



(ก) 80 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ค) 160 mm/min

รูปที่ 2.10 โครงสร้างมหภาคจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม (R) Retreating side, Advancing side, (TMAZ) Thermo-mechanical affected zone และ (SZ) Stir zone

2.4.2 การเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคของหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

จากโครงสร้างมหภาคของหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นในรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น จากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกจะมีลักษณะรูปร่างของรอยเชื่อมคล้ายกับหัวหอมรีที่มีรูปแบบปรากฏเด่นชัดและมีรูปร่างรอยเชื่อมที่แน่นนอนมากกว่ารอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม อันเนื่องมาจากแรงกดและความร้อนที่มากกว่า รวมไปถึงรูปแบบของหัว핀ที่เรียบไม่มีเหลี่ยม ทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุรอบหัว핀มีทิศทางการไหลวนในลักษณะที่แน่นนอน เมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยมลักษณะของหัว핀ที่เป็นแบบเหลี่ยมทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุรอบหัว핀ไม่มีลักษณะที่แน่นนอน อีกทั้งพบว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบสี่เหลี่ยม อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากกว่าทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเป็นบริเวณกว้างกว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบสี่เหลี่ยม [Z.Y. Ma et al. (2006)]

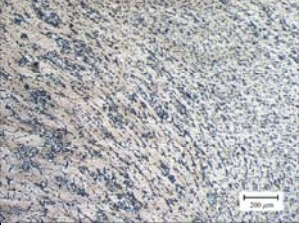
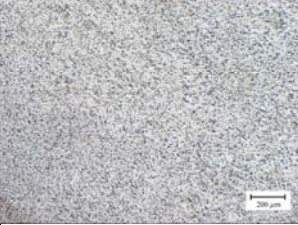
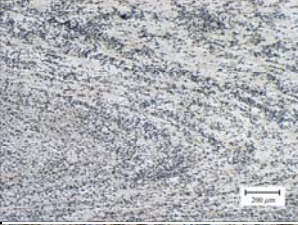
แต่ในขณะเดียวกันบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing ของหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะที่แคบกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม อันเนื่องมาจากหัวพินแบบสี่เหลี่ยมมีลักษณะหัวพินเป็นเหลี่ยมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิดปกติ (กว้างขึ้น)

2.5 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)

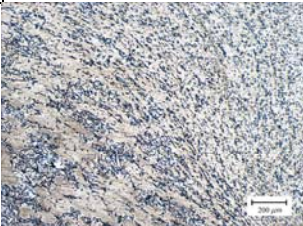
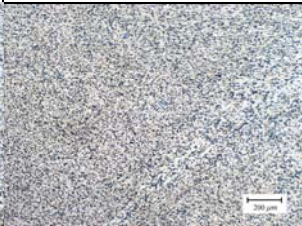
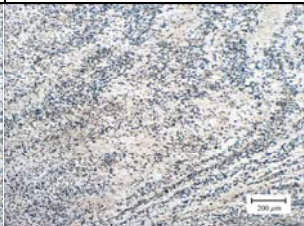
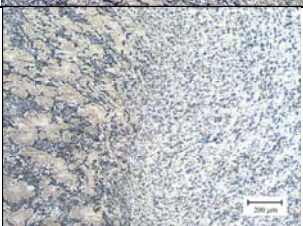
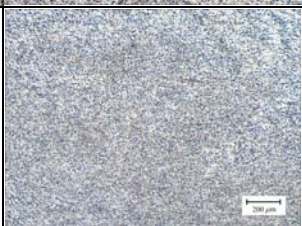
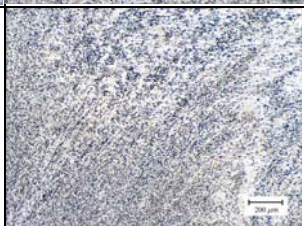
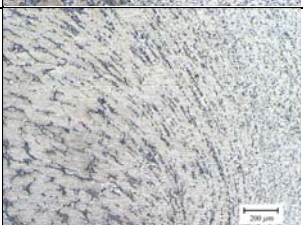
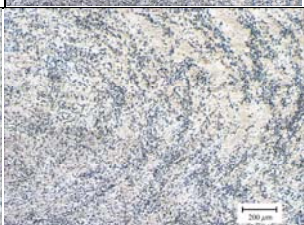
จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (Al) แบบก่อนกลผสมกับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย Al+Si จากการวัดขนาดเกรนโดยใช้ Image tool ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 62 ไมครอน

2.5.1 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยมจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min โครงสร้างรอยเชื่อมมีการประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของเนื้อวัสดุทั้งสองชิ้น อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินและแรงกดทำให้เกิดความร้อนในรอยเชื่อม เนื้อวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวรอบหัวพินเกิดการประสานกัน จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินและการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก่อนกล (Al) และเฟส Eutectic (Al+Si) ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating จะเกิดความแตกต่างจากโครงสร้างระหว่างบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณที่ถูกกวนเป็นลักษณะของโครงสร้างที่ค่อนข้างละเอียดคล้ายกับถูกอัดและแคบกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing เนื่องจากด้าน Retreating มีทิศทางการเดินแนวเชื่อมตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของ Tool และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน Retreating ตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน Advancing เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามบริเวณที่ถูกกวนของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อมของทั้งสองหัวพินจากการสังเกตไม่พบว่าโครงสร้างจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากโครงสร้างมีลักษณะที่ละเอียดมาก

รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TMAZ Retreating	SZ	TMAZ Advancing
แบบ ทรงกระบอก 80 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 120 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 160 mm/min			

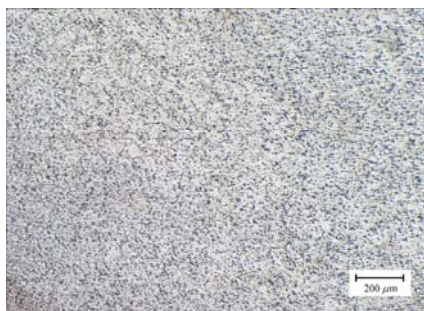
รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบทรงกระบอก

รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TMAZ Retreating	SZ	TMAZ Advancing
แบบสี่เหลี่ยม 80 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 120 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 160 mm/min			

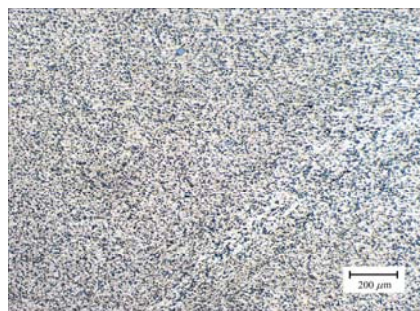
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

2.5.2 เปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก และแบบสี่เหลี่ยม

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min บริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและบริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมมีขนาดเกรนที่ละเอียดมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม แต่อย่างไรก็ตามจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม บริเวณรอยเชื่อมประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากความร้อนและแรงกดทำให้เกิดการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุที่มากกว่าการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Al) และเฟส Eutectic (Al+Si) ในรอยเชื่อมจากรูปที่ 2.11 และ 2.12 บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing ของหัวพินทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



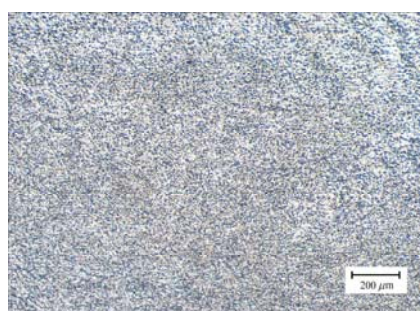
(ก) 80 mm/min



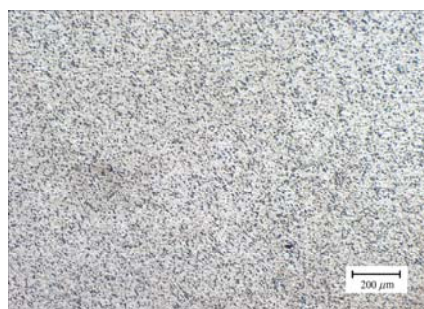
(ข) 80 mm/min



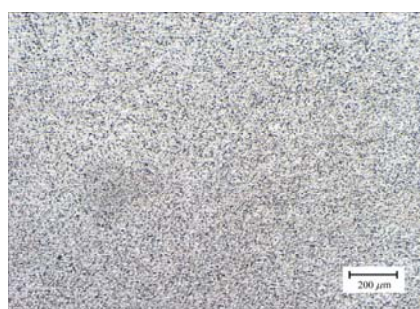
(ก) 120 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ก) 160 mm/min



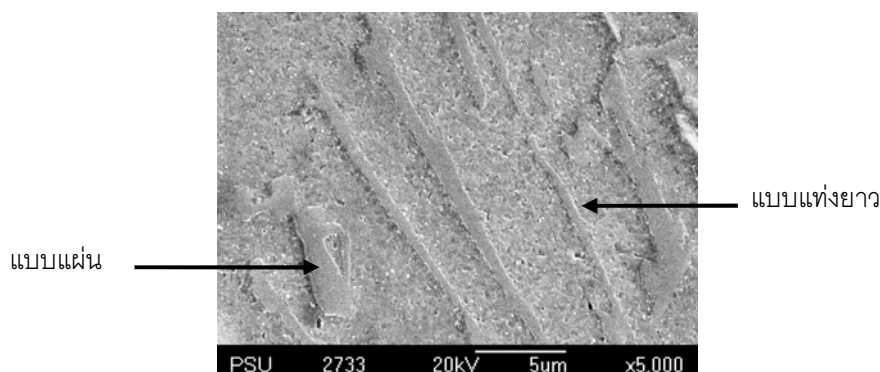
(ข) 160 mm/min

รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน
ของหัวพิน (ก) แบบทรงกระบอกและ (ข) แบบสี่เหลี่ยม

2.6 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีระบบ เอ็กซ์เรย์ (EDX)

จากรูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง พบว่าลักษณะของ
โครงสร้างประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอน (Si) กระจายตัวทั่วไปในอะลูมิเนียมเมทริกซ์ ซึ่งอนุภาคซิลิกอน

เป็นธาตุผสมหลักมีลักษณะเป็นแบบแท่งยาว มีความโตประมาณ $1.5\ \mu\text{m}$ และแบบแผ่น มีความโตประมาณ $2.5\ \mu\text{m}$ มีความยาวประมาณ $5\text{-}20\ \mu\text{m}$ ผสมอยู่ในอลูมิเนียมเมตริกซ์

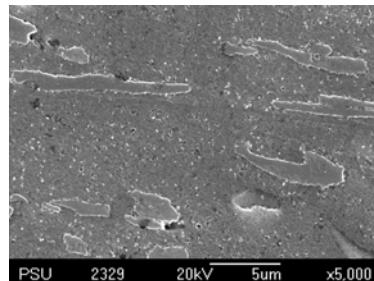


รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ของบริเวณเนื้อโลหะเดิม

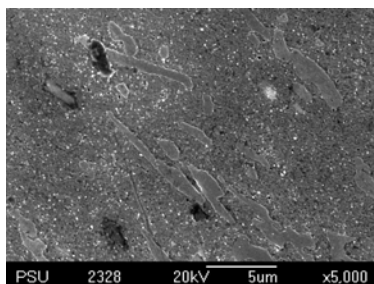
2.6.1 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก

จากรูปที่ 2.15, 2.17 และ 2.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัวพินแบบทรงกระบอก พบว่าขนาดของธาตุซิลิกอน (สีเทาขาว) ในรอยเชื่อมเกิดการแตกหักและเล็กลงมีขนาดความโตประมาณ 1-2 ไมครอน และมีความยาวประมาณ 2-4 ไมครอน เมื่อเทียบกับขนาดของธาตุซิลิกอนในบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินทำให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและอนุภาคซิลิกอนบริเวณเฟสยูเทคติกส์เกิดการแตกหัก อีกทั้งพบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 และ 120 mm/min จากรูปที่ 2.15 และ 2.17 ในบริเวณรอยเชื่อมทั้งด้านบน ตรงกลางและด้านล่าง มีลักษณะโครงสร้างประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนที่มีขนาดเล็กกว่าในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing กระจายตัวอยู่ทั่วไปในอลูมิเนียมเมตริกซ์ ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing จะมีลักษณะการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนที่ยาวกว่าบริเวณที่รอยเชื่อมเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมทั้งสอง ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing ไม่ได้มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิลิกอนอย่างเห็นได้ชัด แต่จากการวิเคราะห์ด้วย EDX ในรูปที่ 2.16 และ 2.18 พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min ในบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่สม่ำเสมอมากกว่าเล็กน้อยของความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่าของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ จากรูปที่ 2.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing มีลักษณะอนุภาคซิลิกอนคล้ายกับที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 และ 120 mm/min แต่ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ จากการวิเคราะห์ด้วย EDX ในบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมมีขนาดอนุภาคซิลิกอนที่เล็ก

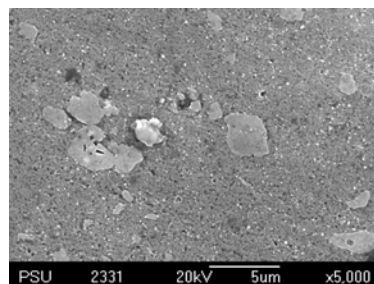
กว่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 และ 120 mm/min และมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่ดีกว่าเช่นกัน อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่าของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ



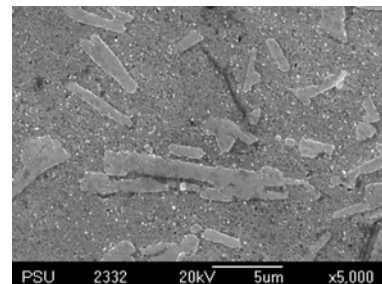
(ก)



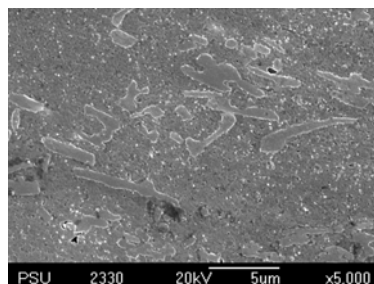
(ข)



(ค)



(ง)

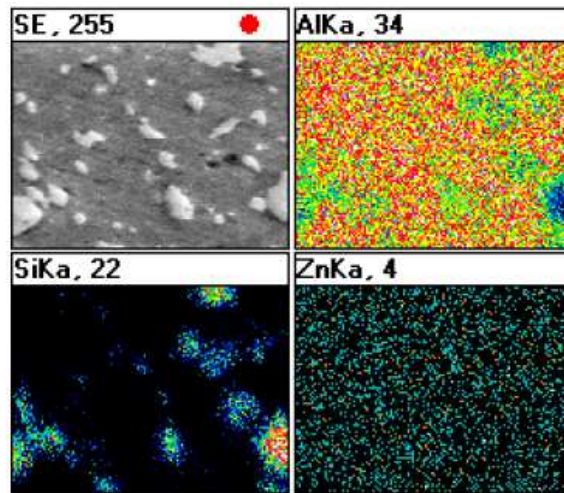


(จ)

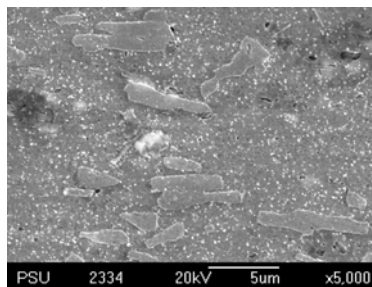
รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min

(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A

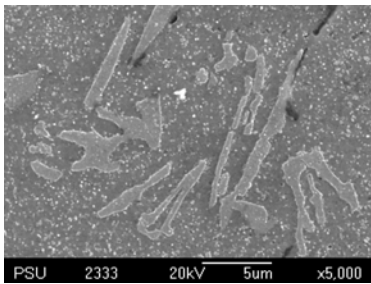
และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



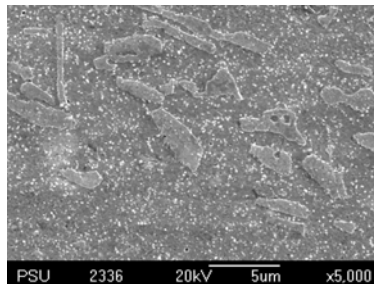
รูปที่ 2.16 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
80 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



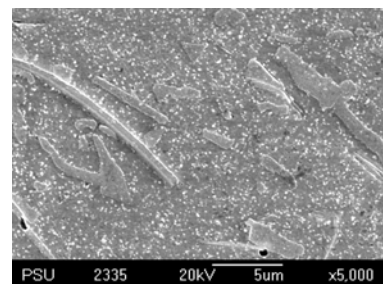
(ก)



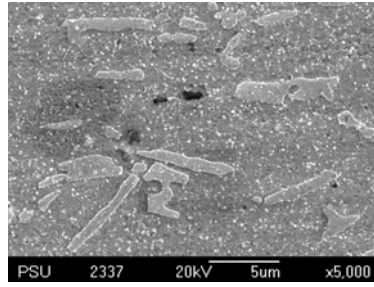
(ข)



(ค)



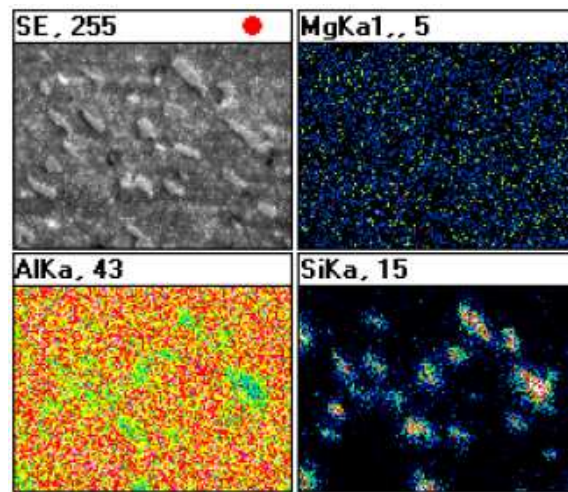
(ง)



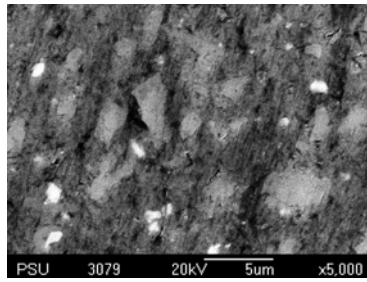
(จ)

รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min

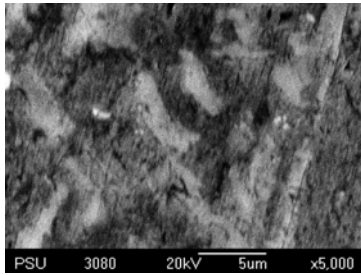
(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A
และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



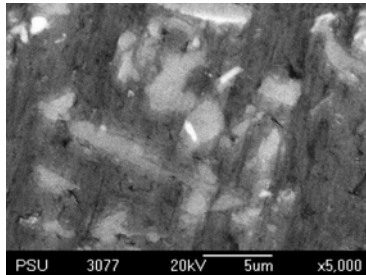
รูปที่ 2.18 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
120 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



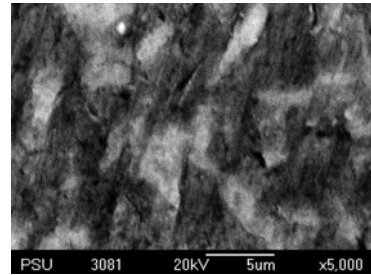
(ก)



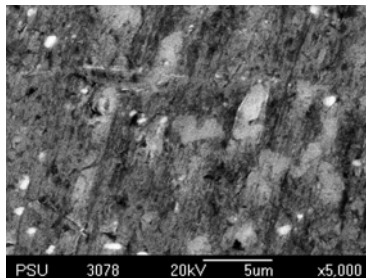
(ข)



(ค)

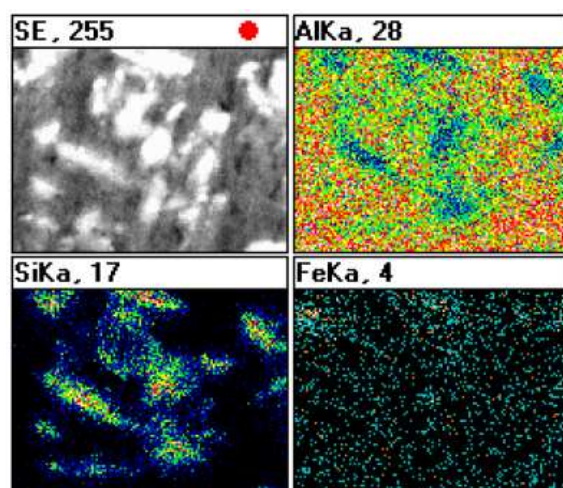


(ง)



(จ)

รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min
 (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A
 และ (จ) Stir zone ด้านล่าง

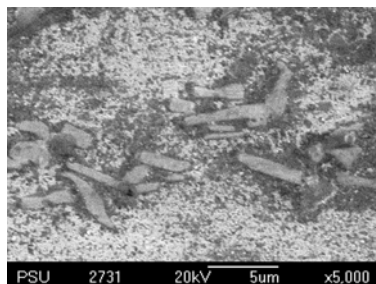


รูปที่ 2.20 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min บริเวณรอยเชื่อม

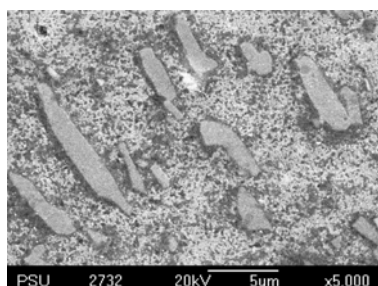
2.6.2 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวปืนแบบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 2.21, 2.23 และ 2.25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัวปืนแบบทรงกระบอก พบว่าขนาดของธาตุซิลิกอน (สีเทาขาว) ในบริเวณรอยเชื่อมเกิดการแตกหักและเล็กลงมีขนาดความโตประมาณ 2-4 ไมครอน และมีความยาวประมาณ 4-6 ไมครอน เมื่อเทียบกับขนาดของธาตุซิลิกอนในบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากการกวของหัวปืนทำให้โครงสร้างเกรนแบบก่อนกลมและอนุภาคซิลิกอนบริเวณเฟสยูเทคติกส์เกิดการแตกหัก อีกทั้งพบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min จากรูปที่ 2.21 บริเวณรอยเชื่อมทั้งด้านบน ตรงกลางและด้านล่าง มีลักษณะโครงสร้างประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนที่ไม่ได้มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคและการกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing จะมีลักษณะการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนที่เป็นแผ่นยาวไม่มีรูปทรงที่แน่นอน อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมทั้งสองนี้ ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิลิกอนและมีการกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัด คือ มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min จากการวิเคราะห์ด้วย EDX ดังในรูปที่ 2.22 เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนน้อยลงเช่นกัน อย่างไรก็ตามในรูปที่ 2.23 และ 2.25 ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing ไม่ได้มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิลิกอนอย่างเห็นได้ชัด แต่จากการ

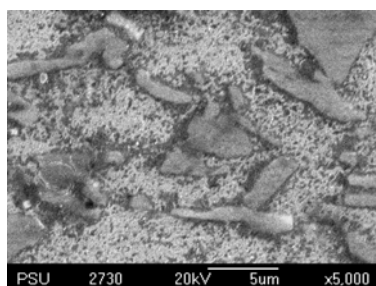
วิเคราะห์ด้วย EDX ในรูปที่ 2.24 และ 2.26 พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ในบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่สม่ำเสมอมากกว่าเล็กน้อยของความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่าของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ



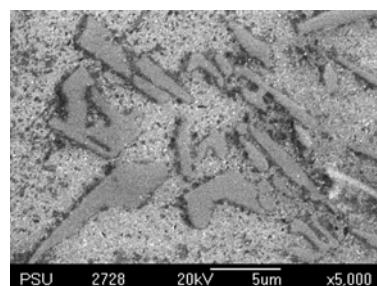
(ก)



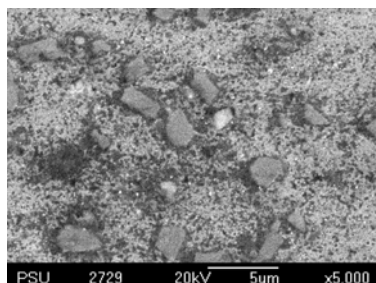
(ข)



(ค)



(ง)

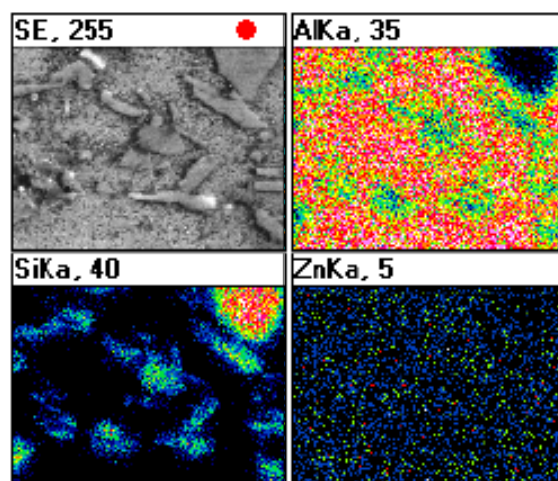


(จ)

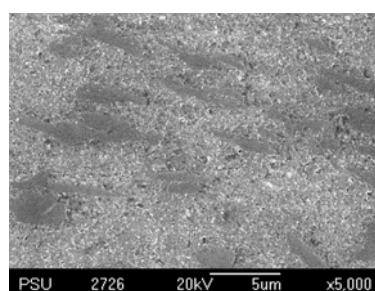
รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min

(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A

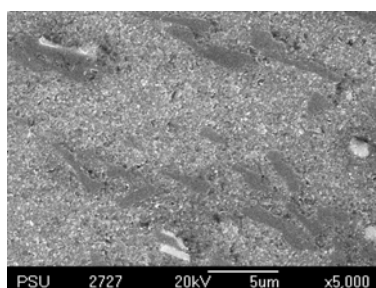
และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



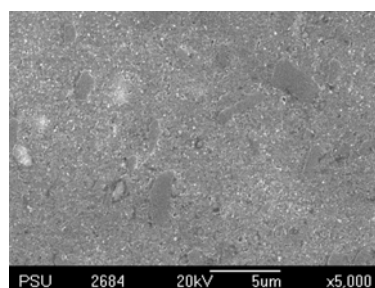
รูปที่ 2.22 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
80 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



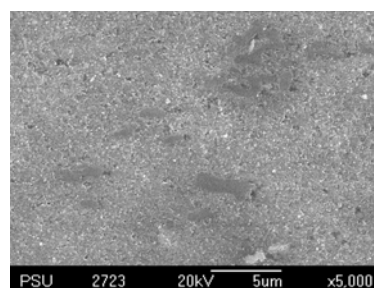
(ก)



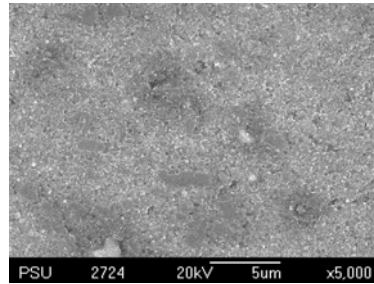
(ข)



(ค)



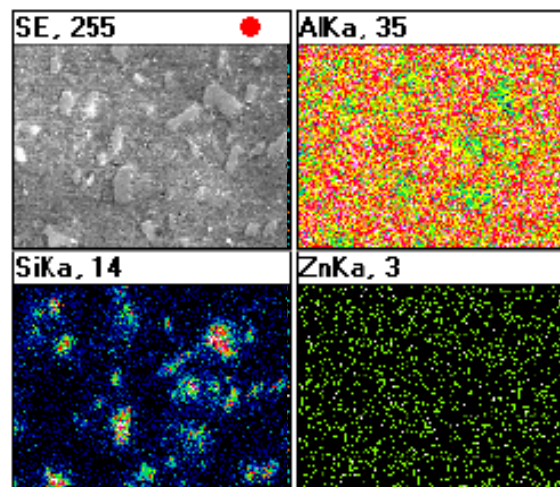
(ง)



(จ)

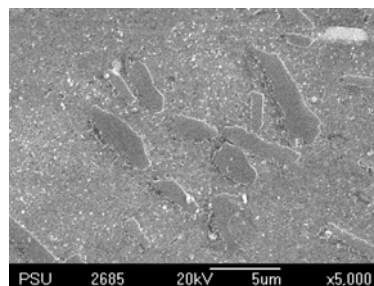
รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min

(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A และ (จ) Stir zone ด้านล่าง

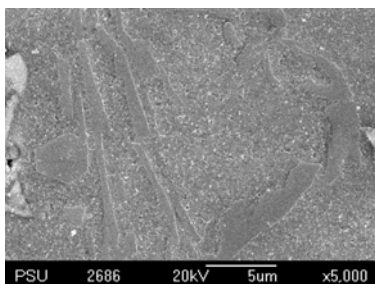


รูปที่ 4.24 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

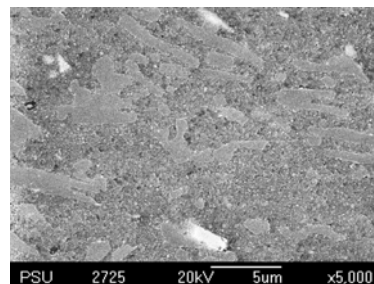
120 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



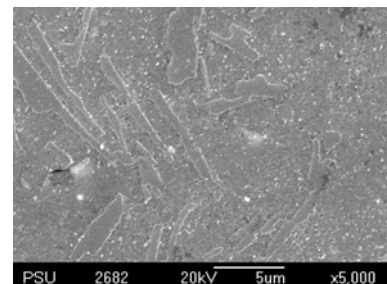
(ก)



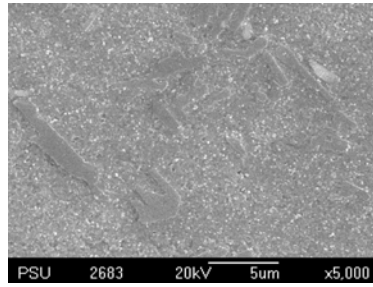
(ข)



(ค)



(ง)

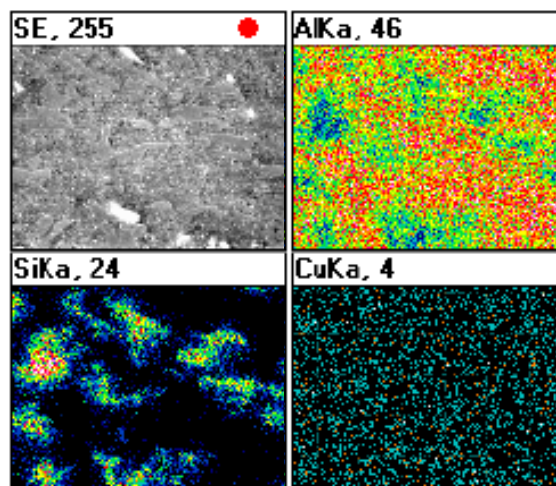


(จ)

รูปที่ 2.25 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min

(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A

และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



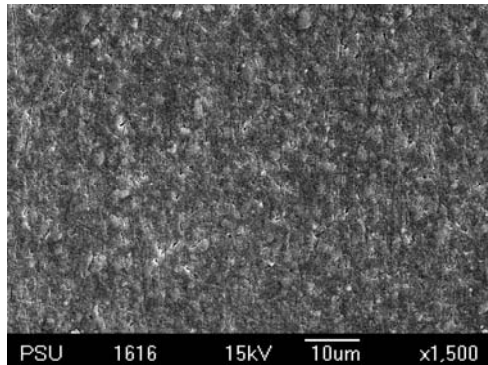
รูปที่ 2.26 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

160 mm/min บริเวณรอยเชื่อม

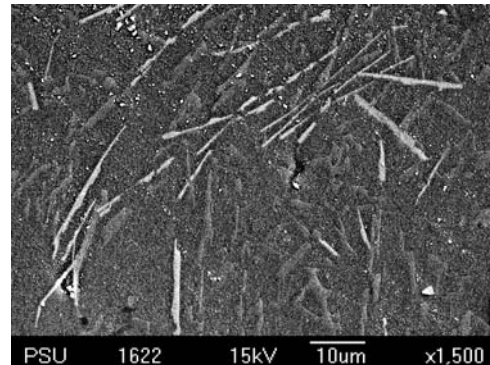
2.6.3 จากการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 2.27 (ก) และ (ข) จากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกจะมีลักษณะของอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยม และมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่ดีกว่าเช่นกัน อันเนื่องมาจากความร้อนและแรงกดจากการเสียดทานของหัว핀ภายในเนื้อของวัสดุมีมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยม รวมไปถึงพื้นที่การเสียดทาน

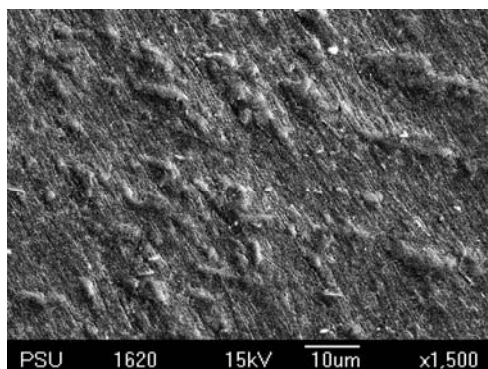
ระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุในรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกมีมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลวนรอบตัวกวนทำให้อนุภาคซิลิกอนเกิดการแตกหักและเล็กลง



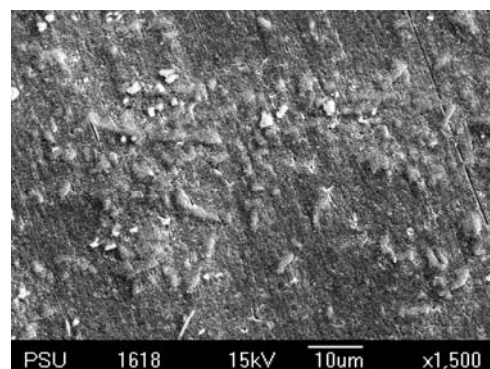
(ก) 80 mm/min



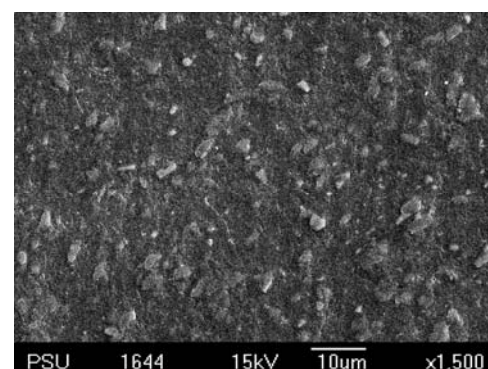
(ข) 80 mm/min



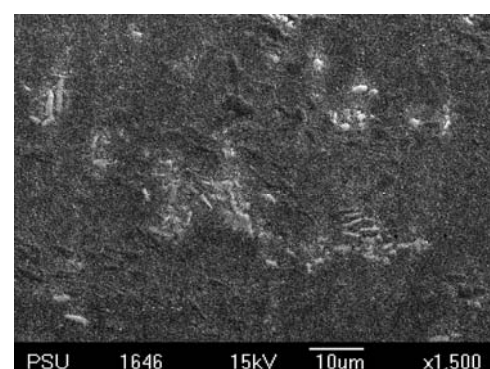
(ก) 120 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ก) 160 mm/min



(ข) 160 mm/min

รูปที่ 2.27 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ในรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพิน (ก) แบบทรงกระบอกและ (ข) แบบสี่เหลี่ยม

2.7 การทดสอบความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

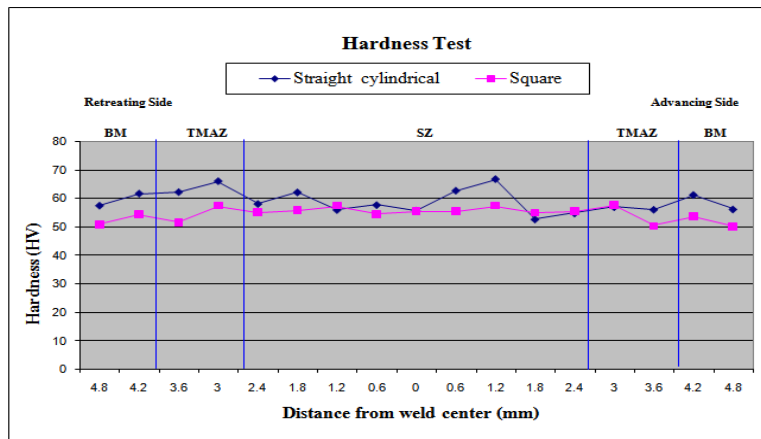
การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยการกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อม ซึ่งถูกตัดตามขวางกับรอยเชื่อมจัดให้เรียบ ขณะทดสอบใช้แรงกด 100 กรัม ใช้เป็นเวลาในการกด 10 วินาที เพื่อหาค่าความแข็งในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและเนื้อโลหะเดิม รอยกดมีระยะห่างกันประมาณ 60 ถึง 70 μm

2.7.1 ค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก

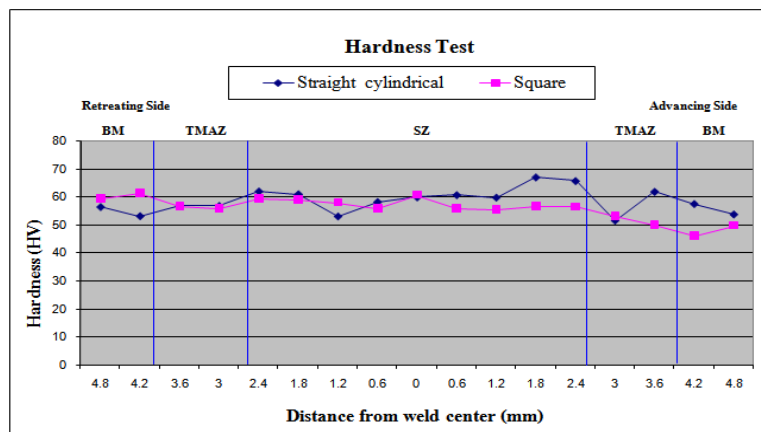
จากรูปที่ 2.28 (ก), (ข) และ (ค) แสดงค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งประมาณ 60.6, 62.7 และ 61.8 HV ตามลำดับ มากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อยซึ่งมีค่าประมาณ 58.5 และ 55.3 HV ตามลำดับอันเนื่องมาจากบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าบริเวณอื่นๆ อนุภาคซิลิกอนที่เล็กและมีการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากจากการกวนของหัวพินทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้าง

2.7.2 ค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

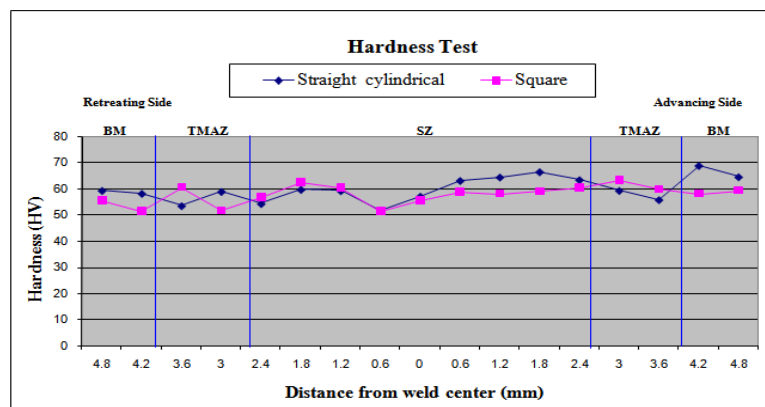
จากรูปที่ 2.28 (ก), (ข) และ (ค) แสดงค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งประมาณ 58.8, 59.4 และ 59.9 HV ตามลำดับ มากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อยซึ่งมีค่าประมาณ 57.6 และ 55.3 HV ตามลำดับ อันเนื่องมาจากบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าบริเวณอื่นๆ อนุภาคซิลิกอนที่เล็กและมีการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากจากการกวนของหัวพินทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้าง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.28 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน
ของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

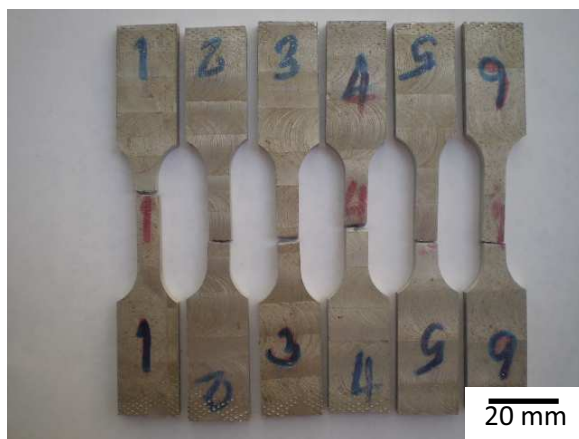
2.7.3 จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 2.28 (ก), (ข) และ (ค) แสดงค่าความแข็งของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม พบว่าค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าค่าความแข็งของหัว핀แบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 5-10 % อันเนื่องมาจากหัว핀แบบทรงกระบอกมีแรงเสียดทานทางกลและมีพื้นที่การเสียดทานระหว่างหัว핀กับเนื้อวัสดุที่มากกว่าทำให้เนื้ออะลูมิเนียมเกิดการไหลวนและเกิดการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนที่ละเอียดมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยม อย่างไรก็ตามค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยมมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน

2.8 การทดสอบความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด A356 ที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม ดังรูปที่ 2.29 และชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม ดังรูปที่ 4.30 โดยให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบนำไปกัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM (E8) และทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงดังนี้

2.8.1 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม



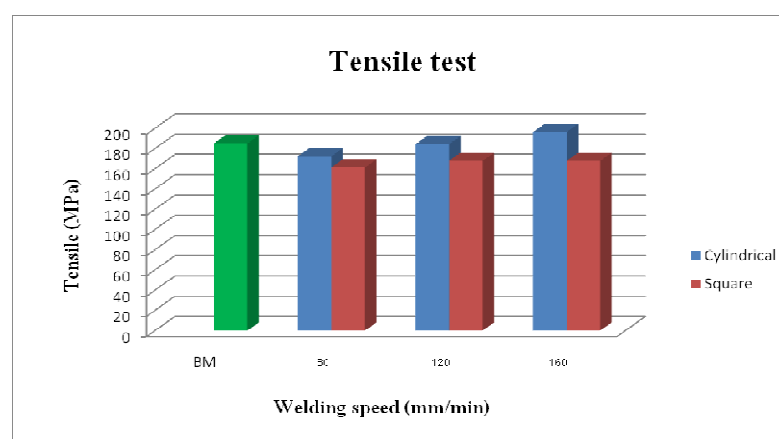
รูปที่ 2.29 แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

จากรูปที่ 2.30 และจากตารางที่ 2.1 ของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม จะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงมีโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ

อย่างไรก็ตามจากทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าทุกๆ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม อันเนื่องมาจากแรงกดและความร้อนจากการเสียดทานที่มากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยมทำให้เนื้อวัสดุในรอยเชื่อมอยู่ในสภาวะพลาสติกโครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวได้สะดวกและถูกอัดแน่นด้วยแรงกด ทำให้โครงสร้างละเอียดและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม ทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น หัวพินแบบสี่เหลี่ยมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 mm/min ขึ้นงานขาดบริเวณรอยเชื่อมและที่ 160 mm/min ขึ้นงานขาดบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากขนาดของอนุภาคซิลิกอนมีลักษณะหยาบกว่าหัวพินแบบทรงกระบอก มีการกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าหัวพินแบบทรงกระบอก

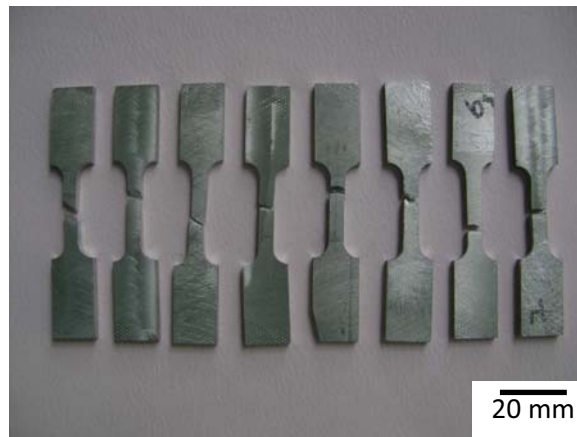
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานตามขวางกับรอยเชื่อม

Welding speed (mm/min)	Tensile test (MPa)			
	Cylindrical	Failure location	Square	Failure location
80	176.22	Base	143.23	Weld
120	190.85	Base	171.73	Weld
160	193.89	Base	173.61	Base
BM	185			



รูปที่ 2.30 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

2.8.2 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวแนวเชื่อม

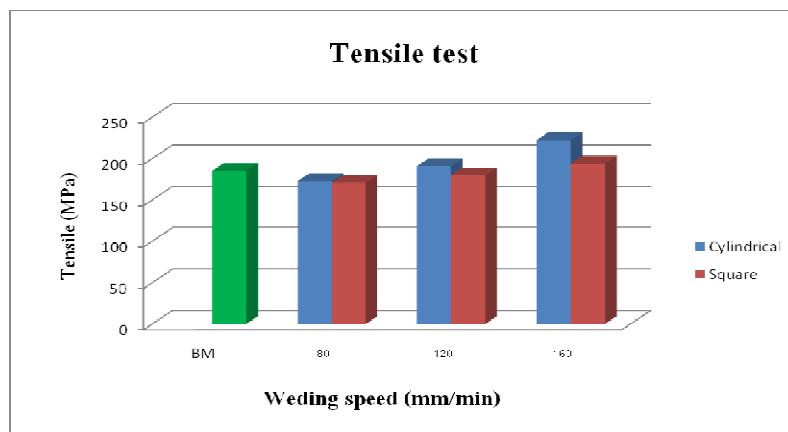


รูปที่ 2.31 แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

จากรูปที่ 2.32 และจากตารางที่ 2.2 ของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม โดยที่เนื้อโลหะเดิมค่าความแข็งแรงดึงจาก SSM A356 หลังจากการหล่อเฉลี่ย 185 MPa จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงพบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม จะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงมีโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าเล็กน้อยจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม ในขณะเดียวกันตามที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ อันเนื่องมาจากหัวพินแบบสี่เหลี่ยมอนุภาคของซิลิกอนมีลักษณะเป็นก้อนหยาบกว่าอนุภาคซิลิกอนที่ได้จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำ

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานตามยาวกับรอยเชื่อม

Welding speed (mm/min)	Tensile test (MPa)	
	Cylindrical	Square
80	172.57	170.67
120	190.79	179.83
160	222.23	193.67
BM	185	



รูปที่ 2.32 แสดงค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรอยเชื่อม ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบ กวน ในอลูมิเนียมหล่อผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีกึ่งของแข็ง โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้ Tool ที่ใช้ในการศึกษามีสองแบบ คือ หัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม กำหนดให้ความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,750 rpm และเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อมสามระดับ 80, 120 และ 160 mm/min หลังจากการเชื่อมทำการตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลเพื่อหาบทสรุปจากการเชื่อมด้วยตัวแปรที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. แรงกดของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำจะมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง อย่างไรก็ตามที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min แรงกดบนชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่าแรงกดมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 5 % และที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min แรงกดบนชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่าแรงกดมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 25 %

2. ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม มีลักษณะเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมสูง และที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำมีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool อย่างไรก็ตามผิวหน้ารอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกจะเกิดครีบกและเกิดเป็นรอยหยาบมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยมของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม

3. โครงสร้างมหภาคของหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ และมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดี โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกจะมีลักษณะรูปร่างคล้ายกับหัวหอมรีแสดงรูปร่างชัดเจนและมีรูปแบบที่แน่นนอนมากกว่าโครงสร้างรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม อีกทั้งพบว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบสี่เหลี่ยม

4. จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกจะมีลักษณะที่ละเอียดและเรียบมากกว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อย บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating จะมีลักษณะของโครงสร้างที่

ค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing มีลักษณะโครงสร้างแบบยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน Retreating

5. โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม พบว่าบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมจะมีอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าบริเวณอื่นๆ และที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่สม่ำเสมอมากกว่าเล็กน้อยของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกจะมีลักษณะของอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยม

6. ค่าความแข็งของหัว핀ทั้งสองชนิด ของทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณที่ถูกกวน จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งของหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าค่าความแข็งของหัว핀แบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 5-10 % อย่างไรก็ตามที่บริเวณที่ถูกกวนของหัว핀ทั้งสองแบบมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM)

7. ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตามขวางและตัดตามยาวกับรอยเชื่อม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกจะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยมในทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม โดยเฉพาะที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าทุกๆ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองเบื้องต้นที่ความเร็วในการเดินเชื่อมน้อยกว่า 80 mm/min หรือมากกว่า 160 mm/min รอยเชื่อมจะไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดช่องว่างในรอยเชื่อม น่าจะมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อหาสาเหตุและเหตุผลรองรับ
2. งานวิจัยในอนาคตควรเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว เพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับสภาพ as cast จากการทดลองเบื้องต้นซึ่งจะเป็นข้อมูลในการศึกษาต่อไป
3. ควรวิจัยหารอยบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุชนิดนี้ ด้วยวิธีการทางการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

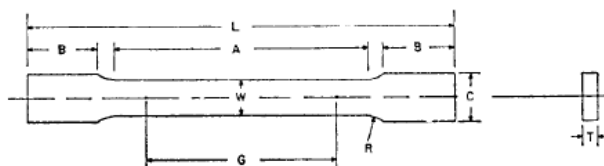
ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติทางโลหวิทยาและสมบัติทางกล

ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายเจือจาง Keller's reagent

กรดไฮโดรฟลูออริก	ความเข้มข้น 48% 2 ml
กรดไฮโดรคลอริก	(เข้มข้น) 3 ml
กรดไนตริก	5 ml
น้ำ	190 ml

ก.2 ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8

E 8



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 1½-in. Wide	Sheet-Type, ¼-in. Wide	¼-in. Wide
	in.	in.	in.
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	8.00 ± 0.01	2.000 ± 0.005	1.000 ± 0.003
W—Width (Note 3 and Note 4)	1½ ± ⅛, - ¼	0.500 ± 0.010	0.250 ± 0.005
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	1	½	¼
L—Over-all length, min (Note 2 and Note 7)	18	8	4
A—Length of reduced section, min	9	2¼	1¼
B—Length of grip section, min (Note 8)	3	2	1¼
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	2	¾	¾

NOTE 1—For the 1½-in. wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 1 in. apart, or one or more pairs of punch marks 8 in. apart may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 1½-in. wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (A) of 2¼ in. may be used with all other dimensions similar to those of the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004, 0.002 or 0.001 in., respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 0.015, 0.005, or 0.003 in., respectively, larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension T is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 1½-in. wide specimens shall be ⅜ in. Maximum thickness of ½-in. and ¼-in. wide specimens shall be ¾ in. and ¼ in., respectively.

NOTE 6—For the 1½-in. wide specimen, a ½-in. minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 100 000 psi in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—To aid in obtaining axial force application during testing of ¼-in. wide specimens, the over-all length should be as large as the material will permit, up to 8.00 in.

NOTE 8—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of ½-in. wide specimens is over ⅜ in., longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 0.10, 0.05 and 0.005 in., respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the ½-in. wide specimen shall be symmetrical within 0.01 in.

NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 0.05 in., and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 0.10 in.

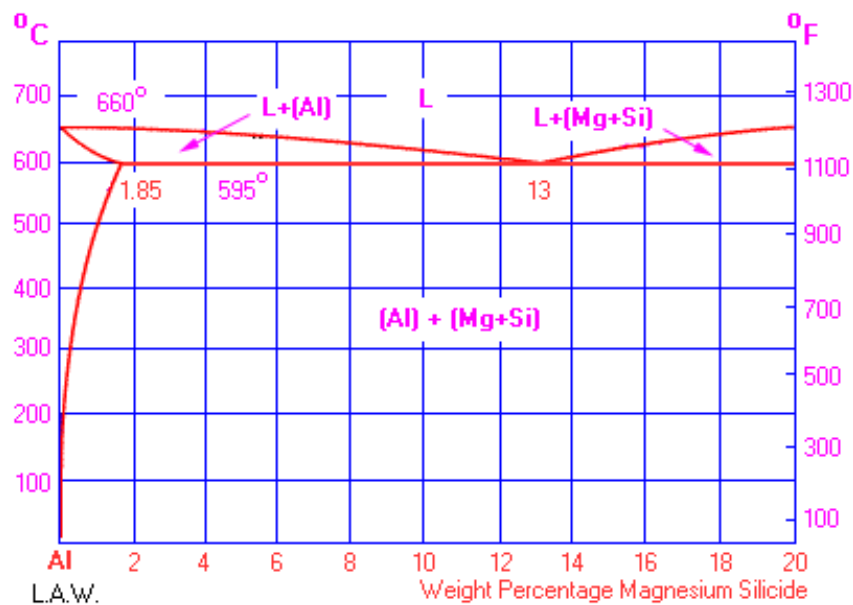
NOTE 11—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2W from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

ภาคผนวก ข

แผนภาพสมดุลเฟสและภาพโครงสร้างทางจุลภาค

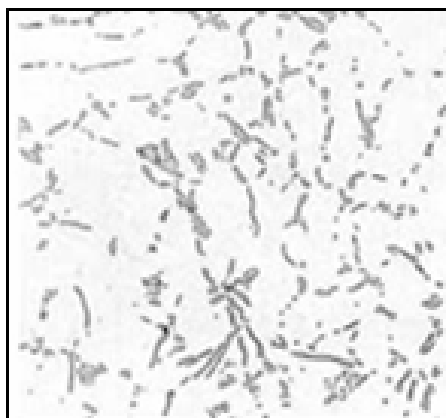
ข.1 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม

แผนภาพสมดุล (Phase diagram)



แผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิไซด์
(Aluminum - Magnesium - Silicide phase diagram)

ข.2 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม



รูปที่ ข.1 แสดงโครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356

ภาคผนวก ก

ภาพโครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ค.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



(ก) 80 mm/min



(ข) 80 mm/min



(ค) 120 mm/min



(ด) 120 mm/min



(ก) 160 mm/min



(ข) 160 mm/min

รูปที่ ค.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพิน (ก) แบบทรงกระบอกและ (ข) แบบสี่เหลี่ยม



(ก)



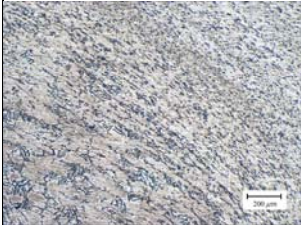
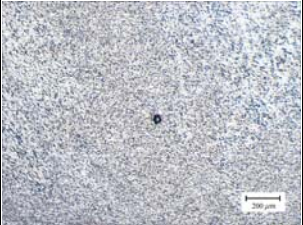
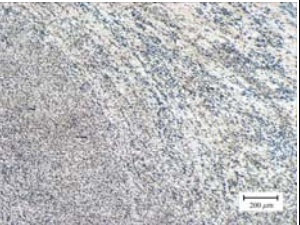
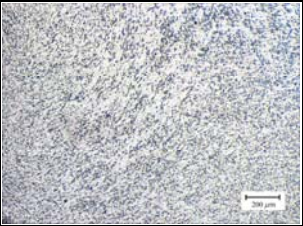
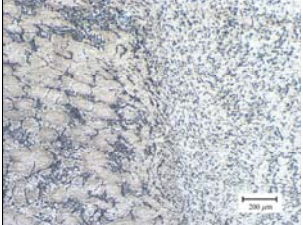
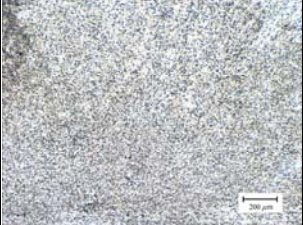
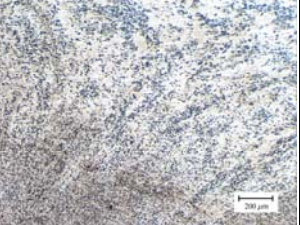
(ข)

รูปที่ ค.2 ผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ก) รอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและ (ข) รอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

ค.2 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

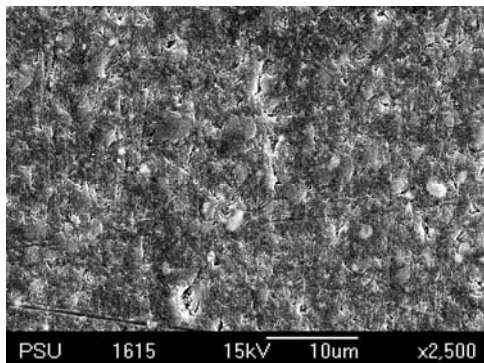
รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TMAZ Retreating	SZ	TMAZ Advancing
แบบ ทรงกระบอก 80 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 120 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 160 mm/min			

รูปที่ ค.3 โครงสร้างทางจุลภาคของหัวพินแบบทรงกระบอก

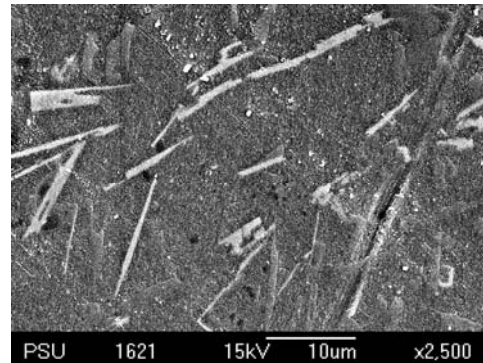
รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TMAZ Retreating	SZ	TMAZ Advancing
แบบสี่เหลี่ยม 80 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 120 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 160 mm/min			

รูปที่ ค.4 โครงสร้างทางจุลภาคของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

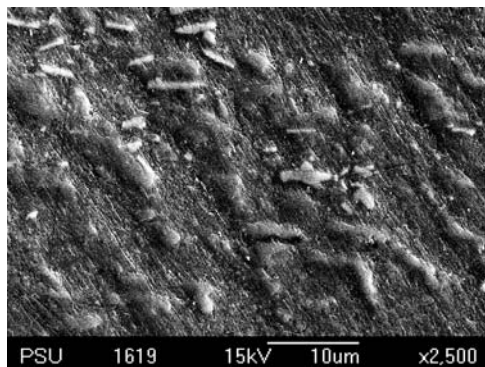
ค.3 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้อง SEM ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



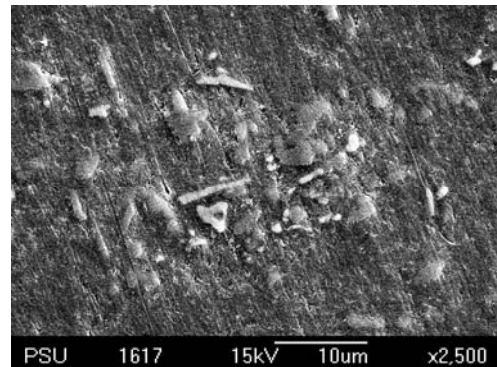
(ก) 80 mm/min



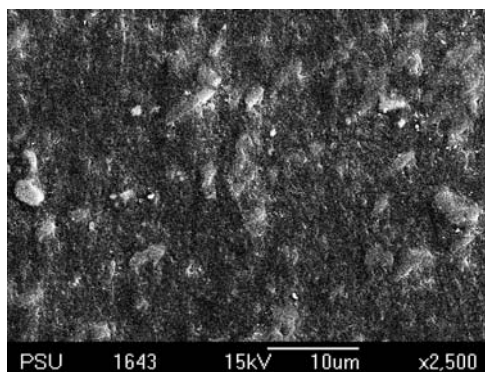
(ข) 80 mm/min



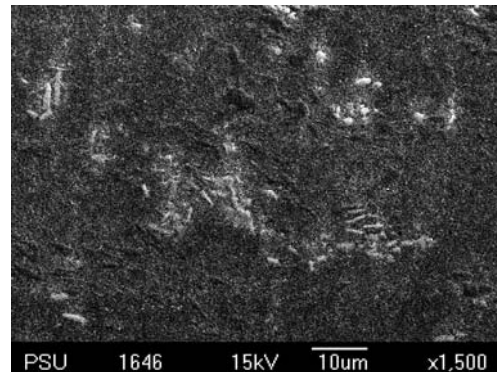
(ก) 120 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ก) 160 mm/min



(ข) 160 mm/min

รูปที่ ค.5 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้อง SEM ของหัวพิน

(ก) แบบทรงกระบอกและ (ข) แบบสี่เหลี่ยม

ภาคผนวก ง

ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ง.1 ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ตารางที่ ง.1 ค่าความแข็งแรงของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

ระยะห่าง จากจุด กึ่งกลาง	รูปแบบของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อม					
	Cylindrical	Square	Cylindrical	Square	Cylindrical	Square
	80	80	120	120	160	160
4.8	57.6	50.9	56.3	59.2	59.2	55.4
4.2	61.8	54.4	53	61.3	58.1	51.4
3.6	62.3	51.7	56.8	56.5	53.4	60.5
3	66.1	57.5	56.7	55.7	58.8	51.5
2.4	58.2	55.1	61.9	59.4	54.2	56.5
1.8	62.2	55.9	60.9	59	59.6	62.2
1.2	56.1	57.5	52.9	57.9	59.1	60.3
0.6	57.8	54.6	58.1	55.7	51.2	51.2
0	55.9	55.6	59.8	60.7	57	55.4
0.6	62.8	55.4	60.6	55.9	63	58.5
1.2	66.8	57.5	59.7	55.5	64.3	58
1.8	52.8	55	67	56.5	66.3	58.9
2.4	54.9	55.6	65.7	56.4	63.3	60.2
3	57.1	57.7	51.4	53	59.2	63.2
3.6	56.2	50.4	61.8	49.9	55.7	59.7
4.2	61.3	53.7	57.4	46	68.7	58
4.8	56.3	50.2	53.6	49.7	64.4	59.2

ภาคผนวก จ

ค่าความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จ.1 ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จ.1.1 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

ตารางที่ จ.1 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

การทดลองที่	Welding speed (mm/min)	Tensile test					
		Cylindrical (Mpa)	% Elongation	ขาด	Square (Mpa)	% Elongation	ขาด
1	80	173.84	15.73	Base	170.57	21.52	Base
	120	168.35	14.79	Base	164.89	9.12	Weld
	160	210.25	13.75	Base	178.44	10.75	Weld
2	80	176.22	13.39	Base	143.23	9.66	Weld
	120	190.85	13.2	Base	171.73	7.67	Weld
	160	193.89	12.97	Base	173.61	16.74	Base

จ.1.2 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

ตารางที่ จ.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

การทดลองที่	Welding speed (mm/min)	Tensile test			
		Cylindrical (Mpa)	% Elongation	Square (Mpa)	% Elongation
3	80	175.2	9.91	149.16	5.54
	120	175.37	10.88	167.84	6.6
	160	238.4	19.90	191.31	10.37
4	80	144.84	1.66	176.63	3.01
	120	201.32	3.83	194.13	3.09
	160	216.11	4.04	202.32	3.98

การทดลองที่	Welding speed (mm/min)	Tensile test			
		Cylindrical (Mpa)	% Elongation	Square (Mpa)	% Elongation
5	80	197.69	11.22	186.22	12.17
	120	195.69	10.75	177.52	14.21
	160	212.2	17.93	193.4	18.94
ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ 3, 4 และ 5	80	172.57	-	170.67	-
	120	190.79	-	179.83	-
	160	222.23	-	193.67	-

ตารางที่ จ.3 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานในบริเวณเนื้อโลหะเดิม

ชั้นที่	Tensile test of base metal	
	Tensile (Mpa)	% Elongation
1	186.14	8.77
2	202.43	14.42
3	175.62	10.2
4	130	8.67
5	195.31	11.74
6	193.98	14.05
7	194.8	12.41
8	202.63	12.12
รวม	185.11	-

Output จากโครงการวิจัย

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- อยู่ในระหว่างเขียนต้นฉบับหัวข้อเรื่อง Effect of welding speed and tool pin profile on weld quality of friction stir welded Semi-solid Aluminium Alloy 356 วารสารที่จะส่งคาดว่าจะส่ง คือ Journal of Materials Processing Technology หรือ Journal of Materials and Design และคาดว่าจะสามารถส่งต้นฉบับภายใน 2-3 เดือน

การนำผลงานไปใช้ประโยชน์

- เชิงสาธารณะ มีเครื่องข่ายงานวิจัยร่วมกับหน่วยงานภายนอก ได้แก่ ม.นราธิวาสราชนครินทร์ และกรมวิทยาศาสตร์บริการ
- เชิงวิชาการ มีนักศึกษาระดับปริญญาโทจบการศึกษา 1 คน

บทความสำหรับการเผยแพร่

- ผลงานวิจัยเสนอในที่ประชุมวิชาการ The 3rd Thailand Metallurgy Conference ระหว่างวันที่ 26-27 ตุลาคม 2009 กรุงเทพมหานคร เรื่อง The Effect of Welding Speed and Tool Pin Profile on Metallurgical and Mechanical Properties of Joining of Semi-Solid (SSM) Aluminium Alloy A356 by Friction Stir Welding Process (FSW)