บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

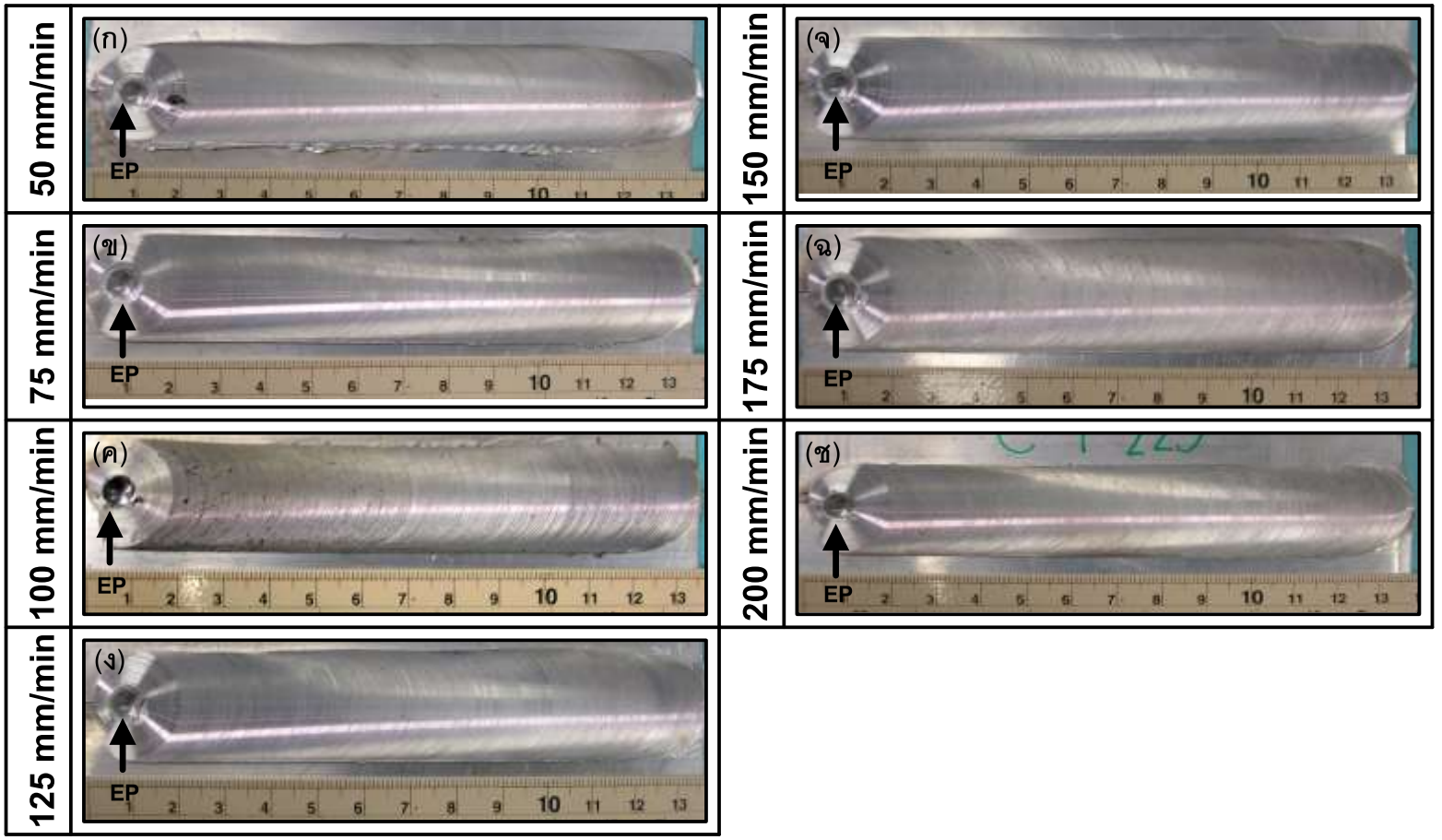
รอยเชื่อมต่อชนอลูมิเนียมเกรด 6063-T1 ในโครงสร้างรถยนต์ ได้ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ โดยทำการทดลองตามการออกแบบ และวางแผนการทดลองตามบทที่ 3 ทำให้ได้ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ประกอบไปด้วย อิทธิพลของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา อิทธิพลของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวซ้าย อิทธิพลของตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา และอิทธิพลของตัวกวนรูปทรงเกลียวซ้าย โดยมีรายละเอียดของผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

4.1 อิทธิพลของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียววนขวาต่อความแข็งแรงแรงดึง

ในงานวิจัยที่ผ่านมา กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [20] ได้รายงานผลเบื้องต้นไว้ว่าการใช้ตัวกวนผิวเรียบในการเชื่อม และเป็นตัวกวนที่มีลักษณะพื้นผิวด้านข้างที่สัมผัสกับวัสดุและเกิดความร้อนเสียดทานนั้นมีลักษณะที่เป็นผิวเรียบ อย่างไรก็ตามในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมต่างๆ ด้วยการเสียดทานแบบกวน [9-12] ได้ระบุไว้ว่าการเชื่อมด้วยตัวกวนที่มีผิวเรียบนั้น ทำให้เกิดผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและตัวกวนลดลง ส่งผลทำให้การเกิดความร้อนเสียดทานลดลง และทำให้การกวนภายในพื้นที่การกวนนั้นลดลง นอกจากนั้นรายงานบางฉบับได้สรุปข้อมูลที่น่าสนใจในการประยุกต์ตัวกวนรูปร่างที่มีผิวเกลียวในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด 2024 และ 6061 [9] ว่าการใช้ตัวกวนที่มีผิวเกลียวนั้นจะทำให้อลูมิเนียมเกิดการไหลวนอย่างมีระเบียบ และง่ายต่อการประ สานกันเป็นเนื้อเดียวได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้ตัวกวนลักษณะผิวเกลียวจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6063-T1 โดยมีความคาดหวังว่าอลูมิเนียมที่เกิดการไหลรอบๆ ตัวกวนที่เป็นเกลียวอาจเกิดการไหลอัดเศษลงไปด้านล่างของแนวเชื่อม หากตัวกวนทรงเกลียวมีลักษณะเป็นเกลียวคล้ายดอกต้าปเกลียว หรืออาจทำให้เศษอลูมิเนียมที่ไหลวนถูกดึงขึ้นมาด้านบนของแนวเชื่อมหากตัวกวนทรงเกลียวมีลักษณะเป็นเกลียวขวาคล้ายสกรูทั่วไป ซึ่งอาจทำให้จุดบกพร่องที่เกิด ขึ้นที่ด้านล่างของด้านแอดวานซิ่งของรอยต่อชนอลูมอเนียม 6063-T1 [20] หายไปได้

ในหัวข้อนี้เริ่มทำการทดลองโดยการใช้ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวมาตรฐาน M5 ที่คาดว่าการไหลวนของอลูมิเนียมจะมีลักษณะการดึงเศษขึ้นด้านบนคล้ายสกรู และมีตัวแปรการเชื่อมในการเชื่อมประกอบไปด้วย

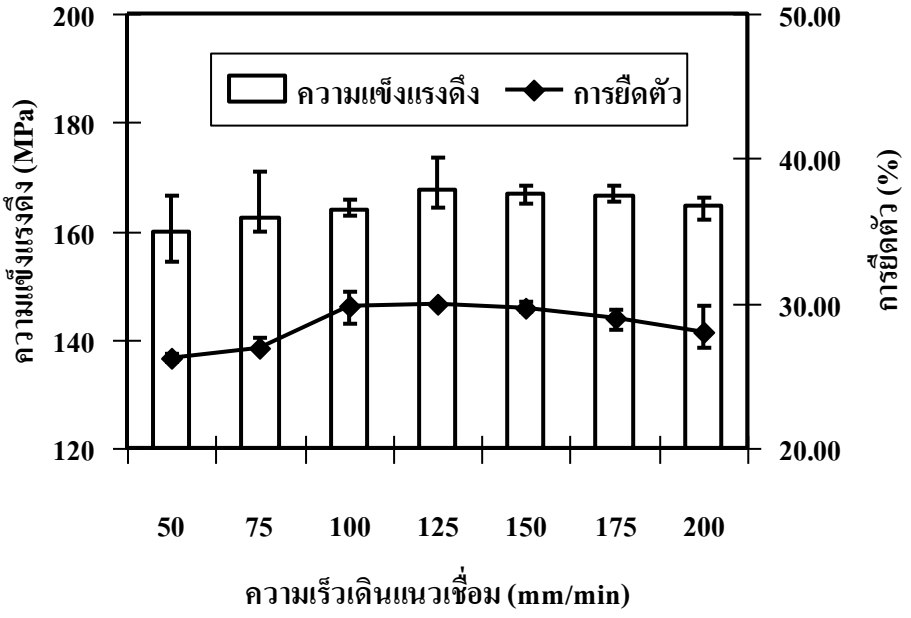
- ตัวกวนรูปร่างทรงกระบอกเกลียวขวาโดยมีขนาดตามเกลียวมาตรฐาน M5
- ความเร็วรอบการหมุนของตัวกวน มีค่าเท่ากับ 2000 rpm เป็นความเร็วรอบที่อ้างอิงมาจากผลการทดลองการเชื่อมอลูมิเนียม 6063-T1 ที่มีการรายงานไว้ [20]



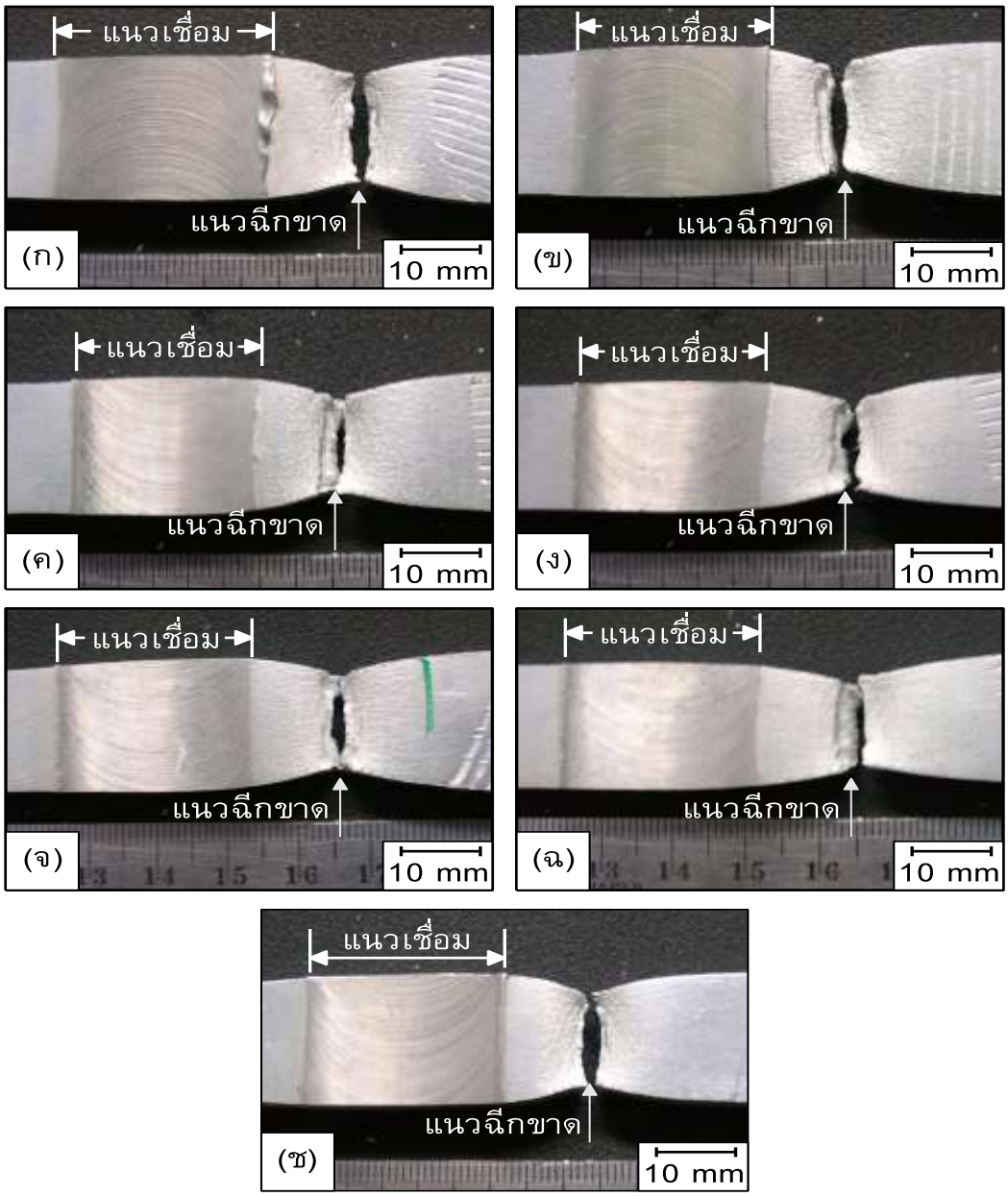
รูปที่ 4.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยตัวกวนทรงเกลียวขวาที่ความเร็วเดินแนวต่างๆ ค่า EP=จุดบกพร่องที่จุดสุดท้าย และค่า WP=จุดบกพร่องบนแนวเชื่อม (หน่วยสเกล: ซม.)

- ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 50-200 mm/min การเลือกค่าความเร็วรอบในการหมุนของตัวกวนและความเร็วในการเดินแนวเชื่อมนั้น อ้างอิงมาจากการคำนวณหา ค่าอัตราระยะห่างการหมุน (Revolution pitch) ของตัวกวนซึ่งในโลหะอลูมิเนียมเกรด 2017-T351 ที่กล่าวว่าความแข็งแรงของอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง จะมีค่าอัตราระยะห่างการหมุนของตัวกวนประมาณ 0.01 ถึง 0.1 mm/rev [5]
- ความเอียงของตัวกวนมีค่าเท่ากับ 2 องศา เนื่องจากมุมเอียงที่สามารถทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงจะมีค่าประมาณ 2-3 องศา [23] ดังนั้นในการทดลองนี้เลือกใช้ที่ค่าต่ำสุดเป็นเบื้องต้น

รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวต่างๆ พบว่าที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อมทุกๆ สภาวะปรากฏจุดบกพร่อง เป็นรูกลมดังแสดงด้วยลูกศร และอักษร EP ที่หมายถึงจุดสุดท้าย (Endpoint) ซึ่งจุดบกพร่องแบบนี้จะเกิดที่ทุกๆสภาวะของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ไม่สามารถกำจัดออกได้ และเป็นข้อเสียของกระบวนการเชื่อมแบบนี้ ซึ่งรูช่องว่างสามารถที่จะอุดรูได้ด้วยกระบวนการเชื่อมอื่นๆ เช่น การเชื่อมอาร์คด้วยไฟฟ้า (Shield metal arc welding : SMAW) ได้ [23]



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และความเร็วเดินแนวเชื่อม ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงเกลียวขวา

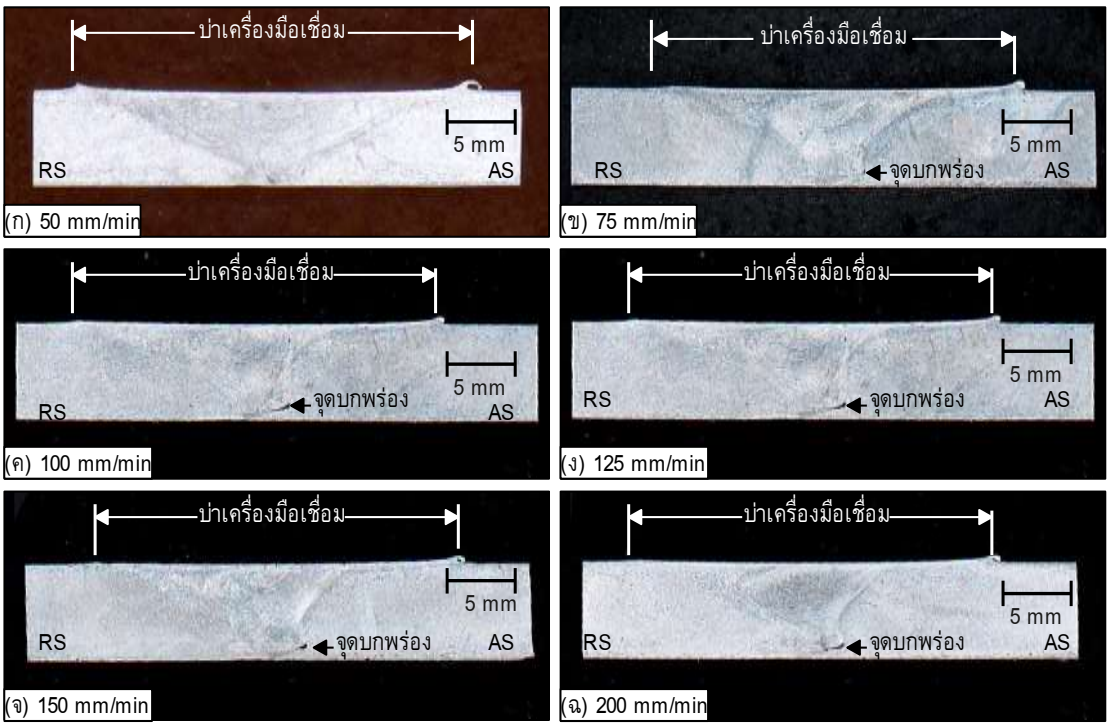


รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการเกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงทีเชื่อมด้วยตัวกวนทรงเกลียวขวา: (ก) 50 mm/min, (ข) 75 mm/min, (ค) 100 mm/min, (ง) 125 mm/min, (จ) 150 mm/min, (ฉ) 175 mm/min และ (ช) 200 mm/min.

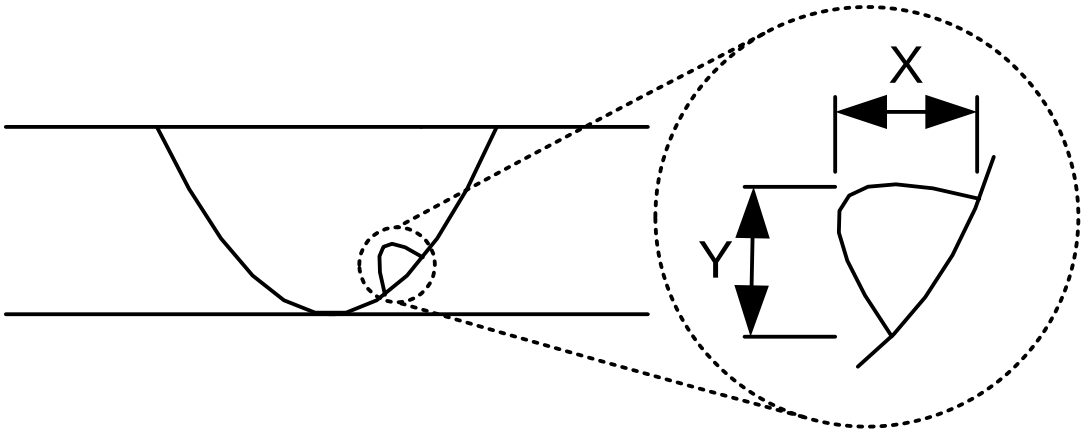
ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับจุดบกพร่องนี้ พิจารณาจุดอื่นๆ ของผิวหน้าแนวเชื่อมไม่พบจุดบกพร่อง ผลการทดลองที่ได้นี้แตกต่างจากผิวหน้าแนวเชื่อมอลูมิเนียม 6063-T1 [20] ที่รายงานการเกิดจุดบกพร่อง ที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ได้ผิวหน้าแนวเชื่อมที่สมบรูณ์เป็นไปได้ยาก ความไม่สมบรูณ์เกิดขึ้นเริ่มจากจุดเริ่มต้นของแนวเชื่อมเป็นแนวยาว และมีขนาดความโตและความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น การเกิดแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ในแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนวนขวานี้ คาดว่ามีสาเหตุเนื่องจากเมื่อพิจารณาทิศทางการ

หมุนของตัวกวน เห็นได้ว่าร่องเกลียวทำหน้าที่คล้ายกับร่องคายเศษของดอกสว่าน ในระหว่างการกวนร่องเกลียวจะดึงเนื้อโลหะที่อยู่ในสภาวะอ่อนตัวขึ้นมาแล้วอัดชนกับบ่า (Shoulder) เนื้อโลหะจะม้วนตัวลงไปเมื่อมีเนื้อโลหะชุดใหม่มาแทนที่ จึงไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องที่ผิวหน้า

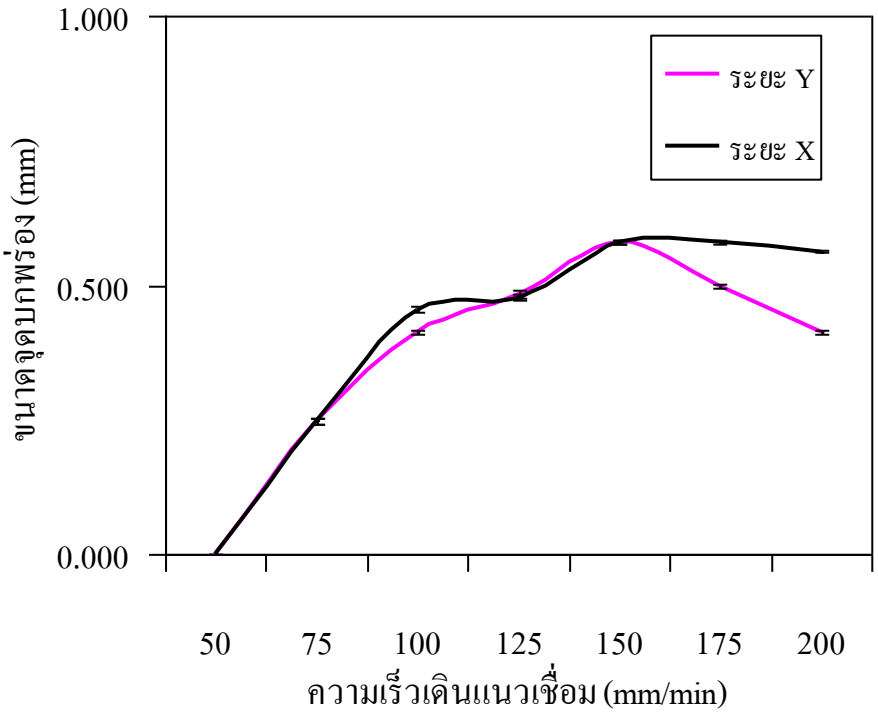
ชิ้นงานเชื่อมที่ได้นำไปทำการทดสอบความแข็งแรงดึงตามวิธีการที่ได้ออกแบบไว้ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบและค่าร้อยละการยืดตัว (%Elongation) ของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 100 mm/min และมีค่าลดต่ำลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 125 ถึง 200 mm/min ความเร็วในการเชื่อม 100 mm/min มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือ 170 MPa มีค่าของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดประมาณ 32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตำแหน่งการพังทลาย หรือการฉีกขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงทั้งหมด เกิดที่บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยระยะการฉีกขาดที่ตำแหน่งประมาณ 10-15 มิลลิเมตรจากขอบผิวหน้าแนวเชื่อม ไม่มีสภาวะการเชื่อมใดๆ ที่แสดงการเกิดการพังทลายภายในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าสภาวะการเชื่อมใดๆ ในหัวข้อนี้สามารถทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์มากกว่าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก [20]



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ ที่เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียวขวา (RS คือ ด้านรีทรีทติ่ง AS แสดงด้านแอดวานซิ่ง เส้นประแสดงแนวพังทลาย)



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการวัดขนาดจุดบกพร่องภายในโครงสร้างมหภาค



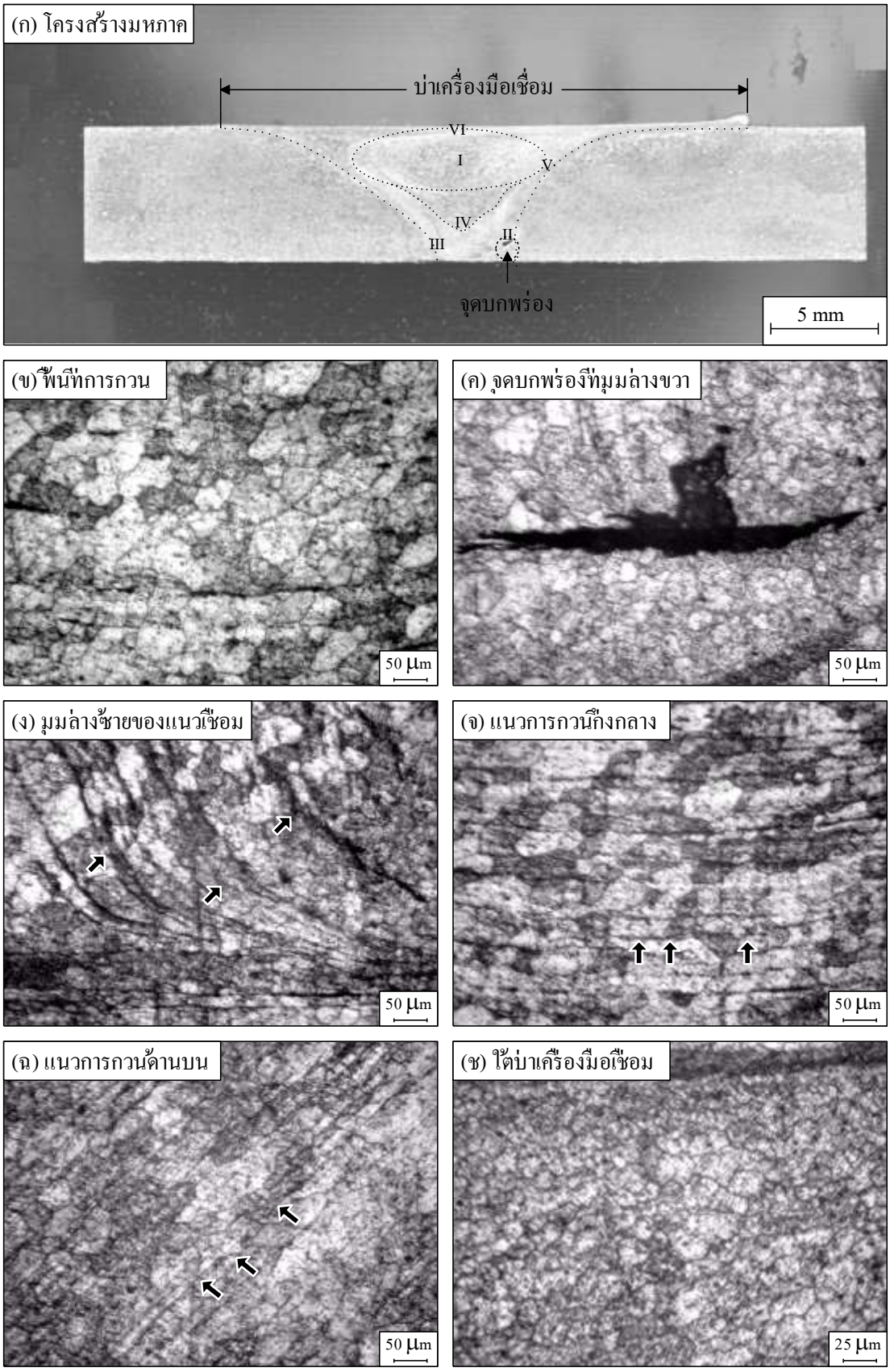
รูปที่ 4.6 ขนาดจุดบกพร่องในเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา

รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ ที่เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียวขวา เส้นประที่แสดงแนวการพังทลายของชิ้นทดสอบไม่มีแสดงในภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคเหล่านี้ เนื่องจากตำแหน่งการพังทลายอยู่นอกห่างบริเวณแนวเชื่อมประมาณ 10-15 มม. ดังที่กล่าวมาแล้ว โครงสร้างมหภาคของรอยต่อแสดงความสมบูรณ์ที่ดีกว่ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก [20] อย่างไรก็ตามสามารถตรวจสอบพบจุดบกพร่องขนาดเล็กๆ ในโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) ถึง (ฉ) ทำการวัดขนาดความกว้าง (ระยะ X) และความ

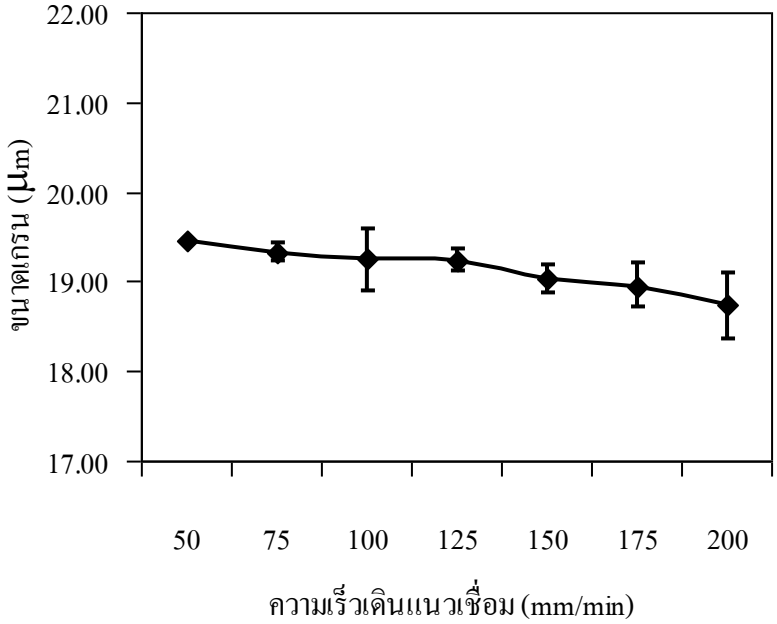
สูง (ระยะ Y) ของจุดบกพร่องดังแสดงในรูปที่ 4.5 ที่ทำการวัดผ่านมา และแสดงผลการวัดในรูปที่ 4.6 พบว่าขนาดของจุดบก พร่องที่ระยะ X และระยะ Y พบว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 mm/min ไม่พบการเกิดจุดบกพร่องเกิดขึ้น ขณะที่จากความเร็วเดินแนวเชื่อมจาก 75-200 mm/min ขนาดของจุดบกพร่องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การเพิ่มขนาดของจุดบกพร่อง คาดว่าเกิดจากการเดินแนวเชื่อมที่เร็วเกินไปทำให้การเวลาในการเติม กด หรืออัดอลูมิเนียมลงสู่ตำแหน่งจุดบกพร่องมีไม่เพียงพอ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการเกิดจุดบกพร่องในรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกและทรงกรวยที่ผ่านมา จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม เนื่องจากตำแหน่งการพังทลายไม่ได้เกิดผ่านจุดบกพร่องนี้แต่เกิดที่บริเวณแผ่นอลูมิเนียมระยะประมาณ 10-15 มม. จากขอบของบ่าแนวเชื่อม ผลการทดลองเบื้องต้นสามารถทำให้ทราบตัวแปรที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม แต่ปัญหาการเกิดจุดบกพร่องยังคงอยู่ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงวิธีการเชื่อมเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่แข็งแรงและสมบรูณ์ต่อไป

รูปที่ 4.7 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียวขวาที่แสดงจุดบกพร่องที่มุมด้านล่างขวาด้านแอดวานซิ่งของชิ้นงานเชื่อม โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานสามารถแบ่งออกเป็นพื้นที่ต่างๆ คือ พื้นที่ของโลหะอลูมิเนียมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง พื้นที่การกวน (Stir zone) หรือพื้นที่ทั้งหมดในเส้นประ และพื้นที่นักเกต (Nugget zone) ที่แสดงด้วยเส้นประวงรี การเกิดความแตกต่างดังกล่าวของพื้นที่ คาดว่าเกิดจากการจัดเรียงของเม็ดเกรนในโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆ ของแนวเชื่อมพบว่า ที่พื้นที่กึ่งกลางของนักเกตตำแหน่งที่ I ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) เม็ดเกรนที่ได้มีลักษณะเม็ดกลมมนที่มีขนาดที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ เม็ดเกรนที่มีความละเอียดและรูปร่างที่กลมมนขึ้นนี้เกิดจากกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้ก่อให้เกิดผลึกเกรนใหม่ (Dynamic Recrystallization) ของอลูมิเนียมขึ้น [6] อย่างไรก็ตามการตรวจสอบการก่อผลึกเกรนใหม่นี้ไม่ได้รายงานไว้ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) ตามมาตรฐาน ASTM E112 [25] พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 19.25 μm และเมื่อเปรียบเทียบเม็ดเกรนบริเวณพื้นที่นักเกตของการเชื่อมด้วยตัวกวนเกลียวขวาที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ พบว่าขนาดเม็ดเกรนมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่ม ทำให้ขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยมีค่าที่เล็กลงดังแสดงในรูปที่ 4.8

รูปที่ 4.7 (ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่บริเวณมุมด้านล่างขวาด้านแอดวานซิ่งตำแหน่งที่ II ที่แสดงขอบเขตระหว่างพื้นที่รับอิทธิพลจากความร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone: HAZ) และพื้นที่ที่เกิดการกวนด้วยเครื่องมือเชื่อม ที่บริเวณ HAZ นั้น พบว่าขนาดและรูปร่างของเม็ดเกรนมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบไม่กลมมน ลักษณะของจุดบกพร่องที่มีมิติด้านแกน Y ที่มีขนาดที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับจุดบกพร่องในรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก [20] ซึ่ง



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคและจุลภาคชิ้นงานเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวขวา และความเร็วเดินแนว 100 mm/min



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดเกรนรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวขวา

คาดว่าตัวกวนนี้มีการดึงให้อลูมิเนียมเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนซึ่งเป็นลักษณะของเกลียวซ้ายนี้ทำให้มีการเติมอลูมิเนียมลงสู่จุดบุกพร่องดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้ทราบว่าการเกิดจุดบกพร่องนี้ยังคงอยู่และควรมีการแก้ไขปรับปรุงเปลี่ยนแปลงต่อไป

รูปที่ 4.7 (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมบริเวณมุมล่างซ้ายตำแหน่งที่ III แสดงแนวเส้นสีดำของอลูมิเนียม (แสดงด้วยลูกศร) ที่เกิดจากการกวนของตัวกวนทรงเกลียวขวา แนวเส้นสีดำแสดงให้เห็นความแตกต่างของแนวเชื่อม ที่อลูมิเนียมถูกบังคับให้เคลื่อนที่ได้ดีกว่าตัวกวนทรงกระบอกและทรงกรวยที่ทำการเชื่อมในหัวข้อที่ผ่านมา และคาดว่าเป็นเหตุผลที่ทำให้แนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งแนวเชื่อมเกิดการฉีกขาดที่บริเวณโลหะหลักอลูมิเนียม แนวเส้นสีดำที่เกิดจากกวนของตัวกวนทรงเกลียวนี้ สามารถพบได้ในพื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นที่การกวน ดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 4.7 (จ) ตำแหน่งที่ IV ซึ่งเป็นขอบเขตของพื้นที่นักเกตที่มีลักษณะเป็นวงรีอยู่กึ่งกลางของแนวเชื่อม หรือในรูปที่ 4.7 (ฉ) ตำแหน่งที่ V ซึ่งเป็นขอบเขตระหว่างพื้นที่การกวนกับโลหะหลักอลูมิเนียมที่แสดงแนวเส้นสีดำที่เกิดจากการกวนอย่างเด่นชัด ขณะที่ขนาดเม็ดเกรนของแนวแนวเชื่อมบริเวณภายใต้เครื่องมือเชื่อม หรือพื้นที่บริเวณเกือบผิวหน้าของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ช) ตำแหน่งที่ VI มีขนาดที่เล็ก ละเอียด และสม่ำเสมอ คล้ายกับเม็ดเกรนบริเวณนี้ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก ทรงกรวยในหัวข้อที่ผ่านมา

จากการทำการประยุกต์ตัวกวนรูปทรงเกลียวขวา ความเร็วรอบในการหมุน 2000 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min ในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ใช้ตัวกวนทรงเกลียวขวา สามารถทำการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิ-