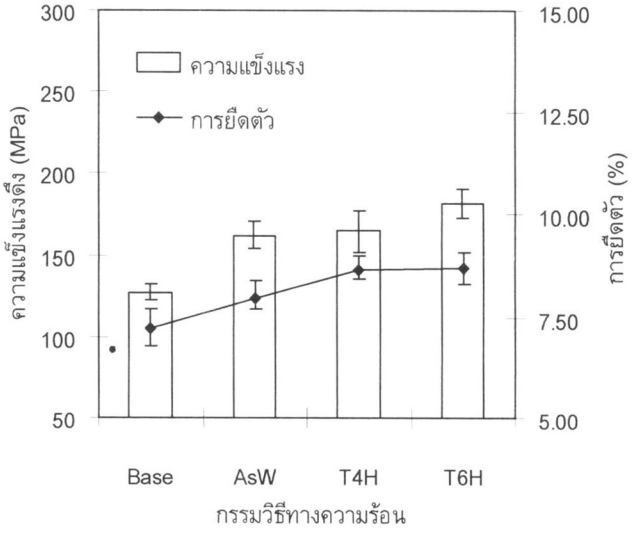
บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

การดำเนินการแผนงาน การปรับปรุงสมบัติรอยเชื่อมอลูมิเนียมผสมด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ได้วางแผนไว้ในบทที่ 3 ได้ผลดังสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ และผลการทดลองที่ได้คาดว่าสามารถใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้งานจริงในงานอุตสาหกรรมต่อไป ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.1 ผลการทดลองโครงการย่อยที่ 1: อิทธิพลการอบชุบด้วยความร้อนหลังการเชื่อมต่อสมบัติของโลหะเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม เกรด6063

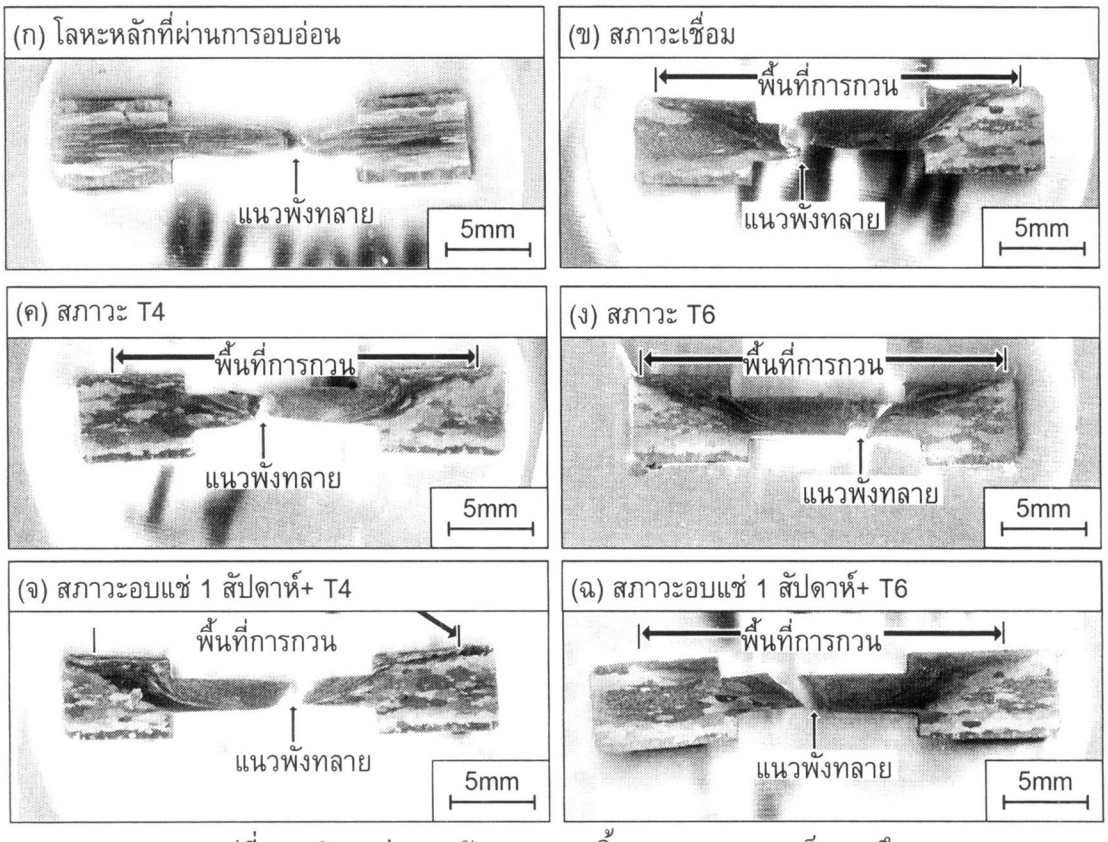


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และการอบคืนไฟแบบต่างๆ ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็งธรรมชาติ

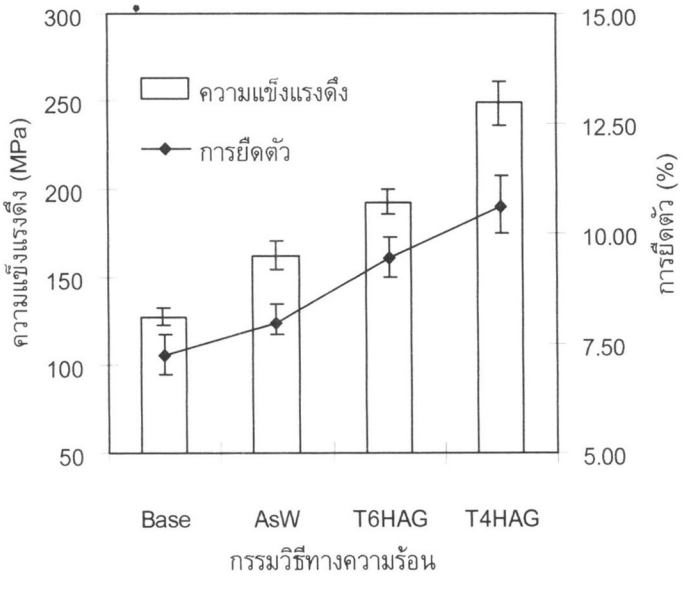
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และการอบคืนไฟแบบต่างๆ ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็งธรรมชาติ ตัวอักษรในแกน X มีความ หมายดังนี้ Base คือ ความแข็งแรงของอลูมิเนียมหลังจากการอบอ่อน AsW คือ โลหะเชื่อมที่ได้จากการนำเอาอลูมิเนียมที่ผ่านการอบอ่อนไปทำการเชื่อม แต่ไม่ผ่านกระบวน การทางความร้อนใดๆ T4H คือ โลหะเชื่อมที่ผ่านการอบคืนไฟวิธี T4 และ T6H คือ โลหะเชื่อมที่ผ่านการอบคืนไฟวิธี T6 ผลการทดลองพบว่า อลูมิเนียมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 413 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงลดลง 30% เมื่อ

เปรียบเทียบกับอลูมิเนียมจากท้องตลาด ก่อนการนำมาทำการอบอ่อน อลูมิเนียมที่ผ่านการอบอ่อนแล้วนำมาทำการเชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมที่กำหนด พบว่าค่าความแข็ง แรงดึงของโลหะเชื่อมนั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหลักที่ค่าเฉลี่ยประมาณ 27% ขณะที่โลหะที่ผ่านการเชื่อมแล้วนำไปทำการอบชุบด้วยกรรมวิธี T4 และ T6 นั้นมีค่าความแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมก่อนการเชื่อมที่ค่าประมาณ 30 และ 40% ตามลำดับ ทำการเปรียบ เทียบรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) ถึง (ง) พบว่ารูปแบบการพังทลายมีความแตก ต่างกัน คือ ชิ้นงานที่ผ่านสภาวะการอบอ่อน สภาวะการเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบชุบ และสภาวะการอบชุบ T4 นั้น แนวการพังทลายมีลักษณะการฉีกขาดเป็นกรวยดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) ถึง (ค) ขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบ T6 นั้น มีแนวการพังทลายเป็นแนวยาวทำมุมเอียงกับแนวขนานของชิ้นทดสอบที่ค่า-ประมาณ 40-60 องศา คาดว่ารูปแบบการพังทลายที่แตกต่างนี้ส่งผลทำให้เกิดความแข็งแรงที่แตกต่าง กล่าวคือ ในสภาวะโลหะอลูมิเนียมที่ผ่านการอบอ่อนและผ่านการเชื่อมนั้น ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงและค่าการยืดตัวที่มีค่าต่ำเนื่องจากการเกิดการพังทลายในรูปแบบที่ไม่เป็นเส้นตรงและไม่เป็นการพังทลายแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone fracture) [24] แต่เป็นลักษณะที่คล้ายกับการเกิดเส้นซิกแซกดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) ถึง (ค) แนวการพังทลายนี้แตกต่างจากการเกิดการพังทลายในโละเชื่อมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนตามกรรมวิธี T6 ดังแสดงในรูปที่ 4 (ง) ที่แสดงการเกิดการพังทลายเอียงทำมุมกับแนวแรงที่แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นการเพิ่มขึ้นนี้คาดว่าเกิดจากการพังทลายที่เกิดขึ้นบนระนาบการเลื่อนไถลซึ่งในวัสดุเหนียวมีค่าทำมุม 45° [25] หรืออาจเกิดจากการตกผลึกของอนุภาคบางอย่างในเนื้ออลูมิเนียมซึ่งต้องทำการหาสาเหตุของการเกิดด้วยกล้องกำลังขยายสูง เช่น กล้องอิเลกตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) ต่อไป

รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของโลหะเชื่อม ที่ผ่านการบ่มแข็งธรรมชาติเป็นเวลา 168 ชม. หรือ 1 สัปดาห์ พบว่าการบ่มแข็งธรรมชาติ 1 สัปดาห์ก่อนการอบชุบส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงและการยืดตัวของโลหะเชื่อม กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงของโล-หะเชื่อมเพิ่มขึ้นประมาณ 34 และ 49% และมีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้น 30 และ 47% สำหรับการอบชุบด้วยวิธี T4 และ T6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะ อลูมิเนียมที่ผ่านการอบชุบ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบโลหะเชื่อมที่ไม่ผ่านการบ่มแข็งธรรมชาติ ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าประมาณ 16 และ 37% และมีค่าการยืดตัวที่สูงกว่าประมาณ 10 และ 22% สำหรับการอบชุบด้วยวิธี T4 และ T6 ตามลำดับ



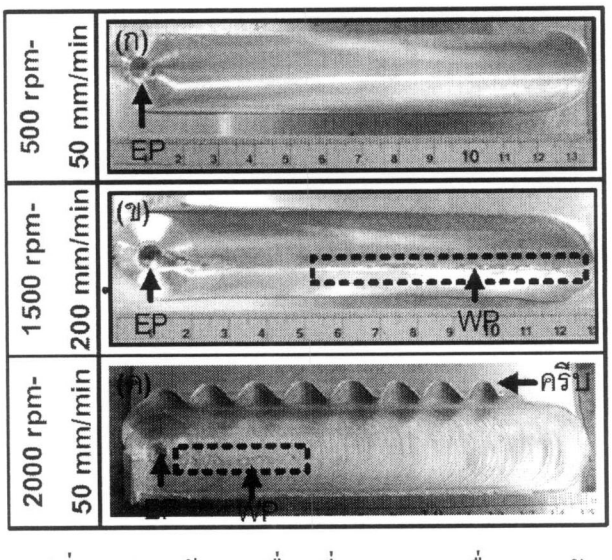
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และการอบคืนไฟแบบต่างๆ ของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งธรรมชาติ

รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงในบริเวณโลหะเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.2 (จ) และ (ฉ) มีลักษณะคล้ายกับการเกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงที่ไม่ได้ผ่านการบ่มแข็งธรรมชาติก่อนการทำการอบชุบแบบ T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ง) กล่าวคือ รูปแบบการพังทลายนี้เอียงทำมุมกับแนวแรงหรือแนวขนานตามความยาวของชิ้นงานทดสอบประมาณ 45° ซึ่งคาดว่าเป็นการเกิดการฉีกขาดด้วยเฉือนตามระนาบการลื่นไถลของวัสดุเหนียว [25] การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะเชื่อมเมื่อทำการบ่มแข็งธรรมชาติไว้ที่ 1 สัปดาห์ก่อนนำไปทำการอบชุบนั้น คาดว่ามีความสอดคล้องกับการศึกษาผลของการบ่มแข็งสองขั้นและทองแดงต่อความแข็งแรงของบริเวณกระทบความร้อนในการเชื่อม AA6061 [26] ที่กล่าวว่า การเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระทบความร้อนนั้นเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคอลูมิเนียม-ทองแดงที่ตกตะกอนในโครงสร้างเข้าไปในพื้นที่จีพี (GP zone) และทำให้ดิสโลเกชั่นมีการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามคำกล่าวดังกล่าวไม่ได้ทำการศึกษาเพื่อยืนยันในบทความวิจัยนี้ และจำเป็นต้องทำการศึกษาในอนาคตต่อไป

4.2 ผลการทดลองโครงการย่อยที่ 2: อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมเกรด 6063 สภาพหล่อและรีด



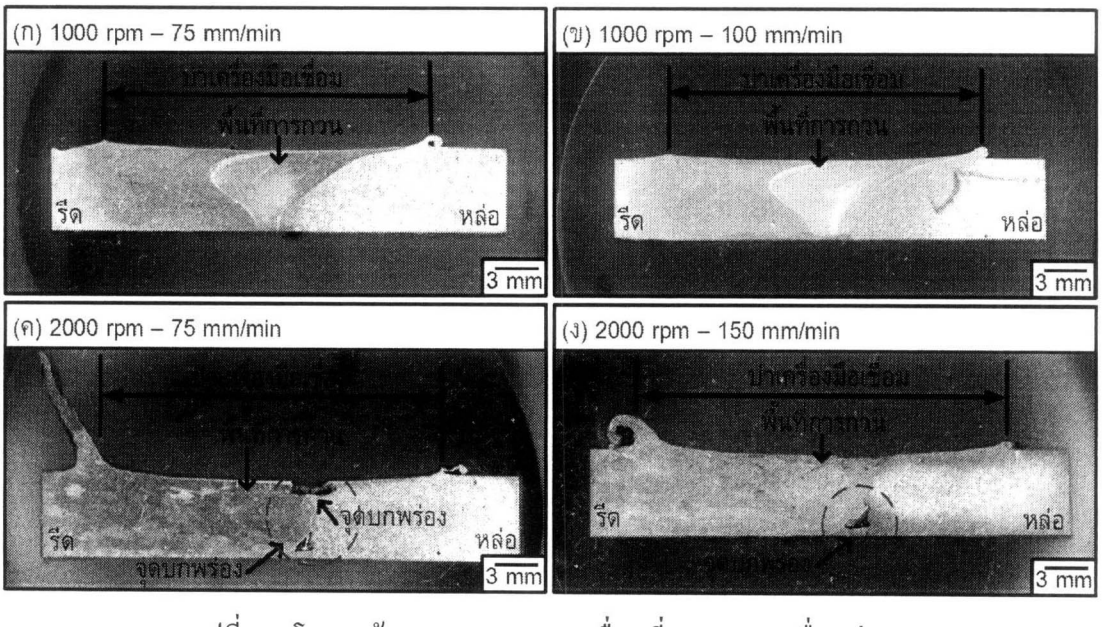
รูปที่ 4.4 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่สภาวะการเชื่อมบางตัว

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถทำการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อเข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเชื่อมนี้ทำให้เกิดผลการทดลองต่างๆ ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมที่ประกอบไปด้วยความเร็วรอบการหมุนของตัวกวน และความเร็ว

เดินแนวเชื่อมทำให้เกิดผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์แตกต่างกัน คือ หากใช้ความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าต่ำ เช่น ความเร็วรอบ 500 rpm และ 50 mm/min ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ตลอดแนวเชื่อมจะไม่ปรากฏความบกพร่อง รูพรุน หรือส่วนที่ร่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารอยต่อนั้นไม่สามารถประสานติดกันได้ อย่างไรก็ตามในแนวเชื่อมการเสียดทานแบบกวนที่สมบูรณ์ยังคงมีจุดบกพร่องเป็นรูกลมที่ด้านปลายของชิ้นงานดังแสดงด้วยตัวอักษร EP รูกลมนี้เกิดจากการถอนตัวกวนออกจากแนวเชื่อมและไม่สามารถกำจัดออกได้ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแต่สามารถกำจัดออกได้การเชื่อมอุดรูวิธีการอื่นๆ เช่น การเชื่อมหลอมละลายเป็นต้น [14]

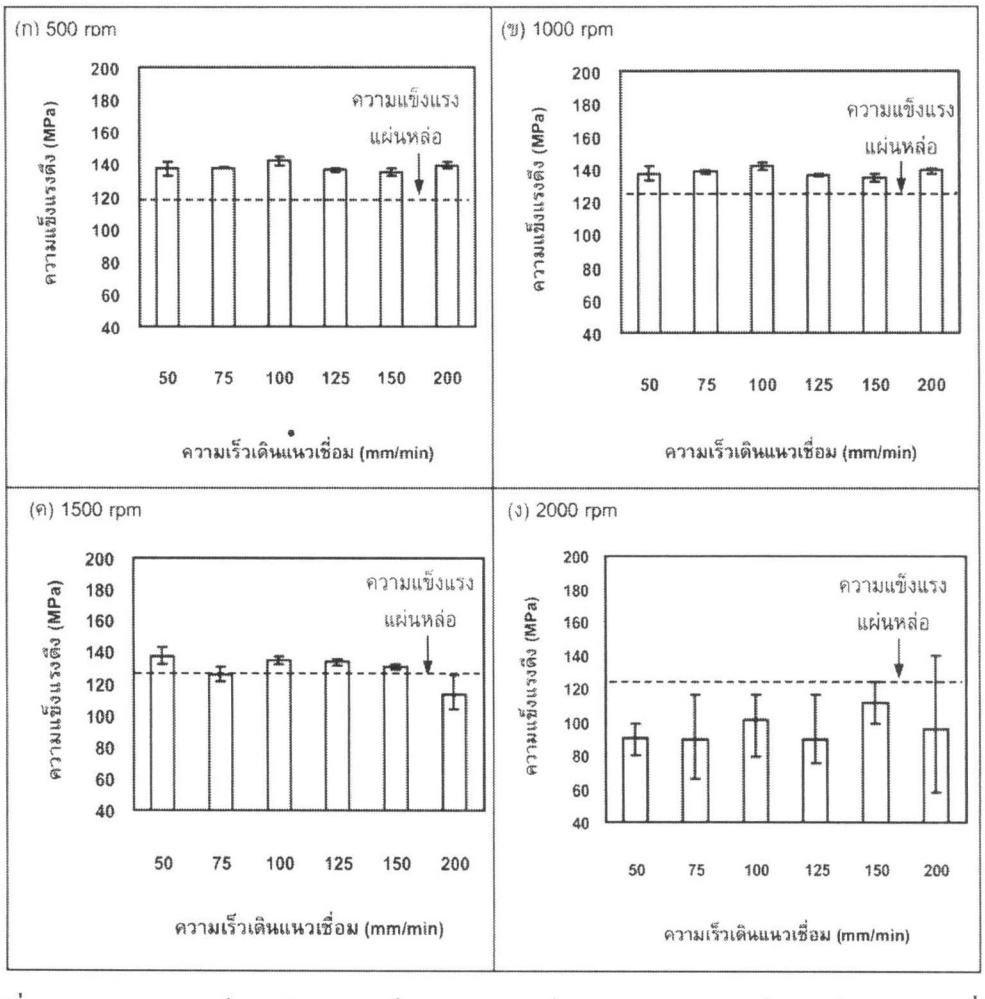
ตารางที่ 4.1 ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมจากการตรวจสอบด้วยสายตา

		ความเร็วเดินแนว (mm/min)					
		50	75	100	125	150	200
ความเร็วรอบ (rpm)	500	O	O	O	O	O	O
	1000	O	O	O	O	O	O
	1500	O	O	O	O	O	X
	2000	X	X	X	X	X	X



รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่สภาวะการเชื่อมต่างๆ

รูปแบบจุดบกพร่องที่พบ คือ พบจุดบกพร่องที่ผิว หน้าแนวเชื่อมที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของการเดินแนวเชื่อม บ่าเครื่องมือด้านหลังไม่สามารถเกลี่ย กด และอัดอลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ได้ดังแสดงด้วยอักษร WP ในรูปที่ 4.4 (ข) และ (ค) จุดบกพร่องลักษณะนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากเมื่อนำไปทำการรับแรงหรือทดสอบแรงดึงแล้วจะทำให้เกิดค่าความ ต้านทานแรงดึงต่ำและทำให้เกิดการพังทลายได้ง่าย [27] ความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ตรวจพบจุดบกพร่องลักษณะนี้ คือ ความเร็วรอบ 1500 rpm-200 mm/min และความเร็วรอบ 2000 rpm ทุกความเร็วรอบ เมื่อความเร็วของการเชื่อมมีค่าสูงขึ้น คือ 2000 rpm ทำให้เกิดจุดบกพร่องอีกชนิดหนึ่งขึ้นมา คือ จุดบกพร่องที่มีลักษณะเป็นครีบขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นที่ด้านรีทรีทติ่ง หรือด้านบนฝั่งอลูมิเนียมแผ่นหล่อดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) จุด บกพร่องนี้ อาจไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อโดยตรง.แต่หากนำรอยต่อชนิดนี้ไปใช้งานอาจต้องเสีย เวลาในการตกแต่งรอยต่อให้สวยงามได้

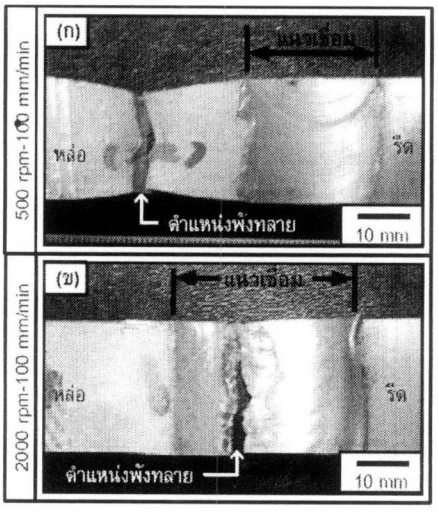


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ความเร็วเดิน และความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมบางตัวที่บ่งบอกให้ทราบว่า มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในโลหะเชื่อม เนื่องจากการเลือกสภาวะการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม ดังเช่นกล่าวมาแล้วในรูป 4.4 ที่ความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าต่ำ ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ ที่บริเวณโลหะเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) สำหรับความเร็วรอบ 1000 rpm และความ เร็วเดินแนวเชื่อม 75-100 mm/min ตามลำดับ อย่างไรก็เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นทดสอบที่ใช้ความเร็วรอบในการเชื่อมสูง คือ 2000 rpm พบว่าในโลหะเชื่อมนั้นเกิดจุดบกพร่องที่บริเวณด้านบนติดผิวหน้าดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) และ (ง) ซึ่งเป็นจุดบกพร่องรูปแบบเดียวกันดังแสดงบนผิวหน้าในรูปที่ 4.4 (ข) และ (ค) ขณะเดียวกันที่บริเวณมุมด้านล่างด้านที่ติดกับแผ่นหล่อนั้นเกิดจุดบกพร่องเป็นช่องว่างขึ้นดังแสดงในพื้นที่วงกลมของรูปที่ 4.5 (ค) และ (ง) การเกิดลักษณะนี้คาดว่าความเอียงของตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อนี้ ไม่สัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบที่กำหนด หากมีการปรับเปลี่ยน เพิ่มมุมเอียงคาดว่าจะทำให้เกิดการกำจัดจุดบกพร่องนี้ลงไปได้ [14] จากการตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อมและโครงสร้างมหภาคของรอยต่อสามารถสรุปผลการทดลองเบื้องต้นได้ดังแสดงในตารางที่ 1 ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้สามารถทำการเชื่อมรอยต่อให้ประสานกันได้ โดยรอยต่อมีความสมบูรณ์ เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500-1500 rpm (แทนด้วยเครื่องหมายวงกลม) ขณะที่ความเร็วรอบที่สูงไม่สามารถทำให้เกิดแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ได้

รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่ค่าความเร็วรอบ และความเร็วเดินต่างๆ ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500-1500 rpm ที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 50-200 mm/min นั้น มีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าโลหะหลักที่ใช้เชื่อม ชิ้นทดสอบเกิดการพังทลายที่บริเวณด้านแผ่นรีดที่ระยะห่างออกมาจากขอบแนวเชื่อมประมาณ 10 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) และเนื่องจากว่าชิ้นทดสอบเกิดการพังทลายที่แผ่นหล่อทั้งหมด ดังนั้นค่าต่ำสุดและสูงสุดของการทดลองแต่ละค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก)-(ค) สำหรับรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500-1500 rpm ตามลำดับนั้น จึงมีความแตกต่างประมาณ 2-3 MPa เท่านั้น ขณะเดียวกัน หากพิจารณาชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm นั้น รอยต่อที่ทำการเชื่อมนั้นมีค่าความแข็งแรงต่ำเนื่อง จากการเกิดจุดบกพร่องในรอยต่อดังได้กล่าวไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ชิ้นทดสอบแรงดึงทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm นี้ ชิ้นงานเกิดการพังทลายบริเวณกึ่งกลางชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) และเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน ทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดและต่ำสุดของรอยต่อ มีความแตกต่างกันสูงดังแสดงให้เห็นด้วยค่าความผิดพลาดในรูปที่ 4.6 (ง) ค่าความแข็งแรงที่ได้ของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm นี้มีค่าที่ต่ำกว่าโลหะหลักที่ใช้

ในการเชื่อมประมาณ 10-20% อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ไม่สามารถสรุปได้ว่า ความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าโลหะหลักด้านหล่อ หรือรีดเท่า กับเท่าใด จนกว่าจะมีการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของโลหะเชื่อม ซึ่งเป็นตัวแปรที่ควรมีการศึกษาต่อไป ในที่นี้สามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมอลูมิเนียมผสมหล่อและแผ่นรีดเข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพทำ ให้เกิดแนวเชื่อมที่มีความแข็ง แรงสูงกว่าโลหะหลักที่ใช้เชื่อม



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึง

4.3 ผลการทดลองโครงการย่อยที่ 3: โครงสร้างและความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนตัวกวนรูปร่างต่างๆ

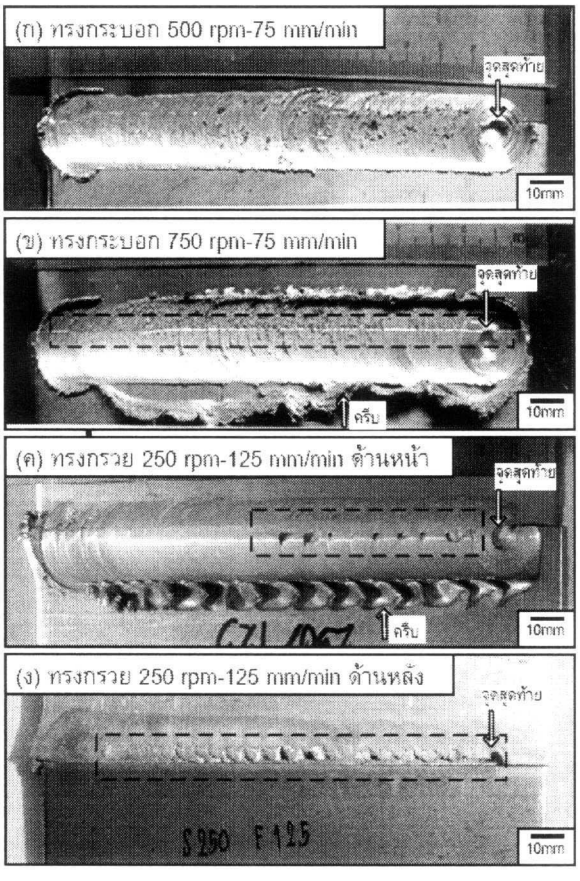
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมด้วยสายตาที่สภาวะการเชื่อมต่างๆ ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกผิวเรียบและตัวกวนทรงกรวยผิวเรียบ พบว่าการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกส่วนใหญ่ ผิวหน้าแนวเชื่อมแสดงความสมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ บนผิวหน้าแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.8(ก) อย่างไรก็ตามจุดสุดท้ายของแนวเชื่อมปรากฏรูกลมเล็กๆ ที่เกิดจากตัวกวนบนแนวเชื่อม นอกจากนั้นหากให้ความเร็วรอบในการเชื่อมที่สูง เช่น 750 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ เช่น 50 mm/min ผิวหน้าแนวเชื่อมเกิดแนวของรอยต่อที่รวมกันไม่สมบูรณ์ดังแสดงด้วยพื้นที่เส้นประสี่เหลี่ยมรูปที่ 4.8 (ก) นอกจากนั้นปริมาณครีบที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของแนวเชื่อม มีปริมาณค่อน ข้างมากที่บริเวณด้านอลูมิเนียม

ตารางที่ 4.2 ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่เชื่อม (O = สมบูรณ์ และ X=ไม่สมบูรณ์)

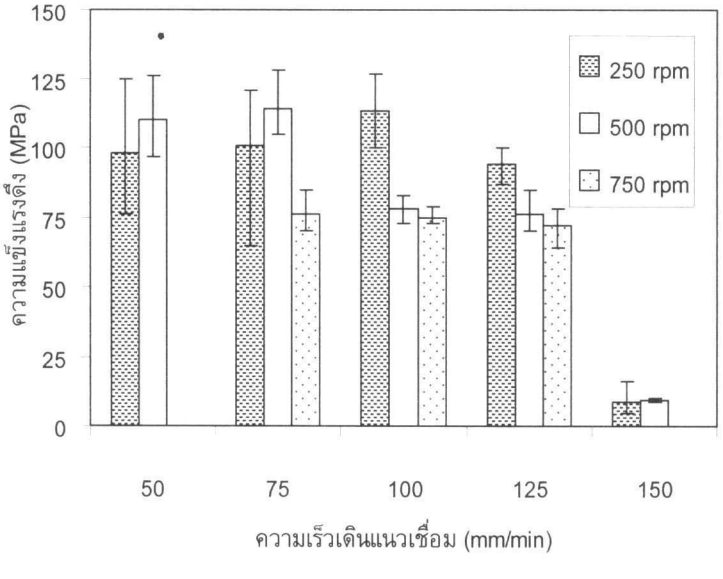
ความเร็วรอบ (rpm)		ทรงกระบอก			ทรงกรวย		
		250	500	750	250	500	750
ความเร็วเดิน(mm/min)	50	O	O	X	X	X	X
	75	O	O	O	X	X	X
	100	O	O	O	X	X	O
	125	O	O	O	X	O	O
	150	O	O	O	O	O	O

เปรียบเทียบกับรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย ที่ค่าความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าต่ำกว่า 100 mm/min แนวเชื่อมส่วนใหญ่ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยนั้น ไม่สามารถทำให้เกิดความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมขึ้นได้ แต่หากทำการเชื่อมที่ค่าความ เร็วเดินแนวเชื่อมสูงกว่า จะทำให้เกิดแนวเชื่อมที่แสดงการรวมตัวกัน และไม่เกิดจุดบกพร่องบนผิวหน้าแนวเชื่อมได้ ความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.8 (ค) เมื่อทำการเชื่อมไปที่ระยะกึ่งหนึ่งของระยะทางเดินแนวเชื่อม เกิดเป็นส่วนของอลูมิเนียมที่ไม่สามารถไหลวนเข้าไปรวมตัวกับผิวรอยต่อด้านของเหล็กได้ดังแสดงในพื้นที่เส้นประ นอก จากนั้นเมื่อพิจารณาด้านล่างของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ง) พบว่า จุดบกพร่องที่แสดงความไม่สามารถในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กของตัวกวนทรงกรวยนี้ เริ่มต้นที่ตำแหน่งใกล้จุดเริ่มต้นของแนวเชื่อมและมีการขยายตัวที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อแนวเชื่อมมีระยะ ทางเพิ่มขึ้น การเกิดจุดบกพร่องในลักษณะนี้คาดว่าเกิดจากตัวกวนทรงกรวยเกิดการดันอลูมิเนียมขึ้นด้านบนของแนวเชื่อม และเมื่ออลูมิเนียมถูกดันขึ้นมาสู่ผิวหน้าแนวเชื่อมทำให้บ่าเครื่องมือเชื่อมดันอลูมิเนียมออกไปสู่ด้านข้างของแนวเชื่อมมากขึ้น และเกิดเป็นครีบขนาดใหญ่ที่ด้านรีทรีทกิ่งของรอยต่อ จึงเป็นเหตุทำให้อลูมิเนียมไม่เพียงพอในการเติมเต็มบริเวณรอยต่อ

จากชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ในตารางที่ 1 ทำการเตรียมชิ้นงาน เพื่อทำการทดสอบแรงดึงของรอยต่อด้วยชิ้นงานที่มีขนาดและมิติดังแสดงในรูปที่ 4 ด้วยการตัดด้วยใบตัดไมโครไฟเบอร์ พบว่าชิ้นงานที่มีผิวหน้าสมบูรณ์บางตัวนั้นมีความแข็งแรงต่ำ และไม่สามารถทำการเตรียมเป็นชิ้นทดสอบได้

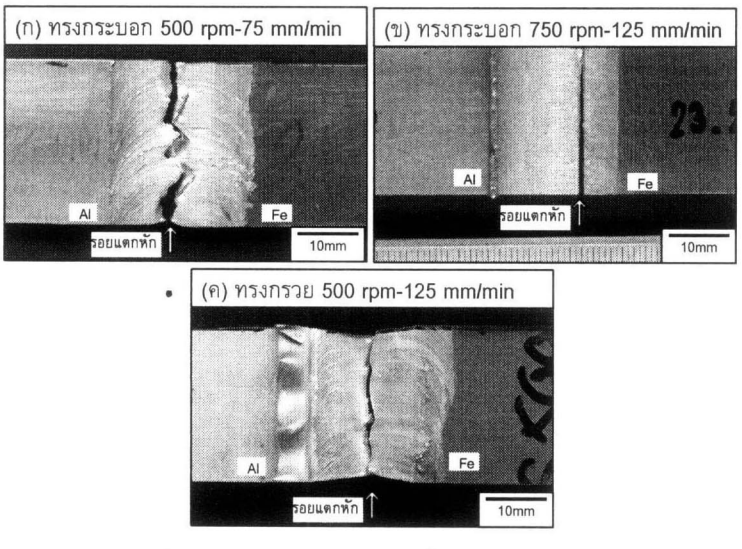


รูปที่ 4.8 ผิวหน้าและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม



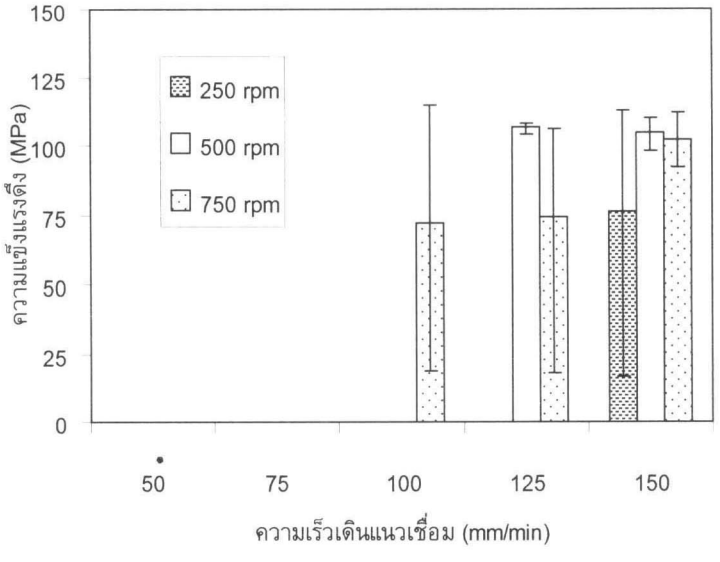
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเดินแนวเชื่อม ความเร็วรอบ และความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอย ต่อของความเร็วรอบ 250 และ 500 rpm นั้นมีแนวโน้มที่มีค่าสูงขึ้น เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าที่เพิ่มจาก 50 mm/min เป็น 75 mm/min และมีค่าลดลง เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นสู่ 150 mm/min แนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อของความเร็วรอบทั้งสองค่านี้ มีลักษณะคล้ายกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแผ่นอลูมิเนียม AA6063 ความหนา 6.3 มม. [11] อย่างไรก็ตาม ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดนั้นแตกต่างกัน โดยในรายงานผลการทดลองนี้ที่ความเร็วรอบ 250 rpm นั้น ค่าความแข็งแรงสูงสุดพบที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min ขณะที่ความเร็วรอบ 500 rpm นั้น ค่าความแข็งแรงสูงสุดพบที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min พิจารณาค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 rpm พบว่าที่ค่าคววามเร็วเดินแนวเชื่อม 50 และ 150 mm/min นั้น ไม่สามารถแสดงค่าความแข็งแรงได้ เนื่องจากรอยต่อเชื่อมที่ได้ไม่สามารถนำมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบได้ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ และความแข็งแรงที่ต่ำของชิ้นทดสอบทำให้ชิ้นงานนั้นเกิดการพังทลายขณะเตรียมชิ้นงานทดสอบ ที่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมที่ประกอบไปด้วยความเร็วรอบ และความเร็วเดินแนวเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกนั้น พบว่าตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้เกิดความแข็งแรงสูงสุดที่ 114 MPa คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min และความเร็วรอบ 500 rpm



รูปที่ 4.10 รอยแตกหักของชิ้นทดสอบแรงดึง

รูปที่ 4.10 แสดงรอยแตกหักของชิ้นทดสอบแรงดึง พบความแตกต่างที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 4.9 กล่าวคือ รอยต่อด้วยทรงกระบอกที่มีค่าความแข็งแรงสูงดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) นั้นมีรอยขาดเป็นแนวซิกแซกคล้ายฟันปลา เนื่องจากอลูมิเนียมและเหล็กมีการเกาะยึดกันได้ดีกว่า รอยต่อที่มีค่าความแข็งแรงน้อยอลู มิเนียมและเหล็กเกาะยึดกันไม่มากนักทำให้การแตกหักเกิดขึ้นเป็นแนวตรง



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเดินแนวเชื่อม ความเร็วรอบ และความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย

รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่ได้นั้นมีค่าความแตกต่างจากตัวกวนทรงกรวยที่แสดงในรูปที่ 4.9 กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงของรอยต่อส่วนใหญ่ไม่สามารถตรวจสอบได้ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อม พิจารณาค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-150 mm/min พบว่า ค่าความแข็งแรงของแรอยต่อที่ได้นั้นล้วนมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก โดยค่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ รอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ทำการตรวจสอบรอยแตกหักของชิ้นทดสอบ ที่แสดงความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ค) พบว่า การแตกหักเกิดคล้ายกับชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก ที่มีความแข็ง แรงสูงสุด คือ เกิดรอยแตกแบบซิกแซกที่

บ่งแสดงว่ารอยต่อมีการจับยึดการอย่างดีเยี่ยม นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าความผิดพลาด (Error bar) ที่แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าค่าความแข็ง แรงดึงสูงสุดและต่ำสุดของรอยต่อที่สมบูรณ์ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยนี้มีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ผลการทดสอบที่ได้นี้ แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงที่ไม่สม่ำเสมอของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย โดยในการทดสอบนี้ได้เลือกสุ่มชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบที่บริเวณตอนต้น กึ่งกลาง และตอนท้ายของความยาวแนวเชื่อม พบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมนั้นจะมีค่าสูง สุดที่ตอน ท้ายของแนวเชื่อม ผลการทดลองที่ได้คาดว่า ตัวกวนทรงกรวยนี้อาจทำให้แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ และมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นได้ เมื่อเพิ่มระยะการเดินแนวเชื่อมให้มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวไม่ได้รวมอยู่ในรายงานนี้ นอกจากนั้นเพื่อการทดลองที่เข้าใจกลไกการรวมตัวของวัสดุทั้งสอง ว่าตัวกวนทรงกระบอก และตัวกวนทรงกรวย ให้ผลทำให้เกิดการกวนต่างกันอย่างไรควรมีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคเพื่อการอธิบายการเกิดการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็กต่อไปในอนาคต

4.4 ผลการดำเนินงานเป้าหมายเชิงยุทธศาสตร์ของแผนงานวิจัย

4.4.1 แผนงานวิจัยนี้ ตอบสนองยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2550-2554) มากน้อยเพียงใดในเชิงปริมาณ พร้อมแสดงผลกระทบด้วย

แผนงานวิจัยนี้ ตอบสนอง ยุทธศาสตร์ที่ 3 การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืน ข้อ 4.2 การสร้างภูมิคุ้มกันของระบบเศรษฐกิจ คือ เนื่องจากเป็นแผนงานวิจัยที่มุ่งในการนำเสนอและประยุกต์ใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง เช่น อลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 1 ใน 3 ของความหนาแน่นของเหล็กเข้ามาใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยมีการนำเสนอกระบวนการเชื่อมแบบใหม่ที่มีการใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป คือ มีการใช้พลังงานในการเชื่อมประมาณ 10% ของกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย กระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีของเสียเกิดขึ้นต่ำกว่า 5% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายที่ประกอบไปด้วย เศษลวดเชื่อม สแลกปกคลุมแนวเชื่อม ควันและแกสจากแนวเชื่อม รังสีจากการอาร์คเป็นต้น ทำให้คาดได้ว่าการนำวัสดุอลูมิเนียมเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยการใช้กระ-บวนเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนจะทำให้เกิดการปรับโครงสร้างการผลิตเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่มีเหลือน้อยนิดให้ใช้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อลดการพึ่งพิงการนำเข้าพลังงานและประหยัดเงินตราต่างประเทศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมที่ค่อนข้างใหม่สำหรับประเทศไทย ดังนั้นการจัดหาเครื่องเชื่อมที่เหมาะสมเป็นไปได้ลำบาก

4.4.2 แผนงานวิจัยนี้ตอบสนอง นโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2553) มากน้อยเพียงใดในเชิงปริมาณ พร้อมแสดงผลกระทบด้วย

แผนงานวิจัยนี้ ตอบสนอง ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 3 การสร้างศักยภาพและความ สามารถเพื่อการพัฒนาทางวิทยาการและทรัพยากรบุคคล กลยุทธ์การวิจัยที่ 1 การพัฒนานวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์ ทางสังคมศาสตร์ และการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในวิทยาการต่าง ๆ แผนงานที่ 1.1 การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คือ ในแผนงานนี้เป็นแผนงานที่มุ่งเน้นในการสร้างพัฒนาอาจารย์ในหน่วยงาน ให้เห็นความสำคัญของการทำวิจัย โดยในเป้าประสงค์หลักของแผนงานสามารถสร้างนักวิจัยเกี่ยวกับสาขาการเชื่อมโลหะขึ้นมาได้จำนวน 4 คน มีการนำองค์ความรู้ที่ได้จากการทดลองไปทำการเผยแพร่ในนิตยสารเกี่ยวกับงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างนักวิจัยกับวงงานอุตสาหกรรมไม่ต่ำกว่า 3 เรื่อง เพื่อเป็นการพัฒนาสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์และสาธารณะ เผยแพร่งานวิจัยในงานประชุมวิชาการได้ไม่ต่ำกว่า 3 เรื่อง และตีพิมพ์งานวิจัยในวารสารภายในประเทศได้ไม่ต่ำกว่า 3 เรื่อง ปรับปรุงโลหะเนื้อเชื่อมที่มีสมบัติทางกล เช่น ความต้านทานแรงดึงให้มีค่าที่ดีกว่าโลหะหลักมากกว่า 20%

4.4.3 แผนงานวิจัยนี้ตอบสนองโครงการวิจัยกับกลุ่มเรื่องที่ควรวิจัยเร่งด่วนตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2553) มากน้อยเพียงใดในเชิงปริมาณ พร้อมแสดงผลกระทบด้วย

แผนงานวิจัยนี้ ตอบสนอง กลุ่มเรื่อง 9 เทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม คือ กระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนั้นเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีการคิดค้นขึ้นมาในปี 1991 แต่กระบวนการเชื่อมแบบนี้ไม่มีการนำเข้ามาใช้ในประเทศไทย อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากยังไม่มีผลการวิจัยที่เผยแพร่มากนัก จากการสำรวจของคณะผู้วิจัยพบว่าหน่วยงานของรัฐที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนั้นมีเพียง 3 แห่งเท่านั้นในประเทศไทย ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาในอุตสาหกรรมการเชื่อมในประเทศไทยมีหน่วยงานเอกชนที่รู้เรื่องและนำเอากระบวนการเชื่อมนี้ไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมในจำนวนที่ต่ำกว่า 5 บริษัท ดังนั้นการนำเทคโนโลยีใหม่นี้ไปทำการเผยแพร่และพัฒนา คาดว่าจะทำให้เกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมในประเทศต่อไป

4.4.4 แผนงานวิจัยนี้ตอบสนองนโยบายรัฐบาล มากน้อยเพียงใดในเชิงปริมาณ พร้อมแสดงผลกระทบด้วย

แผนงานนี้ตอบสนอง นโยบายเร่งด่วนที่จะเริ่มดำเนินการในปีแรก ข้อ 1.15 ดำเนินมาตรการลดผลกระทบจากราคาพลังงาน โดยเร่งรัดโครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากก๊าซธรรม

ชาติและผลผลิตทางการเกษตร เช่น แก๊สโซฮอล์ ไบโอดีเซล รวมทั้งเร่งรัดมาตรการประหยัดพลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดภาระการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ กล่าวคือ กระบวนการเชื่อมที่ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียม ที่นำเข้ามาใช้แทนชิ้นส่วนของเหล็กในภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการลดและประหยัดการใช้พลังงาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การลดน้ำหนักโครงสร้างโดยรวมลง 2 ใน 3 เนื่องจากอลูมิเนียมมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1/3 เท่าของเหล็ก และการใช้พลังงานงานในการเชื่อมของกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนมีค่าประมาณน้อยกว่า 10% ของการเชื่อมแบบหลอมละลาย

แผนงานนี้ตอบสนอง นโยบายระยะการบริหารราชการ 4 ปี ของรัฐบาล ข้อ 2.4 นโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ข้อย่อย 2.4.1 ส่งเสริมการนำงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้ในการพัฒนาประเทศ ควบคู่กับการพัฒนาระบบวิจัยและพัฒนาเชิงนวัตกรรมที่มีอยู่ให้สนองความต้องการของภาคการผลิตและบริการ โดยให้ความสำคัญแก่การเชื่อมโยงระหว่างภาค เอกชน สถาบันวิจัย และมหาวิทยาลัย ตลอดจนพัฒนาเครือข่ายวิสาหกิจ ซึ่งจะนำไปสู่การวิจัยและพัฒ นาต่อยอดและมีการใช้ประโยชน์องค์ความรู้และเทคโนโลยีในเชิงพาณิชย์ กล่าวคือ แผนงานวิจัยนี้ ได้นำเอาเทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่เข้ามาประยุกต์ใช้และเผยแพร่ภายในประเทศเพื่อทำให้อุตสาหกรรมของประเทศสามารถพัฒนาได้อย่างรวดเร็ว กับเทคโนโลยีใหม่ที่มีการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียให้เห็นจากงานวิจัย โดยในแผนงานวิจัยมีการให้ความสำคัญแก่การเชื่อมโยงระหว่างภาคเอกชนกับกลุ่มผู้วิจัย ดังจะเห็นได้จากการเผยแพร่ผลงานวิจัยทางการประชุมวิชาการ 3 เรื่อง

4.5 เป้าหมายของผลผลิต (output) และตัวชี้วัด

ตารางที่ 4.3 ตารางผลผลิตและตัวชี้วัดของโครงการวิจัย

ผลผลิต	ตัวชี้วัด	
	เชิงคุณภาพ	เชิงปริมาณ
1. การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม รอยต่ออลูมิเนียมขึ้นรูปต่างชนิด และรอยต่อวัสดุต่างชนิด	- ความสามารถในการเชื่อมโลหะต่างชนิด และความสามารถขึ้นรูป	- เพิ่มความแข็งแรงของรอยเชื่อมโลหะ
2. การลดต้นทุนการผลิต	- เป็นวิธีที่ไม่มีความร้อนเกี่ยวข้อง และชิ้นงานที่ขึ้นรูปไม่แตกร้าว	- ลดพลังงาน และลดพลังงานและเวลาในการขึ้นรูป
3. ส่งเสริมเทคโนโลยีการผลิต	- เพิ่มองค์ความรู้ให้กับภาคธุรกิจ เพื่อเพิ่มคุณภาพแนวเชื่อม	- ส่งเสริมการผลิตเพื่อใช้ในการผลิต และส่งเสริมการผลิตเครื่องจักรเพื่อใช้ในการผลิต

4.6 เป้าหมายของผลลัพธ์ (outcome) และตัวชี้วัด

ตารางที่ 4.4 ตารางผลลัพธ์และตัวชี้วัดของโครงการวิจัย

ผลผลิต	ตัวชี้วัด	
	เชิงคุณภาพ	เชิงปริมาณ
1. องค์กร	- เพิ่มองค์ความรู้ในการทำงานวิจัย	- เพิ่มองค์ความรู้เพื่อเผยแพร่ต่อไป
2. ภาคธุรกิจ	- เพิ่มองค์ความรู้ให้กับภาคธุรกิจ เพื่อเพิ่มคุณภาพแนวเชื่อม และลดของเสียที่เกิดขึ้น	- เพิ่มกำลังการผลิต
3. ประเทศ	- เพิ่มโอกาสในการแข่งขัน ทำให้รายได้เพิ่มขึ้น	- เพิ่มกระบวนการทางเลือกในการเชื่อมโลหะ และ พัฒนาเครื่องจักรเพื่อใช้ภายในประเทศ