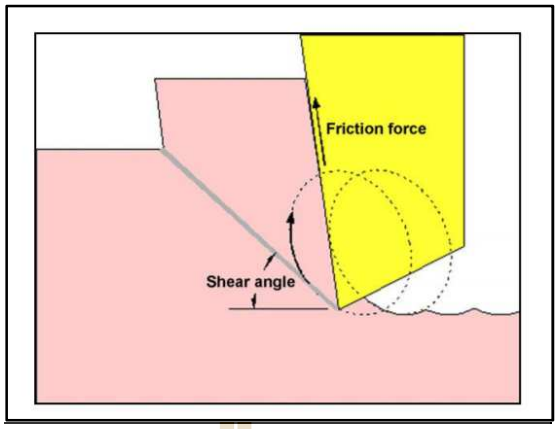
Brehl (2008) อธิบายหลักจลศาสตร์การสั่นสะเทือนหนึ่งมิติสำหรับการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.28 คมตัดเคลื่อนที่ด้วยความถี่และแอมพลิจูดในแนวเส้นตรงณ ตำแหน่งที่ 1เวลาเริ่มต้น t_1มุมเอียงของคมตัดเคลื่อนที่เข้าสู่จุดที่กำลังจะเริ่มตัดเฉือน จากนั้น ณ ตำแหน่งที่ 2ที่เวลา t_2 คมตัดเริ่มทำการตัดเฉือนเนื้อวัสดุเครื่องมือตัดเคลื่อนที่ถึงระยะกระจัดมากที่สุดจากการสั่นสะเทือนในแนวเส้นตรงขนานกับผิวงาน จนกระทั่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของคมตัดเป็นศูนย์ณ ตำแหน่งที่ 3 คมตัดเคลื่อนที่กลับไปสู่ตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งที่ 1และเคลื่อนที่เข้าตัดปาดอีกครั้งซึ่งเป็นการเริ่มต้นรอบการทำงานรอบใหม่ที่เวลาt_1*



รูปที่ 2.28 หลักการขึ้นรูปที่มีการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนในระบบหนึ่งมิติ (Brehl,2008)

2) จลศาสตร์การสั่นสะเทือนสองมิติ

รูปที่ 2.29แสดงทฤษฎีการลดลงของแรงตัดเฉือนในรูปจลศาสตร์การสั่นสะเทือนของการขึ้นรูปในระบบสองมิติโดยศึกษาทดลองในระบบที่มีความถี่ในช่วง 0-6 เฮิรตซ์ พบว่าแรงตัดที่มีค่าสูงที่สุดนั้นมีค่าเท่ากับการตัดเฉือนแบบทั่วไป แต่บางช่วงเวลาพบว่าไม่เกิดการตัดเฉือน เนื่องจากเกิดการแยกตัวระหว่างปลายเครื่องมือตัดและชิ้นงาน การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงานไปพร้อมกับการเคลื่อนที่แนวราบของระบบหนึ่งมิติ ทำให้ปลายของเครื่องมือตัดเคลื่อนที่ในวงกลมหรือวงรีส่งผลให้แรงตัดลดลงประมาณ 30-40% เมื่อเปรียบเทียบกับการตัดเฉือนแบบทั่วไป(Shamoto and Moriwaki, 1999)

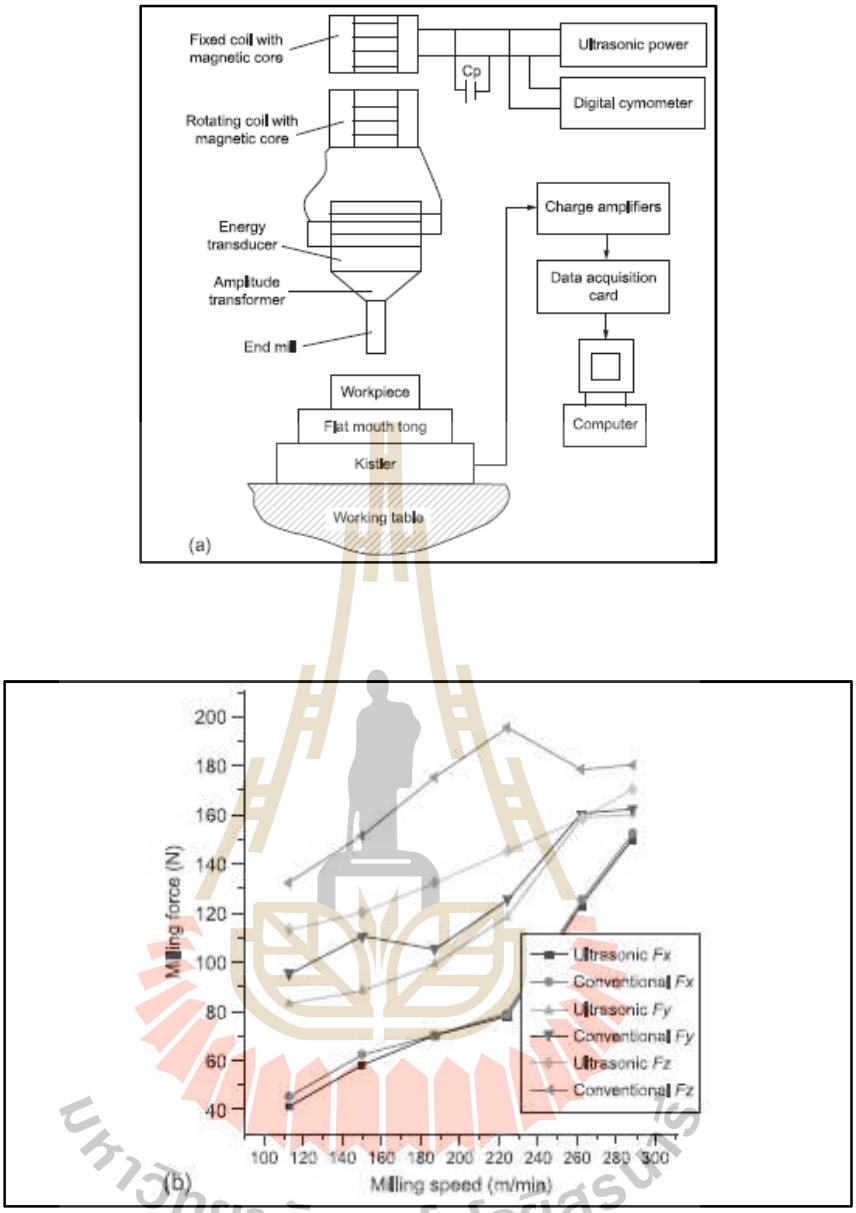


รูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่ของมีดตัดในการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนในระบบสองมิติ(Shamoto and Moriwaki, 1999)

2.7.4) แรงตัด

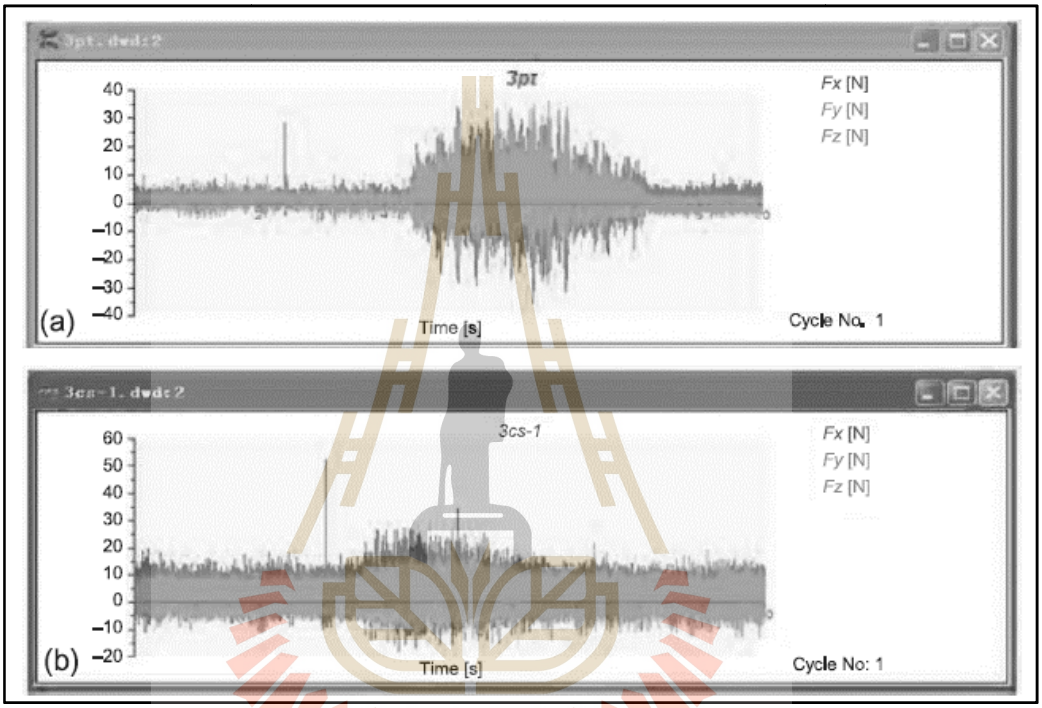
ระบบการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในกระบวนการกัดนั้นได้ถูกพัฒนาโดย Xiang et al. (2011) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (a) การใช้ทรานส์ดิวเซอร์ให้กำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคความถี่ 35 กิโลเฮิรตซ์ ที่แอมพลิจูด 15 ไมโครเมตร เพื่อสร้างการสั่นสะเทือนให้กับเครื่องมือตัด แกนหมุนของดอกกัดมีความเร็วรอบ20,000 รอบต่อนาทีและใช้ดอกเอ็นมิลล์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง6 มิลลิเมตรเพื่อทำการขึ้นรูปวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide)

ผลกระทบของความเร็วตัด (cutting speed) ที่เพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 2.30 (b) โดยแกน y คือแกนหมุนของดอกกัดแกน z คือทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดและแกนx คือทิศทางตั้งฉากกับแกน z การทดลองแสดงให้เห็นว่า แรงในทิศทางแกนหมุนของดอกกัดFy และแรงในทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด Fz มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับการกัดแบบทั่วไป แรงในทิศทางเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อทำการเพิ่มอัตราการป้อนและความลึกในการตัดปาดผิวความแตกต่างระหว่างการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคและการกัดแบบทั่วไปสามารถเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่ลดลงนั้นแสดงให้เห็นในกระบวนการที่ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค



รูปที่ 2.30 การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับเครื่องมือตัดในการกัด (a) แผนภาพแสดงการติดตั้ง และ (b) ผลกระทบของความเร็วตัดที่มีต่อแรงตัด (Xiang et al., 2011)

การศึกษาเพิ่มเติมจากมหาวิทยาลัยฮีนานโพลีเทคนิคโดย Li et al. (2011) ได้นำเสนอการวิเคราะห์แรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโดยเปรียบเทียบระหว่างการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคและกระบวนการกัดแบบทั่วไป ผลแสดงในรูปที่2.31แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในการตัดปาดผิวไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนแต่พบว่า การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคส่งผลค่าแรงที่วัดได้ในช่วงที่ไม่มีการตัดเฉือน สูงกว่าการกัดแบบทั่วไป



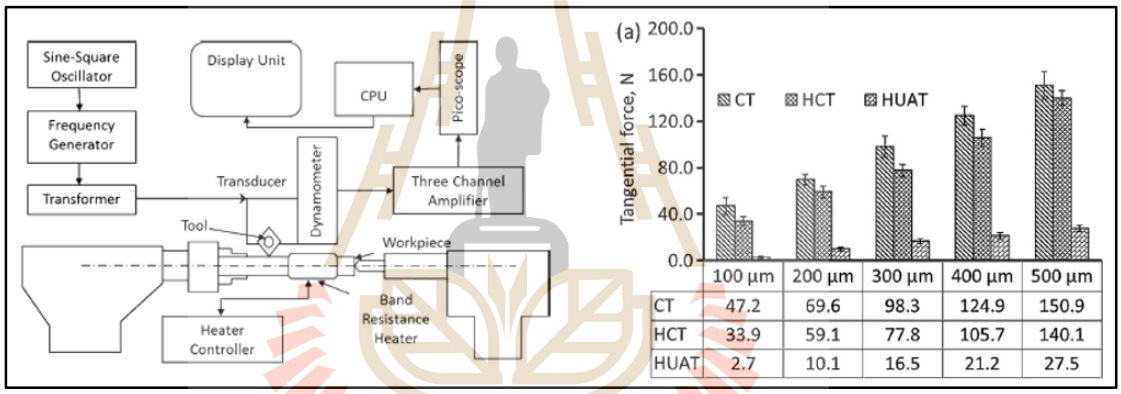
รูปที่ 2.31 แรงตัด (a) การกัดแบบทั่วไปและ (b) การกัดโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค (Li et al.,2012)

Abootorabi et al. (2012) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคที่มีต่อแรงตัดในงานกลึง โดยทดลองเปลี่ยนความเร็วรอบ แอมพลิจูด และความเร็วตัด พบว่า แรงตัดที่เกิดขึ้นเมื่อใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีแนวโน้มที่ลดลง และลดลงมากขึ้นในการทดลองที่มีความเร็วตัดต่ำ

Ahmed (2007) อธิบายว่าการเพิ่มขนาดแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนสามารถลดแรงตัดได้ร้อยละ 52 เหตุผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของคมตัดออกจากบริเวณตัดเฉือนวัสดุ ส่งผลให้เกิดการลดอัตราการสัมผัสระหว่างเครื่องมือตัดและเศษตัด นอกเหนือจากนี้ การเพิ่มความถี่การ

สั่นสะเทือนจาก 10 ไปที่ 30 กิโลเฮิรตซ์ส่งผลให้แรงตัดลดลงร้อยละ 47 นั่นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดแอมพลิจูดและความถี่มีความสัมพันธ์กับแรงตัดที่เกิดขึ้น

Riaz (2014) ทำการทดลองเปรียบเทียบแรงตัดระหว่างการกลึงแบบทั่วไปกับการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับเครื่องมือตัด ร่วมกับการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน พบว่าแรงตัดในทิศทางแนวรัศมีและแนวเส้นสัมผัส จากการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคร่วมกับการให้ความร้อนชิ้นงานมีค่าลดลงประมาณร้อยละ95ส่วนการให้ความร้อนชิ้นงานเพียงอย่างเดียวนั้นแรงตัดลดลงร้อยละ20นอกจากนี้ พบว่า ค่าความหยาบผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญสำหรับกลุ่มที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นงานเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคร่วมกับเพิ่มอุณหภมิให้กับชิ้นงาน มีการลดลงของค่าความหยาบผิวร้อยละ 50ดังแสดงในรูปที่ 2.32



	100 µm	200 µm	300 µm	400 µm	500 µm
CT	47.2	69.6	98.3	124.9	150.9
HCT	33.9	59.1	77.8	105.7	140.1
HUAT	2.7	10.1	16.5	21.2	27.5

รูปที่ 2.32 เปรียบเทียบแรงตัดจากการกลึงแบบทั่วไป (CT) ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือน (HCT และการให้ความร้อน (HUAT)(Riaz,2014)

2.7.5) ความหยาบผิว

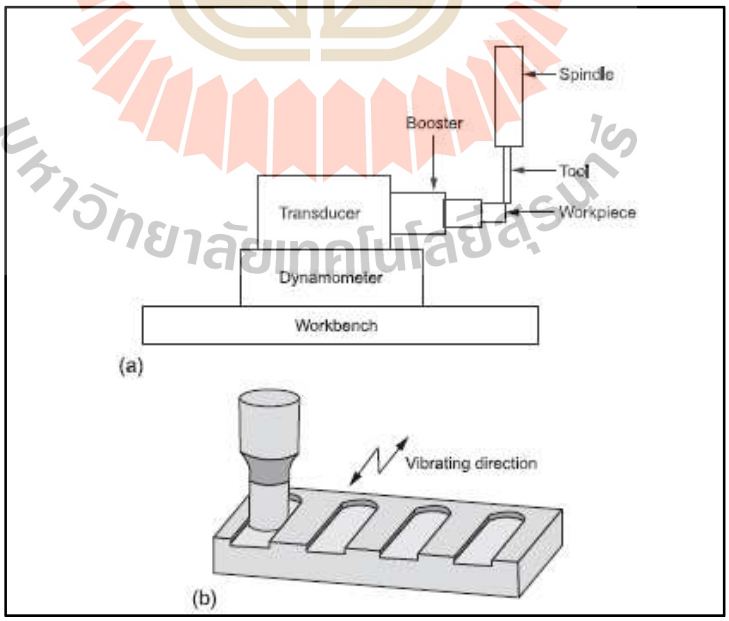
Wang และ Zhou (2002) แสดงการทดลองการตัดเฉือนวัสดุแข็งเปราะด้วยความลึกในการตัดเฉือนที่มีมาก โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคที่มีความถี่40 กิโลเฮิรตซ์ ขนาดแอมพลิจูด 3 ไมโครเมตรกำหนดความเร็วรอบในการหมุนที่ 90 รอบต่อนาทีและอัตราป้อนที่ 5 ไมโครเมตรต่อรอบ ผลการทดลองประสบผลสำเร็จโดยได้ค่าความหยาบผิว100 ไมโครเมตร นอกเหนือจากนี้ พวกเขานำเสนอหลักการและกลไกของการนำพาเศษวัสดุโดยใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการขึ้นรูป ตลอดจนพัฒนาแบบจำลองการวัดขนาดของชิ้นงานและความหยาบผิว

หลักการสำคัญของการพัฒนาการสั่นสะเทือนนั้นขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของเส้นโค้งของปลายเครื่องมือตัด

Chern และ Lee (2005) ได้พัฒนาเครื่องกัดโดยสร้างการสั่นสะเทือนส่งผ่านโต๊ะจับยึดชิ้นงานไปสู่ชิ้นงาน พบว่าการสั่นสะเทือนสามารถปรับปรุงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะให้อยู่ในขนาดที่กำหนด ลดความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของรูเจาะ และลดความหยาบผิวของผนังของรูเจาะ ผลการปรับปรุงที่ดีจะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน แสดงให้เห็นแนวโน้มของเทคนิคการประยุกต์การสั่นสะเทือนเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีงานเจาะ

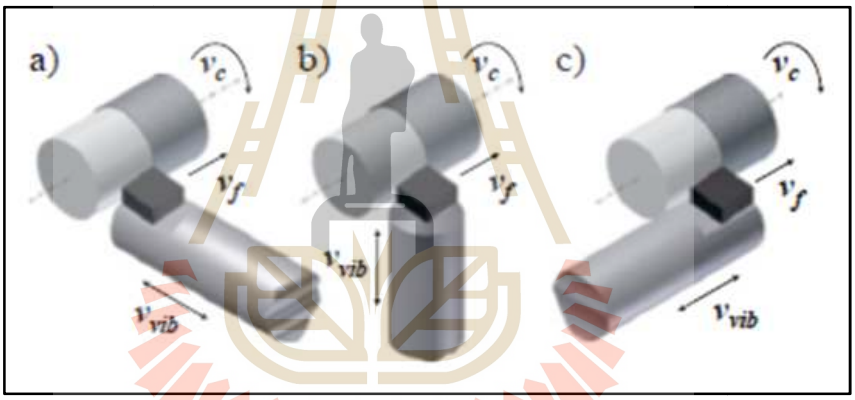
Razfar et al. (2011) ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการตัดเฉือนชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้า โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีต่อความหยาบผิวผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบในระดับอัตราป้อน ความลึกการตัดปาดผิว และความเร็วรอบเดียวกัน การประยุกใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคสามารถปรับปรุงความหยาบผิวให้ดีขึ้น

Shen et al. (2012) ได้ทำการทดลองการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 2A12 โดยส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปที่ชิ้นงาน และกำหนดทิศทางการป้อนตัดในทิศทางเดียวกับทิศทางของการสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่2.33 ผลการทดลองพบว่าการสั่นสะเทือนส่งผลให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อผิวชิ้นงานที่บริเวณตัดเฉือนด้านใต้ของคมมีด แต่เกิดการปรับปรุงผิวบริเวณด้านข้างคมมีดเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม



รูปที่ 2.33 การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับชิ้นงานในการกัด (a)แผนภาพแสดงการติดตั้ง และ (b) การทดลองการกัดร่อง(Shen et al.,2012)

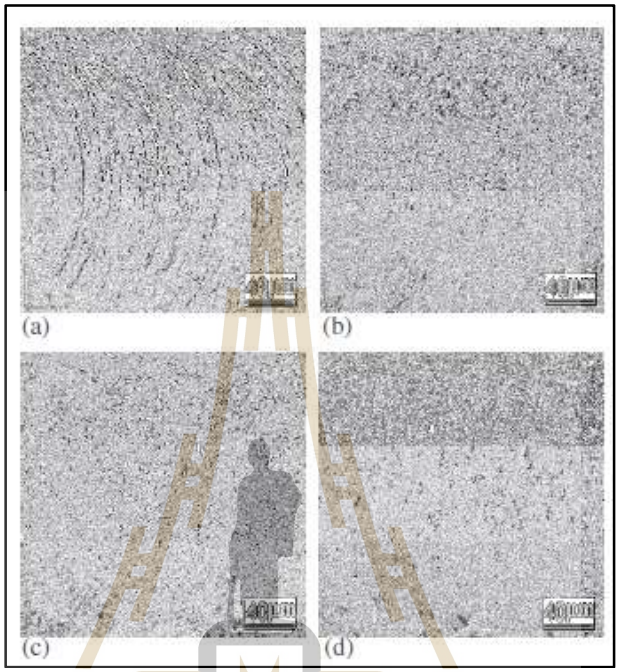
Nestler (2014) ทำการประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกลึงอลูมิเนียมเมทริกซ์คอมโพสิท เกรดAA2124 ที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนคาร์ไบด์สัดส่วนร้อยละ 25โดยทำการกลึงชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคเข้ากับเครื่องมือตัดทำการออกแบบทิศทางของการสั่นสะเทือนหลายๆทิศทางเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของผิวแสดงดังในรูปที่ 2.34การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในทิศทางเข้าหาจุดศูนย์กลางการหมุน แนวตั้งฉากรัศมีและแนวทิศทางการป้อนถูกกำหนดขึ้น ผลการทดลองพบว่า การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคสามารถทำให้เกิดโครงสร้างผิวที่มีความหยาบผิวและคุณภาพผิวชิ้นงานเทียบเท่ากับผิวสำเร็จในขั้นตอนการกลึงขั้นสุดท้ายโดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกลึงละเอียดเพิ่มเติม ยิ่งกว่านั้น การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคนำมาซึ่งความเค้นที่ตกค้างอยู่บนชั้นของพื้นผิวที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มความต้านการล้าของชิ้นส่วน



รูปที่ 2.34 การประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับเครื่องมือตัดในงานกลึง
(a) การสั่นสะเทือนในทิศทางแนวรัศมี (b) การสั่นสะเทือนในทิศทางการตัดเฉือน
(c) การสั่นสะเทือนในทิศทางการป้อน (Nestler, 2014)

Lian (2013) ได้ทำการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้ชิ้นงานวัสดุอลูมิเนียมเกรด Al6061 และศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดเพื่อสร้างโมเดลการเคลื่อนที่โดยใช้กระบวนการเชิงตัวเลข การทดลอง 3 แบบการทดลองที่มีความแตกต่างของระดับแอมพลิจูดมีความเร็วรอบ 150,000 รอบต่อนาที เส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัด 0.5 มิลลิเมตรและอัตราป้อน0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที รูปที่ 2.35 (a) แสดงให้เห็นของผลของกระบวนการขึ้นรูปแบบทั่วไป ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานจะหลงเหลือรอยคมตัดเล็กๆ ในทางตรงกันข้าม รูปที่2.35(b) 2.35(c) และ 2.35

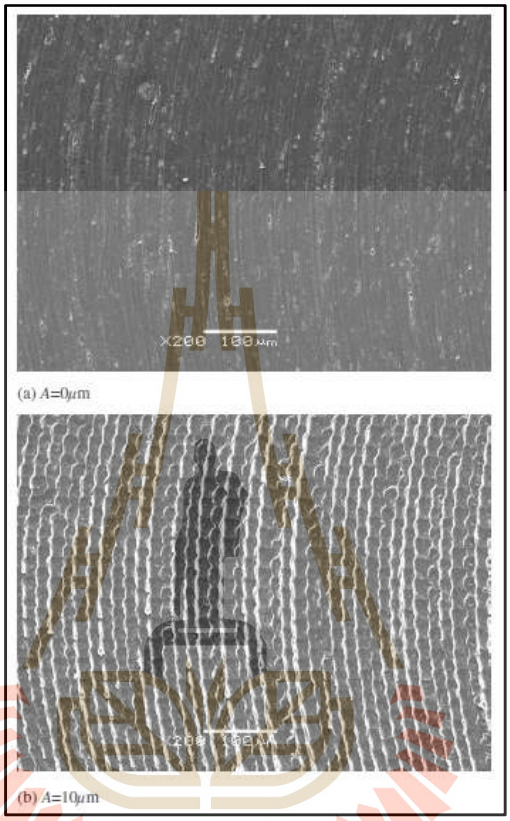
(d) แสดงให้เห็นลักษณะของผิวชิ้นงานที่มีการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในกระบวนการขึ้นรูป พื้นผิวมีความราบเรียบและเป็นรูปแบบเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกัดแบบทั่วไป



รูปที่ 2.35 ลักษณะผิวงานกัดเมื่อประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคแต่ละแอมพลิจูด (a) ไม่มีการสั่นสะเทือน (b) 11 ไมโครเมตร (c) 15 ไมโครเมตร (d) 19 ไมโครเมตร (Lian, 2013)

Xing (2013) ได้ทำการวิเคราะห์จลศาสตร์ของปลายดอกกัดในการกัดที่ประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับชิ้นงานในทิศทางการป้อนโดยการสั่นสะเทือนมีความถี่19.58 กิโลเฮิรตซ์ ทำการตัดเฉือนด้วยดอกเอ็นมิลล์วัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียม ชนิด 2 คม ตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ชิ้นงานทดลองทำจากวัสดุอลูมิเนียม เกรด 2A12 ผลการวิจัยพบว่าการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัด ก่อให้เกิดการกระจายตัวของรอยคมตัดมีลักษณะลายเกร็ดปลาที่เป็นระเบียบ(ดังแสดงในรูปที่ 2.36)เพิ่มความสามารถในการดูดซับของฟลิ์มน้ำมัน เช่นเดียวกันนี้ลักษณะของผิวที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือน ยังทำหน้าที่สำคัญในการเก็บกักน้ำมันและฝุ่นผงที่เกิดจากการสึกกร่อนส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่วัดได้มีความเสถียรมากกว่า

พื้นผิวที่ได้จากงานกัดแบบทั่วไป ในขณะเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผิวที่ประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคลดลงร้อยละ 20และความสามารถการรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 140



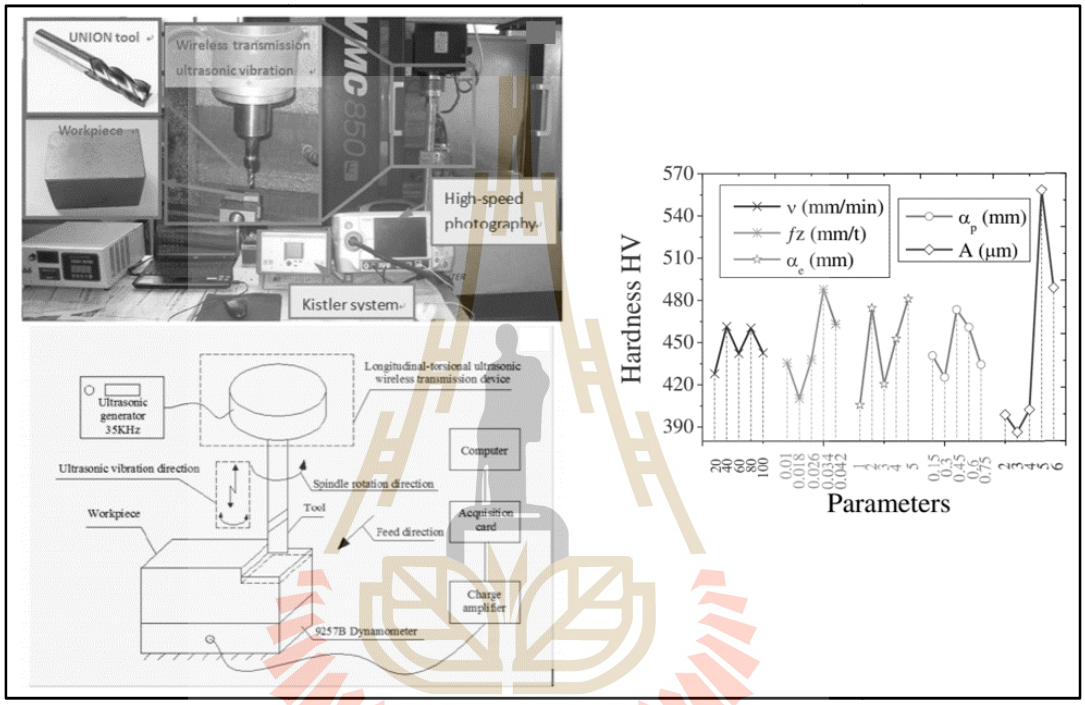
รูปที่ 2.36 ลักษณะผิวของวัสดุจากการให้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการกัด Xing (2013)

2.7.6) ความแข็งผิว

กระบวนการขึ้นรูปโดยการตัดเฉือนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระนาบอะตอมที่ผิว เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรและส่งผลให้เกิดแนวโน้มความแข็งผิวที่เปลี่ยนแปลง การวิจัยและศึกษาอิทธิพลของการตัดเฉือนอันส่งผลต่อความแข็งผิวโดยมีการประยุกต์การสั่นสะเทือนช่วยในการตัดเฉือนยังมีไม่มากนักผู้วิจัยสามารถยกตัวอย่างพอสังเขปได้ดังต่อไปนี้

Ying et.al (2017) ทำการทดลองการกัดชิ้นงานวัสดุไทเทเนียมผสม โดยติดตั้งเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนความถี่ 35 กิโลเฮิรตซ์ ขนาดแอมพลิจูด 2 ถึง 6 ไมโครเมตรส่งการสั่นสะเทือนไปสู่เครื่องมือตัดในทิศทางแกนหมุน โดยปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยความเร็วตัด อัตรา

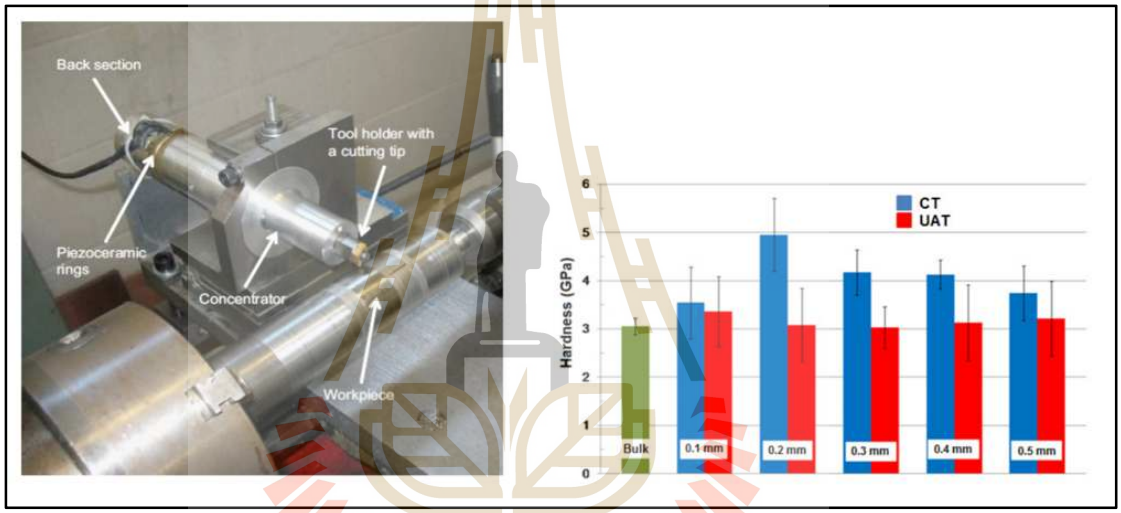
ป้อนต่อฟันตัด และความลึกในการตัดเฉือนในแต่ละการทดลอง ผลการวิจัยพบว่าค่าความแข็งผิวเพิ่มขึ้นเมื่อแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น พลังงานจากการกระแทกของคมตัดที่มีต่อชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากผลการวัดแรงจากไดนาโมมิเตอร์ นอกเหนือจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งผิวมีแนวโน้มที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยของปัจจัยในการตัดเฉือนอื่นๆ รูปแบบการทดลองและผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 การกัดชิ้นงานวัสดุไทเทเนียมผสมโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค (a) วิธีการทดลอง (b) ความสัมพันธ์ของระดับปัจจัยต่อความแข็งผิว Ying et.al (2017)

Abdullah et al.(2009) ได้ทำการวัดคุณภาพผิววัสดุซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-CO) หลังจากผ่านกระบวนการใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการกัดชิ้นงานด้วยไฟฟ้า (electrical discharge machining; EDM) พบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่เครื่องมือตัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการกัดผิวสุดท้าย ส่งผลให้ความหนาของบริเวณกระทบร้อน (Heat effected zone; HAZ)และรีแคสท์เลเยอร์ (Recast Layer) มีขนาดบางลง รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นตามแนวขวางบนผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่ลดลง ตลอดจนความแข็งของผิวที่ทำการกัดมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการกัดด้วยไฟฟ้าแบบทั่วไป

Vadim et.al (2014) ทดลองการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในกระบวนการกลึงวัสดุไทเทเนียม เกรด 1533 โดยใช้ความถี่20 กิโลเฮิรตซ์และขนาดแอมพลิจูดประมาณ 13 ไมโครเมตร การสั่นสะเทือนส่งผ่านไปสู่คมตัดที่ยึดอยู่ที่ปลายของทรานส์ดิวเซอร์และกระทำกับชิ้นงานกลึงในทิศทางตั้งฉาก เครื่องมือตัดทำการตัดเฉือนเนื้อวัสดุด้วยความเร็วตัด 10 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราป้อน0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งผิวของกระบวนการกลึงโดยคมตัดที่มีการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคนั้น มีค่าน้อยกว่าการกลึงแบบทั่วไปร้อยละ 12และยังสังเกตได้ว่า ค่าความแข็งผิวนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของการตัดเฉือนรูปแบบการทดลองและผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 การกลึงชิ้นงานวัสดุไทเทเนียมผสมโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค (a) วิธีการทดลอง (b) ความสัมพันธ์ของระดับปัจจัยต่อความแข็งผิว Vadim et.al (2014)

2.8) การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

เซอร์โรนอล เอ.ฟิชเจอร์ (Sir Ronald A. Fisher) เป็นผู้คิดค้นการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลอง และเป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในปี ค.ศ.1993 การออกแบบการทดลองได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและกระบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก กลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้รับประโยชน์อย่างมากในการใช้การออกแบบการทดลองสำหรับงานพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต

นอกจากนี้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำและอิเล็กทรอนิกส์ยังได้มีการนำเอาวิธีการทดลองนี้ไปใช้งาน และประสบความสำเร็จอย่างมากเช่นกัน หลายปีที่ผ่านมาความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในสหรัฐอเมริกามีมากขึ้น เพราะอุตสาหรรมในอเมริกาจำนวนมากพบว่าคู่แข่งทางการค้าอยู่ในทวีปอื่น ๆ ซึ่งได้ใช้การออกแบบการทดลองมาเป็นเวลานานแล้ว และวิธีการออกแบบการทดลองนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จทางด้านการแข่งขัน

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experimental) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปข้อมูลที่สมเหตุสมผลได้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวที่นำมาในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งที่สำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลอง ก็คือการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสามนั้น ขึ้นอยู่กับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้และหลักพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1) เรพลิเคชั่น (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำเรพลิเคชั่น มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก เรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาด กลายเป็นหน่วยของการชี้วัดขั้นพื้นฐานสำหรับการพิจรณาว่าความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมวลผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมวลผลกระทบนี้

2) แรนดอมไมเซชั่น (Randomization) เป็นหลักพื้นฐานสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง และลำดับของการออกแบบการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random)วิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระแรนดอมไมเซชั่นซึ่งจะทำให้สมมุติฐานนี้ปืนจริง การทดลองแรนดอมไมเซชั่นทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3) บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

แนวทางในการออกแบบการทดลอง การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทดลองต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจำวิเคราะห์ข้อมูลนั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1) ทำความเข้าใจถึงปัญหา จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบางครั้งจะต้องหาอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การเข้าใจปัญหาอย่างชัดเจนเป็นผลอย่างมากต่อการหาคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น

2) การเลือกปัจจัยระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรือจากทฤษฎี ความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรจะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกันในการทดลองเพื่อกรองปัจจัย เราควรกำหนดขอบเขตให้กว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตของปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราทราบว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก็อาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

3) เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบนี้ผู้ทำการทดลองควรแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลที่เกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ หลายครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน หรือทั้งคู่ของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรผลตอบ ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่าอะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดค่าตัวแปรนั้นอย่างไร

4) เลือกการออกแบบการทดลอง เกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้การเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีการบล็อกหรือการใช้การแรนดอมไมเซชั่น ในการเลือกทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มแล้วว่าปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่จะเกิดขึ้น

5) การทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน หากมีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้น

เกี่ยวกับการทดลอง ถือว่าการทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนการทดลองในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทดลองเพื่อผลลัพธ์ และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบมาเป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมานั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการของการทดลองทางสถิติคือ การทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการติดสินใจมีเครื่องมือช่วยวัดประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการจะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกแบบมานั้นมีเหตุผลสนับสนุน และมีความน่าเชื่อถือ

7) สรุปและข้อเสนอแนะเมื่อได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในการปฏิบัติ และนำเสนอแนะแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องนำเสนอผลงานให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirming Testing) ควรทำขึ้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.8.1) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) คือการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกวางขวางในการออกแบบแผนการทดลองเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระกว่างปัจจัย หรือเรียกว่า “อันตรกริยา”(Interaction) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท

1) ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือผลกระทบที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

2) ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factors or 2-ways Interactions) คือผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยเป็นคู่พร้อมกัน (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกริยา) AB, BC และ AC

3) ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors or 3-ways Interactions) คือผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาสามปัจจัยพร้อมกันในที่นี้ ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC โดยทั่วไปผู้ทดลองจะให้ความสำคัญแก่การศึกษาผลกระทบหลัก ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นำยมนำมาพิจารณา

2.8.2) การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment)

การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับการศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และ 3 ระดับ เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยจั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ($k \geq 2$) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ต้องการศึกษาผลกระทบร่วม (Interaction) ผู้ทดลองจะใช้จำนวนของระดับปัจจัยกี่ระดับนั้นขึ้นกับความสำคัญของปัจจัย ปัจจัยที่วิกฤต (Critical Factor) หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาละเอียด จะใช้จำนวนระดับที่มีค่ามากในการทดลองเดียวกัน ผู้ทดลองไม่จำเป็นจะต้องทำการศึกษาปัจจัยแต่ละปัจจัยที่จำนวนระดับเท่ากับค่าจำนวนระดับที่ระบุจะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปกรณี 3 ปัจจัย มีตัวแบบสมการทางด้านสถิติเชิงเส้น (Lineal Statistical Model) คือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \qquad (2.17)$$

y_{ijkl} คือ ค่าตอบสนอง (Response) ของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j) ของการทดลองปัจจัย C ที่ระดับ kที่ทำการทดลองซ้ำครั้งที่ l ให้ i = 1,2 และ l = 1,2,…,n

μ คือ ค่าเฉลี่ยผลรวม (Grand Mean)

τ_i คือ ผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับ i ; i = 1, 2, …, a

β_j คือ ผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับ j ; j = 1, 2, …, b

γ_k คือ ผลกระทบของปัจจัย Cที่ระดับ k ; k = 1, 2, …, c

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อันตรกริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ อันตรกริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย Cที่ระดับ k

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ อันตรกริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย Bที่ระดับ j และปัจจัย Cที่ระดับ k

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ อันตรกริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ iปัจจัย B ที่ระดับ jและปัจจัย C ที่ระดับ k

ε_{ijkl} คือ ค่าผิดพลาดของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ kโดยทำการทดลองซ้ำ lรูปแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับหารออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลกรณี 3 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3วิเคราะห์ความแปรปรวนกรณี 3 ปัจจัย

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares; MS	F-value
A	SS_A	a-1	MS_A	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b-1	MS_B	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	c-1	MS_C	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	(a-1) (b-1)	MS_{AB}	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	(a-1) (c-1)	MS_{AC}	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	(b-1) (c-1)	MS_{BC}	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	(a-1) (b-1) (c-1)	MS_{ABC}	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	abc (n-1)	MS_E	
Total	SS_T	Abcn-1	MS_T	

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} y_{ijkl}^{2} - \frac{y^2}{abcn} \quad (2.18)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{a}\frac{y_{i...}^{2}}{bcn} - \frac{y^2_{...}}{abcn} \quad (2.19)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^{b}\frac{y_{.j.}^{2}}{abcn} - \frac{y^2_{...}}{abcn} \quad (2.20)$$

$$SS_C = \sum_{k=1}^{c}\frac{y_{..k}^{2}}{abcn} - \frac{y^2_{...}}{abcn} \quad (2.21)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\frac{y_{ij\ldots}^{2}}{cn} - \frac{y^{2}_{\ldots}}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (2.22)$$

$$SS_{AC} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{c}\frac{y_{i.k}^{2}}{bn} - \frac{y^{2}_{\ldots}}{abcn} - SS_A - SS_c \quad (2.23)$$

$$SS_{BC} = \sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\frac{y_{.jk}^{2}}{an} - \frac{y^{2}_{\ldots}}{abcn} - SS_B - SS_c \quad (2.24)$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\frac{y_{ijk}^{2}}{an} - \frac{y^{2}_{\ldots}}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} \quad (2.25)$$

$$SS_E = SST - SS_{subtotals(ACB)} \quad (2.26)$$

$$SS_{Subtotals(ABC)} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\frac{y_{ijk}^{2}}{n} - \frac{y^{2}_{\ldots}}{abcn} \quad (2.27)$$

2.8.3) การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Experimental Performing)

1) การตรวจสอบว่ามีการกระจายของแบบปกติหรือไม่โดยใช้ Normal Probability Paper หรือฮิสโตแกรมทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือ และค่าความถี่สะสมว่าเป็นแบบเส้นตรงหรือไม่ ถ้าเป็นแบบเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

2) การตรวจสองความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภาพการกระจายทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือและค่าลำดับการสุ่มว่าสามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ ถ้าทุกจุดของข้อมูลไม่สามารถคาดการณ์ได้ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของการแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภาพการกระจาย ทดสอบโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปฏิบัติ (Treatment) และเศษเหลือ ว่ากราฟมีความสูงสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้ากราฟของแต่ละการปฏิบัติมีความสูงไม่แตกต่างกันแสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำสเมอของความแปรปรวน

2.8.4) การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2)

เป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ และแสดงผลว่าข้อมูลได้รับการเก็บรวบรวมภายใต้สภาวะการควบคุมตามแบบการทดลองแล้วจะทำการวิเคราะห์ค่า R^2ทั้งหมดของข้อมูลในรูป SS_Tว่าเกิดความแปรปรวนจากทรีตเมนต์เท่าใด หาได้จากสามการที่ 2.35

$$R^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้}}{\text{ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล}} \quad (2.28)$$

ซึ่งถ้าค่า R^2ออกมาต่ำสามารถแก้ไขได้โดย

1) เพิ่มจำนวนการทำซ้ำโดยเพิ่มชิ้นงานในการทดสอบมากขึ้น
2) ตรวจสอบว่ามีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องหรือไม่ ถ้ามีการออกแบบการทดลองใหม่
3) ถ้าเพิ่มจำนวนทำซ้ำแล้วค่า R^2ยังคงที่อยู่ ควรจะทำการบล็อกเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.8.5) การวิเคราะห์ความแประปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

เป็นการหาความแปรปรวนโดยรวมแล้วแยกความแปรปรวนเนื่องจาก ทรีตเมนต์ และความแปรปรวนที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่ง หมายถึง รีพีททะบิลิตี้ (Repeatability) แล้วพิจารณาเทอมความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่ เมื่อเทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขการทดลองหรือรีโปรดิวซิบิลิตี้

2.9 ทฤษฎีการวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การการถดถอยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณหรือพยากรณ์ค่าของตัวแประตามจากตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องการวิเคราะห์การถดถอยมีด้วยกันหลายประเภท ขึ้นกับลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ซึ่งโดยทั่วไปการวิเคราะห์การถดถอยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1)การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่มีลักษณะความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามเป็นแบบเส้นตรงการวิเคราะห์เชิงเส้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1.1)การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว ประกอบด้วยตัวแปรตาม Y จำนวนหนึ่งตัว และตัวแปรอิสระ x จำนวนหนึ่งตัวแปร และสร้างรูปแบบสมการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นได้ดังสมการ (2.29)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.29)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตาม (Dependent variable)

X คือ ตัวแปรอิสระ (Independent variable)

β_0 คือ เป็นระยะตัดแกน y หรือค่าเริ่มต้นของเส้นสมการถดถอย

β_1 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient)

ε คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

1.2) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (MultipleLinearRegressions)การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม Y จำนวนหนึ่งตัวแปร และตัวแปรอิสระ X จำนวนสองตัวแปรขึ้นไปและสร้างรูปแบบสมการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหคูณสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นได้ดังสมการ (2.30)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon \qquad (2.30)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตาม (Dependent variable)

X คือ ตัวแปรอิสระ (Independent variable)

β_0 คือ เป็นระยะตัดแกน y หรือค่าเริ่มต้นของเส้นสมการถดถอย

$\beta_1 - \beta_n$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ n

ε คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

โดยที่ค่าβ_iเป็นค่าที่แสดงว่าเมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนไป 1หน่วยจะทำให้ตัวแปรตามเปลี่ยนแปลงไปเท่าใด ขณะที่ตัวแปรอิสระตัวอื่นๆ มีค่าคงที่

2)การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Regression Analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่มีลักษณะความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามไม่เป็นเชิงเส้น หรือเป็นแบบเส้นโค้ง ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม จะเริ่มจากการสร้างแผนภาพการกระจาย (Scatter Plot) เพราะแผนภาพการกระจายจะเป็นแนวทางให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง เป็นแบบเส้นตรงหรือเส้นโค้ง กรณีที่ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงจะวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงดังที่กล่างมาแล้วข้างต้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร x กับตัวแปร y ดังภาพประกอบ 2.39ก)กรณีที่ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นโค้ง จะวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นโค้ง ดังภาพประกอบ 2.39ข) ซึ่งการถดถอยแบบเส้นโค้งอาจแบ่งออกเป็นหลาย

รูปแบบ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมทั่วไปจะพิจารณารูปแบบการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลิโนเมียล (Polynomial Regression) ลำดับที่ p ซึ่งมีรูปแบบสมการดังสมการ (2.31)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \cdots + \beta_p x^\rho + \varepsilon \quad (2.31)$$

โดยที่ y คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

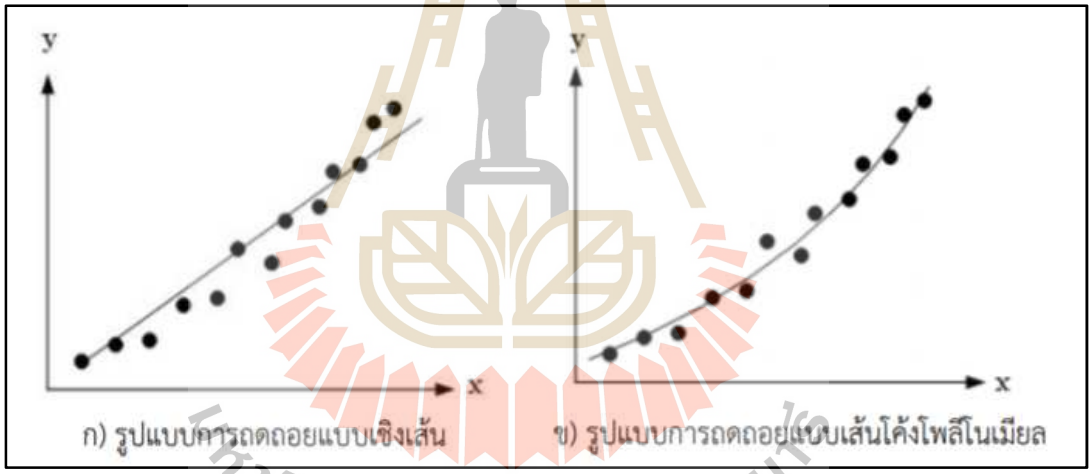
x คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)

β_0 คือ เป็นระยะตัดแกน y หรือค่าเริ่มต้นของเส้นสมการถดถอย

$\beta_1 - \beta_p$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ p

p คือ เลขชี้กำลังสูงสุดของสมการพลีโนเมียล

ε คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม



รูปที่ 2.39 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย

กรณีรูปแบบการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียลที่มีตัวแปรอิสระ 1 ตัวสามารถแสดงรูปแบบทั่วไปที่มีสามการกำลังสอง (Quadratic Model) มีรูปแบบดังสาการ (2.32) และสมการกำลังสาม (Cubic Model) มีรูปแบบดังสมการ (2.33)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon \quad (2.32)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \varepsilon \quad (2.33)$$

การทดสอบทางสถิติที่อธิบายความสอดคล้องและความเหมาะสมกับข้อมูลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทดสอบด้วยวิธีการดังนี้

1) การทดสองความเหมาะสมของโมเดล เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันหรือไม่ จะใช้สถิติทดลอง ANOVA

2) การทดสอบค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยทีละตัวโดยใช้สถิติทดสอ t

3) พิจาณาค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ (Standard error of estimate)

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากปริทัศวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 นำมาสู่วิธีการดำเนินงาน เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

3.1วัสดุ

3.2เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.3การติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค

3.4การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง

3.5การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล

3.6การดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์เชิงพยากรณ์

3.7การวิเคราะห์แรงตัด

3.8การวิเคราะห์ความหยาบผิว

3.9การวิเคราะห์ความแข็ง

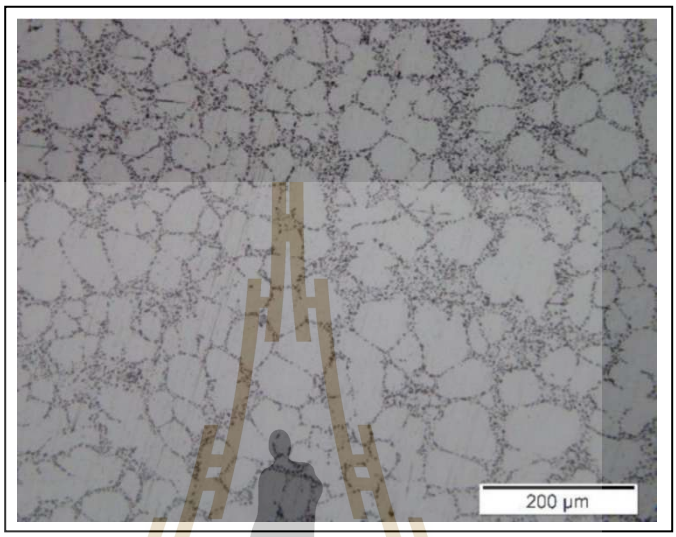
3.10แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัยคือ อลูมิเนียมหล่อเกรดA356ชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ประกอบด้วยขั้นตอนการอบละลาย (Solution treatment) ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส และ 540 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสα-Al แบบก้อนกลม (Globular structure) ล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติกซิลิกอน (Eutectic Silicon) กระจายตามขอบเกรนของเฟส α-Alส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสามารถแสดงดังตารางที่ 3.1และรูปที่ 3.1 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
7.18	0.215	0.108	0.0197	0.0045	0.0089	0.112	Bal.



รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356

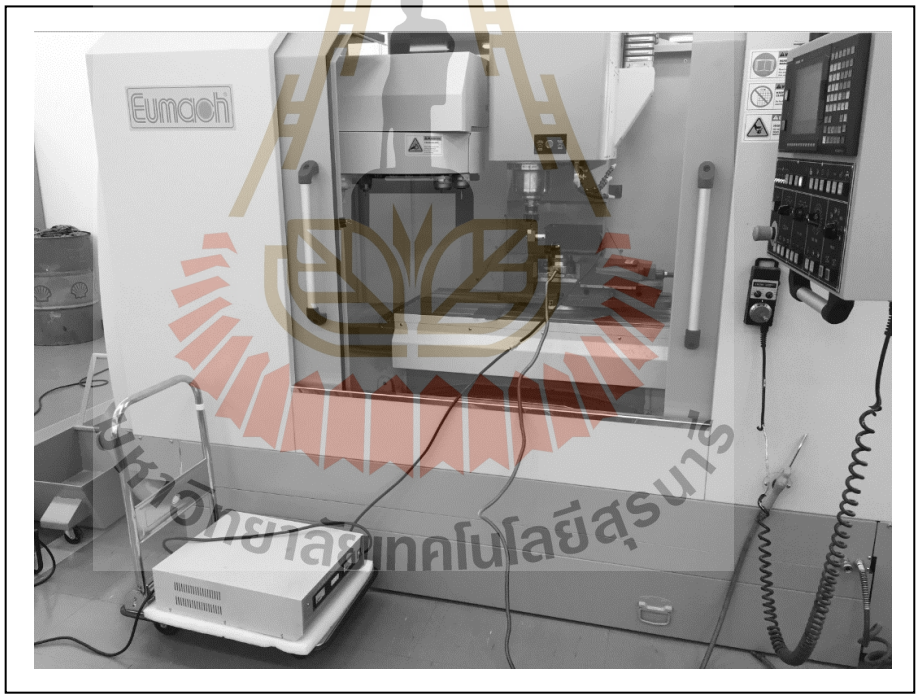
วัสดุชิ้นงานสำหรับการทดลองถูกขึ้นรูปโดยการตัดเฉือนให้มีขนาด 10 x 50 x 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว x ความสูง) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 วัสดุชิ้นงานอลูมิเนียม A356 สำหรับการทดลอง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องกัด

เครื่องกัดซีเอ็นซีแกนตั้งยี่ห้อ EUMACH รุ่น LMC1020ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นเครื่องจักรอัตโนมัติที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อนให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปหาเครื่องมือตัดเพื่อให้เกิดการตัดเฉือนวัสดุให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการเครื่องกัดซีเอ็นซีนี้จะใช้การป้อนคำสั่ง G Code เพื่อกำหนดขั้นตอนการทำงาน การเลือกใช้เครื่องมือตัด การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ การควบคุมอัตราการป้อน และความเร็วรอบซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองข้อมูลจำเพาะของเครื่องกัดมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 8,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนสูงสุด 7,000 มิลลิเมตรต่อนาทีมีความเที่ยงตรงและความละเอียดในการขึ้นรูปในระดับ 8 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องกัดซีเอ็นซี EUMACH รุ่น LMC1020

3.2.2 เครื่องมือตัด

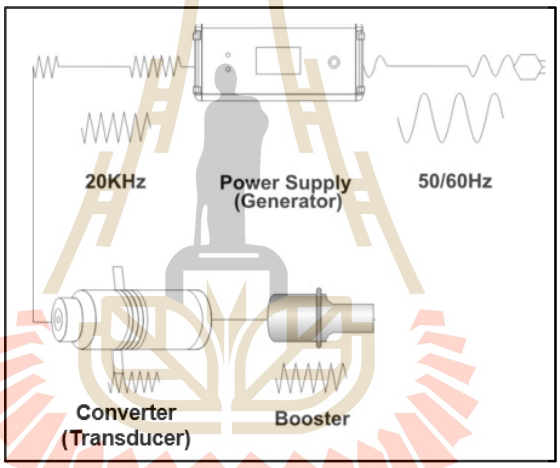
เครื่องมือตัดประเภทดอกกัดเอ็นมิลล์ (Endmill) รุ่น EAPAS2060-SD ผลิตจากบริษัท Mitsubishiวัสดุเครื่องมือตัดทำจากวัสดุคาร์ไบด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนยก์ลางของเครื่องมือตัดที่6มิลลิเมตรชุบผิวด้วย DLC (Diamond like carbine) ขนาดของมุมเกลียว(Helix angle) ที่ 30 องศาดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 ดอกกัดเอ็นมิลล์(End mill) Mitsubishi รุ่น EPAS2060-SD

3.2.3 เครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค

เครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคUCE Ultrasonic ดังแสดงในรูปที่ 3.5มีกำลังขับ 15 กิโลวัตถ์ เชื่อมต่อกับทรานส์ดิวเซอร์ที่มีบูสเตอร์ประกอบอยู่ในตัว กระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำถูกส่งไปยังเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าความถี่สูง จากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะถูกทรานส์ดิวเซอร์ซึ่งมีองค์ประกอบภายในทำมาจากวัสดุเปียโซอิเล็คทริกทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นการสั่นสะเทือนทางกลบูสเตอร์ทำหน้าที่ขยายขนาดแอลพลิจูดของการสั่นสะเทือนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและส่งผ่านให้กับชิ้นงานทดลอง ไดอะแกรมการทำงานเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคแสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค UCE Ultrasonic

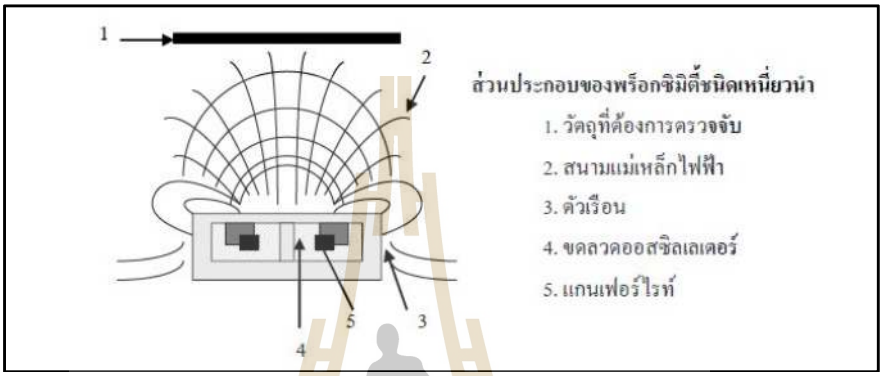


รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมการทำงานเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 เซนเซอร์สำหรับวัดความถี่และแอมพลิจูด

พร้อกซิมิตี้เซนเซอร์ชนิดเหนี่ยวนำ(Inductive proximity sensor) ใช้ในการวัดแอมพลิจูดของชิ้นงานที่เกิดจากการสั่นด้วยการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค โครงสร้างของเซนเซอร์ประกอบด้วย สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ขดลวดออสซิลเลเตอร์ ตัวเรือน และแกนเฟอร์ไรท์ ทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นจากวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยกำเนิดสัญญาณส่งให้ขดลวดซึ่งพันอยู่บนแกนเฟอร์ไรท์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณด้านหน้าของอุปกรณ์ เรียกบริเวณนี้ว่า "ส่วนตรวจจับ" เมื่อมีวัตถุเป้าหมายซึ่งต้องเป็นโลหะเท่านั้นเคลื่อนที่เข้ามาบริเวณ

ส่วนตรวจจับ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำในวัตถุที่ต้องการตรวจจับ ทำให้เกิดมีกระแสไหลวน(eddy current) ขึ้นภายในวัตถุ หรือวัตถุเป้าหมายทำการดูดซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งที่วัตถุเป้าหมายได้ดูดซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจนหมด หรือเกิดการเหนี่ยวนำมากที่สุด วงจรออสซิลเลเตอร์จะหยุดทำงาน จากนั้นวงจรทริกเกอร์จะทำงานและให้สัญญาณทางด้านเอาต์พุตออกมา ส่วนประกอบของพร็อกซิมิตี้เซนเซอร์ชนิดเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 3.7



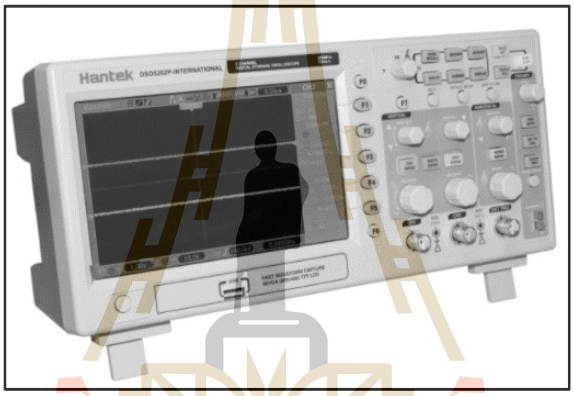
รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบและลักษณะการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเซนเซอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (นวภัทรา และ ทวีพล, 2555)

ในการวิจัยนี้ เซนเซอร์ชนิดเหนี่ยวนำKeyence EX - 110V และคอนโทรลเลอร์ Keyence EX-V02ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ถูกนำมาใช้ในการวัดความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน สามารถวัดระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นงานโดยปราศจากการสัมผัสความถี่ในการวัดข้อมูล 40,000 ครั้งต่อวินาที และความละเอียดของการวัด0.4 ไมโครเมตร ค่าของระยะที่วัดได้สามารถแสดงบนมอนิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์หรือส่งผ่านเอ้าพุตโวลเทจ (Output voltage) ให้กับอุปกรณ์แสดงผลของสัญญาณในรูปแบบอื่นๆได้

รูปที่ 3.8 เซนเซอร์สำหรับวัดความถี่และแอมพลิจูด

3.2.5 ออสซิลโลสโคป

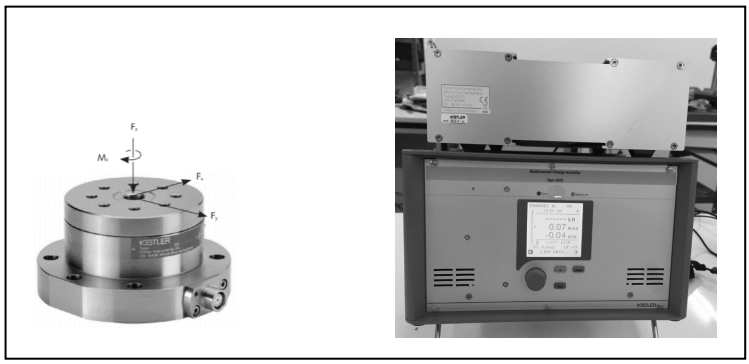
ดิจิตอลออสซิลโลสโคป Hantek รุ่น DSO5202P ดังแสดงในรูปที่ 3.9เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดสัญญาณไฟฟ้า คลื่นไฟฟ้า ค่าแรงดันของไฟฟ้า ความถี่ เฟส และคาบเวลาของสัญญาน โดยมีอัตราการสุ่มตัวอย่าง 25ล้านครั้งต่อวินาที ช่วงของการวัดสัญญาณ (Bandwidth)200 เมกะเฮิรตซ์และแสดงผลการวัดผ่านทางหน้าจอเอลซีดี ในงานวิจัยนี้ออสซิลโลสโคปถูกใช้ในการเชื่อมต่อกับคอนโทรลเลอร์ของชุดเซนเซอร์วัดความถี่และแอมพลิจูดเพื่อแสดงเอ้าพุตของสัญญานไฟฟ้าในรูปแบบของคลื่นซายน์ (Sine wave) และเอฟเอฟที (FFT) เพื่อระบุค่าความถี่และแอมพลิจูดของชิ้นงานที่ได้รับการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค



รูปที่ 3.9 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป Hantek รุ่น DSO5202P

3.2.6 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัดเฉือน

ไดนาโมมิเตอร์ KISTLER รุ่น 9272 เป็นอุปกรณ์วัดแรงเชิงกลแบบเปียโซอิเลคทริคเซนเซอร์ที่สามารถวัดแรงได้ 4แนวแกนโดยมีแกน X แกน Y แกน Z และโมเมนรอบแกน Z สามารถรับแรงสูงสุดในแต่ละทิศทาง 5 กิโลนิวตันโดยมีหลักการทำงานของอุปกรณ์คือ เมื่อแรงกระทำต่อเปียโซอิเลคทริคจะส่งผลให้เกิดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นกระแสไฟฟ้าถูกส่งผ่านไปยังชุดแปลงและขยายสัญญาณ (KISTLERChargeAmplifier รุ่น 5070A)และ DAQ system รุ่น 5697A1 หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่านชุดประมวลผลที่เครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์Dyno Ware เพื่อแสดงข้อมูลของแรงที่เกิดขึ้นโดยสามารถกำหนดอัตราการสุ่มข้อมูล 100,000 ข้อมูลต่อวินาทีเครื่องวัดแรงตัดเฉือน KISTLER Dynamometerและชุดขยายสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดแรงตัดเฉือน KISTLER Dynamometer

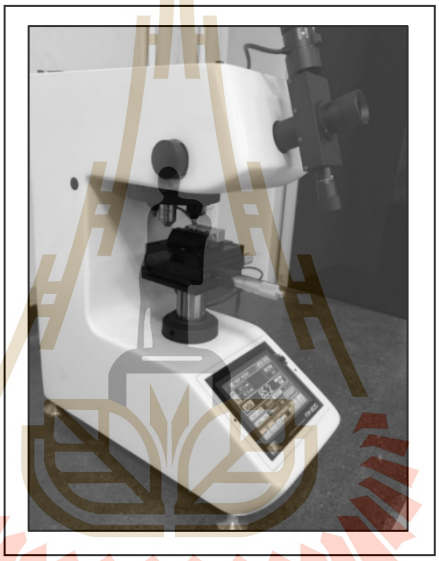
3.2.7 เครื่องวัดความหยาบผิว

เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น Surf Test SJ-210 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงาน มีหลักการทำงานโดยมีหัวโพรบ (Probe) ที่ปลายหัววัดเคลื่อนที่บนผิวชิ้นงานที่ต้องการ ในการวิจัยนี้ใช้ค่าความหยาบผิว (Roughness average; Ra) ที่หาได้จากค่าเฉลี่ยเลขคณิตของพื้นที่ยอดแหลมที่อยู่เหนือและใต้เส้นกึ่งกลางต่อความยาวในการวัด โดยหน่วยวัดมีขนาดเป็นไมโครเมตร (μm)

รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น Surf Test SJ-210

3.2.8 เครื่องมือวัดค่าความแข็งผิวงาน

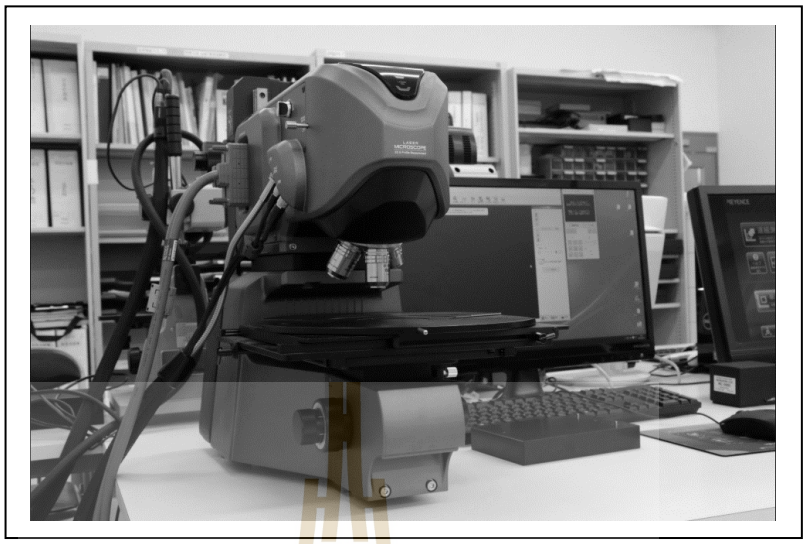
Micro Vickersรุ่น FM-800เป็นเครื่องวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ โดยมีหลักการทดสอบคือใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก กดลงไปที่ผิววัสดุด้วยการควบคุมน้ำหนักกดและเวลา ค่าความแข็งที่วัดได้คำนวนจากขนาดของรอยกดที่ส่งผลจากน้ำหนักของแรงกดที่กระทำต่อพื้นที่และการเปลี่ยนรูปของวัสดุชิ้นงาน การวัดขนาดของรอยกดจะใช้ไมโครสโคปของเครื่องทำหน้าที่ระบุขนาดรอยกดที่วัดได้และประมวลผลออกมาที่หน้าจอมอนิเตอร์ของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ

3.2.9 กล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการแสกน

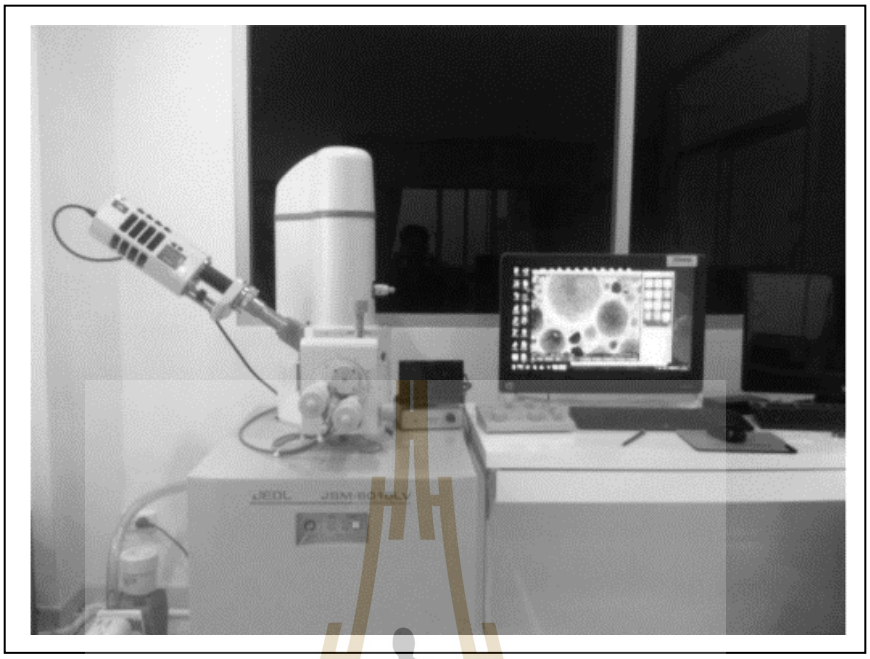
กล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอล(Confocal microscope) ชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการแสกน มีหลักการทำงานคือ เก็บสัญญาณแสงจากจุดโฟกัสทีละจุดแล้วนำสัญญาณทั้งหมดมาสร้างเป็นภาพด้วยการประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสามารถกำหนดความถี่ความละเอียดในการเก็บสัญญาณภาพควบคุมโฟกัสระดับความลึกในแต่ละระดับและสามารถสร้างภาพ 3 มิติของวัตถุที่ซับซ้อนขึ้นมาได้กล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอล(Confocal microscope) ชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการแสกน ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์

3.2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ScanningElectron Microscope;SEM) JSM รุ่น6010LVเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดยอาศัยหลักการปล่อยคลื่นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงส่องกราดไปบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบ ในขณะเดียวกันขนาดของลำอิเล็คตรอน (Electronbeam)จะถูกควบคุมด้วยเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และปรับโฟกัสด้วยเลนส์วัตถุ (Objective lens)สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ(detector) แล้วส่งไปประมวลผลเพื่อสร้างภาพในแนวระนาบและแนวลึกบนจอภาพต่อไปเครื่อง SEM JSM รุ่น 6010LVมีกำลังขยายอยู่ในช่วง 8-300,000เท่า มีความละเอียดในระดับ5นาโนเมตร สามารถใช้ในการบ่งชี้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวและข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

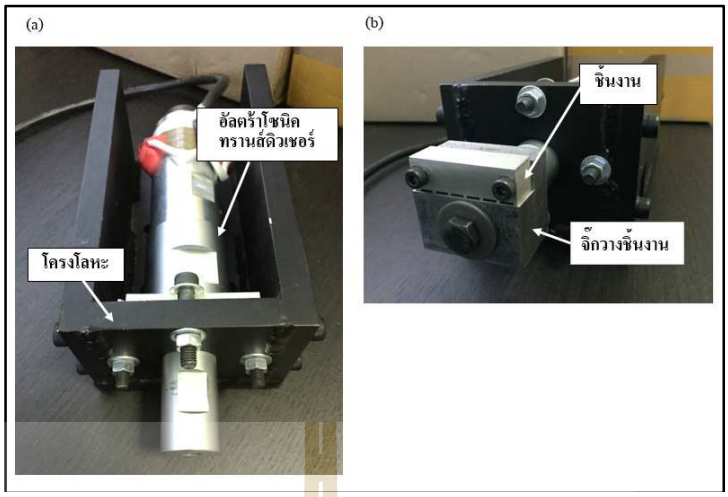


รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดSEMJSM รุ่น 6010LV

3.3 การติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดการสั่นสะเทือนอัลตราโซนิค

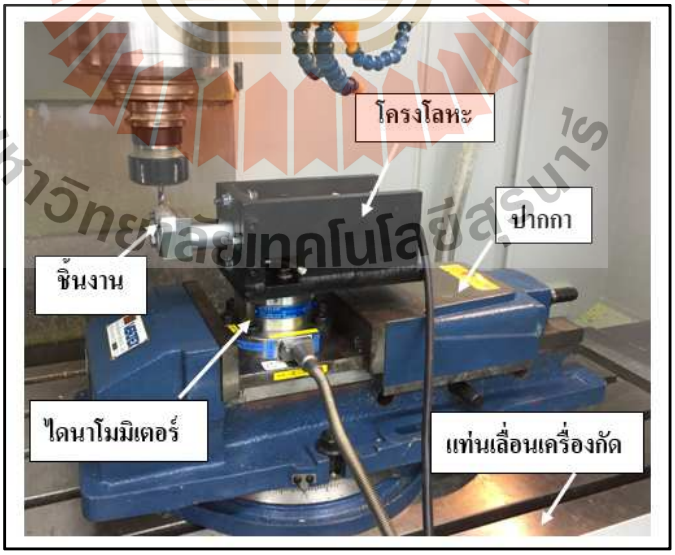
การทดลองประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับชิ้นงานในการกัดมีขั้นตอนการเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้

1) ประกอบอัลตร้าโซนิคทรานส์ดิวเซอร์เข้ากับโครงโลหะด้วยสกรูขนาด M6 จำนวน 4 ชิ้น หลังจากนั้นขันยึดอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง (Jig) เข้ากับปลายบูสเตอร์ของอัลตร้าโซนิคทรานส์ดิวเซอร์ด้วยสกรูขนาด M10 จำนวน 1 ชิ้น และขันยึดชิ้นงานอลูมิเนียม A356 ที่มีขนาด10 x 50 x 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว x ความสูง) เข้ากับอุปกรณ์กำหนดตำแหน่ง ด้วยสกรูขนาด M5 จำนวน 2 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การติดตั้งทรานส์ดิวเซอร์เข้ากับโครงโลหะและประกอบกับชิ้นงาน

2) ประกอบชุดโครงโลหะที่มีทรานส์ดิวเซอร์เข้ากับอุปกรณ์วัดแรงตัดเฉือน KISTLER รุ่น 9272 โดยการยึดด้วยสกรูขนาด M8 จำนวน 8 ชิ้น หลังจากนั้นทำการจับยึดฐานของอุปกรณ์วัดแรงตัดเฉือนให้คงที่ด้วยปากกาที่ติดตั้งอยู่บนแท่นเลื่อนเครื่องซีเอ็นซีEUMACH รุ่น LMC1020 ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องซีเอ็นซี

3) เชื่อมต่อสายสัญญานทรานส์ดิวเซอร์เข้ากับชุดกำเนิดอัลตร้าโซนิค(Ultrasonic Generator)เพื่อให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงส่งผ่านเข้าสู่ทรานส์ดิวเซอร์และเกิดการสั่นสะเทือนที่ปลายบูสเตอร์ที่มีชิ้นงานยึดจับอยู่

4) เชื่อมต่อสายสัญญานของไดนาโมมิเตอร์KISTLER เข้ากับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ KISTLER Charger amplifier 5070A และเชื่อมต่ออุปกรณ์ขยายสัญญานเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB 2.0

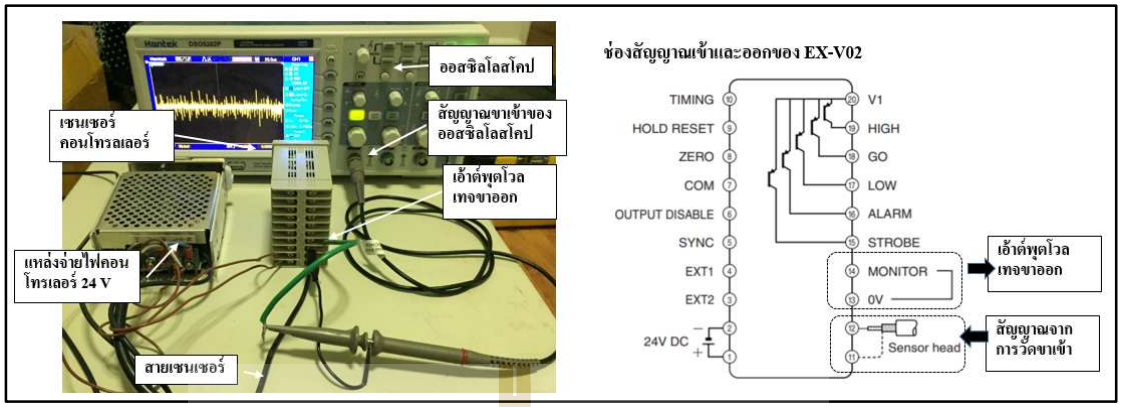
5) ติดตั้งโปรแกรมDyno wareType 2825A ลงในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้แสดงผลของแรงตัด โดยตั้งค่าอัตราการสุ่มข้อมูลที่มีความละเอียด60,000 ครั้งต่อวินาทีเพื่อให้โปรแกรมสามารถแสดงผลของการสั่นสะเทือนความถี่ 19 กิโลเฮิรตซ์ได้

6) ทำการวัดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคที่เกิดขึ้น โดยใช้เซนเซอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Inductive sensor)KEYENCE EX-110V เชื่อมต่อกับคอนโทรลเลอร์ KEYENCE EX-V02ส่งสัญญาณเอ้าพุตโวล์เทจ (Output voltage) ให้กับออสซิลโลสโคป HantekDSO5202P เพื่อทำการแสดงผลในรูปของคลื่นไฟฟ้าโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

6.1) กำหนดตำแหน่งเซนเซอร์ โดยติดตั้งห่างจากชิ้นงานในระยะไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.17 การติดตั้งเซนเซอร์ชนิดเหนี่ยวนำ

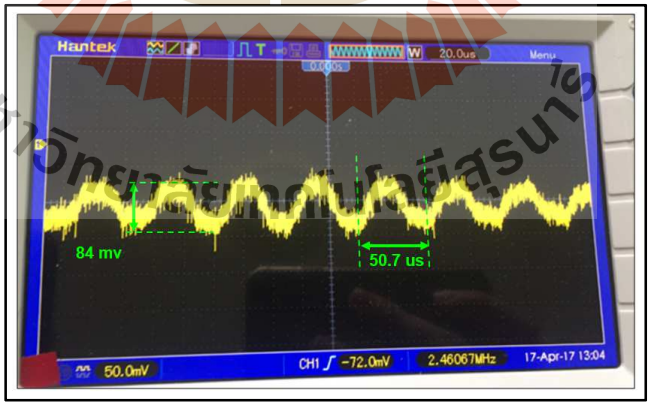
6.2) เชื่อมต่อช่องสัญญาณเอ้าต์พุตโวลเทจของคอนโทรลเลอร์ KEYENCE EX-V02 เข้ากับช่องสัญานขาเข้าของออสซิลโลสโคป Hantek DSO5202P เพื่อทำการแสดงผลในรูปของคลื่นไฟฟ้าวิธีการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างเซนเซอร์ไปออสซิลโลสโคป

6.3) ใช้ฟังชันก์ Output scaling ของคอนโทรลเลอร์ (ขั้นตอนในภาคผนวก ก) เพื่อกำหนดค่าเอ้าต์พุตโวลเทจต่อระยะการเคลื่อนที่ที่วัดได้โดยทำการกหนดที่สัดส่วน1 ไมโครเมตร แสดงเอ้าพุตโวลเทจที่7 มิลลิโวลล์

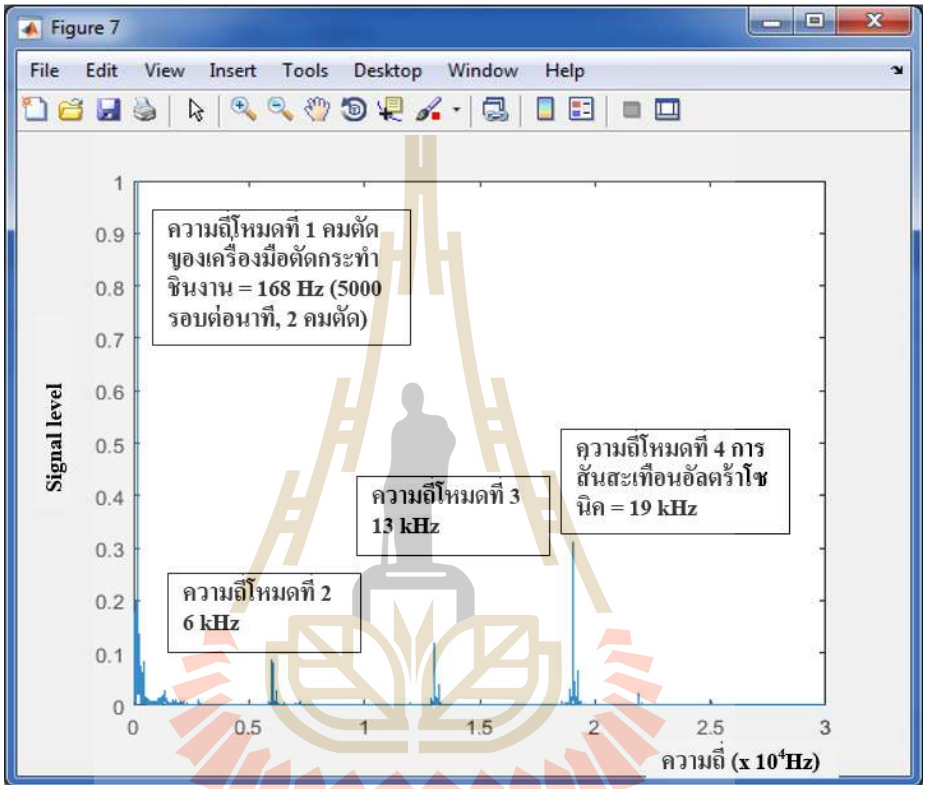
6.4) เปิดเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าแสดงผ่านหน้าจอของออสซิลโลสโคปมีขนาด 84 มิลลิโวลต์ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนจึงเท่ากับ 12 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.19 ค่าแรงดันไฟฟ้าของขนาดแอมพลิจูด

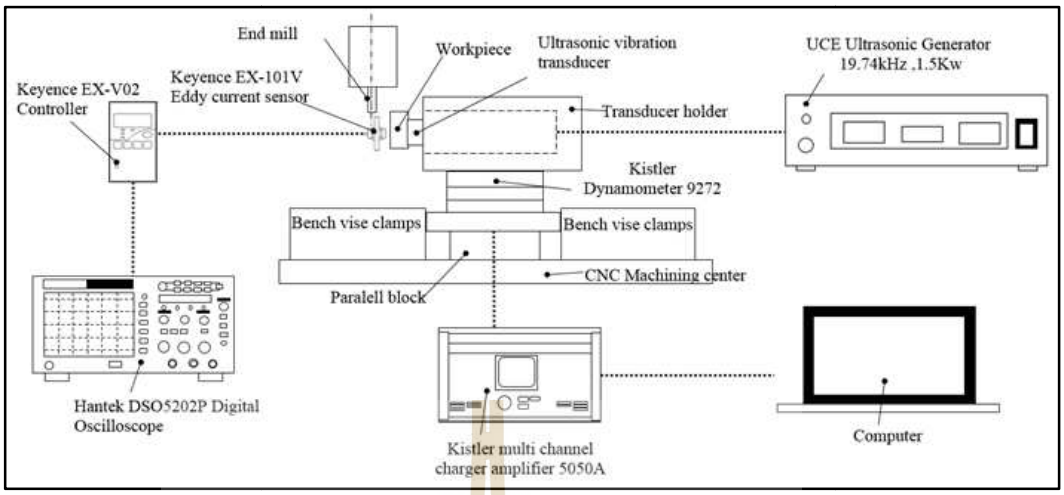
7. วิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)ในกระบวนการกัดโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคความถี่ 19 กิโลเฮิรตซ์ให้กับชิ้นงานโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ที่มีอัตราการสุ่ม

วัดข้อมูลที่ 60,000 ครั้งต่อวินาทีในการวัดข้อมูล และใช้โปรแกรม MATLAB ในการเปลี่ยนรูปข้อมูลให้อยู่ในรูปเอฟเอฟที (Fast Fourier Transform) พบว่า ความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีทั้งหมด 4 โหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.20



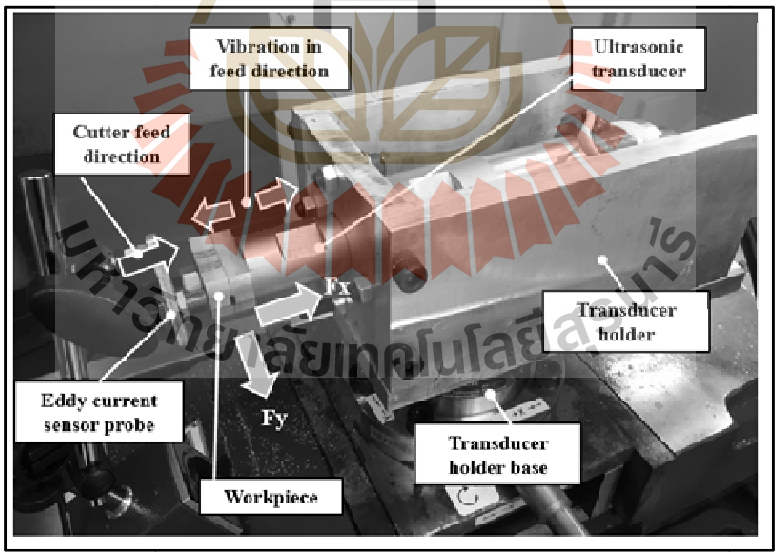
รูปที่ 3.20 แสดงแมกนิจูดความถี่ธรรมชาติ 4 โหมดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดที่ ประยุกต์ใช้แรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค (ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที)

จากขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ที่กล่าวมา สามารถแสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อดังรูปที่3.21 สำหรับทิศทางการสั่นสะเทือน การเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดและทิศทางของแรงตัดในระบบสามารถแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

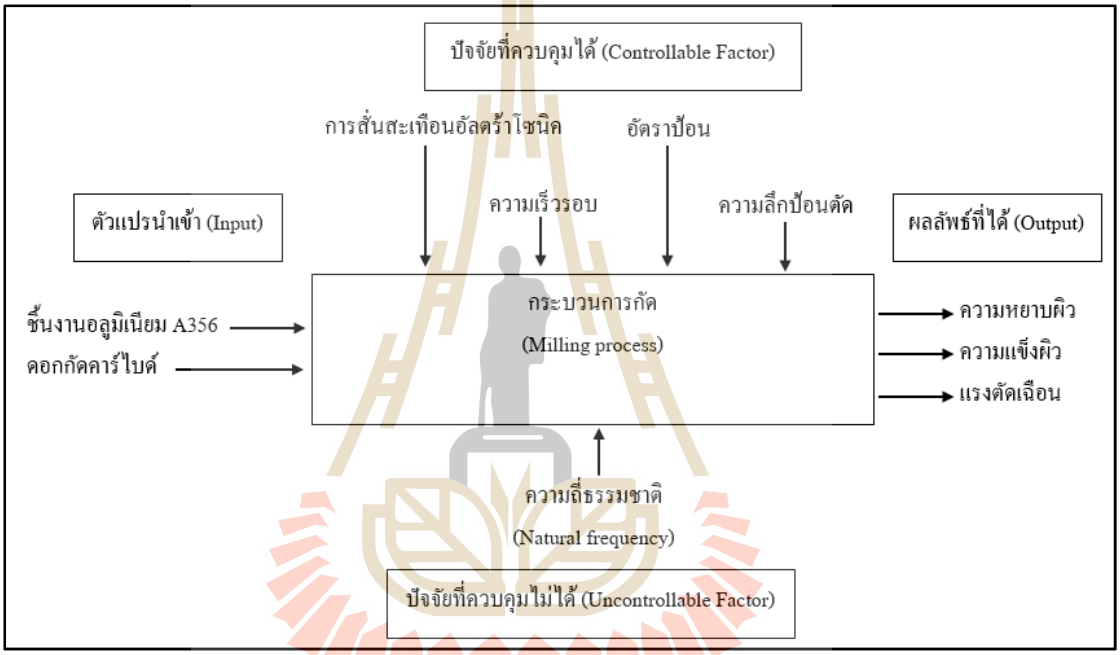
ทิศทางการสั่นสะเทือนของชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดและทิศทางของแรงตัดในระบบ สามารถแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด การสั่นสะเทือน และแรงที่วัดในระบบ

3.4 การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง

การพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในกระบวนการกัดจากงานวิจัยหลายๆงานวิจัย พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการกัดมีหลายปัจจัย ได้แก่ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความเร็วตัด ชนิดของเครื่องมือตัด ชนิดของวัสดุ การหล่อเย็น และความลึกในการป้อนตัด แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเวลา การปฏิบัติงาน และทรัพยากรที่มีในการวิจัย ผู้วิจัยได้คัดเลือกปัจจัยที่ควบคุมได้สำหรับงานวิจัย ดังแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในงานกัด

ตัวแปรตอบสนองซึ่งเป็นเป้าหมายในการหาสมการพยากรณ์ของการทดลองในงานวิจัยนี้มี 2 ตัวแปรคือค่าความหยาบผิว (Surface roughness, Ra) และค่าความแข็งผิว(Surface Microhardness, MH) ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัยได้แก่ ลักษณะของกระบวนการกัด(Milling condition, Mc) ความเร็วรอบ(Spindle speed, n) และอัตราป้อน (Feed rate, f)โดยปัจจัยที่หนึ่งคือลักษณะกระบวนการกัดเป็นปัจจัยที่มี2 ระดับคือกระบวนการกัดแบบทั่วไป (Conventional milling, CM) และการประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัด (Ultrasonic-assisted milling, UAM) ปัจจัยที่สอง คือ ความเร็วรอบ เป็นปัจจัยที่มี 3 ระดับคือ 3,0005,000 และ 7,000 รอบต่อนาที ปัจจัยที่สาม คือ อัตราการป้อน เป็นปัจจัยที่มี 3 ระดับคือ 50 200 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที

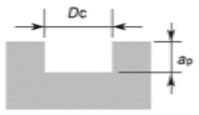
ในการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดอลูมิเนียม A356ผู้วิจัยได้อ้างอิงข้อแนะนำพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนสำหรับการใช้ดอกกัดเอ็นมิลล์คาร์ไบด์Mitsubishi รุ่น EPAS2060-SD ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สำหรับการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อจากผู้ผลิตดังแสดงในตารางที่ 3.2ข้อแนะนำความเร็วรอบและอัตราป้อนสูงสุดในการกัดร่องที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตร ในสภาวะไม่มีการหล่อเย็นอยู่ที่ 11,000 รอบต่อนาทีและ850 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ สามารถคำนวณเป็นอัตราป้อนต่อฟันตัดได้เท่ากับ39 ไมโครเมตรต่อฟันตัด

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการทดลองในสภาวะที่มีโหลดสูงเพื่อค่าแรงตัดมีค่าที่ชัดเจนรวมจนถึงข้อจำกัดเครื่องกัดซีเอ็นซีที่ใช้ในการวิจัยมีความเร็วรอบสูงสุด8000 รอบต่อนาที จึงเพิ่มความลึกในการกัดร่องเป็นสองเท่าคือ1 มิลลิเมตรแต่กำหนดความเร็วรอบกับอัตราป้อนให้มีสัดส่วนลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของข้อแนะนำโดยกำหนดความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาทีและกำหนดอัตราป้อน 400มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อคำนวณเป็นอัตราป้อนต่อฟันตัดของทุกๆระดับปัจจัยการทดลองจึงอยู่ในช่วง 4-67 ไมโครเมตรต่อฟันตัด

ตารางที่ 3.2 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองที่มีความเร็วตัดและอัตราการป้อนต่อฟันตัดอยู่ในขอบเขตของข้อแนะนำ

被削材 Work	1 アルミニウム合金展伸材 A5052,A7075等, etc. Expanded aluminum alloy material		2 アルミニウム合金鋳物 AC4A,ADC12等, etc. Cast aluminum alloy material		3 銅合金 C1100等, etc. Pure copper		4 樹脂 アクリル等 Resin, Acrylic, etc.	
外径Dc Mill dia. (mm)	回転数 n min⁻¹	送り速度 vf mm/min	回転数 n min⁻¹	送り速度 vf mm/min	回転数 n min⁻¹	送り速度 vf mm/min	回転数 n min⁻¹	送り速度 vf mm/min
4	19,000	1,100	16,000	750	8,750	550	8,750	650
6	13,000	1,200	11,000	850	5,800	530	5,800	580
8	9,500	1,300	8,000	900	4,300	600	4,300	620
10	7,600	1,300	6,400	900	3,500	600	3,500	620
12	6,400	1,300	5,300	900	3,000	610	3,000	660

切込み量 Depth of cut (mm)



WET切削：$a_p \leq 1Dc$
DRY切削：$a_p \leq 0.5Dc$

3.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

เพื่อศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว ความแข็งผิว ตลอดจนการสร้างสมการพยากรณ์ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป โดยมี 3 ปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่มี 2 ระดับ 1 ปัจจัย และปัจจัยที่มี 3 ระดับ 2ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 3.3ผลการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ของความหยาบผิวและความแข็งผิว โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α= 0.05)

ตารางที่ 3.3ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

ลำดับการทดลอง (Exp. No.)	ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง		
	A	B	C
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน
1	CM	3000	50
2	CM	3000	200
3	CM	3000	400
4	CM	5000	50
5	CM	5000	200
6	CM	5000	400
7	CM	7000	50
8	CM	7000	200
9	CM	7000	400
10	UAM	3000	50
11	UAM	3000	200
12	UAM	3000	400
13	UAM	5000	50
14	UAM	5000	200
15	UAM	5000	400
16	UAM	7000	50
17	UAM	7000	200
18	UAM	7000	400

3.6 การดำเนินการทดลอง

1) กำหนดจุดอ้างอิงของเครื่องมือตัด สำหรับการกัดแบบร่องลึก 1 มิลลิเมตรที่มีระยะการเดินกัด15 มิลลิเมตร จากนั้นป้อนคำสั่ง G Code เพื่อควบคุมความเร็วรอบและอัตราป้อนตามแผนการทดลองที่ออกแบบ

2) เปิดโปรแกรม Dyno ware และเครื่องขยายสัญญาณ KISTLER charge amplifier เพื่อวัดและบันทึกข้อมูลของแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัด

3) เริ่มกัดชิ้นงานตามลำดับการทดลอง โดยอ้างอิงจากแผนการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป เมื่อต้องทำการทดลองประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการกัด ต้องทำการเปิดเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนเพื่อสั่นชิ้นงานในระหว่างการกัด

4) หลังการทดลองในแต่ละครั้ง ทำการบันข้อมูลของแรงตัดลงในคอมพิวเตอร์โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล CSV ให้เสร็จสมบูรณ์ ก่อนทำการทดลองในลำดับการทดลองถัดไป

5) วัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดความหยาบผิว โดยทำการวัดบริเวณกึ่งกลางความกว้างร่องกัด ทิศทางในการลากหัวโพรบขนานกับการเคลื่อนที่ป้อนกัดของเครื่องมือตัด ทำการวัด 1 ครั้งต่อร่อง

6) วัดค่าความแข็งผิวชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดความแข็ง โดยทำการวัดบริเวณกึ่งกลางความกว้างร่องกัด ทำการวัด 1 ครั้งต่อร่อง

7) นำชิ้นงานไปวิเคราะห์พื้นผิวแบบสามมิติที่กำลังขยาย 20 เท่าด้วยกล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการแสกนและวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวที่กำลังขยาย 1000 เท่าด้วย SEM

8) การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลในงานวิจัยนี้มีลำดับขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

8.1) การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลอง(model adequacy checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลองโดยมีสมมติฐานคือ รูปแบบของส่วนตกค้าง (residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียงศูนย์ และมีค่าคงตัว (stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้

8.2) วิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวและความแข็งผิวรวมถึงผลกระทบร่วมเพื่อเป็นการยืนยันผลความมีนัยสำคัญของปัจจัยโดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α= 0.05)

9) สร้างแบบจำลองสมการพยากรณ์

การสร้างแบบจำลองพยากรณ์โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple regression analysis) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัวซึ่งผู้วิจัยแสดงเป็นสองวิธีดังนี้

9.1) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อหาสมการพยากรณ์ผลตอบสนองโดยพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในรูปแบบสมการเส้นตรง

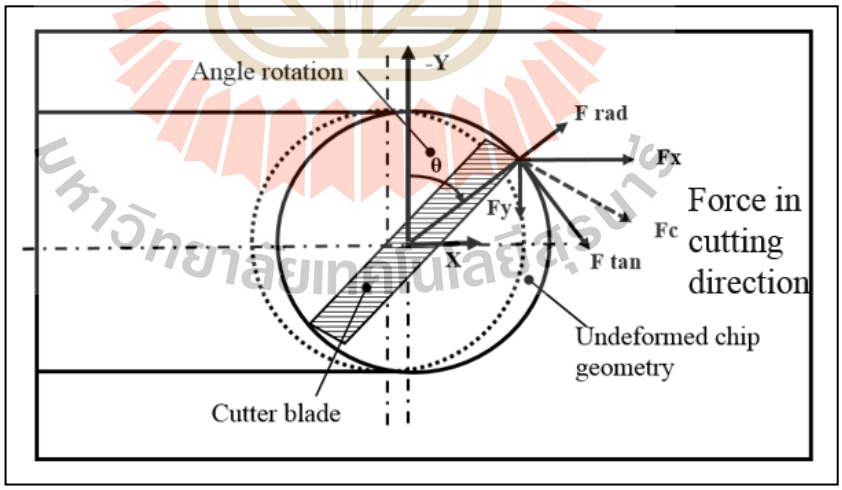
9.2) การวิเคราะห์การถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสอง (Quadratic regression) เพื่อหาสมการพยากรณ์ผลตอบสนองโดยพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในรูปแบบสมการที่มีอันตรกิริยาและกำลังสอง

10) ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองและเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ในแต่ละแบบ

3.7 การวิเคราะห์แรงตัด

ข้อมูลแรงตัดที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์ถูกบันทึกลงไฟล์ที่มีนามสกุลCSV ผ่านทางโปรแกรม Dyno ware ข้อมูลที่บันทึกได้อยู่ในรูปตัวเลขและมีความละเอียดของข้อมูล60,000 ข้อมูลต่อวินาที นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเส้นที่มีแกน X เป็นหน่วยเวลาและแกน Y แสดงถึงแรงตัดที่วัดได้จากนั้นทำการเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผลของความความแตกต่างจากแต่ละระดับปัจจัย

จากรูปที่ 3.24แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของคมตัดเกิดแรงตัดในแนวแกน X และ Y รวมถึงมีทิศทางทั้งทางบวกและทางลบดังนั้นเพื่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในระบบผู้วิจัยจึงใช้ค่าเฉลี่ยผลรวมของแรงตัด(Cutting force, Fc) ซึ่งคำนวณจากรากที่สองของผลรวมแรงตัดในทิศทางแกน X กำลังสอง และแกน Y กำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.24แรงในการตัดเฉือน

$$Fc = \sqrt{Fx^2 + Fy^2} \tag{3.1}$$

โดย Fc = แรงตัด

Fx = แรงตัดในทิศทางแกน X

Fy = แรงตัดในทิศทางแกน Y

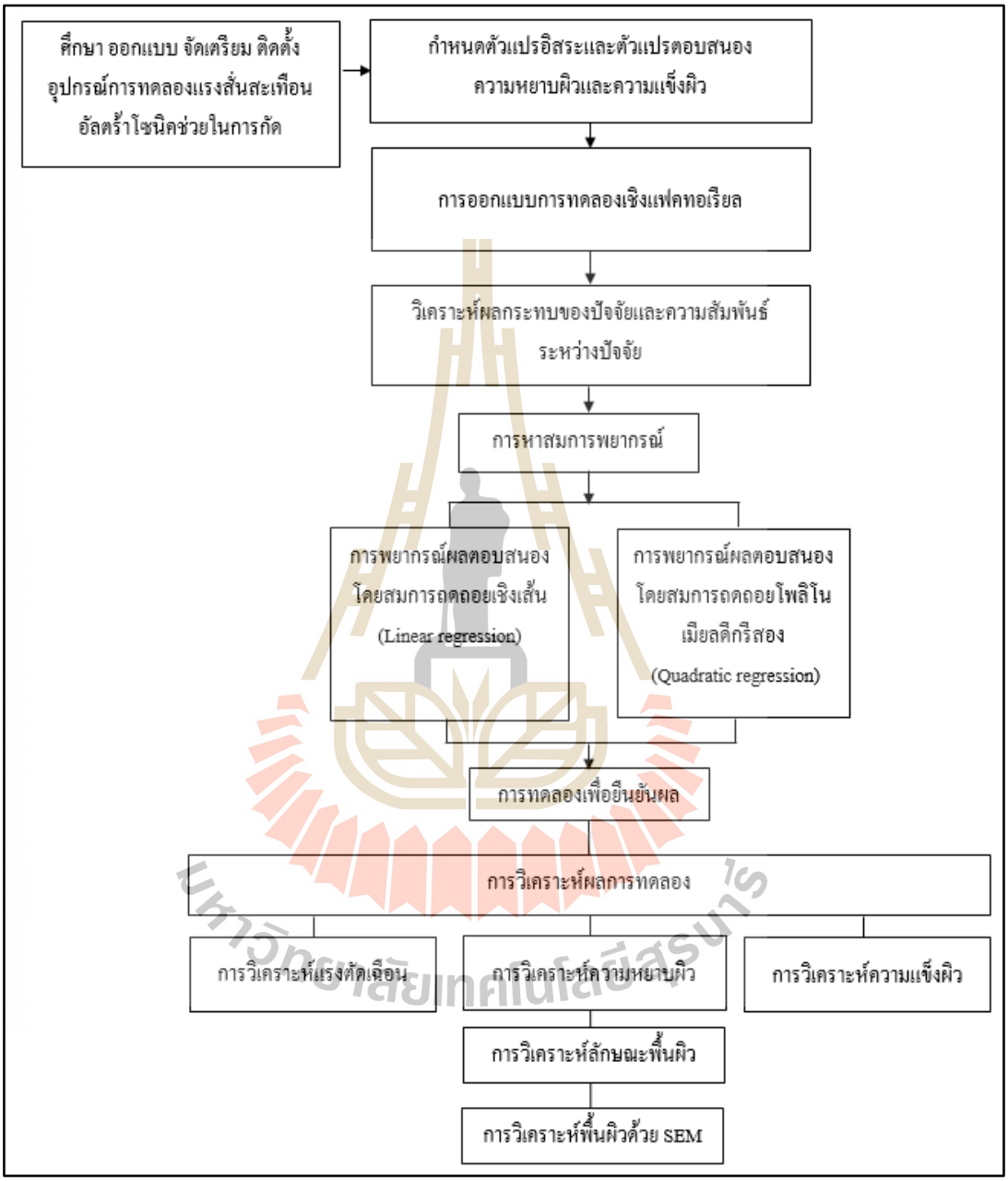
3.8 การวิเคราะห์ความหยาบผิว

การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดความหยาบผิว เริ่มจากการจับยึดชิ้นงานให้คงที่ กำหนดระยะในการลากวัดที่ระยะ 5 มิลลิเมตรและอัตราเร็วของหัวโพรบเคลื่อนที่ด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีทำการลากหัวโพรบบริเวณกึ่งกลางความกว้างของร่องกัดสำหรับวัด 1 ครั้งต่อ 1 ร่องกัดนำข้อมูลที่ได้ในแต่ละการทดลองมาคำนวณค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อนำไปแสดงผลเปรียบเทียบด้วยกราฟ

3.9 การวิเคราะห์ความแข็ง

การวัดค่าความแข็งผิวชิ้นงาน โดยใช้หัวกดเพชรรูปทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงที่ผิววัสดุด้วยน้ำหนักคงที่100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที บันทึกค่าความแข็งวิกเกอร์ที่แสดงบนจอมอนิเตอร์ของเครื่อง ทำการวัด 1 ครั้งต่อ 1 ร่องกัด นำข้อมูลที่ได้ในแต่ละการทดลองมาคำนวณค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อนำไปแสดงผลเปรียบเทียบด้วยกราฟ

3.10 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.25 แผนการดำเนินงาน

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการตัดอลูมิเนียมหล่อ ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลวิเคราะห์ความหยาบผิวของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

4.2 การประเมินผลการทำนายค่าความหยาบผิว

4.3 ผลวิเคราะห์ความหยาบแข็งผิวของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

4.4 การประเมินผลการทำนายค่าความแข็งผิว

4.5 การวิเคราะห์แรงตัด

4.6 การวิเคราะห์ความหยาบผิว

4.7 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอล

4.8 การวิเคราะห์ความแข็งผิว

4.9 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1 ผลวิเคราะห์ความหยาบผิวของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (full factorial design) เป็นการทดลองเพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (main effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (interaction effect)โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดปัจจัยทั้งหมด3 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยที่มี 2 ระดับ1 ปัจจัยและปัจจัยที่มี 3 ระดับ2 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1ปัจจัยและระดับของปัจจัยการกัดเพื่อหาค่าความแข็งผิว

ปัจจัย	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	หน่วย
รูปแบบของกระบวนการกัด	CM	UAM	-	
คาวมเร็วรอบ (Spindle Speed)	3000	5000	7000	รอบต่อนาที
อัตราป้อน (Feed Rate)	50	200	400	มิลลิเมตรต่อนาที

การทดลองแต่ละครั้งกำหนดให้มีการทำซ้ำ (replicate) 3 ซ้ำ โดยจำนวนการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีผลตอบสนองคือค่าความหยาบผิวแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ ที่มีการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ของความหยาบผิว

ลำดับการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ค่าความหยาบผิว			ค่าเฉลี่ย
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	Ra1	Ra2	Ra3	
1	CM	3000	50	0.292	0.234	0.248	0.258
2	CM	5000	200	0.895	0.813	0.795	0.834
3	CM	7000	400	2.301	1.985	1.950	2.079
4	CM	3000	50	0.224	0.203	0.191	0.205
5	CM	5000	200	0.550	0.458	0.382	0.462
6	CM	7000	400	1.008	1.140	0.926	1.025
7	CM	3000	50	0.159	0.131	0.103	0.131
8	CM	5000	200	0.322	0.245	0.236	0.267
9	CM	7000	400	0.736	0.716	0.657	0.705
10	UAM	3000	50	0.226	0.271	0.278	0.257
11	UAM	5000	200	0.789	0.764	0.738	0.764
12	UAM	7000	400	1.906	1.852	1.728	1.829
13	UAM	3000	50	0.289	0.230	0.232	0.249
14	UAM	5000	200	0.541	0.495	0.407	0.481
15	UAM	7000	400	1.010	1.034	0.884	0.976
16	UAM	3000	50	0.216	0.160	0.135	0.169
17	UAM	5000	200	0.297	0.234	0.233	0.254
18	UAM	7000	400	0.682	0.734	0.662	0.693

เพื่อให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองฟูลแฟคทอเรียลมีความถูกต้องและรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Version 17ช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความหยาบผิว

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (model adequacy checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลอง ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยมีสมมติฐานคือ รูปแบบของส่วนตกค้าง (residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียงศูนย์ และมีค่าคงตัว (stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 4 ขั้นตอนดังนี้

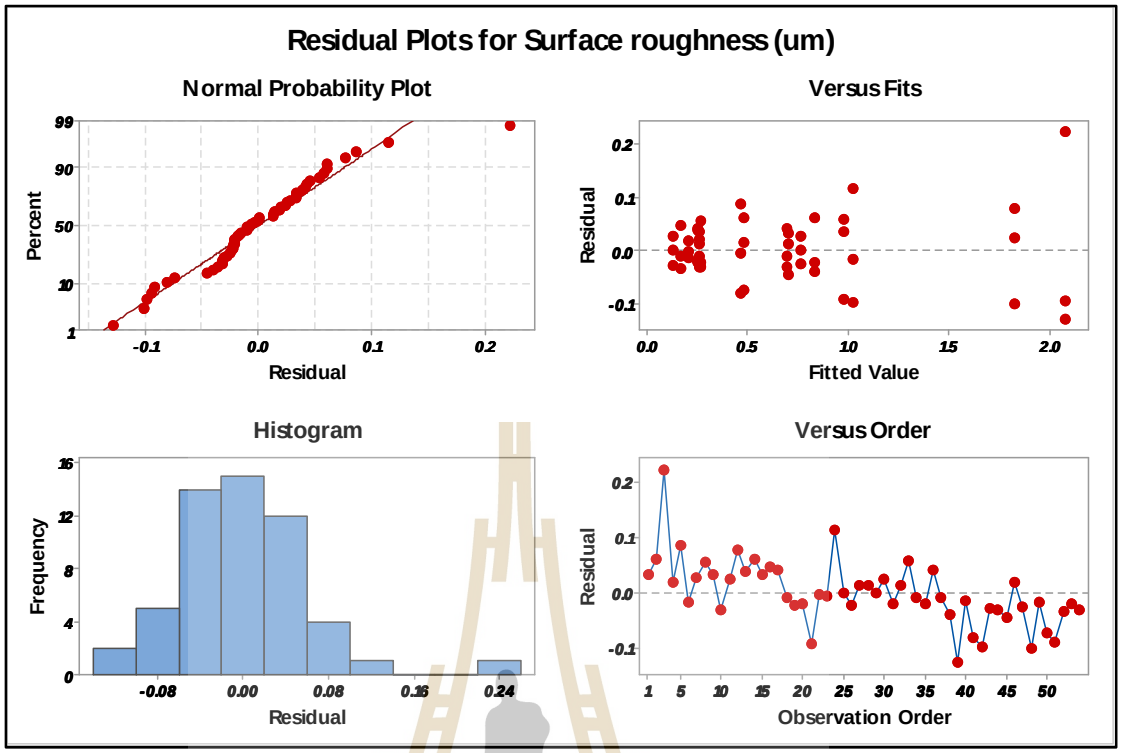
1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ(normal distribution) ของส่วนตกค้าง (residuals)แสดงดังรูปที่4.1(บนซ้าย) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

2) การตรวจสอบความเสถียรภาพของσ^2(variance stability) แสดงดังรูปที่ 4.1 (บนขวา) พบว่า σ^2ของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.1 (ล่างซ้าย) พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.1 (ล่างขวา) พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าเฉลี่ยส่วนตกค้าง มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่ารูปแบบส่วนตกค้างของผลการทดลองความหยาบผิวมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป



รูปที่ 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความหยาบผิว

4.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิว

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป ในการหาค่าความหยาบผิวเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α=0.05) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.3

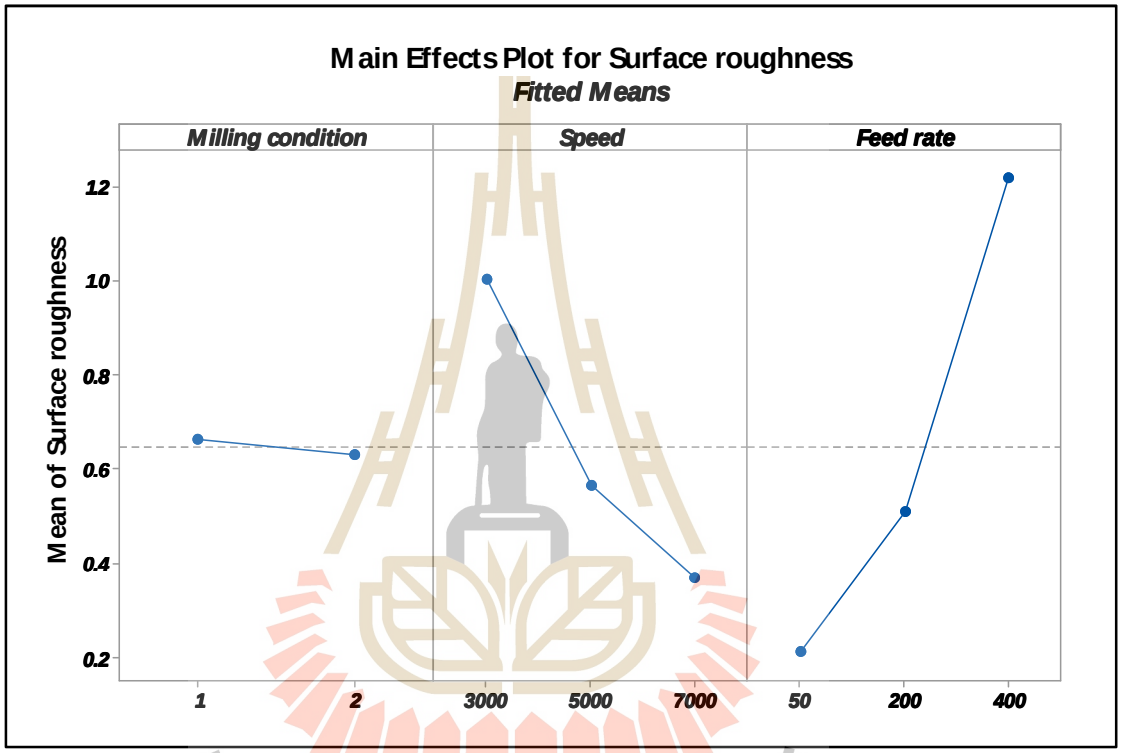
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปของความหยาบผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P
Model	17	15.7728	0.92781	182.86	0.000
Linear	5	13.3897	2.67794	527.79	0.000
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	1	0.0141	0.01411	2.78	0.104
ความเร็วรอบ (n)	2	3.7868	1.89342	373.17	0.000
อัตราป้อน (f)	2	9.5887	4.79437	944.92	0.000
2-Way Interactions	8	2.3630	0.29537	58.21	0.000
Mc*n	2	0.0374	0.01871	3.69	0.035
Mc*f	2	0.0393	0.01967	3.88	0.030
N*f	4	2.2862	0.57156	112.65	0.000
3-Way Interactions	4	0.0201	0.00502	0.99	0.426
Mc*n*f	4	0.0201	0.00502	0.99	0.426
Error	36	0.1827	0.00507		
Total	53	15.9554			
S = 0.0712308 R-sq = 98.86% R-sq(adj) = 98.31%					

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปในการหาค่าความหยาบผิว แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า อิทธิพลเนื่องจากปัจจัยหลักประกอบด้วยความเร็วรอบ (n) และอัตราป้อน (f) รวมถึงอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย ประกอบด้วยรูปแบบกระบวนการกัดกับความเร็วรอบ (Mc*n) รูปแบบกระบวนการกัดกับอัตราป้อน (Mc*f) และความเร็วกับอัตราป้อน (n*f) มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ (p-value<0.05)ในขณะที่อิทธิพลจากปัจจัยหลักของรูปแบบกระบวนการกัด (Mc) และอิทธิพลร่วมระหว่างสามปัจจัยของรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบและอัตราป้อน (Mc*n*f) ไม่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ (p-value>0.05)จะสังเกตได้ว่าปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดเป็นปัจจัยหลักที่ไม่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว แต่เมื่อมีอันตรกิริยากับความเร็วรอบหรืออัตราป้อนส่งผลให้มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ

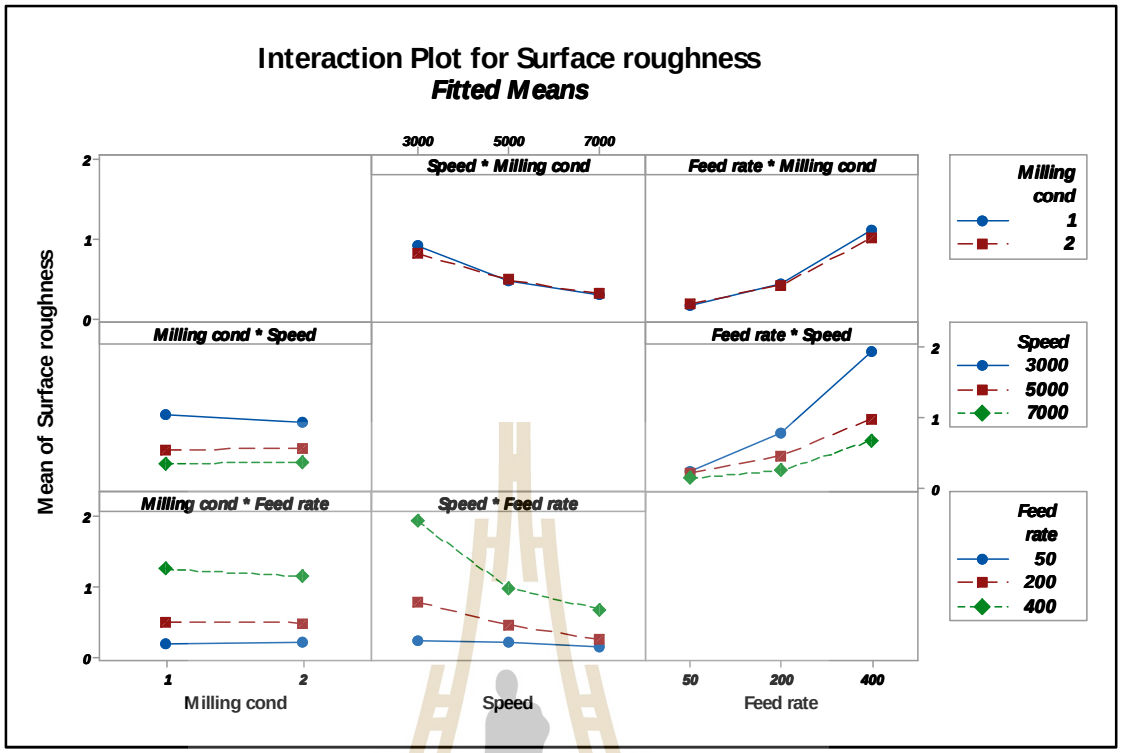
จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (main effect plot) ทั้งสามปัจจัยประกอบด้วยรูปแบบกระบวนการกัด (Mc)ความเร็วรอบ (n) และอัตราป้อน (f) ที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว ดัง

แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ความชันของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและความเร็วรอบมีค่าเป็นลบ หมายถึงการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองลดลง และความชันของปัจจัยอัตราป้อนมีค่าเป็นบวก หมายถึงการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น โดยอิทธิพลของอัตราป้อน (f) มีผลต่อความหยาบผิวมากที่สุด รองลงมาคือปัจจัยความเร็วรอบและรูปแบบกระบวนการกัดตามลำดับ



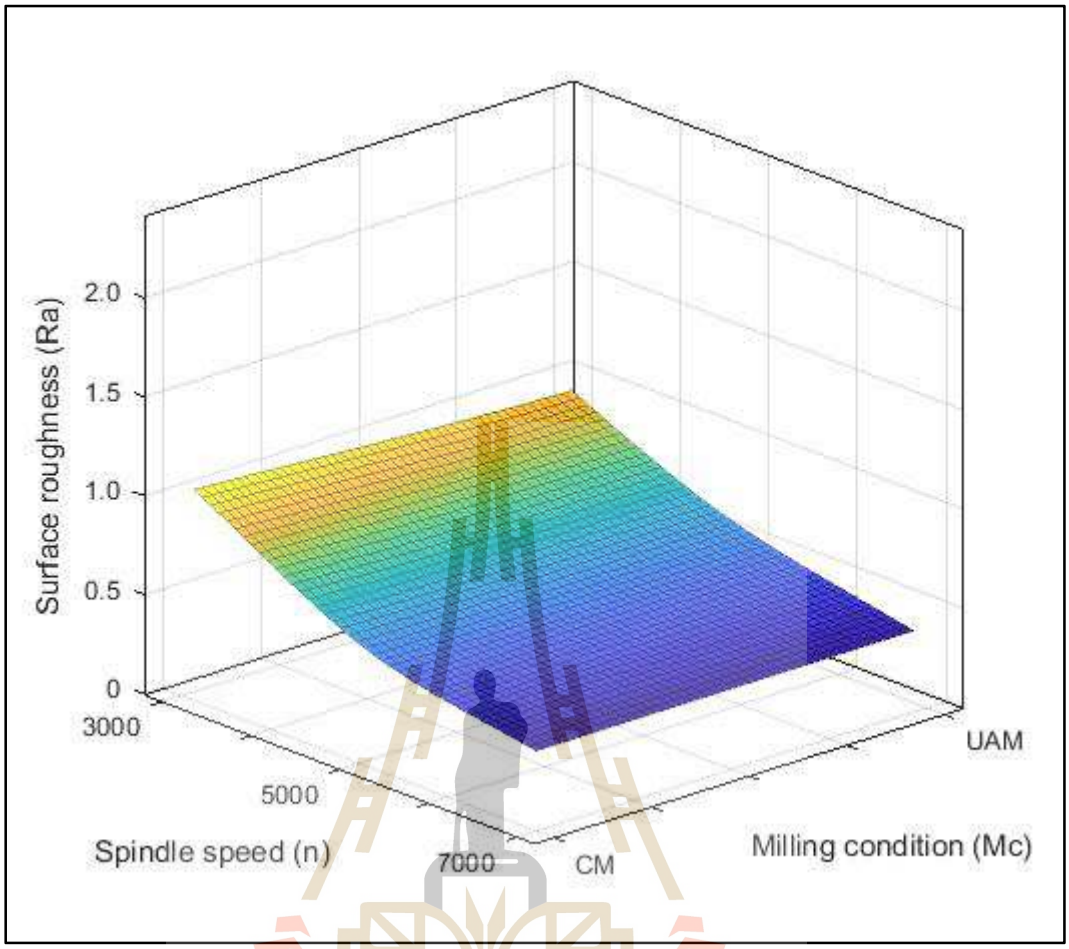
รูปที่ 4.2 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปของความหยาบผิว

จากการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction plot) แสดงดังรูปที่ 4.3พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยทั้งสามคือรูปแบบกระบวนการกัดกับความเร็วรอบ (Mc*n) รูปแบบกระบวนการกัดและอัตราป้อน (Mc*f) และความเร็วรอบกับอัตราป้อน (n*f) มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากความชันของอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยที่มีความแตกต่างกัน



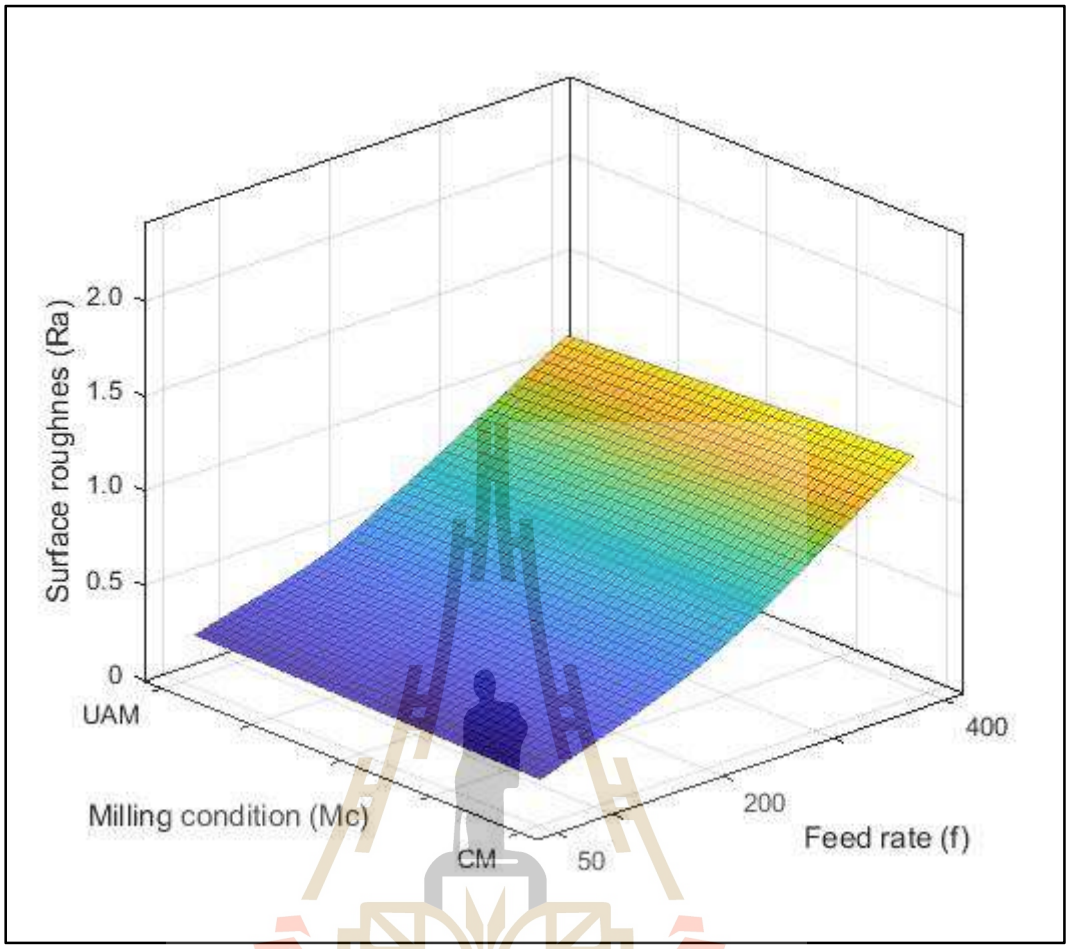
รูปที่ 4.3 การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปของความหยาบผิว

การประมวลผลโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า (curve fitting) สามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างรูปแบบกระบวนการกัด (Mc) และความเร็วรอบ (n) แสดงดังรูปที่ 4.4พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด (จากกระบวนการกัดแบบทั่วไปเป็นกระบวนการกัดโดยประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค)และการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยความเร็วรอบ (จาก 3,000 เป็น 7,000 รอบต่อนาที) ส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าลดลง



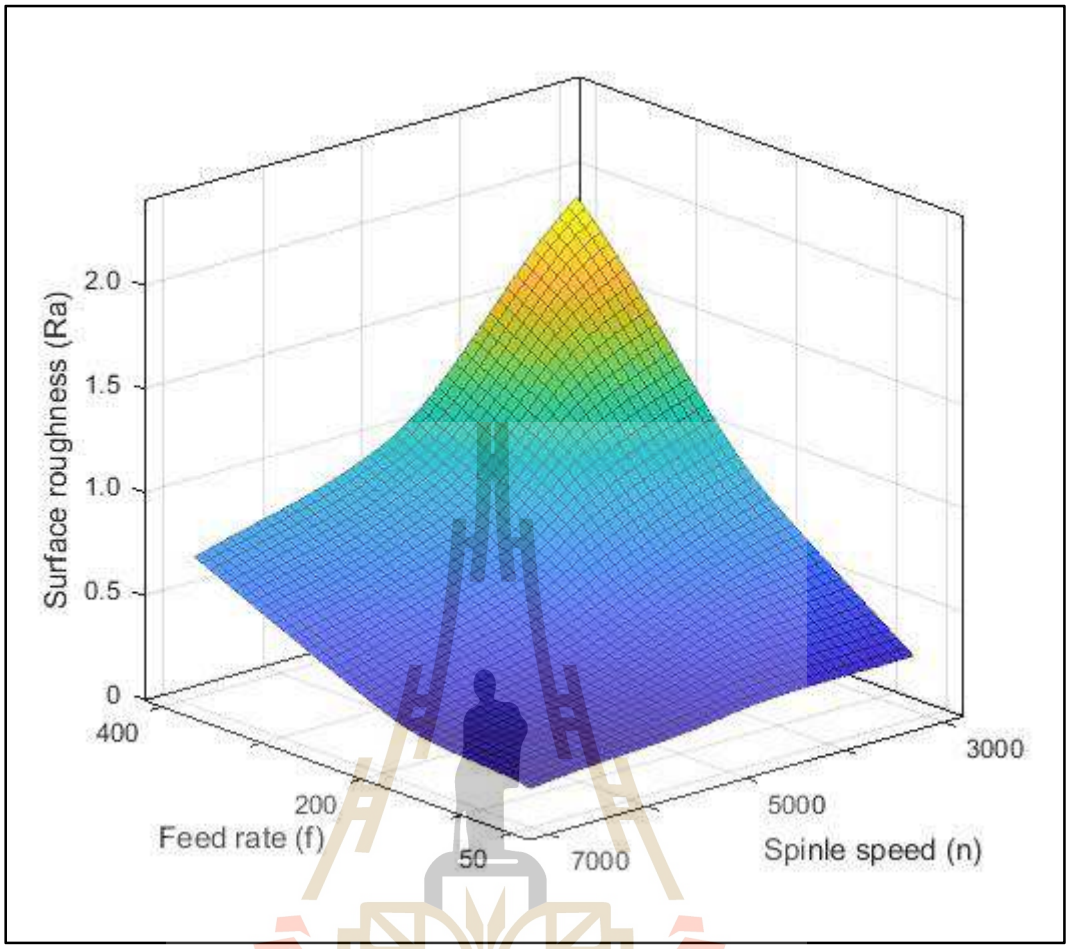
รูปที่ 4.4 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและปัจจัยความเร็วรอบ

ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างรูปแบบกระบวนการกัด (Mc) และอัตราป้อน (f) แสดงดังรูปที่ 4.5พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด (จากกระบวนการกัดแบบทั่วไปเป็นกระบวนการกัดโดยประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค) และการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอัตราป้อน (จาก 400 เป็น 50 มิลลิเมตรต่อนาที) ส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าลดลง



รูปที่ 4.5 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและปัจจัยอัตราป้อน

ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างความเร็วรอบ (n) และอัตราป้อน (f) แสดงดังรูปที่ 4.6พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยความเร็วรอบ (จาก 3,000 เป็น 7,000 รอบต่อนาที) และการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอัตราป้อน (จาก 400 เป็น 50 มิลลิเมตรต่อนาที) ส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าลดลง



รูปที่ 4.6 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยความเร็วรอบและปัจจัยอัตราป้อน

4.1.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของความหยาบผิว

จากผลการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยในรูปของสมการพยากรณ์ (Y = f(x)) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่าง ๆโดยการพิจารณาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดตวามเร็วรอบ และอัตราป้อน ผู้วิจัยกำหนดรูปแบบจำลองการถดถอยเป็นสองรูปแบบได้แก่ แบบจำลองที่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบถดถอยเชิงเส้น(Linearregression) และแบบจำลองที่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นหรือสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง(Quadratic regression) กำหนดได้ดังต่อไปนี้

สมการถดถอยเชิงเส้น(Linear regression)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C \quad (4.1)$$

สมการถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสอง (Quadratic regression)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_4 B^2 + \beta_5 C^2 \quad (4.2)$$

โดยที่

Y ผลตอบสนอง

A รูปแบบกระบวนการกัด

B ความเร็วรอบ

C อัตราป้อน

β_0 ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การถดถอย

β_1 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด

β_2 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยความเร็วรอบ

β_3 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยอัตราป้อน

β_{12} ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและความเร็วรอบ

β_{13} ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและอัตราป้อน

β_{23} ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อน

β_4 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยความเร็วรอบกำลังสอง

β_5 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยอัตราป้อนกำลังสอง

จากแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสอง จะสังเกตได้ว่าจะไม่มีพจน์ของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดกำลังสอง เนื่องจากปัจจัยกระบวนการกัดเป็นปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative factor) และไม่มีอิทธิพลต่อรูปแบบกำลังสอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนและอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสอง ผู้วิจัยได้ออกแบบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ ก (ภาคผนวก ก)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนและอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α=0.05) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนและอิทธิพลแสดงดังตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของความหยาบผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	13.0088	4.33628	73.58	0.000
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	1	0.0141	0.01411	0.24	0.627
ความเร็วรอบ (n)	1	3.6144	3.61443	61.33	0.000
อัตราป้อน (f)	1	9.3803	9.38030	159.17	0.000
Error	50	2.9466	0.05893		
Lack-of-Fit	14	2.7639	0.19742	38.91	0.000
Pure Error	36	0.1827	0.00507		
Total	53	15.9554			
S = 0.242758 R-sq = 80.42% R-sq(adj) = 80.42%					

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์อิทธิพลของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของความหยาบผิว

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.858	0.154	5.58	0.000	
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	-0.0323	0.0661	-0.49	0.627	1.00
ความเร็วรอบ (n)	-0.000158	0.000020	-7.83	0.000	1.00
อัตราป้อน (f)	0.002907	0.000230	12.62	0.000	1.00

สมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2 แสดงแบบจำลองการถดถอยแบบเต็มรูป (full regression model) โดยทั่วไปการสร้างแบบจำลองการถดถอยมักจะเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาสร้างเป็นแบบจำลองเท่านั้น ซึ่งดูได้จากค่า p-value ของแต่ละปัจจัย กล่าวคือ หากปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05) แสดงว่าปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อแบบจำลองถดถอยของความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกัน หากปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยใดมีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ (α= 0.05)

แสดงว่าปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองถดถอยของความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดมีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05) ดังนั้นผู้วิจัยทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญนี้ออก แล้วทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนและอิทธิพลที่มีต่อแบบจำลองอีกครั้งดังสามารถแสดงในตารางที่ 4.6และ ตารางที่ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของความหยาบผิวสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	12.9947	6.49737	111.92	0.000
ความเร็วรอบ (n)	1	3.6144	3.61443	62.26	0.000
อัตราป้อน (f)	1	9.3803	9.38030	161.58	0.000
Error	51	2.9607	0.05805		
Total	53	15.9554			
S = 0.240941R-sq = 81.44%	R-sq(adj) = 80.72%				

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์อิทธิพลของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของความหยาบผิวสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.809	0.117	6.94	0.000	
ความเร็วรอบ (n)	-0.000158	0.000020	-7.89	0.000	1.00
อัตราป้อน (f)	0.002907	0.000229	12.71	0.000	1.00

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.6พบว่าปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนมีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05)โดยสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ 4.3

$$Ra_l = 0.809 - 0.000158B + 0.002907C \qquad (4.3)$$

เมื่อพิจารณาค่า R^2 (adj)แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์กันในระดับดีโดยมีค่าเท่ากับ 80.72% และแบบจำลองการถดถอยแสดงดังสมการที่ 4.3สามารถใช้พยากรณ์ค่าความหยาบผิวจากการกำหนดระดับของปัจจัยแทนค่าลงในสมการ โดยระดับของปัจจัยที่ใช้ในการพยากรณ์ควรอยู่ในช่วงระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นหรือสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง (Quadratic regression) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α= 0.05) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	11	15.4944	1.40858	128.33	0.000
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	1	0.0045	0.00453	0.41	0.524
ความเร็วรอบ (n)	1	0.0424	0.04244	3.87	0.056
อัตราป้อน (f)	1	0.1480	0.14803	13.49	0.001
Mc*n	1	0.0082	0.00825	0.75	0.391
Mc*f	1	0.0090	0.00902	0.82	0.370
n*f	1	0.3240	0.32401	29.52	0.000
n^2	1	0.0493	0.04926	4.49	0.040
f^2	1	0.0239	0.02385	2.17	0.148
Error	42	0.4610	0.01098		
Total	53	15.9554			
S = 0.104768 R-sq = 97.11% R-sq(adj) = 96.35%					

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิว

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.093	0.604	1.81	0.077	
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	-0.245	0.382	-0.64	0.524	179.43
ความเร็วรอบ (n)	-0.000480	0.000244	-1.97	0.056	782.84
อัตราป้อน (f)	0.006540	0.001780	3.67	0.001	320.91
Mc*n	0.000134	0.000154	0.87	0.391	1516.75
Mc*f	-0.001020	0.001130	-0.91	0.370	394.21
n*f	-0.000001	0.000000	-5.43	0.000	126.59
n^2	0.000000	0.000000	2.12	0.040	760.02
f^2	0.000005	0.000003	1.47	0.148	227.16

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.8พบว่าปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและอันตรกิริยาระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดกับปัจจัยอื่นมีค่าp-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05)ดังนั้นผู้วิจัยทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญเหล่านี้ออก แล้วทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญอีกครั้งดังสามารถแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิวสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	15.3874	3.07747	260.05	0.000
ความเร็วรอบ (n)	1	0.1437	0.14366	12.14	0.001
อัตราป้อน (f)	1	0.8681	0.86807	73.35	0.000
n*f	1	2.0118	2.01179	170.00	0.000
n^2	1	0.1724	0.17240	14.57	0.000
f^2	1	0.2085	0.20845	17.61	0.000
Error	48	0.5680	0.01183		
Total	53	15.9554			
S = 0.108786 R-sq = 96.44% R-sq(adj) = 96.07%					

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิวสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.725	0.198	3.66	0.001	
ความเร็วรอบ (n)	-0.000279	0.000080	-3.48	0.001	78.28
อัตราป้อน (f)	0.005010	0.000585	8.56	0.000	32.09
n*f	-0.000001	0.000000	-13.04	0.000	12.66
n^2	0.000000	0.000000	3.82	0.000	76.01
f^2	0.000004	0.000001	4.20	0.000	22.72

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.10พบว่าปัจจัยความเร็วรอบปัจจัยอัตราป้อน อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยความเร็วรอบกับอัตราป้อน ปัจจัยความเร็วรอบกำลังสองและปัจจัยอัตราป้อนกำลังสอง มีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05)โดยสามารถเขียนแบบจำลองแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองได้ดังสมการที่ 4.4

$$Ra_q = 0.725 - 0.000279B + 0.005010C - 0.000001BC + 0.00000003B^2 + 0.000004C^2 \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาค่า R^2 (adj)แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่า ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสอง มีความสัมพันธ์กันในระดับดีมาก โดยมีค่าเท่ากับ 96.07%

4.2 การประเมินผลการทำนายค่าความหยาบผิว

4.2.1 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าความหยาบผิว

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระดับของปัจจัยต่าง ๆ จำนวน 6 แบบการทดลอง ประกอบด้วย ระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบและอัตราป้อนเท่ากับ (CM, 3,000, 100) (UAM, 5,000, 100) (CM, 7,000,100) (UAM, 3,000,300) (CM, 5,000, 300) และ (UAM, 7,000, 300) ตามลำดับ โดยมีปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.12ซึ่งผลทำนายค่าความหยาบผิวสามารถหาได้จากการแทนระดับของแต่ละปัจจัยลงในแบบจำลองการ

ถดถอยเชิงเส้น (สมการที่ 4.3) และแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสอง(สมการที่ 4.4) โดยผลทำนายค่าความหยาบผิว แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าความหยาบผิว

แบบการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ความหยาบผิว (Ra)	
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	ทำนายถดถอยเชิงเส้น	ทำนายโพลิโนเมียลดีกรีสอง
1	CM	3000	100	0.626	0.454
2	UAM	5000	100	0.310	0.210
3	CM	7000	100	-0.006	0.206
4	UAM	3000	300	1.207	1.314
5	CM	5000	300	0.891	0.738
6	UAM	7000	300	0.575	0.402

4.2.1 การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่าความหยาบผิว

ผู้วิจัยทำการทดลองหาค่าความหยาบผิวเพื่อเปรียบเทียบผลทำนายจากสมการแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสอง ของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบ และอัตราป้อนเท่ากับ (CM, 3,000, 100) (UAM, 5,000, 100) (CM, 7,000, 100) (UAM, 3,000,300) (CM, 5,000, 300) และ (UAM, 7,000, 300) จำนวน 3 ซ้ำ ของแต่ละแบบการทดลอง ซึ่งค่าเฉลี่ยความหยาบผิวเท่ากับ 0.382 0.302 0.187 1.390 0.826 และ 0.407 ไมโครเมตร ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ความหยาบผิวจากผลการทดลองระดับปัจจัยที่กำหนด

แบบการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ความหยาบผิว (Ra)			
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	#1	#2	#3	ค่าเฉลี่ย
1	CM	3000	100	0.407	0.364	0.375	0.382
2	UAM	5000	100	0.372	0.267	0.266	0.302

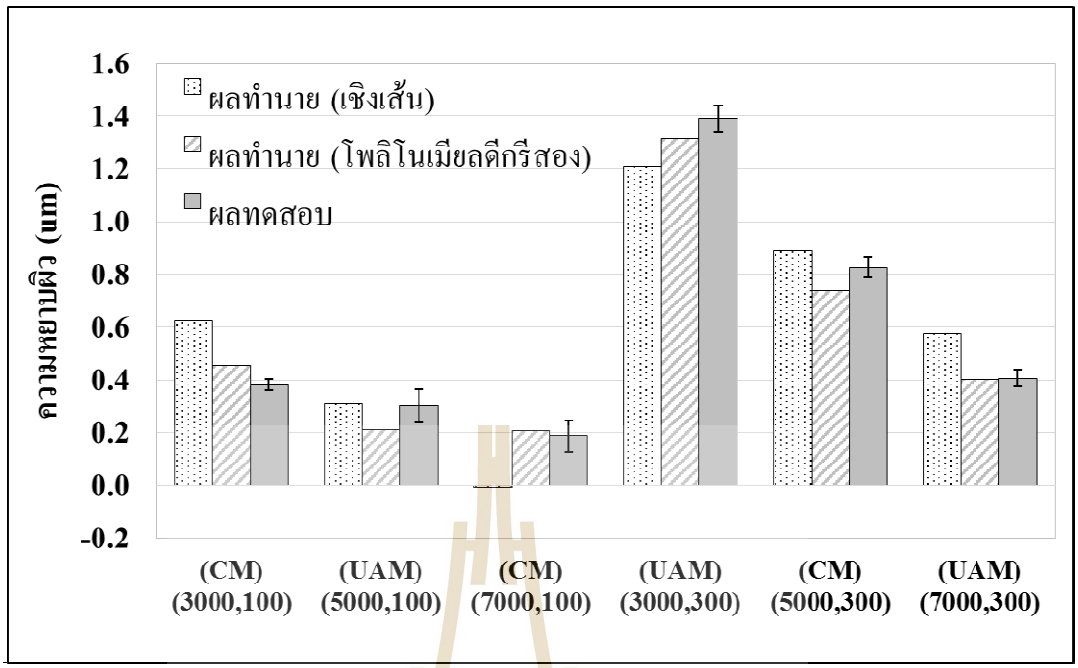
ตารางที่ 4.13 ความหยาบผิวจากผลการทดลองระดับปัจจัยที่กำหนด (ต่อ)

แบบการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ความหยาบผิว (Ra)			
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	#1	#2	#3	ค่าเฉลี่ย
3	CM	7000	100	0.253	0.175	0.134	0.187
4	UAM	3000	300	1.445	1.380	1.346	1.390
5	CM	5000	300	0.790	0.869	0.819	0.826
6	UAM	7000	300	0.445	0.389	0.386	0.407

ตารางที่ 4.14แสดงผลเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างผลทำนายจากแบบจำลองถดถอยเชิงเส้น แบบจำลองถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสอง และผลการทดสอบจริง ที่ระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบและอัตราป้อน (CM, 3,000, 100) (UAM, 5,000, 100) (CM, 7,000, 100) (UAM, 3,000,300) (CM, 5,000, 300) และ (UAM, 7,000, 300) เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความคลาดเคลื่อนของสมการแบบจำลองการทดถอยทั้งสองชนิด จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความหยาบผิวที่ได้จากผลทำนายและผลการทดสอบจริงของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นมีความคลาดเคลื่อนที่สูง โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 38.67 และแบบจำลองถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสองมีผลที่ใกล้เคียง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 12.80 ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.14 ผลเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

แบบการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ความหยาบผิว (Ra)			ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)	
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	ทำนายเชิงเส้น	ทำนายโพลิโนเมียล	ทดสอบ	เชิงเส้น	โพลิโนเมียล
1	CM	3000	100	0.626	0.454	0.382	63.87	18.85
2	UAM	5000	100	0.310	0.210	0.302	2.65	30.46
3	CM	7000	100	-0.006	0.206	0.187	103.21	10.16
4	UAM	3000	300	1.207	1.314	1.390	13.17	5.47
5	CM	5000	300	0.891	0.738	0.826	7.87	10.65
6	UAM	7000	300	0.575	0.402	0.407	41.28	1.23



รูปที่ 4.7 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าความหยาบผิวของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

4.3 ผลวิเคราะห์ความแข็งผิวของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองฟูลแฟคทอเรียล (full factorial design) เป็นการทดลองเพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (main effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (interaction effect) โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยที่มี 2 ระดับ 1 ปัจจัยและปัจจัยที่มี 3 ระดับ 2 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ปัจจัยและระดับของปัจจัยการกัดเพื่อหาค่าความแข็งผิว

ปัจจัย	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	หน่วย
รูปแบบของกระบวนการกัด	CM	UAM	-	
ความเร็วรอบ (Spindle Speed)	3000	5000	7000	รอบต่อนาที
อัตราป้อน (Feed Rate)	50	200	400	มิลลิเมตรต่อนาที

การทดลองแต่ละครั้งกำหนดให้มีการทำซ้ำ (replicate) 3 ซ้ำ โดยจำนวนการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีผลตอบสนองคือค่าความหยาบผิวแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปที่มีการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ของความแข็งผิว

ลำดับการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ค่าความแข็งผิว			ค่าเฉลี่ย
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	HV1	HV2	HV3	
1	CM	3000	50	96.9	92.0	97.8	95.6
2	CM	3000	200	97.6	97.3	102.4	99.1
3	CM	3000	400	113.1	113.9	111.4	112.8
4	CM	5000	50	80.4	80.3	82.9	81.2
5	CM	5000	200	88.3	85.2	91.3	88.3
6	CM	5000	400	102.7	102.7	97.9	101.1
7	CM	7000	50	81.2	78.2	81.3	80.2
8	CM	7000	200	84.6	86.4	89.1	86.7
9	CM	7000	400	95.8	97.1	98.0	97.0
10	UAM	3000	50	105.3	104.7	103.2	104.4
11	UAM	3000	200	106.6	107.2	102.2	105.3
12	UAM	3000	400	115.9	113.3	116.1	115.1
13	UAM	5000	50	98.9	96.7	101.2	98.9
14	UAM	5000	200	103.4	101.8	105.3	103.5
15	UAM	5000	400	104.4	105.4	110.1	106.6
16	UAM	7000	50	97.1	98.7	97.9	97.9
17	UAM	7000	200	104.6	97.1	101.5	101.1
18	UAM	7000	400	104.6	99.4	106.6	103.5

เพื่อให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟคทอเรียลมีความถูกต้องและรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Version 17 ช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความแข็งผิว

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (model adequacy checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลอง ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 โดยมีสมมติฐานคือ รูปแบบของส่วนตกค้าง (residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียงศูนย์ และมีค่าคงตัว (stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 4 ขั้นตอนดังนี้

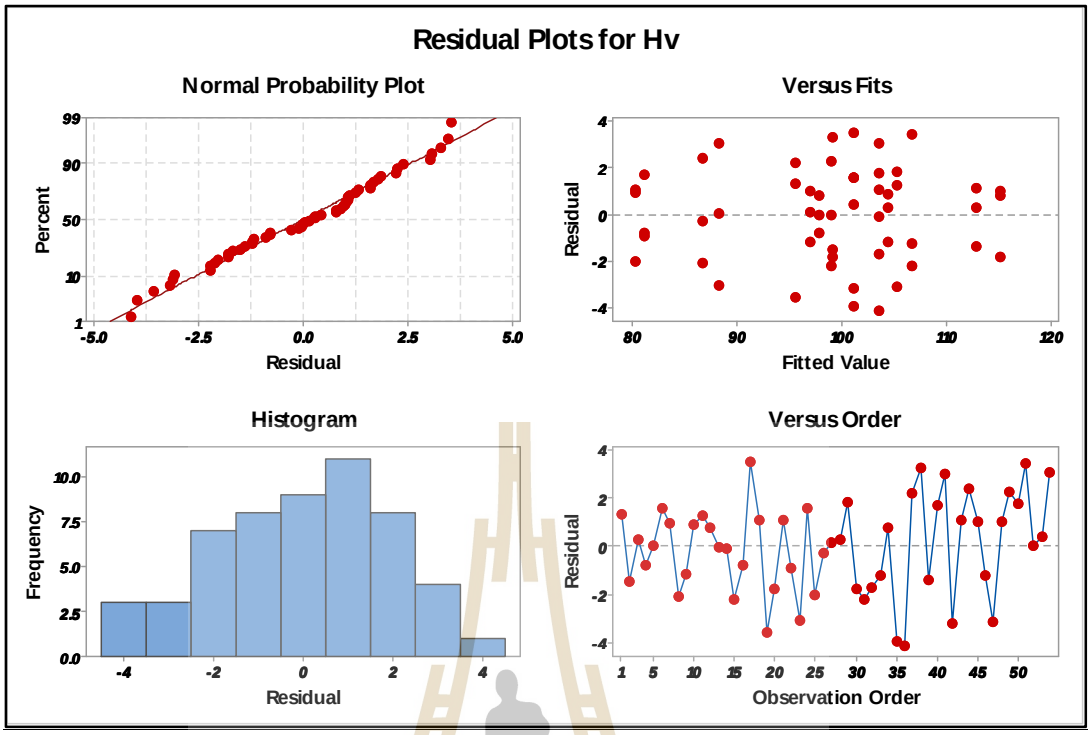
1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ(normal distribution) ของส่วนตกค้าง (residuals) แสดงดังรูปที่ 4.8 (บนซ้าย) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

2) การตรวจสอบความเสถียรภาพของ σ^2(variance stability) แสดงดังรูปที่ 4.8 (บนขวา) พบว่า σ^2ของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.8 (ล่างซ้าย) พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.8 (ล่างขวา) พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าเฉลี่ยส่วนตกค้าง มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่ารูปแบบส่วนตกค้างของผลการทดลองความแข็งผิวมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป



รูปที่ 4.8 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความแข็งผิว

4.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งผิว

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป ในการหาค่าความแข็งผิวเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α=0.05) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.17

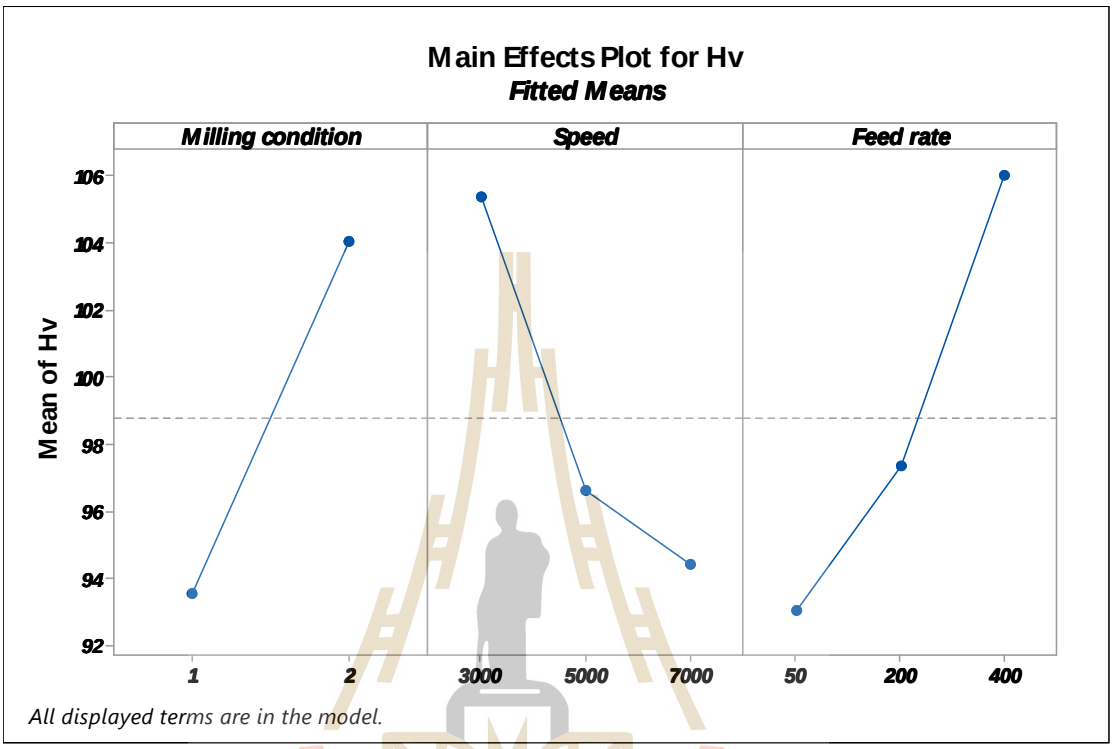
ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปของความแข็งผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P
Model	17	4735.78	278.58	47.62	0.000
Linear	5	4277.94	855.59	146.27	0.000
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	1	1487.33	1487.33	254.27	0.000
ความเร็วรอบ (n)	2	1215.28	607.64	103.88	0.000
อัตราป้อน (f)	2	1575.33	787.66	134.66	0.000
2-Way Interactions	8	439.98	55	9.40	0.000
Mc*n	2	149.58	74.79	12.79	0.000
Mc*f	2	236.66	118.33	20.23	0.000
n*f	4	53.74	13.44	2.30	0.078
3-Way Interactions	4	17.86	4.46	0.76	0.556
Mc*n*f	4	17.86	4.46	0.76	0.556
Error	36	210.58	5.85		
Total	53	4946.36			
S = 2.41856R-sq = 95.74%	R-sq(adj) = 93.73%				

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปในการหาค่าความแข็งผิว แสดงดังตารางที่ 4.17พบว่า อิทธิพลเนื่องจากปัจจัยหลักประกอบด้วยรูปแบบกระบวนการกัด (Mc)ความเร็วรอบ (n)และอัตราป้อน (f) และอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย ประกอบด้วยรูปแบบกระบวนการกัดกับความเร็วรอบ (Mc*n) และรูปแบบกระบวนการกัดกับอัตราป้อน (Mc*f) มีอิทธิพลต่อความแข็งผิวอย่างมีนัยสำคัญ (p-value<0.05) ในขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างสามปัจจัยของรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบและอัตราป้อน (Mc*n*f) ไม่มีอิทธิพลต่อความแข็งผิวอย่างมีนัยสำคัญ (p-value>0.05)

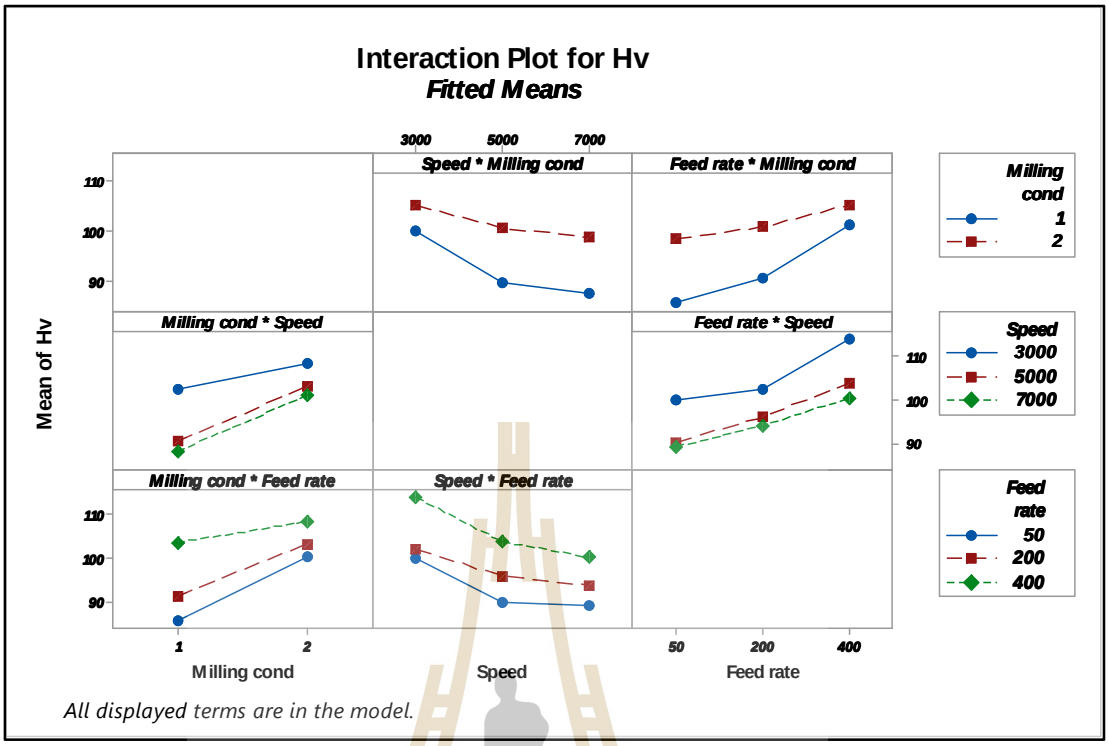
จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (main effect plot) ทั้งสามปัจจัยประกอบด้วยรูปแบบกระบวนการกัด (Mc)ความเร็วรอบ (n) และอัตราป้อน (f) ที่มีอิทธิพลต่อความแข็งผิว ดังแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ความชันของปัจจัยหลักรูปแบบกระบวนการกัดและอัตราป้อนมีค่าเป็นบวก หมายถึงการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น และความชันของปัจจัยหลักความเร็วรอบมีค่าเป็นลบ หมายถึงการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่ง

หน่วยเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองลดลง โดยอิทธิพลของอัตราป้อน (f) มีผลต่อความแข็งผิวมากที่สุด รองลงมาคือปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและความเร็วรอบตามลำดับ



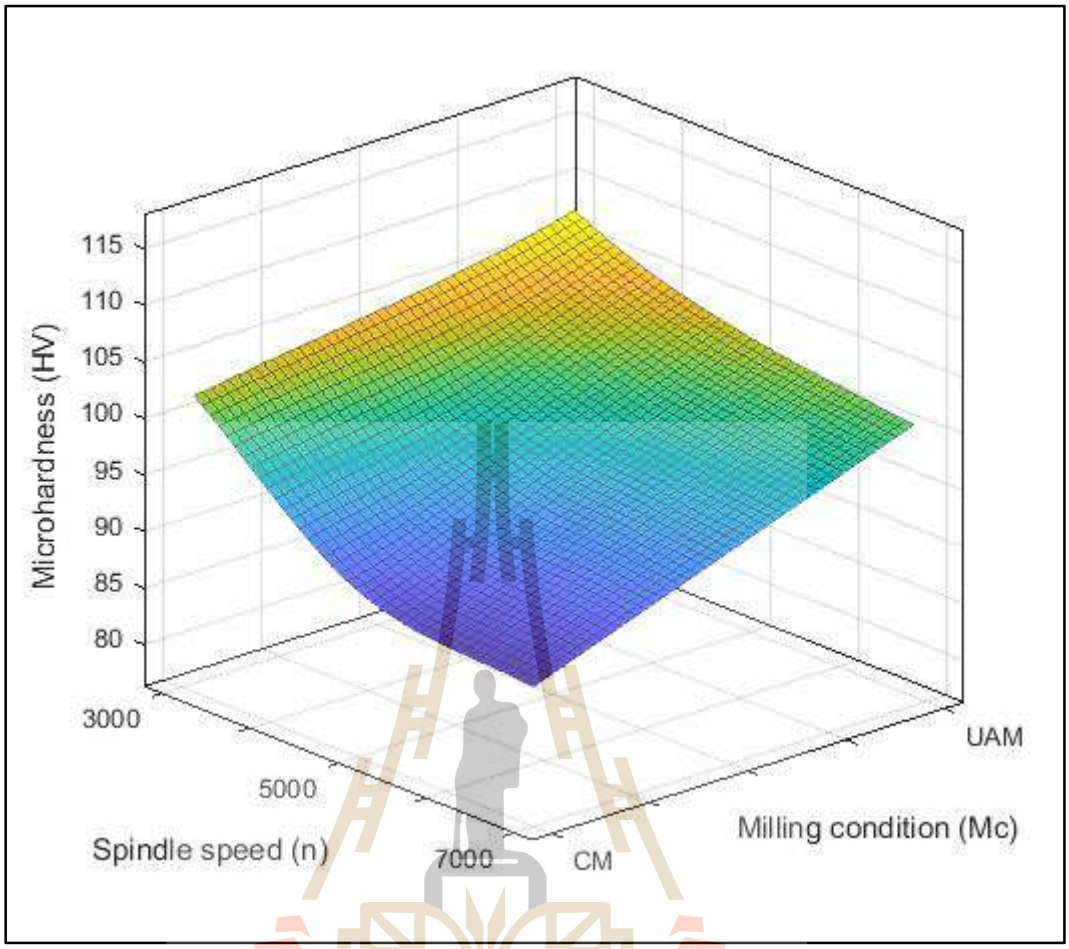
รูปที่ 4.9 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปของความแข็งผิว

จากการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction plot) แสดงดังรูปที่ 4.10พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยทั้งสามคือรูปแบบกระบวนการกัดกับความเร็วรอบ (Mc*n) รูปแบบกระบวนการกัดและอัตราป้อน (Mc*f) และความเร็วรอบกับอัตราป้อน (n*f) มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากความชันของอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยที่มีความแตกต่างกัน



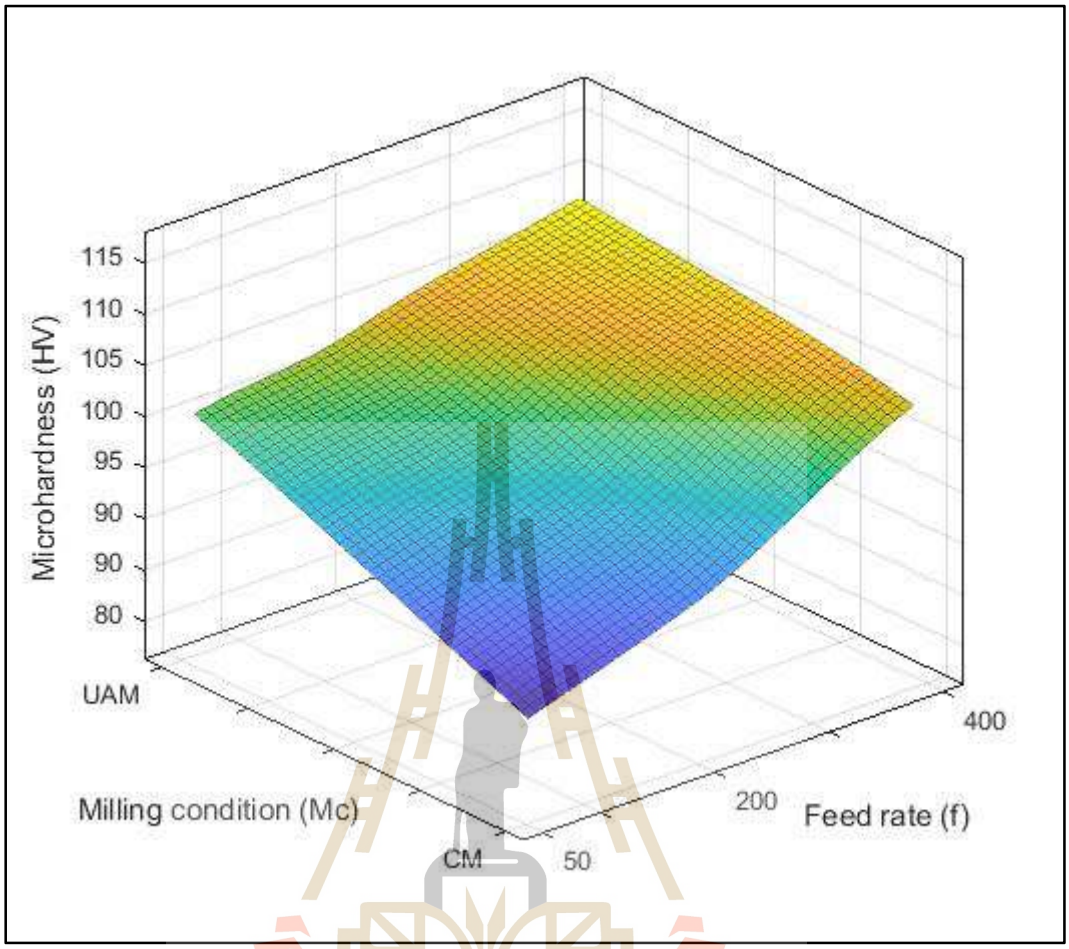
รูปที่ 4.10 การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปของความแข็งผิว

การประมวลผลโดยใช้เทคนิค curve fittingสามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างรูปแบบกระบวนการกัด (Mc) และความเร็วรอบ (n) แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด (จากกระบวนการกัดแบบทั่วไปเป็นกระบวนการกัดโดยประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค) และการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยความเร็วรอบ (จาก 7,000 เป็น 3,000 รอบต่อนาที) ส่งผลให้ความแข็งผิวมีค่าสูงขึ้น



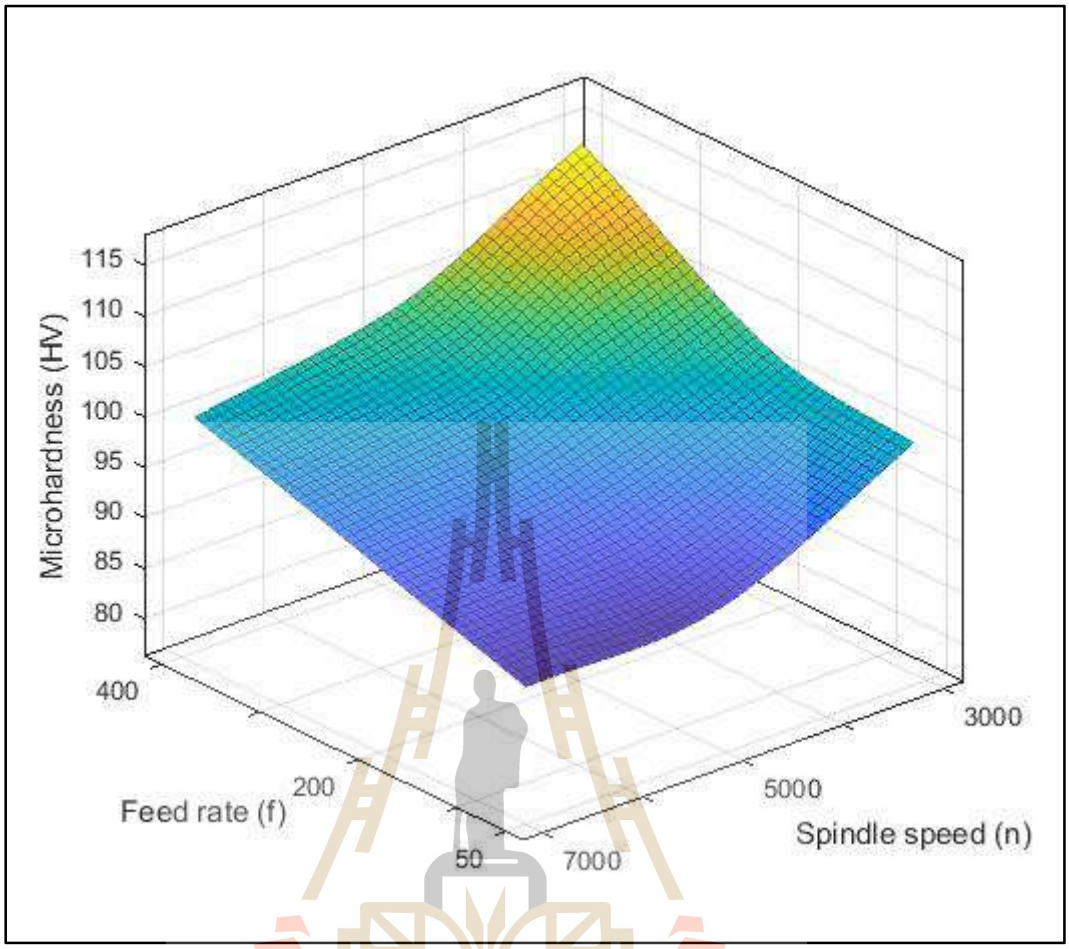
รูปที่ 4.11 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและปัจจัยความเร็วรอบ

ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างรูปแบบกระบวนการกัด (Mc) และอัตราป้อน (f) แสดงดังรูปที่ 4.12พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด (จากกระบวนการกัดแบบทั่วไปเป็นกระบวนการกัดโดยประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค) และการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอัตราป้อน (จาก 50 เป็น 400 มิลลิเมตรต่อนาที) ส่งผลให้ความแข็งผิวมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.12 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและปัจจัยอัตราป้อน

ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างความเร็วรอบ (n) และอัตราป้อน (f) แสดงดังรูปที่ 4.13พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยความเร็วรอบ (จาก 7,000 เป็น 3,000 รอบต่อนาที) และการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอัตราป้อน (จาก 50เป็น 400 มิลลิเมตรต่อนาที) ส่งผลให้ความแข็งผิวมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยความเร็วรอบและปัจจัยอัตราป้อน

4.3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของความแข็งผิว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนและอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นของค่าความแข็งผิว โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α= 0.05) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนและอิทธิพลแสดงดังตารางที่ 4.18 และ ตารางที่ 4.19 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของความแข็งผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	4129	1376.32	84.19	0.000
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	1	1487.3	1487.33	90.98	0.000
ความเร็วรอบ (n)	1	1085.7	1085.7	66.41	0.000
อัตราป้อน (f)	1	1555.9	1555.94	95.18	0.000

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของความแข็งผิว (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Error	50	817.4	16.35		
Lack-of-Fit	14	606.8	43.34	7.41	0.000
Pure Error	36	210.6	5.85		
Total	53	4946.4			
S = 4.04324R-sq = 83.47% R-sq(adj) = 82.48%					

ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์อิทธิพลของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของความแข็งผิว

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	88.67	2.56	34.63	0.000	
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	10.50	1.10	9.54	0.000	1.00
ความเร็วรอบ (n)	-0.002746	0.0000337	-8.15	0.000	1.00
อัตราป้อน (f)	0.03744	0.00384	9.76	0.000	1.00

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.18พบว่าปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบและอัตราป้อนมีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05) โดยสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ 4.5

$$HV_l = 88.67 + 10.50A - 0.002746B + 0.03744C \qquad (4.5)$$

เมื่อพิจารณาค่า R^2 (adj)แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์กันในระดับดีโดยมีค่าเท่ากับ 82.48%

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นหรือสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง (Quadratic regression) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (α= 0.05) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความแข็งผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	11	4687.37	426.124	69.10	0.000
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	1	21.38	21.375	3.47	0.070
ความเร็วรอบ (n)	1	137.72	137.725	22.33	0.000
อัตราป้อน (f)	1	0.660	0.659	0.11	0.745
Mc*n	1	58.29	58.29	9.45	0.004
Mc*f	1	0.91	0.909	0.15	0.703
n*f	1	2.28	2.283	0.37	0.546
n^2	1	87.61	87.609	14.21	0.001
f^2	1	14.34	14.337	2.32	0.135
Error	42	258.99	6.166		
Total	53	4946.36			
S = 2.48324R-sq = 94.76%	R-sq(adj) = 93.39%				

ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความแข็งผิว

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	147.0	14.30	10.27	0.000	
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	-16.86	9.050	-1.86	0.070	179.43
ความเร็วรอบ (n)	-0.02736	0.00579	-4.73	0.000	782.84
อัตราป้อน (f)	0.01380	0.04220	0.33	0.745	320.91
Mc*n	0.011260	0.003660	3.07	0.004	1516.75
Mc*f	0.010300	0.026700	0.38	0.703	394.2
n*f	0.000003	0.000005	0.61	0.546	126.59
n^2	0.000002	0.000001	3.77	0.001	760.00
f^2	0.000116	0.000076	1.52	0.135	227.16

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.20พบว่ามีเพียงปัจจัยความเร็วรอบ อันตรกิริยาระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดและความเร็วรอบ ปัจจัยความเร็วรอบกำลังสอง และอันตรกิริยาระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดและความเร็วรอบกำลังสองมีค่า p-value

น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05) ดังนั้นผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนอีกครั้งหนึ่ง โดยทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญเหล่าออกทีละปัจจัย เริ่มจากปัจจัยที่มีค่า p-value มากที่สุดจนกระทั่งเหลือปัจจัยที่มีนัยสำคัญดังสามารถแสดงในตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความแข็งผิวสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	4601.56	766.927	104.54	0.000
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	1	66.40	66.402	9.05	0.004
ความเร็วรอบ (n)	1	314.05	314.048	42.81	0.000
อัตราป้อน (f)	1	722.02	722.020	98.42	0.000
Mc*n	1	112.71	112.714	15.36	0.000
Mc*f	1	230.29	230.294	31.39	0.000
n^2	1	129.58	129.582	17.66	0.000
Error	47	344.80	7.336		
Total	53	4946.36			
S = 2.70854 R-sq = 93.03% R-sq (adj) = 92.14%					

ตารางที่ 4.23 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิวสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	110.92	6.02	18.42	0.000	
รูปแบบกระบวนการกัด (Mc)	7.89	2.62	3.01	0.004	12.66
ความเร็วรอบ (n)	-0.013620	0.002080	-6.54	0.000	85.00
อัตราป้อน (f)	0.080650	0.008130	9.92	0.000	10.00
Mc*n	0.001769	0.000451	3.92	0.000	19.37
Mc*f	-0.028810	0.005140	-5.60	0.000	12.28
n^2	0.000001	0.000000	4.20	0.000	76.00

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.22พบว่าปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบอัตราป้อน อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดกับความเร็วรอบ อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดกับอัตราป้อน และอัตราป้อนกำลังสอง มีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05)โดยสามารถเขียนแบบจำลองแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสอง ได้ดังสมการที่ 4.6

$$HV_q = 110.92 - 7.89A + 0.01362B - 0.08065C + 0.001769AB - 0.02881AC + 0.000001C^2 \quad (4.6)$$

เมื่อพิจารณาค่า R^2 (adj)แสดงดังตารางที่ 4.22 พบว่า ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในแบบจำลองโพลิโนเมียลดีกรีสอง มีความสัมพันธ์กันในระดับดีมาก โดยมีค่าเท่ากับ 92.14%

4.4 การประเมินผลการทำนายค่าความแข็งผิว

4.4.1 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าความแข็งผิว

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระดับของปัจจัยต่าง ๆ จำนวน 6แบบการทดลอง ประกอบด้วย ระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบและอัตราป้อนเท่ากับ (CM, 3,000, 100) (UAM, 5,000, 100) (CM, 7,000, 100) (UAM, 3,000,300) (CM, 5,000, 300) และ (UAM, 7,000, 300) ตามลำดับ โดยมีปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.24ซึ่งผลทำนายค่าความแข็งผิวสามารถหาได้จากการแทนระดับของแต่ละปัจจัยลงในแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (สมการที่ 4.5) และแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสอง (สมการที่ 4.6) โดยผลทำนายค่าความแข็งผิว แสดงดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าความแข็งผิว

แบบการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ความแข็งผิว (HV)	
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	ทำนายถดถอยเชิงเส้น	ทำนายโพลิโนเมียลดีกรีสอง
1	CM	3000	100	94.68	95.85
2	UAM	5000	100	99.68	99.17
3	CM	7000	100	83.69	81.36
4	UAM	3000	300	112.66	110.77
5	CM	5000	300	96.67	95.68
6	UAM	7000	300	101.68	103.36

4.4.2 การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่าความแข็งผิว

ผู้วิจัยทำการทดลองหาค่าความหยาบผิวเพื่อเปรียบเทียบผลทำนายจากสมการแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสองของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบ และอัตราป้อนเท่ากับ (CM, 3,000, 100) (UAM, 5,000, 100) (CM, 7,000, 100) (UAM, 3,000,300) (CM, 5,000, 300) และ (UAM, 7,000, 300) จำนวน 3 ซ้ำของแต่ละแบบการทดลอง ซึ่งค่าเฉลี่ยความแข็งผิวเท่ากับ 102.47 98.83 79.00 109.33 95.70 และ 102.97HV ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.25

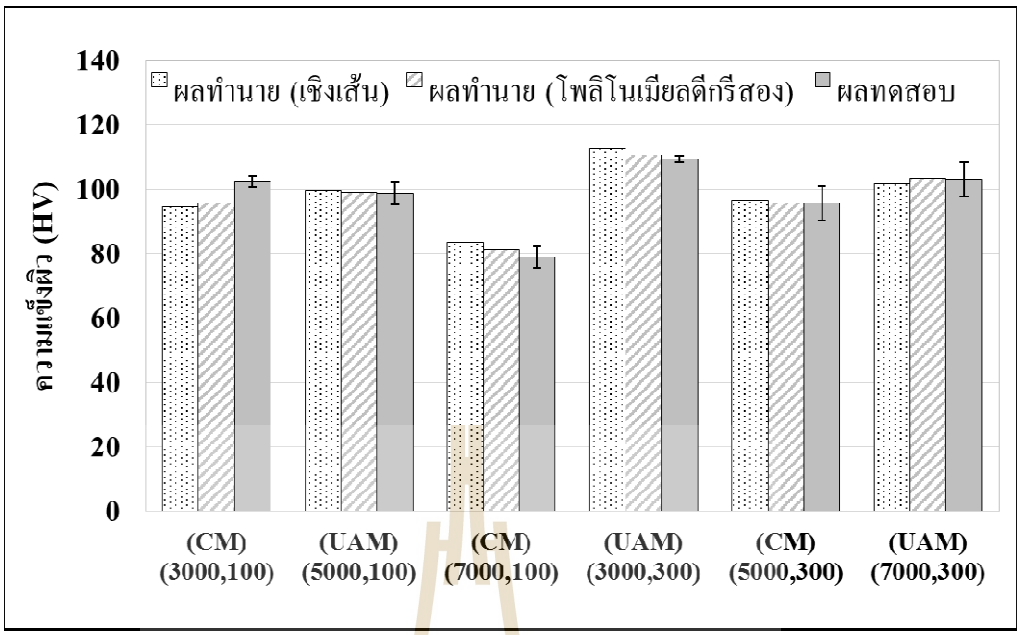
ตารางที่ 4.25 ความแข็งผิวจากผลการทดลองระดับปัจจัยที่กำหนด

แบบการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ความแข็งผิว (HV)			
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	#1	#2	#3	ค่าเฉลี่ย
1	CM	3000	100	104.3	102.3	100.8	102.47
2	UAM	5000	100	97.8	96	102.7	98.83
3	CM	7000	100	80.8	75.1	81.1	79.00
4	UAM	3000	300	108.4	110.4	109.2	109.33
5	CM	5000	300	91	94.7	101.4	95.70
6	UAM	7000	300	96.9	105.6	106.4	102.97

ตารางที่ 4.26 แสดงผลเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวระหว่างผลทำนายจากแบบจำลองถดถอยเชิงเส้น แบบจำลองถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสอง และผลการทดสอบจริงที่ระดับของปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัด ความเร็วรอบและอัตราป้อนเท่ากับ(CM, 3,000, 100) (UAM, 5,000, 100) (CM, 7,000, 100) (UAM, 3,000,300) (CM, 5,000, 300) และ (UAM, 7,000, 300) ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความคลาดเคลื่อนของสมการแบบจำลองการทดถอยทั้งสองชนิด จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความแข็งผิวที่ได้จากผลทำนายและผลการทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ3.29 สำหรับแบบจำลองถดถอยเชิงเส้น และร้อยละ 1.92 สำหรับแบบจำลองถดถอยโพลิโนเมียลกำลังสอง

ตารางที่4.26 ผลเปรียบเทียบค่าความแข็งผิวของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

แบบการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ความแข็งผิว (HV)			ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)	
	รูปแบบกระบวนการกัด	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	ทำนายเชิงเส้น	ทำนายโพลิโนเมียล	ทดสอบ	เชิงเส้น	โพลิโนเมียล
1	CM	3000	100	94.68	95.85	102.47	7.60	6.46
2	UAM	5000	100	99.68	99.17	98.83	0.86	0.34
3	CM	7000	100	83.69	81.36	79.00	5.94	2.99
4	UAM	3000	300	112.66	110.77	109.33	3.05	1.31
5	CM	5000	300	96.67	95.68	95.70	1.02	0.02
6	UAM	7000	300	101.68	103.36	102.97	1.25	0.38



รูปที่ 4.14 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งผิวของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

4.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แรงตัด

ในการวิเคราะห์แรงตัดเพื่อให้ทราบแนวโน้มของแรงตัดที่ชัดเจนมากขึ้นสำหรับการทดลองผู้วิจัยได้เพิ่มระดับปัจจัยของอัตราป้อน100 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการวิเคราะห์แรงตัด

ปัจจัย	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 4	ระดับที่ 5
A :รูปแบบกระบวนการกัด	CM	UAM	-	-	-
B : ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	3000	5000	7000	-	-
C:อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)	50	100	200	300	400

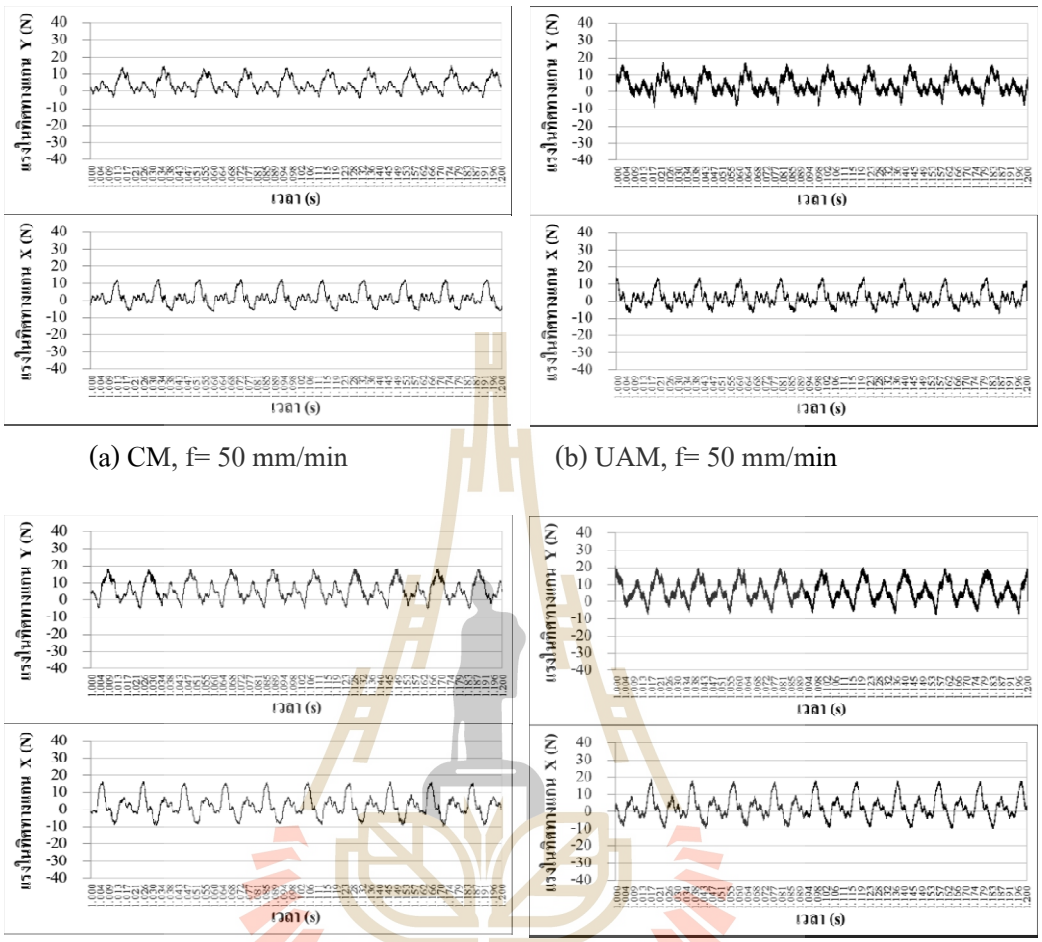
รูปที่ 4.15 4.16และ 4.17แสดงขนาดแมกนิจูดของแรงตัดจากการทดลองในแต่ละระดับปัจจัยความเร็วรอบ 3000 5000 และ 7000 รอบต่อนาทีตามลำดับ โดยแต่ละรูปจะแสดงกราฟย่อย (a) ถึง (f) ระบุถึงความแตกต่างของระดับปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและอัตราป้อนขนาดของ

แรงตัดแสดงในทิศทางแกน X (ทิศทางในการเดินกัด) และทิศทางแกน Y (ตั้งฉากกับทิศทางเดินกัด)โดยแรงที่วัดในการทดลองเป็นแรงกระทำของคมตัดที่มีต่อชิ้นงาน

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะข้อมูลแรงตัดของทุกการทดลองจะพบว่าในหนึ่งรอบการตัดเฉือน (รอบการหมุน) ของเครื่องมือตัดจะเกิดแรงในลักษณะคลื่นโซน์อันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคมตัด โดยหนึ่งรอบการหมุนของเครื่องมือตัดที่มีสองคมตัดในการกัดร่องจะเกิดคลื่นไซน์สองรอบ คลื่นไซน์ที่ 1 แสดงถึงการกระทำของคมตัดครึ่งรอบแรกและคลื่นไซน์ที่ 2 แสดงการกระทำของคมตัดครึ่งรอบหลัง จุดสูงสุดของคลื่นไซน์ที่ 1 และที่ 2 ในกระบวนการกัดแบบทั่วไปจะมีค่าไม่เท่ากัน สาเหตุเนื่องมากจากความไม่สมมาตรกันของขนาดคมตัดในแต่ละด้านที่เกิดขึ้นอันเนื่อมากจากกระบวนผลิตวัสดุคมตัด ความไม่เที่ยงตรงของการหมุนของเครื่องมือตัดที่เกิดขึ้นในระบบความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักร และการสะสมของเศษวัสดุในการตัดเฉือนที่แตกต่างกันในแต่ละคมตัด

จากข้อมูลแรงตัดที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะของแรงตัดที่เกิดขึ้นโดยมีการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในทิศทางเดินกัดมีลักษณะที่แตกต่างจากแรงตัดที่เกิดจากกระบวนการกัดแบบทั่วไป เนื่องจากการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคสร้างการสั่นสะเทือนให้กับชิ้นงานด้วยความถี่ 19.74 กิโลเฮิรตซ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของคมตัดโดยส่งผลให้คมตัดมีการเคลื่อนที่เข้าออกบริเวณที่กำลังตัดเฉือนด้วยความถี่สูง ด้วยกลไกนี้ส่งผลให้ข้อมูลแรงตัดที่ได้มีลักษณะความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของคมตัดมากกว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไป

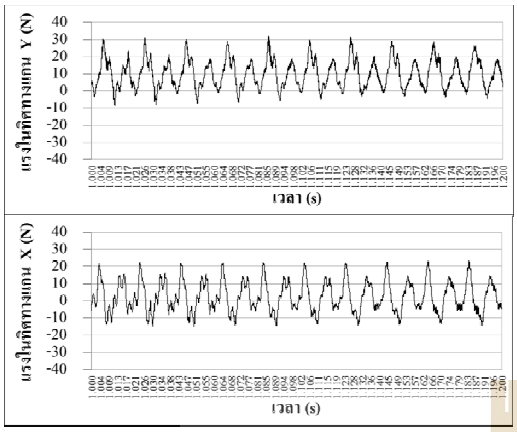
เมื่อพิจารณาขนาดแมกนิจูดสูงที่สุดและต่ำที่สุดของแรงตัดเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการกัดแบบทั่วไปและใช้อัลตร้าโซนิคช่วยในการกัด พบว่าการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคส่งผลให้เกิดแมกนิจูดที่มีค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุด เนื่องจากในขณะที่ชิ้นงานสั่นสะเทือน ชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาคมตัด เกิดโหลดที่สูงมากขึ้นกว่าปกติในทิศทางแกน X และแกน Y และชิ้นงานถอยออกจากระยะการตัดเฉือน เกิดภาระโหลดที่น้อยกว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไป



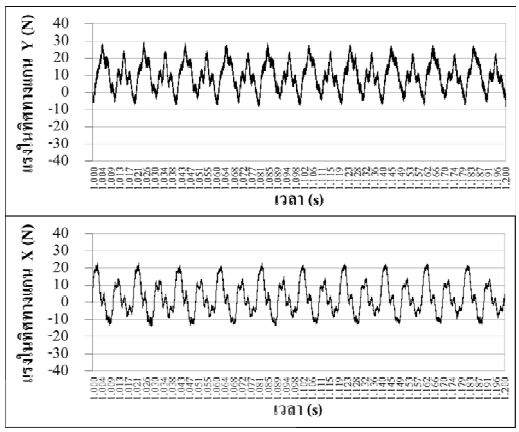
(a) CM, f= 50 mm/min (b) UAM, f= 50 mm/min

(c) CM, f= 100 mm/min (d) UAM, f= 100 mm/min

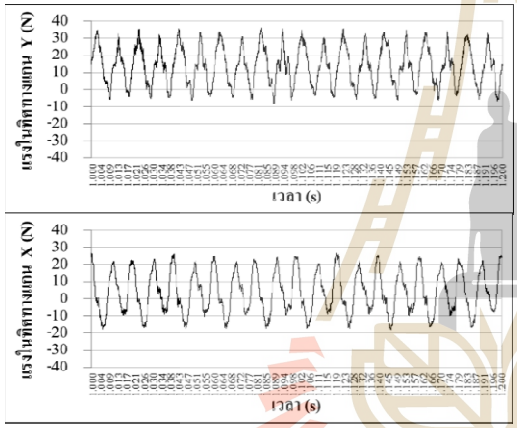
รูปที่ 4.15 แรงตัดในทิศทางแกน X และแกน Y ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที



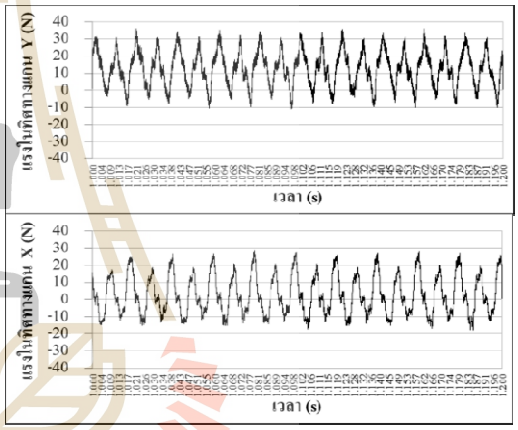
(e) CM, f= 200 mm/min



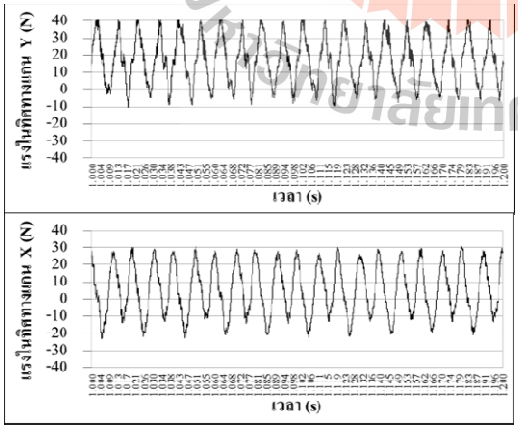
(f) UAM, f= 200 mm/min



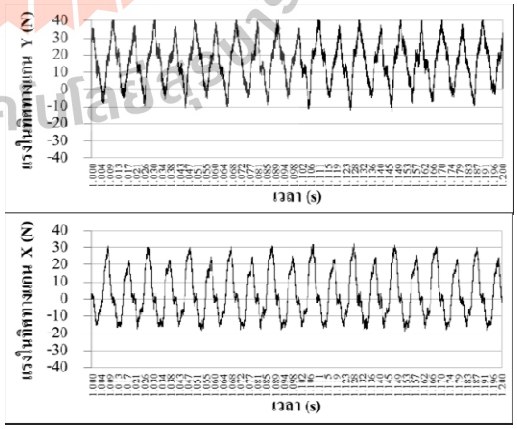
(g) CM, f= 300 mm/min



(g) UAM, f= 300 mm/min

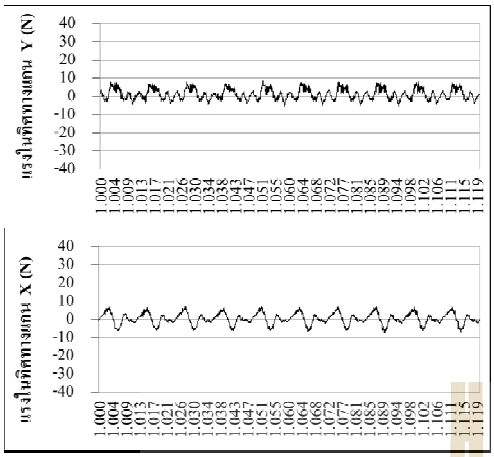


(h) CM, f= 400 mm/min

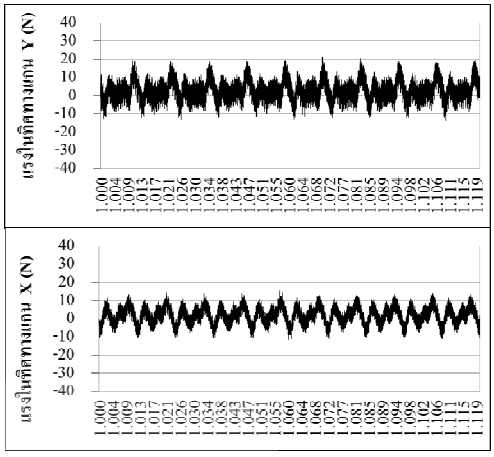


(i) UAM, f= 400 mm/min

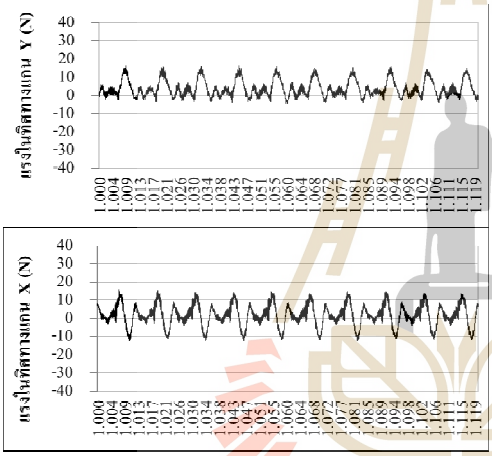
รูปที่ 4.15 แรงตัดในทิศทางแกน X และแกน Y ที่ความเร็วรอบ3000 รอบต่อนาที (ต่อ)



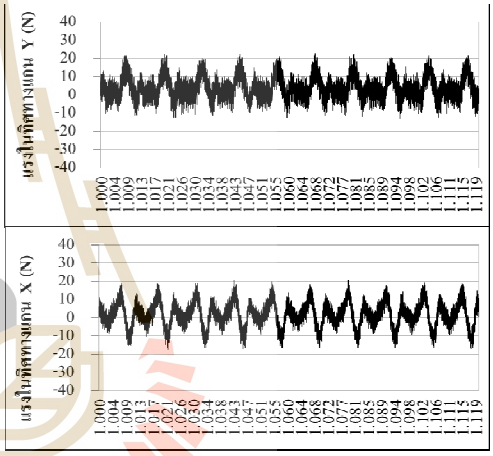
(a) CM, f= 50 mm/min



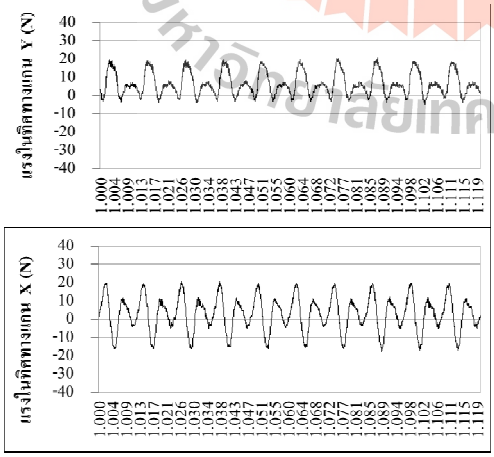
(b) UAM, f= 50 mm/min



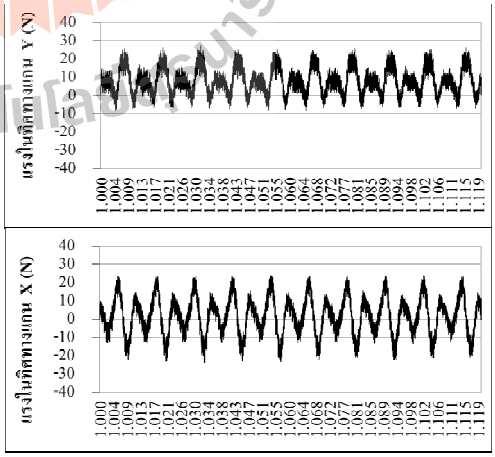
(c) CM, f= 100 mm/min



(d) UAM, f= 100 mm/min

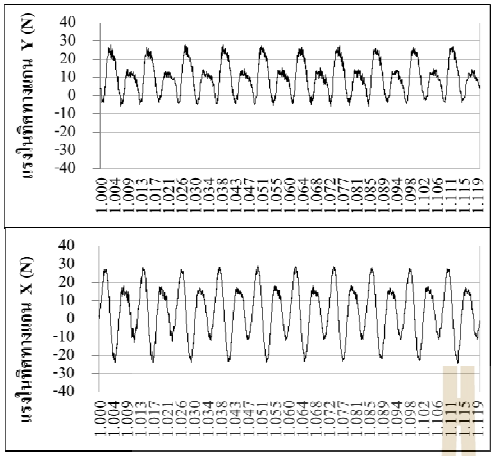


(e) CM, f= 200 mm/min

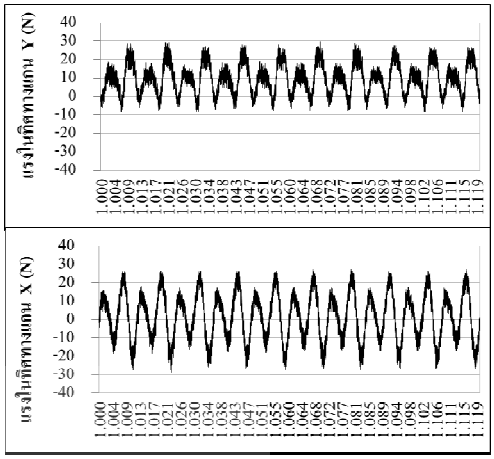


(f) UAM, f= 200 mm/min

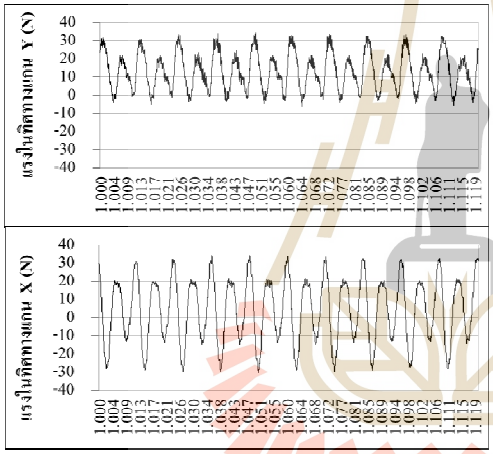
รูปที่ 4.16 แรงตัดในทิศทางแกน X และแกน Y ที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที



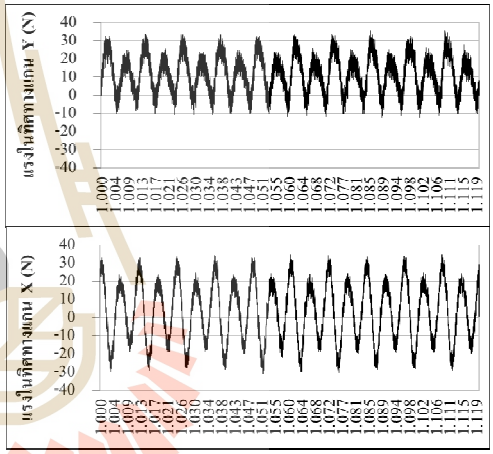
(g) CM, f= 300 mm/min



(g) UAM, f= 300 mm/min

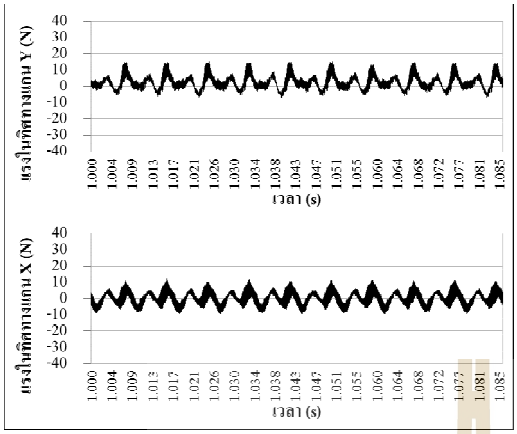


(h) CM, f= 400 mm/min

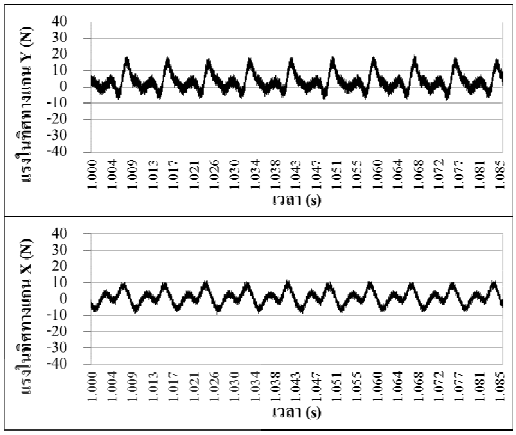


(i) UAM, f= 400 mm/min

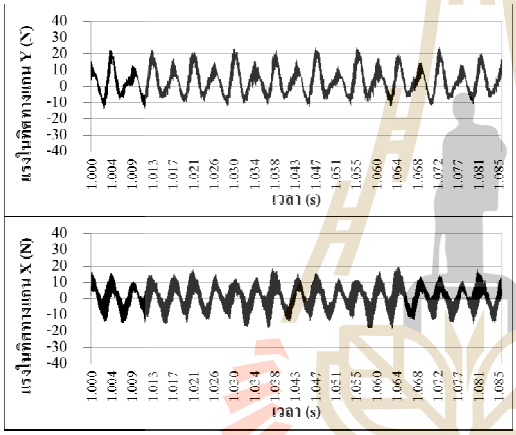
รูปที่ 4.16 แรงตัดในทิศทางแกน X และแกน Y ที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที (ต่อ)



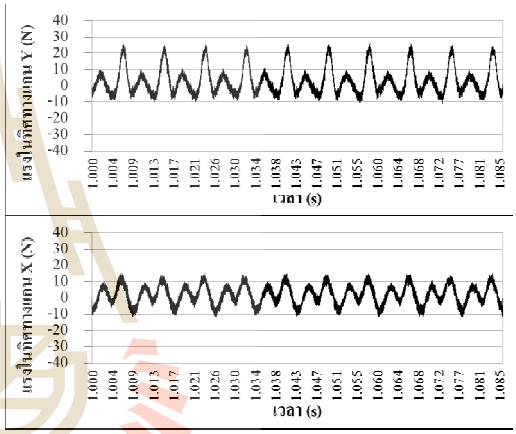
(a) CM, f= 50 mm/min



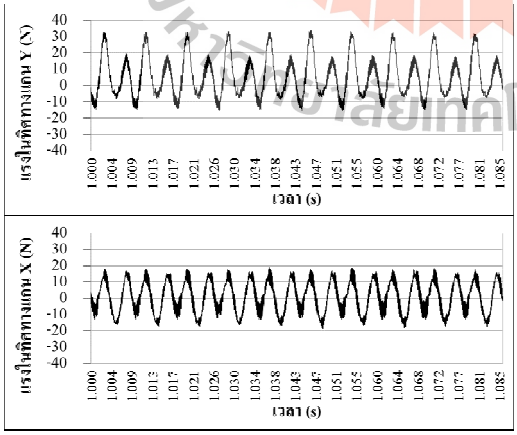
(b) UAM, f= 50 mm/min



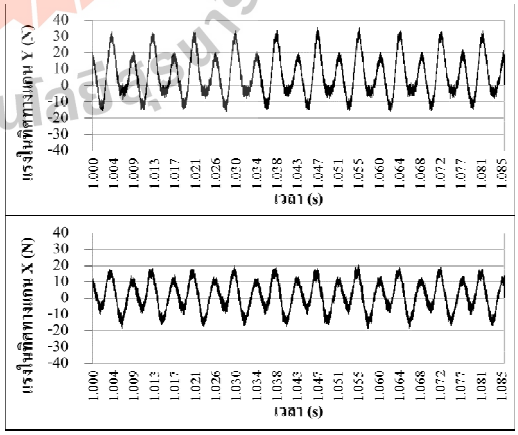
(c) CM, f= 100 mm/min



(d) UAM, f= 100 mm/min

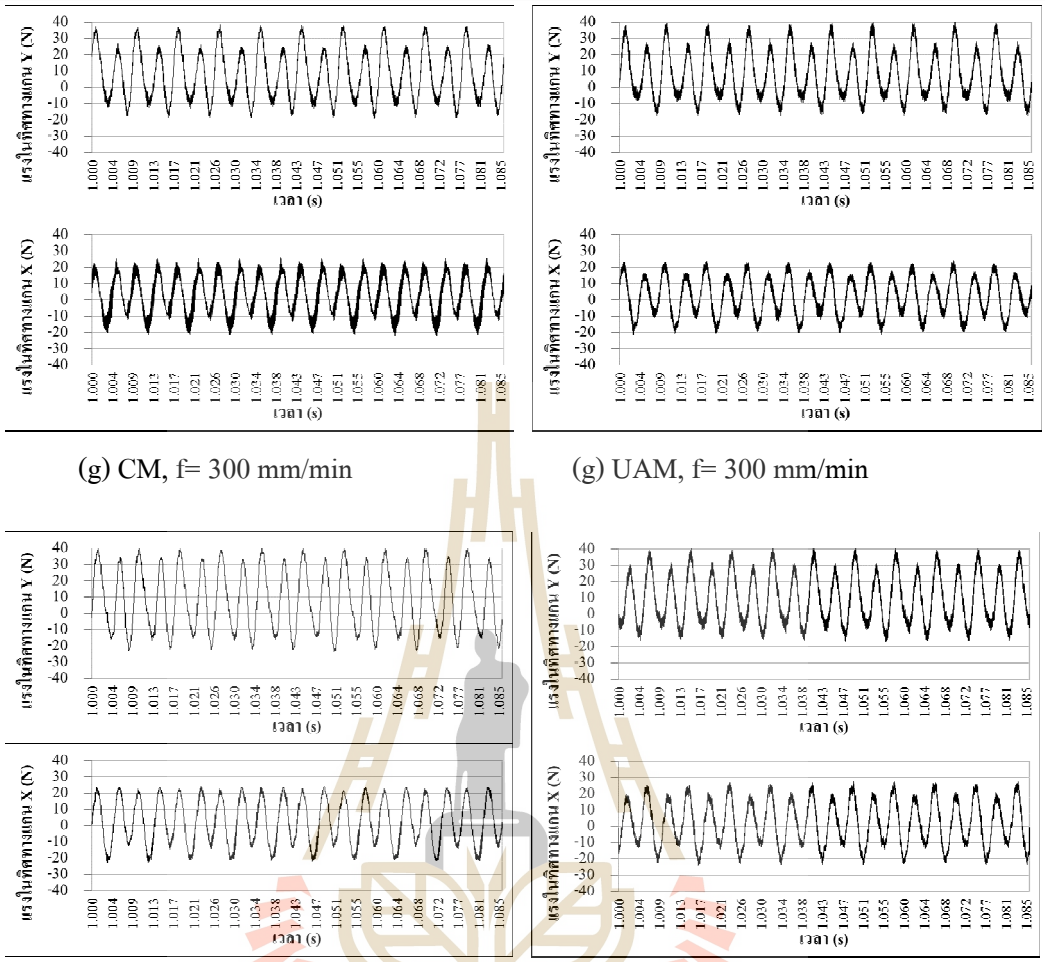


(e) CM, f= 200 mm/min



(f) UAM, f= 200 mm/min

รูปที่ 4.17 แรงตัดในทิศทางแกน X และแกน Y ที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที



(g) CM, f= 300 mm/min

(g) UAM, f= 300 mm/min

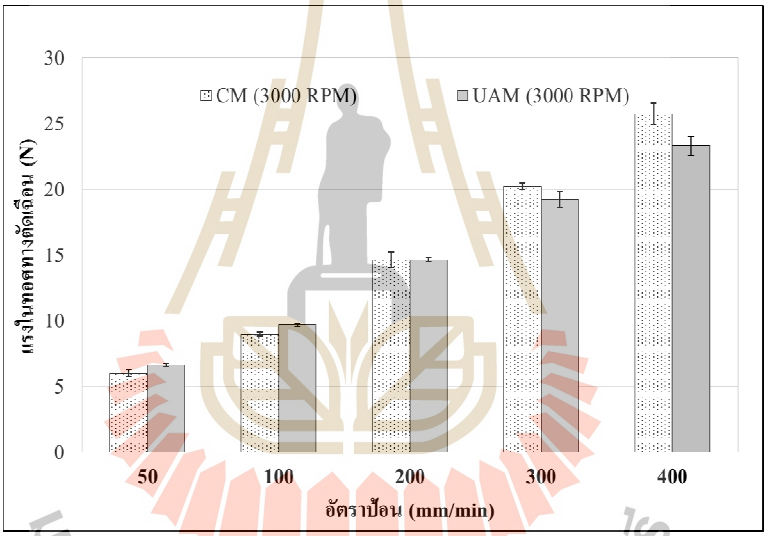
(h) CM, f= 400 mm/min

(i) UAM, f= 400 mm/min

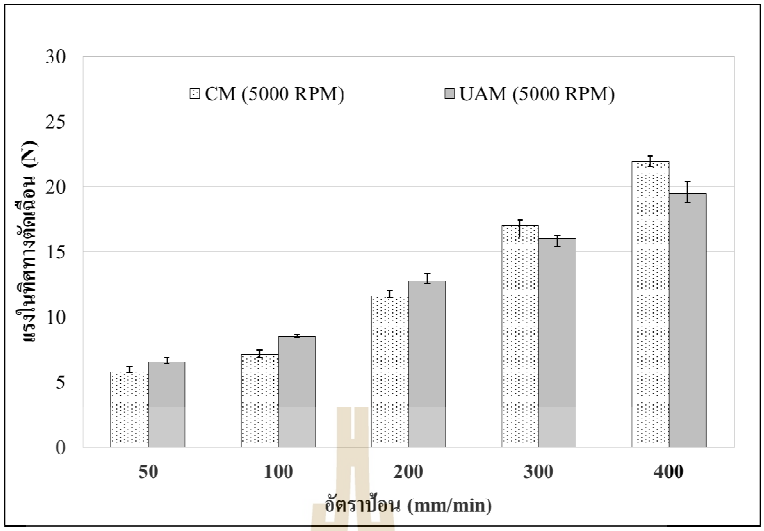
รูปที่ 4.17 แรงตัดในทิศทางแกน X และแกน Y ที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที (ต่อ)

รูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 แสดงค่าเฉลี่ยของแรงตัดที่เกิดขึ้นในทิศทางการตัดเฉือน (Force in cutting direction, Fc) โดยเปรียบเทียบในแต่ละระดับความเร็วรอบ 3000 5000 และ 7000 ตามลำดับ จากข้อมูลพบว่าเมื่ออัตราป้อนมากขึ้นส่งผลให้เกิดแรงตัดมากขึ้น โดยกล่าวคือ เมื่ออัตราป้อนซึ่งเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ชิ้นงานเข้าหาเครื่องมือตัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะของเนื้อวัสดุที่ต้องทำการตัดเฉือนมีความหนาหรือกว้างขึ้น ปริมาตรเนื้อวัสดุที่ถูกกระทำต่อคมตัดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้แรงที่ต้องใช้ในการกระทำให้เนื้อวัสดุแยกออกจากกันหรือแรงตัดมีค่ามากขึ้นด้วย จากการทดลองลองพบว่า ที่อัตราป้อน 400 มิลลเมตรต่อนาทีส่งผลให้เกิดแรงตัดมากที่สุดในทุก ๆ ระดับปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและปัจจัยความเร็วรอบและที่อัตราป้อน 50 มิลลิเมตรต่อนาทีส่งผลให้เกิดแรงตัดน้อยที่สุดในทุก ๆ ระดับปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดและปัจจัยความเร็วรอบเช่นกัน

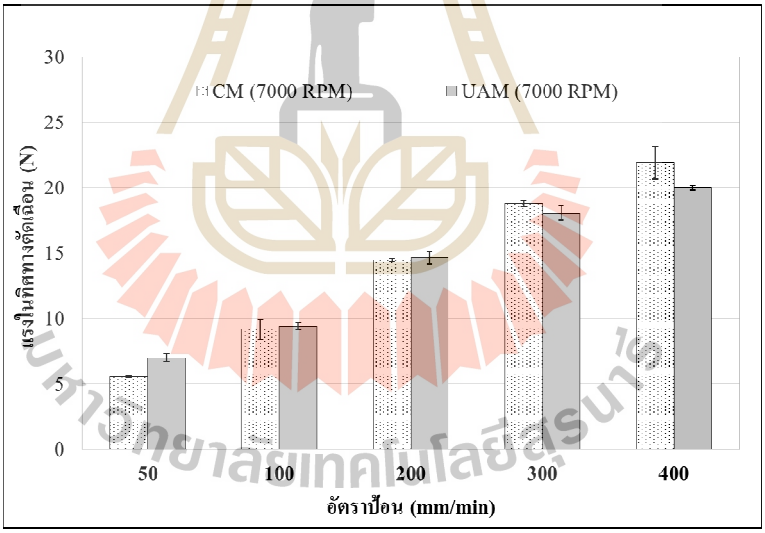
ความเร็วรอบส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นและการลดลงของแรงตัดเนื่องจากความเร็วรอบเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอัตราเนื้อวัสดุต่อฟันตัด (อัตราป้อนต่อฟันตัด) และความเร็วตัดจากผลการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบ3000 รอบต่อนาทีส่งผลให้เกิดแรงตัดมากที่สุดเนื่องจากคมตัดมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำเมื่อเทียบกับอัตราป้อน(อัตราการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อนเครื่องกัด)ส่งผลให้อัตราป้อนต่อฟันตัดหรือเนื้อวัสดุที่กระทำต่อฟันตัดมีขนาดมากขึ้นความเค้นที่จุดตัดเฉือนมีค่าสูงเพื่อให้เนื้อวัสดุฉีกขาดออกจากกัน ในขณะที่ความเร็วรอบ 5000 และ 7000 รอบต่อนาทีส่งผลให้ค่าแรงตัดมีค่าที่ต่ำ เนื่องจากความเร็วรอบที่สูงส่งผลให้เกิดความเร็วตัดสูงขึ้นแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุฉีกขาดออกจากกันง่ายขึ้นอีกทั้งอัตราป้อนต่อฟันตัดต่ำ ภาระโหลดของเนื้อวัสดุที่กระทำต่อจุดตัดเฉือนมีค่าน้อย ส่งผลให้แรงตัดมีค่าน้อย



รูปที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยแรงในทิศทางตัดเฉือนในแต่ละอัตราป้อนที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

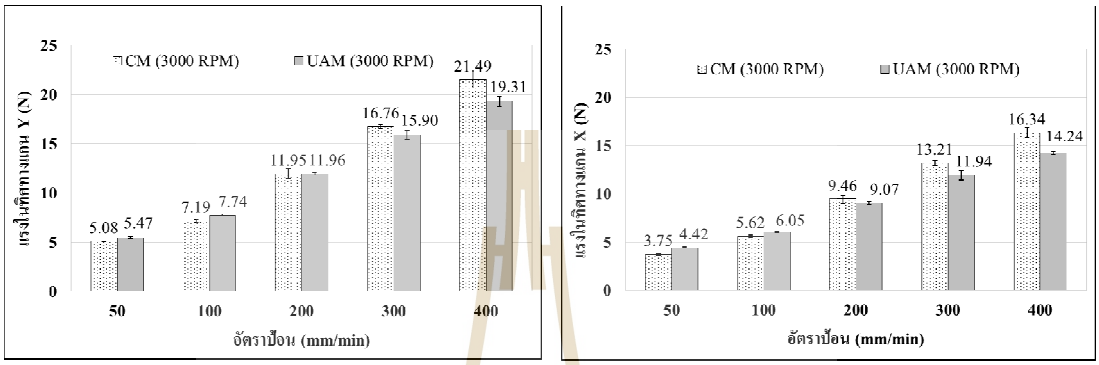


รูปที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยแรงในทิศทางตัดเฉือนในแต่ละอัตราป้อนที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที

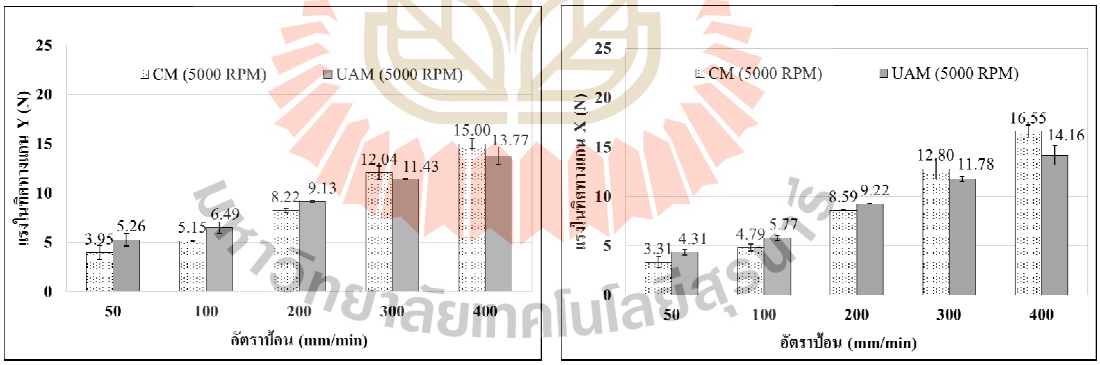


รูปที่ 4.20 ค่าเฉลี่ยแรงในทิศทางตัดเฉือนในแต่ละอัตราป้อนที่ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที

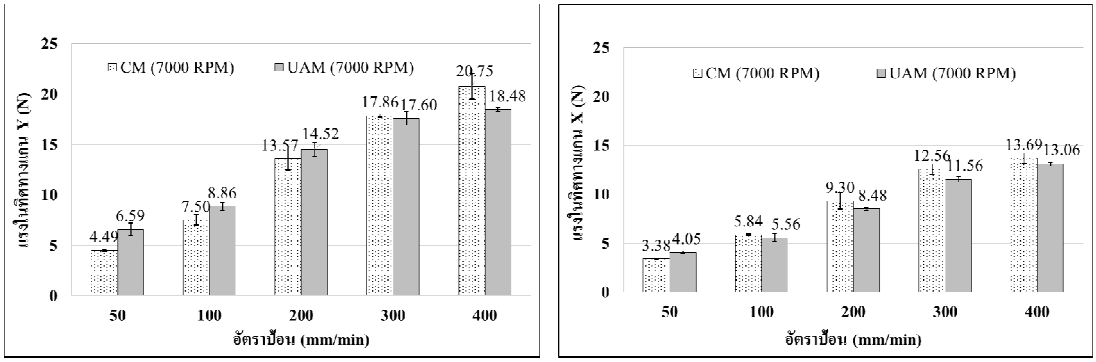
ในการวิเคราะห์แรงตัดในทิศทางแกน X (ทิศทางป้อนกัด) และทิศทางแกน Y พบว่าค่าเฉลี่ยแรงตัดที่วัดได้ในทิศทางแกน X ในแต่ละปัจจัยความเร็วตัดไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้าม ค่าเฉลี่ยแรงตัดในทิศทางแกน Y นั้นมีค่าที่เปลี่ยแปลงตามความเร็วรอบที่เปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่4.21 4.22และ 4.23



รูปที่ 4.21 ค่าเฉลี่ยแรงในทิศทางแกน X และ Y ในแต่ละอัตราป้อนที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

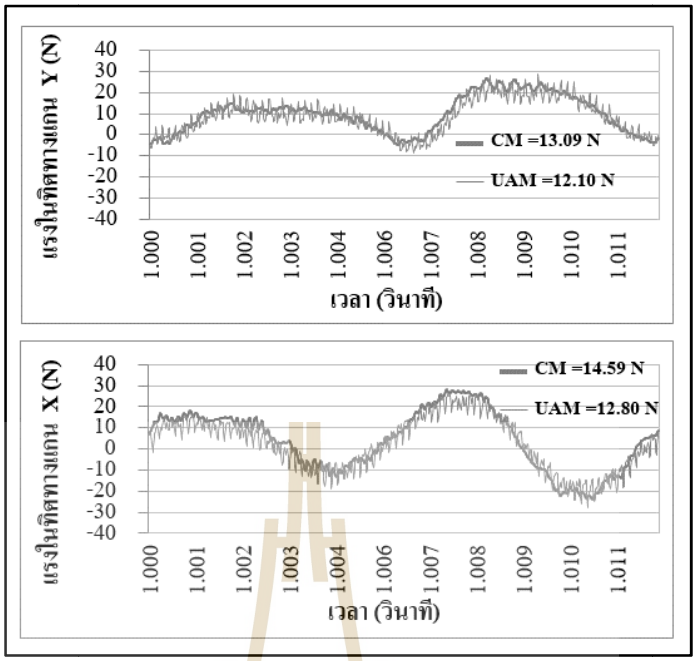


รูปที่ 4.22 ค่าเฉลี่ยแรงในทิศทางแกน X และ Y ในแต่ละอัตราป้อนที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที

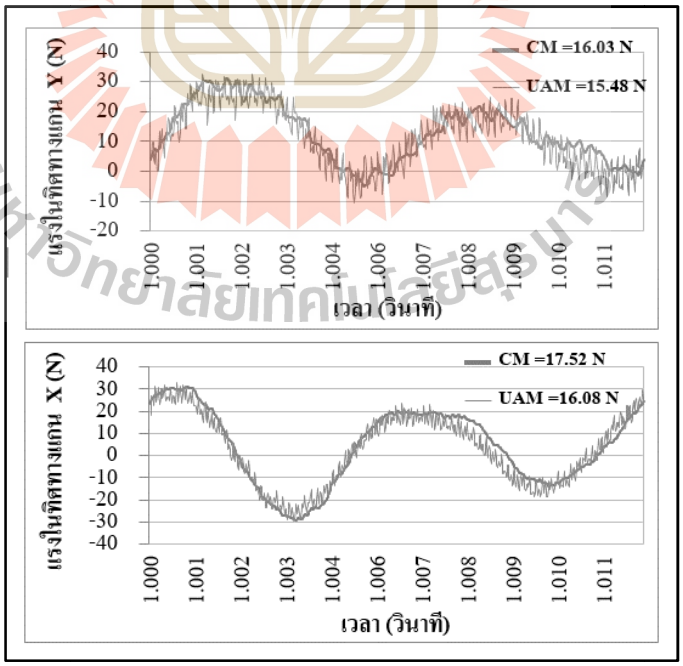


รูปที่ 4.23 ค่าเฉลี่ยแรงในทิศทางแกน X และ Y ในแต่ละอัตราป้อนที่ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงตัดระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดแบบทั่วไป และการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค พบว่า เมื่ออัตราป้อนสูงขึ้น การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงตัดมีค่าน้อยกว่ารูปแบบกระบวนการกัดแบบทั่วไปประมาณร้อยละ 7รูปที่ 4.24 และ4.25แสดงให้เห็นข้อมูลแรงตัดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการหมุนสำหรับการทดลองที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที โดยมีอัตราป้อน 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาทีตามลำดับ ลักษณะค่าแรงตัดที่เกิดจากการประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีลักษณะกระจัดขึ้นลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการสั่นไหวของชิ้นงานที่ทำให้เส้นทางเคลื่อนที่ของคมตัดเปลี่ยนแปลงและเกิดกลไกการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณตัดเฉือน ส่งผลให้รากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมแรงตัดกำลังสองมีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.24 แรงตัดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการหมุน(ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 300 มิลลิเมตรต่อนาที)



รูปที่ 4.25 แรงตัดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการหมุน(ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 400 มิลลิเมตรต่อนาที)

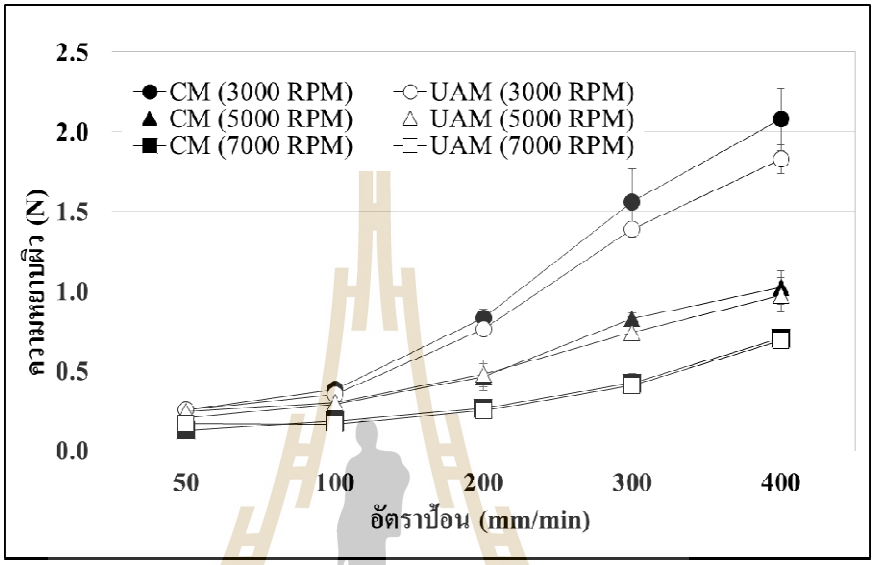
4.6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ความหยาบผิว

จากรูปที่ 4.26แสดงผลเฉลี่ยความหยาบผิวเมื่อทำการทดลองด้วยอัตราป้อน50100 200 300 และ 400มิลลิเมตรต่อนาทีโดยกำหนดระดับปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดเป็นสองระดับคือ กระบวนการกัดแบบทั่วไปกับการใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคและกำหนดระดับปัจจัยความเร็วรอบ3 ระดับคือ 3000 5000 และ 7000 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนให้มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ผลเฉลี่ยความหยาบผิวมีค่ามากขึ้นแสดงให้เห็นว่า ค่าความหยาบผิวแปรผันตรงกับอัตราป้อน และอัตราป้อนมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญดังได้กล่าวในหัวข้อ 4.1 โดยสามารถอธิบายกลไกการเพิ่มขึ้นค่าความหยาบผิวได้ว่า อัตราป้อนที่สูงขึ้นส่งผลให้รอยคมตัดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ตัดเฉือนของแต่ละคมตัดมีระยะห่างกันมากขึ้น เนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือนต่อคมตัดมีปริมาณมากขึ้น เกิดการสะสมของเศษวัสดุในระหว่างการตัดเฉือนก่อตัวเป็นยอดรอยตัดที่มีขนาดใหญ่และสูงความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวอันเนื่องมาจากร่องรอยการฉีกขาดที่มากขึ้น รวมไปถึงภาระโหลดที่กระทำต่อเครื่องมือตัดสูงทำให้เครื่องมือตัดเกิดการโก่งงอหรือเอียงเกิดร่องคมตัดที่มีความลึกมากกว่าการตัดเฉือนในสภาวะที่มีภาระโหลดน้อยปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้ส่งผลให้ความหยาบผิวที่วัดได้มีค่าที่สูงขึ้นเมื่ออัตราป้อนเพิ่มมากขึ้น

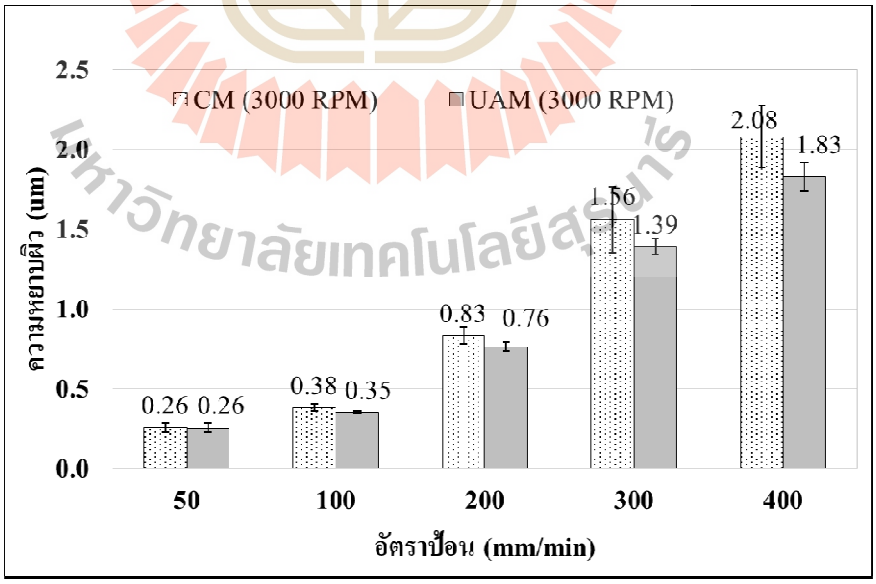
ความเร็วรอบเป็นอีกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญดังได้กล่าวในหัวข้อ 4.1 จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาทีค่าเฉลี่ยความหยาบผิวมีค่าน้อยที่สุด โดยสามารถอธิบายได้ว่าความเร็วรอบที่สูง การเคลื่อนที่ของคมตัดในการเข้าหาเนื้อวัสดุจะมีความถี่มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือนมีขนาดเล็ก เกิดการสะสมและก่อตัวของเนื้อวัสดุในระหว่างตัดเฉือนมีอัตราที่ต่ำ ภาระโหลดที่น้อยทำให้เกิดความลึกร่องคมตัดจากการโก่งตัวของคมตัดมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเร็วรอบลดลง การเคลื่อนที่ตัดเฉือนของแต่ละคมตัดมีระยะห่างกันมากขึ้น อัตราป้อนของเนื้อวัสดุต่อคมตัดเพิ่มมากขึ้น เกิดการสะสมของเศษวัสดุในระหว่างการตัดเฉือนก่อตัวเป็นยอดรอยตัดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตลอดจนภาระโหลดที่กระทำต่อเครื่องมือตัดที่สูง เกิดร่องคมตัดที่มีความลึกมากกว่าการตัดเฉือนในสภาวะที่มีภาระโหลดน้อยปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้ส่งผลให้ความหยาบผิวที่วัดได้มีค่าที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบลดลง

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงตัดระหว่างระดับปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดแบบทั่วไปและการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคพบว่า ที่ความเร็วรอบที่5000 และ 7000 รอบต่อนาที การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดที่อัตราป้อนสูง300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาทีส่งผลค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 9.7เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกัดแบบทั่วไป

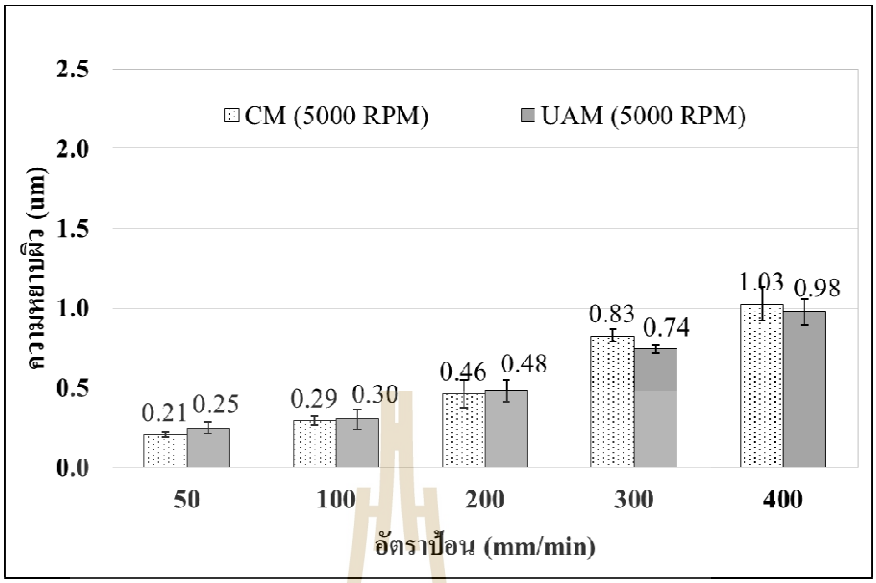
รูปที่ 4.274.28และ 4.29 แสดงกราฟแท่งการเปรียบเทียบความหยาบผิวระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดแบบทั่วไปและการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในแต่ละระดับความเร็วรอบ



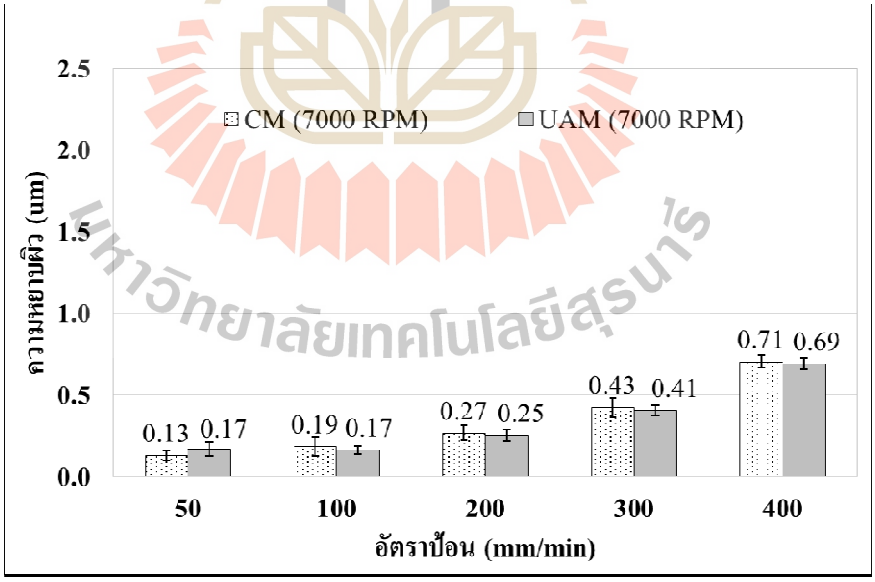
รูปที่ 4.26 ความหยาบผิวในแต่ละอัตราป้อนและความเร็วรอบ



รูปที่ 4.27 ความหยาบผิวเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.28 ความหยาบผิวเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที

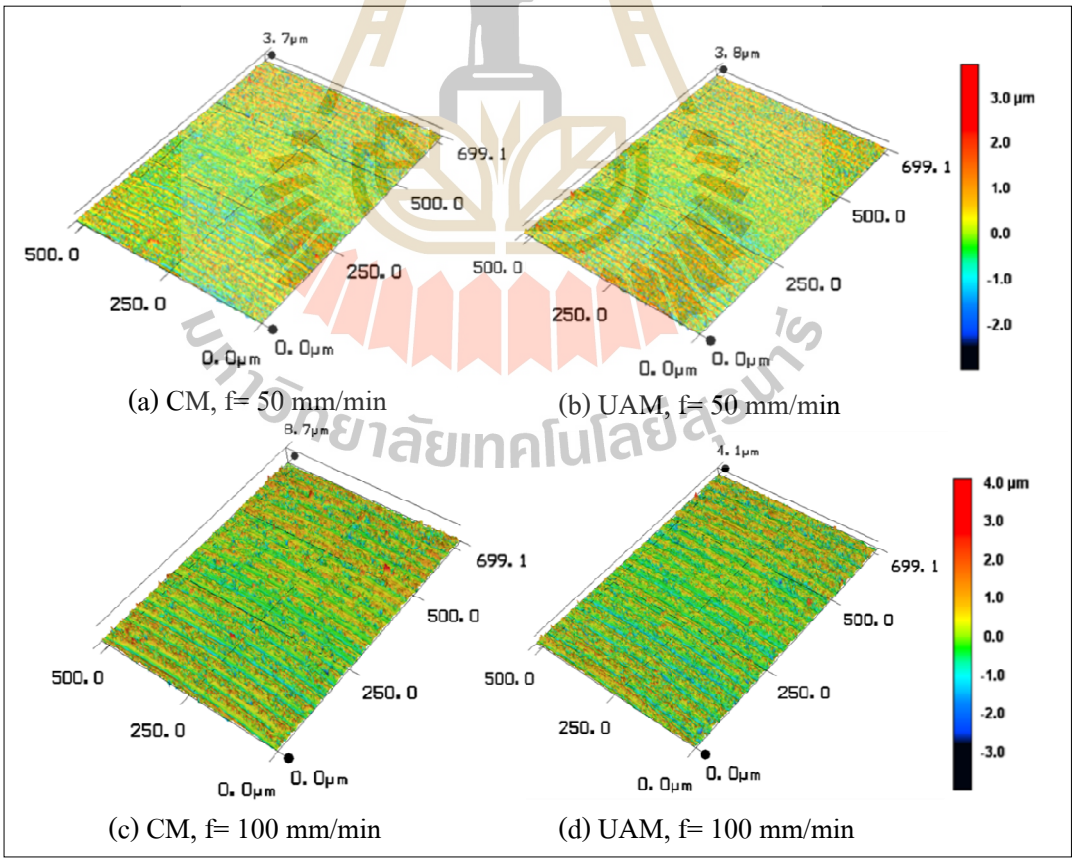


รูปที่ 4.29 ความหยาบผิวเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบกระบวนการกัดที่ความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที

4.7 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอล

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรน์แบบคอนโฟคอล ของชิ้นงานอลูมิเนียมที่ทำการตัดเฉือนด้วยกระบวนการกัดแบบทั่วไปเปรียบเทียบกับกระบวนการกัดที่ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค ใช้การสแกนพื้นผิวด้วยแสงเลเซอร์ที่มีกำลังขยาย 20 เท่าเพื่อแสดงลักษณะสูงต่ำของพื้นผิวด้วยความแตกต่างของระดับเฉดสีในมุมมองสามมิติ

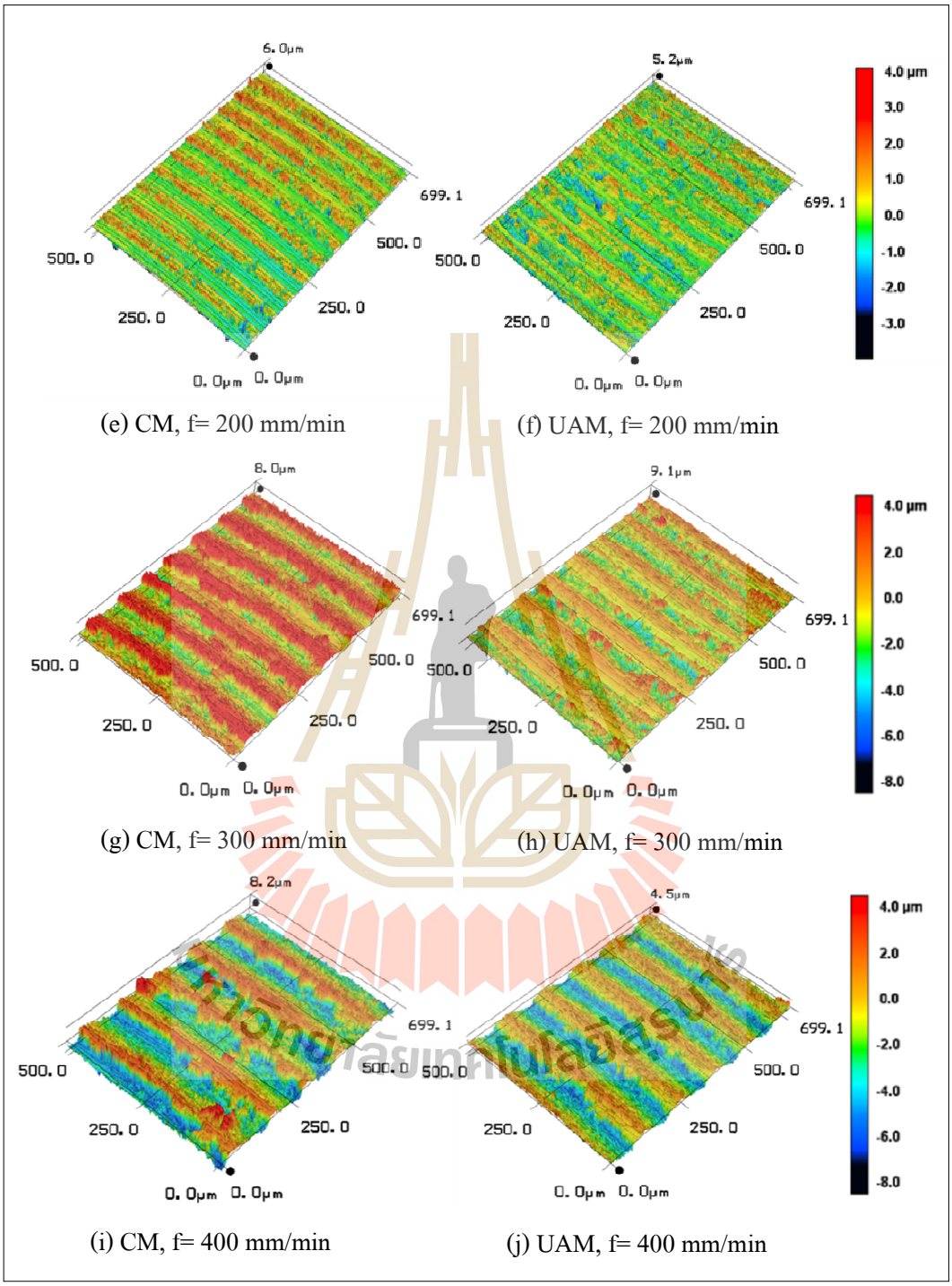
รูปที่ 4.30 4.31และ 4.32แสดงลักษณะพื้นผิวในมุมมองสามมิติ ของแต่ละระดับความเร็วรอบ 30005000 และ 7000 รอบต่อนาทีตามลำดับโดยทำการเปรียบเทียบในแต่ละระดับอัตราป้อน 50100 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาทีรูปที่ 4.30แสดงผลการทดลองระดับความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาทีพบว่าลักษณะความพื้นผิวของกระบวนการกัดแบบทั่วไปที่อัตราป้อน 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที มียอดรอยคมตัดที่สูงกว่าผิวชิ้นงานที่ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราป้อน 400 มิลลิเมตรต่อนาทีของกระบวนการกัดแบบทั่วไปพบว่ามีความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวอันเนื่องมาจากร่องรอยการฉีกขาดของเนื้อวัสดุในระหว่างการตัดเฉือนที่มากกว่าผิวของชิ้นงานที่ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค



(a) CM, f= 50 mm/min (b) UAM, f= 50 mm/min

(c) CM, f= 100 mm/min (d) UAM, f= 100 mm/min

รูปที่ 4.30 ลักษณะพื้นผิวสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที



(e) CM, f= 200 mm/min (f) UAM, f= 200 mm/min

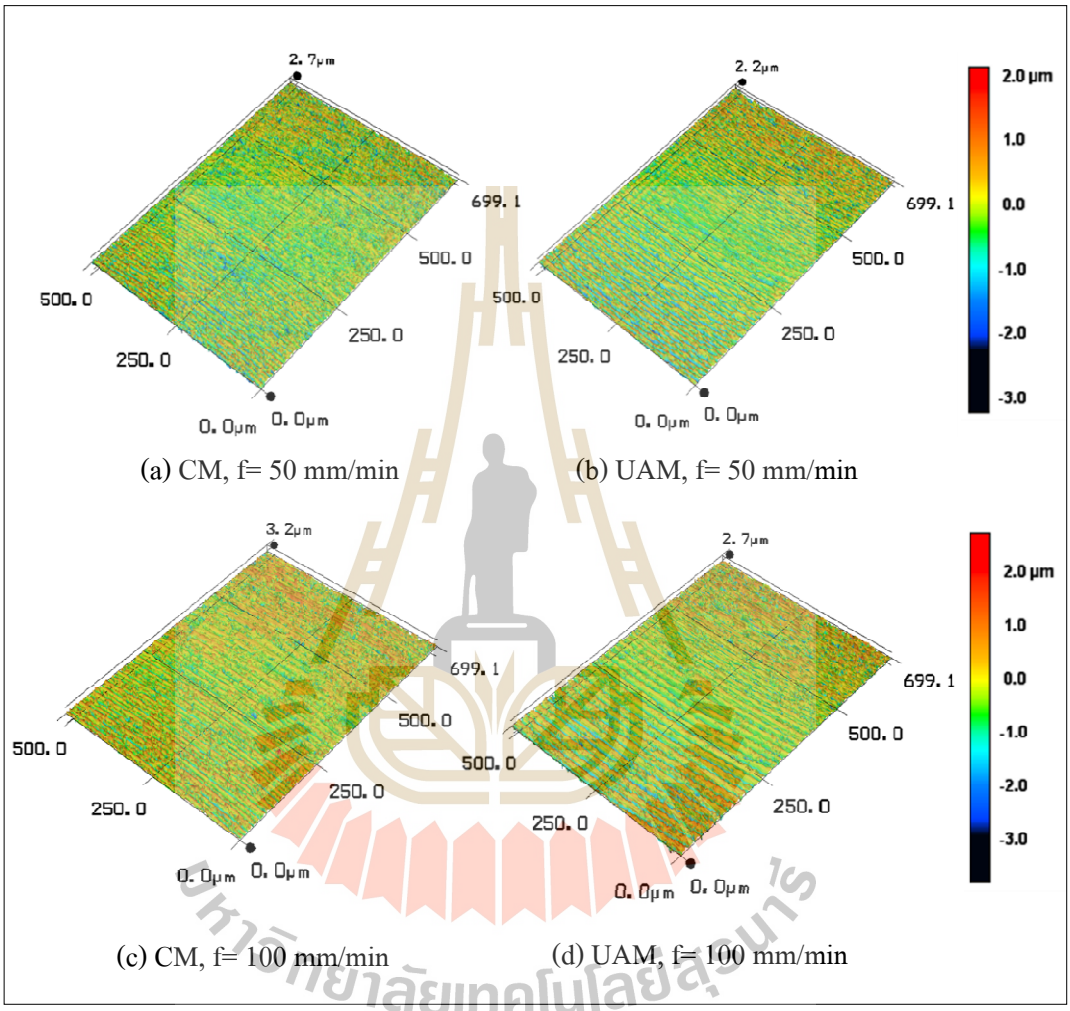
(g) CM, f= 300 mm/min (h) UAM, f= 300 mm/min

(i) CM, f= 400 mm/min (j) UAM, f= 400 mm/min

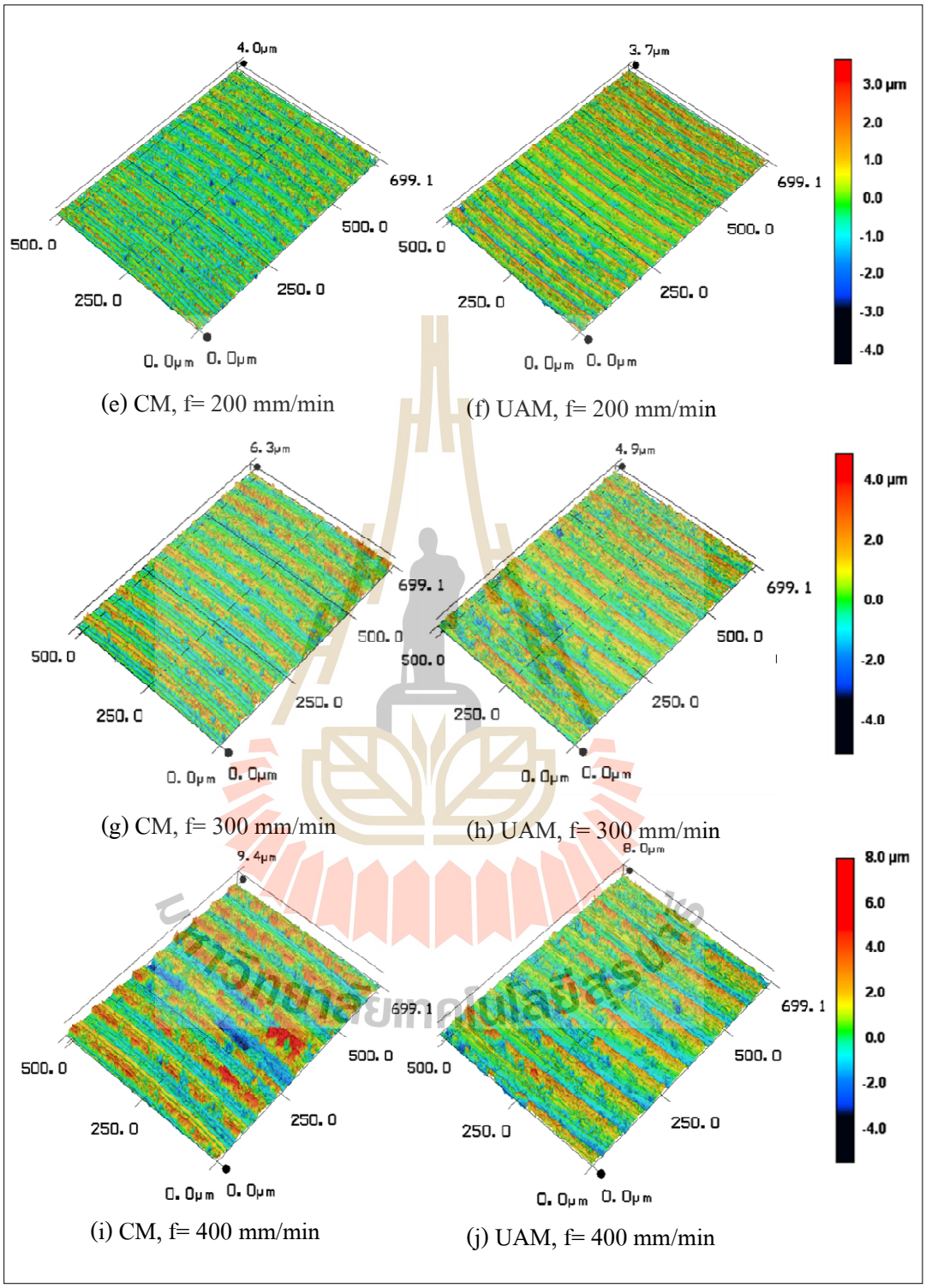
รูปที่ 4.30 ลักษณะพื้นผิวสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที (ต่อ)

จากรูปที่ 4.31แสดงลักษณะพื้นผิวมุมมองสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาทีพบว่าที่อัตราป้อน 400 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะพื้นผิวของกระบวนการกัดแบบทั่วไป

มียอดรอยคมตัดที่สูงกว่าผิวของชิ้นงานที่ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคโดยพบว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไปมีความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวอันเนื่องมาจากร่องรอยการฉีกขาดของเนื้อวัสดุในระหว่างการตัดเฉือนมากกว่าผิวของชิ้นงานที่ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค



รูปที่ 4.31 ลักษณะพื้นผิวสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที



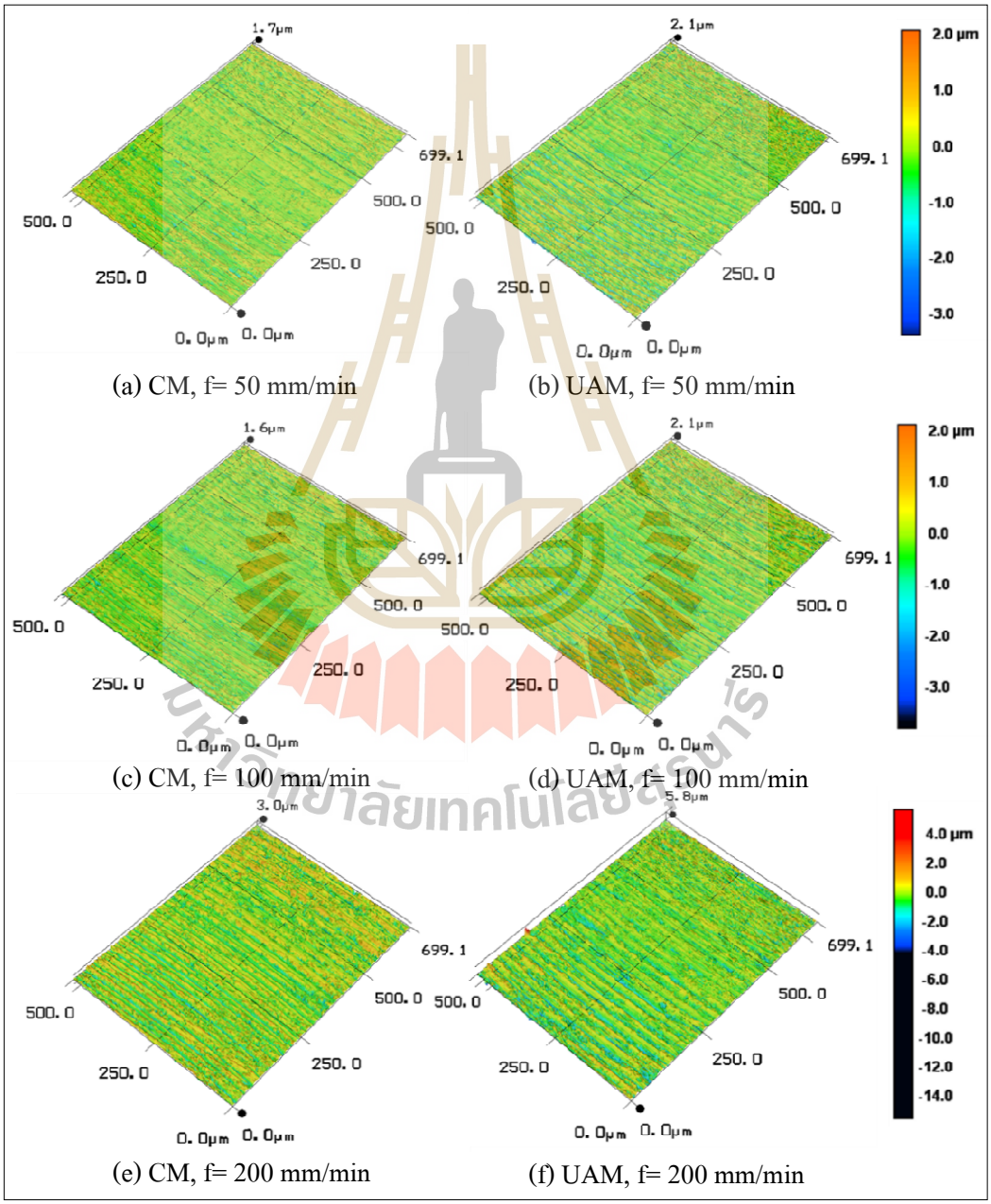
(e) CM, f= 200 mm/min (f) UAM, f= 200 mm/min

(g) CM, f= 300 mm/min (h) UAM, f= 300 mm/min

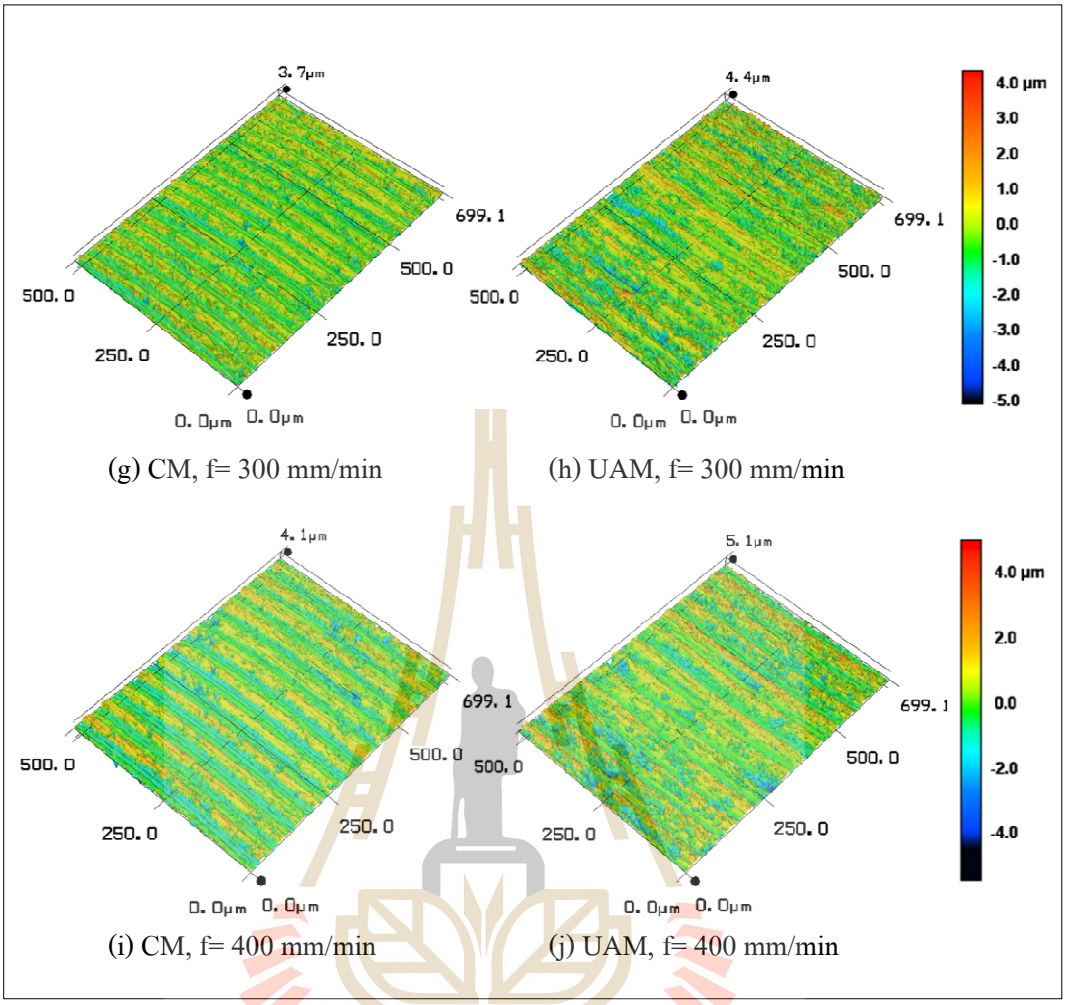
(i) CM, f= 400 mm/min (j) UAM, f= 400 mm/min

รูปที่ 4.31 ลักษณะพื้นผิวสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที (ต่อ)

รูปที่ 4.32แสดงลักษณะพื้นผิวมุมมองสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที พบว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไปและการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการกัดส่งผลให้เกิดความสูงต่ำของร่องการตัดเฉือนหรือแนวโน้มความหยาบผิวไม่แตกต่างกันมากนัก มีเพียงลักษณะของเส้นรอยคมตัดของกระบวนการกัดทั่วไปที่ความแตกต่างจากการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.32 ลักษณะพื้นผิวสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที



(g) CM, f= 300 mm/min (h) UAM, f= 300 mm/min

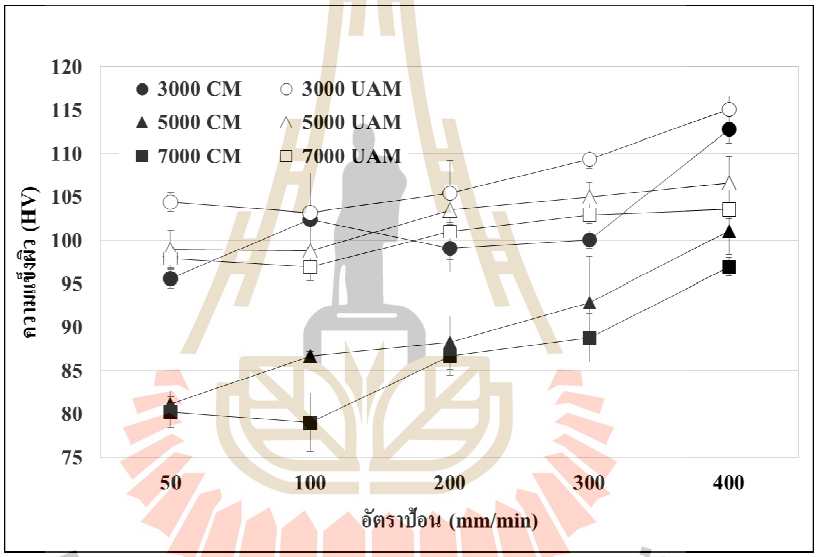
(i) CM, f= 400 mm/min (j) UAM, f= 400 mm/min

รูปที่ 4.32 ลักษณะพื้นผิวสามมิติของชิ้นงานกัดด้วยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที (ต่อ)

4.8 การวิเคราะห์ความแข็งผิว

ผลการทดลองการตัดเฉือนชิ้นงานโดยกระบวนการกัดแบบทั่วไปเปรียบเทียบกับการประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการกัดดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่า การประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับชิ้นงานในขณะตัดเฉือน มีผลให้ค่าความแข็งผิวสูงขึ้นสามารถอธิบายตามสมมุติฐานได้ว่า การสั่นสะเทือนของชิ้นงานในทิศทางป้อนตัดทำให้คมตัดเคลื่อนที่ไปมาบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยความถี่ 19กิโลเฮิรตซ์ เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างคมตัดและผิววัสดุขณะทำการตัดเฉือนรวมจนถึงความเค้นและการเคลื่อนตัวของโครงสร้างผิวที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรกลไกเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการเพิ่มความแข็งในงาน (work hardening) หรือความเครียดแข็งตัว(strain hardening)

การเพิ่มความเร็วรอบที่ 7000 รอบต่อนาที ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ 3000 และ 5000 รอบต่อนาทีทั้งนี้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบลดลงโดยสามารถอธิบายได้ว่า ความเร็วรอบสูง ทำให้อัตราป้อนต่อฟันตัดต่ำ ความเค้นที่กระทำต่อพื้นผิวและการเคลื่อนที่ของระนาบอะตอม (dislocation) อันส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความแข็งผิวมีแนวโน้มลดลง ในทำนองเดียวกันการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนต่อฟันตัดที่มีค่ามากส่งผลให้แนวโน้มของค่าเฉลี่ยความแข็งผิวมีค่ามากขึ้น สาเหตุอันเนื่องมาจากความเค้นที่กระทำต่อผิวมีค่ามากขึ้น เกิดแนวโน้มการเคลื่อนที่ของระนาบอะตอมที่มากขึ้น ระยะห่างระหว่างอะตอมชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ระนาบอะตอมเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น



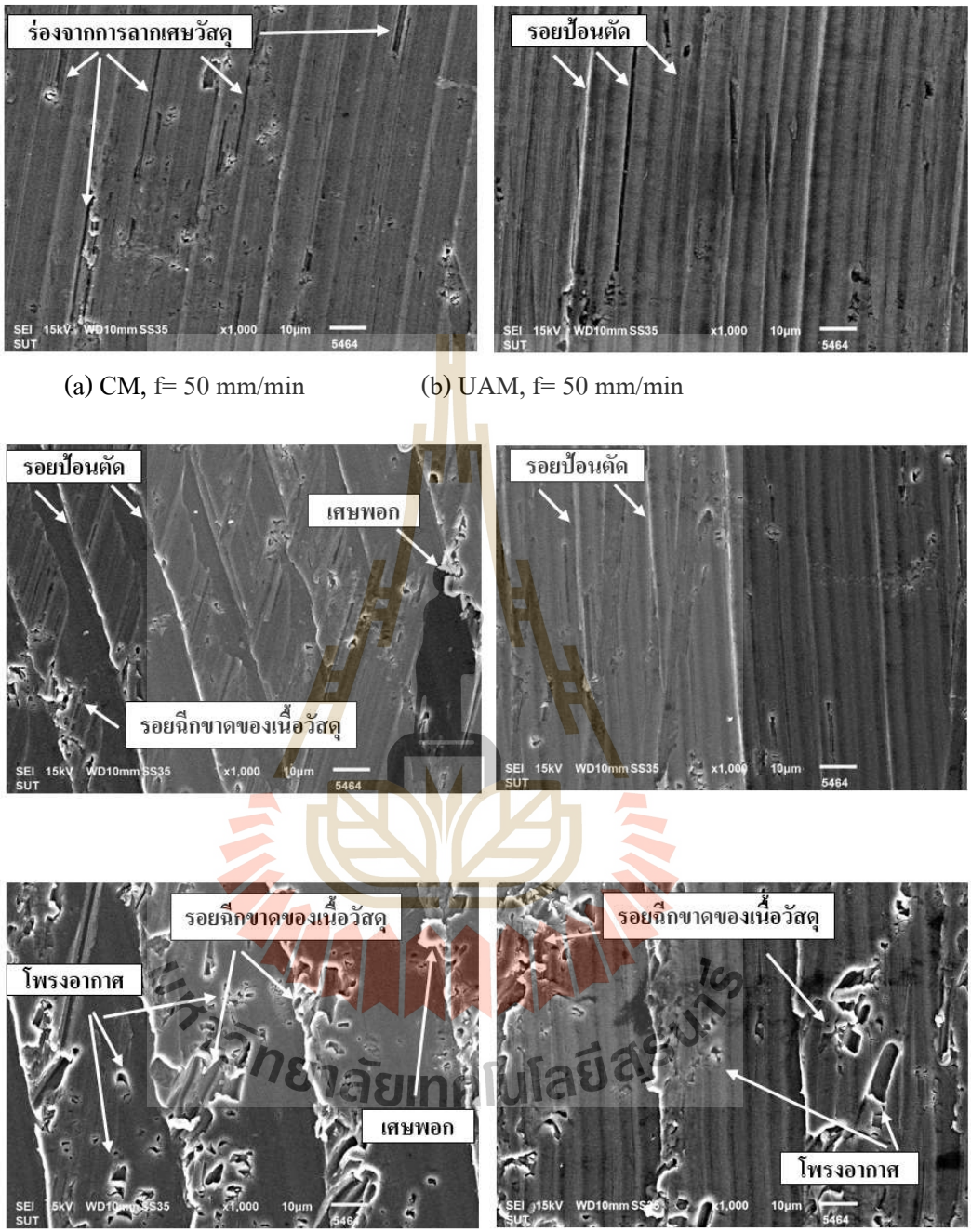
รูปที่ 4.33ค่าความแข็งผิวในแต่ละอัตราป้อนและความเร็วรอบ

4.9 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวชิ้นงานอลูมิเนียม A356

การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์ของผิวชิ้นงานอลูมิเนียม A356 หลังทำการตัดเฉือน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะผิวชิ้นงานระหว่างกระบวนการกัดแบบทั่วไปและการประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในการกัดด้วยกำลังขยาย 1000 เท่า ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดสามารถแสดงลักษณะของพื้นผิวและข้อบกพร่องของผิวงานที่เกิดจากการตัดเฉือนด้วยคมตัด

จากรูปที่4.34แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์ของลักณะพื้นผิวชิ้นงานที่กัดด้วยความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาทีเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการกัดแบบทั่วไปและการกัดที่ประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค พบว่าชิ้นงานที่ประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีรอยคมตัดแสดงอยู่บนผิวของชิ้นงาน โดยสามารถอธิบายได้ว่า การสั่นสะเทือนในระหว่างการกัดส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดมีลักษณะเป็นเส้นโค้งกลับไปกลับมาหลงเหลือร่องรอยการเคลื่อนที่ของคมตัดที่กระทำต่อพื้นผิวและเนื้อวัสดุ ซึ่งกลไกนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวน การกัดแบบทั่วไป

เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้น รอยป้อนตัดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ตัดเฉือนของคมตัดมีระยะกว้างมากขึ้น เป็นสาเหตของการเกิดการฉีกขาดของเนื้อวัสดุ การแตกหักโพรงอากาศและข้อบกพร่องให้กับผิวชิ้นงานมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการฉีกขาดและการเกิดโพรงอากาศของเนื้อวัสดุระหว่างลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดแบบทั่วไปและชิ้นงานที่ประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคพบว่า ชิ้นงานที่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดแบบทั่วไปจะแสดงการฉีกขาดของรอยป้อนตัดมากกว่าชิ้นงานที่ประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิค สมมุติฐานเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของคมตัดเป็นเส้นโค้งไปมาช่วยลดการสะสมของเศษวัสดุที่กระทำต่อผิวชิ้นงานและการแตกหักหรือฉีกขาดของเนื้อวัสดุ ด้วยเหตุนี้แนวโน้มของความหยาบผิวที่วัดได้จึงมีแนวโน้มที่ดีและชัดเจนมากขึ้นเมื่ออัตราป้อนเพิ่มสูงขึ้น



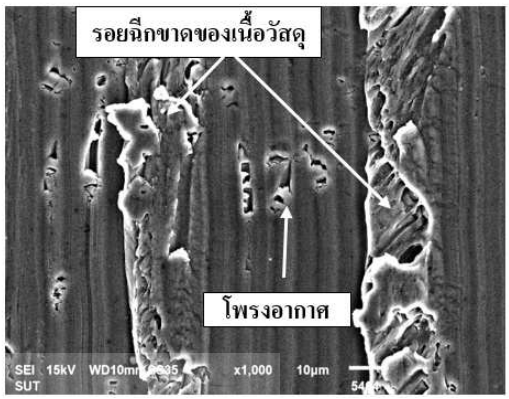
(a) CM, f= 50 mm/min (b) UAM, f= 50 mm/min

(a) CM, f= 100 mm/min (b) UAM, f= 100 mm/min

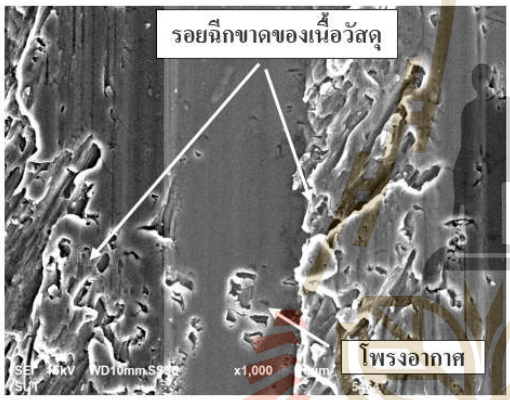
(a) CM, f= 200 mm/min (b) UAM, f= 200 mm/min

รูปที่ 4.34 ภาพ SEM ของผิวชิ้นงานที่กัดด้วยความเร็วรอบ 5000 มิลลิเมตรต่อนาที

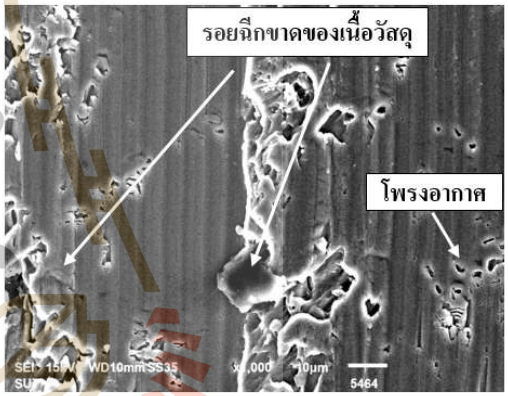
(a) CM, f= 300 mm/min



(b) UAM, f= 300 mm/min



(a) CM, f= 400 mm/min



(b) UAM, f= 400 mm/min

รูปที่ 4.34 ภาพ SEM ของผิวชิ้นงานที่กัดด้วยความเร็วรอบ 5000 มิลลิเมตรต่อนาที (ต่อ)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การดำเนินการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยการตัดอลูมิเนียมหล่อ ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 ความหยาบผิว

5.2 ความแข็งผิว

5.3 แบบจำลองทำนายค่าความหยาบผิวและค่าความแข็งผิว

5.4 แรงตัด

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.1 ความหยาบผิว

ปัจจัยอัตราป้อนและความเร็วรอบเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ในขณะที่ปัจจัยรูปแบบกระบวนการกัดมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวเมื่อมีอันตรกิริยาร่วมกับปัจจัยอัตราป้อนหรือความเร็วรอบ

อัตราป้อนและความเร็วรอบเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวอย่างมากเนื่องจากเป็นปัจจัยกำหนดรูปร่างและขนาดรอยป้อนตัดจากการตัดเฉือนให้กับผิวชิ้นงานเมื่ออัตราป้อนมากขึ้นส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่ออัตราป้อนต่ำส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าน้อยลง ในขณะเดียวกัน ความเร็วรอบแปรผกผันกับขนาดรอยป้อนตัดอันเป็นตัวแปรต้นของความหยาบผิว เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าลดลง และเมื่อความเร็วรอบลดลงส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าสูงขึ้น

ในกระบวนการกัดที่อัตราป้อนสูงและความเร็วรอบต่ำเกิดสภาวะการตัดเฉือนที่มีภาระโหลดมาก การสะสมของเศษวัสดุในขณะตัดเฉือนและการเกิดข้อบกพร่องต่อผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่สูงขึ้นการประยุกต์การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคให้กับชิ้นงาน ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของคมตัด ลดการสะสมของเศษวัสดุที่คมตัดขณะตัดเฉือน ข้อบกพร่องและการฉีกขาดของเนื้อวัสดุบนผิวของชิ้นงานมีแน้วโน้มลดลง ส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกัดแบบทั่วไป

การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในกระบวนการกัดส่งผลให้ระดับความสูงรอยคมตัดมีลักษณะต่ำกว่าการกัดแบบทั่วไป ร่องรอยการฉีกขาดของเนื้อวัสดุที่เกิดจากการตัดเฉือนมีแนวโน้มลดลง โดยสามารถสังเกตเห็นชัดเจนในกลุ่มการทดลองความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ด้วยอัตราป้อน 300และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที หรือกล่าวได้ว่าในกระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่มีปริมาตรสูงและภาระโหลดสูง การเคลื่อนที่ของคมตัดจากการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคสามารถลดกลไกการเกิดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบทั่วไปการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคของชิ้นงานส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดเปลี่ยนแปลง สังเกตได้จากรอยป้อนตัดบนผิวชิ้นงานเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งเลี้ยวเบนไปมา พื้นผิวมีแนวโน้มการฉีกขาดของเนื้อวัสดุและโพรงอากาศน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกัดแบบทั่วไป กล่าวได้ว่าการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคก่อให้เกิดกลไกที่ช่วยลดการสะสมของเศษวัสดุที่กระทำต่อบริเวณคมตัดและผิวชิ้นงาน

5.2 ความแข็งผิว

ปัจจัยอัตราป้อนรูปแบบกระบวนการกัดและความเร็วรอบเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวมากไปหาน้อยตามลำดับ การเพิ่มอัตราป้อนและการลดความเร็วรอบส่งผลให้ความแข็งผิวมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการป้อนตัดที่มีระยะมาก ปริมาณเนื้อวัสดุต่อการตัดเฉือนมากขึ้น เกิดความเค้นสูงในบริเวณที่ทำการตัดเฉือน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (plastic deformation) เพิ่มมากขึ้น อันเป็นสาเหตุของการเพิ่มความแข็งในงาน (work hardening) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

การสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคส่งผลให้เกิดความแข็งของผิวมากขึ้น เนื่องด้วยวัสดุที่เสียรูปจากการตัดเฉือนไปแล้วรับแรงอีกครั้งหนึ่งจากการเคลื่อนที่ของคมตัดที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสั่นสะเทือน ทำให้จุดครากสูงขึ้น ระนาบอะตอมเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้นกว่าเดิมส่งผลให้ความแข็งผิวของชิ้นงานมีค่ามากกว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไปร้อยละ 12

5.3 แบบจำลองทำนายค่าความหยาบผิวและค่าความแข็งผิว

การหาแบบจำลองความหยาบผิวและความแข็งผิวโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสองเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าผลทำนายความหยาบผิวและความแข็งผิวด้วยแบบจำลองสมการถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสองมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงน้อยกว่าแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้น เนื่องจากแบบจำลองถดถอยโพลิโนเมียลดีกรีสองได้พิจารณาอิทธิพลของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและกำลังสองของปัจจัย ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของผลทำนายความหยาบผิวจากแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสองเท่ากับร้อยละ 38.67 และ 12.80 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ความคลาดเคลื่อนของผลทำนาย

ความแข็งผิวจากแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสองเท่ากับร้อยละ 3.29 และ 1.92 ตามลำดับ

5.4 แรงตัด

การเปลี่ยนแปลงของแรงตัดที่วัดได้ในการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนส่งผลให้เนื้อวัสดุที่ทำการตัดเฉือนต่อการหมุนของคมตัดมีปริมาตรมากขึ้น แรงกระทำเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปและขาดออกจากกันต้องมีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้ามการลดลงของอัตราป้อนส่งผลให้เนื้อวัสดุที่ทำการตัดเฉือนต่อการหมุนของคมตัดมีปริมาตรน้อยลง แรงกระทำเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปและขาดออกจากกันมีค่าต่ำจะเห็นได้ว่าอัตราป้อนแปรผันตรงต่อปริมาณเนื้อวัสดุพื้นที่ตัดเฉือนและผลรวมของแรงตัดที่เกิดขึ้น

2) ความเร็วรอบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราป้อนต่อฟันตัด เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของคมตัดต่ออัตราป้อนมีค่าสูง ปริมาตรเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือนต่อรอบการหมุนของคมตัดลดลง ส่งผลให้แรงกระทำเพื่อให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปและขาดออกจากกันมีค่าน้อยในทางกลับกัน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคมตัดต่ออัตราป้อนมีค่าต่ำปริมาตรเนื้อวัสดุที่ตัดเฉือนต่อรอบการหมุนของคมตัดมากขึ้น ส่งผลให้แรงกระทำเพื่อให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปและขาดออกจากกันมีค่ามากขึ้น

3) การเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่มีการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของคมตัดและเป็นกลไกช่วยลดความเค้นสะสมจากเศษวัสดุที่เกิดขึ้นที่คมตัดในขณะตัดเฉือน ซึ่งผลกระทบเชิงบวกแสดงให้เห็นชัดเจนเมื่อการตัดเฉือนมีอัตราป้อนสูง ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงตัดลดลงร้อยละ 7% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกัดแบบทั่วไป

5.5 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้และกระบวนการในการศึกษาการสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการตัดอลูมิเนียมหล่อนี้ จะเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยการตัดเฉือนด้วยการประยุกต์การสั่นสะเทือนในรูปแบบอื่นๆ ต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์สำหรับการทดลองเครื่องสร้างการสั่นสะเทือนเครื่องมือวัดความถี่และขนาดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน เพื่อให้เกิดแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการตัดเฉือนที่ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนไปใช้ในอุตสาหกรรมจริงและเกิดประโยชน์สูงสุด

รายการอ้างอิง

ชาลี ตระกูลการ (2550).**เทคโนโลยีซีเอ็นซี (CNC TECHNOLOGY)**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

นวภัทรา หนูนาค และ ทวีพล ซื่อสัตย์ (2555). **การวัดและเครื่องมือวัด การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Measurement and Instrumentation)**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

มานพ ตันตระบัณฑิต (2541). **เขียนแบบวิศวกรรม (ระบบ ISO และเมตริก)**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 73-81.

อำนาจ ทองแสน (2544). **ทฤษฎีและการเขียนโปรแกรม CNC สำหรับควบคุมเครื่องจักรกลด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control)**. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด (มหาชน). 152-155.

Abdullah, A., and Shabgard, M.R. (2007). **Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co)**.International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.38, 1137-1147.

Abootorabi, Zarchi MM., Razfar, MR. Abdullah A. (2013). **Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.66, 83-92.

Ahmed, N., Mitrofanov, A.V., Babitsky, V. I., and Silberschmidt, V.V. (2007). **Analysis of forces in ultrasonically assisted turning**. Journal of Sound and Vibration, vol.308, 845–854.

Askeland, D.R. (1996). **The Science and Engineering of Materials 3rd ed**. Chapman & Hall Oxford.

Bonifacio, M., and Diniz, E. (1994**). Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools**. Wear, vol.173, 137-144.

Brehl, D. (2008). **Review of vibration assisted machining**. Precision Engineering, vol. 32, 153-173.

Cerniway, M. (2005). **Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Force and Tool**. MSc Dissertation Graduate Faculty, North Carolina State University.

Chern, Gwo-Lianq., and Lee, Han-Jou. (2006).**Using workpiece vibration cutting for micro-drilling**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. vol.27, 668-692.

Endo, T., Tsujimoto, T., and Mitsui, K. (2008). **Study of vibration-assisted micro-EDM: the effect of vibration on machining time and stability of discharge**. Precision Engineering, vol. 32, 269-277.

Hwan, J., Seok, H., Seong L., and Min, S.(1999). **Improvement of Micro-machining Accuracy by 2-Dimensional Vibration Cutting**. American Society of Precision Engineers Conference Proceedings, vol. 20, 150-155.

Jonathan, S.C. (1994). **Computer Numerical Control from Programming to networking**. Delmer Publishers, 125-154.

Lian, H., Guo, Z., Huang, Z., Tang, Y., and Song, J. (2013). **Experiment research of Al6061 on ultrasonic vibration assisted micro-milling**. Procedia CIRP, vol.6, 561-564.

Liu, X., and Cheng, K. (2005). **Modelling the machining dynamics of peripheral milling**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol.45, 1301-1320.

Matsumura, T. (2005). **Glass machining with micro-endmill**. Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), vol. 16, 139-158.

Mikell P, Groover. (1996). **Fundamentals of Manufacturing**. Material Processes and System. Prenties-Hall, 612-617.

Moriwaki, T., and Shamoto, E. (1991). **Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration**. Annals of the CIRP, vol.40, 559-562.

Moriwaki, T., and Shamoto, E. (1999). **Ultra-precision diamond cutting of hardened steel by elliptical vibration cutting**. Annals of the CIRP, vol.48, 441-444.

Nestler, Andreas., and Schubert, Andreas. (2014). **Surface Properties in Ultrasonic Vibration Assisted Turning Particle Reinforce Aluminum Matrix Composites**. Procedia CIRP, vol.13, 125-130.

Razfar M., P. Sarvi., and Zarchi, M.A.(2011). **Experimental investigation of the surface roughness in ultrasonic-assisted milling**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol.225, 1615-1620.

Riaz, Muhammad., Agostino, Maurotto., Anish, Roy., Vadim, V.Silberschmidt. (2012). **Hot ultrasonically assisted turning of β-Ti alloy**. Procedia CIRP, vol.1, 336-341.

Shamoto, E., and Moriwaki, T. (1999**). Ultra-precision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting**. Annals of the CIRP, vol. 48, 441-444.

Shen, X.H., Zhang, J.H., Li, H., Wang, J.J., and Wang, X.C.(2012). **Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.63, 41-49.

Vadim, V. Silberschmidt.,Sameh, M.A.Mahdy., Moustafa, A. Gouda., Ahmed, Naseer., Agostino, Maurotto., and Anish, Roy. (2014). **Surface roughness improvement in ultrasonic assisted turning**. Procedia CIRP, vol.13, 49-54.

Valery, Marinov. (2012). **Manufacturing Technology**, https://www.slideshare.net/Veronnkka/machining-15610701, 104-111.

Wang, X., Zhou M., Gan K., and Ngoi, B. (2002). **Theoretical and experimental studies of ultraprecision machining of brittle materials with ultrasonic vibration**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. vol. 20, 99-102.

Xiang, D.H. (2011). **Study on cutting force and tool wear of high volume SiC/Al MMCs with ultrasonic vibration high speed milling**. Key Engineering Materials, vol.455.

Xing, D., Zhang, J., Shen, X., Zhao, Y., and Wang, T.(2013). **Tribological properties of ultrasonic vibration assisted milling aluminum alloy surfaces**. Procedia CIRP, vol.6 539-544.

Ying, Nui., Feng, Jiao., Bo, Zhao., and Dong, Wang. (2017). **Multiobjective optimization of processing parameters in longitudinal-torsion ultrasonic assisted milling of Ti-6Al-4V**.International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.93, 4345-4356.

ภาคผนวก ก

ตารางการวิเคราะห์ความถดถอยและขั้นตอนการปรับตั้งอัตราส่วนค่าเอ้าต์พุตโวลเทจ

ตาราง ก.แบบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิวและความแข็งผิว

No	Milling condition	Speed	Feed rate	Mc*n	Mc*f	N*f	n^2	f^2	Ra	HV
1	1	3000	50	3000	50	150000	9000000	2500	0.292	96.9
2	1	3000	200	3000	200	600000	9000000	40000	0.895	97.6
3	1	3000	400	3000	400	1200000	9000000	160000	2.301	113.1
4	1	5000	50	5000	50	250000	25000000	2500	0.224	80.4
5	1	5000	200	5000	200	1000000	25000000	40000	0.55	88.3
6	1	5000	400	5000	400	2000000	25000000	160000	1.008	102.7
7	1	7000	50	7000	50	350000	49000000	2500	0.159	81.2
8	1	7000	200	7000	200	1400000	49000000	40000	0.322	84.6
9	1	7000	400	7000	400	2800000	49000000	160000	0.736	95.8
10	2	3000	50	6000	100	150000	9000000	2500	0.226	105.3
11	2	3000	200	6000	400	600000	9000000	40000	0.789	106.6
12	2	3000	400	6000	800	1200000	9000000	160000	1.906	115.9
13	2	5000	50	10000	100	250000	25000000	2500	0.289	98.9
14	2	5000	200	10000	400	1000000	25000000	40000	0.541	103.4
15	2	5000	400	10000	800	2000000	25000000	160000	1.01	104.4
16	2	7000	50	14000	100	350000	49000000	2500	0.216	97.1
17	2	7000	200	14000	400	1400000	49000000	40000	0.297	104.6
18	2	7000	400	14000	800	2800000	49000000	160000	0.682	104.6

ตาราง ก.แบบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิวและความแข็งผิว (ต่อ)

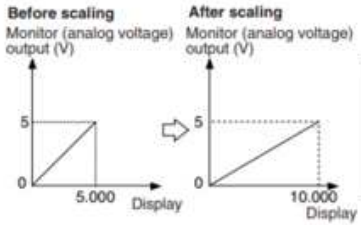
No	Milling condition	Speed	Feed rate	Mc*n	Mc*f	N*f	n^2	f^2	Ra	HV
19	1	3000	50	3000	50	150000	9000000	2500	0.234	92
20	1	3000	200	3000	200	600000	9000000	40000	0.813	97.3
21	1	3000	400	3000	400	1200000	9000000	160000	1.985	113.9
22	1	5000	50	5000	50	250000	25000000	2500	0.203	80.3
23	1	5000	200	5000	200	1000000	25000000	40000	0.458	85.2
24	1	5000	400	5000	400	2000000	25000000	160000	1.14	102.7
25	1	7000	50	7000	50	350000	49000000	2500	0.131	78.2
26	1	7000	200	7000	200	1400000	49000000	40000	0.245	86.4
27	1	7000	400	7000	400	2800000	49000000	160000	0.716	97.1
28	2	3000	50	6000	100	150000	9000000	2500	0.271	104.7
29	2	3000	200	6000	400	600000	9000000	40000	0.764	107.2
30	2	3000	400	6000	800	1200000	9000000	160000	1.852	113.3
31	2	5000	50	10000	100	250000	25000000	2500	0.23	96.7
32	2	5000	200	10000	400	1000000	25000000	40000	0.495	101.8
33	2	5000	400	10000	800	2000000	25000000	160000	1.034	105.4
34	2	7000	50	14000	100	350000	49000000	2500	0.16	98.7
35	2	7000	200	14000	400	1400000	49000000	40000	0.234	97.1
36	2	7000	400	14000	800	2800000	49000000	160000	0.734	99.4

ตาราง ก.แบบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและโพลิโนเมียลดีกรีสองของความหยาบผิวและความแข็งผิว (ต่อ)

No	Milling condition	Speed	Feed rate	Mc*n	Mc*f	N*f	n^2	f^2	Ra	HV
37	1	3000	50	3000	50	150000	9000000	2500	0.248	97.8
38	1	3000	200	3000	200	600000	9000000	40000	0.795	102.4
39	1	3000	400	3000	400	1200000	9000000	160000	1.95	111.4
40	1	5000	50	5000	50	250000	25000000	2500	0.191	82.9
41	1	5000	200	5000	200	1000000	25000000	40000	0.382	91.3
42	1	5000	400	5000	400	2000000	25000000	160000	0.926	97.9
43	1	7000	50	7000	50	350000	49000000	2500	0.103	81.3
44	1	7000	200	7000	200	1400000	49000000	40000	0.236	89.1
45	1	7000	400	7000	400	2800000	49000000	160000	0.657	98
46	2	3000	50	6000	100	150000	9000000	2500	0.278	103.2
47	2	3000	200	6000	400	600000	9000000	40000	0.738	102.2
48	2	3000	400	6000	800	1200000	9000000	160000	1.728	116.1
49	2	5000	50	10000	100	250000	25000000	2500	0.232	101.2
50	2	5000	200	10000	400	1000000	25000000	40000	0.407	105.3
51	2	5000	400	10000	800	2000000	25000000	160000	0.884	110.1
52	2	7000	50	14000	100	350000	49000000	2500	0.135	97.9
53	2	7000	200	14000	400	1400000	49000000	40000	0.233	101.5
54	2	7000	400	14000	800	2800000	49000000	160000	0.662	106.6

ตาราง ข.ขั้นตอนการปรับตั้งอัตราส่วนค่าเอ้าต์พุตโวลเทจของเซนเซอร์คอนโทรลเลอร์ต่อระยะที่วัดได้เพื่อแสดงออกออสซิลโลสโคป

The ratio of the analog voltage output relative to the displayed value can be changed, provided that the output voltage is between -5 and +5 V. To perform scaling, enter the desired monitor (analog voltage) output value respectively for two desired correction points.



Setting

Point 1
Display value: 0.00
Monitor (analog voltage) output value: 0

Point 2
Display value: 10.000
Monitor (analog voltage) output value: 5

1. Press the ▶ key for at least 2 seconds.
   The sensor enters the common function selection mode.

2. Press the ▶ key to make "F" flash.

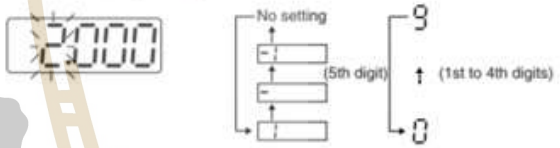
3. Press the ▲ or ↵ key to enter the monitor output setting mode.

4. Press the ↵ key with "F-0" displayed.
   The sensor enters the monitor output scaling setting state.

5. Set the display value for correction point 1.
   The display value is displayed in red.

- The value on the flashing digit can be changed.
- Pressing the ▶ key changes the flashing digit to the right.

- Pressing the ▲ key changes the value.



- All digits flash when the fifth digit and sign can be changed.

6. Press the ↵ key to save the display value for correction point 1.
   - Then, the sensor enters the monitor output value setting state.

7. Set the monitor output value for correction point 1 in the same procedure as step 5, and use the ↵ key to save the setting value.
   - The monitor output value is displayed in green.

8. Repeat steps 5 through 7 to set and save the display and monitor output values for correction point 2.
   - After saving the monitor output value for point 2, the sensor returns to the measurement state.

ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Udomboonyanupap, S., Pangjundee, Th., Muttamara, A., and Siwadamrongpong, S. (2018). **Study of Ultrasonic Vibration Assisted Milling of Casted Aluminum**. Srinakharinwirot Science Journal, vol.34 No.1 (Jan-Jun, 2018).

วารสารวิทยาศาสตร์ มศว
SRINAKHARINWIROT SCIENCE JOURNAL
โทร. 02 649 5000 ต่อ 18216, 18427 โทรสาร. 02 660 0128 E-mail : scjournal@g.swu.ac.th

25 มิถุนายน 2561

เรื่อง ตอบรับการตีพิมพ์บทความ

เรียน อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มศว ขอตอบรับการตีพิมพ์บทความ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เรื่อง : การศึกษาแรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการตัดอะลูมิเนียมหล่อ
(Study of Ultrasonic Vibration Assisted Milling of Casted Aluminum)

ชื่อผู้นิพนธ์ : คุณเศรษฐ์ อุดมบุญญานุภาพ คุณชงชัย ปัญจันดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ และ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์

โดยบทความของท่าน จะได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ มศว ปีที่ 34 ฉบับที่ 1 (มิถุนายน พ.ศ. 2561)

ในการนี้กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มศว ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง ที่ท่านให้ความสนใจและสนับสนุนวารสาร และหวังว่าคงได้รับการสนับสนุนจากท่านอีกในโอกาสต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิญญา ชัยวิสุทธางกูร)
บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มศว

บทความวิจัย

การศึกษาแรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในการตัดอะลูมิเนียมหล่อ

เศรษฐ์ อุดมบุญญานุภาพ[1] ธงชัย เพ็งจันทร์ดี[2] อภิวัฒน์ มุตตามระ[3] และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์[1*]

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้แรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคในงานกัดสามารถช่วยในการปรับปรุงลักษณะเฉพาะในการขึ้นรูปหลายๆ ด้าน เช่น แรงในการตัดเฉือน ความหยาบผิวของชิ้นงาน และอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด อย่างไรก็ตาม จำนวนงานวิจัยในด้านนี้ยังมีอยู่ไม่มากและส่วนใหญ่เป็นการศึกษาวัสดุประเภทเหล็กเปราะ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ขยายขอบเขตการศึกษาในงานกัดอะลูมิเนียมหล่อเกรด A356 ซึ่งมีสมบัติอ่อนเหนียว โดยสร้างแรงสั่นสะเทือนความถี่ 19.74 กิโลเฮิรตซ์ ขนาดแอมพลิจูด 12 ไมโครเมตร ส่งผ่านให้กับชิ้นงานในทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด งานกัดถูกทำขึ้นภายใต้เครื่องกัดซีเอ็นซีและดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร กัดแบบร่องปราศจากการหล่อเย็น ผลการทดลองพบว่า อัตราการป้อนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงตัดเฉือนในแนวระนาบของการใช้แรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีค่าน้อยกว่ากระบวนการกัดแบบทั่วไปถึงร้อยละ 13.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวงานหลังประยุกต์แรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคมีการก่อตัวที่เป็นแบบแผนและแตกต่างจากกระบวนการกัดแบบทั่วไป เมื่อความเร็วในการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นค่าความหยาบผิวลดลงร้อยละ 21.4 สรุปได้ว่าแรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคสามารถก่อให้เกิดผลกระทบเชิงบวกต่อค่าเฉลี่ยแรงตัดเฉือนและค่าความหยาบผิวโดยขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนต่อฟันและความเร็วในการตัดเฉือน

คำสำคัญ: แรงตัดเฉือน ค่าความหยาบผิว แรงสั่นสะเทือนอัลตร้าโซนิคช่วยในงานกัด อะลูมิเนียม A356

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[2]สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมการผลิตและโลจิสติกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
[3]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: somsaksi@sut.ac.th

Study of Ultrasonic Vibration Assisted Milling of Casted Aluminum

Sed Udomboonyanupap[1], Thongchai Pangjundee[2], Apiwat Muttamara[3] and Somsak Siwadamrongpong[1*]

ABSTRACT

Ultrasonic vibration-assisted milling (UAM) has been proven to improve machining characteristics such as cutting force, surface roughness quality, and cutting tool life. However, the number of research studies in the field of UAM is very small and mainly focused on hard-brittle material machining processes. Accordingly, to expand UAM research into a wider variety of materials, a study of UAM on a ductile material, A356 Cast aluminum is presented in this research. In the experiment, ultrasonic vibration of 19.74 kHz with an amplitude of 12 μm was applied to the workpiece along cutting feed direction. Besides, CNC machining center and carbide end mill with a diameter of 6 millimeters were used for slot milling under dry cutting condition. Characteristics of cutting force magnitude in end mill revolution, surface topography, and surface roughness were compared between UAM and conventional milling (CM). Experimental results showed that the average horizontal force in cutting direction of UAM was lower than CM at large feed per tooth value by 13.9%. UAM surface topography was different when comparing to CM because ultrasonic vibration assistance enables the generation of a uniformed pattern on the workpiece. Surface roughness was improved by 21.4% when cutting speed increases. It was concluded that UAM application on A356 Cast aluminum material has positive effects on cutting force and surface roughness depending on feed per tooth and cutting speed.

Keywords: Cutting force, Surface roughness, Ultrasonic vibration-assisted milling, Aluminum A356

[1]School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology
[2]Program in Production and Logistics Engineering Management, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University
[3]Department of Industrial Engineering, Thammasat University
*Corresponding author, email: somsaksi@sut.ac.th

Introduction

Milling process is the most commonly used metal removal operation in industry. General problems of milling process especially machining of good mechanical property materials are high cutting forces, wear of cutter edges, dimensioning deviation, poor surface roughness, and properly method requirement of cooling. These are potentially increasing risks of quality and economic concerns because of growing demand for milling of good mechanical property materials. A new efficient technique to break constraints of milling performance is known as ultrasonic-assisted milling (UAM). The fundamentals of UAM is that the tool face was separated from the chip and cutting area repeatedly by using high-frequency vibration amplitude imposed to the tool or workpiece.

In the past few decades, different researchers have reported significant improvements in hard-brittle material by using ultrasonic-assisted milling. Zhang *et al.* [1-3] compared the performance of rotary ultrasonic face milling (RUFM) with the conventional milling of K9 optical glass. There were reported that the relationship between cutting depth and ultrasonic amplitude would significantly reduce the cutting force, and extend tool life of diamond tool. Pei *et al.* [4] used rotary ultrasonic face milling to reveal the main effects of the process parameters such as Material Removal Rate (MRR), cutting force, and surface roughness in advanced ceramic machining process. Noma *et al.* [5] presented a reduction of thrust force, tool wear and chipping size after applied axial ultrasonic vibration-assisted milling of chemically strengthened glass. Li *et al.* [6] evaluated the cutting force and surface quality of ceramic matrix composite finding that RUFM has advantage over conventional machining.

Beside hard brittle material machining by UAM research, hard-to-cut material was also picked up to study on UAM application in order to improve machining characteristics. Suarez *et al.* [7] investigated the effect of UAM on Ni-Alloy 718 hard-to-cut material. The result shows that fatigue of UAM specimen increases which can explain by surface differences from conventional milling (CM). Elhami *et al.* [8] could reduce cutting force of hardened AISI4140 machining process by applying two advanced machining methods: thermally enhanced machining and UAM to the workpiece. Uhlmann *et al.* [9] studied effects of UAM when different cutting condition applied into the carbon and glass fiber reinforce plastics. The result shows that ultrasonic-assisted milling can be advantageous on workpiece quality and dust concentration but a reduction of cutting force could not be observed. Razfar *et al.* [10] investigated the effect of UAM of AISI 1020 steel in term of depth of cut, cutting speed and feed rate. The surface roughness is improved by up to 12.9% when implementing UAM. Shen *et al.* [11] agreed that forces while milling AISI 420 steel are reduced during UAM compared to CM. Reduction of cutting forces is attributed to the vibration amplitude influencing the gap between the cutting tool and the workpiece material resulting in improved chip breaking condition. Zarchi *et al.* [12] investigated the effect of ultrasonic vibration on cutting forces in ultrasonic-assisted side milling of AISI 420. They developed a new theoretical model for cutting force. Maurotto *et al.* [13] investigated that the effect on residual stresses in ultrasonic-assisted milling of AISI 316L reaching frequencies as high as 60 kHz, but they found the best result in the

low frequency range. Tao *et al.* [14] analyzed horizontal cutting force after applying ultrasonic vibration into Ti-6Al-4V workpiece. The result indicates that cutting force would be decreased when feed direction ultrasonic vibration is exerted to the workpiece especially when feed per tooth value is equivalent with vibration amplitude.

Furthermore, widely applicable ductile and soft material such as aluminum was sometimes selected to study in UAM application to compare with conventional milling process. Ma *et al.* [15] researched on ultrasonic vibration-assisted cutting and found that it could improve machining precision of Al52S workpiece. Chern *et al.* [16] researched on vibration-assisted milling of Al6061 and found that vibration could improve machining accuracy, surface roughness, and tool life. Xing *et al.* [17] presented that ultrasonic vibration-assisted milling can improve tribology property because scaly textures which occur by vibration could enhance the adsorption capacities of Al alloy surface to oil film.

In overall, ultrasonic-assisted milling is an advanced machining technology and has contributed several advantages. However, the number of research studied in the field of UAM is a few quantities when compared with a variety of applications, techniques, and materials. The main reason is UAM researchers highly focused on machining of hard-brittle and hard-to-cut materials rather than general soft materials. To expand UAM research into a wider variety of materials and applications, UAM research on ductile material A356 Cast aluminum is presented in this research. The difference of machining characteristics between UAM and CM such as cutting force, surface topography and surface roughness are analyzed and discussed in this study.

Materials and Methods

The experiments of UAM process have been performed on a 3-axis UMACH LMC1020 CNC milling machine. An UCE Ultrasonic generator is employed to supply high frequency electrical impulses into 1.5 kW piezoelectric transducer. These high frequency electrical pulses are converted to mechanical vibrations with ultrasonic frequency (19.74 kHz) and transferred to cast aluminum A365 workpiece which is attached at the end of transducer. An ultrasonic transducer body is fixed with the metal frame which is clamped with a Kistler dynamometer model 9072 by 4 hex head set screws. Bench vise on CNC machine table is used to clamp dynamometer. Cutting force signal is displayed on Kistler amplifier 5070A and it interfaced to the computer using Dyno software to analyze the force (Figure 1).

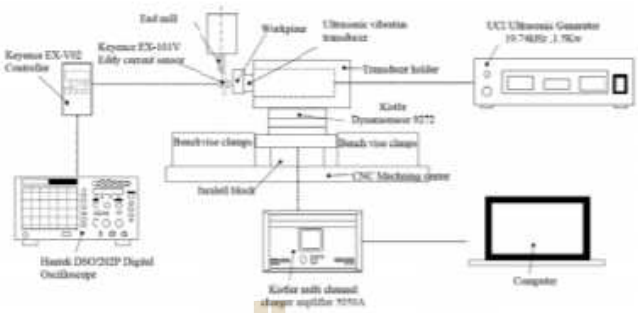


Figure 1 Schematic of experiment set up.

Vibration amplitude of the work piece has been confirmed by Keyence EV-101V eddy current sensor. The sensor probe was located in a distance of 1 mm to the end face of the workpiece as shown in Figure 2(a). Vibration frequency signal was transferred through eddy current sensor and Keyence controller EX-V02 to output at Hantek DSO520P Digital oscilloscope monitor. Output voltage value is shown 84mV and its amplitude value was indicated at 12 µm peak to peak by voltage calculation as in Figure 2(b).

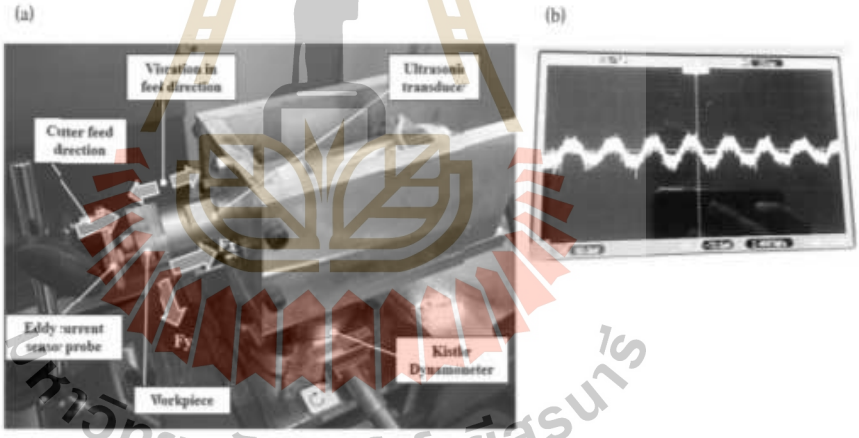


Figure 2 (a) Set up of workpiece and sensor for vibration amplitude measurement, (b) Output voltage from sensor measuring vibration amplitude (1 µm/7mV) which shows the amplitude of 12 µm

Cast aluminum A356 T6 was used for this experiment. The workpiece material was cut to the dimension of 10x50x20 mm. The elemental compositions of the workpiece material are shown in Table 1.

Slot milling has been performed by a commercial two-flute carbine end mill with a diameter of 6 mm without cooling process. Cutting process was operated by UAM and CM methods. Vibration amplitude was applied at 0 and 12 µm to see the difference of cutting force and surface structure. Axial cutting depth is set at 1 mm, all cutting parameters with their ranges have been given in Table 2.

Table 1 Percentage of alloying elements used in A356 T6.

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
7.18	0.215	0.108	0.0197	0.0045	0.0089	0.112	Bal.

Table 2 Cutting conditions in experiment test.

Experiment	Cutting speed n, (r/min)	Feed per tooth f_z, (µm/tooth)	Feed rate* f_t, (mm/min)	Depth of cut A_p, (mm)	Frequency f, (kHz)	Amplitude A, (µm)
CM	5000,7000*	10,20,30	50,100,200,300,400	1	-	0
UAM	5000,7000*	10,20,30	50,100,200,300,400	1	19.74	12

*Cutting parameter for surface roughness study

Surface topography was analyzed by SEM JSM-6010 series while surface roughness (Ra) was measured by Mitutoyo surface roughness portable tester model SJ-201. Due to the variations in vibration amplitude at different positions along the vibration, cutting force, and surface roughness have been measured and then their average values have been recorded.

Results and Discussions

1. Cutting force.

In experiment of feed per tooth of 10, 20 and 30 µm range, two cutting force components along feed direction (F_x) and feed perpendicular direction (F_y) components have been measured by a 9272A KISTLER dynamometer. The force signals are recorded for analysis via a Dyno-ware software. As commonly understood by many researchers that rotation angle shall not be measured under the current experimental conditions, therefore, the measured forces in F_x and F_y directions cannot be converted to tangential force. The resultant force in horizontal cutting direction (F_c) is used to analyze the improving effect of the exerted ultrasonic vibration on the milling processing. Components of cutting force in F_x, F_y and F_c directions are presented on Figure 3

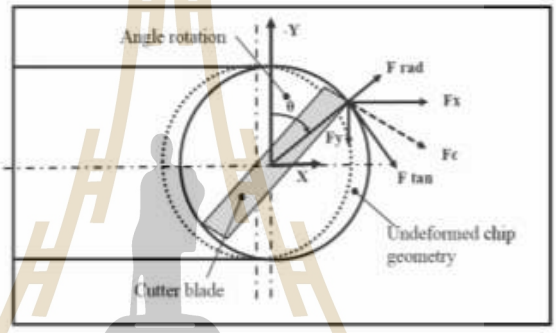


Figure 3 Cutting force components of slot milling.

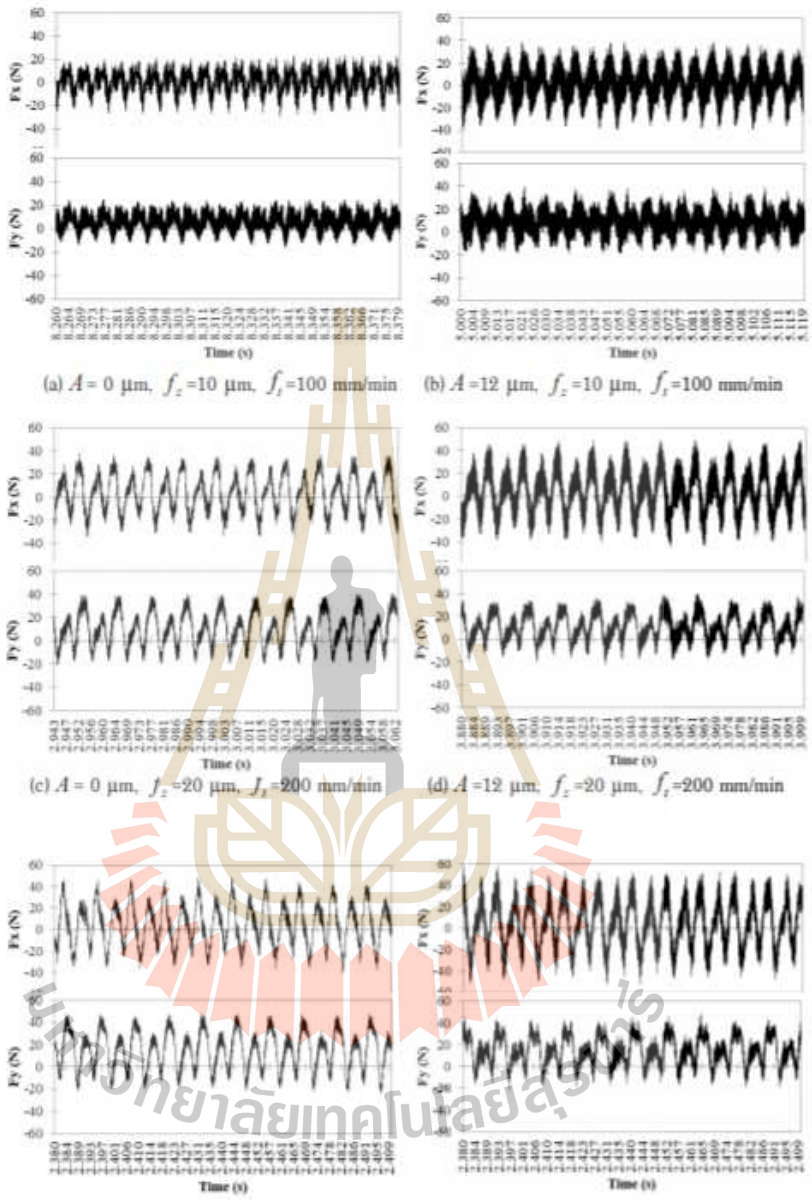
The horizontal force in cutting direction (F_c) can be calculated and obtained by Eq. (1).

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

Figure 4 shows partial raw cutting force data where F_x and F_y indicate the cutting force of feed tangential feed directions. The cutting force profiles of the UAM workpiece (Figure 4(b), 4(d) and 4(f)) were different from those of cutting force of conventional milling (Figure 4(a), 4(c) and 4(e)) process. It could be considered due to UAM generated workpiece vibration with a high frequency of 19.74 kHz which caused the cutting tool tips move backward-forward, and resulting high density of cutting force measured profile. A different peak of cutting force in each cutting tooltip observed, it might cause by different edge radius due to wear and run-out length phenomena in the regular milling process. Besides, peak values of cutting force increase when feed per tooth values are increasing, and the peak values of UAM cutting forces in F_x direction are higher than CM because of cutting tool moved forward over the conventional cutting patch.

The detailed photographs in Figure 5 show the feed direction and tangential direction cutting forces in one cutting cycle under the same feed per tooth condition (f_z = 30 µm) when the vibration amplitudes are 0 (conventional milling) and 12 µm, respectively. It shows that ultrasonic vibration could reduce the profiles of cutting forces in F_y direction while F_y in conventional milling maintains. Analysis shows that the production of pulse like profiles was the result of the cutter moving backward to the position which could make reduction of cutting force in F_y direction.

Figure 6 shows the average horizontal force in cutting direction value by hundred cutting cycles against three feeds per tooth values. The primary efficacy parameter which profoundly influenced to average horizontal force in cutting direction increasing in all experimental conditions is feed per tooth. Cutting force gradual increase when feed per tooth is rising. Comparison of cutting force, CM gave lower horizontal cutting force than UAM at feed per tooth of 10 µm because UAM contributed to high cutting force in both F_x and F_y cutting force directions. But when feed per tooth value is increased to 20 µm, cutting force in UAM become equivalent with CM, and when feed per tooth value is increased to 30 µm, cutting force in UAM becomes lower than CM by 13.9%. This phenomena effect is analyzed and presented that cutting force in direction is reduced because tooltip moved backward and contributed to lower average horizontal force in cutting direction at the measured point as explained above in Figure 5. It might be additionally observed that the advantage of vibration could contribute to cutting force reduction when vibration amplitude is smaller than feed per tooth value. It could explain that large vibration amplitude could make an adverse effect on cutting force because the cutting tooltip moves forward over feed per tooth.

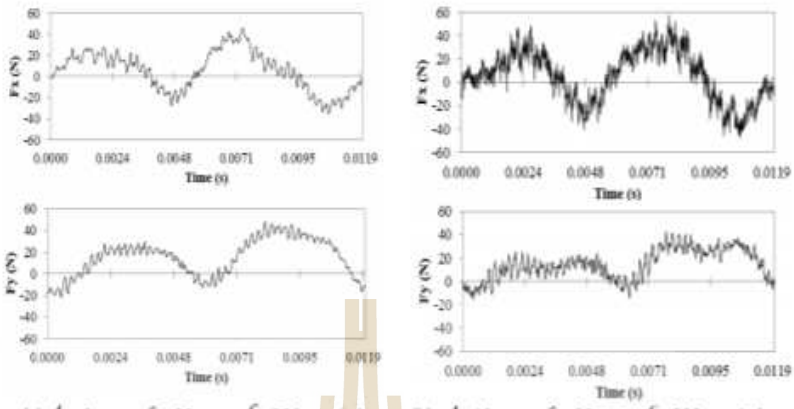


(a) A = 0 µm, f_z =10 µm, f_t =100 mm/min (b) A =12 µm, f_z =10 µm, f_t =100 mm/min

(c) A = 0 µm, f_z =20 µm, f_t =200 mm/min (d) A =12 µm, f_z =20 µm, f_t =200 mm/min

(e) A = 0 µm, f_z =30 µm, f_t =300 mm/min (f) A =12 µm, f_z =30 µm, f_t =300 mm/min

Figure 4 Experiment cutting force with different amplitudes and feed per tooth.



(a) A = 0 µm, f_z =30 µm, f_t =300 mm/min (b) A =12 µm, f_z =30 µm, f_t =300 mm/min

Figure 5 Experiment cutting force data in a cutting cycle.

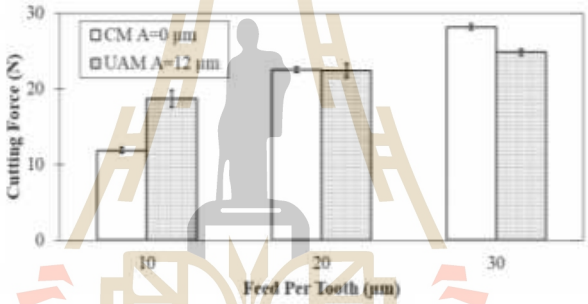
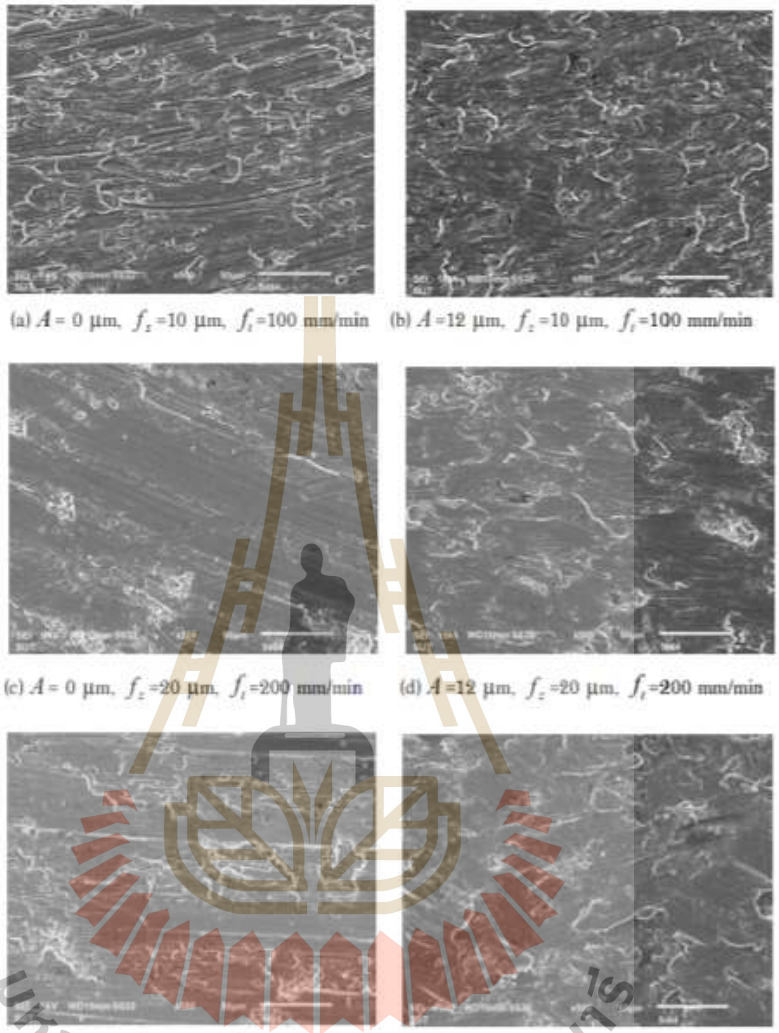


Figure 6 Average value of force in cutting direction (F_c) with different feeds per tooth.

2. Surface topography

Figure 7 shows the SEM photographs of slot bottom surfaces comparing between CM and UAM against feed per tooth of 10, 20 and 30 µm. Surface defects by cutting tool tip long dragging mark and chip removing appear on the bottom surface even when there is no ultrasonic vibration applied, as shown in Figure 7(a), 7(c) and 7(e). Without ultrasonic vibration, constant cutting tool surface contacts with workpiece materials during the cutting process acting on the processing surface continuously. Therefore, chips and cutting heat cannot be carried away in a timely manner which give the reason for surface defects. When ultrasonic vibration is applied, scaly textures evenly distribute on the UAM surface. The small chips and cutting heat could be quickly removed or eliminated, and thus avoiding tooltip and chip long dragging mark were occurred. Besides, a cause of scaly texture difference depending on a ratio of vibration amplitude and feed per tooth value. It is shown in Figure 7(b), 7(d), and 7(f).



(a) A = 0 µm, f_z =10 µm, f_t =100 mm/min (b) A =12 µm, f_z =10 µm, f_t =100 mm/min

(c) A = 0 µm, f_z =20 µm, f_t =200 mm/min (d) A =12 µm, f_z =20 µm, f_t =200 mm/min

(e) A = 0 µm, f_z =30 µm, f_t =300 mm/min (f) A =12 µm, f_z =30 µm, f_t =300 mm/min

Figure 7 SEM photographs of finished surface at x500.

3. Surface roughness

In each experiment, the surface roughness has been measured three times by using a Mitutoyo surface roughness measuring tool, and their arithmetic average has been recorded as the corresponding surface roughness. Figure 8 shows the respective values of surface roughness of slot bottom surfaces against feed rate for CM and UAM in different cutting speed levels (n, r/min)

conditions. It can be observed that surface roughness increase with the rising of feed rate both CM and UAM with similar trend. In term of cutting speed effect, the surface roughness of both UAM and CM is reduced when cutting speed increases because of under a specific feed rate value, higher cutting speed effects to thinner chip thickness. Surface roughness is not much distinctly different in all feed rate values of cutting speed of 5000 r/min, but the surface roughness of UAM condition can be improved by 21.4% compared with CM when the cutting speed was rose to 7,000 r/min. It can explain that under a particular vibrating frequency, the higher the spindle speed, the shorter the cutting period, the trajectory of the tooltips change, and fewer tool marks remain on the machined surface as shown in Figure 9. Thus, in UAM, selection of cutting parameters and vibrating parameters affects the topography and surface.

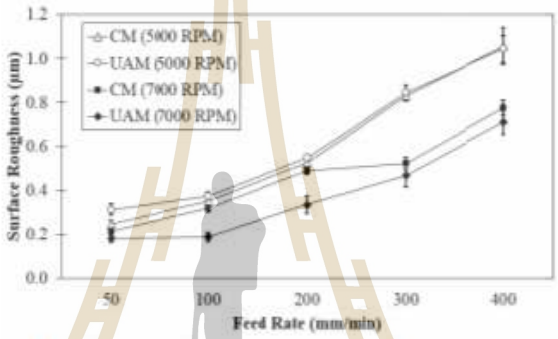


Figure 8 Average value of surface roughness with different cutting speed.

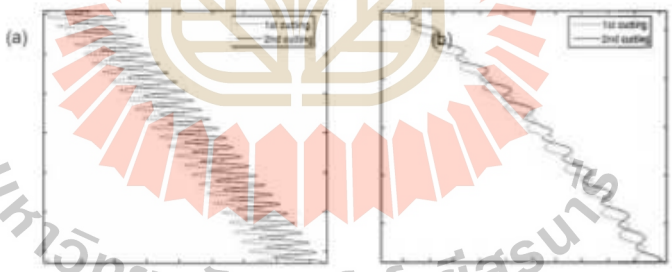


Figure 9 Trajectories of tool tips under different spindle speed (partial enlarged view). (a) Low cutting speed, (b) High cutting speed.

Conclusions

Ultrasonic vibration-assisted milling (UAM) has been utilized to machine slots into casted aluminum A365. The purpose of this exploratory work was to investigate the effect of feed per tooth, cutting speed and ultrasonic vibration on ductile material. Following conclusions can be drawn from the studies:

1. Cutting feed per tooth was the main effect on the cutting force in CM and UAM conditions. Cutting force gradually increases when cutting feed per tooth was rising.

2. Intermittent micro-segmentation cutting in a milling cycle by ultrasonic vibration effecting to a pulse of cutting force changed. The higher feed per tooth value of milling with ultrasonic vibration in the feed direction can bring advantage result on the lower average horizontal force in cutting direction lower than conventional milling method.

3. By comparing surface topographies of machined slot bottom surface, UAM can reduce surface defects with minimal tooltips drag mark phenomena and obtain uniform machined surfaces.

4. UAM in the feed direction has a positive effect on the surface roughness of machined surface.

The experiment study corroborates the difference between UAM and CM in term of variable feed per tooth, feed rate, and cutting speed at constant value of the vibration amplitude. Further studies are expected to address the effect of ultrasonic vibration on milling process, especially in term of wider parameters such as cutting speed, depth of cut, vibration amplitude and mechanism causing tool wear.

References

1. Zhang, C., Feng, P., Zhang, J., Wu, Z., and Yu, D. 2012. Theoretical and Experimental Research on the Features of Cutting Force in Rotary Ultrasonic Face Milling of K9 Glass. *Applied Mechanics and Materials*. 158: 1674-1679.
2. Zhang, C., Feng, P., Zhang, J., Wu, Z., and Yu, D. 2012. Investigation into the Rotary Ultrasonic Face Milling of K9 Glass with Mechanism Study of Material Removal. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 25 (4): 248-268.
3. Zhang, C., Zhang, J., and Feng, P. 2013. Mathematical Model for Cutting Force in Rotary Ultrasonic Face Milling of Brittle Materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 69 (1-4): 161-170.
4. Pei, Z. J., Ferreira, P. M. 1999. An Experiment Investigation of Rotary Ultrasonic Face Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 39: 1327-1344.

5. Noma, K., Takeda, Y., Aoyama, T., Kakinuma, Y., and Hamada, S. 2014. High-Precision and High-Efficiency Micromachining of Chemically Strengthened Glass Using Ultrasonic Vibration. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC2014). 23-25 June 2014. California. USA. p. 389-394.
6. Li, Z., Yuan, S., and Zhang, C. 2016. Research on the Rotary Ultrasonic Facing Milling of Ceramic Matrix Composites. The 9th International Conference on Digital Enterprise Technology–Intelligent Manufacturing in the Knowledge Economy Era. 29-31 Mar 2016. Nanjing. China. p. 428-433.
7. Suarez, A., Veiga, F., Luis, L., Polvorosa, R., Steffen, L., and Wretland, A. 2016. Effects of Ultrasonic– Assisted Face Milling on Surface Integrity and Fatigue Life of Ni-Alloy 718. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 25: 5076-5086.
8. Elhami, S., Razfar, M. R., and Farahnakian, M. 2015. Analytical, Numerical and Experimental Study of Cutting Force during Thermally Enhanced Ultrasonic Assisted Milling of Hardened AISI 4140. *International of Mechanical Sciences*. 103: 158-171.
9. Uhlmann, E., Protz, F., Stawiszyndski, B., and Heidler, S. 2017. Ultrasonic Assisted Milling of Reinforced Plastics. 1st CIRP Conference on Composite Materials Parts Manufacturing (CIRP CCMPM 2017). 8-9 June 2017. Karlsruhe. Germany. p. 164-168.
10. Razfar, M., Sarvi, P., and Zarchi, M. A. 2011. Experimental Investigation of the Surface Roughness in Ultrasonic-Assisted Milling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*. 225: 1615-1620.
11. Shen, X. H., Zhang, J. H., Li, H., Wang, J. J., and Wang, X. C. 2012. Ultrasonic Vibration-Assisted Milling of Aluminum Alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 63: 41-49.
12. Zarchi, M. A., Razfar, M., and Abdullah, A. 2013. Influence of Ultrasonic Vibrations on Side Milling of AISI 420 Stainless Steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 66: 83-92.
13. Maurotto, A., and Wickramarachchi, C. T. 2016. Experimental Investigations on Effects of Frequency in Ultrasonically-Assisted End-Milling of AISI, 316L: A Feasibility Study. *Ultrasonic*. 65: 113–120.
14. Tao, G. C., Ma, C., Shen, X. H., and Zhang, J. H. 2017. Experimental and Modeling Study on Cutting Force of Feed Direction Ultrasonic Vibration-Assisted Milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 90: 709–715.
15. Ma, C., Shamoto, E., Moriwaki, T., and Wang, L. 2004. Study of Machining Accuracy in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 44: 1305.

16. Chern, G. L., and Chang, Y. C. 2006. Using Two-Dimensional Vibration Cutting for Micro-Milling. *International journal of machine tools and manufacture*. 46: 659.

17. Xing, D., Zhang, J., Shen, X., Zhao, Y., and Wang, T. 2013. Tribological Properties of Ultrasonic Vibration Assisted Milling Aluminum Alloy Surfaces. Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM 2013). 8-12 April 2013. Leuven. Belgium. p. 539-544.

ได้รับบทความวันที่ 1 ธันวาคม 2560
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 31 มีนาคม 2561

ประวัติผู้เขียน

นายเศรษฐ์ อุดมบุญญานุภาพ เกิดเมื่อวันที่ 23พฤษภาคม 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่1-6 ที่โรงเรียนอนุบาลกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ มัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนกาฬสินพิทยาสรรพ์ ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างกลโรงงาน ที่วิทยาลัยเทคนิค ไทย-เยอรมัน จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ.2546 และเข้าทำงานเป็นวิศวกรบริษัท เวสเทริ์นดิจิตอล ประเทศไทยหลังจากนั้น สำเร็จการศึกษาระดับ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2553

ในปี พ.ศ. 2556ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในขณะศึกษา ผู้วิจัยยังคงทำงานทางด้านวิศวกรรมการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรมอีกทั้งมีความสนใจในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุ อันเป็นพื้นฐานสำคัญจากการศึกษาวิชาช่างกลโรงงาน ก่อให้เกิดการใช้ทักษะ ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีการผลิต วัสดุ การขึ้นรูป ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติ การบริหารจัดการในเชิงเทคนิคและทรัพยากร ควบคู่กับการได้การศึกษาค้นคว้างานวิจัยและการได้รับข้อแนะนำจากคณาจารย์ ซึ่งประสบการณ์ทั้งหลายเหล่านี้ส่งผลให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเชี่ยวชาญในระบบการผลิตและเทคนิคการขึ้นรูปเป็นอย่างดี โดยมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ดังภาคผนวก ข