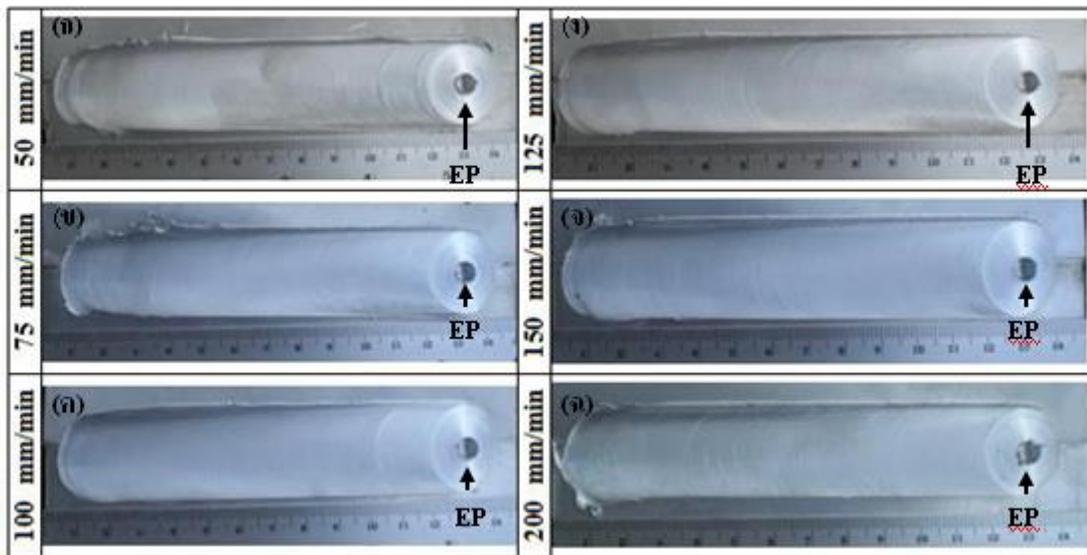


บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

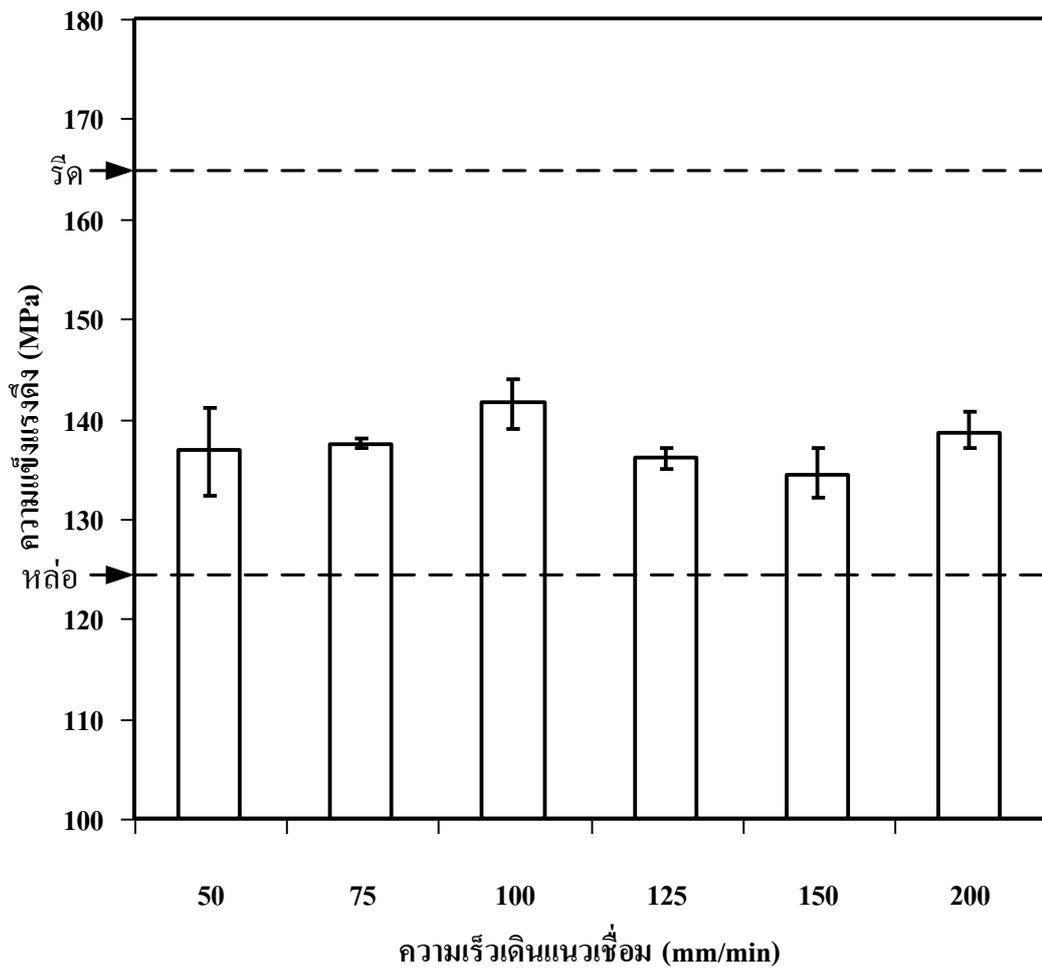
การดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อระหว่างแผ่นอลูมิเนียม 6063 ในสภาวะแผ่นรีดและแผ่นหล่อด้วยวิธีการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ได้ผลคงสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้และผลการทดลองที่ได้คาดว่าสามารถใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้งานจริงในงานอุตสาหกรรมต่อไป ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมซึ่งประกอบไปด้วย การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือเชื่อม การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการป้อน ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.1 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min



รูปที่ 4.1 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

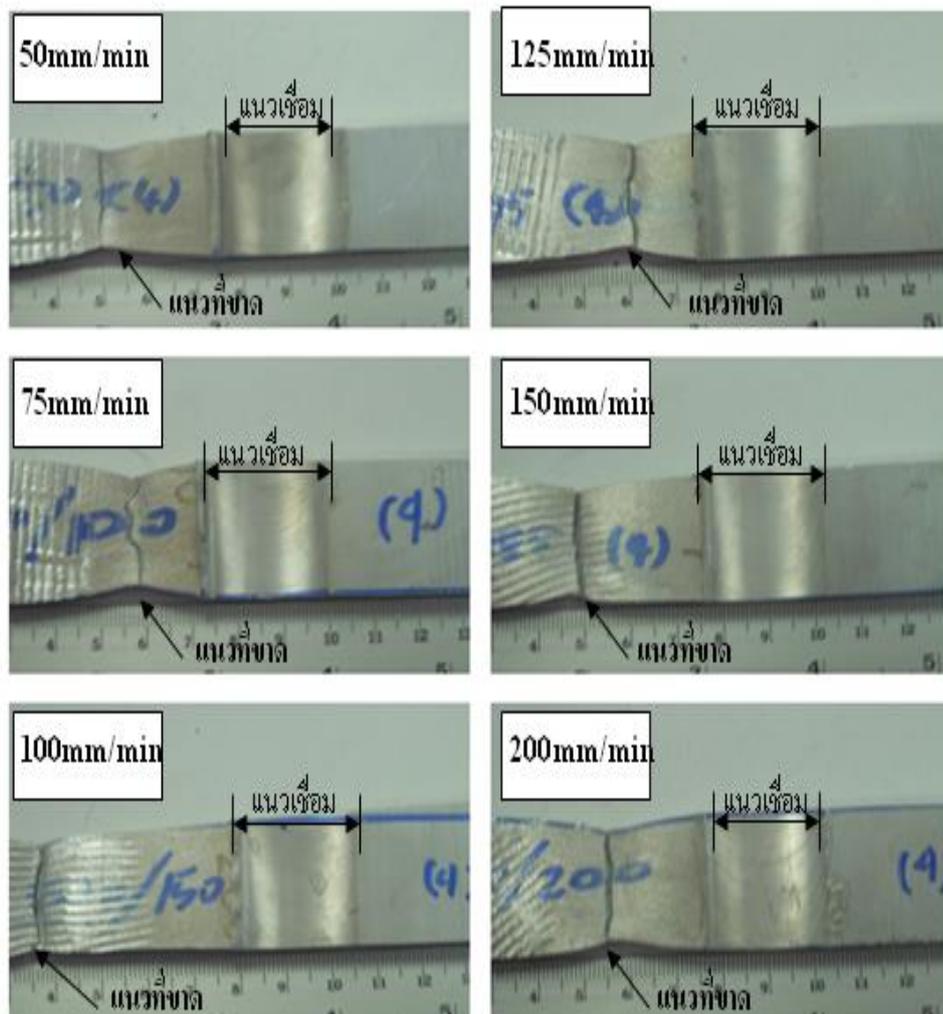
ตัวแปรการเชื่อมสำคัญที่ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 500 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ผลการทดลองที่น่าสนใจมีดังนี้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของรอยต่อและความเร็วเดินแนวต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 500 rpm

รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้ารอยต่อที่ผ่านการเชื่อมด้วยสภาวะความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ พบว่าผิวหน้ารอยเชื่อมทุกๆ สภาวะแสดงความราบเรียบและสม่ำเสมอของผิวแนวเชื่อม ไม่มีจุดบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นบนผิวหน้าแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม พบจุดบกพร่องรูปวงกลมขนาดเล็กใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมเกิดขึ้น รุกกลมที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นจากการถอนตัวกวนที่กำลังหมุนขณะทำการเชื่อมออกจากแนวเชื่อม จุดบกพร่องแบบนี้เป็นจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นทุกๆ แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ไม่สามารถกำจัดออกได้ แต่สามารถทำการเชื่อมอุดรูด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอื่นๆ ได้ [13] พิจารณาด้านข้างของผิวหน้าแนวเชื่อมพบว่า มีครีบบนของอลูมิเนียมที่ถูกกวน อัด และดันออกมาด้านข้างของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามลักษณะและรูปร่างของครีบบนขนาดที่ค่อนข้างน้อยและเล็ก เปรียบเทียบกับรอยต่อชนของอลูมิเนียม 6063-T1 [6] ซึ่งเป็น

อลูมิเนียมเกรดเดียวกันแล้วพบว่า รูปแบบและลักษณะของครีบมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ หากรอยต่อของการเชื่อมใช้วัสดุชนิดเดียวกันแล้ว การรวมผสมกันของวัสดุที่ถูกกวนด้านล่างของบ่าเครื่องมือเชื่อมมีความสามารถรวมเข้าด้วยกันอย่างดีและต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเกิดแนวเชื่อมขึ้นทำให้อลูมิเนียมเกิดการดันออกมาอย่างต่อเนื่องเป็นครีบต่อเนื่องที่ด้านรีทริทิงของรอยต่อ คำกล่าวนี้สามารถพบได้ที่รอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดแบบอื่นๆ เช่น รอยต่ออลูมิเนียม 5083 และเหล็กกล้า SS400 [23] รอยต่ออลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าคาร์บอน 1015 [30] รอยต่ออลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 [10] หรือรอยต่ออลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [31] เป็นต้น



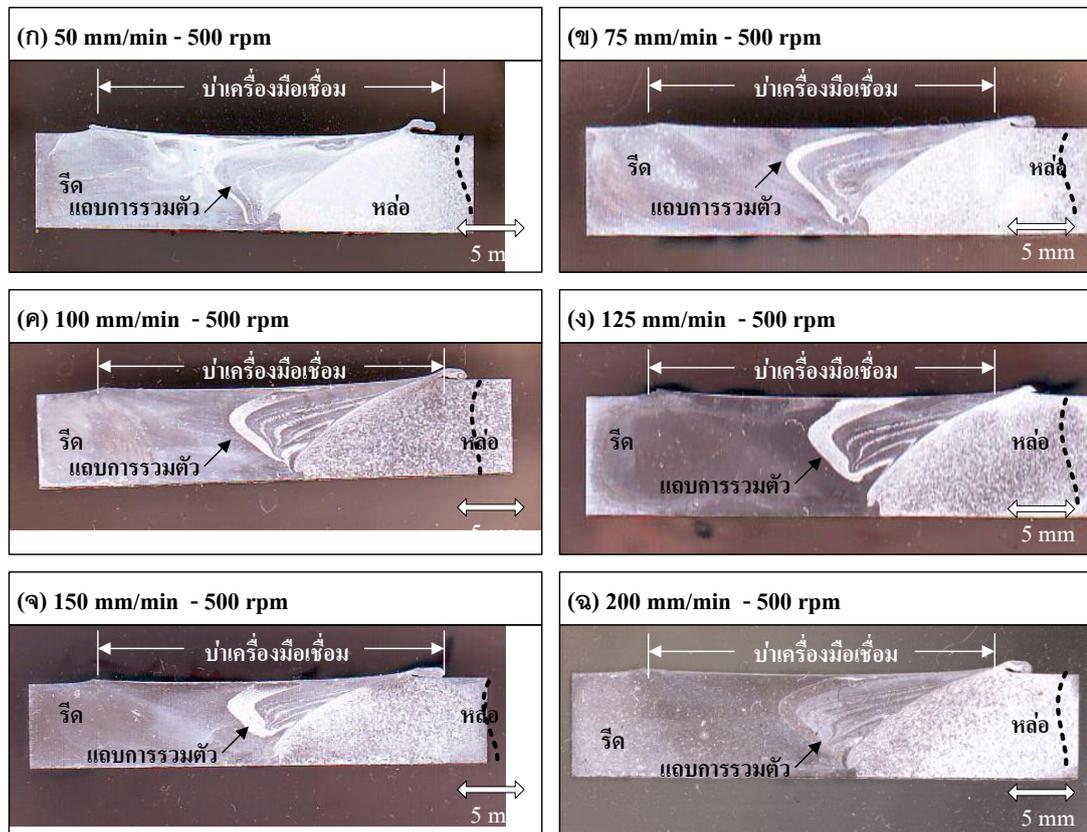
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

รอยต่อที่ได้ในรูปที่ 4.1 ถูกนำมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 โดยกำหนดให้เลือกชิ้นทดสอบ 6 ชิ้นจากรอยต่อที่เชื่อม 3 รอยต่อแบบสุ่ม แล้วนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test machine) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อประมาณ 5-10% แนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ได้จากสถานะการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 500 rpm คือ การเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 136.5 MPa ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 500 rpm ตัวกวนกวนเนื้ออลูมิเนียมขึ้นมาชนบ่าของตัวกวนในปริมาณที่น้อยทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยตามไปด้วย

รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min พบว่าตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงนั้นมีลักษณะการพังทลายคล้ายกัน กล่าวคือ ทุกสถานะการเชื่อมนั้นชิ้นทดสอบแรงดึงเกิดการพังทลายที่บริเวณโลหะหลักด้านตำแหน่งของแผ่นหล่อ ผลการทดลองที่ได้ยืนยันผลการทดสอบแรงดึงในรูปที่ 4.2 ได้เป็นอย่างดีถึงสาเหตุที่ทำให้รอยต่อทุกๆ สถานะการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน และรอยต่อหรือโลหะเชื่อมนั้นมีค่าความแข็งแรงมากกว่าโลหะหลักที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในที่นี้คือ อลูมิเนียม 6063 แผ่นรีด ความแตกต่างความแข็งแรงดึงในรูปที่ 4.2 พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงดึงในรูปที่ 4.3 ที่พบตำแหน่งการฉีกขาดเฉลี่ยของรอยต่อมีค่าประมาณ 10-30 มม.

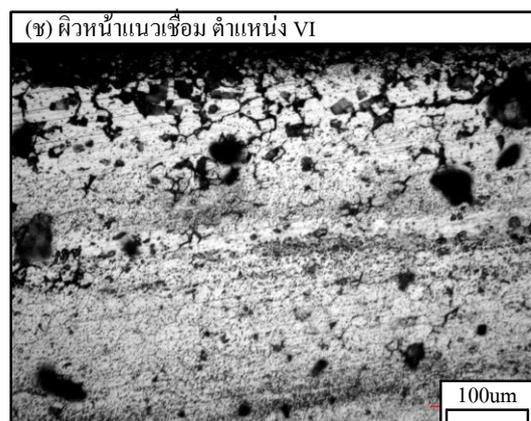
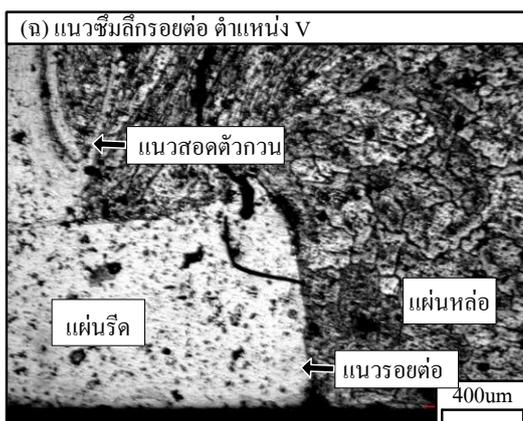
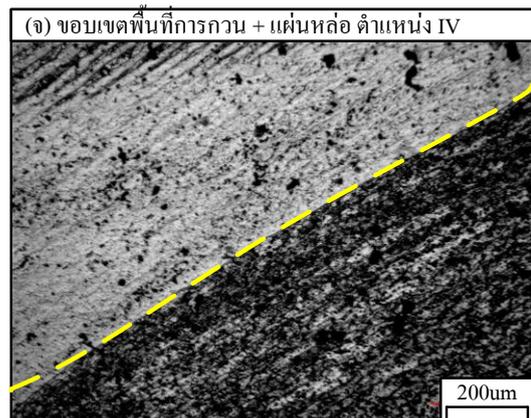
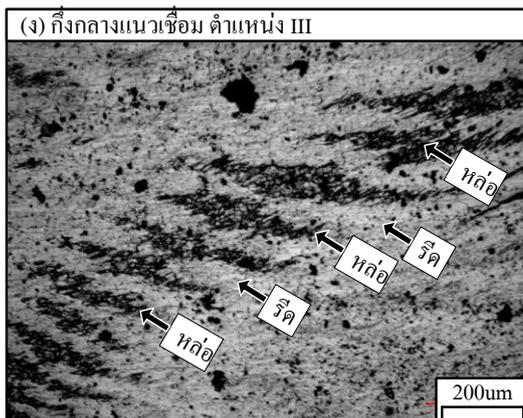
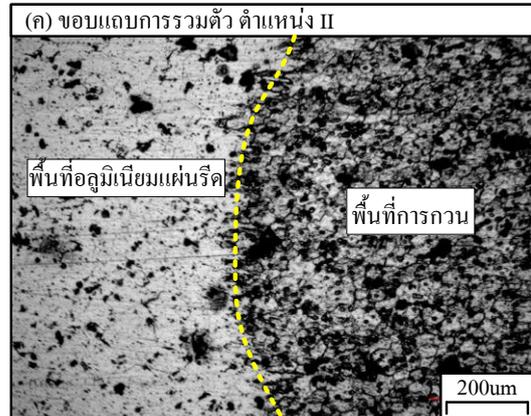
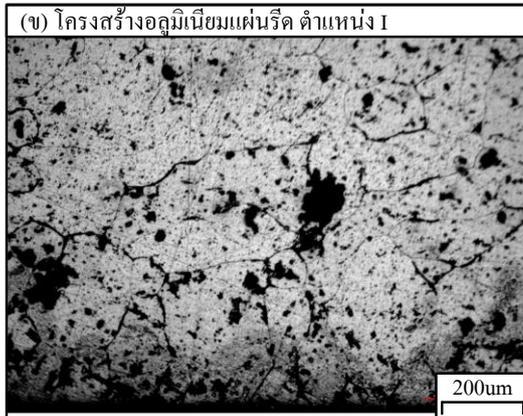
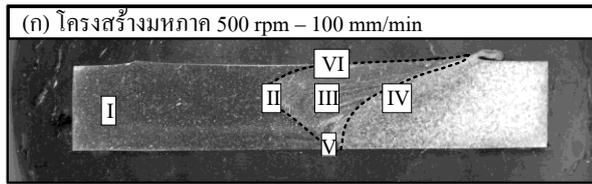
รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างสร้างมหภาคของรอยต่ออลูมิเนียมรีดและหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min โดยระนาบที่แสดงนั้นเป็นระนาบที่เตรียมจากการตัดตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อม และทิศทางการเชื่อมมีทิศทางที่พุ่งออกมาจากรูปถ่าย อลูมิเนียมแผ่นหล่อซึ่งถูกวางที่ด้านแอดวานซึ่งอยู่ด้านขวาของรูปถ่าย และอลูมิเนียมแผ่นรีดที่ถูกวางไว้ที่ด้านรีทริทซึ่งอยู่ด้านซ้ายของรูปถ่าย เส้นประด้านขวาของรูปถ่ายแต่ละความเร็วเดินแนวเชื่อม คือแนวการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึง โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่แสดงพบรอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ไม่ปรากฏจุดบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อมทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ทำการศึกษา แถบการรวมตัวของรอยเชื่อมมีความหนาขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำการวัดความหนาของแถบการรวมตัวพบว่ามีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 0.5 1.0 2.1 3.2 3.6 และ 3.5 มม. สำหรับความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของแถบการรวมตัวนี้คาดว่าอลูมิเนียมมีการรวมตัวการมากขึ้นเนื่องจากการเดินแนวเชื่อมที่มีความเร็วสูง และความเร็วรอบของตัวกวนที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นส่งผลโดยตรงต่อความรุนแรงของอลูมิเนียมที่มีการไหลวนด้านล่างของเครื่องมือเชื่อม และ

ทำให้วัสดุที่อ่อนตัวและไหลอยู่ด้านล่างของป่าเครื่องมือเชื่อมถูก กด อัด และดันให้รวมตัวกันเพิ่มมากขึ้น [14]



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

รูปที่ 4.5 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นริคและแผ่นหลอที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min ซึ่งแสดงความแข็งแรงสูงสุดในความเร็วนี้นี้ที่ 137 MPa โครงสร้างมหภาคของรอยต่อแสดงความสามารถในการผสมรวมของอลูมิเนียมที่ขึ้นรูปต่างวิธีการ คือ การริค และการหลอ เข้ากันได้เป็นอย่างดี ไม่มีจุดบกพร่องใดๆ เช่น รูตามด หรือความไม่สมบูรณ์ใดๆ เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าในรูปที่ 4.4 (ค) และรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าบริเวณแนวเชื่อมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่เป็นอลูมิเนียมแผ่นริคด้านซ้าย ส่วนที่เป็นอลูมิเนียมแผ่นหลอ และส่วนที่เป็นโลหะเชื่อมซึ่งแสดงความสามารถในการรวมตัวกันชัดเจนเป็นวงอย่างชัดเจน เรียกพื้นที่นี้ว่า “พื้นที่การกวน (Stir zone) หรือพื้นที่ทั้งหมดในเส้นประ” และเรียกพื้นที่ที่เกิดการขาดเป็นวงว่า “พื้นที่นั้กเกิด (Nugget zone)” [32]



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min

เนื่องจากอูมิเนียมที่ขจัดรวมในพื้นที่การกวนนี้มีรูปแบบเป็นวงรีคล้ายหัวหอม (Onion ring) [18] ทำการตรวจสอบพื้นที่ต่างๆ บริเวณรอยเชื่อมพบข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

รูปที่ 4.5 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ตำแหน่งที่ I ในรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งเป็นพื้นที่ของอูมิเนียมแผ่นรีดพบการเรียงตัวโครงสร้างเม็ดเกรนที่มีรูปร่างไม่กลมมนมากนัก แต่มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) ตามมาตรฐาน ASTM E112 [33] พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ $35 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นขนาดเม็ดเกรนของอูมิเนียม 6063-T1 ที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมไทย และมีการนำมาใช้ในการทดสอบทำการเชื่อมในหลายๆ สภาวะ [6,10,29,31]

รูปที่ 4.5 (ค) แสดงขอบเขตของพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) แต่ไม่ถูกกวนของแผ่นรีดซึ่งอยู่ที่ด้านซ้ายของเส้นประ และพื้นที่การกวนหรือวงแหวนหัวหอมซึ่งอยู่ที่ด้านขวาของเส้นประ ในตำแหน่งที่ II ของรูปที่ 4.5 (ก) พื้นที่ด้านซ้ายของเส้นประแสดงให้เห็นว่าเนื้อเดิมของอูมิเนียมนั้นถึงแม้จะได้รับความร้อนจากการเชื่อมแต่รูปแบบและขนาดของเม็ดเกรนยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนพบว่ามีขนาดเท่ากับขนาดเกรนเฉลี่ยในรูปที่ 4.5 (ข) คือประมาณ $35 \mu\text{m}$ ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาด้านขวาของเส้นประในรูปที่ 4.5 (ข) แล้วพบว่าอูมิเนียมในพื้นที่การกวนนั้นทำให้เกิดการจัดเรียงของเม็ดเกรนในพื้นที่การกวนใหม่อีกครั้ง ทำให้ได้เม็ดเกรนใหม่ที่มีขนาดเล็กและละเอียด เม็ดเกรนในพื้นที่การกวนนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดผลึกใหม่แบบไดนามิกส์ (Dynamics Recrystallization) หรือการเกิดเม็ดผลึกแบบใหม่ที่เกิดจากแรงกดอัดอย่างรุนแรง ดังได้แสดงไว้ในงานวิจัยของ Jata and Semiatin [32] ขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยของพื้นที่การกวนนี้มีค่าประมาณ $19.53 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอูมิเนียมแผ่นรีดประมาณกึ่งหนึ่ง

รูปที่ 4.5 (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคของขอบเขตชั้นวงแหวนหัวหอมในตำแหน่งที่ III ของรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งเป็นพื้นที่การกวนของแนวเชื่อมพบเห็นเป็นรอยแตกต่างอย่างชัดเจนแบ่งเป็นพื้นที่สีขาวซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าเป็นพื้นที่ของอูมิเนียมที่มากจากด้านอูมิเนียมแผ่นรีด และพื้นที่สีดำดังแสดงด้วยลูกศรหล่อ คือพื้นที่ของอูมิเนียมที่มากจากด้านอูมิเนียมแผ่นหล่อ อย่างไรก็ตามถึงแม้พื้นที่ทั้งสองสามารถระบุความแตกต่างได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยของพื้นที่ทั้งสองแล้วพบว่า ขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ $19.53 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยในพื้นที่การกวนดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) พื้นที่การเรียงสลับกันสองพื้นที่ของวัสดุที่แตกต่างกันนี้มีลักษณะคล้ายกับผลการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนอูมิเนียม 2024 และ 6061 [18] ซึ่งเป็นการศึกษาเพื่ออธิบายรูปแบบการไหลของวัสดุที่อ่อนตัวภายใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม และการไหลเข้าร่วมตัวของวัสดุทำให้เกิดการประสานของวัสดุทั้งสอง

ด้านของรอยต่อ ซึ่งในพื้นที่การกวนบริเวณชั้นวงแหวนหัวหอมนั้น โครงสร้างจุลภาคได้แบ่งพื้นที่ของโลหะเชื่อมออกเป็นชั้นเรียงสลับกันไปมาของวัสดุทั้งสองชนิดที่ประกอบกันเป็นรอยต่อ

รูปที่ 4.5 (จ) แสดงขอบเขตของพื้นที่การกวนในตำแหน่งที่ IV ของรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งแสดงขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยประมาณ $19.53 \mu\text{m}$ ดังได้กล่าวผ่านมาซึ่งอยู่ที่ด้านซ้ายของเส้นประ และพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนของด้านอลูมิเนียมแผ่นหล่อซึ่งอยู่ที่ด้านขวาของเส้นประ ในที่นี้ไม่สามารถทำการวัดขนาดเกรนเฉลี่ยของอลูมิเนียมแผ่นหล่อได้ เนื่องจากโครงสร้างไม่ได้ประกอบเป็นรูปเกรนที่มีรูปร่างสมมาตรกลมมนแต่เม็ดเกรนมีรูปแบบคล้ายโครงสร้างงานหล่อ คือ โครงสร้างคล้ายเดนไดรต์

รูปที่ 4.5 (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวต่อของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อในตำแหน่งที่ V ของรูปที่ 4.5 (ก) ที่กึ่งกลางด้านล่างของรูปที่ 4.5 (ฉ) แสดงแนวรอยต่อดั้งเดิมที่ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และหากพิจารณาในแนวตั้งตามลูกศรชี้ ระยะที่ได้มีค่าประมาณ 0.1 มม. ซึ่งเป็นระยะที่ตัวกวนสอดลงมาในรอยต่อแต่ไม่ลึกจนถึงผิวด้านล่างของรอยต่อ จากนั้นในกรรมวิธีการเชื่อมที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ตัวกวนถูกสอดเข้าหาแผ่นรีดเป็นระยะทางเท่ากับ 0.1 มม. ทำให้เกิดระยะรอยต่อที่ทำการเชื่อมดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 4.5 (ฉ) พิจารณาพื้นที่บริเวณรอยต่อนี้ พบว่าการกวนอาจเกิดไทรุนแรงดังเกิดที่ด้านกึ่งกลางและด้านบนของรอยต่อที่เกิดเป็นพื้นที่การกวนและวงแหวนหัวหอม อย่างไรก็ตามจากการพิจารณารอยต่อบริเวณนี้พบว่าไม่ปรากฏความไม่สมบูรณ์ ตามค รูพรุน หรือความไม่เข้ากันของวัสดุทั้งสอง เนื่องจากบริเวณนี้เกิดการอัดตัวของอลูมิเนียมหล่อที่ถูกกวนเข้าสู่อลูมิเนียมแผ่นรีดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงพบลักษณะของอลูมิเนียมด้านขวาถูกกดอัดเสียรูปเข้าสู่ด้านแผ่นรีด

รูปที่ 4.5 (ซ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้าแนวเชื่อมของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อในตำแหน่งที่ VI ของรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่บริเวณภายใต้บำเครื่องมือเชื่อมและเป็นบริเวณที่มีความร้อนสูงสุดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โครงสร้างจุลภาคสามารถแบ่งออกชัดเจนให้เห็นถึงพื้นที่ของอลูมิเนียมทั้งสอง เม็ดเกรนมีขนาดเล็ก ละเอียด และสม่ำเสมอ

รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อถูกเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวแปรการเชื่อมประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 500 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ได้ผลสรุปดังนี้

- การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถทำการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อ
- ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 137 MPa คือ ความเร็วรอบตัวกวน 500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min