



รายงานการวิจัย

การทดสอบและทดลองผลกระทบของชนิดเลเซอร์พัลส์ต่อการเชื่อม
ในงานอัญมณีและเครื่องประดับ
(Investigate the Effect of the Laser Pulse Shape on the Welded Quality
in the Jewelry Production)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การทดสอบและทดลองผลกระทบของชนิดเลเซอร์พัลส์ต่อการเชื่อม
ในงานอัญมณีและเครื่องประดับ

(Investigate the Effect of the Laser Pulse Shape on the Welded
Quality in the Jewelry Production)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร. สุกัญญา เตชะไทรภพ
สาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และฟิสิกส์
สำนักวิชาวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง เป็นเพราะรับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จึงขอขอบพระคุณมา ณ. ที่นี้ อีกทั้งเจ้าหน้าที่F5 ตัดจัดเตรียมชิ้นงาน อีกทั้งนางสาว อพันธ์ร ชำช่วย นาย
อำนาจ สอนเจริญ ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องเลเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งนักศึกษา ฤชกานต์
พลพิทักษ์ ที่ช่วยดำเนินการจัดชิ้นงาน และถ่ายภาพด้วยกล้องกำลังขยายสูง

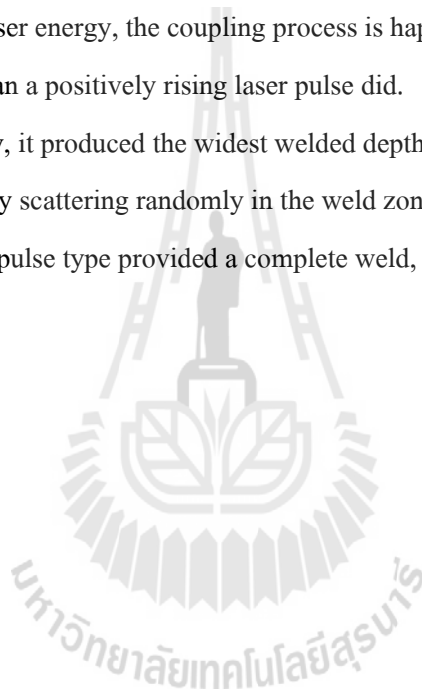
ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ. โอกาสนี้

อาจารย์ ดร. สุกัญญา เตชะไตรภพ



Abstract

Laser pulse shapes affect the welded quality and appearance in jewelry production. After the laser pulse impinges on the target material, it impacts on the welding processes: coupling, melting, and cooling. The experiment was carried on a silver, 1 mm thickness. The series of up-down laser pulse produced a smallest energy density; therefore, it often provided incomplete weld. The slowly rising and falling laser pulse produced a weld zone having a bowl like shape. It represents the low laser energy density. Both a positively rising laser pulse and a negatively falling laser pulse gave the same overall welding appearance. However, the negatively falling laser pulse has a suddenly increasing of laser energy, the coupling process is happened rapidly. Therefore, it had more a material splatter than a positively rising laser pulse did. Since the square pulse type gave the highest energy density, it produced the widest welded depth and width in keyhole welding mode. However, it had porosity scattering randomly in the weld zone. For welding a thin sheet of gold, it was difficult due to no pulse type provided a complete weld, either making a hole or no melting.



บทคัดย่อ

การเชื่อมวัสดุทองคำและเงินในงานอัญมณีและเครื่องประดับ ด้วยเลเซอร์ลักษณะเลเซอร์พัลส์แบบต่างๆ พัลส์แต่ละแบบให้การคับปิ้ง การหลอมละลาย และการเย็นตัวที่แตกต่างกัน การเชื่อมวัสดุเงินความหนา 1 มม. โดยใช้พัลส์เลเซอร์แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง ให้ความหนาแน่นของพลังงานที่ถูกดูดกลืนที่น้อยที่สุด ประกอบกับระยะเวลาของพัลส์ในการหลอมละลายมีค่าต่ำ ทำให้เกิดรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะพัลส์แบบค่อยๆขึ้นและลง ให้อรอยเชื่อมเป็นรูปถ้วย หรือคอนคักชันโหมค แสดงถึงระดับความหนาแน่นของพลังงานที่ต่ำ รูปพัลส์แบบขาขึ้นเป็นบวกและแบบขาลงเป็นลบให้อรอยเชื่อมลักษณะทั่วไปที่คล้ายกัน แต่รูปพัลส์แบบขาลงเป็นลบ แสดงให้เห็นถึงการกระจายของโลหะหรือ splatter เนื่องจากให้การคับปิ้งพลังงานเลเซอร์ต่อเวลาที่รวดเร็ว รูปแบบพัลส์สี่เหลี่ยมให้การคับปิ้งและการเย็นตัวที่รวดเร็ว และมีการหลอมละลายที่ระยะเวลานานที่สุด เป็นผลให้ได้รอยเชื่อมที่ลึกและกว้างที่สุดในโหมคคีย์โฮ รวมทั้งการแทรกตัวของฟองอากาศอยู่ทั่วไป ส่วนการเชื่อมแผ่นทองที่บางที่ลักษณะของพัลส์ต่างๆ ไม่ทำให้เกิดการเชื่อมที่สมบูรณ์เนื่องจากพลังงานตกกระทบมากเกินไปจนเกิดรูที่ขึ้นงาน หรือพลังงานน้อยเกินไปจนไม่เกิดการละลาย



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser Welding)	5
2.1.1 ตัวแปรเลเซอร์ (Laser parameters)	7
2.1.2 ชนิดของพัลส์เลเซอร์ (Laser pulse types)	8
2.2 โหมดการเชื่อม (Welding mode)	9
2.2.1 เกิดตามคหรือรูพรุน (Porosity)	10
2.3 คุณสมบัติของวัสดุทองคำและเงิน (Properties of gold and silver material)	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 การเตรียมการทดลอง	12
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	13
3.2.1 การทดลองการเชื่อมด้วยเลเซอร์นีโอติเมียมแฮ็คเลเซอร์	13
3.3 การแสดงผลการทดลอง	14
3.3.1 การแสดงผลของการเชื่อมชิ้นงานด้วยกล้องกำลังขยายสูง	14
3.3.2 การยัดชิ้นงานด้วยเรซิน	15
3.3.3 การขัดและการกัดกรด	15
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 งานเชื่อมวัสดุเงิน ในรูป Butt joint	16

4.2	งานเชื่อมวัสดุทองแผ่นบาง	22
บทที่ 5 บทสรุป		
5.1	สรุปผลการวิจัย	23
5.2	ข้อเสนอแนะ	24
บรรณานุกรม		25
ประวัติผู้วิจัย		27



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติโดยทั่วไปของของทองคำและเงิน



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะ หลังจากที่ใช้แสงเลเซอร์ตัดกระทบ	6
2.2	ขบวนการเชื่อมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน (Power) และเวลา	7
2.3	แสดงลักษณะของพัลส์ ก) แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง ข) แบบค่อยๆขึ้นและลง ค) แบบขาขึ้นเป็นบวก ง) แบบขาลงเป็นลบ และ จ) แบบสี่เหลี่ยม	8
2.4	แสดงลักษณะของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ก. คอนดัคชัน โหมด (Conduction mode) และ ข. คีย์โฮโหมด (Keyhole mode)	9
3.1	แสดงชิ้นงานเงินที่ได้ตัดเตรียมก่อนการเชื่อม	12
3.2	การเชื่อมชิ้นงานในลักษณะ Butt joint เพื่อกำหนดระยะช่องว่างของชิ้นงานทั้งสอง	13
3.3	กล้องDino-lite ที่ใช้ในการทดลอง	13
3.4	เครื่องนี้โอไนเมียมแฮ็คเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง	14
3.5	กล้อง Carl Zeiss optical microscope รุ่น Axio Imager.A1M ที่มีกำลังขยายสูง	14
3.6	แสดง ก. เรซินและสารทำให้แข็งตัว และ ข. ชิ้นงานถูกยึดด้วยเรซิน	15
4.1	แสดงภาพถ่ายรอยเชื่อมด้านบน ที่ได้จากพัลส์เลเซอร์ ก) แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง ข) แบบค่อยๆขึ้นและลง ค) แบบขาขึ้นเป็นบวก ง) แบบขาลงเป็นลบ และ จ) แบบ สี่เหลี่ยม	17
4.2	แสดงรายชื่อภาพตัดขวาง ของพัลส์ 3 ลักษณะ ก) แบบค่อยๆขึ้นและลง ข) แบบขาลงเป็นลบ และ ค) แบบสี่เหลี่ยม	19
4.3	แสดงรอยเชื่อมของรูปแบบพัลส์เลเซอร์ขาลงเป็นลบ เมื่อเพิ่มเวลาพัลส์เป็น 5.0 mse	21
4.4	แสดงรอยเชื่อมของรูปแบบพัลส์เลเซอร์ขาลงเป็นลบ เมื่อลดขนาดของลำแสงเลเซอร์เป็น 0.2 มม.	21
4.5	การเชื่อมแผ่นเงินที่ลักษณะของเลเซอร์พัลส์ที่แตกต่างกัน	22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

สมาคมผู้ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับได้รายงานถึงมูลค่าการส่งออกในระดับแสนล้านอย่างต่อเนื่อง ในขบวนการผลิตได้มีการประยุกต์ใช้เลเซอร์สำหรับเชื่อม ในอุตสาหกรรมนี้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของเลเซอร์ที่มีลำแสงที่ไม่บานปลาย มีคุณภาพ พลังงานจากเลเซอร์จึงอยู่ในบริเวณที่จำกัด การกระจายความร้อนอยู่ในบริเวณแคบ การใช้ลำแสงเลเซอร์ในการเชื่อมจึงได้จุดเชื่อมที่มีขนาดเล็ก ไม่มีการเปลี่ยนสีของอัลลอยด์หลังการเชื่อม ไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวเสียหายสำหรับ เพชร พลอย หินสีที่ไวต่อความร้อน รวมทั้งไม่ทำให้วัสดุเครื่องประดับผิดรูปทรง [Brown 2003, Wright 2002, Faerber et al., 2003 และ Watanabe, 2006] แต่ในปัจจุบันประเทศไทยเผชิญกับการแข่งขันจากประเทศอินเดีย และจีนเนื่องด้วยประเทศดังกล่าวมีค่าแรงที่ต่ำและเป็นแหล่งผลิตเพชร พลอยสำคัญของโลก ดังนั้นการประกอบขึ้นด้วยเรือนโดยการใช่เพชรพลอย ประกอบขึ้นมาเป็นเครื่องประดับสำเร็จ จึงมีต้นทุนที่ต่ำกว่าประเทศไทยมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่เราควรประยุกต์ใช้เครื่องมือทางเทคโนโลยี และสนับสนุนทางวิชาการ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่ออุตสาหกรรมนี้ โดยเฉพาะเครื่องเชื่อมเลเซอร์ให้เกิดประโยชน์กับการผลิตเครื่องประดับให้มากที่สุด ทั้งนี้ทั้งนั้นเพื่อเป็นการสนับสนุนให้อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับสามารถแข่งขันกับตลาดโลกได้

เลเซอร์ทำการปลดปล่อยพลังงานให้กับเนื้อ โลหะหรืออัลลอยด์ในรูปของพัลส์ (Pulse Shape) พลังงานของเลเซอร์ถูกจำกัดให้อยู่ภายใต้ระดับกำลังของพัลส์ (Power) และเวลา (Time) ที่แตกต่างกัน อาทิ พัลส์ของเลเซอร์มีหลากหลายรูปแบบ อาทิ แบบพัลส์สี่เหลี่ยม (Square Pulse Shape) แบบพัลส์ขาขึ้นมีค่าความชันเป็นบวก (Positive Slope Leading Pulse) แบบพัลส์ขาลงมีค่าความชันเป็นลบ (Negative Slope Trailing Pulse) แบบพัลส์ค่อๆ ขึ้นและลง (Position Bridge Pulse) และแบบพัลส์ขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง (Sequence of Square Pulse) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปสัญญาณแบบอื่น รูปสัญญาณแบบพัลส์สี่เหลี่ยมเป็นการให้พลังงานจากเลเซอร์ที่มากที่สุด พลังงานจากเลเซอร์จึงทำให้เกิดการเชื่อมที่กินบริเวณกว้างและลึก รวมทั้งให้การกระจายความร้อนเป็นบริเวณกว้างที่สุด

ในการผลิตอัญมณีและเครื่องประดับประกอบด้วยขบวนการหลัก 4 ขบวนการกล่าวคือ ขบวนการหล่อ ขบวนการแต่ง ขบวนการขัด และขบวนการฝัง ปัญหาที่เกิดขึ้นจากขบวนการผลิตที่ต้องการเครื่องเชื่อมเลเซอร์ในการแก้ปัญหานั้น สามารถสรุปได้คร่าวๆ ดังนี้ หลังจากขบวนการหล่อ งาน พบว่างานที่ได้ไม่สมบูรณ์ มีตำหนิ ชื้นงานผุ มีตามด การหล่องานไม่เต็มชิ้นงานเป็นต้น หรือปัญหาที่เกิดขึ้นจากขบวนการแต่งชิ้นงาน อาทิเช่น พ่นงานแต่งได้ใช้อุปกรณ์แต่งผิดพลาดทำให้

เนื้ออัลลอยด์หลุด ขอบหรือกระเปาะสำหรับใส่เพชร พลอย หรือหินสีแหง หรือขาด ส่วนปัญหาที่เกิดจากจากขบวนการขัด มักเกิดขึ้นบ่อยครั้งเมื่อพนักงานขัด ขัดชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานบางเกินไป ชิ้นงานไม่ได้สัดส่วน หรือน้ำหนัก ส่วนในขบวนการฝัง พนักงานฝังมีหน้าที่ใส่เพชร พลอย หรือหินสีให้อยู่ระหว่างหนามเตย ไขปลาคา หรือล๊อค บางครั้งระหว่างทำการฝัง หนามเตยหัก ไขปลาคาหลุด ไขปลาคาเล็กไม่ได้ขนาดสำหรับพลอย หรือล๊อคไม่ได้ขนาด หรือบางเกินกว่าที่จะยึดพลอยได้เป็นต้น

ในสมัยก่อนที่ยังไม่ได้มีการพัฒนาเครื่องเชื่อมเลเซอร์ การแก้ปัญหาทางการผลิตกระทำโดยใช้หัวไฟ (Torch) หัวไฟให้เปลวไฟที่ใหญ่ ทำให้เพชร พลอย บริเวณใกล้เคียงแตกร้าว หรือเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนที่มากเกินไป จึงนิยมที่จะทำการถอดเพชร พลอยออกจากชิ้นงาน ก่อนที่จะทำการซ่อมแซม ซึ่งทำให้ขบวนการผลิตใช้เวลานานขึ้น บางครั้งการกระทำดังกล่าวทำให้เพชร พลอยแตกเสียหายได้ อีกทั้งการใช้หัวไฟไม่สามารถควบคุมการละลายและกำหนดบริเวณของการละลายของอัลลอยด์ได้ การละลายของอัลลอยด์และความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง จึงทำให้ลวดลายหรือรูปทรงของชิ้นงานบริเวณใกล้เคียงเสียหาย ซึ่งผลดังกล่าวอาจจะทำให้งานอัญมณีและเครื่องประดับที่ใกล้สำเร็จต้องเริ่มต้นทำการผลิตใหม่ เพิ่มระยะเวลาการผลิต ทำให้ต้นทุนการผลิตสูง งานไม่ทันกำหนดส่งมอบเป็นต้น หลังจากเครื่องเชื่อมเลเซอร์ได้ถูกนำมาใช้ในขบวนการผลิตอัญมณี และเครื่องประดับ เทคโนโลยีนี้จึงได้มีการยอมรับอย่างรวดเร็วและกว้างขวาง เนื่องด้วยเลเซอร์จะทำการปลดปล่อยพลังงานอย่างรวดเร็วและเป็นจุดเล็กๆ จึงทำให้เกิดจุดจากการเชื่อมมีขนาดเพียง 0.5-1.0 มิลลิเมตร ความร้อนกระจายในบริเวณแคบ จึงทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมอัลลอยด์หรือเติมเนื้ออัลลอยด์ที่ขาดหายไปจากตัวเรือนไม่สามารถทำให้อัลลอยด์บริเวณด้านที่อยู่ใกล้เคียงหลอมละลาย เพชรไม่แตก พลอยไม่เปลี่ยนสี เครื่องประดับไม่ผิดรูปทรง การใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ในการแก้ปัญหาในขบวนการผลิตจึงใช้เวลาที่น้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ในอดีตราคาอัลลอยด์อากิทองหรือเงิน มีราคาต่ำกว่าปัจจุบันมาก รูปแบบงานเครื่องประดับจึงออกมาในสไตล์หนาและหนัก ร่วมกับความต้องการของตลาดที่สูง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มกำลังการผลิตและผลผลิต การเชื่อมหรือซ่อมงานต้องใช้เวลาที่น้อยที่สุด เครื่องเชื่อมเลเซอร์จึงนิยมใช้รูปพลังงานเลเซอร์แบบพัลส์สี่เหลี่ยม เพื่อให้เกิดการเชื่อมงานที่กินบริเวณกว้างและลึก การใช้พลังงานที่มากเกินไปหรือความร้อนที่กระจายเกินความจำเป็น จึงไม่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อคุณภาพของงาน หรือกำไรโดยรวม

แต่ในปัจจุบันด้วยเหตุผลทางการตลาดและอัลลอยด์ที่มีราคาสูง อัญมณีและเครื่องประดับได้มีขนาดเล็กและบางลง ลวดลายมีความแปลกใหม่ อ่อนช้อย รายละเอียดของงานมีมากขึ้น อาทิ ไขปลาคามีขนาดเล็กลง ลวดลายมีความบาง รายละเอียดอ่อนช้อยมากขึ้น ดังนั้นการเชื่อมเลเซอร์ด้วยพลังงานที่ไม่เหมาะสมหรือมากเกินไปอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อการผลิตและคุณภาพของงาน อาทิเนื้ออัลลอยด์ทะลุ การลุดกลามรอยเชื่อมทำให้เกิดการขาดหายของอัลลอยด์ในบริเวณใกล้เคียง รอยเชื่อมกินบริเวณกว้าง งานซ่อมมีมาก เป็นผลให้การผลิตใช้เวลานาน ต้นทุนการผลิต

สูงและลดศักยภาพการแข่งขันทางการตลาดลง ประกอบกับรูปลักษณ์ (Design) ของอัญมณีและเครื่องประดับมีความซับซ้อนมากขึ้น เครื่องเชื่อมเลเซอร์ได้ถูกนำมาใช้ในการประกอบ (Assembly) อัญมณีและเครื่องประดับนอกเหนือจากการนำมาใช้ซ่อมงาน นอกจากนี้เพื่อเป็นการเพิ่มความแปลกใหม่และลดราคาต่อชิ้นของเครื่องประดับให้อยู่ในระดับที่ไม่สูงเกินไป ได้มีการใช้อัลลอยด์ต่างชนิดกันในการประกอบกันเป็นตัวเรือนอาทิทองกับแพตตินัม หรือทองกับเงิน ชนิดของอัลลอยด์ที่แตกต่างกันมีการละลายที่พลังงานแตกต่างกัน นอกจากนี้การเชื่อมเลเซอร์ด้วยพลังงานที่ไม่เหมาะสม ยัง มีผลต่อคุณภาพงานอาทิ ไขปลานขนาดเล็กทำได้ยาก ทองมีการเปลี่ยนสี รอยเชื่อมเปราะ หักง่าย หรือพลอยบริเวณใกล้เคียงแตก ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้การผลิตใช้เวลานาน ของเสียมีมาก ปริมาณผลผลิตต่ำ ต้นทุนสูง

การประกอบชิ้นงานโดยทั่วไปมีการใช้เทคนิคสองอย่าง คือการใช้หัวไฟ (Torch) หรือ แสงเลเซอร์ อย่างแรกคือการใช้หัวไฟ (Torch) หัวไฟให้เปลวไฟที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถกำหนดบริเวณและควบคุมการละลาย ของอัลลอยด์หรือเนื้อโลหะได้ การละลายและความร้อนที่แพร่กระจายจึงเกิดเป็นบริเวณกว้าง ความร้อนที่มากเกินไปนอกเหนือจากจะทำให้เพชร พลอยบริเวณใกล้เคียงแตกเสียหายได้ อาจทำให้ทำให้หลวละลายหรือรูปทรงของชิ้นงานบริเวณใกล้เคียงผิดเพี้ยน หรือทำให้เกิดการลุกลามของตามด รวมทั้งให้เกิดแตกต่างของสี และความผิดเพี้ยนของระหว่างบริเวณที่มีการเชื่อมและโลหะใกล้เคียงมีมากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวทำให้ขบวนการผลิตใช้เวลานาน ต้นทุนการผลิตสูงและคุณภาพไม่ได้มาตรฐาน เป็นผลให้ลดศักยภาพการแข่งขันทางการตลาดลง

งานวิจัยนี้คาดว่าจะเป็นการชี้แนะทางวิชาการและเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการ อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับไทยได้นำเทคโนโลยีไปใช้ให้เหมาะสมในการผลิตสินค้า ส่งผลให้มีการพัฒนาสินค้า เพิ่มผลิตภาพ และคุณค่าของสินค้า ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างโอกาสทางการตลาดที่เหนือกว่าคู่แข่ง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เป้าหมายดังกล่าวครอบคลุม ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้าง เศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืน ในด้าน (3.1) การปรับโครงสร้างการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพ และคุณค่าของสินค้าและ บริการบนฐานความรู้และความเป็นไทย และ(3.2) การสร้างภูมิคุ้มกันของระบบ เศรษฐกิจ และนอกจากนี้ยังครอบคลุมยุทธศาสตร์การเสริมสร้างธรรมาภิบาลในการบริหาร จัดการประเทศ ในด้าน (5.5) ส่งเสริมภาคธุรกิจเอกชนให้เกิดความเข้มแข็ง สุจริต และมีธรรมาภิบาล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับให้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล และ

2. เพื่อส่งเสริมการเพิ่มศักยภาพทางการตลาดของประเทศ ควรให้มีการสนับสนุนทางวิชาการและเทคโนโลยี ในเรื่องของการปลดปล่อยพลังงานของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ในรูปแบบพัลส์ที่นอกเหนือจากรูปพัลส์สี่เหลี่ยมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
3. ทำการทดสอบและทดลองรูปแบบของเลเซอร์พัลส์ต่อการเชื่อมของอัลลอยด์เงินและทอง โดยใช้พัลส์ที่แตกต่าง 5 รูปแบบกล่าวคือ แบบพัลส์สี่เหลี่ยม(Square Pulse Shape) แบบพัลส์ขาขึ้นเป็นบวก(Positive Slope Leading Pulse) แบบพัลส์ขาลงเป็นลบ(Negative Slope Trailing Pulse) แบบพัลส์ค้อยๆขึ้นและลง(Position Bridge Pulse) และแบบพัลส์ขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง(Sequence of Square Pulse) เพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะพัลส์ของเลเซอร์กับการเชื่อม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ใช้เครื่องนีโอดีเมียมแอกต์เลเซอร์ (Nd:YAG Laser)แบบพัลส์ ในการทดลองและเก็บข้อมูลของการเชื่อมที่รูปแบบพัลส์ที่แตกต่างดังกล่าวไปแล้ว อัลลอยด์ที่เลือกใช้คือ เงินและทอง เนื่องจากเป็นอัลลอยด์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ การวิเคราะห์และเก็บข้อมูลจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์กระทำโดยใช้โดยใช้กล้องกำลังขยายสูง 90 เท่า และ 500 เท่า คูผลจากการเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ส่วนหนึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการเผยแพร่ความรู้เพื่อให้เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยเทคโนโลยี การบริการความรู้ ในรูปบทความ การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการSiam Physics Congress 2010 และ National Conference of Optics and Applications ครั้งที่ 6 ปี 2011

บทที่ 2

ทฤษฎี

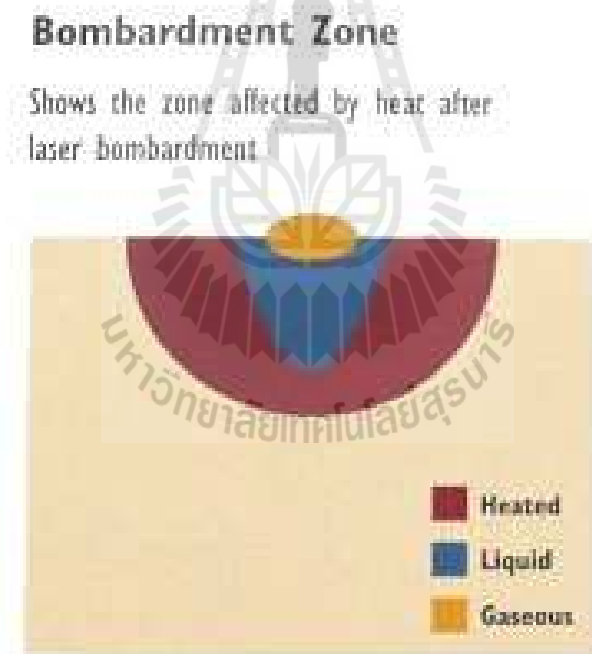
การเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกันโดยใช้เลเซอร์ เป็นการประกอบชิ้นงานที่ให้อรอยเชื่อมที่เล็ก การเล็งเป้าหมายมีความแม่นยำ การควบคุมการกระจายความร้อนไปยังบริเวณใกล้เคียงได้ดี จึงทำให้ชิ้นงานไม่บิดงอง่าย สามารถเชื่อมชิ้นงานใกล้กับวัสดุที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อน อาทิ หินสี พลอย ข้อต่อสกรูย จึงทำให้การเชื่อมด้วยเลเซอร์เป็นที่นิยม [Duley, 1998, Smith et al., 1972, Wright, 2002, Brown, 2003, Davis, 2003 และ Kugler, 2003] นำใช้แทนที่หัวไฟ ถึงแม้ว่าหัวไฟในปัจจุบันจะมีขนาดเล็ก ทำให้บริเวณที่ได้รับความร้อนไม่กระจายเป็นบริเวณกว้างเหมือนเดิม แต่ในอย่างไรก็ตามการหยุดจ่ายพลังงานก็กระทำไม่ได้ไม่รวดเร็วเท่าการควบคุมพัลส์ของเลเซอร์ ดังนั้นการควบคุมบริเวณบริเวณความร้อนและการละลายของโลหะยังคงทำได้ยาก ความร้อนดังกล่าวทำให้เกิดการละลายของเครื่องประดับละลายเกิดการละลายเข้าหากัน รูปแบบผิวด้าน ความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนของสีที่รอยเชื่อม หรือสีผิวด้าน ถ้าเป็นการเชื่อมข้อต่อสกรูย ความร้อนที่กระจายมากเกินไปอาจเกิดการละลายและสูญเสียการเคลื่อนไหวที่อิสระที่รอยต่อ เรียกว่าข้อต่อตาย ส่วนอัญมณีที่ได้รับความร้อนมากเกินไป ทำให้สีเปลี่ยนสี แดก หรือกะเทาะ ความเสียหายที่เกิดขึ้น ทำให้การผลิตมีต้นทุนสูง ของเสียมาก การผลิตใช้ระยะเวลาาน รูปแบบเครื่องประดับมีความจำกัด ต้องใช้พนักงานที่มีทักษะสูง ซึ่งพนักงานลักษณะนี้มีปริมาณน้อย ไม่เหมาะกับการทำเครื่องประดับในระดับอุตสาหกรรม ปัญหาและอุปสรรคทั้งหลายเป็นผลมาจากการกระจายความร้อนที่เป็นบริเวณกว้างของหัวไฟ [Mazumder, 1997]

ในการเชื่อมสำหรับเครื่องประดับและอัญมณี ต้องการความแข็งแรงและความสวยงาม การแทรกตัวของฟองอากาศจากการเชื่อมหรือรูพรุนเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา เนื่องจากให้ผิวรอยเชื่อมที่ขรุขระ เมื่อชิ้นงานผ่านการชุบจะแสดงรอยขรุขระที่ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ฟองอากาศที่แทรกตัวอยู่ในรอยเชื่อม เมื่อชิ้นงานผ่านขบวนการขัดก่อนขบวนการชุบ อาจแสดงให้เห็นรูพรุนที่ชัดเจนยิ่งขึ้นทำให้เสียเวลาในการอุดรูด้วยเลเซอร์และขัดแต่งอีกครั้ง ดังนั้นในการเชื่อมเครื่องประดับ จึงต้องการเทคนิคที่ต้องการลดผลเสียจากการเชื่อมดังกล่าว ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.1 การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser welding)

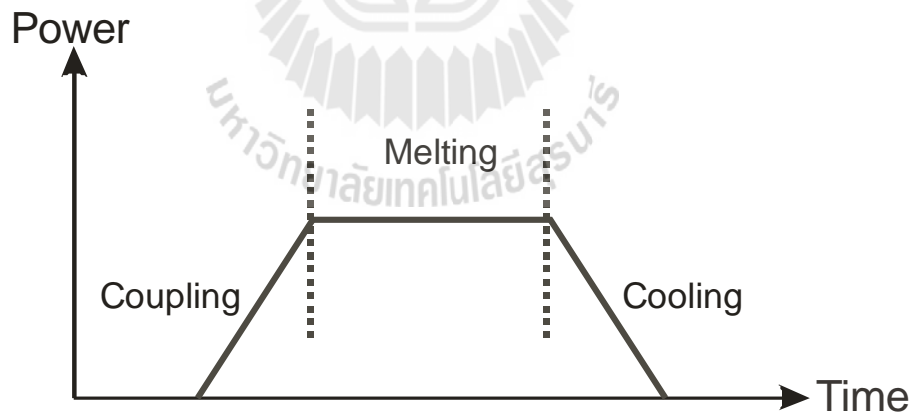
ขบวนการเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์เป็นขบวนการที่ต่อเนื่อง เริ่มจากเมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบยังโลหะเป้าหมาย พลังงานส่วนหนึ่งของเลเซอร์ถูกสะท้อนกลับการสะท้อนกลับของแสงสามารถแสดงได้ด้วยค่า Reflectance โลหะเงินและทองมีค่า Reflectance สูงกว่า 98% [Bennett and Ashley, 1965] ทำให้พลังงานส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการหลอมละลาย ประกอบกับถ้าชิ้นงานมีความเงามัน

ลำแสงเลเซอร์จะเกิดการกระเจิง (Scattering) ออกจากเป้าหมายมากขึ้น ก็ทำให้ชิ้นงานได้พลังงานเลเซอร์น้อยลงไปอีก ส่วนเป้าหมายที่มีสีเข้มลำแสงเลเซอร์จะถูกดูดกลืนได้มากขึ้น พลังงานของเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่โลหะเป้าหมาย จะถูกนำไปทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะและการฟอร์มตัวของกลุ่มแก๊ส (Gaseous) เนื้อชิ้นงานที่เรียกว่าพลาสมา (Plasma) [Beck, 1995, Semark, 2000 และ Sibillano, 2005] ดังรูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์นี้ไม่เป็นสิ่งที่ปรารถนาของการเชื่อม [Wang, 1995] เนื่องจากไปทำให้เกิดการลดขนาดของพลังงานที่ตกกระทบเป้าหมายโลหะ อีกทั้งพลาสมาและกลุ่มแก๊สในบรรยากาศทำปฏิกิริยากับโลหะในระหว่างขบวนการเชื่อม ส่วนของพลังของเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่โลหะเป้าหมายจะถูกใช้ในการทำให้โลหะละลาย เพื่อเชื่อมโลหะเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณหลอมละลาย (Liquid Zone) พลังงานที่ถูกดูดกลืนบางส่วนถูกกระจายไปบริเวณใกล้เคียง ตามคุณสมบัติการการส่งผ่านความร้อน (Thermal conductivity) ประกอบกับส่วนพลังงานที่มีขนาดไม่สูงเพียงพอที่จะทำการละลายโลหะได้ ก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อนกระจายออกไปยังด้านข้าง ผลรวมของพลังงานทั้งสอง เกิดการหลอมละลายและปรากฏรอยเชื่อมที่บริเวณไกลจากจุดลำแสงเลเซอร์ตกกระทบ



รูปที่ 2.1. รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะ หลังจากที่ถูกแสงเลเซอร์ตกกระทบ [Faerber et al., 2003]

ขบวนการเชื่อมที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างละเอียดสามารถ แบ่งออกเป็น 3 ขบวนการ คือ ขบวนการคัปปีง (Coupling process) ขบวนการหลอมละลาย (Melting process) และขบวนการเย็นตัว (Cooling process) ถ้าแสงของเลเซอร์ถูกนำมาใช้ในขบวนการดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.2 ภายหลังจากที่เลเซอร์ถูกดูดกลืนที่เป้าหมาย โลหะจะรับพลังงานจากเลเซอร์ผ่านขบวนการคัปปีง (Coupling process) การดูดกลืนพลังงานนี้ซึ่งนอกจากจะขึ้นกับลักษณะของผิวโลหะเป้าหมาย ค่าคุณสมบัติการสะท้อนของโลหะที่ความยาวคลื่นของเลเซอร์ แล้วขึ้นกับลักษณะของรูปพัลส์ซึ่งจะกล่าวในภายหลัง พลังงานที่ดูดกลืนมีระดับที่เพียงพอ จะทำให้โลหะเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลว ซึ่งเรียกขบวนการในขั้นตอนนี้ว่า ขบวนการหลอมละลาย (Melting process) ส่วนพลังงานที่เหลือและไม่เพียงพอต่อการหลอมโลหะ เปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อนและถูกถ่ายเทไปยังบริเวณใกล้เคียงกับรอยเชื่อม การกระจายความร้อนไปยังบริเวณใกล้เคียงขึ้นโดยตรงกับคุณสมบัติส่งผ่านความร้อนของโลหะ ส่วนค่า Thermal diffusivity เป็นค่าที่แสดงการส่งผ่านพลังงานที่ดูดกลืนในรูปของความร้อนไปยังบริเวณใกล้เคียง เมื่อพลังงานตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาที่รวดเร็ว อาทิลำแสงเลเซอร์ ระยะเวลาของขบวนการนี้มีผลโดยตรงกับขนาดการหลอมละลายหรือรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น จากนั้นเมื่อพลังงานของเลเซอร์ได้สิ้นสุดลง โลหะจะเกิดการเย็นตัวและเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง (Solidification) ผ่านขบวนการเย็นตัว (Cooling process) ทำให้เกิดการเชื่อมของเนื้อโลหะเข้าด้วยกัน สิ่งที่มีผลต่อขบวนการเชื่อมทั้ง 3 คือ ตัวแปรเลเซอร์ และชนิดของพัลส์เลเซอร์ [Dawes, 1992 และ Ion, 2005]

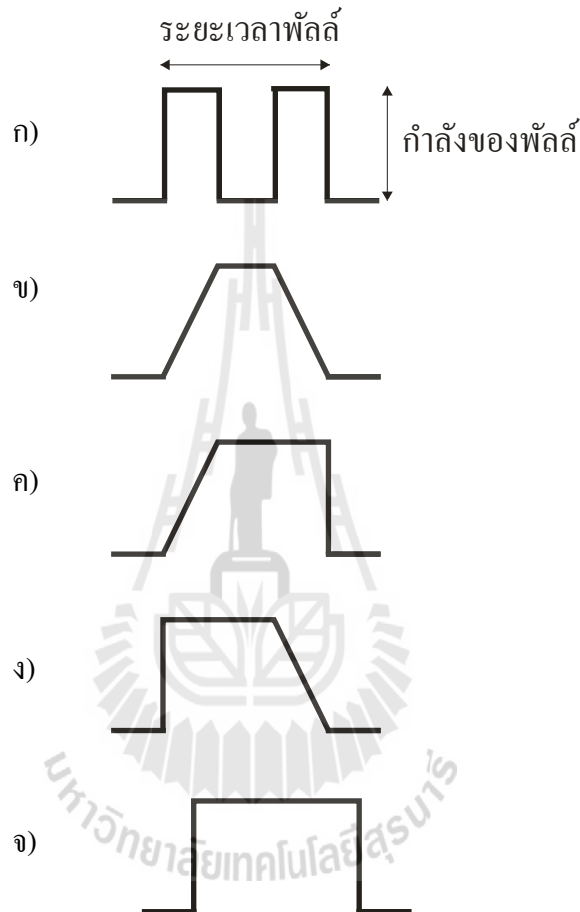


รูปที่ 2.2 ขบวนการเชื่อมซึ่ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน (Power) และเวลา

2.1.1 ตัวแปรเลเซอร์ (Laser parameters) แสดงรายละเอียดการส่งผ่านพลังงานของเลเซอร์ คือ กำลังของพัลส์ (Power) ขนาดของเลเซอร์ (Laser spot size) และระยะเวลาของพัลส์ (Pulse duration time) กำลังของเลเซอร์และขนาดของเลเซอร์ มีผลต่อระดับความหนาแน่นของพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลาย

ที่ส่งผ่านระหว่างขบวนการค้ำปิ้ง ระดับพลังงานที่มากเพียงพอทำให้การหลอมละลายของโลหะได้ ส่วนระยะเวลาของพัลส์ เป็นระยะเวลาที่พลังงานเลเซอร์อยู่บนชิ้นงาน ระหว่างขบวนการหลอมละลาย

2.1.2 ชนิดของพัลส์เลเซอร์ (Laser pulse types) เป็นรายละเอียดรูปสัญญาณเลเซอร์ที่ให้กับขบวนการเชื่อมทั้ง 3 แบบ พัลส์เลเซอร์เลเซอร์ มี 5 ลักษณะ แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง แบบค่อยๆขึ้นและลง แบบขาขึ้นเป็นบวค แบบขาลงเป็นลบ และ แบบสี่เหลี่ยม แสดงดังรูป 2.3



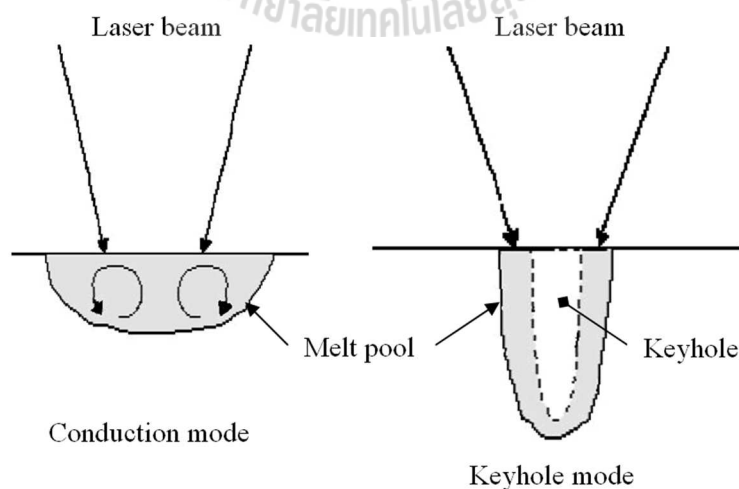
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของพัลส์ ก) แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง ข) แบบค่อยๆขึ้นและลง ค) แบบขาขึ้นเป็นบวค ง) แบบขาลงเป็นลบ และ จ) แบบสี่เหลี่ยม

เมื่อตัวแปรเลเซอร์มีค่าเท่ากัน พัลส์เลเซอร์แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง มีระยะเวลาหลอมละลายน้อยที่สุด เนื่องจากพลังงานของพัลส์ ถูกนำไปแยกเป็นรูปพัลส์ 2 ลูก แสดงดังรูป 2.3 ก) ส่วนพัลส์แบบค่อยๆขึ้นและลง ดังรูป 2.3 ข) ให้ระยะเวลาหลอมละลายที่มากขึ้น แต่มีค่าน้อยกว่าพัลส์แบบขาขึ้นเป็นบวค แบบขาลงเป็นลบ และแบบสี่เหลี่ยม พัลส์แบบขาขึ้นเป็นบวค และแบบขาลงเป็นลบมี ระยะเวลาหลอมละลายที่เท่ากัน แต่การค้ำปิ้งและการเย็นตัวที่อัตราต่างกัน การค้ำปิ้งของพัลส์แบบขาขึ้นเป็นบวค แสดงดังรูป 2.3 ค) ให้การเพิ่มขึ้นของพลังงานอย่างช้าๆ แต่การเย็นตัวที่ฉับพลัน ส่วนพัลส์แบบขาลงเป็นลบดัง

รูป 2.3 ง) ใ้การปลดปล่อยพลังงานเลเซอร์อย่างรวดเร็ว การค้ำบั้งของพลังงานเกิดอย่างฉับพลัน แต่ให้อัตราการเย็นตัวอย่างช้าๆ พัลส์ลักษณะสุดท้ายรูปสี่เหลี่ยมปลดปล่อยพลังงานเลเซอร์อย่างฉับพลัน ทำให้เกิดขบวนการค้ำบั้งไปทำให้การขบวนการหลอมละลายของโลหะอย่างรวดเร็ว และรุนแรง รวมทั้งให้การหยุดจ่ายพลังงานเลเซอร์อย่างฉับพลัน เป็นผลให้การเย็นตัวถูกกำหนดให้มีช่วงเวลาที่สูง การเชื่อมที่กำลังเลเซอร์สูงมักนำมาซึ่งการกระเด็นของโลหะ หรือ splatter หรือตามดภายในบ่อรอยเชื่อม

2.2 โหมดการเชื่อม (Welding mode)

ระดับของหนาแน่นของพลังงานเลเซอร์ทำให้เกิดรอยเชื่อมเป็นสองลักษณะ กล่าวคือคอนดัคชัน โหมด (Conduction mode) และ คีย์โฮโหมด (Keyhole mode) เมื่อความหนาแน่นของพลังงานเลเซอร์มีระดับต่ำ รอยเชื่อมเป็นรูปเสมือนถ้วย (Bowl-shape) ความลึกของรอยเชื่อมตื้น (Shallow) ดังรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปเลเซอร์มีการกระจายของพลังงานในรูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian beam profile) โดยบริเวณตรงกลางของลำแสงมีระดับพลังงานสูงสุด และส่วนที่ขอบของลำแสงทั้งสองข้างมีระดับพลังงานต่ำกว่า เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเป้าหมายโลหะ พลังงานตรงกลางของลำแสงเมื่อถูกดูดกลืนบริเวณผิวโลหะและมีขนาดเพียงพอในการหลอมละลายโลหะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจากโลหะเป็นของเหลวในบ่อหลอมละลาย (Melt pool) สำหรับระดับพลังงานบริเวณขอบของลำแสงที่ไม่เพียงพอต่อการหลอมละลายของโลหะก็จะถูกถ่ายเทไปยังด้านข้างของบ่อหลอมละลายในรูปของความร้อน โดยมีการตอบสนองการกระจายความร้อนในรูปเวลา และขอบเขตเป็นไปตามคุณสมบัติ Thermal diffusivity ของวัสดุ ผลของการกระจายของพลังงานดังกล่าวทำให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อทิศทางของปรากฏการณ์การละลาย (Melting dynamic) ของโลหะภายในบ่อหลอมละลาย ผลของแรงตึงผิว (Surface tension) ทำให้เกิดแรงดึงออกจากบริเวณตรงกลางบ่อหลอมละลาย อีกทั้งมีแรงดันจากข้างล่างของบ่อหลอมละลาย



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ก. คอนดัคชัน โหมด (Conduction mode) และ ข. คีย์โฮโหมด (Keyhole mode) [Duley, 1998]

เนื่องจากข้างล่างมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าด้านบนที่ได้รับพลังงานมากกว่าจากลำแสงเลเซอร์ เป็นผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (Weld diameter) ด้านบนที่ได้มีขนาดกว้าง และระดับความลึก (Weld penetration) ของรอยเชื่อมที่ตื้น เมื่อระดับความหนาแน่นของพลังงานของลำแสงเลเซอร์มีค่าสูงขึ้น ระดับพลังงานที่สูงถึง $10^4 \text{ Watt mm}^{-2}$ ทำให้โลหะที่ผิวหน้าเกิดการกลายเป็นไอ (vaporize) เรียกว่า plume และไอนี้ถูกไอออไนซ์ (Ionize) กลายเป็นกลุ่มแก๊สพลาสมา (Plasma formation) เป็นผลทำให้เกิดรู (Hole) ที่บ่อหลอมละลาย พลังงานของเลเซอร์จึงสามารถถูกดูดกลืนที่ด้านล่างของผิวหน้าโลหะได้ จากนั้นพลังงานถูกสะท้อนและหักเหไปมาภายในรูหลอมละลาย เป็นผลให้อัตราการดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ที่บ่อหลอมละลายเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้ได้อัตราการความลึกของรอยเชื่อมต่อพลังงานที่สูงขึ้น [Dowden, 1989, Duley, 1998, และ Messler, 1999] รอยเชื่อมที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก และมีความกว้างของรอยเชื่อมที่ได้มีขนาดเล็กกว่าคอนดักชันโหมด

2.2.1 การเกิดตามคหรือรูพรุน (Porosity) ระหว่างขบวนการหลอมละลายแก๊สสามารถแทรกตัวเข้าไปยังโลหะหลอมละลายได้ดี แก๊สที่แทรกตัวเข้าไปยังโลหะหลอมละลาย กลายสภาพเป็นฟองอากาศ (Bubbles) ฟองอากาศพยายามลอยตัวออกจากบ่อหลอมละลาย ตามทิศทางของแรงดึง อาทิผลของแรงดึงผิวมีแรงดึงไปยังด้านข้างและด้านล่างของรอยเชื่อม เมื่อเลเซอร์หยุดให้พลังงานและเข้าสู่ขบวนการเย็นตัวของรอยเชื่อม ฟองอากาศไม่สามารถหลุดออกมาได้ทันก่อนที่เนื้อโลหะและรอยเชื่อมเกิดการประสานระหว่างขบวนการเย็นตัว เกิดฟองอากาศหรือตามคแทรกอยู่ภายในรอยเชื่อม ทำให้เนื้อโลหะที่รอยประสานมีจำนวนน้อยเนื่องจากผลของการแทรกตัวของฟองอากาศ ซึ่งทำให้ความแข็งแรง และความคงทนที่ได้จากการเชื่อมลดลง นอกจากนี้ในการผลิตเครื่องประดับ ชิ้นงานต้องไปผ่านขั้นตอนการขัด ก่อนการชุบ ในระหว่างขบวนการขัดเนื้อด้วยฟองอากาศหรือตามคที่แทรกตัวอยู่ ทำให้ชิ้นงานมีสภาพเป็นรูพรุน ขนาดเล็ก หรือใหญ่ขึ้นกับขนาดของฟองอากาศ เป็นผลให้ชิ้นงานดังกล่าวต้องกลับไปสู่ขบวนการซ่อม และเติมเนื้อโลหะส่วนที่ขาดหาย จากนั้นชิ้นงานจะเข้าสู่ขบวนการขัด และชุบต่อไป การซ่อมชิ้นงานดังกล่าวนำมาซึ่งต้นทุนการผลิตที่สูง ระยะเวลาการผลิตที่ยาวนาน คุณภาพสินค้าต่ำ ตามคหรือรูพรุนซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่พึงปรารถนา สำหรับการผลิตเครื่องประดับ

การเกิดฟองอากาศภายในรอยเชื่อมนับว่าเป็นผลกระทบเนื่องจากระดับพลังงาน ความหนาแน่นของพลังงาน และลักษณะของพัลส์เลเซอร์ เนื่องด้วยตัวแปรทั้งสามเกี่ยวเนื่องโดยตรงกับขบวนการคัปปีง และขบวนการเย็นตัวของโลหะ

2.3 คุณสมบัติของวัสดุทองคำและเงิน (Properties of gold and silver material)

โลหะทองคำและเงินถือว่าเป็นโลหะที่มีมูลค่าสูง จึงถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโลหะทั้งสองแสดงดังตาราง 2.2 พิจารณาคุณสมบัติของวัสดุ

โดยเริ่มจากขบวนการคัปปีง โลหะทั้งสองชนิดจะมีค่าสะท้อน Reflectance สูงถึง 98% เป็นอย่างต่ำ แต่พลังงานของลำแสงนี้โอดีเนียมแอ็คเลเซอร์เลเซอร์ก็ยังมีปริมาณที่เพียงพอในการเชื่อมโลหะ (Weldability) ค่าสะท้อน Reflectance ของวัสดุเงินมีค่าสูงกว่าทองคำ ประกอบกับค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และค่า Thermal diffusivity ของโลหะเงินมีค่าสูงกว่า แสดงให้เห็นว่าโลหะเงินกระจายความร้อนไปบริเวณด้านข้างอย่างรวดเร็ว พลังงานความร้อนมีกระจุกตัวในบริเวณแคบ ถึงแม้ว่าโลหะทองคำมีค่าการหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงกว่า ผลที่ได้จากการกระจายความร้อนทำให้โลหะเงินต้องการพลังงานเลเซอร์ที่สูงกว่าทองคำในการเชื่อม ดังนั้นในการเชื่อมเครื่องประดับที่มีลวดลายละเอียด หรือบาง วัสดุทองคำต้องให้ความระมัดระวังในการปรับค่าพลังงานเลเซอร์ในการเชื่อมมากกว่าวัสดุเงิน

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติโดยทั่วไปของทองคำและเงิน [Bennett และ Ashley, 1965, Togaya, 1999, Davis, 2003 และ Wright, 2002]

โลหะ	Density g/cm ³	Melting Temperature (degree C)	Thermal conductivity W/(m. K)	Thermal diffusivity mm ² . s ⁻¹	ค่า Reflectance At 1000 nm
เงิน Ag	10.5	880-960	397	174	99%
ทอง Au	13.8	860-1060	297	125	98%

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

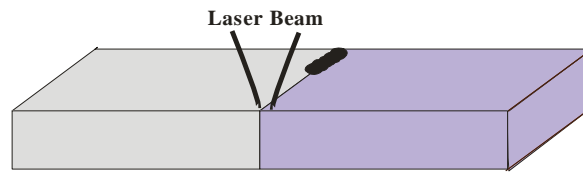
3.1 การเตรียมการทดลอง

การทดสอบและทดลองผลกระทบของชนิดเลเซอร์พัลส์ต่อการเชื่อมในงานอัญมณีและเครื่องประดับ ได้ศึกษาวัสดุสองชนิดหลักกล่าวคือ วัสดุเงินและทองคำ เนื่องด้วยทองคำต้องการพลังงานในการเชื่อมที่น้อยกว่าวัสดุเงิน การจัดทำชิ้นงานทองคำ 18K จึงกระทำกับชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง ในที่นี้ชิ้นงานมีความบาง 0.2 มม. ส่วนวัสดุเงินทำการหล่อวัสดุเงินทำการหล่อโดยในเนื้อเงินบริสุทธิ์ 92.5% ทองเหลือง 3.75% ทองแดง 3.75% จากนั้นทำการรีดชิ้นงานให้เป็นแผ่นที่มีความหนา 1.5 มม. และ 1 มม. จากนั้นนำไปตัดให้ได้ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสม เป็นสองลักษณะกล่าวคือชิ้นงานที่ต้องการทดสอบผลกระทบของรอยเชื่อมกับเลเซอร์ในลักษณะทั่วไป ดังรูปที่ 3.1 ชิ้นงานมีขนาดไม่น้อยกว่า 6 มม. X 15 มม. จากนั้นได้ให้เหมาะกับการศึกษารอยการเชื่อม

จากนั้นทำการตัดชิ้นงานแบ่งครึ่ง (ที่บริเวณที่จะมีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในภายหลัง) ด้วยเครื่องตัดละเอียด และทำการขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน (Grinder Polish) โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 ในแนวระนาบและตัดขวาง จากนั้นทำการล้างคราบน้ำมันด้วยอะซิโตนก่อนทำการเชื่อม จากนั้นโลหะสองชนิดจะนำมาเชื่อมต่อในลักษณะของ Butt joint ประมาณไม่เกิน 1 ใน 3 ของรอยต่อชิ้นงานทั้งหมด ดังรูปที่ 3.2 เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นงานมีช่องว่างระหว่างชิ้นงานอยู่ในระยะที่กำหนด ไม่เกิน 20 ไมครอน ชิ้นงานได้ทำการวัดและตรวจสอบด้วยชิ้นงานได้ทำการวัดและตรวจสอบด้วยกล้อง Dino-lite กำลังขยายสูงสุด 90 ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นงานเงินที่ได้ตัดเตรียมก่อนการเชื่อม



รูปที่ 3.2 การเชื่อมชิ้นงานในลักษณะ Butt joint เพื่อกำหนดระยะช่องว่างของชิ้นงานทั้งสอง



รูปที่ 3.3 กล้องDino-lite ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 การทดลองการเชื่อมด้วยเลเซอร์นี้ โอคิเมียมแอนด์เลเซอร์ ให้พลังงานแบบพัลส์รุ่น LW6V ยี่ห้อ Z-tech ให้พลังงานสูงสุด 150 จูลผลิตที่ประเทศอเมริกา ได้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.4 พลังงานของเลเซอร์ถูกใช้ที่ระดับพลังงาน ขนาดลำแสง และเวลาของพัลส์ที่ค่าต่างๆ ในการเชื่อมงานทองคำระดับพลังงาน 1.4 กิโลวัตต์ ขนาดลำแสงที่ 0.2 มม. เวลาของพัลส์ที่ 1.6 มิลลิวินาที ลักษณะของพัลส์หลากหลายรูปแบบที่เหมาะสมกับชิ้นงาน ส่วนการเชื่อมงานเครื่องประดับเงินระดับพลังงานไม่เกิน 5.0 กิโลวัตต์ ขนาดลำแสงที่ 0.2 และ 0.3 มม. เวลาของพัลส์ที่ 4.0 และ 5.0 มิลลิวินาที ลักษณะของพัลส์แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง แบบค่อยๆ ขึ้นและลง แบบขาขึ้นเป็นบวก แบบขาลงเป็นลบ และแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.4 เครื่องนีโอเคมีมแยกเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3 การแสดงผลการทดลอง

การแสดงผลของการเชื่อมด้วยนีโอเคมีมแยกเลเซอร์แบบพัลส์ หลังจากที่ชิ้นงานได้ผ่านการเชื่อม ด้วยค่าตัวแปรเลเซอร์ค่าต่างๆ โดยกล้องกำลังขยายสูงเพื่อดูรอยเชื่อมด้านบน และด้านข้าง ก่อนที่ชิ้นงานจะถูกนำไปตรวจสอบรอยเชื่อมด้านข้าง ชิ้นงานต้องไปถูกนำไปยึดด้วยเรซิน เมื่อเรซินแห้งแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำไปขัดและผ่านขบวนการกัดกรด เพื่อตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยกล้องกำลังขยายสูงอีกครั้ง

3.3.1 การแสดงผลของการเชื่อมชิ้นงานด้วยกล้องกำลังขยายสูง ผลการทดลองของการเชื่อม กล้อง Carl Zeiss optical microscope รุ่น Axio Imager.A1M ที่มีกำลังขยายสูงสุด 500 เท่า เพื่อตรวจสอบรอยเชื่อมด้านบนและด้านข้าง ในแนวตัดขวาง

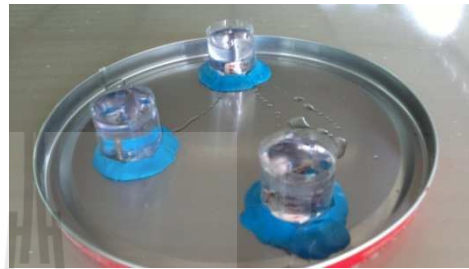


รูปที่ 3.5 กล้อง Carl Zeiss optical microscope รุ่น Axio Imager.A1M ที่มีกำลังขยายสูง

3.3.2 การยึดชิ้นงานด้วยเรซิน หลังจากที่ยึดงานได้ผ่านการเชื่อมและถ่ายภาพด้านบนของรอยเชื่อมแล้ว ก่อนที่ยึดงานจะนำไปเก็บข้อมูลรอยเชื่อมด้านข้าง หรือรอยตัดขวาง ชิ้นงานจะต้องถูกนำไปติดตั้งในแนวตัดขวาง cross section ด้วยเรซิน ดินน้ำมันทำการยึดชิ้นงานและแผ่นพลาสติกที่ถูกม้วน ดินน้ำมันและถาดด้านล่างทำการกักบริเวณเรซินไม่ให้ไหลออกจากพิมพ์ ใช้เรซิน 200 มิลลิลิตร และสารทำให้แข็งตัว 10 มิลลิลิตรผสมกันและเทลงไปยังพิมพ์ที่เตรียมไว้ หลังจากที่ยึดงานไว้ประมาณ 6 ชั่วโมงเป็นอย่างต่ำ เรซินจะแห้งอย่างสมบูรณ์จึงสามารถแกะพิมพ์ดินน้ำมันออกได้ แสดงดังรูปที่ 3.6



ก.



ข.

รูปที่ 3.6 แสดง ก. เรซินและสารทำให้แข็งตัว และ ข. ชิ้นงานถูกยึดด้วยเรซิน

3.3.3 การขัดและการกัดกรด หลังจากที่ยึดงานได้ผ่านยึดด้วยเรซินแล้ว จะถูกขัดไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ในการขัดส่วนของชิ้นงานและรอยเชื่อมจะกระทำด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดต่างๆ กัน เริ่มด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบมากที่สุดเบอร์ 180 จะทำการกำจัดเรซิน ส่วนของรอยเชื่อมและโลหะที่ไม่ต้องการ จากนั้นก็ด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด กระทำให้รอยขัดมีความเรียบขึ้น โดยใช้เบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 1600 ตามลำดับ ขั้นตอนสุดท้ายผงอะลูมินาขนาด 0.05 ไมครอนทำการขัดผิวงานให้มีความเงาเหมือนกระจก ก่อนที่จะมีการสังเกตรอยเชื่อมในเชิงลึกด้วย Optical microscope กำลังขยายสูง ขบวนการตรวจสอบทางโลหะวิทยา (Metallographic examination) กระทำโดยนำวัสดุไปกัดกรดด้วยสารละลาย ที่ประกอบไปด้วยสารละลายแอมโมเนีย (Ammonia solution) 30% จำนวน 2 มล. สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% จำนวน 2 มล. และน้ำกลั่น (Distilled water) 4 มล. โดยใช้เวลากัดกรดประมาณ 1 วินาที [Petzow, 1999] จากนั้นโลหะผ่านการทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและเอทิลแอลกอฮอล์

บทที่ 4

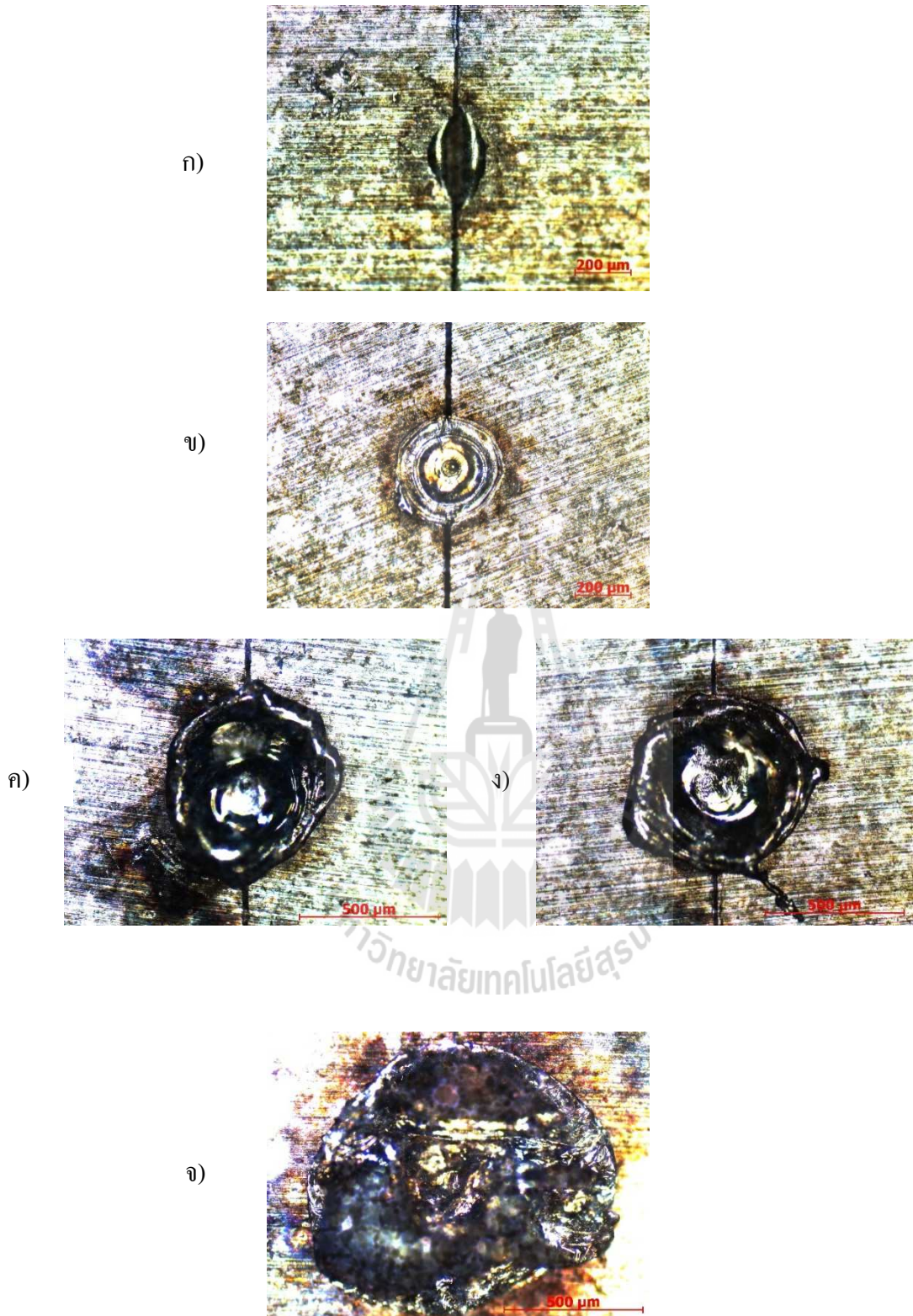
ผลการทดลอง

การทดลองได้จัดทำขึ้นงานสำหรับการเชื่อมวัสดุเงินหนา 1 มม. ลักษณะของ Butt joint ที่ตัวแปรเลเซอร์และเลเซอร์ลักษณะพัลส์ต่างๆ ส่วนวัสดุทองมีความหนาประมาณ 0.2 มม. ทำการเชื่อมที่เลเซอร์ลักษณะพัลส์ต่างๆ รูปแบบพัลส์เลเซอร์แต่ละแบบเป็นการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพลังงาน และการตอบสนองของการหลอมละลายของโลหะและการเย็นตัวที่ขึ้นกับเวลาที่แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองจากการเชื่อมขึ้นงานในลักษณะต่างๆ จะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 งานเชื่อมวัสดุเงิน ในรูป Butt joint

หลังจากที่ขึ้นงานได้ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จนได้ความหนา 1.0 มม. จากนั้นทำการตัดขึ้นงานเป็นสองชิ้นและนำขึ้นงานไปเชื่อมลักษณะของ Butt joint ประมาณไม่เกิน 1 ใน 3 ของรอยต่อขึ้นงานทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าช่องว่างระหว่างขึ้นงานทั้งสองอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 ไมโครมิเตอร์ จากนั้นนำขึ้นงานไปเชื่อมโดยใช้ตัวแปรเลเซอร์กำลังเลเซอร์ 5.0 กิโลวัตต์ จุดเลเซอร์ 0.3 มม. และความยาวพัลส์ 4.0 มิลลิวินาทีในลักษณะของพัลส์ แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง แบบค่อยๆ ขึ้นและลง แบบขาขึ้นเป็นบวก แบบขาลงเป็นลบ และแบบสี่เหลี่ยม ใช้กล้องภาพถ่ายกำลังขยายสูงแสดงรอยเชื่อมด้านบน ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 ลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง รูป 4.1 ก) ไม่ได้ทำให้เกิดการเชื่อมแต่อย่างใด ส่วนลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบค่อยๆ ขึ้นและลง ให้การเชื่อมที่ดีขึ้น (รูป 4.1 ข) ส่วนลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบขาขึ้นเป็นบวก แบบขาลงเป็นลบ ดังรูป 4.1 ค) และ ง) ตามลำดับ ให้รอยเชื่อมลักษณะคล้ายกัน โดยมีรอยเชื่อมเริ่มกระจายเป็นวงกว้างขึ้น และปรากฏการกระเด็นของโลหะที่ขอบบนของรอยเชื่อม ลักษณะพัลส์เลเซอร์แบบสี่เหลี่ยม ให้การเชื่อมที่เป็นรอยกว้างที่สุด และมีการกระเด็นของโลหะที่รุนแรงที่สุด แสดงดังรูป 4.1 จ

รูปแบบพัลส์แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง รูปสัญญาณพัลส์เลเซอร์ขึ้น – ลง – ขึ้น – ลง ภายในเวลา 4 มิลลิวินาที ดังรูป 4.1 ก) พบว่ามีการละลายของโลหะ บริเวณที่ผิวเท่านั้น จึงทำให้เกิดการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือโลหะเงินรับพลังงานจากเลเซอร์ เกิดการดูดกลืนพลังงาน ระดับพลังงานของเลเซอร์ ที่จุดสูงสุดของพัลส์มีค่าเพียงพอที่ทำให้การหลอมละลาย แต่พัลส์เลเซอร์รูปแรกมีเวลาที่สั้นประมาณ 1.33 มิลลิวินาที พลังงานเลเซอร์ไม่อยู่บนขึ้นงานที่จุดเลเซอร์ตกกระทบนานเพียงพอที่เกิดการหลอมละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าการนำความร้อนของโลหะเงินมีค่าสูง พลังงานตกกระทบจะกระจายและแผ่ไปบริเวณใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเชื่อมที่เฉพาะผิวหน้าดังรูป จากนั้นพัลส์เลเซอร์หยุดจ่ายพลังงานอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 1.33 มิลลิวินาที ทำให้โลหะเกิดการเย็นตัว ต่อมาพัลส์เลเซอร์ให้พลังงานอีก



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายรอยเชื่อมค้ำบน ที่ได้จากพัลล์เลเซอร์ ก) แบบขี้ผึ้งอย่างต่อเนื่อง ข) แบบค้อยๆ ขี้ผึ้งและลง ค) แบบขาค้างเป็นบวม ง) แบบขาลงเป็นลบบ และ จ) แบบสี่เหลี่ยม

ครั้ง 1.33 มิลลิวินาที แต่เนื่องด้วยการกระจายพลังงานความร้อนไปบริเวณด้านใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว และเวลาที่เลเซอร์พัลส์ที่น้อย ทำให้ได้การหลอมละลายของโลหะเงินที่จำกัด

ส่วนลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบค่อยๆขึ้นและลง ให้การเชื่อมที่ดีขึ้น (รูป 4.1 ข) เนื่องจากหลังจากที่พลังงานเลเซอร์ตกกระทบวัสดุเงิน เกิดการหลอมละลาย และพลังงานเลเซอร์มีเวลาพัลส์ที่นานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการหลอมละลาย เนื่องจากเวลาที่ฐานของพัลส์เลเซอร์คือ 4.0 มิลลิวินาที พลังงานของพัลส์เลเซอร์ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น ขณะเดียวกันก็มีการกระจายพลังงานความร้อนไปยังบริเวณใกล้เคียง ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานที่จุดตกกระทบมีค่าน้อย การหลอมละลายจึงไม่เกิดเป็นบริเวณกว้าง และรุนแรง ขณะเดียวกันพัลส์ค่อยๆลดลง ทำให้การเย็นตัวของโลหะเป็นไปอย่างช้าๆ รอยเชื่อมที่ได้จึงมีขนาดเล็กและไม่มีการกระจายของเนื้อโลหะออกจากบ่อหลอมละลาย

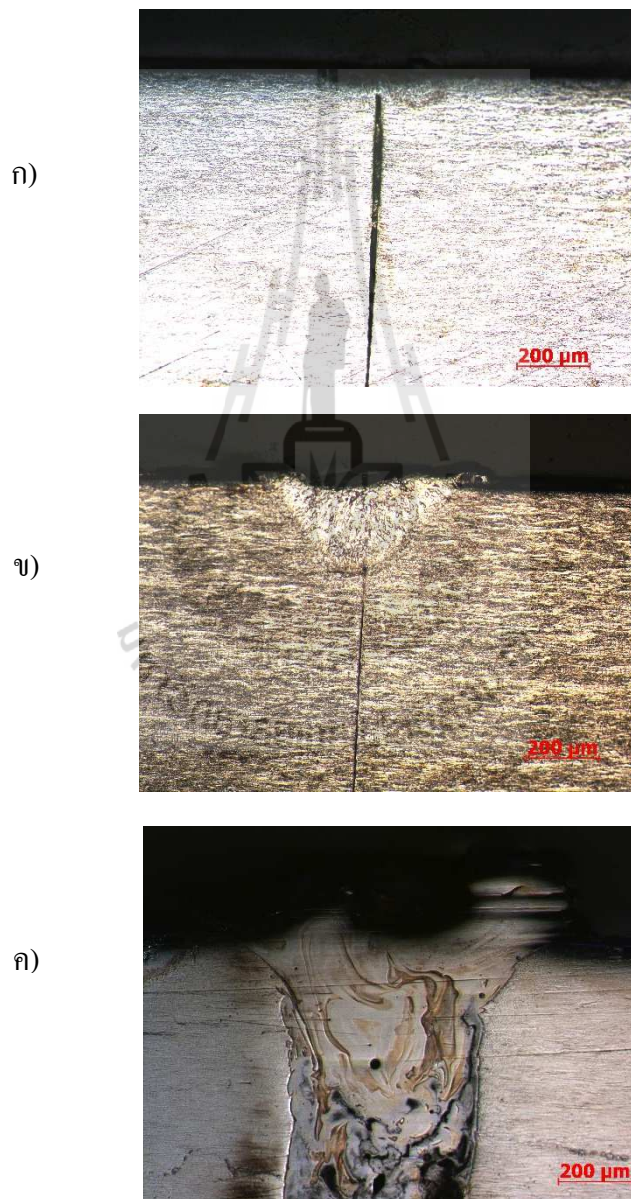
ส่วนลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบขาขึ้นเป็นบวก หมายความว่าพลังงานเลเซอร์ค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเวลา พลังงานเลเซอร์อยู่บนชิ้นงานที่ระยะเวลาค่าหนึ่ง จากนั้นพลังงานเลเซอร์หยุดปลดปล่อยพลังงานอย่างรวดเร็ว เนื่องด้วยความสัมพันธ์ของเวลากับระดับพลังงานตกกระทบระยะเริ่มต้นของพัลส์เป็นไปอย่างช้าๆ เช่นเดียวกับการดูดกลืนพลังงานที่ชิ้นงานและการกระจายพลังงานไปยังบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นการหลอมละลายเมื่อจึงเป็นการเปลี่ยนแปลงช้าๆ ทำให้ได้รอยเชื่อมที่ไม่กว้าง จากนั้นพลังงานเลเซอร์หยุดจ่ายให้กับวัสดุเงินอย่างรวดเร็ว และจับพลาสมา จึงทำให้ปรากฏการ splatter ที่ขอบรอยเชื่อม ดังรูป 4.1 ค) แต่เนื่องจากพลังงานเลเซอร์อยู่บนชิ้นงานยาวนานกว่า ลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบค่อยๆขึ้นและลง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของพัลส์ทั้ง 2 แบบ ลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบขาขึ้นเป็นบวกจึงให้รอยเชื่อมที่กว้างกว่า

ส่วนลักษณะของพัลส์เลเซอร์แบบแบบขาลงเป็นลบ หมายความว่าพลังงานเลเซอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเวลา พลังงานเลเซอร์อยู่บนชิ้นงานที่ระยะเวลาค่าหนึ่ง จากนั้นพัลส์พลังงานเลเซอร์หยุดปลดปล่อยพลังงานอย่างช้าๆ พลังงานเลเซอร์ที่ให้กับชิ้นงานเงินอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานเงินได้รับพลังงานมากในระยะเวลาสั้น โลหะได้รับพลังงานเพียงพอทำให้เกิดการหลอมละลาย เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวอย่างรวดเร็ว ความหนาแน่นของพลังงานมีค่ามาก เนื่องจากการกระจายความร้อนไปยังบริเวณใกล้เคียงเกิดช้ากว่า จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้การหลอมละลายเป็นรอยเชื่อมที่กว้างกว่า และมีการ splatter ที่มากและรุนแรงกว่าการเชื่อมของพัลส์เลเซอร์แบบขาขึ้นเป็นบวก แสดงดังรูป 4.1 ง)

ลักษณะของพัลส์แบบสี่เหลี่ยม มีพลังงานเลเซอร์เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ที่ชิ้นงานได้รับพลังงานอย่างจับพลาสมา เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการกระเด็นของน้ำโลหะออกจากบ่อหลอมละลายมาก ขณะโลหะเกิดการหลอมละลายพลังงานเลเซอร์ก็ยังคงให้อย่างต่อเนื่อง ที่สถานะของเหลวโลหะมีการดูดการแผ่รังสีเลเซอร์มากขึ้น หมายความว่าพลังงานที่โลหะเงินได้รับมีค่าสูงขึ้น ข้อมทำให้เกิดการหลอมละลายมากขึ้น ประกอบกับระยะเวลาที่ให้กับการหลอมละลายนานขึ้น ลักษณะพัลส์แบบสี่เหลี่ยมจึงให้รอยเชื่อมที่มีขนาดกว้างที่สุด แสดงดังรูป 4.1 จ)

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมของพัลส์ 3 ลักษณะ คือแบบค่อยๆขึ้นและลง แบบขาลงเป็นลบ และแบบสี่เหลี่ยม มาทำการขัดกระดาษทรายเบอร์ละเอียดและผ่านกัศกรดเพื่อดูรอยเชื่อมในแนวขวาง ภาพถ่ายรอยเชื่อมที่ถ่ายด้วยกล้องกำลังขยายสูงแสดงดังรูป 4.2

ลักษณะของพัลส์ค่อยๆขึ้นและลง ให้ถ่ายเทพลังงานเลเซอร์ไปยังชิ้นงานอย่างช้าๆ พลังงานที่ตกกระทบก็เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนไปยังด้านบริเวณใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ความหนาแน่นของพลังงานมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงเกิดรอยเชื่อมที่ตื้นดังแสดงดังรูป 4.2 ก) ส่วนลักษณะของพัลส์แบบ



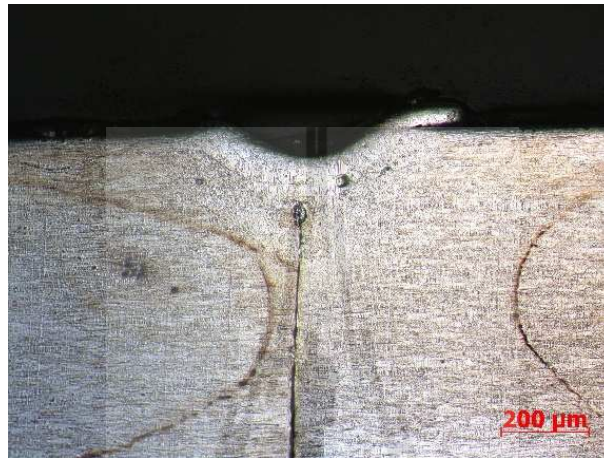
รูปที่ 4.2 แสดงรอยเชื่อมภาพตัดขวาง ของพัลส์ 3 ลักษณะ ก) แบบค่อยๆขึ้นและลง
ข) แบบขาลงเป็นลบ และ ค) แบบสี่เหลี่ยม

ขาลงเป็นลบ เลเซอร์ให้พลังงานอย่างรวดเร็วแก่ชิ้นงาน ดังนั้นพลังงานจึงถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะ จากของเหลวเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว ความกว้างของรอยเชื่อมมีค่าประมาณ 0.52 มม. และความลึก 0.2 มม. รอยเชื่อมเป็นรูปถ้วยในโหมคคอนคักชั่น แสดงดังรูป 4.2 ข) ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นของพลังงานที่ ชิ้นงานมีค่าไม่สูงมากและมีการกระจายความร้อนของพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปยังบริเวณใกล้เคียง การ ละลายของโลหะเกิดเมื่อพลังงานเลเซอร์ที่จุดตกกระทบมีค่าเพียงพอต่อการหลอมละลายโลหะ ประกอบกับ เวลาของพัลส์ช่วงขบวนการหลอมละลายที่ยาว ทำให้ได้รอยเชื่อมที่กว้าง 0.52 มม. มีค่ามากกว่าขนาดของ ลำแสงเลเซอร์ 0.3 มม. จะเห็นการกระเด็นของโลหะที่ขอบรอยต่อด้านบน เนื่องจากโลหะตอบสนองต่อการ เปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ถูกดูดกลืนอย่างรวดเร็ว เพราะค่า Thermal diffusivity วัสดุเงินมีค่ามาก การ เปลี่ยนแปลงจากสถานะของแข็งเป็น โลหะหลอมละลายเกิดอย่างรวดเร็ว แต่การที่พัลส์เลเซอร์หยุดปล่อย พลังงานอย่างช้าๆ ทำให้ฟองอากาศที่เกิดระหว่างขบวนการหลอมละลาย ลอยตัวผู้ผิวหน้าและหลุดออกจาก บ่อหลอมละลายก่อนที่โลหะหลอมละลายจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ส่วนลักษณะของพัลส์แบบ สี่เหลี่ยม ให้ขบวนการถ่ายเทพลังงานกับวัสดุอย่างรวดเร็ว ขบวนการหลอมละลายที่ยาวนาน และ ขบวนการเย็นตัวที่ฉับพลัน แสดงดังรูป 4.2 ค) ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามีการกระเด็นของโลหะที่ขอบบนของรอย เชื่อม มีฟองอากาศหรือตามดเกิดอยู่ภายในรอยเชื่อม เนื่องจากลักษณะพัลส์สี่เหลี่ยมถ่ายเทพลังงานให้กับ วัสดุอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานได้รับพลังงานอย่างฉับพลันและถูกนำไปเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว อย่างรวดเร็ว ประกอบกับโลหะหลอมละลายมีการดูดกลืนพลังงานที่ดีกว่าสภาพของแข็ง ทำให้ความ หนาแน่นของพลังงานที่โลหะหลอมละลายมีค่าสูงขึ้น รอยเชื่อมที่ได้เป็นลักษณะคีย์โฮโมค ซึ่งส่วนใหญ่มี ความกว้างของรอยเชื่อมที่แคบกว่าโหมคคอนคักชั่น แต่เนื่องจากระยะเวลาของพัลส์ที่ยาว และการกระจาย ความร้อนออกจากบ่อหลอมละลายไปยังบริเวณใกล้เคียง จึงทำให้ได้รอยเชื่อมมีขนาดความกว้าง 0.78 มม. ซึ่งกว้างขนาดของลำแสงเลเซอร์ 0.3 มม. ที่ให้รอยเชื่อมที่ลึก ระหว่างขบวนการหลอมละลายเกิดการแทรก ตัวของแก๊สอากาศภายในบ่อหลอมละลาย ซึ่งต่อมาแก๊สกลายสภาพเป็นฟองอากาศ เมื่อเลเซอร์พัลส์หยุดให้ พลังงานขบวนการหลอมละลายเข้าสู่ขบวนการเย็นตัว ฟองอากาศไม่สามารถลอยตัวไปยังผิวหน้าของบ่อ หลอมละลายได้ทันเวลา ฟองอากาศจึงถูกกักอยู่ภายในรอยเชื่อมดังรูป

เลเซอร์มีลักษณะของรูปแบบพัลส์ขาลงเป็นลบ กำลังเลเซอร์ 5.0 กิโลวัตต์ และขนาดของ ลำแสงเลเซอร์ 0.3 มม เวลาพัลส์จาก 4.0 มิลลิวินาที ให้รอยเชื่อมดังรูป 4.2 ข) และเมื่อทำการเพิ่มเวลาพัลส์ เป็น 5.0 มิลลิวินาที โดยตัวแปรเลเซอร์อื่นคงเดิม รอยเชื่อมในแนวตัดขวาง แสดงดังรูป 4.3 การเพิ่มเวลา พัลส์เป็นผลให้เกิดขบวนการหลอมละลายที่นานขึ้น เกิดการหลอมละลายของโลหะที่มากขึ้น ทำให้เกิดรอย เชื่อมที่กว้างขึ้นจาก 0.52 เป็น 0.58 มม. อีกทั้งยังเกิดการแทรกตัวแก๊สที่กลายสภาพเป็นฟองอากาศภายในบ่อ หลอมละลายมากขึ้น เป็นผลที่รอยเชื่อมเกิดฟองอากาศหรือตามดมากขึ้นดังภาพ รวมทั้งยังเกิดการกระเด็น ของโลหะที่เด่นชัดอีกด้วย

เลเซอร์มีลักษณะของรูปแบบพัลส์ขาลงเป็นลบ กำลังเลเซอร์ 5.0 กิโลวัตต์ เวลาพัลส์จาก 4.0 มิลลิวินาที และขนาดของลำแสงเลเซอร์ 0.3 มม ให้รอยเชื่อมดังรูป 4.2 ข) และเมื่อทำการลดขนาดของ

ลำแสงจาก 0.3 มม. เป็น 0.2 มม. ขนาดของลำแสงเลเซอร์ที่เล็กลงเป็นผลให้ความหนาแน่นของพลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบและถูกดูดกลืนมีค่าสูงขึ้น การหลอมละลายของโลหะเกิดมากขึ้น รวดเร็วขึ้น เปิดโอกาสให้มีการแทรกตัวของแก๊สจากบรรยากาศมากขึ้น เป็นผลให้เกิดรอยเชื่อมที่ลึกขึ้นจากความลึก 0.2 มม. เป็น 0.38 มม. แก๊สที่กลายสภาพเป็นฟองอากาศในรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูป 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงรอยเชื่อมของรูปแบบพัลส์เลเซอร์ข้างเป็นลบ เมื่อเพิ่มเวลาพัลส์เป็น 5.0 msec



รูปที่ 4.4 แสดงรอยเชื่อมของรูปแบบพัลส์เลเซอร์ข้างเป็นลบ เมื่อลดขนาดของลำแสงเลเซอร์เป็น 0.2 มม.

4.2 งานเชื่อมวัสดุทองแผ่นบาง

การเชื่อมวัสดุทองคำต้องการความหนาแน่นของพลังงานที่น้อยกว่าวัสดุเงิน วัสดุทองคำที่บางจึงมีความยากในการเชื่อมมากกว่าวัสดุเงิน เมื่อนำแผ่นทองความบางประมาณ 0.2 มม. มาทำการตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมพื้นผ้า จากนั้นทำการตัดชิ้นงานเป็นทางยาว และนำไปเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่ลักษณะของพัลส์ที่แตกต่างกัน ลดกำลังเลเซอร์เป็น 1.4 กิโลวัตต์ และเวลาพัลส์ 1.6 มิลลิวินาที ส่วนขนาดของลำแสงเลเซอร์ 0.2 มม. แสดงผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.5

จากการทดลองเลเซอร์พัลส์แบบรูปสี่เหลี่ยม มีความหนาแน่นของพลังงานที่ตกกระทบชิ้นงานมากที่สุด เกิดการทะลุของชิ้นงานด้านบนสุดของรูป ส่วนการเปลี่ยนพัลส์เป็นแบบขาลงเป็นลบ ทำให้การทะลุที่ชิ้นงานมีขนาดความกว้างของรูที่แคบลง ทำให้เห็นว่าพัลส์ลักษณะนี้ให้ความหนาแน่นของพลังงานที่ชิ้นงานต่ำกว่าพัลส์รูปสี่เหลี่ยม ส่วนพัลส์ลักษณะอื่นๆ คือ แบบค่อยๆขึ้นและลง และแบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถทำให้เกิดการละลายของโลหะได้เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะ อีกทั้งระยะเวลาของพัลส์ที่สั้นเกินกว่าจะเกิดการถ่ายเทพลังงานในรูปความร้อนเพื่อนำไปช่วยทำให้เกิดการหลอมละลายวัสดุทอง



รูปที่ 4.5 การเชื่อมแผ่นเงินที่ลักษณะของเลเซอร์พัลส์ที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

บทสรุป

การทดลองการเชื่อมวัสดุเงินและทอง โดยมีลักษณะเลเซอร์พัลส์แบบต่างๆ เป็นการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพลังงานต่อเวลา ในขบวนการคับปลิ่ง ขบวนการหลอมละลาย และ ขบวนการเย็นตัว จึงทำให้ได้โหมครอยเชื่อม ความกว้าง ความลึก และคุณภาพของรอยเชื่อมที่ขึ้นกับรูปแบบพัลส์เลเซอร์

5.1 สรุปผลวิจัย

ภาพถ่ายรอยเชื่อมวัสดุเงินด้านบนที่ได้จากลักษณะเลเซอร์พัลส์แบบต่างๆ แสดงดังรูป 4.1 การเชื่อมแบบพัลส์เลเซอร์แบบขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง ใ้รอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์เนื่องด้วยความหนาแน่นของพลังงานที่ถูกดูดกลืนที่ชิ้นงานมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มเวลาให้กับขบวนการหลอมละลายให้มากขึ้นและลดจำนวนขบวนการเย็นลงในรูปพัลส์แบบค่อยๆขึ้นและลง ทำให้เกิดการละลายของโลหะมากขึ้น เป็นผลให้เกิดรอยเชื่อมที่ขยายเป็นวงกว้าง แต่ความลึกของรอยเชื่อมที่ได้ขึ้นแสดงดังรูป 4.2 รอยเชื่อมมีขนาดความลึกเพิ่มมากขึ้นถ้าขบวนการหลอมละลายมีระยะเวลาที่มากขึ้น ในรูปพัลส์เป็นแบบขาลงเป็นลบ ใ้รอยเชื่อมที่ลึก 0.2 มม. และรูปพัลส์แบบสี่เหลี่ยมใ้รอยเชื่อมที่ลึกมากกว่า 1 มม. อีกวิธีที่สามารถเพิ่มความความลึกของรอยเชื่อมใ้กับชิ้นงานคือการลดขนาดของลำแสงเลเซอร์ แสดงดังรูป 4.4

ขบวนการคับปิ้งพลังงานที่ตกกระทบ มีผลต่อการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นโลหะหลอมละลาย รูปพัลส์แบบขาลงเป็นลบและแบบสี่เหลี่ยมใ้การเปลี่ยนแปลงพลังงานอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการกระจายของโลหะ splatter มากกว่าพัลส์เลเซอร์ชนิดอื่น แสดงดังรูปที่ 4.1 แต่รูปพัลส์แบบสี่เหลี่ยมมีระยะเวลาหลอมละลายที่ยาวนานกว่า ประกอบกับค่าการดูดกลืนพลังงานของเลเซอร์ที่วัสดุเงินหลอมละลายมีค่าสูงที่สถานะของเหลว ความหนาแน่นของพลังงานจึงมีค่ามากกว่า ผลที่ได้จึงเกิดรอยเชื่อมที่กว้างและลึกที่สุด

ขบวนการเย็นตัวมีผลต่อฟองอากาศหรือตามดที่รอยเชื่อม การเย็นตัวที่รวดเร็วของรูปพัลส์แบบสี่เหลี่ยมใ้รอยตามดแทรกอยู่ทั่วไปในรอยเชื่อมแสดงดังรูป 4.2 ค) ส่วนรูปพัลส์แบบขาลงเป็นลบใ้ขบวนการเย็นตัวอย่างช้าๆ ทำให้ฟองอากาศที่แทรกอยู่ภายในบ่อหลอมละลาย มีโอกาสหนีไปยังผิวบ่อหลอมละลายได้ทันก่อนที่ โลหะหลอมละลายจะหลายสภาพเป็นของแข็ง จึงไม่ปรากฏตามดหรือฟองอากาศจากพัลส์แบบนี้แสดงดังรูป 4.2 ข) แต่อย่างไรสำหรับรูปพัลส์แบบขาลงเป็นลบแบบเดิม แต่ทำการเพิ่มเวลาของพัลส์เลเซอร์ หรือการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานเลเซอร์โดยการลดขนาดของลำแสงเลเซอร์ ดังรูป 4.3 และรูป 4.4 ตามลำดับ เป็นการเพิ่มการแทรกตัวของแก๊สระหว่างขบวนการหลอมละลาย ต่อมาภายหลังแก๊สหลายสภาพเป็นฟองอากาศ จึงทำให้มีฟองอากาศและตามดเพิ่มขึ้น

ลักษณะของพัลส์ต่อการเชื่อมยังมีผลต่อความหนาของชิ้นงานอีกด้วย การเชื่อมวัสดุทองแผ่นบาง แสดงให้เห็นว่าลักษณะเลเซอร์พัลส์แบบต่างๆ ให้ระดับความหนาแน่นของพลังงานที่แตกต่างกัน รูปพัลส์แบบสี่เหลี่ยมให้ความหนาแน่นของพลังงานสูงที่สุดจึงเกิดการทะลุของชิ้นงาน เป็นรูปกว้างกว่าพัลส์แบบขาลงเป็นลบ และพัลส์ลักษณะอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ลักษณะของพัลส์ต่อการเชื่อม มีผลต่อขบวนการค้ำปิ้ง ขบวนการหลอมละลาย และขบวนการเย็นตัว แต่ขณะเดียวกันเพื่อให้ได้การเชื่อมบางและหนาด้วยเลเซอร์โดยมีรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ คือมีค่าความลึกและความกว้างของรอยเชื่อมที่เพียงพอ ปรากฏจากข้อเสียเรื่อง splatter ตามค ควรรีความสำคัญกับ ตัวแปรอื่นที่นอกเหนือจากลักษณะของพัลส์ กล่าวคือ

1. ขบวนการค้ำปิ้งเกี่ยวเนื่องโดยตรงต่อพลังงานงานตกกระทบและพลังงานที่ถูกดูดกลืนที่วัสดุเป้าหมาย ขึ้นตัวแปรอื่น อาทิ สีและความสกปรก วัสดุสีค้ำย้อมดูดกลืนพลังงานแสงเลเซอร์ได้ดีกว่าวัสดุเงินที่ผิวเป็นเงา
2. ผลของการขบวนการค้ำปิ้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณภาพผิว อาจนำมาซึ่ง splatter ฟองอากาศ และตามคที่รอยเชื่อม ดังนั้นควรมอนิเตอร์ตัวแปรเลเซอร์อื่นที่มีผลต่อการเชื่อมคือ กำลังเลเซอร์ ขนาดลำแสงเลเซอร์ เวลาพัลส์
3. การลดการกระจายของโลหะ หรือ splatter ไม่ควรใช้พลังงานการเชื่อมที่สูง เป็นผลให้ได้การเชื่อมในโหมดคอนดักชัน เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานที่ชิ้นงานต่ำ
4. เพื่อป้องกันการแทรกตัวของแก๊สในบ่อหลอมละลาย เป็นผลให้เกิดฟองอากาศและตามค ควรมีการใช้แก๊สเฉื่อย
5. การเชื่อมโลหะที่มีแผ่นบางมาก ควรใช้พัลส์เลเซอร์ที่มีความกว้างน้อยกว่า มิลลิวินาที หรือใช้เลเซอร์ระบบเพิ่มโตเซชันเลเซอร์ ที่มีค่าพลังงานเฉลี่ยต่ำ แต่ค่าพลังงานพีกสูงในการเชื่อม ทำให้การกระจายพลังงานไปยังบริเวณใกล้เคียงเป็นขบวนการที่เกิดช้ากว่าการให้พลังงานที่มีค่าความหนาแน่นสูงของเลเซอร์

บรรณานุกรม

- Beck, M., Berger, P. and Hugel, H. (1995). The Effect of Plasma Formation on Beam Focusing in Deep Penetration Welding with CO₂ laser. J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 28. no. 12. pp. 2430-2442.
- Bernnett, J.M. and Ashley, E.J. (1965). Infrared Reflectance and Emittance of Silver and Gold Evaporated in Ultrahigh Vacuum. Applied Optics, vol. 4, no. 2, pp. 221-224.
- Brown, D. (2003). Laser Welding Basics Primary Adjustable Welding Parameters. Bench Magazine. Fall issue. vol. 3. issue 2. pp. 78-83.
- Davis, J. R. (2003). Handbook of material for medical device. ASM International: USA.
- Dawes, C. (1992). Laser Welding. Woodhead Publishing Ltd: England.
- Dowden, J., Kapadia, P. and Postacioglu, N. (1989). An Analysis of the Laser-Plasma Interaction in Laser Keyhole Welding. J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 22. no. 6. pp. 741-749.
- Duley, W. W. (1998). Laser welding. John Wiley & sons, Inc: Canada.
- Faerber, M., Danzer, W., Hartl, J. May 2003. Laser Welding Beyond Limits. Industrial Laser Solutions Magazine. (Online): <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/laser-welding-beyond-limits.html>.
- Ion, J. C. (2005) Laser Processing of Engineering Materials. Elsevier Butterworth-Heinemann: MA.
- Kugler, T. May 2003. Advanced Modulation for Welding. Industrial Laser Solutions Magazine. (Online): <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/advanced-modulation-for-welding.html>.
- Mazumder, J. (1997). ASM Handbook v.6 Welding, Brazing, and Soldering (4 th ed.). ASM International.
- Messler, R. W. , Jr. (1999). Principles of Welding. John Wiley & sons, Inc: Canada.

- Petzow, G. (1999). Metallographic Etching. ASM international: USA.
- Semark, V. V., Steel, R. J., Fuerschbach, P. W. and Damkroger, B. K. (2000). Role of Beam Absorption in Plasma During Laser Welding. J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 33, no. 10. pp. 1179-1185.
- Sibillano, T., Ancona, A., Berardi, V. and Lugara, P. M. (2005). Correlation Analysis in Laser Welding Plasma. Optics Comm. vol. 251, issues. 1-3. pp 139-148.
- Smith, D., Burnett, A. and Gordon, T. (1972). Laser Welding of Gold Alloy. J. Dent. Res., vol. 51, no. 1, pp. 161-167.
- Steen, W. M. (2003) Laser Material Processing. Springer-Verlag: London.
- Togaya T. and Shinosaki T. (1999). Introduction of laser welding in dentistry (1). Quintessence Dent Technol. vol. 24, no 6, pp. 740-749.
- Wang, R. and Welsch, G. E. (1995). Joining titanium materials with tungsten inert gas welding, laser welding, and infrared brazing. J. Prosthet. Dent. vol.74. issue 5, pp 521-530.
- Watanabe,I., Topham, D. (2006). Laser Welding of Cast Titanium and Dental Alloys Using Argon Shielding. J. of Prosthodontics. vol. 15. no. 2. pp. 102-107.
- Wright, J. (2002). Jewellery-Related Properties of Platinum. Platinum Metals Rev. vol. 46. no. 2. pp.66-72.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาวสุกัญญา นามสกุลเตชะไตรภพ

(ภาษาอังกฤษ) Miss Sukanya Tachatriphop

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

สาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟตอนิกส์

สำนักวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โทร 044-22-4643

โทรสาร 044-22-4185

E-mail: tsukanya@ccs.sut.ac.th

ประวัติการศึกษา

1992 B.S. (Physics) King Mungkut Institute of Technology Thonburi, Thailand

1995 M.S. (Physics) King Mungkut Institute of Technology Thonburi, Thailand

1997 M.S. (Electrical Engineering) University of Maryland, College Park, USA

2002 Ph.D. (Electrical Engineering) University of Maryland, College Park, USA

Major: ElectroPhysics: Laser Technology and Photonics

Minor: MicroElectronics: Semiconductor Device