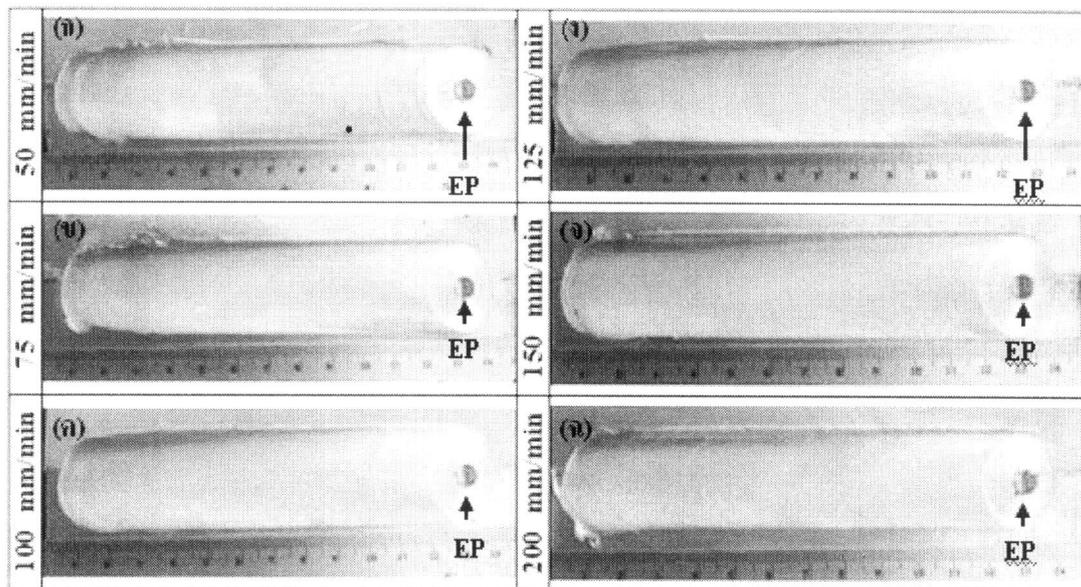


บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

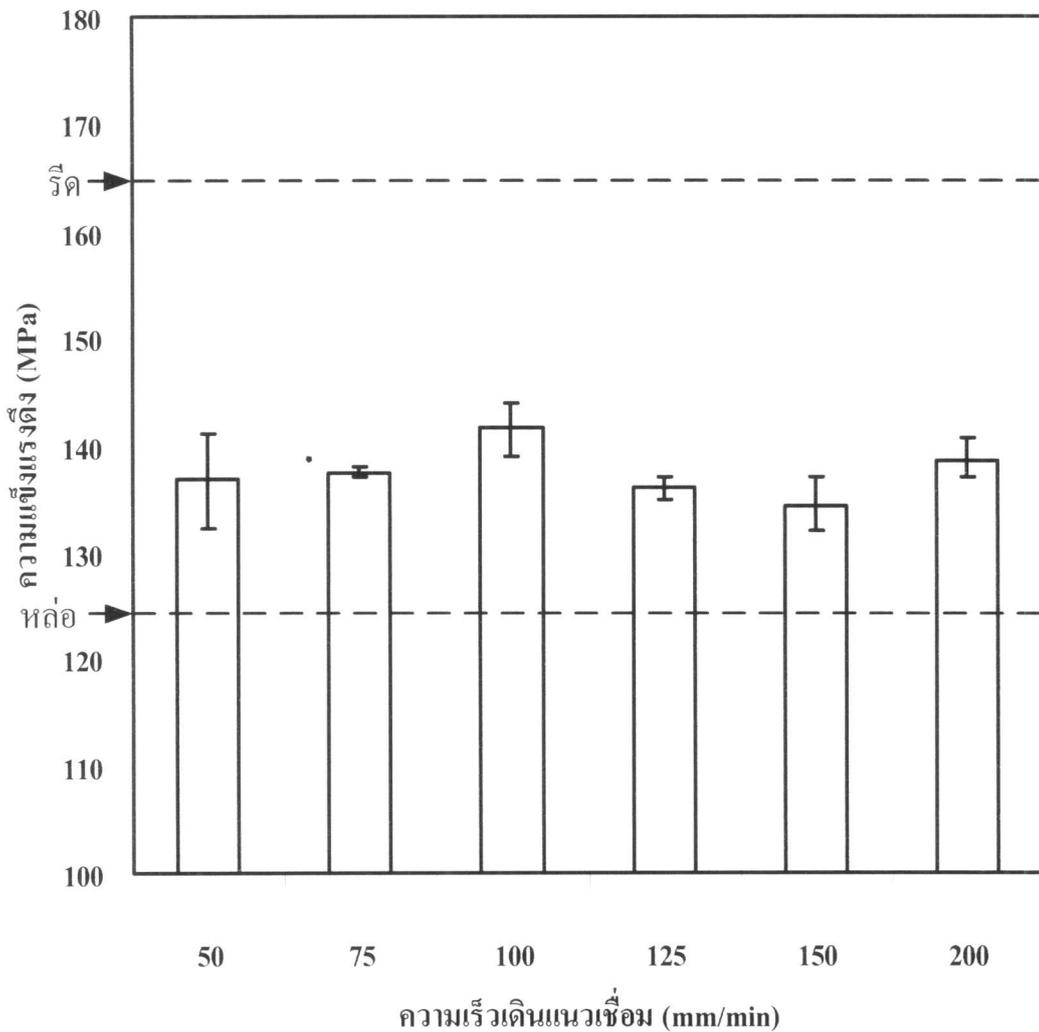
การดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อระหว่างแผ่นอลูมิเนียม 6063 ในสภาวะแผ่นรีดและแผ่นหล่อด้วยวิธีการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ได้ผลดังสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ และผลการทดลองที่ได้คาดว่าสามารถใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้งานจริงในงานอุตสาหกรรมต่อไป ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมซึ่งประกอบไปด้วย การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือเชื่อม การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการป้อน ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.1 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min



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

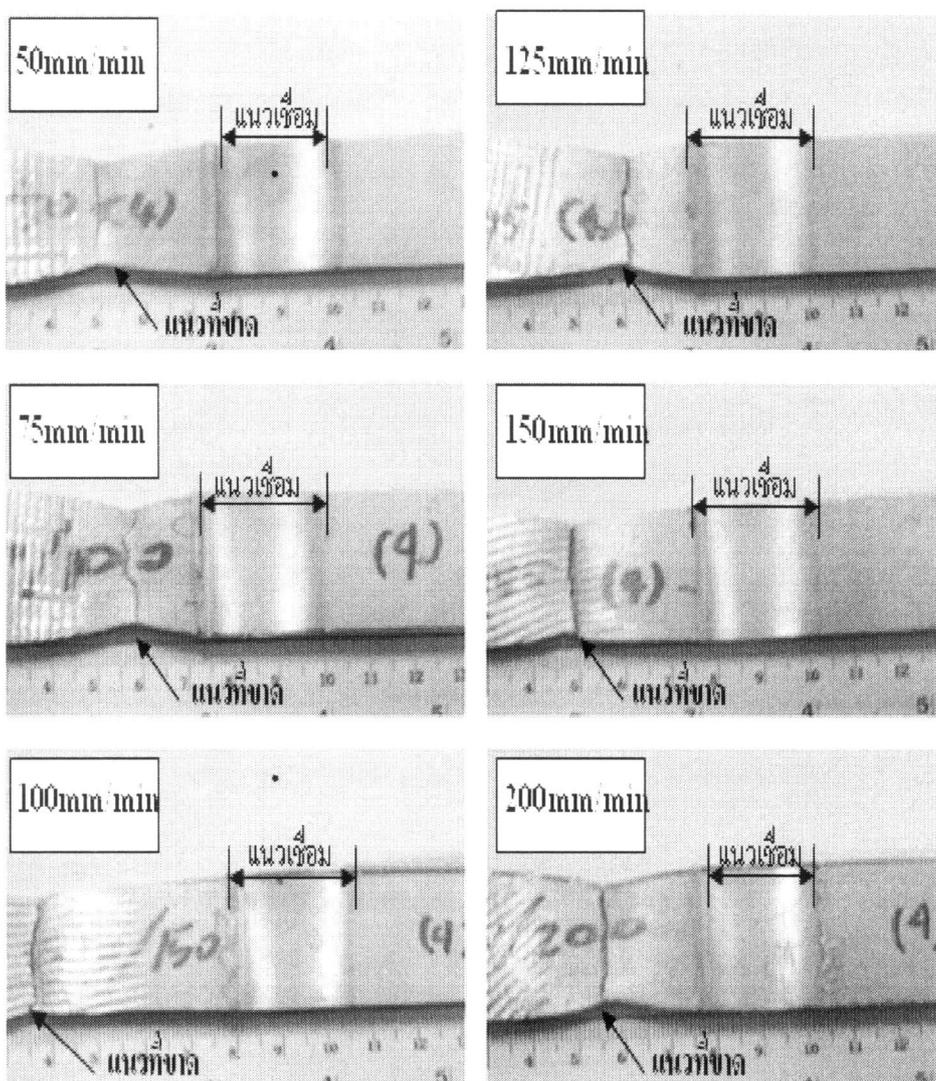
ตัวแปรการเชื่อมสำคัญที่ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 500 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ผลการทดลองที่น่าสนใจมีดังนี้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของรอยต่อและความเร็วเดินแนวต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 500 rpm

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

อลูมิเนียมเกรดเดียวกันแล้วพบว่า รูปแบบและลักษณะของครีบมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ หากรอยต่อของการเชื่อมใช้วัสดุชนิดเดียวกันแล้ว การรวมผสมกันของวัสดุที่ถูกกวนด้านล่างของบ่าเครื่องมือเชื่อมมีความสามารถรวมเข้าด้วยกันได้ดีและต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน 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

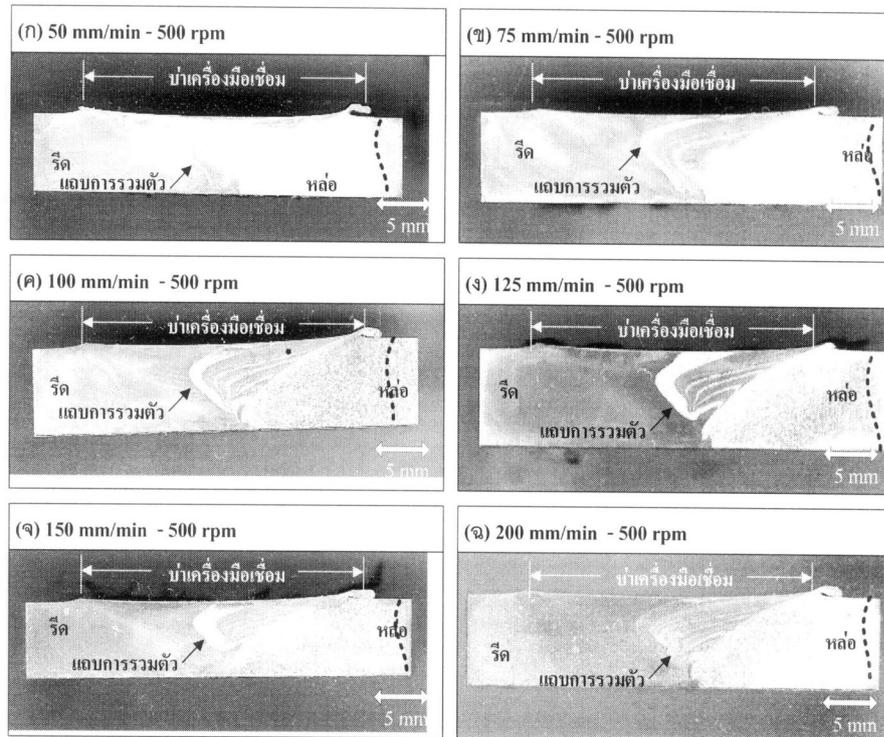
50-200 mm/min

รอยต่อที่ได้ในรูปที่ 4.1 ถูกนำมาเตรียมเป็นขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงดึงดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 โดยกำหนดให้เลือกขั้นตอนทดสอบ 6 ขั้นตอนจากรอยต่อที่เชื่อม 3 รอยต่อแบบสุ่ม แล้วนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test machine) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อประมาณ 5-10% แนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ได้จากสภาวะการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 500 rpm คือ การเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 136.5 MPa ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 500 rpm ตัวกวนกวนเนื้ออลูมิเนียมชั้นมาชนป่าของตัวกวนในปริมาณที่น้อยทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยตามไปด้วย

รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min พบว่าตำแหน่งการพังทลายของขั้นตอนทดสอบแรงดึงนั้นมีลักษณะการพังทลายคล้ายกัน กล่าวคือ ทุกสภาวะการเชื่อมนั้นขั้นตอนทดสอบแรงดึงเกิดการพังทลายที่บริเวณโลหะหลักด้านตำแหน่งของแผ่นหล่อ ผลการทดลองที่ได้ยืนยันผลการทดสอบแรงดึงในรูปที่ 4.2 ได้เป็นอย่างดีถึงสาเหตุที่ทำให้รอยต่อทุกๆ สภาวะการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน และรอยต่อหรือโลหะเชื่อมนั้นมีค่าความแข็งแรงมากกว่าโลหะหลักที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในที่นี้ คือ อลูมิเนียม 6063 แผ่นรีด ความแตกต่างความแข็งแรงดึงในรูปที่ 4.2 พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งการฉีกขาดของขั้นตอนทดสอบแรงดึงในรูปที่ 4.3 ที่พบตำแหน่งการฉีกขาดเฉลี่ยของรอยต่อมีค่าประมาณ 10-30 มม.

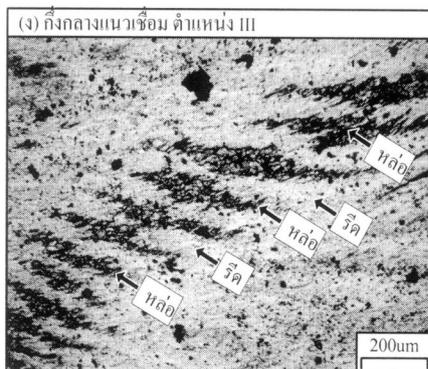
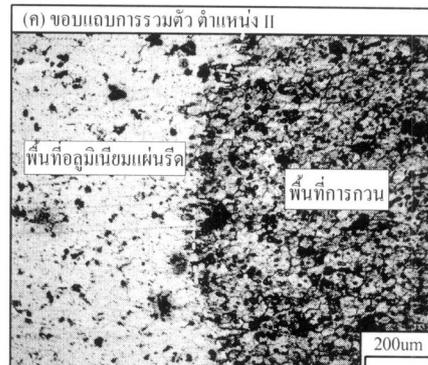
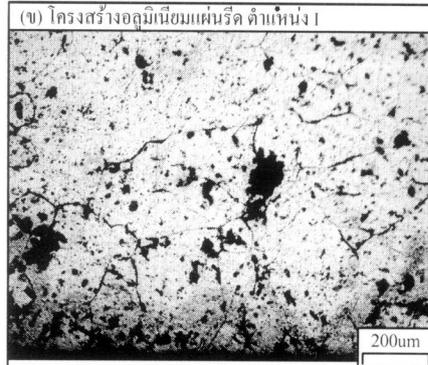
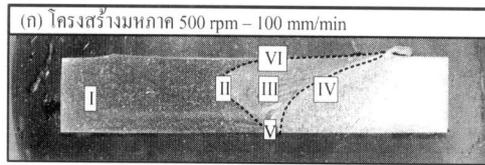
รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างสร้างมหภาคของรอยต่ออลูมิเนียมรีดและหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min โดยระนาบที่แสดงนั้นเป็นระนาบที่เตรียมจากการตัดตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อม และทิศทางการเชื่อมมีทิศทางที่พุ่งออกมาจากรูปถ่าย อลูมิเนียมแผ่นหล่อซึ่งถูกวางที่ด้านแอดวานซึ่งอยู่ด้านขวาของรูปถ่าย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

ทำให้วัสดุที่อ่อนตัวและไหลอยู่ด้านล่างของบ่าเครื่องมือเชื่อมถูก กด อัด และดันให้รวมตัวกันเพิ่มมากขึ้น [14]



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

รูปที่ 4.5 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min ซึ่งแสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดในความเร็วรอบนี้ที่ 137 MPa โครงสร้างมหภาคของรอยต่อแสดงความสามารถในการผสมรวมของอลูมิเนียมที่ขึ้นรูปต่างวิธีการ คือ การรีด และการหล่อ เข้ากันได้เป็นอย่างดี ไม่มีจุดบกพร่องใดๆ เช่น รูตามด หรือความไม่สมบูรณ์ใดๆ เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าในรูปที่ 4.4 (ค) และรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าบริเวณแนวเชื่อมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่เป็นอลูมิเนียมแผ่นรีดด้านซ้าย ส่วนที่เป็นอลูมิเนียมแผ่นหล่อ และส่วนที่เป็นโลหะเชื่อมซึ่งแสดงความสามารถในการรวมตัวกันชัดเจน เรียกพื้นที่นี้ว่า “พื้นที่การกวน (Stir zone)” หรือพื้นที่ทั้งหมดในเส้นประ” และเรียกพื้นที่ที่เกิดการขาดเป็นวงว่า “พื้นที่นั้กเกต (Nugget zone)” [32]



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min

เนื่องจากอลูมิเนียมที่ขดรวมในพื้นที่การกวนนี้มีรูปแบบเป็นวงรีคล้ายหัวหอม (Onion ring) [18] ทำการตรวจสอบพื้นที่ต่างๆ บริเวณรอยเชื่อมพบข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

รูปที่ 4.5 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ตำแหน่งที่ I ในรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งเป็นพื้นที่ของอลูมิเนียมแผ่นรีดพบการเรียงตัวของโครงสร้างเม็ดเกรนที่มีรูปร่างไม่กลมมนมากนัก แต่มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) ตามมาตรฐาน ASTM E112 [33] พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ $35 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นขนาดเม็ดเกรนของอลูมิเนียม 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) พื้นที่ด้านซ้ายของเส้นประแสดงให้เห็นว่าเนื้อเดิมของอลูมิเนียมนั้นถึงแม้จะได้รับความร้อนจากการเชื่อมแต่รูปแบบและขนาดของเม็ดเกรนยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนพบว่ามีขนาดเท่ากับขนาดเกรนเฉลี่ยในรูปที่ 4.5 (ข) คือประมาณ $35 \mu\text{m}$ ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาด้านขวาของเส้นประในรูปที่ 4.5 (ข) แล้วพบว่าอลูมิเนียมในพื้นที่การกวนนั้นทำให้เกิดการจัดเรียงของเม็ดเกรนในพื้นที่การกวนใหม่อีกครั้ง ทำให้ได้เม็ดเกรนใหม่ที่มีขนาดเล็กและละเอียด เม็ดเกรนในพื้นที่การกวนนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดผลึกใหม่แบบไดนามิกส์ (Dynamics Recrystallization) หรือการเกิดเม็ดผลึกแบบใหม่ที่เกิดจากแรงกดอัดอย่างรุนแรง ดังได้แสดงไว้ในงานวิจัยของ Jata and Semiatin [32] ขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยของพื้นที่การกวนนี้มีค่าประมาณ $19.53 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอลูมิเนียมแผ่นรีดประมาณกึ่งหนึ่ง

รูปที่ 4.5 (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคของขอบเขตชั้นวงแหวนหัวหอมในตำแหน่งที่ III ของรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งเป็นพื้นที่การกวนของแนวเชื่อมพบเห็นเป็นรอยแตกต่างอย่างชัดเจนแบ่งเป็นพื้นที่สีขาวซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าเป็นพื้นที่ของอลูมิเนียมที่มากจากด้านอลูมิเนียมแผ่นรีด และพื้นที่สีดำดังแสดงด้วยลูกศรห่อ คือพื้นที่ของอลูมิเนียมที่มากจากด้านอลูมิเนียมแผ่นหล่อ อย่างไรก็ตามถึงแม้พื้นที่ทั้งสองสามารถระบุความแตกต่างได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยของพื้นที่ทั้งสองแล้วพบว่า ขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ $19.53 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยในพื้นที่การกวนดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) พื้นที่การเรียงสลับกันสองพื้นที่ของวัสดุที่แตกต่างกันนี้มีลักษณะคล้ายกับผลการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนอลูมิเนียม 2024 และ 6061 [18] ซึ่งเป็นการศึกษาเพื่ออธิบายรูปแบบการไหลของวัสดุที่อ่อนตัวภายใต้ปาเครื่องมือเชื่อม 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) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่บริเวณภายใต้ปาเครื่องมือเชื่อมและเป็นบริเวณที่มีความร้อนสูงสุดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โครงสร้างจุลภาคสามารถแบ่งออกชัดเจนให้เห็นถึงพื้นที่ของอลูมิเนียมทั้งสอง เม็ดเกรนมีขนาดเล็ก สะเอียด และสม่ำเสมอ

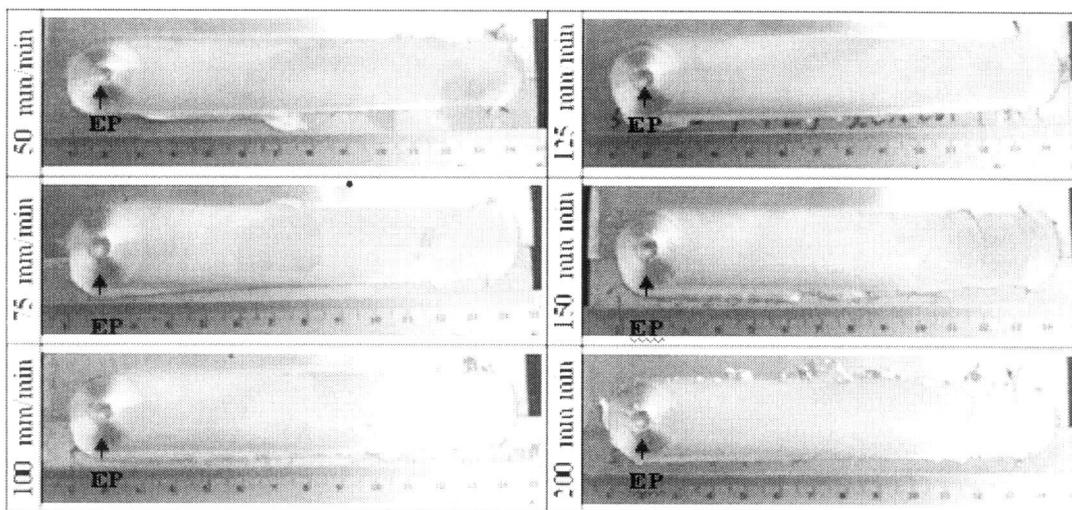
รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อถูกเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวแปรการเชื่อมประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 500 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ได้ผลสรุปดังนี้

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

- รอยเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลักเนื่องจากการพังทลายของชิ้นงานเกิดขึ้นที่แผ่นอลูมิเนียมหล่อ
- โครงสร้างจุลภาคแสดงพื้นที่การกวนที่ทำให้เม็ดเกรนเล็กและละเอียดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมหลัก
- โครงสร้างจุลภาคแสดงการรวมตัวไม่สมบูรณ์ของอลูมิเนียมในโครงสร้างจุลภาคแสดงชั้นการแบ่งแยกระหว่างอลูมิเนียมทั้งสองอย่างชัดเจน

4.2 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

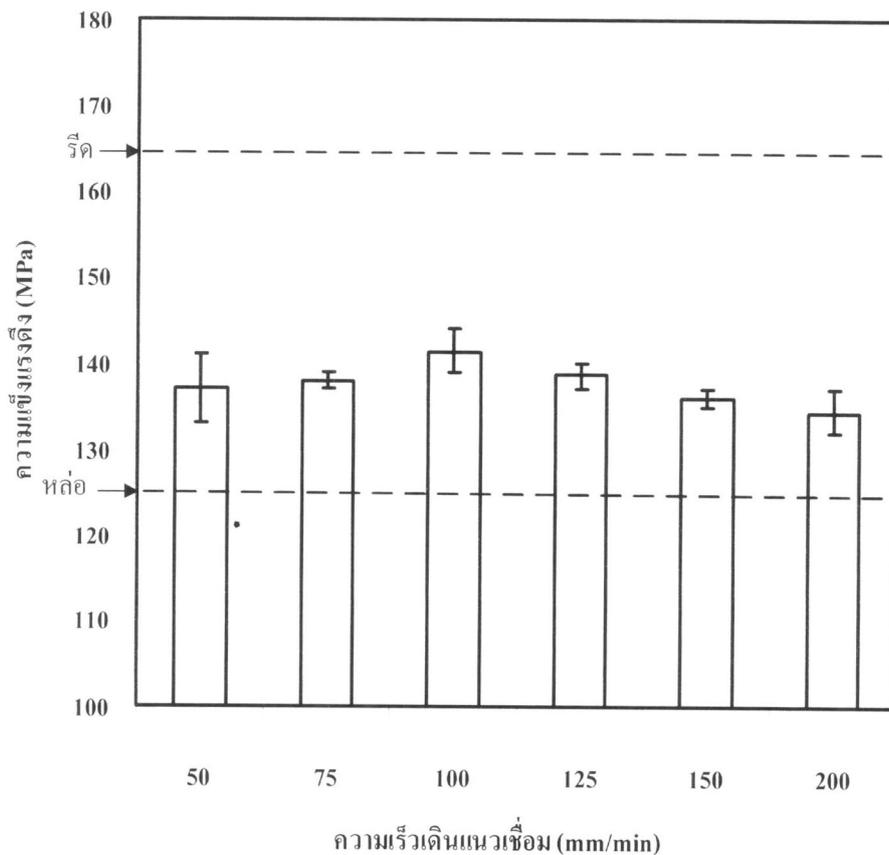
ตัวแปรการเชื่อมสำคัญที่ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 1000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ผลการทดลองที่น่าสนใจมีดังนี้



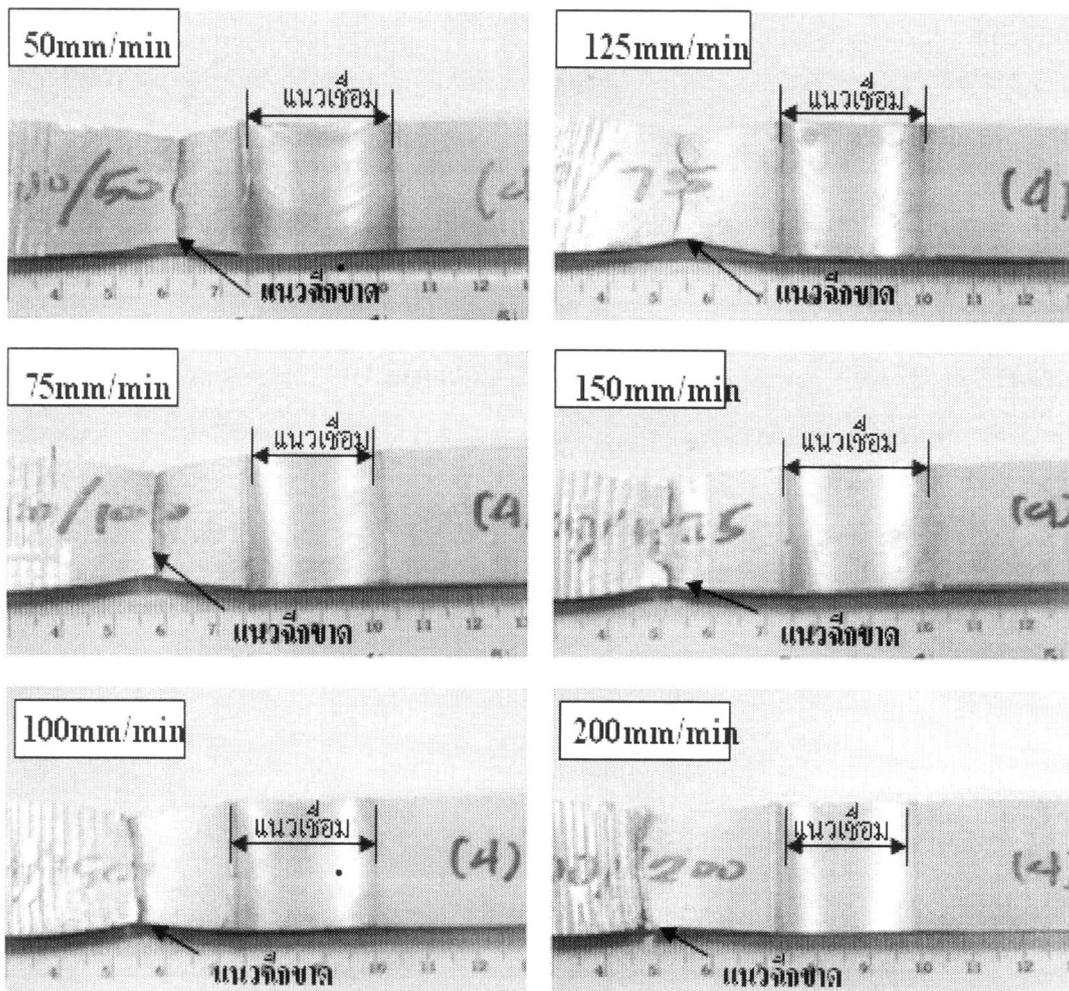
รูปที่ 4.6 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

รูปที่ 4.16 แสดงผิวหน้ารอยต่อที่ผ่านการเชื่อมด้วยสภาวะความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ พบว่าผิวหน้ารอยเชื่อมทุกๆ สภาวะแสดงความราบเรียบและสม่ำเสมอของผิวแนวเชื่อม ไม่มีจุดบกพร่องใดๆ ที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมบนผิวหน้าแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อมพบจุดบกพร่องวงกลมที่เกิดจากการถอนตัวกวนออกจากแนวเชื่อมดังที่พบในหัวข้อที่ 4.1 พิจารณาด้านข้างของผิวหน้าแนวเชื่อมพบว่า มีครีบของอลูมิเนียมที่ถูกกวน อัด และดันออกมาด้านข้างของแนวเชื่อมเล็กน้อยและมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบตัวกวน 500 rpm ในรูปที่ 4.1 การ

เพิ่มขึ้นของครีบอลูมิเนียมด้านข้างแนวเชื่อมนี้ คาดว่าเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเชื่อม เพราะว่าตัวแปรสำคัญที่ทำให้ความร้อนเสียดทานเพิ่มขึ้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ประกอบด้วยตัวแปรสำคัญ 4 ตัวแปร คือ ชนิดของผิวสัมผัส แรงที่ใช้กดลงไปบนรอยต่อ ความเร็วเดินแนวเชื่อม และความเร็วรอบการหมุนของของเครื่องมือเชื่อม หากพิจารณาตัวแปรทั้งสี่พบว่าตัวแปรการเชื่อมอื่นๆ ถูกกำหนดให้มีค่าเดียวกันตลอด แต่ตัวแปรที่เปลี่ยนไปนั้น คือ ความเร็วรอบ [14] ด้วยเหตุนี้เมื่อความเร็วรอบการหมุนของตัวกวนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความร้อนเสียดทานมากขึ้น ส่งผลทำให้ลูมิเนียมอ่อนตัวได้มากกว่าความเร็วรอบ 500 rpm ในหัวข้อที่ 4.1 และส่งผลทำให้ลูมิเนียมถูกดันออกมาข้างนอกเพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นครีบบอบๆ แนวเชื่อม อย่างไรก็ตามการวัดเปรียบเทียบอุณหภูมิการเชื่อม ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีวัดอุณหภูมิด้วยเครื่อง มือวัด หรือการจำลองอุณหภูมิด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปอื่นๆ เช่น การจำลองไฟไนท์อีลีเมนต์ (Finite element methods: FEM) หรือการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics: CFD) เป็นต้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของรอยต่อและความเร็วเดินแนวต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1000 rpm

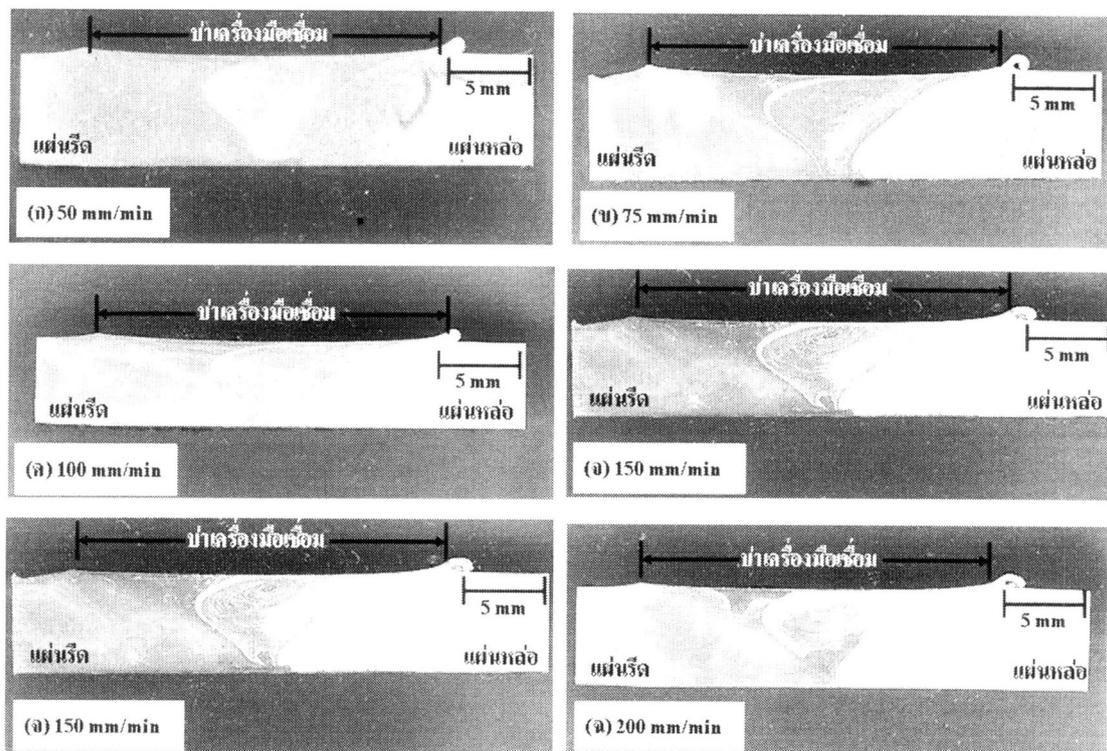


รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

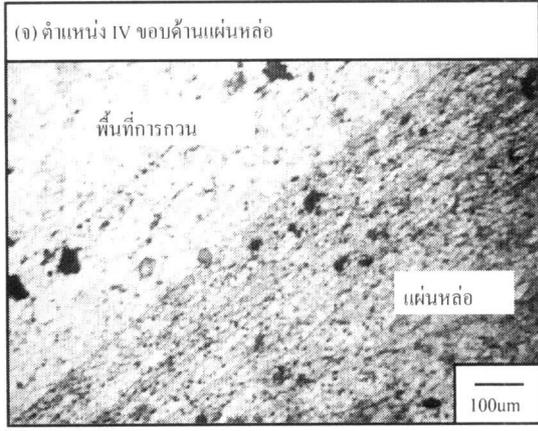
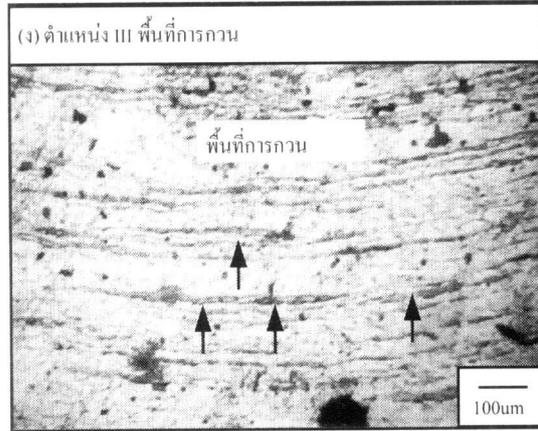
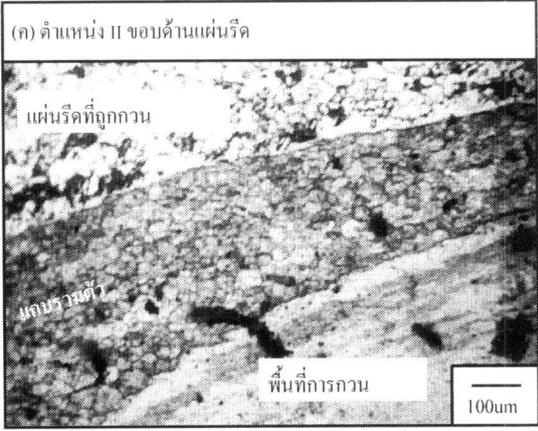
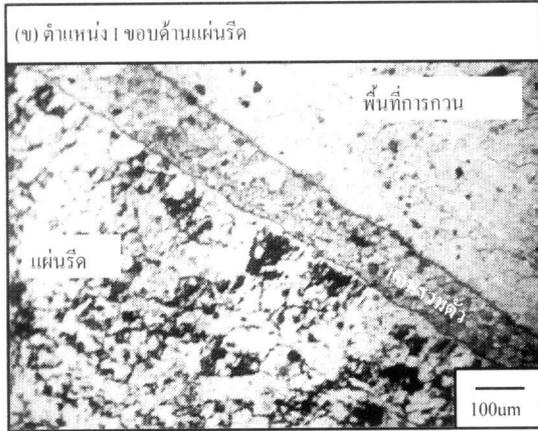
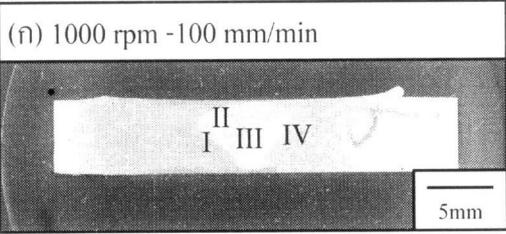
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ที่กำหนดให้เลือกชั้นทดสอบ 6 ชั้นจากรอยต่อที่เชื่อม 3 รอยต่อแบบสุ่ม แล้วนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมหลัก โดยมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิเนียมแผ่นหล่อประมาณ 5-10% แนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจาก 50-100 mm/min จากนั้นค่าความแข็งแรงมีค่าที่ลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100-200 mm/min ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ได้จากสถานะการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1000 rpm นี้คือ การเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 142 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 500 rpm นี้ คาดว่าเกิดจาก

ความเร็วรอบ 1000 rpm นี้เป็นความเร็วรอบที่มีความเหมาะสมในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6063 ความหนา 6.3 มม. ดังเห็นได้ผลการทดลองจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม 6063 เพื่อศึกษาอิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อม [30] หรือการศึกษาอิทธิพลรูปร่างตัวกวนที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 [29-30]

ความแข็งแรงดึงที่ได้ในรูปที่ 4.7 นั้นไม่ใช่ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ได้จากการประยุกต์ใช้ความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือเชื่อม 1000 rpm ในการเชื่อม ค่าความแข็งแรงที่แสดงเป็นค่าความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมด้านอลูมิเนียมแผ่นหล่อ เนื่องจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารอยต่อเกิดการพังทลายที่ด้านของอลูมิเนียมหล่อทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 4.8 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบเกิดขึ้นที่ระยะ 13, 13, 18, 23, 22 และ 25 มม. สำหรับรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 มม. ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้ช่วยยืนยันข้อมูลผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 ว่าสภาวะการเชื่อมที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 สามารถทำให้เกิดรอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิเนียมหลักที่ใช้เชื่อม อย่างไรก็ตามการพังทลายบริเวณตำแหน่งดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุอื่นๆ หรือไม่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min

รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min ในรูปนี้ไม่ได้ระบุเส้นประที่แสดงตำแหน่งการพังทลายเหมือนดังในรูปที่ 4.4 ของการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm แต่ขอระบุว่าตำแหน่งการพังทลายอยู่ด้านขวาสุดของรอยต่อด้านอลูมิเนียมแผ่นหล่อ โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 1000 rpm พบการแบ่งพื้นที่โครงสร้างมหภาคของรอยต่อออกเป็น 3 ส่วน คือ อลูมิเนียมแผ่นรีดอยู่ที่ด้านซ้าย อลูมิเนียมแผ่นหล่ออยู่ที่ด้านขวา และพื้นที่การกลวงอยู่ที่กึ่งกลางแนวเชื่อม ที่กึ่งกลางของแนวเชื่อมในพื้นที่การกลวง พบนักเกิดของวงแหวนหัวหอมที่มีลักษณะวงรีอยู่เช่นเดียวกับรอยต่อที่

เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่ามีความชัดเจนมากกว่า และวงของวงแหวนหัวหอมมีชั้นมากกว่า เปรียบเทียบแถบการรวมตัวสีขาวที่ขอบด้านซ้ายของวงแหวนหัวหอมมีขนาดที่เล็กลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับขนาดของวงแหวนหัวหอมที่มีขนาดของวงรีที่มีขนาดเล็กลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การลดลงของขนาดวงแหวนหัวหอมนี้ คาดว่าเกิดขึ้นจากความรุนแรงที่เพิ่มมากขึ้นของการกวนเมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้อลูมิเนียมมีโอกาสในการรวมตัวเป็นนักเกตที่มีขนาดใหญ่ได้น้อย [32]

รูปที่ 4.10 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและอลูมิเนียมแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนว 100 mm/min ซึ่งแสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดในความเร็วรอบนี้ที่ 142 MPa ที่แสดงโลหะเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ ในโลหะเชื่อม ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่ง I ถึง IV ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดการประสานกันระหว่างโลหะทั้งสองชนิด

รูปที่ 4.10 (ข) แสดงบริเวณขอบของแผ่นรีดและพื้นที่การกวน หรือตำแหน่งที่ I ในรูปที่ 4.10 (ก) พบการเกิดการอัดตัวของอลูมิเนียมมีขนาดเกรนเล็กลงเหมือนดังการเชื่อมการเสียดทานแบบกวนในอลูมิเนียมผสม [5, 14] ทั่วไป บริเวณกึ่งกลางระหว่างแผ่นรีดและพื้นที่การกวนเกิดการรวมตัวกันระหว่างอลูมิเนียมแผ่นรีดและหล่อเกิดขึ้นและมีความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิเนียมแผ่นรีดและหล่อเพียงเล็กน้อย (ความแข็งแรงการรวมตัวประมาณ 85HV ความแข็งแรงแผ่นหล่อ 80HV และความแข็งแรงแผ่นรีด 77HV) แถบการรวมตัวนี้เริ่มเกิดที่ด้านล่างของรอยต่อและมีขนาดแถบมีความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อมีระยะใกล้ผิวด้านบนของแนวเชื่อม

รูปที่ 4.10 (ค) แสดงบริเวณขอบของแผ่นรีดและพื้นที่การกวนด้านบน หรือตำแหน่งที่ II ในรูปที่ 4.10 (ก) พบแถบการขยายตัวมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแถบการรวมตัวในรูปที่ 4.10 (ข) การเกิดลักษณะนี้มีสาเหตุจากที่ด้านบนของแนวเชื่อมที่มีความร้อน และแรงเฉือนที่เกิดจากบ่าเครื่องมือเชื่อมสูง ทำให้โลหะทั้งสองมีโอกาสในการรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้น ที่บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมพบวงแหวนหัวหอม (Onion ring) ก่อตัวขึ้นภายในแนวเชื่อม มีลักษณะไม่กลมมน แต่มีรูปร่างคล้ายวงแหวนหัวหอมวางซ้อนบนกรวยดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจสอบแล้ว พบว่าแถบของวงแหวนหัวหอมซึ่งแสดงการรวมตัวกันเป็นอย่างดีของโลหะเชื่อมการเสียดทานแบบกวนนั้นก่อตัวขึ้น

รูปที่ 4.10 (ง) แสดงพื้นที่การกวน หรือตำแหน่งที่ III ในรูปที่ 4.10 (ก) ชั้นของอลูมิเนียมวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ดังแสดงด้วยลูกศร การรวมตัวของอลูมิเนียมในพื้นที่การกวน หรือในวงแหวนหัวหอมของความเร็วรอบ 1000 rpm มีความสมบูรณ์มากกว่า เนื่องจากในชั้นของวงแหวนหัวหอมที่ตรวจสอบนั้น ไม่เกิดการแบ่งแยกกันระหว่างอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อ (มีขนาดเล็กมาก) ดังที่

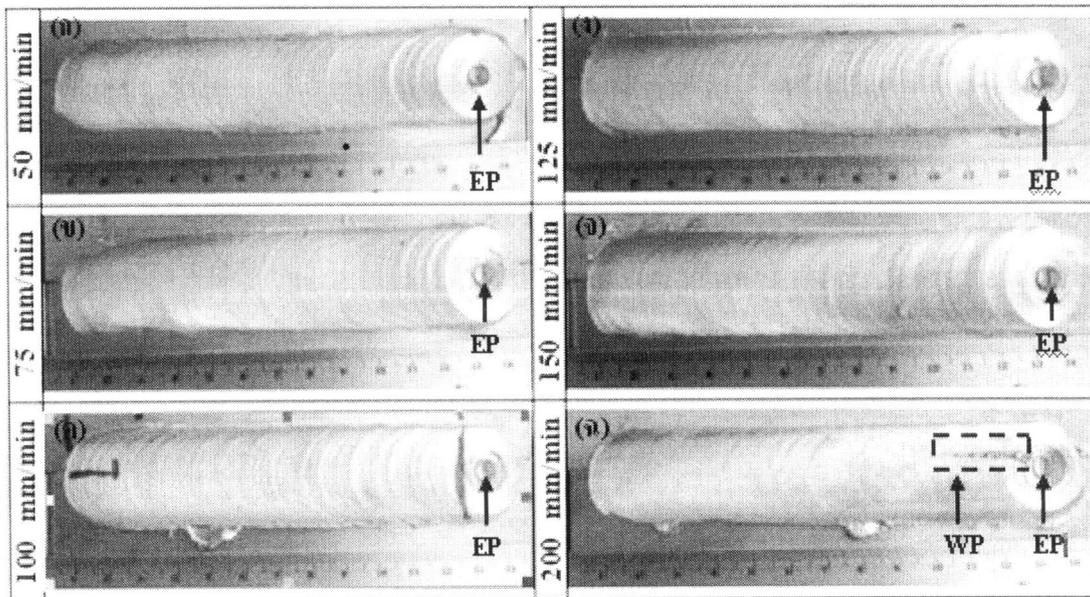
เกิดขึ้นในชั้นวงแหวนหัวหอมของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ง) นอกจากนั้นพบว่าแถบการรวมตัวกันของอลูมิเนียมทั้งสองไม่ก่อตัวขึ้น อินเทอร์เฟสของรอยต่อสามารถระบุได้ชัดเจนถึงพื้นที่การกววนและแผ่นหล่อ และเมื่อพิจารณาอินเทอร์เฟสของรอยต่อพบว่าโลหะทั้งสองถูกอัดและบีบเข้ากันอย่างรุนแรงมีขนาดเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 7 (จ)

รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อถูกเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวแปรการเชื่อมประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 1000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ได้ผลสรุปดังนี้

- การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถทำการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อ
- ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 142 MPa คือ ความเร็วรอบตัวกวน 1000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min
- รอยเชื่อมมีความแข็งแรงกว่า โลหะหลักเนื่องจากการพังทลายของชิ้นงานเกิดขึ้นที่แผ่นอลูมิเนียมหล่อ
- โครงสร้างจุลภาคแสดงพื้นที่การกววนที่ทำให้เม็ดเกรนเล็กและละเอียดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมหลัก
- โครงสร้างจุลภาคแสดงการรวมตัวสมบูรณ์ของอลูมิเนียมใน โครงสร้างจุลภาคแสดงชั้นการแบ่งแยกระหว่างอลูมิเนียม

4.3 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

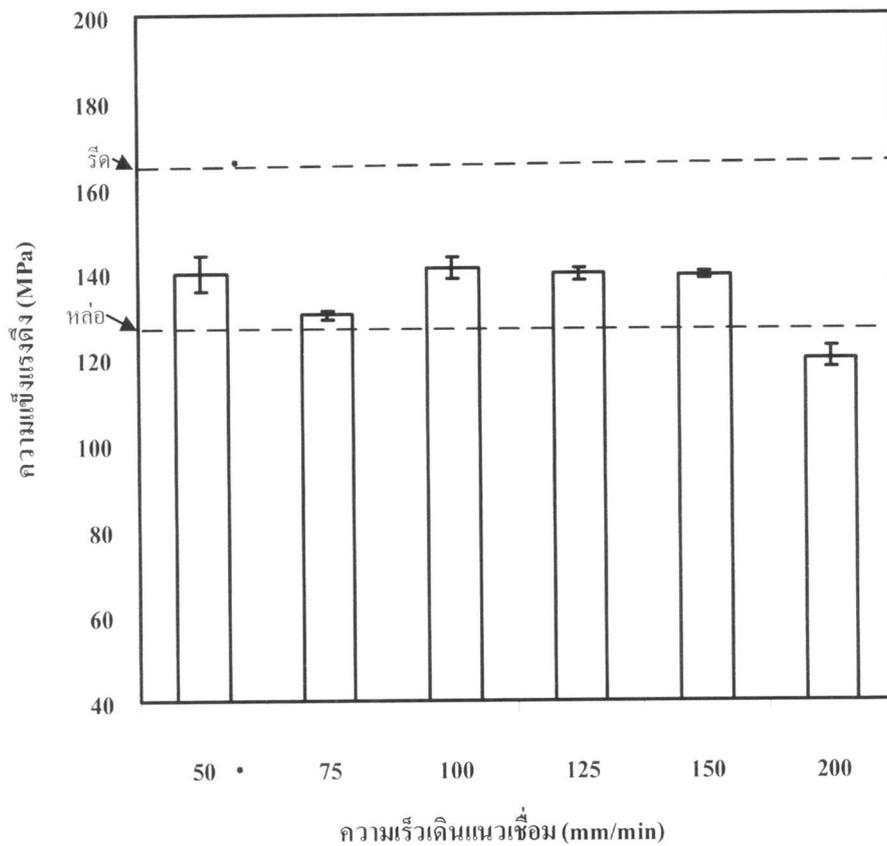
ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ได้รายงานผลการศึกษาค่าความแข็งแรงรอบที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าการเพิ่มขึ้นค่าความเร็วรอบส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อโดยการเพิ่มความเร็วยกการหมุนของตัวกวนโดยกำหนดให้ ตัวแปรการเชื่อมสำคัญที่ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 500 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ผลการทดลองที่น่าสนใจมีดังนี้



รูปที่ 4.11 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

รูปที่ 4.11 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่ผ่านการเชื่อมด้วยสภาวะความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ พบว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-100 mm/min ผิวหน้ารอยเชื่อมมีความราบเรียบและสม่ำเสมอ ไม่มีจุดบกพร่องใดๆ เช่น ตามค รูพรุน ความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นบนผิวหน้าแนวเชื่อม แต่ที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม (EP) ยังคงพบจุดบกพร่องรูปวงกลมที่เกิดขึ้นจากการถอนตัวกวนที่กำลังหมุนออกจากแนวเชื่อมดังที่พบในการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 และ 1000 rpm ดังที่กล่าวไว้แล้ว “จุดบกพร่องแบบนี้สามารถทำการเชื่อมอุดรูด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอื่นๆ ได้” พิจารณาการเกิดครีปที่ด้านข้างของแนวเชื่อมพบว่าครีปที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 500 และ 1000 rpm ปริมาณของการลดลงของการเกิดครีปที่น้อยลงนี้ต้องมีการนำมาทำการศึกษาต่อไป เนื่องจากในหัวข้อที่ 4.2 ได้กล่าวไว้ว่า “คาดว่าเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเชื่อม เมื่อความเร็วรอบการหมุนของตัวกวนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความร้อนเสียดทานมากขึ้น ส่งผลทำให้อลูมิเนียมอ่อนตัวได้มากกว่า และส่งผลทำให้อลูมิเนียมถูกดันออกมาข้างนอกเพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นครีปรอบๆ แนวเชื่อม” ในหัวข้อนี้พบว่าไม่ถูกต้องเสมอไป คาดว่าการเกิดครีปควรมีกลไกการเกิดแนวเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องและควรศึกษาต่อไป การเกิดครีปในปริมาณที่ลดลงนั้นมีลักษณะผลการทดลองที่น่าสนใจ คือ เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาการต่อเชื่อมวัสดุต่างชนิดหลายการทดลอง เช่น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่ออลูมิเนียม 5083 และเหล็กกล้า SS400 [23] รอยต่ออลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าคาร์บอน 1015 [30] รอยต่ออลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 [10] หรือรอยต่ออลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [31] เป็นต้น พบว่าการเชื่อม

รอยต่อของวัสดุต่างชนิดนั้นทำให้เกิดครีปที่ไม่ต่อเนื่องและทำให้ครีปเกิดการหลุดร่อนออกมาเมื่อทำการเชื่อมได้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของรอยต่อและความเร็วเดินแนวต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

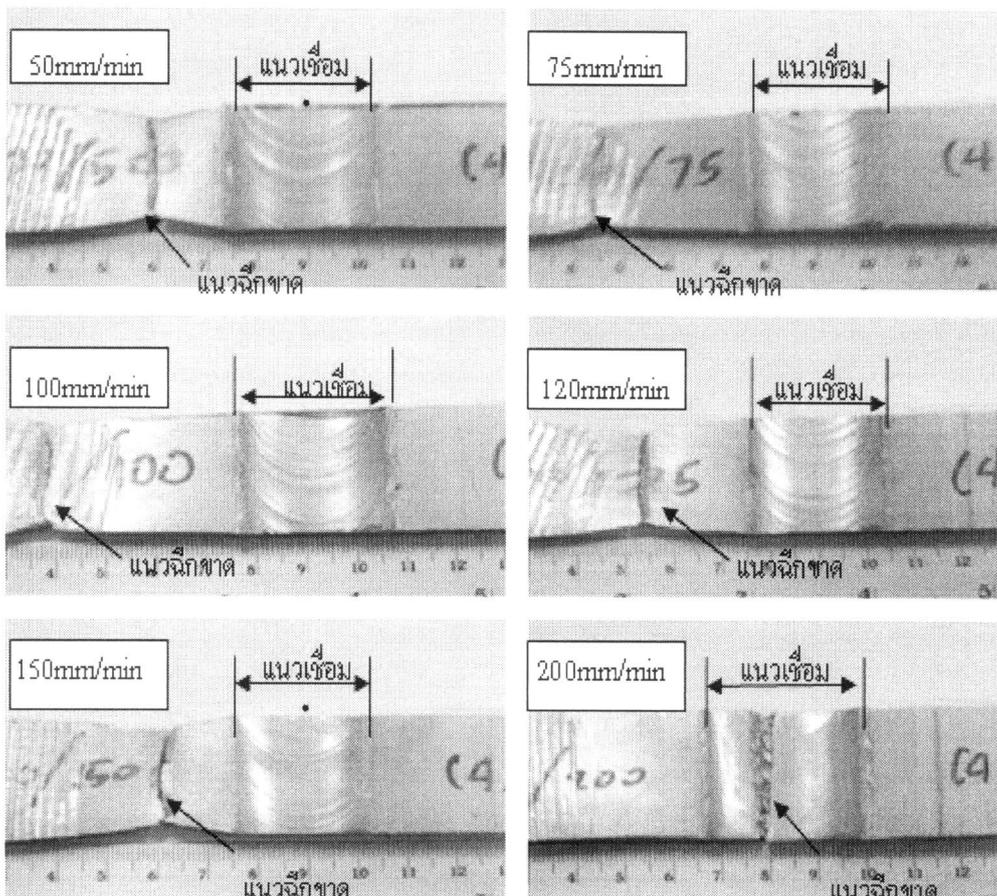
รูปที่ 4.11 (จ) แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min ซึ่งเป็นความเร็วเดินแนวเชื่อมสูงสุดในการเชื่อมครั้งนี้ พบว่าผิวหน้าแนวเชื่อมประมาณ 40 มม. ก่อนถึงจุดสุดท้ายของแนวเชื่อมนั้นเกิดความไม่สมบูรณ์ขึ้นดังแสดงด้วยพื้นที่ในสี่เหลี่ยมเส้นประ ความไม่สมบูรณ์นี้อาจเกิดจากตัวแปรสำคัญ 2 ประการ คือ ความเร็วรอบ 1500 rpm เป็นความเร็วรอบที่สูงทำให้เกิดความร้อนเสียคทานที่มีค่าสูง ส่งผลทำให้ลูมิเนียเกิดการไหลตัวค่อนข้างง่ายภายใต้ปากเครื่องมือเชื่อม ขณะเดียวกันเมื่อเครื่องมือเชื่อมเกิดการเคลื่อนที่แล้ว คาดว่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูงทำให้ลูมิเนียที่ไหลจากด้านหลังของตัวกวนขณะทำการ

เชื่อมไม่สามารถไหลสู่ด้านหลังของตัวกวนเพื่อที่จะถูกบ่าเครื่องมือเชื่อมกดอัดเพื่อให้เกิดแนวเชื่อมได้ [13]

รูปที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ที่กำหนดให้เลือกชิ้นทดสอบ 6 ชิ้นจากรอยต่อที่เชื่อม 3 รอยต่อแบบสุ่ม แล้วนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-150 mm/min นั้นมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมหลัก โดยมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิเนียมแผ่นหล่อประมาณ 5% แนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจาก 50-75 mm/min จากนั้นค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นและค่อนข้างสม่ำเสมอ หรือมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5% เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100-150 mm/min ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ได้จากสถานะการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1500 rpm นี้คือ การเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 141 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความแข็งแรงสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm ที่แสดงในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 142 MPa ค่าความแข็งแรงที่ใกล้เคียงนี้ เป็นเพียงค่าสูงสุดในกลุ่มรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm เท่านั้น แต่ถ้าหากเปรียบเทียบแนวโน้มความแข็งแรงที่กลุ่มรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm แล้ว พบว่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ได้นี้มีแนวโน้มที่ต่ำกว่า กลุ่มรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min ที่มีค่าความแข็งแรงต่ำสุดในการศึกษาในหัวข้อนี้ คาดว่าอาจเกิดจากจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าแนวเชื่อมนั้นเป็นจุดกำเนิดการพังทลายทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงดึงลดต่ำลง ผลการทดลองนี้มีผลการทดลองคล้ายกับการประยุกต์ใช้ตัวกวนทรงกระบอกความเร็วรอบ 1000 rpm ในการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ที่พบจุดบกพร่องที่ผิวหน้าและส่งผลต่อการเกิดจุดบกพร่องในรอยเชื่อมและทำให้เกิดการลดลงของค่าความแข็งแรงดึง [34]

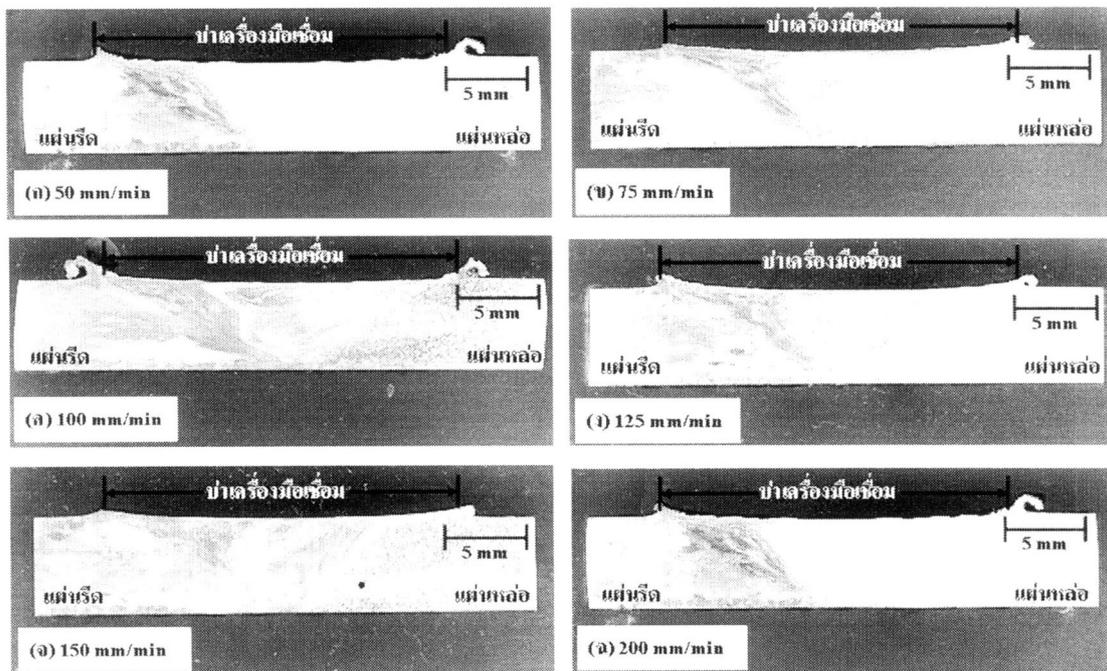
รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min ผลการตรวจสอบการพังทลายยืนยันผลการทดลองการทดสอบแรงดึงในรูปที่ 4.12 ที่กล่าวว่าที่รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-150 mm/min นั้น รอยต่อมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิเนียมแผ่นหล่อดังเห็นได้จากการพังทลายที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณอลูมิเนียมแผ่นหล่อ ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบเกิดขึ้นที่ระยะ 15, 30, 30, 22 และ 15 มม. สำหรับรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-150 มม. ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้นี้มีลักษณะเดียวกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 500 และ 1000 rpm ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ขณะที่รอยต่อการเชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min ที่แสดงผิวหน้าเกิดจุดบกพร่อง

ขึ้นนั้นพบว่า ชันทดสอบแรงดึงเกิดการพังทลายที่ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดจุดบกพร่องที่ผิวหน้าของแนวเชื่อม ดังการเกิดการพังทลายของรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ที่พบจุดบกพร่องบนผิวหน้า และด้านล่างของแนวเชื่อม ที่แสดงให้เห็นว่าการเกิดจุดบกพร่องใดๆ ในโลหะเชื่อมหรือผิวหน้าแนวเชื่อมนั้นเป็นจุดรวมความเค้นและเป็นจุดกำเนิดการพังทลายของแนวเชื่อม เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึง จุดบกพร่องดังกล่าวที่เป็นจุดที่มีความเค้นสูงอยู่แล้ว ทำให้เกิดการขยายตัวของจุดบกพร่องให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และขยายตัวกินลึกเข้าไปในชิ้นงานได้ ผลที่ได้เนื่องจากชิ้นงานมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยกว่า จึงแสดงค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่มีปริมาณน้อยกว่า [34] อย่างไรก็ตามการศึกษาคความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมและจุดบกพร่องดังกล่าวนี้ไม่ได้ทำการศึกษาได้ง่ายนัก เนื่องจากการตรวจเอกสารที่ผ่านมา ในรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเค้นตกค้างในชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นยังไม่มีกรรายงานไว้ งานวิจัยอื่นๆ เพียงแสดงผลการพยากรณ์ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์เท่านั้น การศึกษาแบบอื่นๆ ยังไม่ได้มีการรายงานผลและควรมีการศึกษาต่อไปเพื่อยืนยันผลการทดลองนี้



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดิน

แนว 50-200 mm/min



รูปที่ 4.14 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min



รูปที่ 4.15 การแบ่งพื้นที่รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm

รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 1500 rpm พบการแบ่งพื้นที่ที่โครงสร้างมหภาคของรอยต่อออกเป็น 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.15 คือ อลูมิเนียมแผ่นรีดอยู่ที่ด้านซ้าย อลูมิเนียมแผ่นหล่ออยู่ที่ด้านขวา พื้นที่การกว่นอยู่ที่กึ่งกลางแนวเชื่อมมีรูปร่างเป็นกรวย และพื้นที่วงแหวนหัวหอมที่กึ่งกลางพื้นที่การกว่น เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 500 และ 1000 rpm ที่ผ่านมาพบว่าที่ความเร็วรอบ 1500 rpm นี้โครงสร้างมหภาคแสดงพื้นที่การกว่นที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยสังเกตเห็นได้พื้นที่รูปกรวยที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจน และในพื้นที่ของกรวยนั้นมีวงแหวนหัวหอมสวมทับอยู่ภายใน เปรียบเทียบแถบการรวมตัวของอลูมิเนียมแผ่นหล่อและแผ่นรีดภายในพื้นที่การกว่นพบว่า ในรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm นี้ ไม่สามารถตรวจสอบเห็นได้โดยการตรวจสอบระดับมหภาค คาดว่าการกว่นที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการ

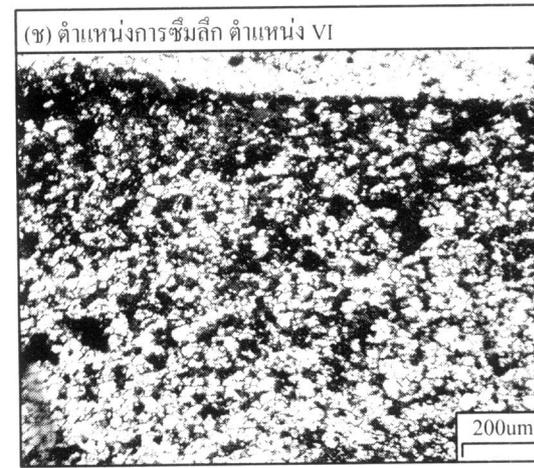
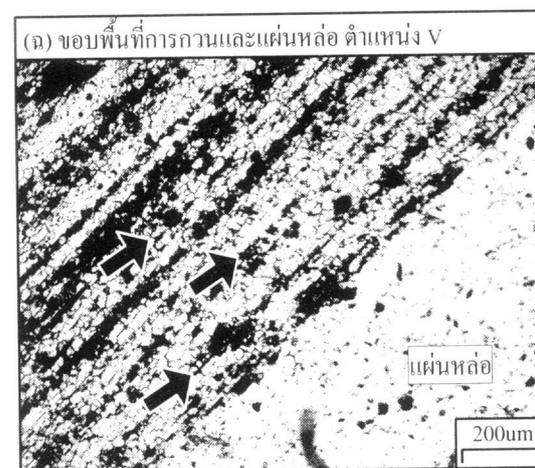
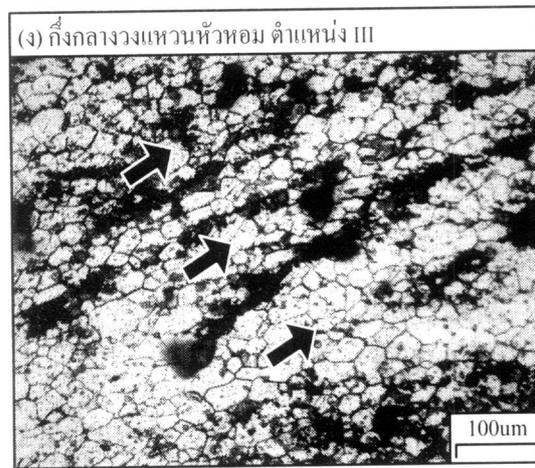
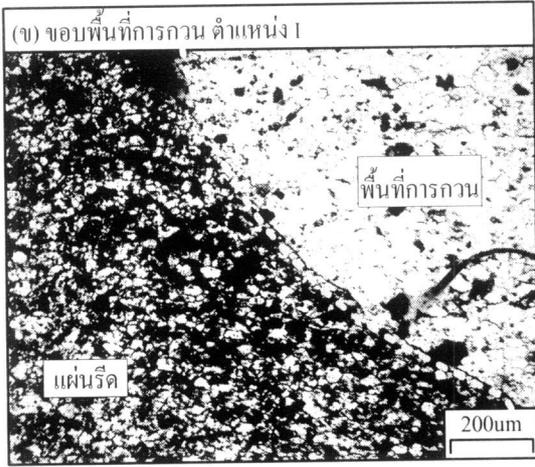
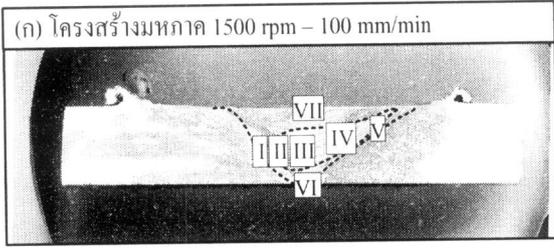
รวมผสมของอลูมิเนียมต่างๆ เข้ากันได้ดีขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากความรุนแรงที่เพิ่มมากขึ้นของการกวานเมื่อตัวกวานเกิดการเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้อลูมิเนียมมีโอกาสในการรวมตัวเป็นนิกเกตที่มีขนาดใหญ่ได้น้อย [32]

รูปที่ 4.15 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและอลูมิเนียมแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 100 mm/min ซึ่งแสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดในความเร็วรอบนี้ที่ 141 MPa ที่แสดงโลหะเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ ในโลหะเชื่อม ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่ง I ถึง VII ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการประสานกันระหว่างโลหะทั้งสองชนิดรอยต่อ

รูปที่ 4.15 (ข) แสดงขอบเขตระหว่างอลูมิเนียมแผ่นรีดที่อยู่ด้านซ้ายกับพื้นที่การกวาน โครงสร้างจุลภาคของแผ่นรีดพบว่าขนาดเม็ดเกรนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและมีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับที่ตรวจไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $35 \mu\text{m}$ ขณะเดียวกันที่ด้านขวาของเส้นประนั้นแสดงพื้นที่การกวานบริเวณที่เป็นรูปทรงกรวยแสดงการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของเม็ดเกรนของอลูมิเนียมทำการวัดขนาดเกรนพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าประมาณ $24 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดที่โตกว่าขนาดเม็ดเกรนที่พบในพื้นที่การกวานของการเชื่อมที่ใช้ความเร็วรอบ 500 และ 1000 rpm ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 อย่างไรก็ตามเม็ดเกรนบริเวณนี้ไม่ได้แสดงข้อด้อยจนเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายบริเวณนี้

รูปที่ 4.15 (ค) แสดงชั้นของวงแหวนหัวหอมที่ละเอียดยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และมีขนาดเม็ดเฉลี่ยประมาณ $20.02 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยที่โตกว่าขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยในวงแหวนหัวหอมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm เพียงเล็กน้อย ชั้นของวงแหวนหัวหอมที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนน้อยกว่า อาจเป็นไปได้ว่าความเร็วรอบและอุณหภูมิรอยเชื่อมที่สูงกว่าทำให้เกิดการละลายเข้าหากันได้ง่ายยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามต้องทำการทดลองเพื่อหาคำตอบต่อไป

รูปที่ 4.15 (ง) แสดงกึ่งกลางของวงแหวนหัวหอมที่พบการก่อตัวของเม็ดเกรนใหม่ที่มีรูปร่างกลมมนและมีเกรนเฉลี่ยที่มีค่าประมาณ $20 \mu\text{m}$ ชั้นของวงแหวนหัวหอมนั้นสามารถตรวจพบได้ดังแสดงด้วยลูกศรแต่ขอบเขตของชั้นวงแหวนนั้นไม่ชัดเจนมากนัก เม็ดเกรนที่ตรวจพบมีความกลมมนมากกว่าบริเวณอื่นๆ คาดว่าเกิดจากการที่บริเวณนี้เป็นกึ่งกลางของแนวเชื่อมและเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง เกิดการถ่ายเทความร้อนซ้ำทำให้เม็ดเกรนมีความสามารถในการปรับสภาพได้ดีกว่า และมีขนาดเกรนที่โต กว่า [11] และด้วยเหตุผลดังกล่าว คาดว่าเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ตรวจพบว่าขนาดเม็ดเกรนในวงแหวนหัวหอมนี้มีขนาดที่โตกว่าความเร็วรอบที่ผ่านมา

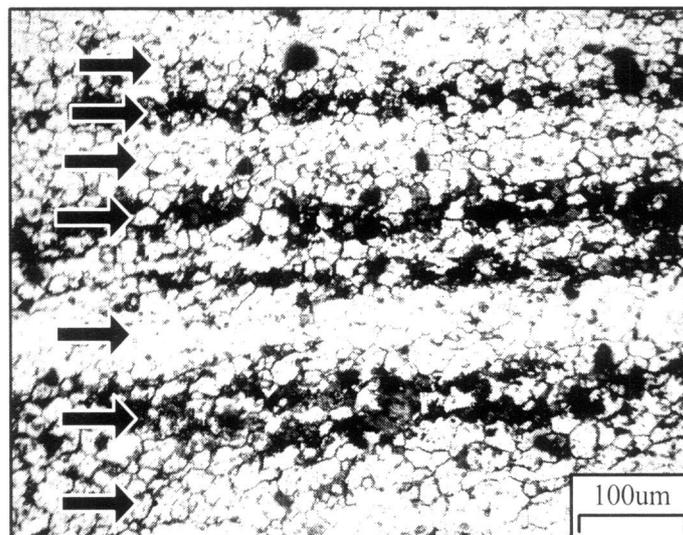


รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min

รูปที่ 4.15 (จ) แสดงชั้นของวงแหวนหัวหอมที่ลากยาวไปทางด้านอลูมิเนียมแผ่นหล่อที่แสดงแถบการรวมตัวของอลูมิเนียมชัดเจนยิ่งขึ้นดังแสดงด้วยลูกศร ขนาดของเม็ดเกรนที่ได้บริเวณนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่รูปร่างของเม็ดเกรนนั้นถูกดึงให้มีความยาวมากขึ้น เม็ดเกรนอลูมิเนียมบริเวณนี้จึงมีความกลมมนน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

รูปที่ 4.15 (ฉ) คือ ขอบเขตระหว่างพื้นที่การกว่นและอลูมิเนียมแผ่นหล่อ พบแนวของการอัดกด และพาอลูมิเนียมให้เคลื่อนที่เป็นแนวแถบการรวมตัวดังแสดงด้วยลูกศร ขณะเดียวกันภายในบริเวณแถบการรวมตัวนั้นยังได้แสดงการก่อตัวของเม็ดเกรนใหม่ที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ $19.15 \mu\text{m}$ แต่รูปร่างของเม็ดเกรนนั้นมีรูปร่างไม่กลมมนโน้มเอียงจามทิศทางขนานกับแถบการรวมตัวของอลูมิเนียมในพื้นที่การกว่น

รูปที่ 4.15 (ช) แสดงตำแหน่งที่แผ่นอลูมิเนียมแผ่นหล่อและอลูมิเนียมแผ่นรีดถูกนำมาต่อชนกันก่อนการเชื่อม พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm นี้สามารถทำให้เกิดการซึมลึกลงมากวนพื้นที่รอยต่อจนกระทั่งไม่สามารถพบเจอรอยต่อเดิมได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 1000 rpm แล้ว พบว่าความเร็วรอบนี้ทำให้เกิดความสมบูรณ์ของแนวต่อมากกว่า เพราะรอยต่อที่ 1500 rpm นี้มีความเป็นเนื้อเดียวของโลหะเชื่อมมากกว่า



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม

รูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม หรือ

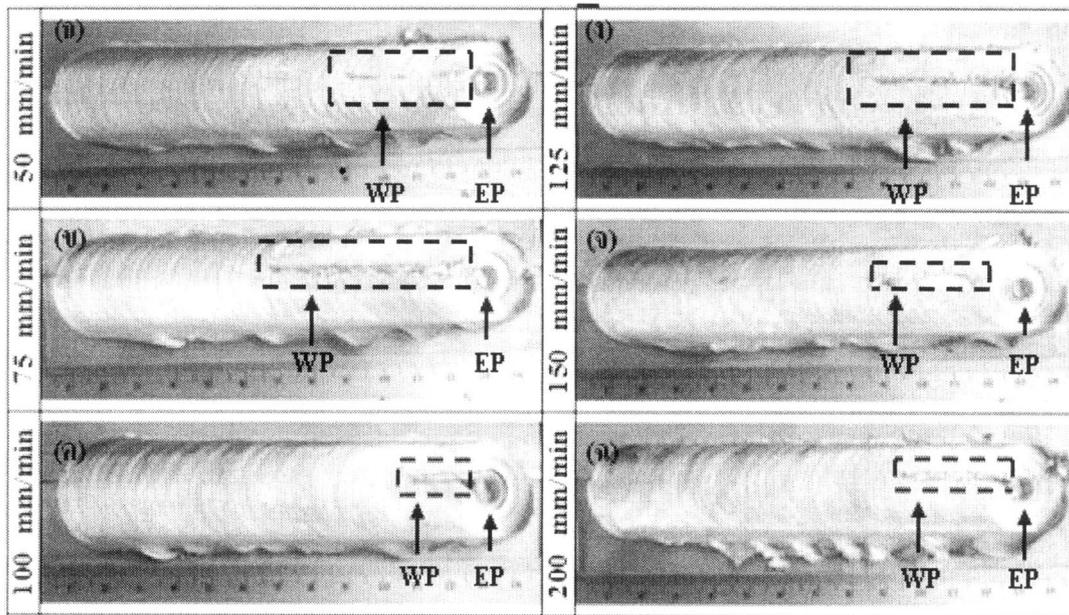
บริเวณด้านล่างของปาเครื่องมือเชื่อมที่กดอัด ฤ เสียคทานจนเกิดความร้อนสูงสุดในแนวเชื่อมพบว่าแถบการรวมตัวที่โคนกดอัด และเงื่อนไขสามารถพบเจอได้ชัดเจนและขนาดของเม็ดเกรนโลหะมีขนาดเล็กกว่าที่บริเวณอื่นๆ เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้น วัดค่าขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยมีค่าประมาณ $14.20 \mu\text{m}$

รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวแปรการเชื่อมประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 1500 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ได้ผลสรุปดังนี้

- การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถทำการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อ
- ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 141 MPa คือ ความเร็วรอบตัวกวน 1500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min
- รอยเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลักเนื่องจากการพังทลายของชิ้นงานเกิดขึ้นที่แผ่นอลูมิเนียมหล่อ
- ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูงเกินไปทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมและทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลง
- โครงสร้างจุลภาคแสดงพื้นที่การกวนที่ทำให้เม็ดเกรนเล็กและละเอียดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมหลัก
- โครงสร้างจุลภาคแสดงการรวมตัวสมบูรณ์ของอลูมิเนียมในโครงสร้างจุลภาคและตรวจสอบพบชั้นการแบ่งแยกระหว่างอลูมิเนียมทั้งสองได้ลำบาก

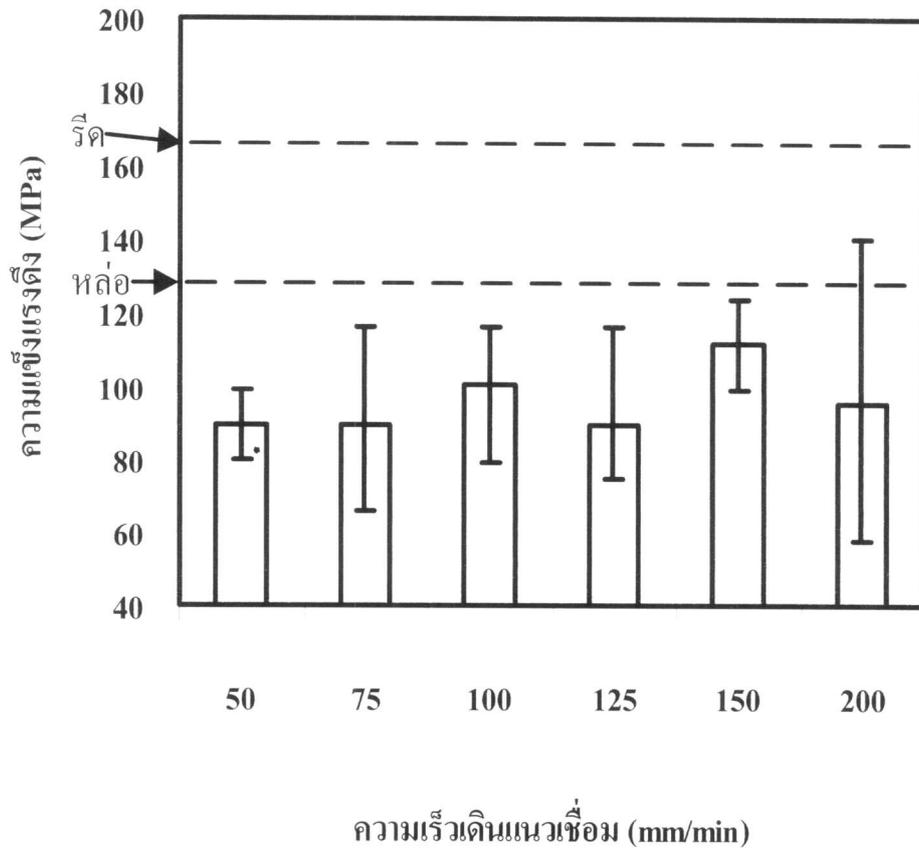
4.4 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

ในหัวที่ผ่านมาได้รายงานผลการศึกษากิจกรรมความเร็วยรอบ 500-1500 rpm ที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อ ค่าความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบตัวกวนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 500-1000 rpm และมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1500 rpm ในหัวข้อนี้ความเร็วรอบการหมุนถูกเพิ่มขึ้นอีก เพื่อพิจารณาความเป็นได้ว่าความเร็วรอบสามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างไรบ้าง ตัวแปรการเชื่อมสำคัญที่ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ผลการทดลองที่น่าสนใจมีดังนี้



รูปที่ 4.16 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

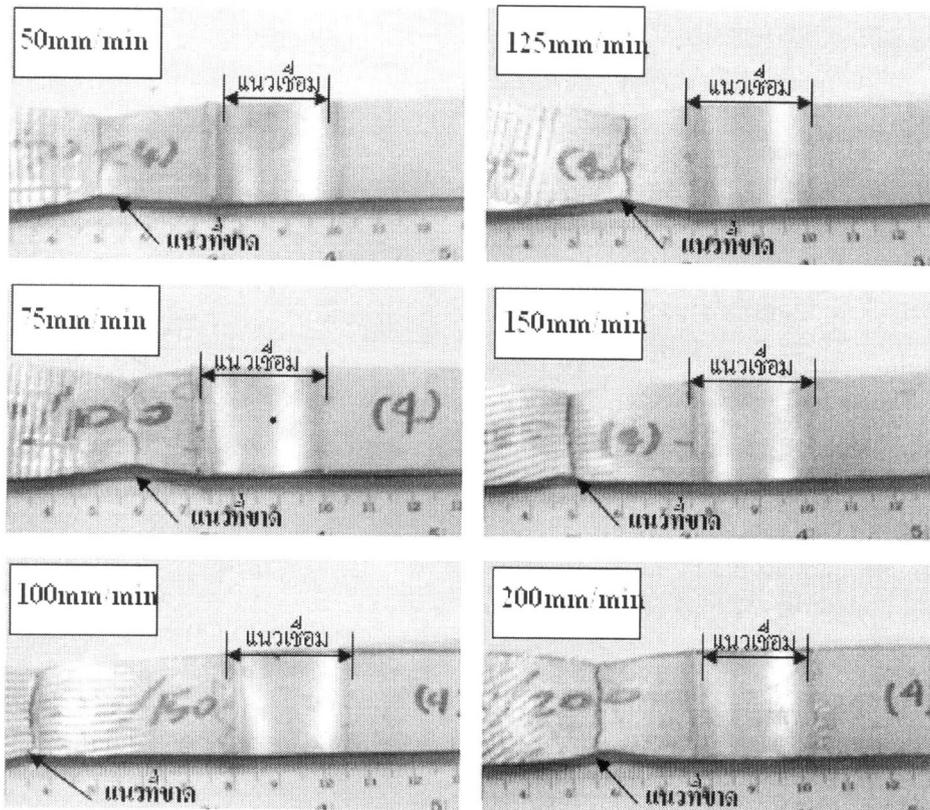
รูปที่ 4.16 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min พบว่าทุกความเร็วเดินแนวเชื่อมตั้งแต่ 50-200 mm/min ผิวหน้ารอยเชื่อมมีจุดบกพร่องขนาดความยาวประมาณ 15-50 มม. ก่อนถึงจุดสุดท้ายของแนวเชื่อม (แสดงโดยสีเหลี่ยมผืนผ้าเส้นประ WP) ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เป็นลักษณะครึ่งวงกลมไม่ราบเรียบเป็นเหมือนกับการเชื่อมที่ความเร็วรอบการหมุน 500-1500 rpm ผิวที่ได้มีความหยาบขรุขระมากกว่า ครีบที่เกิดขึ้นบริเวณข้างๆ รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้นและยาวต่อเนื่องเป็นแผ่นด้านข้างรอยเชื่อมทั้งสองด้าน การเกิดขนาดนี้เนื่องจากความร้อนแนวเชื่อมที่สูงทำให้อลูมิเนียมเกิดการไหลตัวอย่างง่ายและต่อเนื่องรอบๆ ตัวกวนซึ่งเป็นลักษณะที่แตกต่างจากการเชื่อมที่ความเร็วรอบการหมุน 500-1500 rpm ที่ครีบอลูมิเนียมจะเกิดการส่งถ่ายเพียงจากด้านแอดวานซิ่งสู่ด้านรีทริททีงก็จะหลุดออกไป แต่ในความเร็วรอบนี้ครีบที่เกิดจะอ่อนตัว และไหลไปรอบๆ บ่าเครื่องมือเชื่อมจนกระทั่งหมุนกลับมาที่ตำแหน่งเดิมอีกครั้ง เป็นผลทำให้ครีบมีขนาดใหญ่และต่อเนื่องยาวตลอดแนวเชื่อม การเกิดครีบนี้พบได้เมื่อใช้ความเร็วรอบที่สูงในการเชื่อมเสียดทานรอยต่อเกะระหว่างอลูมิเนียมเกรด 5083 และเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 [35-36] และการเชื่อมเสียดทานรอยต่อเกะระหว่างอลูมิเนียมเกรด 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 [37] ที่แสดงครีบที่มีขนาดใหญ่และต่อเนื่องกันเมื่อเชื่อมรอยต่อด้วยความเร็วรอบที่สูง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของรอยต่อและความเร็วเดินแนวต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm

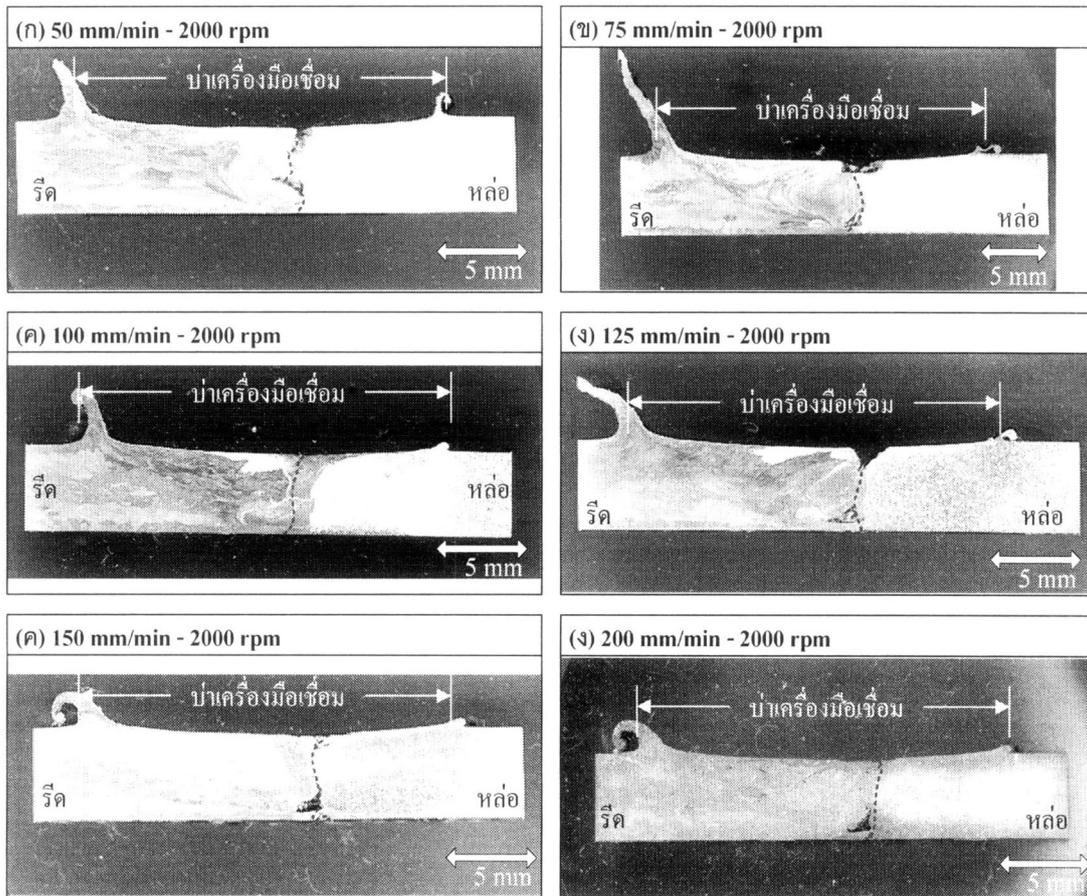
รูปที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งแรงของรอยต่ออลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ที่กำหนดให้เลือกชิ้นทดสอบ 6 ชิ้นจากรอยต่อที่เชื่อม 3 รอยต่อแบบสุ่ม แล้วนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง พบค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างจากความเร็วรอบตัวกวน 500-1500 rpm กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของรอยต่อทุกค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมนั้นมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมหลัก ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าต่ำกว่าอลูมิเนียมแผ่นหล่อประมาณ 20-40% แนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 50-100 mm/min จากนั้นความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ได้จากสภาวะการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2000 rpm นี้คือ การเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 mm/min แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 112 MPa เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วรอบนี้กับค่าความแข็งแรงดึงในความเร็วรอบ 500-1500 rpm พบว่าความแข็งแรงของรอยต่อ

ที่ได้นี้มีค่าที่ต่ำกว่า สาเหตุอาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของรอยต่อที่คาดว่าส่งผลต่อการลดความแข็งแรงของรอยต่อ ผลการทดลองที่ได้นี้คล้ายกับลักษณะการเกิดความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อที่ส่งผลโดยตรงต่อการลดความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ที่รายงานผลไว้ว่าความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อมเสียดทานรอยต่ออลูมิเนียม นั้นส่งผลต่อความไม่สมบูรณ์ของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและทำให้เป็นจุดกำเนิดที่ก่อให้เกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงได้ง่ายขึ้น [34]



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

รูปที่ 4.18 แสดงการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min ผลการตรวจสอบการพังทลายที่พบมีความแตกต่างจากการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500-1500 rpm ชิ้นทดสอบของชิ้นทดสอบกลุ่มนี้เกิดการพังทลายที่กึ่งกลางหรือบริเวณอินเทอร์เฟสของรอยเชื่อมตามแนวของการเกิดความไม่สมบูรณ์บนผิวหน้าแนวเชื่อมที่ตรวจพบในรูปที่ 4.16 ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบต่อไป



รูปที่ 4.19 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min

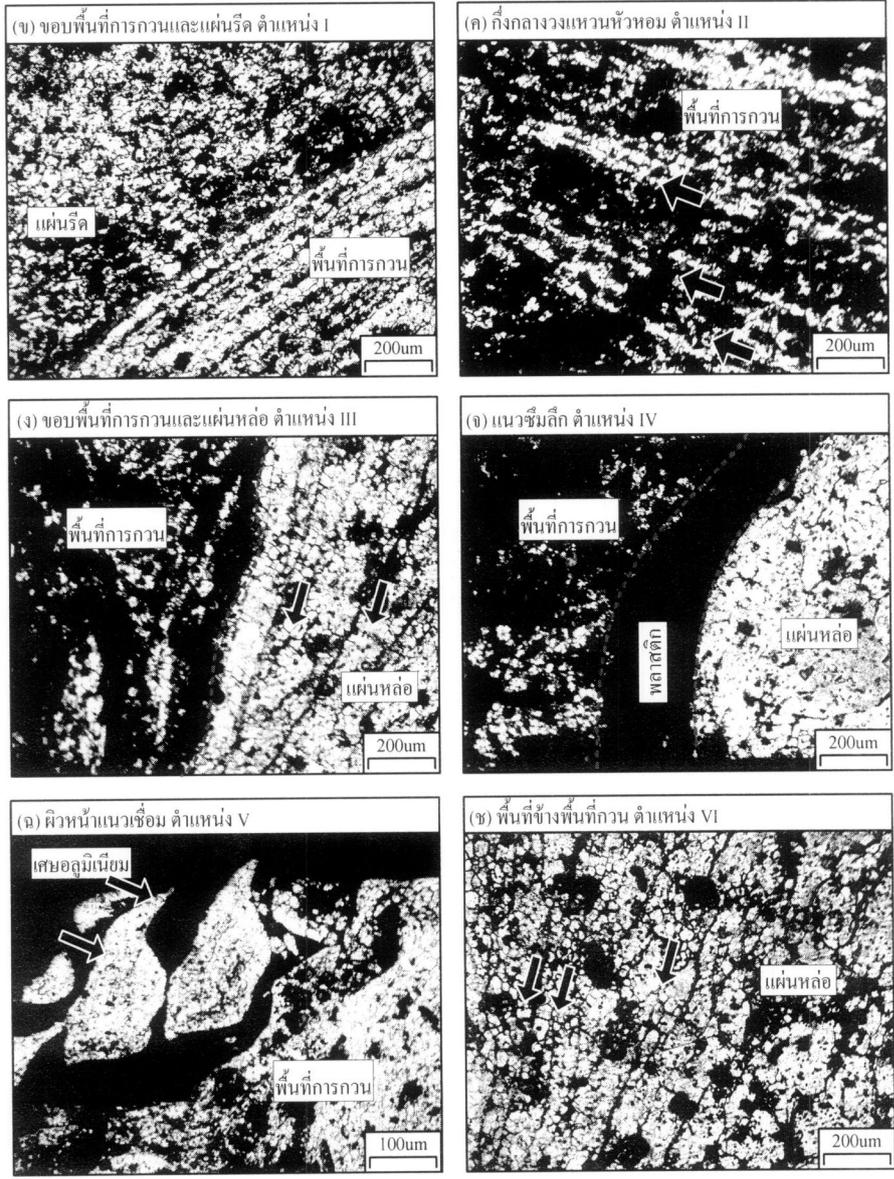
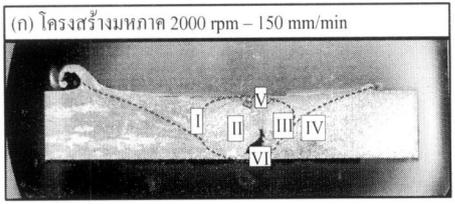
รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 2000 rpm พบการแบ่งพื้นที่โครงสร้างมหภาคของรอยต่อออกเป็น 4 ส่วน ดังโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm แสดงในรูปที่ 4.15 คือ อลูมิเนียมแผ่นรีดอยู่ที่ด้านซ้าย อลูมิเนียมแผ่นหล่ออยู่ที่ด้านขวา พื้นที่การกวนอยู่ที่กึ่งกลางแนวเชื่อมมีรูปร่างเป็นกรวย และพื้นที่วงแหวนหัวหอมที่กึ่งกลางพื้นที่การกวน พื้นที่การกวนของโครงสร้างมหภาคแสดงพื้นที่การกวนที่มีขนาดเท่ากับและใหญ่กว่าโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm โดยพบพื้นที่รูปกรวยที่มีวงแหวนหัวหอมภายใน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500-1500 rpm พบจุดบกพร่องแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ จุดบกพร่องที่บริเวณผิวหน้าด้านติดกับแผ่นหล่อ และจุดบกพร่องที่บริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมด้านแผ่นหล่อ ขนาดของจุดบกพร่องที่มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงที่ลดลง จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของรอยต่อนี้เกิดจากการไหลวนของอลูมิเนียมที่บริเวณ

ดังกล่าวมีค่าน้อยเกินไป อนุภาคนิวที่มีค่าอนุภาคสูงนี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเป็นส่วนใหญ่ทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดการเติมเต็มอนุภาคนิวได้ อย่างไรก็ตามหากทำการเพิ่มมุมเอียงของตัวกวนแล้ว คาดว่าอาจทำให้เกิดการเติมอนุภาคนิว หรือการไหลวนของอนุภาคนิวที่จุดดังกล่าวเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับกาเพิ่มมุมเอียงในการเชื่อมอนุภาคนิวเกรด 6063 ทั่วไป [6,13] การลดความแข็งแรงของรอยต่อเมื่อปรากฏจุดบกพร่องในรอยต่อนั้น คาดว่าเกิดจากสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นที่จุดรวมความเค้นในรอยต่อ (ในที่นี้คือจุดบกพร่องในแนวเชื่อม) ที่แสดงให้เห็นว่าความเค้นที่มินั้นมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อรูปร่างและขนาดของรอยต่อเพิ่มขึ้น ความเค้นที่จุดรวมความเค้นที่มีค่าสูงนี้เมื่อคนแรงกระทำทำให้ชิ้นส่วนรับแรงได้น้อยลง อีกทั้งบริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง และส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลง [26]

รูปที่ 4.20 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่ออนุภาคนิวแผ่นรีดและอนุภาคนิวแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 150 mm/min ซึ่งแสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดในความเร็วรอบนี้ที่ 112 MPa ที่แสดงโลหะเชื่อมมีจุดบกพร่องที่ผิวหน้าและมุมด้านล่างติดแผ่นหล่อในพื้นที่การกวน ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่ง I ถึง VI ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการประสานกันระหว่างโลหะทั้งสองชนิดรอยต่อ

รูปที่ 4.20 (ข) แสดงขอบเขตระหว่างอนุภาคนิวแผ่นรีดที่อยู่ด้านซ้ายกับพื้นที่การกวน โครงสร้างจุลภาคของแผ่นรีดพบว่าขนาดเม็ดเกรนคล้ายกับการเชื่อมด้วยความเร็วรอบอื่นๆ ที่ผ่านมา คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $35 \mu\text{m}$ ขณะเดียวกันที่ด้านขวาของเส้นประนั้นแสดงพื้นที่การกวนบริเวณที่เป็นวงแหวนหัวหอมแสดงการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของเม็ดเกรนของอนุภาคนิว และเรียงซ้อนเป็นชั้นๆ ชั้นการเรียงตัวนี้คือวงแหวนหัวหอมที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งมีทิศทางการเรียงตัวตามทิศทางการกวนของตัวกวนที่ทำให้เกิดการประสานของอนุภาคนิว ทำการวัดขนาดเกรนพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าประมาณ $22 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดเม็ดเกรนที่พบในพื้นที่การกวนของการเชื่อมที่ใช้ความเร็วรอบ 1500 rpm

รูปที่ 4.20 (ค) แสดงกึ่งกลางของวงแหวนหัวหอมที่ละเอียดยิ่งขึ้น พบชั้นการรวมตัวของอนุภาคนิวมีลักษณะเป็นวงแหวนหัวหอมดังแสดงด้วยลูกศรชี้ อย่างไรก็ตามดูเหมือนการก่อตัวของอนุภาคนิวบริเวณนี้จะตรวจสอบได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากโครงสร้างอาจเกิดการทำลายไปบางส่วนเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไปทำให้การก่อตัวของเม็ดเกรนไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการกล่าวอ้างนี้เป็นเพียงการสันนิษฐานเท่านั้นเพราะขอบเขตของการศึกษานี้ไม่ได้ระบุถึงการศึกษารองความร้อน จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาวิเคราะห์อนุภาคในแนวเชื่อมต่อไป ขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยมีค่าประมาณ $22.02 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยที่โตกว่าขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยในวงแหวนหัวหอมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500-1500 rpm



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min

รูปที่ 4.20 (ง) แสดงขอบเขตระหว่างวงแหวนหัวหอมและพื้นที่ของรูปทรงกรวยของพื้นที่การกวน ที่พบว่าด้านของอลูมิเนียมพื้นที่ของรูปทรงกรวยของพื้นที่การกวนเกิดการอัดตัวเข้าสู่ด้านวงแหวนหัวหอมเป็นชั้นๆดังแสดงด้วยลูกศรชี้ ภายในชั้นของลูกศรเกิดการก่อตัวของเม็ดเกรนอลูมิเนียมดังเกิดขึ้นในพื้นที่การกวน

รูปที่ 4.20 (จ) แสดงตำแหน่งที่แผ่นอลูมิเนียมแผ่นหล่อและแนวการกวนของอลูมิเนียมบริเวณที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้น ในพื้นที่แสดงด้วยพลาสติกในรูป พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm นี้ไม่สามารถทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างอลูมิเนียมแผ่นรีดและพื้นที่การกวนได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 500-1500 rpm แล้ว พบว่าความเร็วรอบนี้อาจไม่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความสมบูรณ์ของแนวต่อ และจุดบกพร่องนี้เป็นสาเหตุหลักที่ให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

รูปที่ 4.20 (ฉ) แสดงผิวหน้าของรอยต่อที่บริเวณการเกิดจุดบกพร่อง หรือความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อม พบส่วนของเศษอลูมิเนียมถูกดันเปิดออกที่ตำแหน่งนี้ ด้านล่างของพื้นที่การกวนไม่พบการก่อตัวของเม็ดเกรนอย่างต่อเนื่อง นั่นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อไม่สมบูรณ์และเกิดจุดบกพร่องขึ้น

รูปที่ 4.20 (ซ) แสดงพื้นที่ข้างพื้นที่การกวนด้านอลูมิเนียมแผ่นหล่อที่พบความแตกต่างจากการเชื่อมที่ความเร็วรอบอื่นๆ กล่าวคือที่ความเร็วรอบนี้พื้นที่ด้านนอกพื้นที่การกวน อลูมิเนียมถูกอัดเข้ามาสู่พื้นที่ของการกวนเพิ่มมากขึ้น ทำให้อลูมิเนียมเกิดการเรียงอัดตัวเป็นชั้นๆ ดังแสดงด้วยลูกศรในรูป การเกิดการอัดเรียงตัวนี้เกิดจากการที่อลูมิเนียมที่ถูกกวนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการประสานเพื่อให้แนวเชื่อมเกิดความสมบูรณ์ได้จึงพยายามดึงเอาอลูมิเนียมด้านข้างลงไปเติมเต็มตำแหน่งด้านล่างของพื้นที่การกวนจึงทำให้เกิดการเสียรูปขึ้น [6]

รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อถูกเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวแปรการเชื่อมประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2 องศา ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกเกลียว ระยะสอดตัวกวน 0.1 มม. เข้าสู่แผ่นรีด แผ่นรีดวางอยู่ด้านแอดวานซิง ได้ผลสรุปดังนี้

- การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm ไม่สามารถทำการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063 แผ่นรีดและแผ่นหล่อที่สมบูรณ์ได้
- ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 112 MPa คือ ความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 mm/min
- รอยเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะหลักเนื่องจากการพังทลายของชิ้นงานเกิดขึ้นที่แนวเชื่อม

- โครงสร้างจุลภาคแสดงพื้นที่การกวนที่ไม่สมบูรณ์ การก่อดั้วของเม็ดเกรนที่เล็กและละเอียดและพบชิ้นการอัดตัวของอลูมิเนียม

