

## การศึกษาการออกแบบโซโนโทรดของกระบวนการขัดเงาพื้นผิวด้วยการสั่นอัลตราโซนิก ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ปฏิภาณ ทองลาด<sup>1\*</sup> และชนะ รักษศิริ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\*Patiphan.t@ku.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบโซโนโทรดสำหรับกระบวนการขัดเงาพื้นผิวด้วยการสั่นอัลตราโซนิก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความยาวรวม ความยาวของระยะบ่า ตำแหน่งการวางบ่าประกอบกับอุปกรณ์จับยึด รัศมีของระหว่างบ่าและเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่อความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นเมื่อประกอบเป็นระบบขัดเงาพื้นผิวด้วยอัลตราโซนิก โดยใช้เครื่องกำเนิดการสั่นอัลตราโซนิกขนาด 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ต่อเข้ากับเพือโซอิล็กทริกเพื่อแปลงคลื่นไฟฟ้าเป็นการสั่น การทดลองจะใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองการหาโหมดที่เกิดการสั่นทิศทางตามยาวและความถี่ของการสั่นพ้องของทั้งระบบให้สอดคล้องกับคลื่นจากเครื่องกำเนิด การตอบสนองของความถี่ของโซโนโทรด เพื่อเลือกนำเสนอการออกแบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในวัสดุอลูมิเนียม 7075-T6 จากการทดลองพบว่า สามารถปรับเปลี่ยนความถี่สั่นพ้องด้วยการปรับความยาวรวม ความยาวของระยะบ่า และรัศมี จะทำให้การสั่นพ้องสามารถปรับค่าได้ ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองรูปร่างของโซโนโทรดเพื่อลดการสูญเสียการเตรียมขนาดวัสดุและลดเวลาในการปรับแต่งเพื่อหาช่วงความถี่ธรรมชาติของทั้งระบบ เพื่อให้อุปกรณ์สั่นพ้องกับเครื่องกำเนิดและทำงานได้อย่างเหมาะสม จากการทดลองพบว่า การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 1.11% สำหรับผลของความถี่ และ 2.14% สำหรับผลของแอมพลิจูด ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิศวกรรมเพื่อทดสอบการตอบสนองความถี่ของตัวแปรในการออกแบบโดยเลือกการออกแบบอุปกรณ์ไม่ซับซ้อนมากนัก เพื่อให้เกิดการเริ่มต้นพัฒนาในอุตสาหกรรมอัลตราโซนิกในประเทศไทย และเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจพัฒนาเครื่องมือ

**คำสำคัญ:** การตอบสนองความถี่ การขัดเงาพื้นผิว อัลตราโซนิก ไฟไนต์เอลิเมนต์ การออกแบบโซโนโทรด

# The Study of Sonotrode Design for Ultrasonic Surface Burnishing Process by Finite Element Method

Patiphan Thonglad<sup>1\*</sup> and Chana Raksiri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Production Technology, Faculty of Engineering, Kasetsart University

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

\*Patiphan.t@ku.th

## Abstract

This research studies the design of a sonotrode for the ultrasonic assist vibration surface polishing. The objective is to study the effects of changing of the total length, shoulder-length, shoulder placement combined with clamping equipment, shoulder radius, and diameter affect to frequency and vibration amplitude when completed stack also. The ultrasonic frequency is generated by a 20 kHz ultrasonic generator connected to a piezoelectric to convert electrical waves into vibrations. The experiment used the finite element method to simulate the natural frequency to select the mode of longitudinal direction and resonance of the entire system corresponds to the frequency from the generator. Frequency response and internal stress to choose and present a design that is suitable for use. Compare with the actual experimental results in AL 7075-T6 sonotrode. The experiment, it was found that the resonance frequency can be adjusted by modified the total length, length of the shoulder distance and radius to making the resonance adjustable. Finite element simulation had a percentage error of 1.11% for the frequency result and 2.14% for the amplitude result. The finite element method is used to simulate the sonotrode shape to reduce material preparation losses and tuning time to determine the properly desired frequency of ultrasonic stack. This research used Computer-aided engineering simulation to predict the frequency response of the dimensional variables of the design by selecting an uncomplicated sonotrode.

**Keywords:** Frequency Response, Burnishing, Ultrasonic, Finite Element, Design Sonotrode

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการขัดเงาในประเทศไทยส่วนมากที่พบมักจะเป็นการขัดด้วยการใช้น้ำมันและผงเพชร ซึ่งเป็นวิธีการขัดโดยการตัดเฉือนผิวหยาบของชิ้นงานออก กระบวนการขัดเงาด้วยการสั่นอัลตราโซนิกจะเป็นการปรับปรุงผิวโดยการกดผิวของชิ้นงานเพื่อลดความแตกต่างระหว่างจุดสูงสุดและต่ำสุด (peak-valley) ของบริเวณที่ถูกกระทำ นอกจากนี้จะทำให้ความหยาบผิวดีขึ้นแล้ว ยังทำให้เกิดความเค้นตกค้างทางกด (compressive residual stress) ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงความแข็งที่ผิวชิ้นงาน (surface hardness), การต้านทานความสึกหรอ (wear resistance), การต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance), การสึกหรอร่วมกับการล้าบนผิวหน้า (surface fatigue wear)[1] โดยมีตัวแปรสำคัญคือการสั่นด้วยความถี่ระดับอัลตราโซนิก (20 kHz – 100 kHz) แรงสถิตย์ (static force) และแอมพลิจูดซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงจากการสั่น (dynamic force) โดยโซโนทรอดจะทำหน้าที่ส่งต่อการสั่นจากไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) และแปลงขนาดของแอมพลิจูดของการสั่นให้สูงขึ้นหรือลดลงก็ได้ตามที่ต้องการแบบเห็นภาพว่าเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งขั้นตอนการออกแบบนั้นจะต้องถูกคำนวณความถี่ธรรมชาติและโหมดของการสั่นให้สอดคล้องกับทิศทางการสั่น และยังสามารถปรับเปลี่ยนความถี่สั่นพ้อง (resonance frequency) ได้เมื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรของการออกแบบ การผลิตโซโนทรอดยังคงใช้วิธีการปรับค่าความถี่การสั่นพ้องด้วยการวัดด้วยอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนแล้วกลับมาแมชชีนลดขนาดบางตำแหน่งของชิ้นงานออก แล้วนำกลับไปวัดซ้ำ

ไปเรื่อยๆ จนได้ความถี่ที่ต้องการ หากขนาดของชิ้นงานเล็กจนเกินไปอาจจะเป็นของเสียไปทันที จากปัญหานี้ผู้วิจัยใช้การจำลองโซโนโทรดแบบครึ่งความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Patran/Nastran เพื่อจำลองผลจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรการออกแบบโซโนโทรดเปรียบเทียบผลการวัดที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะทำให้ผู้ออกแบบและช่วยลดการสูญเสียวัสดุและเวลาในการแมชชีนเพื่อปรับค่าความถี่ (fine tune)

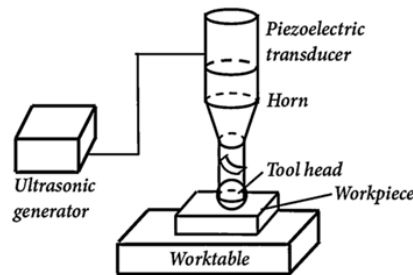
### การทบทวนและนำเสนอวรรณกรรม

Satpathy et al. [2] ทดลองหาผลกระทบจากตัวแปรของกระบวนการเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ฮาร์โมนิกและความถี่ขณะสั่นตามยาวด้วยโปรแกรม Ansys พบว่าการจำลองความถี่ธรรมชาติที่ได้ มีความผิดพลาดประมาณ 2.4% ซึ่งสามารถปรับลดความถี่โดยการลดความยาวรวมของโซโนโทรด ต่อมา Allaparthi et al [3] ศึกษาการออกแบบฮอร์นแบบมีป่า (Stepped-Horn) เทียบกับทรงกรวย (Conical) โดยใช้วัสดุ AL6061-T6 เพื่อใช้ในกระบวนการเจาะ ผลการทดลองแนะนำให้ใช้ฮอร์นแบบมีป่า (Stepped-Horn) เนื่องจากเกิดความเค้นต่ำ และให้แอมพลิจูดสูงกว่า ต่อมาในปี 2021 Yazdian and Karafi [4] วิเคราะห์การออกแบบฮอร์นและบูสเตอร์สำหรับการเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก โดยเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับกรอกแบบด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความถี่สั่นพ้อง โดยมีความผิดพลาดประมาณ 0.82% และ 0.92% ตามลำดับ

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การขัดเงาด้วยอัลตราโซนิก

เทคโนโลยีการขัดเงาด้วยอัลตราโซนิก (ultrasonic burnishing, UB) [5] ประกอบด้วย หัวกดชิ้นงาน (tool head) สำหรับกดผิวชิ้นงาน, หัวส่งแรงสั่น (sonotrode/horn) สำหรับส่งผ่านแรงสั่นจากตัวแปลงสัญญาณไปยังหัวกดชิ้นงาน, ตัวแปลงสัญญาณเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric transducer) สำหรับแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดอัลตราโซนิก (ultrasonic generator) เป็นการสั่น (vibration) แสดงหลักการทำงานดังภาพที่ 1



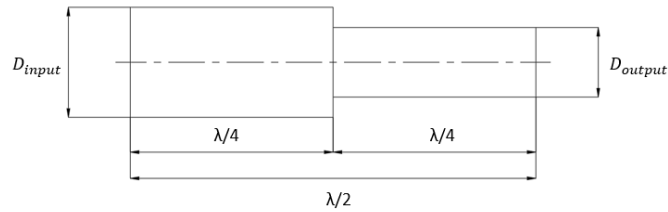
ภาพที่ 1 ระบบขัดเงาด้วยอัลตราโซนิก

ที่มา Luo et al [5]

### 2.2 การออกแบบโซโนโทรด

หน้าที่หลักของโซโนโทรดหรือฮอร์นคือ ขยายหรือลดการสั่นสะเทือนของเครื่องมือให้อยู่ในระดับที่จำเป็นสำหรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนจากเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ไปยังชิ้นงานหรือหัวกด การออกแบบโซโนโทรดจะต้องได้รับการคำนวณมาอย่างดี หากผลิตไม่ถูกต้องประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงอาจเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์และเครื่องมือในระบบ [6]

การออกแบบความยาวของโซโนโทรดจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือในกรณีแรกจะออกแบบการสั่นแบบความยาวครึ่งคลื่น (half wave shape) โดยจะมี 1 บัพและ 2 ปฏิบัพจะเป็นการออกแบบที่มักพบเจอ และกรณีที่ 2 การออกแบบการสั่นความยาวแบบเต็มคลื่น (wave shape) มี 2 บัพและ 2 ปฏิบัพ [7]



ภาพที่ 2 การออกแบบโซโนทรอดแบบความยาวครึ่งคลื่น

2.2.1 การคำนวณหาอัตราขยาย (magnitude) [8] สามารถทำได้โดย

$$\beta = \left( \frac{D_{input}}{D_{output}} \right)^2 \quad (1)$$

โดยที่  $\beta$  หมายถึง อัตราการขยายของแอมพลิจูด (magnitude),  $D_{input}$  หมายถึง พื้นที่หน้าสัมผัสของโซโนทรอดกับไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric), และ  $D_{output}$  หมายถึง พื้นที่หน้าสัมผัสของโซโนทรอดขาออก

2.2.2 การหาความเร็วเสียงในตัวกลางโซโนทรอด [9] สามารถทำได้ โดย

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (2)$$

โดยที่  $c$  หมายถึง ความเร็วเสียงในตัวกลาง (m/s),  $E$  หมายถึง โมดูลัสของยัง (GPa), และ  $\rho$  หมายถึง ความหนาแน่นของวัสดุโซโนทรอด ( $\text{kg/m}^3$ )

2.2.3 การหาความยาวคลื่นในตัวกลางโซโนทรอด [9] วัสดุอลูมิเนียม 7075-T6 ทำได้โดย

$$\lambda = c/f \quad (3)$$

โดยที่  $\lambda$  หมายถึง ความยาวคลื่น (m), และ  $f$  หมายถึง ความถี่ของคลื่นจากไพโซอิเล็กทริก (Hz)

2.2.4 การหาความยาวรวมของโซโนทรอด [9] สามารถทำได้โดย

$$L = k_1 \frac{c}{4f} + k_2 \frac{c}{4f} \quad (4)$$

โดยที่  $L$  หมายถึง ความยาวรวมของโซโนทรอด (m), และ  $k$  หมายถึง จำนวนจุดบัพของการสั่น เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ตัวแปร  $k_1$  และ  $k_2$  มีจุดบัพพร้อมกันจึงให้รวมเป็นค่าเดียวในการคำนวณความยาวรวมของโซโนทรอดแบบความยาวครึ่งคลื่น [8, 9]

## 2.3 ไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เป็นหนึ่งในหลายวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของ ของแข็ง ทั้งทางด้านสถิตศาสตร์และทางด้านพลศาสตร์ [10] ในส่วนของงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์การสั่นด้วยโปรแกรม MSC Patran/Nastran ซึ่งในการวิเคราะห์โหมดและความถี่จะใช้ modal frequency (SOL103) และ direct frequency response (SOL108) ในการวิเคราะห์ปัญหา

### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลองประกอบด้วย

- 3.1.1. เครื่องกำเนิดการสั่นทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่ทางไฟฟ้าที่ 50-60 Hz เป็น 20 kHz ขนาด 2000 Watt
- 3.1.2. ตัวแปลงสัญญาณไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric transducer) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกลที่ทำให้เกิดการสั่น
- 3.1.3. โซโนโทรดทำหน้าที่ส่งผ่านความถี่การสั่นและปรับเพิ่ม-ลด แอมพลิจูดของการสั่น
- 3.1.4. laser doppler vibrometer: Polytec OFV-505 สำหรับวัดความถี่และแอมพลิจูดการสั่น



#### ภาพที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

#### 3.2 ค่าคงที่วัสดุที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าคงที่วัสดุได้กำหนดค่าของวัสดุชิ้นงาน AL 7075-T6 เพื่อใช้ในการคำนวณและจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M-13 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

#### ตารางที่ 1 ค่าคงที่วัสดุสำหรับจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

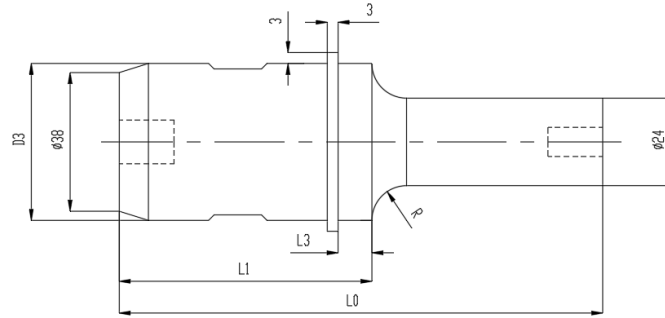
วัสดุ	ค่ามอดูลัสของยัง	ค่าความต้านทานแรงดึง	อัตราส่วนปัวซอง	ความหนาแน่น
	E (GPa)	$\sigma_T$ (MPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
AL7075-T6	72.61	554.6	0.33	2,810

#### 3.3 การออกแบบโซโนโทรดของกระบวนการขัดเงาพื้นผิวด้วยการสั่นอัลตราโซนิค

ไพโซอิเล็กทริกวัสดุอลูมิเนียมที่นำมาทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm. จึงออกแบบโซโนโทรดให้เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าสัมผัส มีความถี่ของการสั่น 19.5 kHz และสามารถวัดค่าแอมพลิจูดการสั่นหลังจากต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดได้ที่ 0.01 mm. ออกแบบอัตราขยายแอมพลิจูด โดยกำหนดอัตราขยายแอมพลิจูดที่ 3 เท่าและเส้นผ่านศูนย์กลางของโซโนโทรดทำเข้าอยู่ที่ 38 mm. คำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของโซโนโทรดขาออกจากโดยใช้สมการที่ (1) และออกแบบความยาวรวมของโซโนโทรด วัสดุอลูมิเนียม 7075-T6 โดยวิธีความยาวครึ่งคลื่น (half wave shape) โดยใช้สมการที่ (2)-(4) ดังนั้นจากการคำนวณ จะได้ความยาวรวมของโซโนโทรด  $\lambda / 2$  ประมาณ 130.4 mm. ระยะตำแหน่งจุดบัพที่  $\lambda / 4$  ประมาณ 60.2 mm.

#### 3.4 การออกแบบโซโนโทรดของกระบวนการขัดเงาพื้นผิวด้วยการสั่นอัลตราโซนิค

เมื่อได้ขนาดของโซโนโทรดเบื้องต้นแล้วผู้วิจัยจึงทำการออกแบบโซโนโทรดสำหรับกระบวนการขัดเงาด้วยการสั่นอัลตราโซนิค (แสดงในภาพที่ 4) โดยมีประกอบ การใส่รัศมีเพื่อกระจายความเค้น และการปรับขนาดความยาวเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน



ภาพที่ 4 การออกแบบโซโนโทรดของกระบวนการขัดเงาพื้นผิวด้วยการสั่นอัลตราโซนิก

### 3.5 การออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยออกแบบการทดลองโดยกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโซโนโทรดจำนวน 5 ตัวแปร 3 ระดับโดยที่ -1 หมายถึงระดับต่ำ, 0 หมายถึงระดับปานกลาง, และ +1 หมายถึงระดับสูง(ดังตารางที่ 2) หากใช้วิธี Full Factorial จะต้องดำเนินการทดลองทั้งหมด 243 การทดลอง จึงเลือกใช้วิธีทาгуชิ (Taguchi's method) เพื่อลดกรณีทดลอง โดยใช้ Taguchi's Orthogonal Array L27 ตามจำนวนตัวแปรและระดับ [11] และ หาคความถี่คลื่นและทิศทางการสั่นด้วย MSC.Nastran Modal Frequency (SOL103) :ซึ่งเป็นโหมดที่ใช้จำลองทิศทางและลักษณะการสั่น

ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับตัวแปรของการทดลอง

ตัวแปรต้น	ระดับของตัวแปร		
	-1	0	+1
ความยาวรวม (L0), mm.	125.4	130.4	135.4
ความยาว (L1), mm.	60.2	65.2	70.2
ระยะป่าประกอบ (L3), mm.	0	5	10
รัศมีของชิ้นงาน (R), mm.	3.5	9.5	15.5
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D3), mm.	38	43	53

### 3.6 การปรับจูนโซโนโทรด

ผู้วิจัยเลือกกรณีทดลอง โดยทำการปรับแก้ขนาดโซโนโทรดและจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วย Nastran direct frequency response (SOL 108) โดยใส่การสั่นแอมพลิจูด 0.01 mm.. ความถี่ 19500 Hz เข้าที่ด้านหลังแล้วดูผลการสั่นพ้อง และระยะกระจัดด้านปลาย แล้วทำการแมชชีนโซโนโทรดและวัดการความถี่ด้วย laser doppler vibrometer (แสดงในภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 การวัดการสั่นของโซโนโทรดด้วยเครื่อง laser doppler vibrometer

## 4.ผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองความถี่ของการสั่นทางยาวและอัตราขยาย (magnitude) ของการทดลองที่จำนวน 5 ตัวแปร 3 ระดับ โดยใช้ Taguchi's OA L27 ซึ่งผลการจำลองด้วย MSC. Nastran Modal Analysis แสดงได้ดังตารางที่ 3

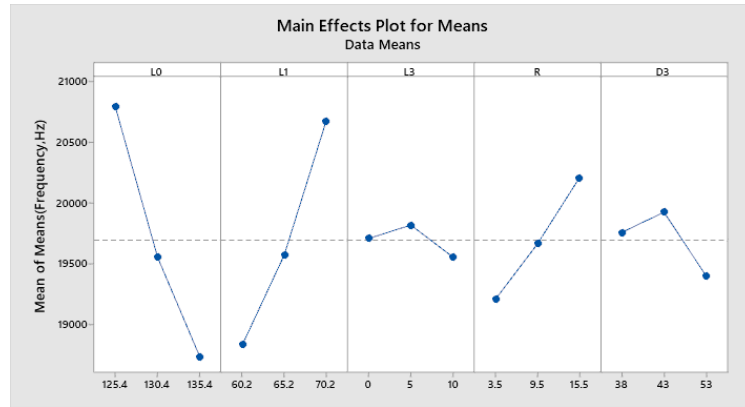


ตารางที่ 3 ผลการจำลองความถี่การสั่นทางยาวและอัตราขยายด้วยโปรแกรม MSC.Nastran SOL 103

กรณีทดสอบ	ตัวแปร					ผลการจำลอง	
	L0 (mm.)	L1 (mm.)	L3 (mm.)	R (mm.)	D3 (mm.)	ความถี่ (Hz)	อัตราขยาย
1	125.4	60.2	10	3.5	38	19,696	2.45
2	125.4	60.2	10	3.5	43	19,392	3.01
3	125.4	60.2	10	3.5	53	18,833	4.37
4	125.4	65.2	5	9.5	38	20,892	2.42
5	125.4	65.2	5	9.5	43	20,859	2.97
6	125.4	65.2	5	9.5	53	20,561	4.33
7	125.4	70.2	0	15.5	38	22,071	2.19
8	125.4	70.2	0	15.5	43	22,381	2.64
9	125.4	70.2	0	15.5	53	22,481	4.05
10	130.4	60.2	5	15.5	38	19,428	2.44
11	130.4	60.2	5	15.5	43	19,392	3.18
12	130.4	60.2	5	15.5	53	19,176	4.62
13	130.4	65.2	0	3.5	38	19,265	2.41
14	130.4	65.2	0	3.5	43	19,036	3.18
15	130.4	65.2	0	3.5	53	18,582	4.68
16	130.4	70.2	10	9.5	38	20,401	2.39
17	130.4	70.2	10	9.5	43	20,444	2.99
18	130.4	70.2	10	9.5	53	20,264	4.30
19	135.4	60.2	0	9.5	38	18,216	2.41
20	135.4	60.2	0	9.5	43	17,929	3.09
21	135.4	60.2	0	9.5	53	17,413	4.34
22	135.4	65.2	10	15.5	38	19,006	2.46
23	135.4	65.2	10	15.5	43	19,038	3.02
24	135.4	65.2	10	15.5	53	18,915	4.57
25	135.4	70.2	5	3.5	38	18,862	2.46
26	135.4	70.2	5	3.5	43	20,859	2.97
27	135.4	70.2	5	3.5	53	18,349	4.51

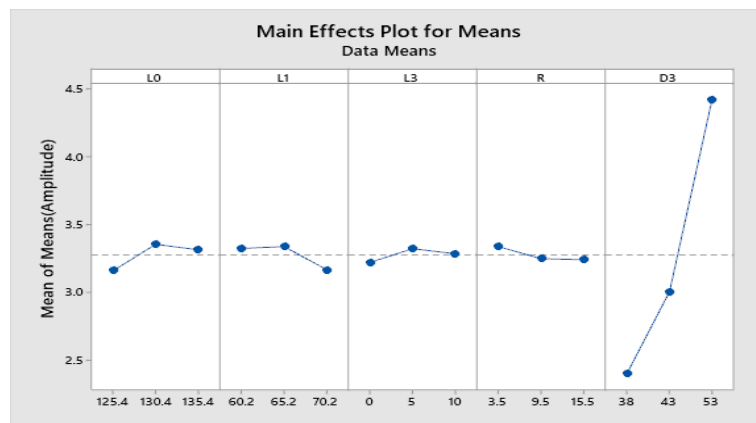
จากตารางที่ 3 พบว่า การปรับเปลี่ยนตัวแปรการออกแบบมีผลให้ความถี่ของการสั่นทางยาวและอัตราขยายเปลี่ยนแปลงไป หากต้องการควบคุมค่าความถี่ของการสั่นที่ 19.5 kHz อัตราขยายที่ 3 เท่า ผู้วิจัยจึงเลือกกรณีทดสอบที่ 11 มาปรับค่า เนื่องจากมีความถี่การสั่นและอัตราขยายใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.2

4.2 ผลการวิเคราะห์ Mean of Means ของตัวแปรที่ส่งผลต่อความถี่ของการสั่นตามยาวของโซ่โนโทรด จากผลการจำลองความถี่ (ในตารางที่ 3) ด้วยโปรแกรม Minitab 19 แสดงในภาพที่ 6 พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความถี่จะประกอบด้วย 3 ตัวแปร คือ ความยาวรวม (L0), ความยาว (L1), และรัศมีของชิ้นงาน (R)



ภาพที่ 6 Main effect plot ของตัวแปรที่ตอบสนองต่อความถี่การสั่นทางยาว

4.3 ผลการวิเคราะห์ Mean of Means ของตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราขยายแอมพลิจูดของการสั่นของโซโนโทรดซึ่งจากการจำลองอัตราขยาย (ในตารางที่ 3) ด้วยโปรแกรม Minitab 19 แสดงในภาพที่ 7 พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความถี่การขยายแอมพลิจูดมีเพียงตัวแปรเดียวคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (D3)



ภาพที่ 7 Main effect plot ของตัวแปรที่ตอบสนองต่อแอมพลิจูดการสั่น

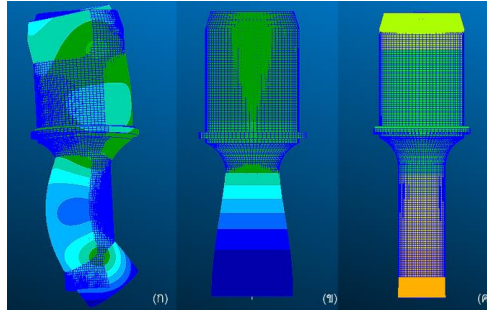
4.4 ผลการจำลองโหมดของการสั่นพบว่า โซโนโทรดจะเกิดรูปแบบการสั่นตามยาวที่โหมดที่ 10 โดยยกตัวอย่างกรณีทดลองที่ 11 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการจำลองโหมดของการสั่นของกรณีทดลองที่ 11

โหมดการสั่น	ทิศทางการสั่น	ความถี่ (Hz)
1	ตามขวาง	3454
2	ตามขวาง	3454.2
3	ตามขวาง	9340.1
4	ตามขวาง	9351.3
5	บิด	11,447
6	บิด	15,874
7	ตามขวาง	15,911
8	ตามขวาง	15,912
9	ตามขวาง	15,932
10	ตามยาว	19,392



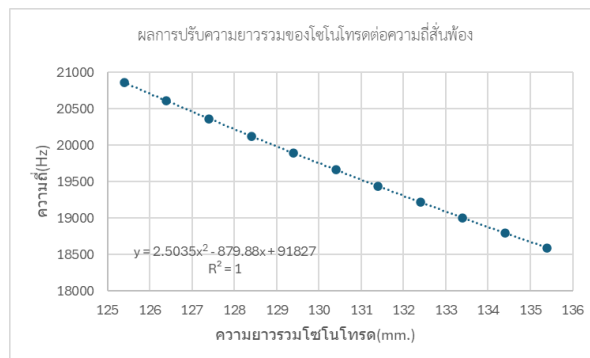
จากตารางที่ 4 ผลการสั่นในช่วง 10 โหมดแรกของการจำลองพบว่า เมื่อความถี่การสั่นเปลี่ยนไป ทิศทางการสั่นของโซโนโทรดจะเกิดขึ้นหลายรูปแบบ เช่น ตามขวาง(transverse), แบบบิด (twist), และการสั่นตามยาว (Longitudinal) ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยการออกแบบโซโนโทรดสำหรับการขัดเงาพื้นผิวด้วยการสั่นอัลตราโซนิคจะสนใจที่ทิศทางการสั่นตามยาว เนื่องจากต้องการกัดผิวชิ้นงานขึ้นลงในแนวตั้งเท่านั้น



ภาพที่ 8 ลักษณะการสั่นในรูปแบบต่างๆ ของโซโนโทรด (ก) การสั่นตามขวาง (ข) การบิด และ (ค) การสั่นตามยาว

4.5 การแก้ไขปรับปรุงการออกแบบโซโนโทรดกรณีทดลองที่ 11 โดยทำการปรับค่าตัวแปรการออกแบบที่ส่งผลต่อความถี่ทางยาวทั้งหมด 3 ตัวแปรจาก 4.2 ความยาวรวม(L0), และรัศมีของชิ้นงาน(R) เนื่องจากมีผลความถี่การสั่นและอัตราขยายใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ใน 3.2

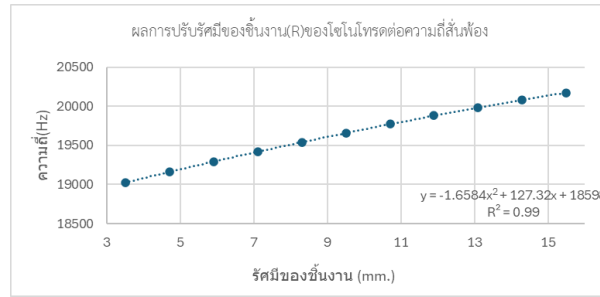
ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการปรับความยาวรวมของโซโนโทรดต่อความถี่สั่นพ้อง โดยทำการปรับเพิ่มความยาวรวมของโซโนโทรดทีละ 1 mm. โดยให้ตัวแปรอื่นๆ เป็นค่าคงที่ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการสั่นทางยาว ซึ่งแสดงผลการจำลองได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การปรับความยาวรวมสำหรับกรณีทดลองที่ 11 และความถี่ของโซโนโทรดด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

หากต้องการปรับลดความถี่ของการสั่นพ้องจะสามารถทำได้โดยการเพิ่มความยาวรวมของโซโนโทรด ดังแสดงในภาพที่ 9 และเมื่อนำผลการปรับความยาวรวมของโซโนโทรดต่อความถี่สั่นพ้องมาทำการวิเคราะห์สมการถดถอยจะมีความสัมพันธ์  $y = 2.5035x^2 - 879.88x + 91827$  ที่  $R^2 = 1$

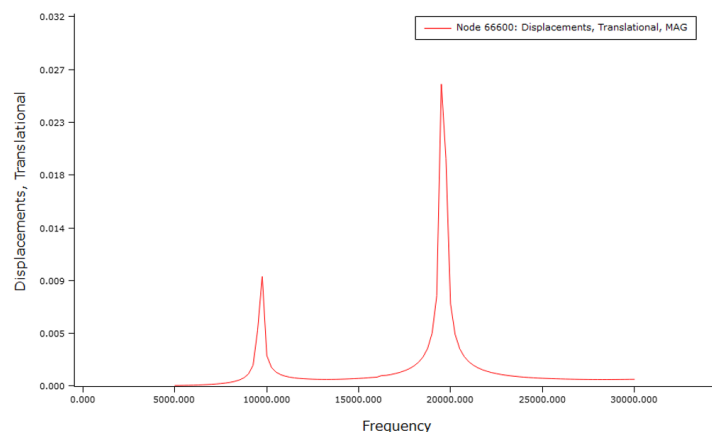
สำหรับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการปรับรัศมี (R) ของโซโนโทรดต่อความถี่สั่นพ้องซึ่งผู้วิจัยทำการปรับเพิ่มขนาดรัศมี(R) ของโซโนโทรดทีละ 1.2 mm. โดยให้ตัวแปรอื่นๆ เป็นค่าคงที่



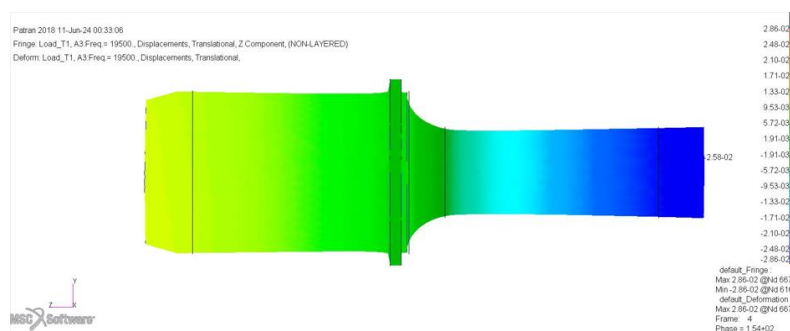
ภาพที่ 10 การปรับรัศมีสำหรับกรณีทดลองที่ 11 และความถี่ของโซลินอยด์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

หากต้องการปรับเพิ่มความถี่ของการสั่นพ้องจะสามารถทำได้โดยการเพิ่มรัศมี (R) ของโซลินอยด์ ดังแสดงในภาพที่ 10 และเมื่อนำผลการปรับรัศมี (R) ของโซลินอยด์ต่อความถี่สั่นพ้องทำการวิเคราะห์สมการถดถอยจะได้ความสัมพันธ์  $y = -1.6584x^2 + 127.32x + 18598$  ที่  $R^2 = 0.99$

4.6 ผลการตอบสนองความถี่หลังการปรับแก้ไขโซลินอยด์โดยปรับความยาวรวมของโซลินอยด์จากกรณีทดลองที่ 11 จาก 130.4 เป็น 131.1 mm., ปรับรัศมีจาก 15.5 เป็น 9.5 mm. แล้วจำลองด้วย MSC.Nastran Direct Frequency Response (SOL 108) จากการจำลองพบว่า โซลินอยด์สั่นพ้องที่ความถี่ 19,500 Hz ตามภาพที่ 11 และระยะกระจัดทางแกน Z อยู่ที่ 25.751  $\mu\text{m}$ . ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 11 การตอบสนองความถี่หลังการปรับแก้ไขโซลินอยด์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 12 ระยะกระจัดของแกน Z ที่ความถี่ 19,500 Hz ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

4.7 ผลการวัดการความถี่ด้วย laser doppler vibrometer เป็นความถี่ (kHz) และแอมพลิจูดของความถี่คลื่น (Volt) โดยทำการแปลงแอมพลิจูดตามช่วงของการวัดคลื่น คือ 1 m/sec/Volt และหาค่าระยะกระจัดของการสั่นได้จาก

$$A = V/2\pi f \quad (5)$$

โดยที่  $A$  หมายถึง ระยะกระจัด(แอมพลิจูด) (m.),  $V$  หมายถึง ความเร็วของคลื่น (m/s), และ  $f$  หมายถึง ความถี่ (Hz)

ตารางที่ 5 ผลการวัดการความถี่และแอมพลิจูดด้วย Laser Doppler vibrometer

ครั้งที่วัด	ผลความถี่ (kHz)	แอมพลิจูดของความถี่คลื่น (Volt)	ความเร็วคลื่น (m/s)	ระยะกระจัด ( $\mu\text{m}.$ )
1	19.29630	2.9556	2.9556	24.38
2	19.29040	3.0145	3.0145	24.87
3	19.28840	3.0580	3.0580	25.23
4	19.28570	3.0645	3.0645	25.29
5	19.28340	3.0947	3.0947	25.54
6	19.28120	3.0956	3.0956	25.55
7	19.27770	3.1036	3.1036	25.62
ค่าเฉลี่ย	19.28616	3.0552	3.0552	25.21

เมื่อได้ความถี่และแอมพลิจูดแล้ว นำผลจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการวัดนำมาสร้างกราฟในโดเมนของเวลาได้จากสมการ  $f(t) = A\sin(2\pi ft)$

จะได้สมการคลื่นจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คือ  $f_{FEM}(t) = 25.751\sin(2\pi(19500)t)$  และสมการคลื่นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองคือ  $f_{Experiment}(t) = 25.21\sin(2\pi(19286.16)t)$

เมื่อผลจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดลองจริงมาเปรียบเทียบในรูปของตารางโดยแสดงผลของความถี่และแอมพลิจูดสูงสุด โดยแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบหลังปรับจูนโซโนโทรด

ผลการทดลอง	ความถี่(Hz)	แอมพลิจูด(แกน Z, $\mu\text{m}.$ )
ไฟไนต์เอลิเมนต์	19500	25.751
การทดลองจริง	19286.16	25.213
ผลต่างที่ได้	213.84	0.538
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	1.11%	2.14%

จากการเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 6 พบว่าผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าความถี่สูงกว่าการทดลองจริงอยู่ที่ 213.84 Hz และแอมพลิจูดทางแกน Z สูงกว่าการทดลองจริงอยู่ที่ 0.538  $\mu\text{m}.$

## 5.สรุปผล

การปรับเพิ่มค่าความถี่สั่นพ้องของโซโนโทรดสามารถทำได้โดยลดขนาดจากความยาวรวม (L0) โดยต้องลดความยาวจากทั้งฝั่งขาเข้าและขาออกเท่าๆกัน

การปรับลดค่าความถี่สั่นพ้องของโซโนโทรดสามารถทำได้โดยลดขนาดจากความยาว (L1) และลดรัศมี (R) ของชิ้นงาน

การปรับเพิ่ม-ลดแอมพลิจูดสามารถทำได้ หากต้องการปรับเพิ่มแอมพลิจูดควรลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซโนโทรดฝั่งขาออก และหากต้องการปรับเพิ่มแอมพลิจูดควรลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซโนโทรดฝั่งขาเข้าเพื่อให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น และการปรับระยะบ่าประกอบไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงค่าความถี่สั่นพ้องและแอมพลิจูดของโซโนโทรด

จากผลการทดลองผลิตโซโนโทรดพบว่าสามารถใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อปรับการออกแบบให้เหมาะสมทั้งใน ส่วนของความเร็วการสั่นพ้องเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องกำเนิด โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความเร็วประมาณ 1.11% และ แอมพลิจูดการสั่นประมาณ 2.14% อาจมีองค์ประกอบจากหลายสาเหตุ เช่น การกำหนดค่าขอบของการจำลอง, การขันแน่นเพื่อจับยึดโซโนโทรดบนอุปกรณ์ไม่ได้มีการวัดแรงบิดขณะขันแน่น และตัวแปรความร้อนที่เกิดขึ้นบนตัวโซโนโทรด ขณะทดลอง

## 6. ข้อเสนอแนะ

การออกแบบโซโนโทรดควรมีการเผื่อความยาวรวมเพื่อปรับจูนโซโนโทรดเพื่อหาค่าความถี่ที่เหมาะสมและหากติดตั้ง ในระบบการขัดควรพิจารณาใช้ความเร็วการสั่นที่สูงขึ้น เช่น 40 kHz เนื่องจากส่งผลต่อการออกแบบความยาวของโซโนโทรด เกิดความร้อนสูงบนตัวโซโนโทรดขณะทดลอง ควรพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิของโซโนโทรดในการวิเคราะห์ อาจส่งผลต่อ ประสิทธิภาพของการสั่น และอายุการใช้งาน

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kudryavtsev, Y. F., & Sharpe, W. N. (2008). Residual Stress BT-Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics. Boston, MA: Springer US, 371-388.
- [2] Satpathy, M., S. Sahoo, and S. Datta, Acoustic horn design and effects of process parameters on properties of dissimilar ultrasonic welding aluminum to brass. Materials
- [3] Allaparthi, M., M.R. Khan, and S.N. Addepalli, FE Modal and Harmonic Analysis of Micro Drill with Ultrasonic Horn. Materials Design and Applications, 2017: p. 281-293
- [4] Yazdian, A. and M.R. Karafi, An analytical approach to design horns and boosters of ultrasonic welding machines. SN Applied Sciences, 2022. 4(6): p. 166.
- [5] Luo, A. M., Zheng, J. X., & Wu, H. Q. (2013). Kinematics analysis on ultrasonic deep rolling with longitudinal-torsional vibration. Advanced Materials Research, 630, 148-152.
- [6] Kantnat T, Chaiyakorn Ch., & Chana R. (2016), A Development of Robot Ultrasonic Burnishing Tool for Free-form Finishing Surface., Kasetsart University
- [7] Nad, M. (2010). Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies.
- [8] ZVEI—German Electrical Manufacturers Association. (1980). Ultrasonic Assembly of Thermoplastic Moldings and Semi-Finished Products. Fachverband Electroschweissgera te, Frankfurt.
- [9] Ngo, Q. H., Chu, N. H., & Nguyen, V. D. (2018). A study on design of vibratory apparatus and experimental validation on hard boring with ultrasonic-assisted cutting. Int. J. Adv. Eng. Res. Appl, 3, 383-396.
- [10] Pramote Dechaumphai (2017). Finite Element Method in Engineering, CU Press
- [11] Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2004). Taguchi's quality engineering handbook.