

## การเชื่อมด้วยอุลตราโซนิก: อุปกรณ์และวิธีการเชื่อม

อดิศักดิ์ บุตรวงษ์\*

### บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยอุลตราโซนิกเป็นวิธีการเชื่อมที่อาศัยการสั่นที่มีความถี่สูงของหัวเชื่อม ทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานที่ชิ้นงานตรงบริเวณที่หัวเชื่อมสัมผัสกับชิ้นงานหรือบริเวณที่ชิ้นงานสัมผัสกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน โดยบทความนี้จะได้ทบทวนวรรณกรรมและรายงานที่เกี่ยวข้องของการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิก ซึ่งจะสนใจวิธีการเชื่อม ผลของการเชื่อมเป็นหลัก โดยจะอภิปรายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ หลักการทำงานของอุปกรณ์ ลักษณะการเชื่อม ประเภทชิ้นงานที่สามารถเชื่อมด้วยวิธีการนี้ และตัวแปรที่ส่งผลกับรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น นอกจากนี้พฤติกรรมของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจะได้อธิบายอย่างชัดเจนในชิ้นงานที่เป็นโลหะ และพลาสติกซึ่งพบว่าการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิกจะต้องเลือกใช้ความถี่ แอมพลิจูด และวัสดุที่ใช้ทำหัวเชื่อมที่เหมาะสม รวมถึงยังได้ชี้ประเด็นช่องว่างของงานวิจัยที่ผ่านมาและขอเสนอแนะสำหรับแนวทางการวิจัยการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิกที่ควรจะดำเนินการต่อไปในอนาคตจะถูกนำเสนอในบทความนี้ด้วย

**คำสำคัญ:** การเชื่อมด้วยอุลตราโซนิก

## Ultrasonic welding: Device and methods

**Adisak Bootwong\***

### Abstract

Ultrasonic welding is a welding method that depends on the high resonance frequency vibration of the welding tip. The heat generated due to the friction of welding tip piece occupies the area of contact with the specimen or specimen contact. The specimens were joined when the temperature increased. This article is a review of the literatures and reports of the ultrasonic welding. The main results are discussion on the factors of ultrasonic welding, including the principle of method, performance of device, type of specimens that can be joined with this method and variables that affect the weld. Moreover, the behaviors of the weld were clearly explained for in a piece of metal and plastic. As results, it was clearly confirmed the ultrasonic welding involves the use of optimal frequency, amplitude, and the materials of horn using. In addition, this research also identifies weaknesses of past research and suggestions for future works in ultrasonic welding.

**Keywords :** Ultrasonic welding

## 1. บทนำ

การเชื่อมแบบต่างๆ ในงานวิศวกรรม เช่น การเชื่อมด้วยไฟฟ้า การเชื่อมด้วยแก๊ส ถือเป็นวิธีที่แพร่หลายและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เพื่อใช้ในการต่อโครงสร้างหรือเชื่อมชิ้นงานต่างๆ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของของไหล หรือก๊าซ ทั้งการเชื่อมโลหะ [1-2] การเชื่อมพลาสติก [3-5] หรือการเชื่อมในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ [6] วิธีการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการถูก โดยเฉพาะในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องเชื่อมให้มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบา สะดวกกับการเคลื่อนย้าย ใช้งานง่าย และสามารถหาซื้อได้ง่ายตามร้านค้าทั่วไป แต่อย่างไรก็ตาม การเชื่อมด้วยวิธีดังกล่าวก็มีทั้งข้อดี ข้อด้อยหรือข้อจำกัด และปัญหาอุปสรรคอยู่หลายประการ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีนักวิจัยพัฒนาวิธีการเชื่อมแบบต่างๆ ขึ้นวิธีการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิก [1-38] เป็นอีกหนึ่งวิธีการเชื่อมที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยได้มีการพัฒนากระบวนการ และวิธีการเชื่อมจนสามารถใช้ได้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การเชื่อมชิ้นงานที่เป็นพลาสติก [7] หรือโลหะต่างๆ [1-2] และการเชื่อมชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ [8] เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปข้อดี ข้อด้อยหรือข้อจำกัดของการเชื่อมแบบทั่วไป และข้อดี ข้อด้อยของการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิกได้ดังนี้

### 1.1 ข้อดีหรือข้อจำกัดของการเชื่อมแบบทั่วไป

คือ ทักษะและประสบการณ์ของผู้เชื่อมจะต้องได้รับการฝึกปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความชำนาญ และเรียนรู้หลักความปลอดภัยในการเชื่อมแสงจ้าจากการเชื่อมเป็นอันตรายต่อดวงตาของผู้เชื่อมและอาจทำให้

ผิวหนังไหม้ นอกจากนี้ยังเป็นอันตรายต่อบุคคลที่ทำงานข้างเคียง คว้นที่เกิดจากการเชื่อมโลหะ ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ โดยคว้นที่เกิดขึ้นมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซโอโซนซึ่งเกิดจากการเชื่อมที่ใช้อาร์กอน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดจากการเชื่อมที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ และคว้นที่เกิดจากการบัดกรี ก๊าซเหล่านี้ปะปนในอากาศที่หายใจ เป็นสารพิษที่เป็นอันตราย จะก่อให้เกิดการระคายเคืองตา จมูก และลำคอ อาจทำให้หอบหืด นอกจากนี้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารบางชนิด เช่นสี โลหะหนัก นิกเกิล โครเมียม สแตนเลส พิษของมันมีผลเสียต่อปอดและไต เป็นต้น รวมถึง การเชื่อมแบบทั่วไปไม่สามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีจุดหลอมเหลวแตกต่างกันได้ เช่น อะลูมิเนียมกับสแตนเลส และการเชื่อมแบบทั่วไปสำหรับชิ้นงานพลาสติกจะเกิดการเสียรูปของชิ้นงานบริเวณใกล้เคียงแนวเชื่อม

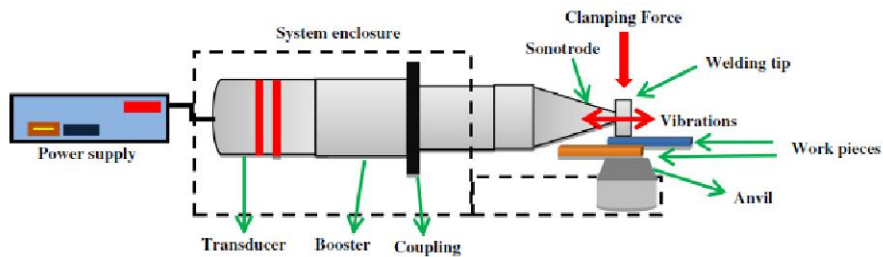
### 1.2 ข้อดีของการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิก

คือ ผู้เชื่อมไม่จำเป็นต้องมีทักษะประสบการณ์มาก เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ ง่ายต่อการใช้งาน สามารถฝึกปฏิบัติให้เกิดความชำนาญได้อย่างรวดเร็ว วิธีนี้จะไม่เกิดแสงจ้าขณะเชื่อม ดังนั้นจึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้เชื่อมหรือบุคคลที่ทำงานข้างเคียง ไม่เกิดคว้นในการเชื่อม ดังนั้นจึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้เชื่อมหรือบุคคลที่ทำงานข้างเคียง ทั้งยังสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีจุดหลอมเหลวแตกต่างกันได้ เช่น อะลูมิเนียมกับสแตนเลส [9] เป็นต้น และการเชื่อมด้วย

อัลตราโซนิกสามารถเชื่อมพลาสติกได้ดี โดยไม่เกิดการเสียรูปของชิ้นงาน ซึ่งใช้เวลาไม่เกิน 10 วินาที และสามารถเชื่อมชิ้นงานที่วิธีการอื่นๆ ที่ไม่สามารถเชื่อมได้ เช่น เซรามิก และ แก้ว [10-12] ใช้พลังงานและเวลาในการเชื่อมน้อย โดยมีเวลาในการเชื่อมช่วงสั้นๆ เป็นวินาที อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกยังคงมีข้อจำกัด คือ อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพง และไม่สามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ ได้ จากข้อด้อยดังกล่าว ได้มีนักวิจัยพัฒนาการเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกให้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเชื่อมต่อไป โดยในบทความนี้จะได้ทบทวนวรรณกรรมและเรียบเรียงเนื้อหา จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงข้อมูลการวิจัยที่ผ่านมาของผู้เขียนเองผนวกกับการวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นๆ

## 2. อุปกรณ์การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก

การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกอาศัยหลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่สูงเป็นการสั่นทางกลด้วยเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างและหดตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนเนื่องมาจากแรงเสียดทานในชิ้นงาน โดยอุปกรณ์ในการเชื่อมประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (ultrasonic generator) ตัวแปลงสัญญาณความถี่เป็นการสั่น (piezoelectric transducer) ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีเพียโซอิเล็กทริก เป็นตัวแปลงสัญญาณความถี่ หัวเชื่อม (sonotrode) เป็นตัวเชื่อมสัมผัสกับชิ้นงาน และฮอร์น (horn) เป็นตัวขยายแอมพลิจูดการสั่น [13-14] ในการเชื่อม ซึ่งหัวเชื่อมและฮอร์นอาจจะเป็นชิ้นเดียวกันหรือแยกกันตามลักษณะของการเชื่อม [15]

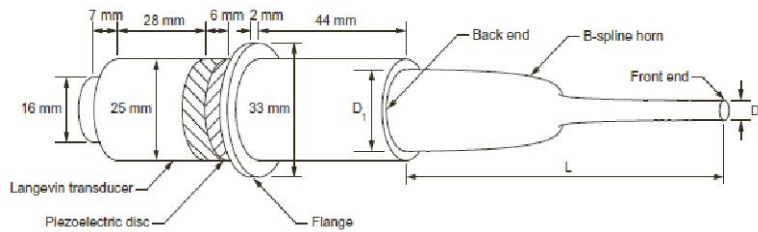


รูปที่ 1 อุปกรณ์การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก [15]

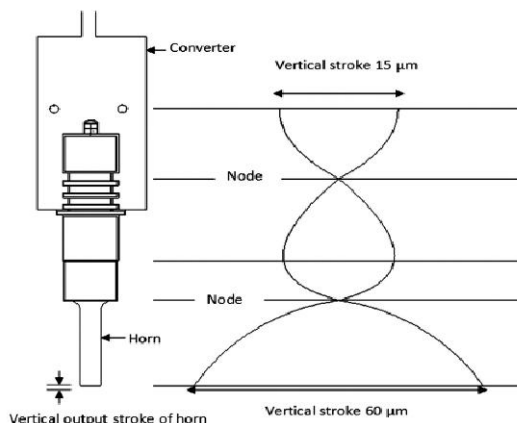
### 2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่

ประกอบด้วยอุปกรณ์กำเนิดความถี่และอุปกรณ์ขยายความถี่เพื่อให้กำลังสูงขึ้น โดยนักวิจัยส่วนใหญ่จะแสดงกำลังขยายความถี่ในหน่วย จูน (J) และเวลาใน

การเชื่อมในหน่วยวินาที (s) ทั้งนี้อุปกรณ์กำเนิดความถี่หรืออุปกรณ์ขยายความถี่ อาจรวมอยู่ในเครื่องเดียวกันหรือแยกกันก็ได้ ซึ่งกำลังขยายที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับประเภทชิ้นงานที่ใช้ และแรงกดด้วย [16]



(a) แบบ B-spline horn [13]



(b) แบบ Stepped [14]

รูปที่ 2 เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (a) และ (b)

**2.2 เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์**

เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณความถี่เป็นการสั่นเพื่อส่งต่อไปยังหัวเชื่อม ประกอบด้วย แผ่นเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric disc) โดย flange คือชิ้นส่วนที่ยึดกับจตุรกรรปหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นแบบปฏิบัติ (node) และ B-spline horn เป็นตัวขยายสัญญาณทำให้ที่ปลายของ horn มีแอมพลิจูดที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2

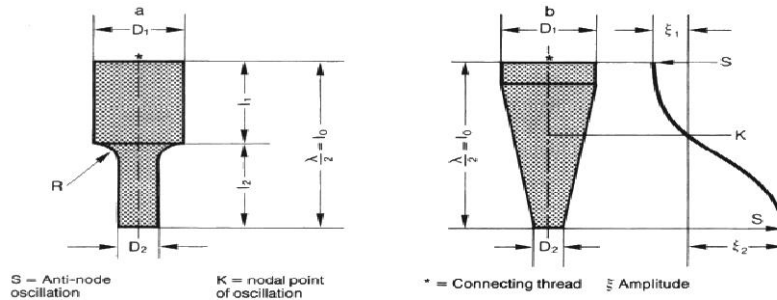
**2.3 หัวเชื่อมและฮอร์น**

หัวเชื่อม คือชิ้นส่วนที่ต่อจากฮอร์นให้สัมผัสกับชิ้นงาน ซึ่งลักษณะของหัวเชื่อมขึ้นกับลักษณะการใช้งาน ฮอร์น (horn) คือ ตัวขยายแอมพลิจูดการสั่นให้

สูงขึ้น หรือจะใช้เป็นหัวเชื่อมก็ได้ ดังนั้นในการออกแบบหัวเชื่อมและ ฮอร์น เพื่อให้ได้โหมดการสั่นที่ถูกต้อง เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเกิดรอยเชื่อม โดยต้องคำนึงถึงความถี่และแอมพลิจูดที่เหมาะสม ซึ่งความถี่และแอมพลิจูดมีผลกับการเพิ่มและลดลงของพื้นที่รอยเชื่อม เมื่อความถี่สูงขึ้นจะได้พื้นที่ของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น และแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่รอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้ความถี่และแอมพลิจูดสูง นักวิจัยจึงนิยมใช้ ฮอร์น เป็นตัวขยายแอมพลิจูดในการเชื่อม ฮอร์น ที่ใช้ในการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิคจึงมีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน [4] เช่น Stepped Gaussian Catenoidal Bezier Cylindrical B-Spline [17] เป็นต้น ผลจากงานวิจัย พบว่า

ฮอร์น แบบ Stepped และ Bezier ให้แอมพลิจูดและอุณหภูมิระหว่างเชื่อมสูงสุด กระบวนการออกแบบฮอร์น และหัวเชื่อมสามารถใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (FEA) ในการจำลองโหมดการสั่นหาความถี่สั่นพ้องของฮอร์น หรือหัวเชื่อมได้ [13-14, 18] สำหรับการใช้งาน หากต้องการพื้นที่รอยเชื่อมแบบเป็นจุด [19] หรือต้องการให้ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่เพื่อให้ได้

รอยเชื่อมเป็นแนวยาว [20] อาจจะใช้ ฮอร์น เป็นหัวเชื่อมได้เลย นอกจากนี้หากชิ้นงานมีลักษณะเฉพาะจำเป็นต้องออกแบบหัวเชื่อมตามลักษณะของชิ้นงานหรือต้องการเชื่อมชิ้นงานอย่างอื่น จำเป็นต้องออกแบบหัวเชื่อมใหม่ให้มีความความถี่เดียวกัน ต่อเข้ากับ ฮอร์นตามโหมดการสั่นที่ต้องการได้ [21] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 Horn (a) แบบ Stepped (b) แบบ Conical [22]

ซึ่งแสดงตัวอย่างการออกแบบ ฮอร์น แบบ Stepped และ Conical การประมาณค่าความยาวของหัวเชื่อมแบบ Stepped และ Conical สามารถคำนวณดังสมการที่ (1) และ (2) ส่วนสมการที่ (3) จะเป็นการประมาณค่าความยาวของหัวเชื่อมแบบ Step และ Conical และสมการที่ (4) เป็นการคำนวณอัตราส่วนแอมพลิจูด

- โดยที่
- $k = 1$
  - $\beta =$  อัตราส่วนแอมพลิจูด
  - $\xi_2 =$  แอมพลิจูดที่ปลายของหัวเชื่อม
  - $\xi_1 =$  แอมพลิจูดที่ปลาย ฮอร์น
  - (ไม่มีการสูญเสียที่รอยต่อ)
  - $A_1 =$  พื้นที่ด้านต่อกับ ฮอร์น
  - $A_2 =$  พื้นที่ด้านปลายหัวเชื่อม
  - $D_1 =$  เส้นผ่านศูนย์กลางกลางด้าน ฮอร์น
  - $D_2 =$  เส้นผ่านศูนย์กลางด้านปลายหัวเชื่อม ฮอร์น
  - $v =$  ความเร็วเสียง
  - $f =$  ความถี่
  - $l_0 =$  ความยาวทั้งหมดของ ฮอร์น

$$\beta = \frac{\xi_2}{\xi_1} \tag{1}$$

$$\beta = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \tag{2}$$

$$l_0 = k \cdot \frac{v}{2 \cdot f} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{D_1}{D_2} = \frac{\xi_2}{\xi_1} \tag{4}$$

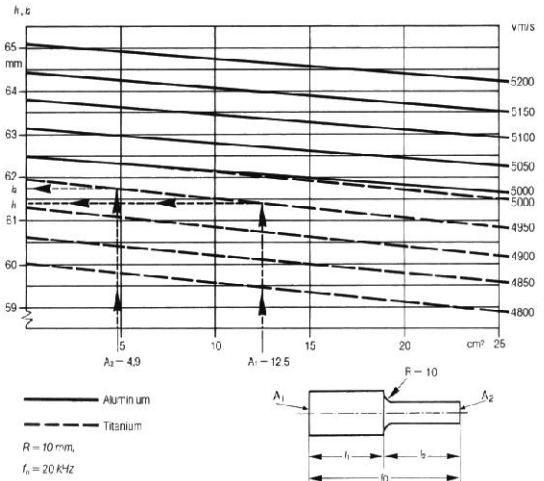
**ตารางที่ 1** แอมพลิจูดของการสั่นสำหรับวัสดุต่างๆ [22]

Material (PS)	Amplitude Values adopted In practice	
	( $\mu\text{m}$ )	
Polystyrol (PS)	15 to 30	
Polystyrol Impact strong (SB)	20 to 35	
Acryl, butadiene-Styrol (ABS)	20 to 30	
Stryol-acryl nitrile (SAN)	15 to 30	
Polymethyl methacrylate (PMMA)	20 to 35	
injection mould		
Modified (PPO)	25 to 40	
Polycarbonate (PC)	25 to 40	
Polyacetyl resin (POM)	40 to 50	
Polyamide (PA)	35 to 55	
Polyethyl enterephthalate (PETP)	45 to 55	
Polynuthyl enterephthaiate (PBTB)	40 to 50	
Cellulose Derivatives	25 to 35	
PVC hart	20 to 40	
Polyethylene(PE)	25 to 60	
Polypropylene(PP)	30 to 60	

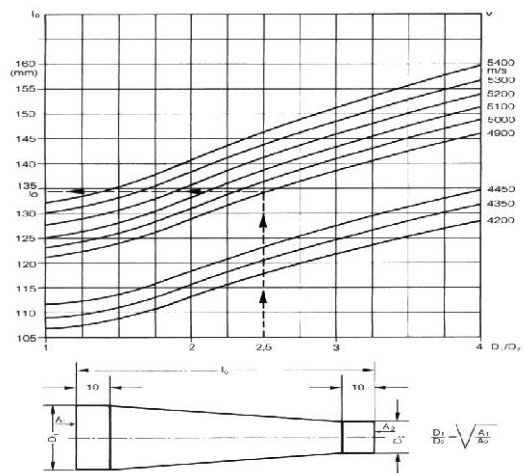
**ตารางที่ 2** การประมาณค่าความเร็วเสียงในวัสดุ [22]

Material	Sound velocity Variations	
	$V_0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	$\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$
Titanium alloy TiAlV64	4900	$\pm 100$
Aluminium alloys		
AlCuMg2	5100	$\pm 100$
AlCuMGPb	5000	$\pm 100$
Aluminium	5100	$\pm 200$
Monel annealed and quenched	4350	$\pm 150$
1550 steel (RT 11) tempered	5250	$\pm 50$
Ferrotitanite WFN hardened	6950	$\pm 150$

นอกจากนี้ค่าความเร็วเสียงและแอมพลิจูด จะประมาณค่าได้จากตารางที่ 1 และ 2 โดยความยาวของ Horn  $l_0$  จะใช้กราฟรูปที่ 4 และ 5 ในการประมาณค่า



**รูปที่ 4** กราฟประมาณหัวเชื่อมแบบ Stepped [22]



**รูปที่ 5** กราฟประมาณหัวเชื่อมแบบ Conical [22]

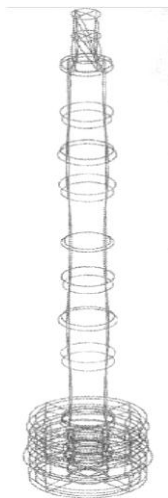
### 3. ลักษณะการเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก

ลักษณะการเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกจะมีอุปกรณ์หลัก 3 ตัว ดังกล่าวในหัวข้อข้างต้น แต่สามารถแยกลักษณะ

การเชื่อมได้จากการสั่นที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ได้ 3 ลักษณะดังนี้

### 3.1 การสั่นในแนวแกน

เมื่อก้าวถึงการเชื่อมด้วยอุลตราโซนิค พบว่าการสั่นในแนวแกนเป็นการสั่นที่ใช้มากที่สุด ถึงแม้ว่าเครื่องเชื่อมจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน แต่หลักการทำงานเหมือนกัน คือการสั่นแบบหดตัวและยืดตัวตามแนวแกนของ ทรานสดิวเซอร์ ไปจนถึงปลายหัวเชื่อม ตัวอย่างเช่น การเชื่อมของ S-I. Matsuoka และคณะ ใช้ชิ้นงานในการเชื่อมเป็น  $\text{SiO}_2/\text{Cu}/\text{Al}$ ,  $\text{Al}/\text{Ni}/\text{SiC}$  และ  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{Al}$  โดยโลหะที่อยู่ระหว่างกลางเป็นตัวประสาน ซึ่งมีแรงกด 20 Mpa ในทิศทางตั้งฉากกับการสั่น ที่แอมพลิจูดการสั่นสูงสุดที่ 20  $\mu\text{m}$  ใช้เวลาในการเชื่อม 1 s อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมสูงสุดที่ 500 °C และยังสามารถแสดงโครงสร้างตรงบริเวณรอยเชื่อมด้วย [10] นอกจากนี้การเชื่อมของ J. Tsujino และคณะ ได้ศึกษาการเชื่อมโดยใช้ชิ้นงานเป็นพลาสติก



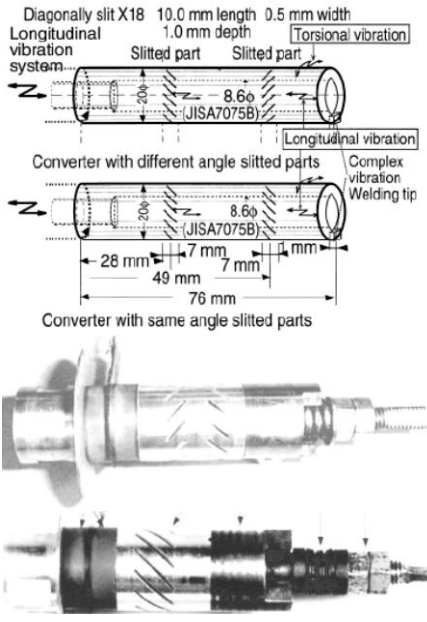
รูปที่ 6 Mode การสั่นตามแนวแกน [18]

พบว่าใช้การสั่นในแนวแกน ซึ่งแรงกดที่ใช้มีทิศทางเดียวกับการสั่น และทำการศึกษาโดยการเพิ่มความถี่ในการเชื่อมจำนวน 3 ความถี่ ในการเชื่อมต่อหนึ่งครั้ง นอกจากนี้ยังแสดงผลของการเชื่อมด้วยพื้นที่รอยเชื่อมและความแข็งแรง [19, 23] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ L. Parrini และคณะ [18] ได้ศึกษาการออกแบบอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์การสั่นในแนวแกน ที่ความถี่สูงด้วย FEA ดังรูปที่ 6

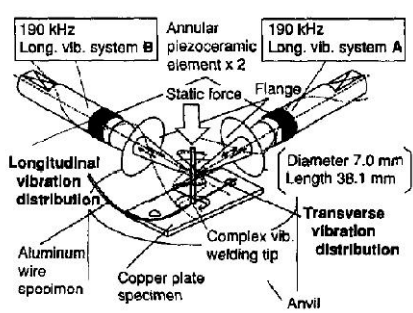
### 3.2 การสั่นแบบผสม

การสั่นแบบผสมมี 2 แบบ คือแบบที่เกิดจากการเจาะช่องเล็กๆ ที่ตัว transducer (slitted part rotor) เพื่อเปลี่ยนทิศทางการสั่นในแนวแกนให้เป็นการสั่นแบบบิดพร้อมๆ กัน ดังรูปที่ 7 โดยพื้นที่รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นวงรี และแบบที่เกิดจากการใช้อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ 2 ตัว ที่ความถี่เดียวกัน หรือความถี่ต่างกันทำมุมกัน ดังรูปที่ 8 โดยพื้นที่รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นวงกลมในกรณีที่มีความถี่และแอมพลิจูดในการสั่นเท่ากัน หรือเป็นวงรีในกรณีที่มีความถี่ต่างกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมา J. Tsujino และคณะ ได้เชื่อมชิ้นงานประเภทต่างๆ โดยใช้การสั่นแบบผสม (slitted part rotor) ได้แก่ การเชื่อมพลาสติก ที่ความถี่ 27 kHz และ 40 kHz [20] การเชื่อมโลหะที่ความถี่ 190 300 และ 600 kHz [24-25] และการเชื่อมลวดทองแดง ที่ความถี่ 40 60 และ 100 kHz [26] พบว่าการเชื่อมด้วยวิธีดังกล่าวทำให้เกิดพื้นที่รอยเชื่อมเป็นวงรี 6-8  $\text{mm}^2$  มีความหนาของชิ้นงาน 0.3-1 mm และมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมใกล้เคียงกับความแข็งแรงของชิ้นงาน





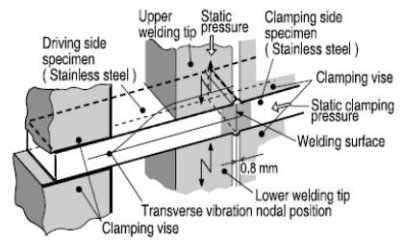
รูปที่ 7 ลักษณะ slitted part rotor [27]



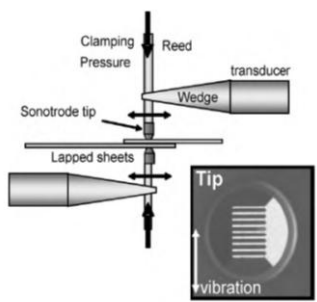
รูปที่ 8 การสันแบบผสมที่ใช้ทรานสดิวเซอร์ 2 ตัว [24]

3.3 การสันหลายความถี่

การสันวิธีนี้ใช้ 2 ความถี่ในการเชื่อมชิ้นงาน จาก ด้านบนและด้านล่างในลักษณะต่อชน ดังรูปที่ 9 โดยการสันในแนวแกน 2 ตัวมาร่วมกัน ลักษณะการเชื่อม อาจแตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบและการใช้งาน



รูปที่ 9 การสันสองความถี่ชิ้นงานแบบต่อชน [1]



รูปที่ 10 การสันสองความถี่ชิ้นงานแบบต่อเกย [28]

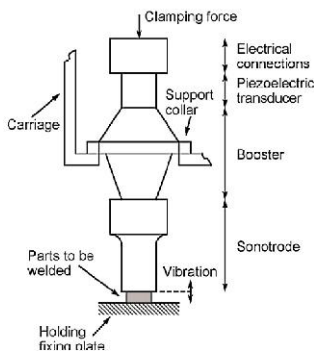
ดังรูปที่ 10 จากงานวิจัยของ M. Iijima และคณะ ทำการเชื่อม Silicon Nitride ( $Si_3N_4$ ) โดยใช้ความถี่ 19 kHz ที่เวลาในการเชื่อม 10 วินาที พบว่าได้ความแข็งแรงของรอยเชื่อม 33 Mpa [29] และ T. Jiromaru และคณะ ได้ทำการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยและสแตนเลส โดยใช้ความถี่ 15 kHz และแอมพลิจูดการสัน 25  $\mu m$  ที่เวลาในการเชื่อม 1-3 s พบว่าได้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเกือบเท่ากับค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน และตรงบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 20% [1, 5]

4. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรอยเชื่อม

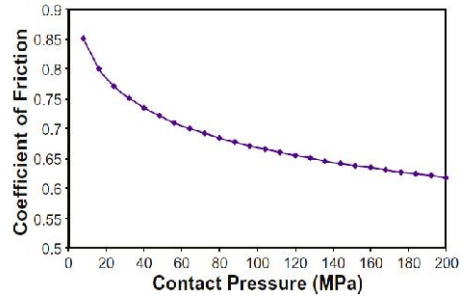
จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อรอยเชื่อม พื้นที่รอยเชื่อม และความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งสามารถสรุป ได้ดังนี้

**4.1 แรงกด**

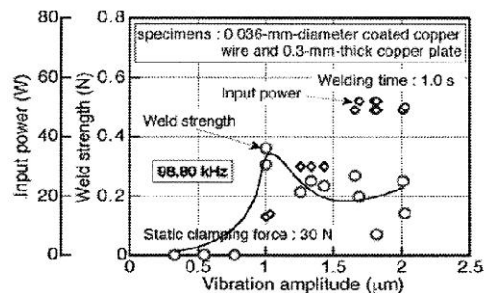
เป็นแรงกดที่ใช้เพิ่มการเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสตรงบริเวณที่เกิดรอยเชื่อม สังเกตได้ว่าเมื่อแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้พื้นที่รอยเชื่อมและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย [25] ซึ่งทิศทางของแรงกดนั้นสามารถตั้งฉากกับทิศทางการสั่น [1, 28] หรือกดในทิศทางเดียวกับการสั่นก็ได้ ดังรูปที่ 11 [21] นอกจากนี้แรงกดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับประเภทของชิ้นงาน และลักษณะการเชื่อม เพราะหากเพิ่มแรงกดมากเกินไปหัวเชื่อมหรือชิ้นงานไม่สั่น [16] ดังรูปที่ 12 จะทำให้ไม่เกิดรอยเชื่อม ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าแนวโน้มของพื้นที่รอยเชื่อมและความแข็งแรงจะเริ่มคงที่และลดลง [26] ดังรูปที่ 13 สำหรับชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมากๆ ต้องใช้แรงกดที่มากตามไปด้วย เช่น เซรามิก หรือ โลหะ ส่วนแรงกดที่ใช้บนชิ้นงานที่เป็นพลาสติกจะใช้แรงน้อยกว่า ทั้งนี้หากใช้แรงกดมากขึ้น สิ่งตามมาคือการใช้กำลังงานของ ultrasonic generator ก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย [16, 26] และรอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับชิ้นงานปกติ หรือมากกว่าในชิ้นงานที่เป็นพลาสติก



รูปที่ 11 แรงกดในทิศทางเดียวกับการสั่น [21]



รูปที่ 12 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงกด [16]



รูปที่ 13 พลังงาน ความแข็งแรง และแอมพลิจูด [26, 30]

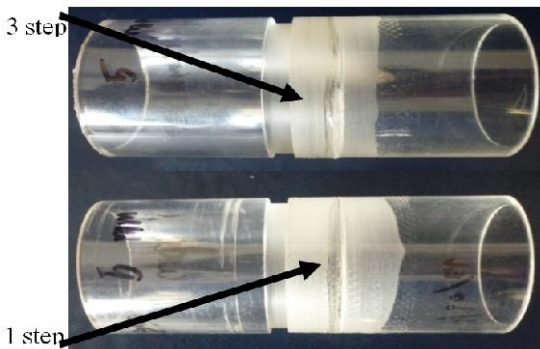
**4.2 ความถี่และแอมพลิจูด**

เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญกับคุณภาพรอยเชื่อมโดยตรง โดยแอมพลิจูดจะเปลี่ยนตามความถี่ หากความถี่ต่ำก็จะได้แอมพลิจูดสูง ในทางตรงข้ามหากความถี่สูงก็จะได้แอมพลิจูดต่ำ เมื่อใช้ความถี่ต่ำจะได้ความแข็งแรงและขนาดของรอยเข็มน้อยกว่าใช้ความถี่สูงๆ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานชนิดเดียวกัน [24-25, 30] ดังนั้น จึงต้องมีการขยายแอมพลิจูดขึ้นที่ความถี่สูงๆ โดยการเพิ่มพลังงานหรือการออกแบบ horn ให้มีการขยายแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นด้วย จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเพิ่มความถี่หลายความถี่ในการเชื่อมหนึ่งครั้ง หรือการทำช่องที่ตัวอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ให้เกิด

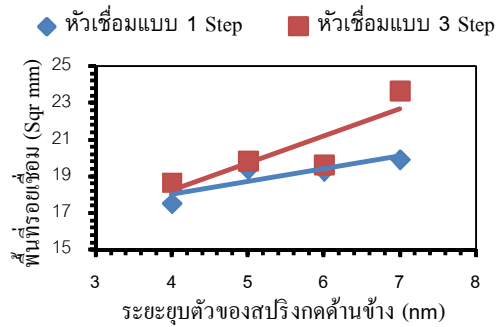
การบิดและการสั้นในแนวแกนพร้อมกันหรือการเชื่อมด้วยสองความถี่ มีผลทำให้พื้นที่รอยเชื่อมมากขึ้น ความแข็งแรงก็มากขึ้น [30] ทั้งนี้ จากการศึกษาที่ผ่านมาของผู้เขียน ที่ความถี่ 28 kHz ได้เลือกใช้ horn แบบ stepped โดยทำการทดลองผลของการเพิ่มแอมพลิจูดการสั้นด้วยหัวเชื่อมแบบ 3 step เปรียบเทียบกับ 1 step [31] ดังรูปที่ 14 จากผลการทดลองพบว่าพื้นที่รอยเชื่อมแบบ 3 step มีพื้นที่รอยเชื่อมขนาดใหญ่กว่าแบบ 1 step ดังรูปที่ 15 โดยรอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับชิ้นงานปกติ และเมื่อนำผลการทดลองของหัวเชื่อมทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบกัน ที่ความเร็วรอบ 88 rpm พบว่า เปรอร์เซ็นต์ของพื้นที่รอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2-7% ดังรูปที่ 16



รูปที่ 14 หัวเชื่อมแบบ stepped [31]



รูปที่ 15 ตัวอย่างรอยเชื่อม [31]



รูปที่ 16 พื้นที่รอยเชื่อม 1 step และ 3 step ที่ 88 rpm [31]

### 4.3 เวลาในการเชื่อม

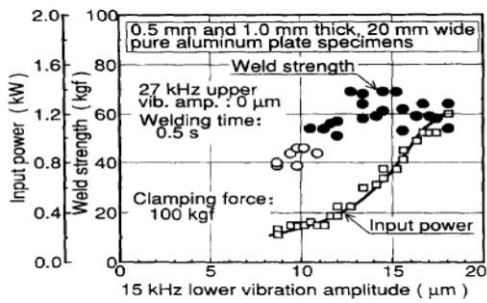
การใช้เวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้พื้นที่รอยเชื่อมและความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย [24, 32] ชิ้นงานที่เป็นพลาสติกจะใช้เวลาไม่เกิน 10 วินาที หากใช้เวลาในการเชื่อมนานเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ ดังนั้นเวลาในการเชื่อมก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของเครื่องเชื่อมและชิ้นงานในการเชื่อม

### 4.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่รอยเชื่อมในระหว่างการเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงกดและเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง โดยความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีทิศทางเพิ่มขึ้นตามด้วย ชิ้นงานที่เป็นโลหะและเซรามิกจะเกิดอุณหภูมิสูงแต่อาจจะไม่ถึงจุดหลอมเหลว ส่วนพลาสติกอุณหภูมิที่เกิดอาจมากกว่าจุดหลอมเหลวได้ แต่ทั้งสองกรณีก็สามารถเชื่อมติดกันได้

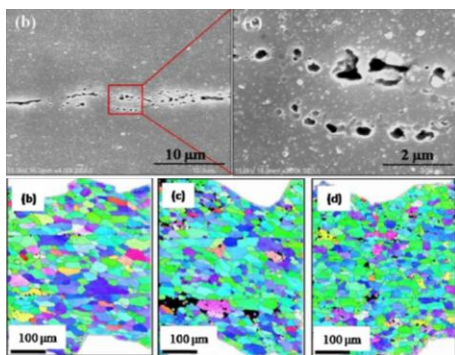
### 4.5 การตรวจสอบประสิทธิภาพของรอยเชื่อม

ประสิทธิภาพของรอยเชื่อมใช้วิธีการนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยวิธีการดึง เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงต่อพื้นที่รอยเชื่อม [11] จากงานวิจัยที่ผ่านมา J. Tsujino และคณะ ได้ทดสอบความแข็งแรง การเชื่อมพลาสติกและการเชื่อมโลหะ [2, 33] ดังรูปที่ 17 [12]

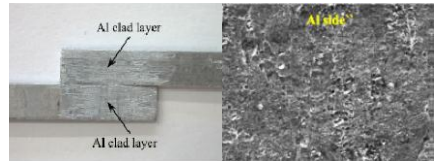


รูปที่ 17 ความต้านทานแรงดึงต่อพื้นที่รอยเชื่อม [2]

พบว่าเมื่อเพิ่มพลังงานมากขึ้น แอมพลิจูดการสั่นจะเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของรอยเชื่อมก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย หนึ่ง หากชิ้นงานที่เชื่อมเป็นแผ่นบางก็จะใช้วิธีการคุณภาพตัดตรงบริเวณรอยเชื่อมที่กำลังขยายสูง [34-35] เพื่อให้เห็นลักษณะการประสานของรอยเชื่อม และความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม รวมถึงมีการวัดความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วย โดย H. Ji และคณะได้ศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กของรอยเชื่อมอลูมิเนียม 1100 ดังรูปที่ 18 [34] นอกจากนี้ A. Macwan และคณะยังได้ศึกษาโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ 100 J พบว่าใช้เวลา 0.1 s ที่ขนาดแรงกด 0.4 MPa โดยมีแมกนีเซียมเป็นตัวประสาน [36] ดังรูปที่ 19



รูปที่ 18 ลักษณะการประสานของรอยเชื่อม [34]



รูปที่ 19 รอยเชื่อมที่ใช้แมกนีเซียมเป็นตัวประสาน [36]

จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าวิธีการเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกสามารถเชื่อมชิ้นงานได้ รวมถึงอธิบายกลไกการติดกันของชิ้นงาน ลักษณะการไหล การเกิดแนวเชื่อม [37] เนื่องจากบางครั้งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่ถึงจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน

### 5. สรุปผล

โดยทั่วไปอุปกรณ์ในการเชื่อมมีองค์ประกอบหลักพื้นฐาน 3 ส่วน คือ อัลตราโซนิกเจนเนอเรเตอร์ เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ และหัวเชื่อม โดยจะทำงานตามลำดับเพื่อให้เกิดการสั่นที่ปลายหัวเชื่อมตามความถี่และแอมพลิจูดที่ต้องการ อุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นเครื่องเชื่อมพลาสติกที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณหัวเชื่อม ซึ่งการเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับประเภทของชิ้นงานในการเชื่อม แต่มีหลักการทำงานเหมือนกัน

การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกมีข้อดีหลายอย่าง ได้แก่ ใช้พลังงานในการเชื่อมน้อย เวลาในการเชื่อมช่วงสั้นๆ เป็นวินาที สามารถเชื่อมชิ้นงานที่ต่างชนิดกันได้ โดยเฉพาะการเชื่อมพลาสติก ทั้งนี้ยังสามารถเชื่อมชิ้นงานที่วิธีการอื่นๆ ไม่สามารถเชื่อมได้ เช่น เซรามิกแก้ว เป็นต้น นอกจากนี้การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกยังไม่มียันตรายจากควันหรือแสงจากการเชื่อม ใดๆก็ตาม วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดและความหนาของ

ชิ้นงานที่ยังไม่สามารถเชื่อมได้ดี คือ ไม่สามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ ได้

ปัจจุบัน ถึงแม้ว่าเครื่องเชื่อมด้วยอุลตราโซนิกถูกพัฒนาจนอยู่ในระดับที่สามารถวางจำหน่ายในท้องตลาดได้ แต่หากเปลี่ยนลักษณะชิ้นงานหัวเชื่อมความถี่ก็จะแตกต่างกันไป ซึ่งก็สามารถเชื่อมชิ้นงานได้ แต่การศึกษา พัฒนาและปรับปรุง จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพราะการศึกษาในเชิงลึกเกี่ยวกับความถี่ แอมพลิจูด รูปแบบหัวเชื่อม รวมถึงชิ้นงานชนิดใหม่ที่สามารถเชื่อมด้วยวิธีนี้ยังคงพบองค์ความรู้ใหม่ๆ อยู่เสมอ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการต่อยอดพัฒนาเครื่องเชื่อมอุลตราโซนิก ทั้งนี้สามารถสรุปแนวโน้มหรือทิศทางการศึกษาและพัฒนาในอนาคต ได้ดังนี้

### 5.1 การเชื่อมชิ้นงานโลหะ

การเชื่อมชิ้นงานที่เป็นโลหะยังเป็นผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ สามารถต่อยอดการวิจัยเพื่อให้ใช้งานได้เชิงพาณิชย์ ดังเช่นเครื่องเชื่อมพลาสติกแบบต่างๆ

### 5.2 ลักษณะและพฤติกรรมของรอยเชื่อมเชิงลึก

นักวิจัยและพัฒนาสามารถศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดรอยเชื่อม หรือลักษณะการเชื่อมแบบต่างๆ ได้ ทั้งนี้ยังสามารถศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงานพฤติกรรมของรอยเชื่อมในเชิงลึก ได้หลายแบบ โดยการใช้การทดลองเพื่อสอบเทียบกับการใช้โปรแกรมคำนวณ (FEA) ในการศึกษาซึ่งจะได้ข้อมูลและมุมมองการศึกษาที่ลึกซึ้งมากกว่าการทดลอง [38]

### 5.3 การพัฒนาขีดความสามารถของเครื่องเชื่อม

การพัฒนาขีดความสามารถของเครื่องเชื่อมให้สามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หนามากขึ้น โดย

จากวิธีการเดิมที่หัวเชื่อมอยู่กับที่ สามารถพัฒนาให้หัวเชื่อมเคลื่อนที่ได้ และง่ายต่อการควบคุมและการใช้งาน เช่น เครื่องเชื่อมที่สามารถเชื่อมท่อพลาสติก [31] โดยให้หัวเชื่อมสามารถเคลื่อนที่รอบท่อพลาสติกและสร้างรอยเชื่อมได้โดยรอบท่อ เป็นต้น นอกจากนี้ อุปกรณ์การเชื่อม ในอนาคตควรจะถูกพัฒนาให้มีความซับซ้อน มีขนาดกะทัดรัด ราคาถูกลง และสามารถประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมได้หลากหลาย

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช) ที่สนับสนุนทุนโครงการวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Tsujino, K. Hidai, A. Hasegawa, R. Kanai, H. Matsuura, K. Matsushima and T. Ueoka, "Ultrasonic butt welding of aluminum, aluminum alloy and stainless steel plate specimens", *Ultrasonics* 40, 2002, pp. 371–374.
- [2] J. Tsujino and T. Ueoka, "Ultrasonic multi-spot continuous welding of metal plate specimens using a two-vibration-system welding equipment", *Ultrasonics* 34, 1996, pp. 229-233.
- [3] S. I. Matsuoka, "Ultrasonic welding and characteristics of glass-fiber reinforced plastic: comparison between the paper-making method and the impregnation method", *Journal of Materials Processing Technology* 55, 1995, pp. 427-431.

- [4] Y. Watanabe and E. Mori, “A study on a new flexural-mode transducer-solid horn system and its application to ultrasonic plastics welding”, *Ultrasonics* 34, 1996, pp. 235-238.
- [5] J. Tsujino, T. Uchida, K. Yamano, N. Iwamoto and T. Ueoka, “Welding characteristics of ultrasonic plastic welding using two-vibrationsystem of 90 kHz and 27 or 20 kHz and complex vibration systems”, *Ultrasonics* 36, 1998, pp. 67-74.
- [6] J. Tsujino, Y. Harada, S. Ihara, K. Kasahara, M. Shimizu and T. Ueoka, “Configurations of high-frequency ultrasonics complex vibration systems for packaging in microelectronics”, *Ultrasonics* 42, 2004, pp. 125–129.
- [7] R. Truckenmuller, R. Ahrens, Y. Cheng, G. Fischer and V. Saile, “An ultrasonic welding based process for building up a new class of inert fluidic microsensors and -actuators from polymers”, *Sensors and Actuators A*. 132, 2006, pp. 385–392.
- [8] J. Sackmann, K. Burlage, C. Gerhardy, B. Memering, S. Liao and W.K. Schomburg, “Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices”, *Ultrasonics*, 2014, pp. 1-12
- [9] S. I. Matsuoka and H. Imai, “Direct welding of different metals used ultrasonic vibration”, *Journal of materials processing technology* 209, 2009, pp. 954–960.
- [10] S. I. Matsuoka, “Ultrasonic welding of ceramics/ metals using inserts”, *Journal of Materials Processing Technology* 75, 1998, pp. 259–265.
- [11] M. Sano, H. Oguma, M. Sekine and C. Sato, “High-frequency welding of glass-fiber-reinforced polypropylene with a thermoplastic adhesive layer including SiC”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 54, 2014, pp. 124–130.
- [12] M. Sano, H. Oguma, M. Sekine and C. Sato, “High-frequency welding of polypropylene using dielectric ceramic compounds in composite adhesive layers”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 47, 2013, pp. 57–62.
- [13] H. T. Nguyen, H. D. Nguyen, J. Y. Uan and D. A. Wang, “A nonrational B-spline profiled horn with high displacement amplification for ultrasonic welding”, *Ultrasonics* 54, 2014, pp. 2063–2071.
- [14] M. R. Rani, K. Prakasan and R. Rudramoorthy, “Studies on thermo-elastic heating of horns used in ultrasonic plastic welding”, *Ultrasonics* 55, 2015, pp.123–132.
- [15] M. Shakil, N.H. Tariq, M. Ahmad, M.A. Choudhary, J. I. Akhter and S. S. Babu, “Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints”, *Materials and Design* 55, 2014, pp. 263–273.

- [16] A. Siddiq and E. Ghassemieh, “Thermo-mechanical analyses of ultrasonic welding process using thermal and acoustic softening effects”, *Mechanics of Materials* 40, 2008, pp. 982–1000.
- [17] M. R. Rani and R. Rudramoorthy, “Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding”, *Ultrasonics* 53, 2013, pp. 763–772.
- [18] L. Parrini, “New technology for the design of advanced ultrasonic transducers for high-power applications”, *Ultrasonics* 41, 2003, pp. 261–269.
- [19] J. Tsujino, M. Hongoh, M. Yoshikuni, H. Hashii and T. Ueoka, “Welding characteristics of 27, 40 and 67 kHz ultrasonic plastic welding systems using fundamental- and higher-resonance frequencies”, *Ultrasonics* 42, 2004, pp. 131–137.
- [20] J. Tsujino, T. Ueoka, T. Kashino and F. Sugahara, “Transverse and torsional complex vibration systems for ultrasonic seam welding of metal plates”, *Ultrasonics* 38, 2000, pp. 67–71.
- [21] M. Carboni, “Failure analysis of two aluminium alloy sonotrodes for ultrasonic plastic welding”, *International Journal of Fatigue* 60, 2014, pp. 110-120.
- [22] C. Cheers, “Handbook Horn/Sonotrode design and manufacture *PowerUltrasonics*”, <http://www.power-ultrasonics.com>, 24 March 2008.
- [23] J. Tsujino, M. Hongoh, R. Tanaka, R. Onoguchi, and T. Ueoka, “Ultrasonic plastic welding using fundamental and higher resonance frequencies”, *Ultrasonics* 40, 2002, pp. 375–378.
- [24] J. Tsujino and K. Hasegawa, “Ultrasonic wire bonding using high frequency 330, 600 kHz and complex vibration 190 kHz welding systems”, *Ultrasonics* 34, 1996, pp. 223-228.
- [25] J. Tsujino, H. Yoshihara, K. Kamimoto and Y. Osada, “Welding characteristics and temperature rise of high frequency and complex vibration ultrasonic wire bonding”, *Ultrasonics* 36, 1998, pp. 59-65.
- [26] J. Tsujino, S. Ihara, Y. Harada, K. Kasahara and N. Sakamaki, “Characteristics of coated copper wire specimens using high frequency ultrasonic complex vibration welding equipments”, *Ultrasonics* 42, 2004, pp. 121–124.
- [27] J. Tsujino, T. Ueoka, K. Otoda and A. Fujimi, “One-dimensional longitudinal-torsional vibration converter with multiple diagonally slitted parts”, *Ultrasonics* 38, 2000, pp. 72–76.
- [28] D. Bakavos and P.B. Prangnell, “Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet”, *Materials Science and Engineering A* 527, 2010, pp. 6320–6334.
- [29] M. Iijima and Y. Watanabe, “Ultrasonic Joining of silicon nitride plates without an adhesive material using a 19kHz vibration system”, *The Japan Society of Applied Physics* 40, 2001, pp. 3789-3791.

- [30] J. Tsujino, M. Hongoh, R. Tanaka, R. Onoguchi and T. Ueoka, “Ultrasonic plastic welding using fundamental and higher resonance frequencies”, *Ultrasonics* 40, 2002, pp. 375-378.
- [31] A. Bootwong, “The effects on the welded area of plastic tube welded by ultrasonic welding”, *ME-NETT* 27 16-18 October 2556 Pataya Chonburi 2556, Paper no. AMM2036. (in thai)
- [32] I. F. Villegas, “Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters”, *Composites: Part A*. 65, 2014, pp. 27–37.
- [33] J. Tsujino, T. Ueoka, K. Hasegawa, Y. Fujita, T. Shiraki, T. Okada and T. Tamura, “New methods of ultrasonic welding of metal and plastic materials”, *Ultrasonics* 34, 1996, pp. 177-185.
- [34] H. Ji, J. Wang and M. Li, “Evolution of the bulk microstructure in 1100 aluminum builds fabricated by ultrasonic metal welding”, *Journal of Materials Processing Technology* 214, 2014, pp. 175– 182.
- [35] J. Kim, “Weldability of  $\text{Cu}_{54} \text{Zr}_{22} \text{Ti}_{18} \text{Ni}_6$  bulk metallic glass by ultrasonic welding processing”, *Materials Letters* 130, 2014, pp. 160–163.
- [36] A. Macwan, V.K. Patel, X.Q. Jiang, C. Li, S.D. Bhole and D.L. Chen, “Ultrasonic spot welding of Al/Mg/Al tri-layered clad sheets”, *Materials and Design* 62, 2014, pp. 344–351.
- [37] A. Levy, S. L. Corre, N. Chevaugeon and A. Poitou, “A level set based approach for the finite element simulation of a forming process involving multiphysics coupling: Ultrasonic welding of thermoplastic composites”, *European Journal of Mechanics A/Solids* 30, 2011, pp. 501-509.
- [38] S. Elangovan, S. Semeer and K. Prakasan, “Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding - An FEA - based study”, *Journal of materials processing technology* 209, 2009, pp. 1143 –1150.