

ปัจจัยที่มีผลต่อพื้นที่รอยเชื่อมท่อพลาสติกกลมด้วยอัลตราโซนิก

The effects on the welded area of plastic tube welded by ultrasonic welding

อดิศักดิ์ บุตรวงษ์^{1*}¹มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี เลขที่ 64 ถนนทหาร ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมืองฯ จังหวัดอุดรธานี 41000

ติดต่อ: a_bootwong@yahoo.co.th, โทรศัพท์ 042211040 ต่อ 612, โทรสาร 042221978

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารอยเชื่อมท่อพลาสติกกลมด้วยอัลตราโซนิกให้มีคุณภาพดีขึ้น ด้วยการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างหัวเชื่อมและชิ้นงานให้มากขึ้น โดยให้ปลายหัวเชื่อมมีรัศมีความโค้งตามรัศมีของชิ้นงาน และขยายแอมพลิจูดการสั่นให้แรงขึ้นจากหัวเชื่อมแบบ 1 step หน้าตัดตรงเป็นหัวเชื่อมแบบ 3 step หน้าตัดโค้งตามรัศมีของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 35 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร มีมุมปากของท่อ 0 องศา และ 2.8 องศา และใช้ความถี่ในการเชื่อม 28 kHz ที่ความเร็วรอบ 43 rpm, 63 rpm, 88 rpm และ 113 rpm ผลการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบ 63 rpm มีพื้นที่รอยเชื่อมมากที่สุด คือ 30 ตารางมิลลิเมตร และที่ความเร็วรอบ 88 rpm ได้พื้นที่รอยเชื่อม 17-19 ตารางมิลลิเมตร ใกล้เคียงกันทุกช่วงแรงกดที่ระยะยุบตัวของสปริง 4, 5, 6, และ 7 มิลลิเมตร นอกจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างหัวเชื่อมทั้งสองแบบที่ความเร็วรอบ 88 rpm พบว่ารอยเชื่อมของหัวเชื่อมแบบ 3 step หน้าตัดโค้งตามรัศมีของชิ้นงาน มีพื้นที่รอยเชื่อมมากกว่าหัวเชื่อมแบบ 1 step หน้าตัดตรง โดยเฉลี่ยที่ 2-7% ดังนั้นการเพิ่มแอมพลิจูดการสั่นและการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานทำให้ได้รอยเชื่อมดีขึ้น

คำหลัก: ท่อพลาสติกกลม, การเชื่อมอัลตราโซนิก

Abstract

This study was aimed to develop for the welded area of plastic tube welded by ultrasonic welding. The ultrasonic welding machine was designed to increase the contact area between the horn and specimens by shaping the tip of horn into a round shape and fit to radius of specimens. The vibration amplitude of horn was also increased using a 3-step horn instead of a traditional 1-step horn. The specimens used in this study were round plastic tubes with diameter of 35 mm and 2 mm thickness. End of each tube was machined to have inclined angle of 0° and 2.8° degree in order to create the contact faces. The frequency was fixed at 28 kHz and tube rotational speeds were used at 43 rpm, 63 rpm, 88 rpm and 113 rpm. The result showed that the rotational speed of 63 rpm offered highest welded area (30 m²). The rotational speed of 88 rpm was found to provide similar welded area around the pipe (about 17-19 m²) under the spring pressure at 4, 5, 6, and 7 mm. Furthermore, it was observed that the welded area of a 3-step horn was higher than that of the 1-step horn by 2-7%. Thus, these results indicated that the increasing of the contact area and vibration force between the horn and specimens can enhance the quality of joint.

Keywords: Plastic Tube, Ultrasonic Welding.

1. บทนำ

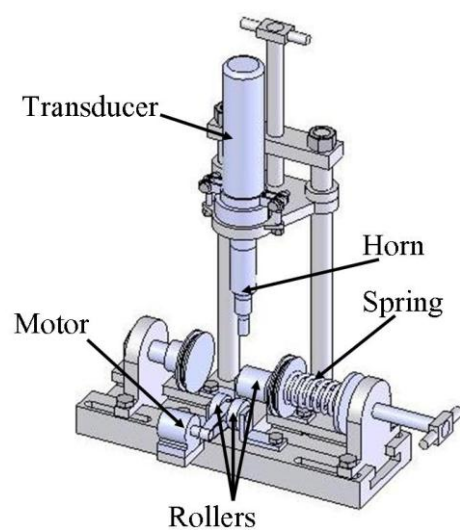
จากงานวิจัย [1-14] ที่ได้มีการทดลองเชื่อมด้วยวิธีอัลตราโซนิกนั้น พบว่าการเชื่อมด้วยวิธีการนี้สามารถเชื่อมวัสดุได้หลายชนิด [1-2] โดยใช้เวลาสั้นและประหยัดพลังงาน ทั้งที่เป็นโลหะและเป็นพลาสติก โดยวิธีการเชื่อมส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเชื่อมในแนวแกน คือ มีทิศทางการสั่นขึ้นลง และได้มีการพัฒนาเชื่อมชิ้นงานที่เป็นท่อพลาสติก (PMMA) [5] ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถเชื่อมชิ้นงานได้ โดยใช้ความถี่ในการเชื่อมที่ 28 KHz รอยเชื่อมที่ได้มี 2 ลักษณะ คือ รอยเชื่อมในลักษณะที่กระจายตัวกว้างออกไปเป็นหลายแถว (2-3 แถว) โดยในแต่ละแถวจะมีรอยเชื่อมที่มีลักษณะเป็นช่วงๆ หรือเป็นจุดไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งเกิดจากชิ้นงานตัวด้านนอกและตัวด้านในมีมุมที่เหมือนกัน เช่น 2.8-2.8, 3.8-3.8 และอีกลักษณะคือ รอยเชื่อมแบบแถวเดียว มีลักษณะต่อเนื่องโดยรอบท่อ ซึ่งเกิดจากพื้นที่สัมผัสของชิ้นงานตัวด้านนอกและตัวด้านในสัมผัสกันที่เส้นรอบวง เป็นผลมาจากชิ้นงานตัวด้านนอกและตัวด้านในมีมุมที่ต่างกัน เช่น 2.8-0, 3.8-0 [7,15] นอกจากนั้นที่มุมของชิ้นงาน 2.8-0 ยังทำให้เปอร์เซ็นต์การต่อเนื่องของรอยเชื่อมโดยรอบท่อมากที่สุดอีกด้วย เพื่อพัฒนารอยเชื่อมท่อด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบหัวเชื่อมในแนวแกนที่ 28 KHz ให้มีคุณภาพของรอยเชื่อมที่ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้หัวเชื่อมแบบ 3 step หน้าตัดโค้งตามรัศมีของชิ้นงาน และเปรียบเทียบกับแบบ 1 step หน้าตัดตรง โดยการเพิ่ม step ของหัวเชื่อมนอกจากจะทำให้แอมพลิจูดการสั่นที่ปลายหัวเชื่อมมากขึ้น ยังเป็นเพิ่มพื้นที่สัมผัสของหัวเชื่อมกับชิ้นงานให้มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจมีผลกับพื้นที่ของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น และในการทดลองในครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้มุมปากของชิ้นงานตัวด้านนอกและตัวด้านในที่ 2.8-0 ตามลำดับ ที่ช่วงแรงกด 80- 120 N (ระยะยุบตัวของสปริงที่ 4, 5, 6, 7 mm) [5-7] เพื่อเปรียบเทียบพื้นที่

รอยเชื่อมและความต่อเนื่องของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเชื่อมทั้ง 2 แบบ

2. วิธีการทดลอง

2.1 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อมด้วยอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องที่ใช้เชื่อมในแนวแกน ซึ่งมีหลักการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องเชื่อมที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 1 หัวเชื่อม (Horn) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเรียกหัวเชื่อมแบบนี้ว่า หัวเชื่อมแบบ step มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเพื่อเพิ่มแอมพลิจูดในการสั่นที่ปลายหัวเชื่อมให้แรงขึ้น ที่ปลายหัวเชื่อมแบบ 1 step มีหน้าตัดตรงเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 6 mm x 10 mm และหัวเชื่อมแบบ 3 step ที่ปลายหัวเชื่อมมีรัศมีความโค้งตามรัศมีของชิ้นงานเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสที่ปลายหัวเชื่อมกับชิ้นงานให้มากขึ้น ลูกกลิ้ง (Rollers) รองรับชิ้นงานด้านล่างสองข้างลูกกลิ้งทั้งสองและหัวเชื่อมทำมุม 120 องศา ชิ้นงานเป็นอิสระในแนวแกนเพื่อให้แรงกดจากด้านข้างสามารถกดชิ้นงานให้เคลื่อนที่ได้ในขณะที่เชื่อม หัวเชื่อมจะเป็นตัวบังคับให้ชิ้นงานติดกับลูกกลิ้งเพื่อให้เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่อง และลูกกลิ้งจะทำงานพร้อมกับการสั่นของหัวเชื่อม



รูปที่ 1 เครื่องเชื่อมท่อพลาสติกกลมที่ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

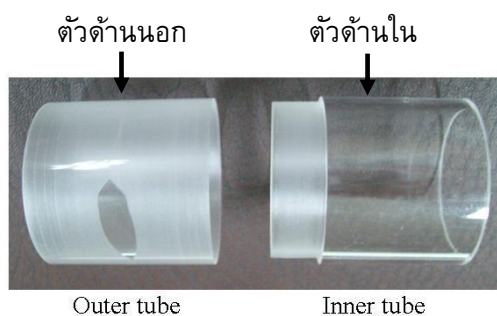
โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลัง แรงกดด้านข้างจะวัดจากระยะยุบตัวของสปริง และใช้สปริงเป็นตัวกดชิ้นงานให้เคลื่อนที่ตลอดระยะเวลาของการเชื่อม ปลายหัวเชื่อมจะสัมผัสกับผิวของชิ้นงานอย่างอิสระ จะมีแค่แรงกดจากน้ำหนักของชุดหัวเชื่อมที่ทำหน้าที่กดหัวเชื่อมลงมา และยังมีชิ้นส่วนอย่างอื่นเป็นตัวช่วยในการเชื่อม เช่น แบร็ง ที่ทำให้การหมุนสม่ำเสมอเมื่ออยู่ภายใต้แรงกด



รูปที่ 2 หัวเชื่อม 1 step และ 3 step

2.2 ชิ้นงานในการทดลอง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 35 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร มีมุมปากของท่อ 0 องศา และ 2.8 องศา เป็นมุมที่ทำให้เกิดรอยเชื่อมต่อเนื่องโดยรอบท่อ [7,15] และเพื่อให้ชิ้นงานสวมกันได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

2.3 เงื่อนไขการทดลอง

ทดลองเชื่อมชิ้นงาน โดยใช้หัวเชื่อมแบบ 1 step ที่ความเร็วรอบ 43 rpm, 63 rpm, 88 rpm และ 113 rpm แรงกดด้านข้างวัดจากระยะยุบตัวของสปริงที่ 4 mm, 5 mm, 6 mm, และ 7 mm เป็นช่วงของแรงกดที่ทำให้ได้พื้นที่รอยเชื่อมดีที่สุด [7,15]

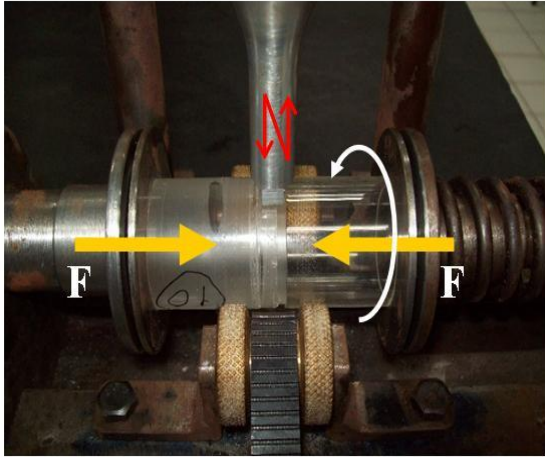
ทดลองเชื่อมชิ้นงาน โดยใช้หัวเชื่อมแบบ 3 step ที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากการทดลองหัวเชื่อมแบบ 1 step ในช่วงแรงกดด้านข้างเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

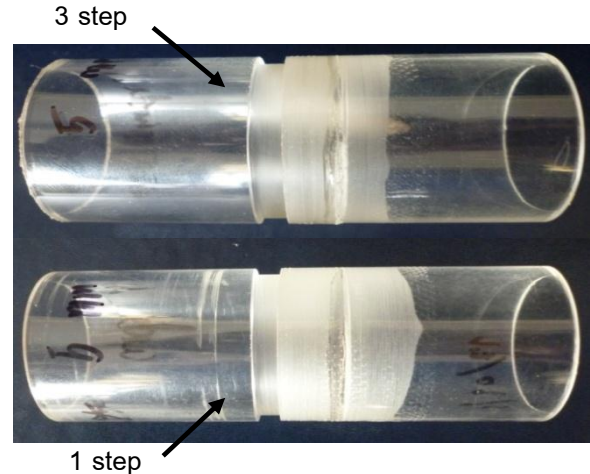
หัวเชื่อม	มุมปากของชิ้นงาน (องศา)	แรงกดด้านข้าง(N)	ความเร็วรอบ (rpm)
1 step	2.8-0	70,90,105, 125	43,63,88,113
3 step	2.8-0	70,90,105, 125	เหมาะสมจากหัวเชื่อม 1 step

2.4 ขั้นตอนการทดลอง

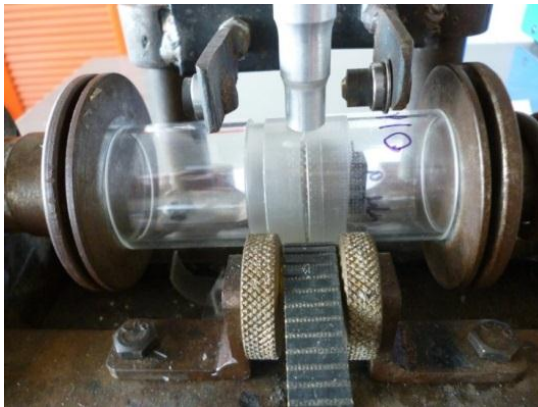
นำชิ้นงานวางบนพื้นที่เชื่อมให้ชิ้นงานที่เคลื่อนที่อยู่ด้านขวามือตามรูปที่ 4 (ก) และ (ข) หรือด้านที่มีสปริงกดและให้ชิ้นงานที่ไม่เคลื่อนที่ อยู่ด้านซ้ายมือ เพื่อรักษาแนวรอยเชื่อมให้คงที่ เลื่อนหัวเชื่อมให้สัมผัสชิ้นงานและใส่แรงกดด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4



(ก) หัวเชื่อมแบบ 1 step



รูปที่ 5 ตัวอย่างรอยเชื่อม

(ข) หัวเชื่อมแบบ 2 step
รูปที่ 4 ขั้นตอนการทดลอง

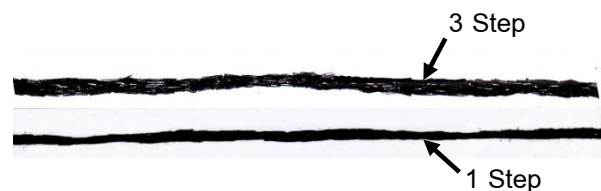
เมื่อหัวเชื่อมทำงานขึ้นงานก็จะหมุนไปพร้อมกัน ตามเวลาที่ตั้งไว้ 5-10 วินาที ใช้ความถี่ในการเชื่อม 28 kHz 500 w

3. ผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการเชื่อมแบบหัวเชื่อม 1 step หน้าตัดตรงและหัวเชื่อมแบบ 3 step หน้าตัดโค้งตามรัศมีชิ้นงาน พบว่าได้รอยเชื่อมต่อเนื่องโดยรอบท่อทั้ง 2 แบบ ดังแสดงตัวอย่างรอยเชื่อมในรูปที่ 5 จากรูปจะสังเกตเห็นพื้นที่ที่พลาสติกเชื่อมติดกัน มีลักษณะใสต่อเนื่องเป็นแนวเชื่อมรอบท่อ

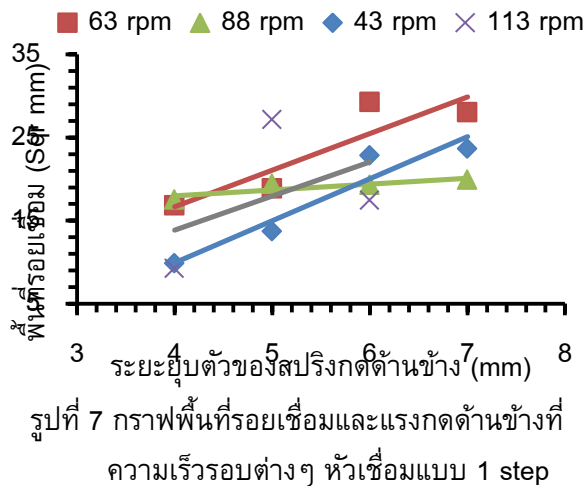
จากรูปที่ 5 แสดงรอยเชื่อมแบบ 3 step และ 1 step จะเห็นว่ารอยเชื่อมที่เกิดขึ้นโดยรอบท่อพลาสติกเป็นแนวเดียวกันอย่างสมบูรณ์ทั้ง 2 แบบ แต่รอยเชื่อมแบบ 3 Step มีพื้นที่รอยเชื่อมมากกว่าแบบ 1 Step

เพื่อเปรียบเทียบพื้นที่รอยเชื่อมระหว่างหัวเชื่อมทั้งสองแบบ จึงได้คัดลอกรอยเชื่อมลงบนแถบขาว ซึ่งจะทำให้มองเห็นแนวเชื่อมได้โดยรอบท่อดังแสดงในรูปที่ 6



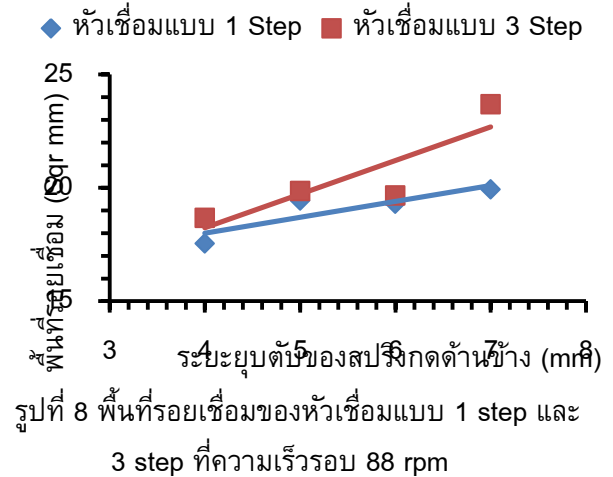
รูปที่ 6 ตัวอย่างรอยเชื่อมโดยรอบท่อ

เพื่อทำการวิเคราะห์หาร้อยละของพื้นที่รอยเชื่อม จึงได้นำรอยเชื่อมที่คัดลอกแล้วไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Dewinter Material Plus 4.1 ภายใต้มาตรฐาน ASTM E562&E1245 แล้วนำมาสร้างกราฟระหว่างพื้นที่รอยเชื่อมและแรงกดด้านข้างที่ความเร็วรอบต่างๆ เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมดังรูปที่ 7



จากกราฟรูปที่ 7 แสดงพื้นที่รอยเชื่อมและแรงกดด้านข้างที่ความเร็วรอบต่างๆ ของหัวเชื่อมแบบ 1 step เพื่อทำการทดลองหาค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากในการทดลองนี้มีการเปลี่ยนมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนจากงานวิจัยเดิมที่ผ่านมา [5,6,7,15] โดยทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่รอยเชื่อม ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ความเร็วรอบ 43 rpm ที่ระยะยุดตัวของสปริง 4 และ 5 มิลลิเมตร ได้พื้นที่รอยเชื่อมเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากชิ้นงานเคลื่อนที่ช้าเกินไป ทำให้ชิ้นงานเสียหายเนื่องจากหัวเชื่อมกดลงที่ชิ้นงานที่อ่อนตัวจากความร้อน และเมื่อเพิ่มแรงกดด้านข้างจะทำให้พื้นที่รอยเชื่อมมากขึ้น แต่มีการเสียรูปของชิ้นงานเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นนานเกินไป ที่ความเร็วรอบ 63 rpm ได้พื้นที่รอยเชื่อมมากที่สุด แต่มีการเสียหายของชิ้นงานคล้ายกับที่ความเร็วรอบ 43 rpm ที่ความเร็วรอบช้าเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายก่อนที่จะเกิดรอยเชื่อม โดยรอบท่อ ที่ความเร็วรอบ 88 rpm ได้พื้นที่รอยเชื่อมเฉลี่ยอยู่ช่วงกลางของความเร็วรอบอื่นๆ แต่รอยเชื่อมมีความสม่ำเสมออย่างสมบูรณ์โดยรอบท่อ และชิ้นงานไม่มีการเสียหายในทุกช่วงแรงกด และที่ความเร็วรอบ 113 rpm มีความไม่แน่นอนของรอยเชื่อม บางพื้นที่รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่บางพื้นที่มีขนาดเล็ก เป็นผลจากความเร็วรอบที่มากเกินไป หรือเกิดจากการกระตุกของชิ้นงานจึงหวั่นเริ่มเชื่อม ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วรอบที่ 88 rpm ในการทดลองกับหัวเชื่อม

แบบ 3 Step หน้าตัดโค้งตามรัศมีของชิ้นงาน โดยทำการจำนวน 3 ครั้ง เช่นกัน และหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่รอยเชื่อมได้ผลดังรูปที่ 8



จากรูปที่ 8 แสดงพื้นที่รอยเชื่อมของหัวเชื่อมแบบ 1 step และ 3 step ที่ความเร็วรอบ 88 rpm พบว่าพื้นที่รอยเชื่อมมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน หัวเชื่อมแบบ 3 step หน้าตัดโค้งตามรัศมีของชิ้นงานมีพื้นที่รอยเชื่อมมากกว่าหัวเชื่อมแบบ 1 step หน้าตัดตรง โดยมีค่าเฉลี่ย 2-7% ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รอยเชื่อม นั้น อาจเกิดจากแอมพลิจูดการสั่นที่เพิ่มขึ้นหรือการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานที่ทำให้การกระจายการสั่นได้ดีขึ้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะได้ทำการศึกษาในการทดลองต่อไป

4. สรุปผลการทดลอง

รอยเชื่อมที่ได้จากหัวเชื่อมทั้ง 2 แบบที่ความเร็วรอบ 88 rpm มีความต่อเนื่องกันอย่างสมบูรณ์โดยรอบท่อ หัวเชื่อมแบบ 3 step หน้าตัดโค้งตามรัศมีของชิ้นงานได้พื้นที่รอยเชื่อมมากกว่าแบบ 1 step หน้าตัดตรง มีค่าเพิ่มขึ้น 2-7% โดยเฉลี่ย

การเพิ่ม step ของหัวเชื่อม ทำให้แอมพลิจูดการสั่นและพื้นที่สัมผัสระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น อาจมีผลทำให้พื้นที่รอยเชื่อมเพิ่มขึ้น

นอกจากจะเลือกใช้หัวเชื่อมที่เหมาะสมแล้ว
ชิ้นงานจะต้องเคลื่อนที่ภายใต้แรงกดดันด้านข้างที่
พอเหมาะ ภายใต้ความเร็วรอบที่เหมาะสมอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้ทุน
สนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์
พื้นที่รอยเชื่อม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Wagner, and et al. "Glass/glass joints by ultrasonic welding", Glass Technology. Vol. 44: pp 152-155; 11 December, 2002.
- [2] Yuji Watanabe, and Yukihiro Shijo, "Large-Scale ultrasonic joining tool for joining plastic sheets using a rectangular plate face vibrating in-plane-mode", Japanese Journal of Applied Physics. Vol. 38: pp 5297-5300; 9 September, 1999.
- [3] Yuji Watanabe. "High power ultrasonics and tis applications", Private communication sheet, S. I.: n. d., 2003.
- [4] อติศักดิ์ บุตรวงษ์ และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, 2005, กราฟช่วยออกแบบหัวเชื่อมอัลตราโซนิกแบบครึ่งวงกลม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา
- [5] อติศักดิ์ บุตรวงษ์, สุรสิงห์ อารยางกูร และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. 2552. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมท่อพลาสติกกลมด้วยอัลตราโซนิก. วารสารวิชาการ ม. อบ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2552 .
- [6] อติศักดิ์ บุตรวงษ์, สุรสิงห์ อารยางกูร และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. 2552. การเชื่อมท่อ พลาสติกกลมด้วยอัลตราโซนิก. การประชุมวิชาการเครือข่าย

วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17
ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

Paper no. AMM053

[7] C. Thinvongpituk, A. Bootwongb and Y. Watanabe. The effect of axial force and contact angle on the welded area of plastic tube welded by ultrasonic welding. Proc. of SPIE , Vol. 7522 75221Z-1. 2010.

[8] Jiromaru Tsujino, and et al. "Ultrasonic plastic welding using fundamental and higher resonance frequencies", Ultrasonics. Vol. 40: pp 375-378, 2002.

[9] Jiromaru Tsujino, Misugi Hongoh, Masafumi Yoshikuni, Hidekazu Hashii, 2004. Welding characteristics of 27,40 and 67 kHz ultrasonic plastic welding systems using fundamental-and higher-resonance frequencies. Ultrasonic vol. 42, pp. 131 - 137.

[10] Jiromaru Tsujino, and et al. "Welding characteristics of 27,40 and 67 kHz ultrasonic plastic welding systems using fundamental-and higher-resonance frequencies", Ultrasonics. Vol. 40: pp 131-137, 2004.

[11] Jiromaru Tsujino, Misugi Hongoh, Ryoko Tanaka, Rie Onoguchi, Tetsugi Ueoka, 2002. Ultrasonic plastic welding using fundamental and higher resonance frequencies. Ultrasonics, Vol. 40, pp. 375 - 378.

[12] T. Matusinovic, S. Kurajica, J. Sipusic, 2004. The correlation between compressive strength and ultrasonic parameters of calcium aluminate cement materials. Cement and Concrete Research. Vol. 34, pp 1451 - 1457

[13] Yuji Watanabe ,Yukihiro Shijo, 1999. Large-Scale ultrasonic joining tool for joining plastic sheets using a rectangular plate face vibrating in

In-Plane-Mode. pn. J. Appl. Phys, vol. 38, pp.
5297 – 5300.

[14] A. Brodyanski, C. Born, M. Kopnarski, 2005.
NM-scale resolution studies of the bond interface
between ultrasonically welded Al-alloys by an
analytical TEM: a path to comprehend bonding
phenomena. Applied Surface Science.

[15] อติศักดิ์ บุตรวงษ์ และ ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์.
2553. การเชื่อมต่อ พลาสติกกลม ด้วยอุลตราโซนิก.
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง
ประเทศไทยครั้งที่ 24 20-22 ตุลาคม 2553
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. Paper no. AMM 76