

รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาค้อนฉีกอ้อยที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรม
งานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม

Development of Sugarcane Shredding Hammer with Degeneration
Resistant Property by Welding Engineering Technology and
Welding Qualification Control

โดย รองศาสตราจารย์ ตรีนตร ยิงสัมพันธ์เจริญ และคณะ
ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1 กันยายน พ.ศ. 2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0078

รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาค้อนฉีกอ้อยที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรม
งานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม

Development of Sugarcane Shredding Hammer with Degeneration
Resistant Property by Welding Engineering Technology and Welding
Qualification Control

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1. รศ.ตรีเนตร	ยิ่งสัมพันธ์เจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2. ดร.นครินทร์	ศรีสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
3. อาจารย์อรรถพล	แก้ววิสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
4. อาจารย์ชูชาติ	ด้วงสงค์	วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2559

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

สัญญาเลขที่ RDG60T0078

การพัฒนาเครื่องมือที่มีสมบัติด้านการเชื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อม
และการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม

รายงานฉบับสมบูรณ์

ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการ

ชื่อผู้รับทุน : รองศาสตราจารย์ ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ

โครงการเริ่มเมื่อ

วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 31 สิงหาคม พ.ศ.2561

รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น 12 เดือน

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 ในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 ถึง 2 ธันวาคม พ.ศ. 2560

สารบัญ

บทที่	หัวข้อ	หน้า
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	3
	1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม	3
	1.6 แผนงานโครงการ	4
บทที่ 2	การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	5
	2.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	5
	2.2 เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy Steel : HSLA)	11
	2.3 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555 Part 1	17
	2.4 การพอกผิวแข็ง	26
	2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ	27
	2.6 การตรวจสอบความแข็ง (Hardness test)	29
	2.7 การทดสอบด้วยแรงกระแทก (Impact test)	33
	2.8 การสึกหรอแบบเชาะร่อง (Gouging Abrasion)	37
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	41
	3.1 การวิเคราะห์สภาพปัญหาการเสื่อมสภาพของค้อนฉีกอ้อยของโรงงาน	41
	3.2 การเลือกลวดเชื่อม	43
	3.3 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพงานเชื่อมค้อนฉีกอ้อย	43
	3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี	45
	3.5 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	46
	3.6 การกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลองเชื่อมพอกแข็ง	49
	3.7 วิธีการดำเนินงาน	50
	3.8 การกำหนดขั้นตอนการการเชื่อมพอกแข็งค้อนทุบอ้อย	53
	3.9 การกำหนดขั้นตอนการการทดลองเชื่อมพอกแข็งชิ้นทดสอบค้อนทุบอ้อย	54

บทที่ 4	ผลการทดลอง	57
4.1	ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างจากโรงงาน (<u>ชิ้นงาน Benchmark</u>)	57
4.2	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	60
4.3	ผลการทดสอบการเชื่อมพอกแข็งชิ้นทดสอบงานเชื่อมสภาวะการทดลองต่างๆ	64
4.4	เปรียบเทียบผลการทดสอบการเชื่อมพอกแข็งชิ้นทดสอบงานเชื่อมสภาวะการทดลองต่างๆ	164
4.5	รายงานผลการทดสอบความต้านทานการสึกร่อน (Test Report : Wear Testing)	174
4.6	เอกสารข้อกำหนดรายละเอียดขั้นตอนการเชื่อม (WPS)	176
4.7	การจัดทำใบบันทึกผลการทดสอบรับรองขั้นตอนการเชื่อม (PQR)	178
4.8	การประเมินราคาค้อนฉีกอ้อย	180
4.9	การจัดอบรมเพื่อถ่ายทอดความรู้และผลการประเมินความรู้และความพึงพอใจของผู้เข้าอบรมรวมถึงเอกสารประชาสัมพันธ์	181
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	185
5.1	สรุปผลการทดลอง	185
5.2	อภิปรายผลการทดลอง	190
5.3	ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป	192
เอกสารอ้างอิง		193
ภาคผนวก ก.		195
ภาคผนวก ข.		220
ภาคผนวก ค.		226

บทคัดย่อ

งานวิจัยได้ทำการศึกษากระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งของค้อนฉีกอ้อยสำหรับกระบวนการเชื่อม วัสดุ เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง ASME SA572 Gr.65 ทำการเชื่อมโดยใช้ การเชื่อมพอกแข็งด้วย UTP Ledurit 65 และลวดเชื่อมพอกแข็ง ESAB DUROID 650 และมีลวดเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม UTP 63 และไม่มีการเชื่อมรองพื้น โดยให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat) ที่ 150°C และไม่ให้ความร้อน ที่ขึ้นงานตามลำดับ นอกจากนั้น งานวิจัยนี้มีการควบคุมกระบวนการทางความร้อนสำหรับวัสดุเชื่อมเพื่อแก้ปัญหา ข้อบกพร่องเรื่องรอยแตกร้าวด้วย และก่อนทำการเชื่อมอุ่นขึ้นงานที่ 150 องศาเซลเซียส สำหรับเชื่อมขึ้นงานรองพื้น สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง รวมถึงการทดสอบโครงสร้างมหภาค และการทดสอบโครงสร้างจุลภาค การทดสอบ ความแข็ง การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก และการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน ตามลำดับ

Abstract

The research is carried out to investigate the hard-facing welding process of the sugar fibrizer hammers for the welding process. High strength steel ASME SA572 Gr.65 is welded by using hard-facing welding with UTP Ledurit 65 welding wire ESAB DUROID 650 and welding wire UTP 63 to be the buffer layer with no buffer welding. Preheat at 150 degrees celsius and do not heat the workpiece in sequence. In addition, this research has controlled the thermal process for the weld material to solve the problem of cracking. And before the welding of the workpiece at 150 degrees celsius for welding work to be buffer layer for hard-facing welding including macroeconomic testing, microstructure testing, hardness testing, impact resistance testing and erosion resistance testing respectively.

บทสรุปผู้บริหาร

ปัจจุบัน โรงงานน้ำตาลได้จัดซื้อค้อนฉีกอ้อยและเหมาจ้างบริษัท SME ที่จำหน่ายลวดเชื่อมหรือบริษัทที่รับงานเชื่อมพอกผิวแข็ง ให้ดำเนินการเชื่อมพอกผิวบริเวณหัวค้อน เพื่อเสริมความแข็งแรง และยืดอายุการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม บริษัท SME ที่รับหน้าที่เชื่อมพอกผิวแข็งนั้นไม่ทราบถึงขั้นตอนที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง การเลือกลวดเชื่อม และการทดสอบ รวมถึงไม่มีระบบเอกสารงานเชื่อมเพื่อควบคุมคุณภาพ จึงทำให้โรงงานน้ำตาลยังคงประสบปัญหาการเสื่อมสภาพของค้อนอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ผู้ประกอบการ SME ด้านการผลิตและการเชื่อมพอกผิวแข็งควรปรับปรุงกระบวนการผลิต การทดสอบ และการควบคุมคุณภาพให้ดีขึ้น เพื่อช่วยลดการหยุดเปลี่ยนอะไหล่ค้อนฉีกอ้อยและลดการสูญเสียรายได้มหาศาลของโรงงานน้ำตาล ทั้งนี้การผลิตค้อนฉีกอ้อยให้มีคุณภาพจะสามารถเพิ่มมูลค่าสินค้าให้กับผู้ประกอบการ SME ด้านการผลิตค้อนฉีกอ้อย และเพิ่มยอดขายสินค้าที่มีคุณภาพด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะวิจัยได้เล็งเห็นถึงปัญหาและความสำคัญในการพัฒนากระบวนการผลิตค้อนฉีกอ้อยให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น จึงได้เสนอวิธีการวิจัยเกี่ยวกับ การเชื่อมพอกแข็งค้อนฉีกอ้อย และการจัดทำเอกสารควบคุมคุณภาพงานเชื่อมพอกผิวแข็ง เพื่อแก้ไขปัญหาการเสื่อมสภาพของชิ้นพอกแข็งบนค้อนฉีกอ้อย และพัฒนากระบวนการเชื่อมพอกแข็งให้มีมาตรฐานโดยอาศัยองค์ความรู้ทางด้านโลหะวิทยา และเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อม ซึ่งสามารถช่วยให้ค้อนฉีกอ้อยให้มีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ค้อนฉีกอ้อยที่พัฒนาขึ้นใหม่จะมีคุณภาพสูงขึ้นและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล โดยโครงการวิจัยนี้สอดคล้องตามนโยบายของทุนอุดหนุนกรอบวิจัยมุ่งเป้าด้านวิสาหกิจชุมชน และวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SME) ที่มุ่งเน้นการวิจัยที่มีผลผลิตสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมได้ทันที คณะวิจัยจึงได้นำเสนอโครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาค้อนฉีกอ้อยให้มีสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพ ด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม” เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของกระบวนการการผลิตของสินค้าให้กับผู้ประกอบการ SME ด้านการผลิตค้อนฉีกอ้อย ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปต่อยอดในเชิงธุรกิจได้อย่างยั่งยืน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

ปัญหาการเสื่อมสภาพของชั้นผิวพอกแข็งบนค้อนฉีกอ้อย (รูปที่ 1) ในกระบวนการหีบสกัดน้ำอ้อยของโรงงานน้ำตาลถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ เนื่องจากมูลค่าของค้อนฉีกอ้อยที่โรงงานน้ำตาลต้องสั่งซื้อในแต่ละปีอาจสูงถึง 3,000,000 - 4,000,000 บาท ทั้งนี้ขึ้นกับกำลังการหีบสกัดอ้อยของแต่ละโรงงานน้ำตาล โดยฝ่ายโรงจักรจะวางแผนการซ่อมบำรุง และจัดหาอะไหล่ค้อนฉีกอ้อยในปริมาณที่เหมาะสม เพราะหากโรงงานน้ำตาลต้องหยุดระบบหีบสกัดน้ำอ้อยนอกแผนซ่อมบำรุงจะสูญเสียรายได้เฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 500,000 บาทต่อวัน โดยข้อมูลจากโรงงานน้ำตาลพบว่าชั้นผิวพอกแข็งบนค้อนฉีกอ้อยเกิดการสึกกร่อน และแตกหักหลังผ่านการใช้งานได้ประมาณ 2-3 สัปดาห์ ทำให้ฝ่ายโรงจักรต้องหยุดเปลี่ยนอะไหล่ค้อนฉีกอ้อยใหม่ ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำในช่วงฤดูหีบอ้อย (เดือนธันวาคม – เมษายน ของทุกปี)



รูปที่ 1.1 ปัญหาการเสื่อมสภาพของชั้นผิวพอกแข็งบนค้อนฉีกอ้อย

ปัจจุบัน โรงงานน้ำตาลได้จัดซื้อค้อนฉีกอ้อยและเหมาจ้างบริษัท SME ที่จำหน่ายลวดเชื่อมหรือบริษัทที่รับงานเชื่อมพอกผิวแข็ง ให้ดำเนินการเชื่อมพอกผิวบริเวณหัวค้อนเพื่อเสริมความแข็งแรง และยืดอายุการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม บริษัท SME ที่รับหน้าที่เชื่อมพอกผิวแข็งนั้นไม่ทราบถึงขั้นตอนที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง การเลือกลวดเชื่อม และการทดสอบรวมถึงไม่มีระบบเอกสารงานเชื่อมเพื่อควบคุมคุณภาพ จึงทำให้โรงงานน้ำตาลยังคงประสบปัญหาการเสื่อมสภาพของค้อนอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ผู้ประกอบการ SME ด้านการผลิตและการเชื่อมพอกผิวแข็งควรปรับปรุงกระบวนการผลิต การทดสอบ และการควบคุมคุณภาพให้ดีขึ้น เพื่อช่วยลดการหยุดเปลี่ยนอะไหล่ค้อนฉีกอ้อยและลดการสูญเสียรายได้มหาศาลของโรงงานน้ำตาล ทั้งนี้การผลิตค้อนฉีกอ้อยให้มีคุณภาพจะสามารถเพิ่มมูลค่าสินค้าให้กับผู้ประกอบการ SME ด้านการผลิตค้อนฉีกอ้อยและเพิ่มยอดจำหน่ายสินค้าที่มีคุณภาพ

ด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะวิจัยได้เล็งเห็นถึงปัญหาและความสำคัญในการพัฒนากระบวนการผลิตค้อนฉีกอ้อยให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น จึงได้เสนอวิธีการวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมพอกแข็งค้อนฉีกอ้อย และการจัดทำเอกสารควบคุมคุณภาพงานเชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อแก้ไขปัญหาการเสื่อมสภาพของชิ้นผิวพอกแข็งบนค้อนฉีกอ้อย และพัฒนากระบวนการเชื่อมพอกแข็งให้มีมาตรฐานโดยอาศัยองค์ความรู้ทางด้านโลหะวิทยา และเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อม ซึ่งสามารถช่วยให้ค้อนฉีกอ้อยให้มีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ค้อนฉีกอ้อยที่พัฒนาขึ้นใหม่จะมีคุณภาพสูงขึ้นและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล โดยโครงการวิจัยนี้สอดคล้องตามนโยบายของทุนอุดหนุนการวิจัยมุ่งเป้าด้านวิสาหกิจชุมชน และวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SME) ที่มุ่งเน้นการวิจัยที่มีผลผลิตสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมได้ทันที คณะวิจัยจึงได้นำเสนอโครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาค้อนฉีกอ้อยให้มีสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม” เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของกระบวนการการผลิตของสินค้าให้กับผู้ประกอบการ SME ด้านการผลิตค้อนฉีกอ้อย ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปต่อยอดในเชิงธุรกิจได้อย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัญหาการเสื่อมสภาพของค้อนฉีกอ้อย
- 1.2.2 เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตค้อนฉีกอ้อยให้มีความต้านทานการเสื่อมสภาพ
- 1.2.3 เพื่อยกระดับกระบวนการผลิตและตรวจสอบคุณภาพค้อนฉีกอ้อยให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล
- 1.2.4 เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้และผลงานวิจัยให้กับผู้ประกอบการ SME ที่เกี่ยวข้อง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ใช้ค้อนฉีกอ้อยที่โรงงานน้ำตาลเป็นชิ้นงานอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ
- 1.3.2 ใช้เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A533 หรือเทียบเท่า เป็นวัสดุหลักในการทำงานวิจัย
- 1.3.3 ใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า (SMAW)
- 1.3.4 เติมลวดเชื่อมโลหะกลุ่มนิเกิล-โครเมียม (Ni-Cr) เพื่อสร้างชั้นรองพื้นที่ชิ้นงานตัวอย่าง
- 1.3.5 ดำเนินการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยลวดเชื่อมที่มีความแข็งช่วง 55 - 65 HV
- 1.3.6 ใช้กรรมวิธีทางความร้อนกับชิ้นงานตัวอย่างด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 300-550 °C
- 1.3.7 การตรวจสอบงานเชื่อมด้วยวิธีพินิจ (Visual Test) ตามมาตรฐาน AWS D1.1
- 1.3.8 การตรวจสอบงานเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Test) ตามมาตรฐาน ASME Section V
- 1.3.9 การทดสอบความแข็ง (Hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM E92-82/ASTM E384-81

- 1.3.10 ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน (Wear Test) ตามมาตรฐาน ASTM G65-16
- 1.3.11 ทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ตามมาตรฐาน ASME SA-370 / ASTM E208
- 1.3.12 วิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาคด้วย Optical Microscope (OM) หรือ Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-ray Diffractometer (XRD)
- 1.3.13 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Optical Emission Spectrometer (OES) หรือ Emission Dispersive X-ray (EDX) หรือ X-ray Fluorescent Spectrometer (XRF)
- 1.3.14 จัดทำเอกสารแสดงขั้นตอนการเชื่อม เอกสารควบคุมคุณภาพงานเชื่อม (WPS และ PQR)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เกิดองค์ความรู้ในการพัฒนากระบวนการผลิตค้อนฉีกอ้อยที่มีความต้านทานการเสื่อมสภาพ และสามารถเพิ่มมูลค่าของสินค้าได้
- 1.4.2 ข้อมูลวิจัยสามารถนำไปต่อยอดสู่การการขับเคลื่อนผลิตภัณฑ์สู่เชิงพาณิชย์ได้อย่างยั่งยืน
- 1.4.3 ยกระดับการผลิตสินค้าของผู้ผลิตค้อนหีบอ้อยและการเชื่อมพอกแข็งให้เป็นที่ยอมรับ

1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม



รูปที่ 1.2 แนวคิดและขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม

1.6 แผนงานโครงการ

ตารางที่ 1-1 แผนการทำงานโครงการวิจัย

ข้อที่	กิจกรรมการวิจัย	เดือนที่							
		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	1-2	3
1	รวบรวมปัญหาการเสื่อมสภาพของค้อนฉีกอ้อยและวิเคราะห์งานวิจัยด้านงานเชื่อมที่เกี่ยวข้อง								
2	ประสานงานกับผู้ประกอบการ SME ที่ประสงค์ทำวิจัยเพื่อพัฒนาการเชื่อมพอกแข็งบนชิ้นงานตัวอย่าง								
3	จัดฝึกอบรมเกี่ยวกับความรู้โลหะวิทยา กระบวนการเชื่อมเพื่อการผลิตค้อนฉีกอ้อยให้กับบุคลากรของผู้ประกอบการ SME								
4	กำหนดพารามิเตอร์ในการทดลองเชื่อมพอกแข็ง								
5	ทดลองเชื่อมพอกแข็งตามแผนงานที่กำหนดไว้								
6	การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่ได้ทดลองทำขึ้น								
7	จัดทำเอกสารควบคุมคุณภาพงานเชื่อม (WPS/PQR)								
8	สรุปผลการดำเนินงาน และจัดทำศูนย์องค์ความรู้ด้านการพัฒนาและรักษามาตรฐานการผลิตค้อนฉีกอ้อยให้มีคุณภาพ								
9	จัดสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย								
10	จัดทำรายงานผลการดำเนินการ								
	รายงานความก้าวหน้า 1								
	รายงานความก้าวหน้า 2								
	รายงานฉบับสมบูรณ์								

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

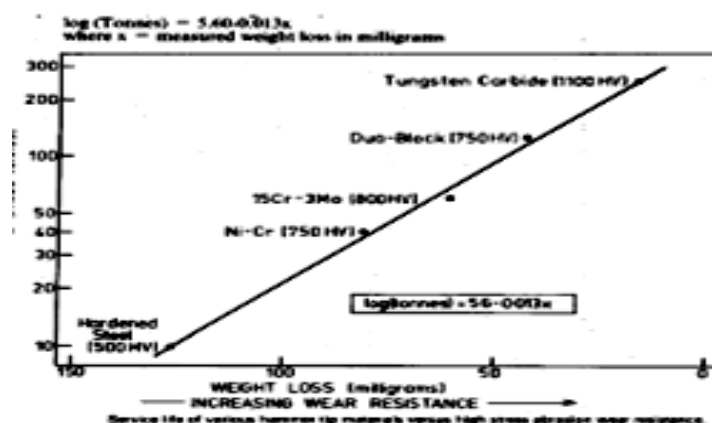
2.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

ปี 1983 K.F. Dalman และคณะได้ศึกษาการเลือกใช้วัสดุโลหะต่างๆ สำหรับผลิตเป็นหัวค้อนฉีกอ้อยโดยในสมัยนั้น (ค.ศ.1983) มีการทำหัวค้อนฉีกอ้อย 3 แบบ คือ การชุบแข็งด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์, การใช้เหล็กหล่อขาว หรือการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยค้อนที่ผลิตจากทั้ง 3 แบบ จะมีสมบัติแตกต่างกันตามตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ทำหัวค้อนฉีกอ้อย

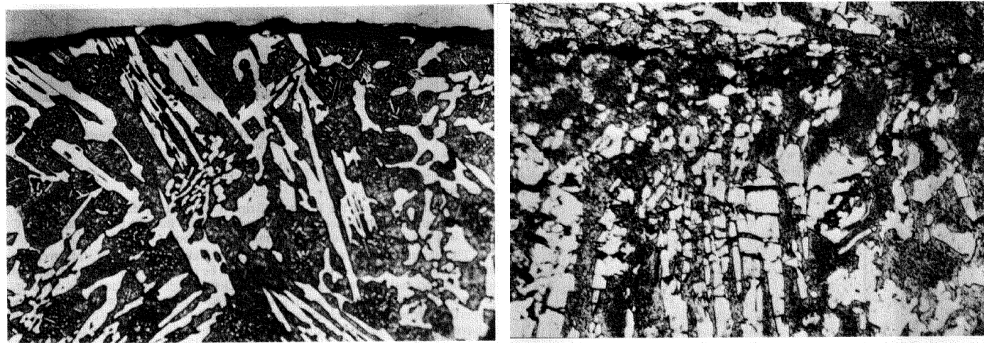
	Tungsten Carbide	White Iron	Hard Facing
Service Life (weeks)	6-12*	2-4	1-2
Material Cost	High	Moderate	Low*
Labour Cost	Low*	Moderate	High
Shatter Resistance	Low	Moderate	High*
Hardness (HV)	1100*	600-800	600-800
Cutting Edge	Sharp*	Lge Radius	Small Radius
Power Requirements	Low*	High	Moderate
Cell Breakage	High*	Moderate	Moderate

Dalman ได้ศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานการเสียดสีและสึกกร่อน ความเหนียวของวัสดุในการต้านการแตกหัก ของวัสดุโลหะผสมชนิดใหม่ (High Chromium With cast iron) ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า Dua-Black ผลการวิจัยพบว่าวัสดุ Dua-Black สามารถต้านทานการเสียดสีและสึกกร่อนได้ดี และมีอายุการใช้งานรองจากวัสดุกลุ่ม Tungsten carbide แต่สูงกว่าโลหะที่อยู่ในกลุ่ม 15Cr-2Mo, Ni-Cr และ Hardened steel ตามลำดับ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 อายุการใช้งานของหัวค้อนฉีกอ้อยที่ผลิตจากวัสดุต่างๆ

Lakeland และคณะ ได้วิจัยเกี่ยวกับความแข็งแรงและความต้านทานการสึกกร่อนของ ค้อนฉีกอ้อยที่มีการปรับปรุงธาตุ Alloying Elements ลงไปในเนื้อโลหะผสม (Fe-Cr-V-C Alloy) เพื่อให้เกิด Vanadium Carbide และ Tungsten Carbide ซึ่งใช้เหล็กหล่อขาว (White Iron) Dua-Black และเหล็ก Fe-Cr-C เป็นวัสดุอ้างอิง ผลการวิจัยพบว่าโลหะผสม Fe-Cr-V-C alloy ที่พัฒนาขึ้นยังมีสมบัติสู่เหล็ก Dua-Black ไม่ได้เมื่อพิจารณาจากการทดสอบหาน้ำหนักที่หายไป และข้อมูลจากภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคยังพบว่าอนุภาคของ Hard carbide ในเหล็ก Dua-Black ที่มีขนาดเล็กจะแทรกตัวอยู่ในเนื้อโลหะ ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรง ช่วยป้องกันการสึกกร่อน และลดการหลุดร่อนของคาร์ไบด์ (Carbide Pull-Out) ได้ แต่ในกรณีของโลหะผสม Fe-Cr-V-C Alloy จะพบรอยแตกเมื่อกัดด้วยกรดเฟอร์ริกคลอไรด์ (รูปที่ 2.2)



Dua-Black

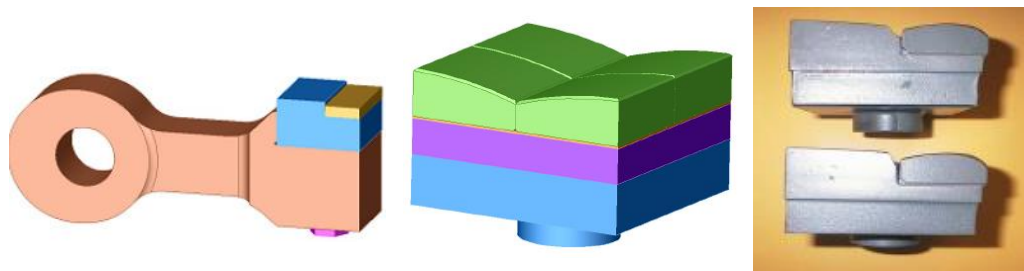
Fe-Cr-V-C alloy

รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค แสดงปริมาณคาร์ไบด์ในเหล็ก Dua-Black และรอยแตก Carbide Cracking ของโลหะผสม Fe-Cr-V-C alloy จากการกัดด้วยกรดเฟอร์ริกคลอไรด์

ปี 2005 J.G. Loughran และคณะ มีข้อมูลว่าหัวค้อนฉีกอ้อยที่มีการชุบเคลือบด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) บนเหล็กกล้าหรือเหล็กหล่อขาว เพื่อเพิ่มความแข็งที่ผิวและป้องกันการแตกหัก แต่เนื่องจากความแข็งของทั้งสแตนคาร์ไบด์ต่างกับความแข็งของเหล็กกล้าหรือเหล็กหล่อขาว ค่อนข้างมากจากตารางที่ 2-2 เมื่อนำไปใช้งานที่มีการชนกระแทกจึงเกิดการหลุดร่อน คณะวิจัยจึงทำการใช้ชั้น Tri-Ply Ag-Cu-Ag shim ช่วยยึดประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และโครงสร้างเหล็กกล้า (รูปที่ 2.4) จากนั้นจึงใช้การคำนวณทางคอมพิวเตอร์เพื่อจำลอง และตรวจสอบการกระแทกแบบไดนามิกที่ปลายของหัวค้อนฉีกอ้อย ซึ่งใช้การกระแทกที่ความเร็ว 1/3 ของความเร็วเสียง

ตารางที่ 2-2 สมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ผลิตค้อนฉีกอ้อย

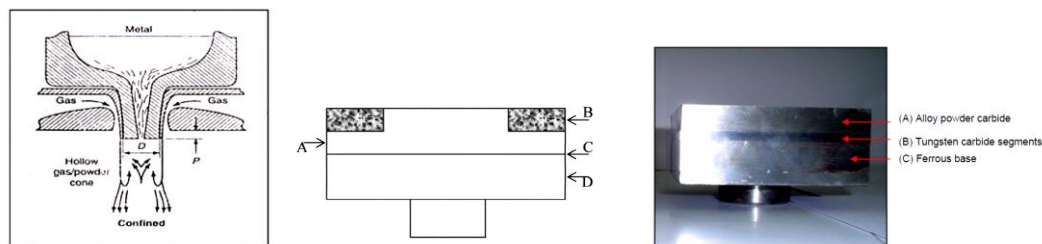
Material	Elastic modulus E (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength UTS@ ϵ_{uts} (MPa)	Coefficient of thermal expansion
Mild steel	207	250	400@0.15	14.1E-6
White iron	207	250	400@0.15	14.1E-6
Brazing	73	80	220@0.15	19.9E-6
WC (H10P)	558	N/A	N/A	5.3E-6



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างปลายหัวค้อนฉีกอ้อยที่ใช้วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ประสานติดกับชั้น Tri-Ply บนโครงสร้างเหล็กกล้า

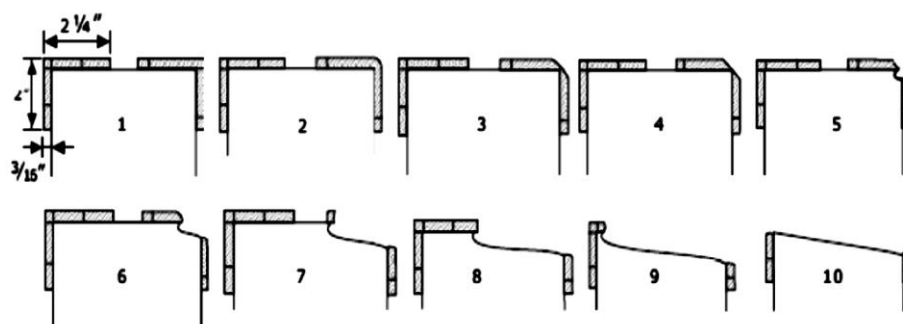
ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การแตกหักของโครงสร้างเหล็กกล้ามีผลกระทบมาจากความแข็งของทั้งสแตนคาร์ไบด์ และจากการวิเคราะห์ Finite Element Framework ทำให้ทราบถึงกลไกและรูปแบบความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับปลายค้อนฉีกอ้อย ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนาปลายหัวค้อนฉีกอ้อยให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานถึง 600,000 ตันอ้อยได้

ปี 2007 J. Duttagupta และคณะ ได้พัฒนาการผลิตปลายหัวค้อนฉีกอ้อยที่สามารถถอดเปลี่ยนได้โดยการให้มีสมบัติที่ดีเหล็กกล้าและทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีการใช้งานอยู่ในตอนนั้น (ค.ศ. 2007) ซึ่งออกแบบการผลิตหัวค้อนฉีกอ้อยให้เป็นชั้นโลหะ ชั้น คือ ชั้นบนสุด ใช้วัสดุโลหะผสมผงคาร์ไบด์เคลือบที่ผิวโลหะด้วยวิธี Atomization Process (รูปที่ 2.4) ซึ่งผงคาร์ไบด์จะกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้พื้นผิวทนต่อการสึกกร่อนได้ดี ส่วนชั้นรองลงมาจะใช้ทั้งสแตนคาร์ไบด์และโลหะผสมโคบอลต์เป็นชั้นประสานกับพื้นเหล็กกล้า เนื่องจากโคบอลต์จะช่วยเพิ่มความเหนียวในการยึดเกาะระหว่างชั้นโลหะผสมผงคาร์ไบด์กับโครงสร้างเหล็กกล้าได้ดี นอกจากนี้ยังออกแบบให้สลับเปลี่ยนปลายหัวค้อนที่มุมได้ 2 ข้าง (ตำแหน่ง 180°) ผลการวิจัยพบว่า ปลายหัวค้อนฉีกอ้อยที่ออกแบบใหม่ มีความแข็งแรงและต้านทานการสึกกร่อนได้มากกว่าปลายหัวค้อนฉีกอ้อยที่ทำจากเหล็กหล่อขาว โดยชั้นทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสมโคบอลต์เพื่อเพิ่มความเหนียวสามารถช่วยลดความเสียหายจากการแตกหักได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การออกแบบปลายหัวค้อนฉีกอ้อยให้สลับใช้งานได้ 2 ข้าง สามารถเพิ่มอายุการใช้งานได้มากขึ้น (900,000 – 1,000,000 ตันอ้อย)



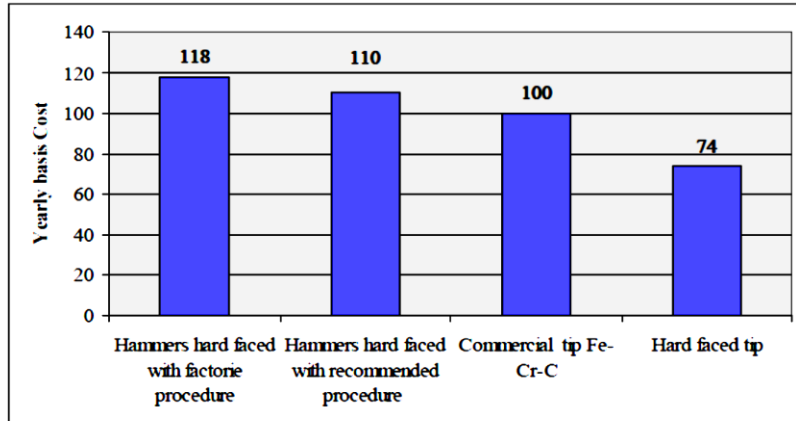
รูปที่ 2.4 การผลิตปลายหัวค้อนโดยใช้วิธี Atomization Process เพื่อสร้างชิ้นวัสดุโลหะผสมผงคาร์ไบด์ และการออกแบบให้เปลี่ยนปลายหัวค้อนได้ 2 ข้าง รวมถึงลักษณะปลายหัวค้อนที่พัฒนาขึ้นใหม่

ปี 2007 A.L. GÓMEZ และคณะได้ศึกษารูปแบบการแตกหักของหัวค้อนฉีกอ้อย (รูปที่ 2.5) และมีการออกแบบการเชื่อมปลายหัวค้อนฉีกอ้อยให้มีความหนามากขึ้น โดยเลือกใช้กระบวนการเชื่อมแบบ Flux-Cored Arc Welding (FCAW) ใช้ลวดเชื่อม 3 ชนิด คือ High Chromium Martensitic Steels, High Chromium White Cast Irons และ High Chromium Martensitic Steel with Titanium Carbides



รูปที่ 2.5 ลำดับการแตกหักของชิ้นพอกผิวแข็งที่ปลายหัวค้อนฉีกอ้อย

ผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มความหนาของชิ้นพอกผิวแข็งช่วยให้ค้อนฉีกอ้อยมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น และการเลือกใช้ลวดเชื่อม Chromium martensitic steel จะมีประสิทธิภาพกว่า High chromium white cast irons นอกจากนี้การใช้กระบวนการเชื่อมแบบ Flux-Cored Arc Welding (FCAW) ที่ปลายหัวค้อนฉีกอ้อย ถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับโรงงานผลิตน้ำตาล เพราะสามารถทดลองเปลี่ยนชนิดของลวดเชื่อมและพารามิเตอร์ในการเชื่อมได้สะดวก และสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตค้อนฉีกอ้อยได้อีกด้วย (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในรอบฤดูหีบอ้อยที่ใช้ค้อนฉีกอ้อยแบบต่างๆ

ปี 2014 Kenchi Reddy และคณะ ได้ทดลองใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง 2 ชนิด ที่มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุโครเมียม คาร์บอน และซิลิคอนแตกต่างกัน (ตารางที่ 2-3) บนเหล็กกล้าคาร์บอน โดยใช้กระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ (ตารางที่ 2-4) ซึ่งมีการควบคุมพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อม มีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G65

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมพอกแข็ง

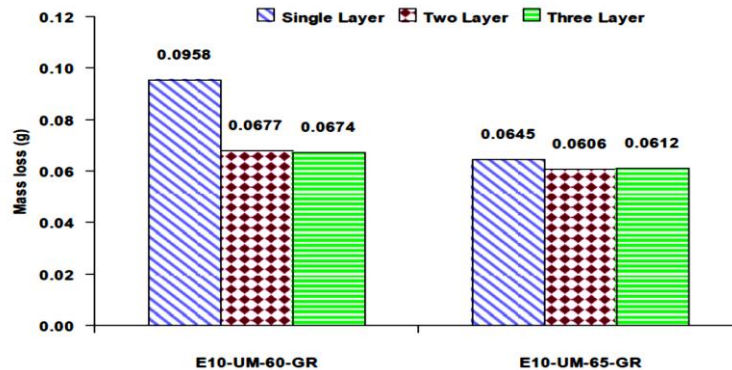
Electrode	C	Si	Mn	S	p	Cr	Mo	Ni	V
Hardfacing 1	0.33	0.28	1.15	0.014	0.025	2.22	-	-	-
Hardfacing 2	0.1	0.38	1.51	0.024	0.03	2.15	0.745	1.09	0.103

ตารางที่ 2-4 กระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ ซึ่งแสดงอัตราการใช้ปริมาณลวดเชื่อม

Process	Deposition Rates (Kg/Hr)
Flux core arc welding (FCAW)	3.63-11.34
Gas metal arc welding (GMAW)	2.3 -5.44
Gas tungsten arc welding (GTAW)	1.4 - 2.3
Shielded metal arc welding (SMAW)	1.4 -2.3
Submerged arc welding (SAW)	3.63 -11.34
Oxy fuel arc welding (OFW)	2.3 - 4.54

ผลการวิจัยพบว่า การใช้ลวดเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมและคาร์บอนสูงเชื่อมพอกบนเนื้อเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้ชิ้นงานเชื่อมสามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดีและมีค่าน้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกกร่อนน้อยกว่าลวดเชื่อมพอกแข็งที่มีโครเมียมและคาร์บอนต่ำ โดยภาพถ่าย SEM สามารถยืนยันการเกิดสารประกอบคาร์ไบด์แสดงถึงสมบัติด้านการสึกกร่อนและเพิ่มความแข็งแรงได้

ปี 2554 สุพร ฤทธิภักดี ได้วิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของชิ้นผิวเชื่อมพอกแข็งโดยใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า (SMAW) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งมาตรฐาน DIN8555 กลุ่มที่ 10 (E10-UM-65-GR และ E10-UM-60-GR) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 เพื่อป้องกันการสึกกร่อนแบบขัดสี โดยทดสอบการสึกกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G65 ผลการวิจัยพบว่า ค่าความแข็งแรงของชิ้นผิวเชื่อมพอกแข็งจากลวดเชื่อม E10-UM-65-GR สูงกว่าชิ้นผิวเชื่อมพอกแข็งจากลวดเชื่อม E10-UM-60-GR นอกจากนี้ ยังพบว่าชิ้นผิวแนวเชื่อมพอกแข็งที่มีแนวเชื่อม 2 ชั้น ของลวดเชื่อม E10-UM-65-GR มีความต้านทานการสึกกร่อนแบบขัดสีสูงกว่าชิ้นผิวเชื่อมพอกแข็งของลวดเชื่อม E10-UM-65-GR ชิ้นผิวเชื่อม 3 และ 1 ชั้น ตามลำดับ และในส่วนของชิ้นผิวเชื่อมพอกแข็งของลวดเชื่อม E10-UM-60-GR ชิ้นผิวเชื่อม 3 ชั้น มีความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่าชิ้นผิวเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น และ 1 ชั้น ตามลำดับ (รูปที่ 2.7)



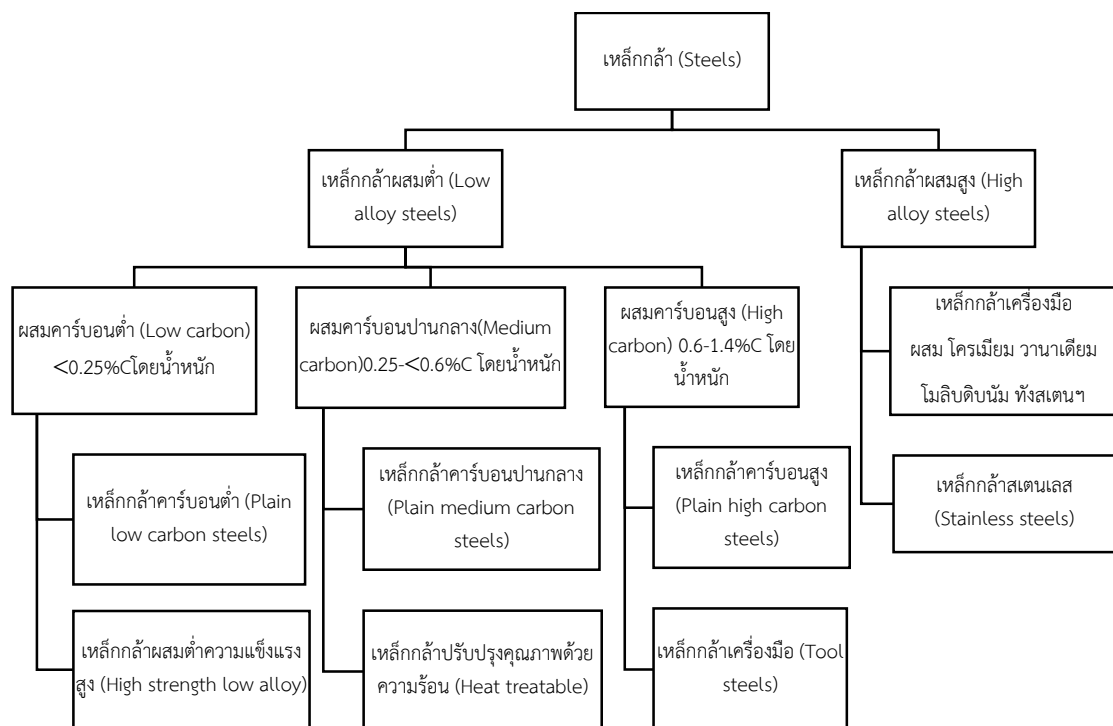
รูปที่ 2.7 ค่าน้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกกร่อน ตามมาตรฐาน ASTM 65

ปี 2555 ยงยุทธ และคณะได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการสึกกร่อนของการเชื่อมพอกผิววัสดุเหล็ก AS3678 เกรด 350 ด้วยกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกัน (SMAW GTAW/GMAW และ FCAW) เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการกร่อน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G65 เป็นเวลา 50 ชั่วโมง ผลการวิจัยพบว่า เนื้อเชื่อมจากกระบวนการเชื่อมพอกผิวทั้ง 3 แบบ ให้ค่าการทนต่อการสึกกร่อนแบบขัดสีที่แตกต่างกัน ซึ่งชิ้นงานจากกระบวนการเชื่อม FCAW มีค่าความต้านทานการสึกกร่อนแบบขัดสีที่ดีที่สุด บริเวณเนื้อเชื่อมการสูญเสียเนื้อโลหะน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมอื่นๆ รวมถึง

ให้ค่าความแข็งได้สูงที่สุดที่ 213.4 HV ส่วนกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW/GMAW มีค่าความต้านทานการสึกกร่อนแบบขัดสีน้อยสุด โดยมีค่าความแข็งน้อยสุดที่ 174.8 HV ดังนั้นในการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเชื่อมเหล็ก AS3678 เกรด 350 ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ จึงแนะนำให้เลือกใช้กระบวนการเชื่อมแบบ Flux-Cored Arc Welding (FCAW)

2.2 เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy Steel : HSLA)

บางครั้งเหล็กกล้าคาร์บอนจะจัดรวมกับเหล็กกล้าผสมแยกออกได้เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมสูง เหล็กกล้าอาจแบ่งประเภท ตามกรรมวิธีการผลิตเช่น ผลิตจากเตาครุชีเบล เตาเบส เซมเมอร์ เตาโอเพ่นฮาร์ท เตาเบสค็อกซ์เจน เตาหลอมด้วยไฟฟ้า หรือแบ่งตามการใช้งาน เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือกล เหล็กกล้าสปริง เหล็กหม้อน้ำ เหล็กโครงสร้าง เหล็กเครื่องมือ แต่ที่ง่ายใช้กันมากที่สุดคือ แบ่งประเภทตามส่วนผสมทางเคมี



รูปที่ 2.8 ประเภทของเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมสูงสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอน

ที่มา : K P Shah, The Hand Book on Mechanical Maintenance.

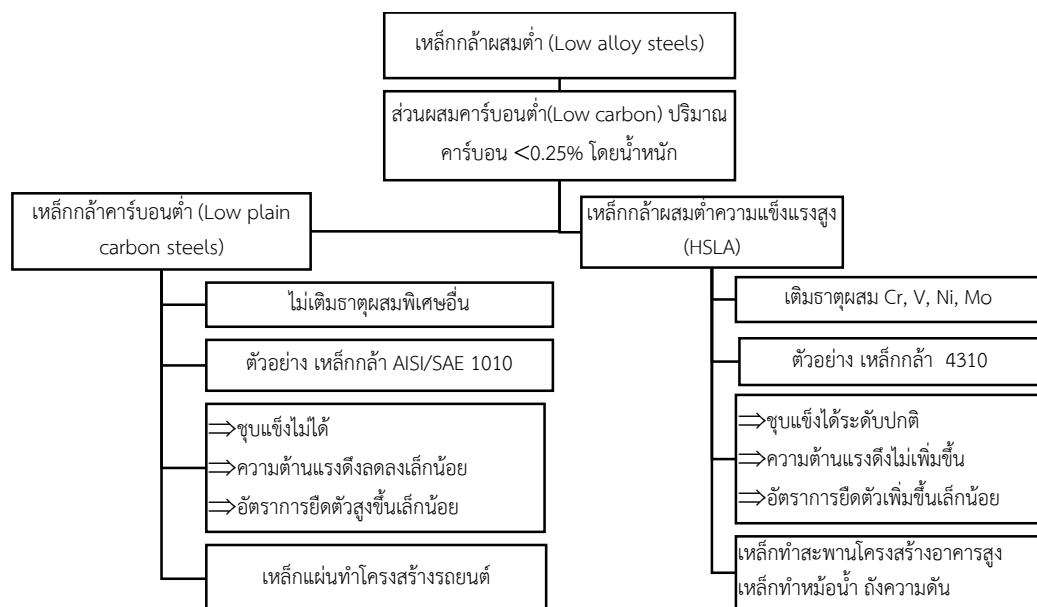
ตารางที่ 2-5 ชนิดของเหล็กกล้าผสมต่ำและชนิดของเหล็กกล้าผสมสูง

ข้อมูล	เหล็กกล้า (Steels)							
	เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)						เหล็กกล้าผสมสูง (High Alloy S)	
	คาร์บอนต่ำ (Low Carbon)		คาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon)		คาร์บอนสูง (High Carbon)			
ชื่อเรียก(Name)	Plain	HSLA	Plain	เหล็กกล้าใช้ชุบ แข็งด้วยความร้อน	Plain	เหล็ก เครื่องมือ	เหล็กเครื่องมือ ผสมสูง	เหล็กกล้า สแตนเลส
ส่วนผสม (Additions)	ไม่ผสม (None)	Cr, V, Ni, Mo	ไม่ผสม (None)	Cr, Ni, Mo	ไม่ผสม (None)	Cr, Mo, V, W<10%	Cr, V, Mo, Co, W, Ti>10%	Cr, Ni, Mo
ตัวอย่าง	1010	4310	1040	4340	1095	W1	T1, M2	304, 409
ความสามารถชุบ แข็ง	0	+	+	++	++	+++	+++	เปลี่ยนตามชนิด SUS
ความต้านแรงดึง	—	0	+	++	+	++	++	เปลี่ยนตามชนิด
การยืดตัว	+	+	0	—	—	—	—	++
การนำไปใช้งาน (Applications)	เหล็กแผ่น ตัวถัง รถยนต์	สะพาน โครงสร้างสูง ถึงความดัน	เพล ข้อ เหวี่ยง	เสื้อสูบ, ลูกสูบ, เกียร์, ต่อกาน การสึกหรอ,	ดันทา นการสึก หรอ	เครื่องมือ เล็กทั่วไป	เครื่องมือตัด, เครื่องมือเล็ก คุณภาพสูง	อุณหภูมิสูงไอน้ำ เตาอบ ต่อกัด กร่อน

หมายเหตุ ความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น, ราคาเพิ่ม, ความเหนียว (Ductility) ลดลง

ที่มา : <http://slideplayer.com/,2015,Types and applications of metals.>

จากตารางที่ 2-5 ถ้าเจาะจงไปที่เหล็กกล้าผสมต่ำชนิดคาร์บอนต่ำจะสรุปได้ตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำปริมาณคาร์บอนต่ำ

เหล็กกล้าผสมต่ำ ผสมคาร์บอน <0.25% โดยน้ำหนัก แมงกานีส 0.30-0.60% ฟอสฟอรัสสูงสุด 0.04% กำมะถัน สูงสุด 0.05% ถ้าไม่เติมธาตุผสมอื่น จะได้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชุบแข็งไม่ได้ ความต้านแรงดึง (Tensile Strength : TS) ลดลง อัตราการยืดตัว (Elongation: EL) เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเหล็กกล้า AISI-SAE 1010 ใช้ทำตัวถังรถยนต์

ถ้าผสมโครเมียม วานาเดียม นิกเกิล โมลิบดีนัม ฯลฯ รวมไม่เกิน 2% จะได้เหล็กกล้าผสมต่ำ ความแข็งแรงสูง (High - Strength Low Alloy Steel : HSLA เช่นเหล็กกล้า AISI-SAE 4310 ความสามารถชุบแข็ง เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความต้านแรงดึงไม่เพิ่ม อัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ใช้สร้างสะพาน (Bridge) โครงสร้างตึกสูง (Tower) เหล็กกล้าผลิตหม้อน้ำและถึงความดัน (Boiler and pressure vessels) เป็นต้น

ตารางที่ 2-6 เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA)

ธาตุผสมอื่นรวม $\leq 2\%$	อิทธิพลของธาตุผสม
แมงกานีส (Mn), ทองแดง (Cu), ไททาเนียม (Ti), วานาเดียม (V), และไนโอเบียม (Nb)	เพิ่มความแข็งแรง (Strengthenin) โดยกระจายคาร์ไบด์ละเอียดบนโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite Matrix)
ทองแดง (Cu), ซิลิกอน (Si), นิกเกิล (Ni), โครเมียม (Cr) และฟอสฟอรัส (P)	เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)
เซอร์โคเนียม (Zr), แคลเซียม (Ca), ธาตุหายากในโลก (Rare earth element)	ควบคุมการผลึกของซัลไฟด์ เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Formability)

ที่มา: <https://en.wikipedia.org>

2.2.1 โครงสร้างจุลภาคเหล็กผสมต่ำความแข็งแรงสูง (Microstructure of High Strength Low Alloy Steel : HSLA)

M. Pirinen , Yu. Martikainen และ P.D. Layusa Technical University, Lappeenranta, Finland ร่วมกับ V.A. Karkhin , S.Yu. Ivanov, St Petersburg State Polytechnic University, St Petersburg, Russia, Published online: 16 Jun 2015. <http://www.tandfonline.com/loi/twld20>, ได้ทำการศึกษาเรื่อง ผลของปริมาณความร้อนเข้าที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของรอยต่อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (Effect of heat input on the mechanical properties of welded joints in high-strength steels) สรุปว่าเหล็กกล้า HSLA มีค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) สูงกว่า 950 MPa มีกรรมวิธีผลิตหลักๆ อยู่ 3 กรรมวิธีคือ

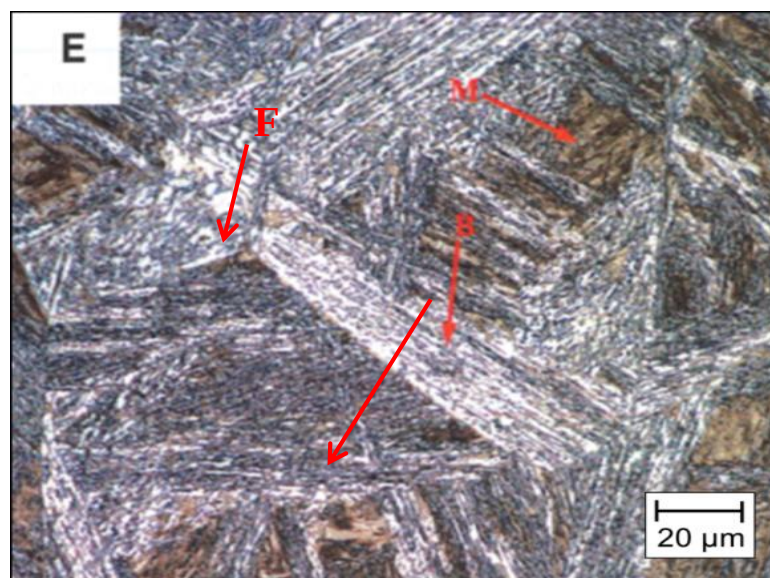
- (1) ชุบแข็งและอบคืนตัว (Quenching and tempering : QT)
- (2) รีดด้วยกระบวนการทางความร้อนและเร่งอัตราการเย็นตัว (Thermomechanical rolling with accelerated cooling : TMCP)
- (3) ชุบแข็งโดยตรง (Direct quenching)

โครงสร้างจุลภาคจะขึ้นกับส่วนผสมทางเคมี

ตารางที่ 2-7 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า HSLA ที่ใช้ทดลอง

Steel	C	Si	Mn	Al	B	Nb	Ti	V	Cu	Cr	Ni	Mo	N	P	S
Qt	0.137	0.28	1.39	0.061	0.0021	0.022	0.002	0.001	0.02	0.062	0.066	0.029	0.005	0.013	0.0013
TMPC	0.049	0.17	1.86	0.025	-	0.018	0.092	0.009	-	-	-	0.008	0.005	0.012	0.02
OK Autrod 13.51	0.07	0.89	1.45	0.061	-	-	0.01	-	≤0.30	0.05	0.04	-	0.005	0.012	0.02

ที่ปรากฏผลจากการทดลองจะเป็นโครงสร้างผสมระหว่างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียด, มาเทนไซต์ และเฟอร์ไรท์+เบนไนท์ (Bainitic, Martensitic and Ferritic+Bainitic)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างมาเทนไซต์ เบนไนต์ และเฟอร์ไรต์

ที่มา : Wesley Wang on Wednesday, May 20th, 2015, <https://ewi.org/>

สามารถสังเกตโครงสร้างต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ⇒ พื้นที่สีขาวเป็นเฟอร์ไรต์ หรือ (α -Fe)
- ⇒ พื้นที่สีเทาอ่อนเป็นมาเทนไซต์ (Martensite : Fe_3C)
- ⇒ ชั้นที่ถูกแบ่งบาง ๆ เป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) หรือ (α -Fe + Fe_3C)
- ⇒ ส่วนที่ดำมากที่สุดเป็นเบนไนต์ (Benite or Fine Pearlite)

2.2.2 สมบัติเชิงกลเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (Mechanical Property of High Strength Low Alloy Steel : HSLA)

2.2.2.1 ค่าสมบัติเชิงกล (Mechanical Property)

ตารางที่ 2-8 ค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

Steel	Yield stress (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation A5 (%)	Impact energy (J)
QT	793	835	16.3	103 (-40°C)
TMPC	761	821	20	98 (-20°C)
OK Autrod 13.51	470	560	min 20	26 (-30°C)

หมายเหตุ QT = Production by Quenching and tempering : QT

TMPC = Production by Thermomechanical rolling with accelerated

OK Autrod 13.51 = Electrode from ESAB Trade mark.

ตารางที่ 2-9 ค่าตัวแปรเชื่อมที่ใช้เชื่อมทดลอง

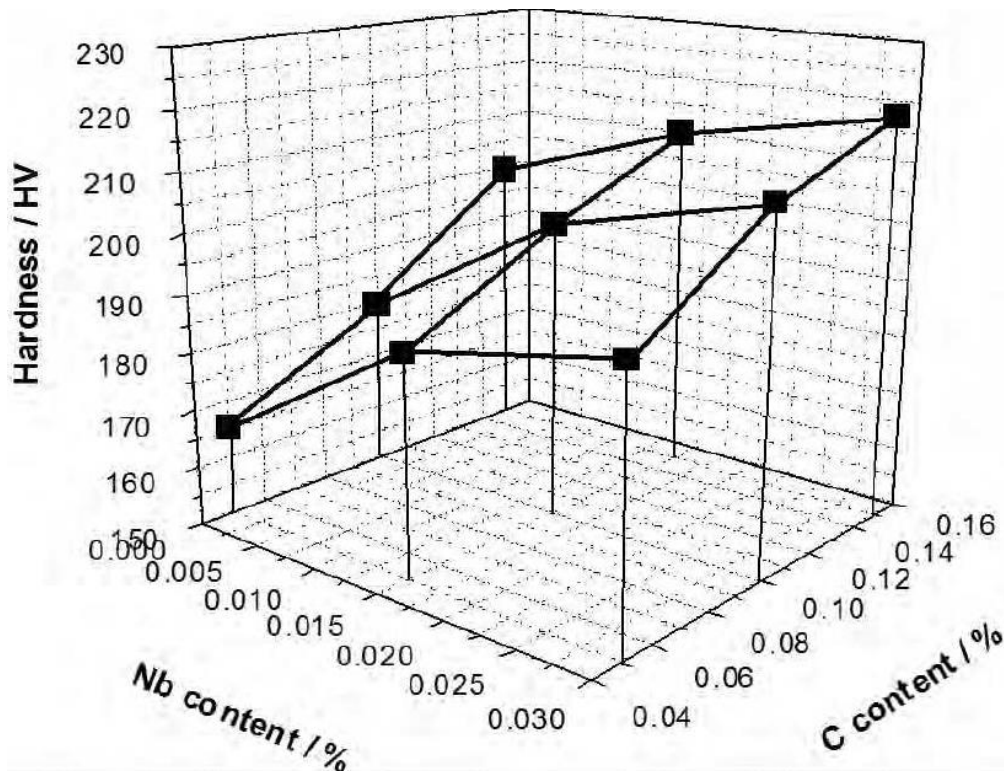
No.	Current (A)	Arcvoltage (V)	Welding speed (mm s ⁻¹)	Arc power (W)	Effective power (W)	Heat input (J mm ⁻¹)
1	230	25.6	4.53	5888	4710	1039
2	268	29.0	4.52	7772	6218	1376
3	258	30.6	3.71	7895	6316	1701

ผลสรุปที่ได้จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

- (1) ค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ของรอยต่อเชื่อมจะสูงกว่า ค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ของลวดเชื่อม 15 % ซึ่งเท่ากับ 67 -68% ของโลหะงาน (Parent metal)
- (2) เนื่องจากเกิดความเค้นในเนื้อเชื่อมสูง อัตราการยืดตัวของชิ้นทดสอบมีค่า 4 – 10 % ซึ่งน้อยกว่า อัตราการยืดตัวของโลหะงาน (Parent metal) 2 – 4 เท่า
- (3) ค่าปริมาณความร้อนเข้า (Heat input) สูงมีผลทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรงแต่อัตราการยืดตัว (Elongation) ที่ลดลงมีผลทำให้ความแข็งแรงรอยต่อเชื่อมสูงขึ้น
- (4) ในการทดสอบเชื่อมเหล็กกล้า HSLA หนา 8 มม. พบว่าถ้าควบคุม ปริมาณความร้อนเข้า (Heat input) ให้อยู่ระหว่าง 1.0 – 1.7 KJ mm⁻¹ จะมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงแตกน้อยและลดความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าวในบริเวณกระพี้ร้อน (HAZ)

2.2.2.1 ความแข็งบริเวณกระตบร้อนจากการเชื่อมของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HAZ Hardness of High Strength Low Alloy Steel : HSLA)

E. El-Kashif¹ จาก Department of Mechanical Design and Production Engineering, Cairo University, Giza, Egypt. และ T. Koseki² จาก Department of Materials Engineering, The University of Tokyo, Hongo-Bunkyo-ku, Japan. ได้ทำการทดลองอิทธิพลของ ธาตุผสมไนโอเบียมที่มีต่อบริเวณกระตบร้อนจากการเชื่อม (Effect of Niobium on HAZ Toughness of HSLA Steels) ใน www.intechopen.com ได้สรุปผลการทดลองว่า ความแข็งบริเวณกระตบร้อนจากการเชื่อม (Heat Accetted Zone : HAZ) ของเหล็กกล้า HSLA ตัวแปรสำคัญขึ้นกับธาตุผสม ไนโอเบียม (Nb) และคาร์บอน (C) การเปลี่ยนแปลงความแข็งจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Miceostructure) จากรูป 2.10 เป็นผลการทดลอง ส่วนผสมธาตุไนโอเบียม (Nb) 0.005 ถึง 0.030 และ คาร์บอน (C) 0.04 ถึง 0.16 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก จะได้ความแข็งบริเวณ HAZ สูงอยู่ระหว่าง 165 (157 HB) ถึง 208 HV (198HB)



รูปที่ 2.10 เปลี่ยนแปลงความแข็งเมื่อส่วนผสมของธาตุไนโอเบียม (Nb) และคาร์บอน (C) เปลี่ยนไป

2.2.2.2 ค่าความเหนียวแรงของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HAZ Toughness of High Strength Low Alloy Steel : HSLA)

Brazilian producer ได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้า Steel ASTM A572 Gr.65 (Green) ด้วยกระบวนการเชื่อม Submerg Arc Welding (SAW) และทดลองหาค่าเฉลี่ยความเหนียวแรงบริเวณกระพร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ด้วย Charpy test ที่ 23 degree Celsius ได้ค่าเฉลี่ย 293 จูล (J)

ผลจากการทดลองของ M. Pirinen และคณะ (2015) ได้ผลสรุปว่าค่า Impact Energy ของเนื้อเชื่อม (Weld metal) จากลวดเชื่อมความแข็งแรงสูงจะสูงกว่า เนื้อโลหะงานบริเวณกระพร้อน (HAZ) ส่วนผสมของธาตุไททาเนียม (Ti) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Impact Energy ของเนื้อเชื่อมสูงขึ้น และปริมาณความร้อนเข้าที่ต่ำ (Low heat input) ให้ค่า Impact Energy สูงกว่าปริมาณความร้อนเข้าที่สูง (High heat input)

2.3 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555 Part 1

1. เป็นมาตรฐานข้อกำหนดรายละเอียดลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง (Filler Metal Used For Surfacing) ที่ทำจากเหล็กกล้าไม่ผสมหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ (Unalloyed and Low Alloyed Steels) โลหะผสมแข็ง (Hard Alloyed) และโลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Metal Alloys) ในรูปแบบลวดเติมเป็นม้วน (Filler Wires) ลวดเติมเป็นแท่งยาว (Filler Rods) ลวดเชื่อมตันเป็นม้วน (Wire Electrode) และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered Electrodes) ไม่รวมโลหะเติมชนิดผงโลหะ (Powder) หรือลวดเติมเส้นแบน (Strip) ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐานลวดเชื่อมเยอรมัน DIN 8555 Part 1 แบ่งกลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered Electrodes) แกนลวดเชื่อมเติม (Core Rods) และแกนลวดเชื่อมม้วน (Core Wires) ตามส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม (All-Weld Metal)

2. ลวดเชื่อมเหล็ก (Filler Metals Rich in Iron) แบ่งออกเป็น Alloy Group 1– Alloy Group 10

2.1 Alloy Group 1

- ใช้เชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าไม่ผสมหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ (Unalloyed and Low Alloyed Steels)
- ไม่มีข้อกำหนดความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอใช้งานเฉพาะของเนื้อเชื่อม (Weld Metal)
- เนื้อเชื่อม (Weld Metal) สามารถกลึงตบแต่งด้วยวิธีการได้ทั้งในสภาวะหลังการเชื่อม (As-Weld) หรือหลังการอบคลายความแข็งด้วยด้วยความร้อน (Tempered Condition)
- เนื้อเชื่อมสามารถชุบแข็งได้
- ตัวอย่างใช้งานเช่น เชื่อมเสริมขนาด (Weld Built-Up) เชื่อมเติมแนวให้เต็ม (Fill-in Welds) การเชื่อมรองพื้น Buttering or Buffer Layers)

2.2 Alloy Group 2

- ความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า Alloy Group 1 เนื่องจากโครงสร้างพื้นแข็งตัวเริ่มต้นของเนื้อเชื่อม (Matrix of Weld Metal) แข็งกว่า และมีคาร์ไบด์ในเนื้อเชื่อมสูงกว่า
- เนื้อเชื่อม (Weld Metal) ไม่สามารถกลึงตบแต่งด้วยวิธีกล
- ตัวอย่างใช้งานเช่นเชื่อมพอกผิวแข็งล้อวิ่ง ล้อตีนตะขาบรรดแทรกเตอร์

2.3 Alloy Group 3

- ต้องการเนื้อเชื่อม (Weld Metal) พอกแข็งใช้งานต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูง เนื้อเชื่อม มีส่วนผสมของธาตุผสมให้คาร์ไบด์คือทังสเตน (W) โครเมียม (Cr) และหลายกรณีเพิ่มธาตุโมลิบดีนัม (Mo) นิกเกิล (Ni) และวานาเดียม (V) รวมทั้งอาจเพิ่มส่วนผสมของธาตุโคบอลต์ (Co)
- โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ออสเทนไนท์ (Austenite) และคาร์ไบด์
- เนื้อเชื่อมสามารถอบอ่อน (Annealed) เพื่อให้สามารถกลึงตบแต่งด้วยเครื่องจักรได้และสามารถชุบแข็ง (Hardening) กลับคืนได้
- เนื้อเชื่อมสามารถคงความแข็งต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส
- ต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) และควบคุมแนวเชื่อมให้เย็นตัวช้าๆ หลังการเชื่อมเพื่อป้องกันการแตกร้าว

2.4 Alloy Group 4

- วิเคราะห์ทางเคมีแล้วให้เนื้อเชื่อมพอกแข็งสมบัติคล้ายเหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steels)
- เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีของธาตุทังสเตน (W) โมลิบดีนัม (Mo)โครเมียม (Cr) และ วานาเดียม (V) หลายกรณีเพิ่มธาตุโคบอลต์ (Co)
- ต้องการกลึงตบแต่งด้วยเครื่องจักรต้องอบอ่อน (Annealed) เนื้อเชื่อมก่อน
- ไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการชุบแข็ง (Hardening) เพราะโดยปกติเนื้อเชื่อมที่ได้จากการเชื่อม Alloyed Group 3 ต้องอบคลายความแข็งหลังการเชื่อม 1 ถึง 2 ครั้งอยู่แล้ว
- ต้องการตบแต่งในสภาวะหลังการเชื่อม (As-Weld) ต้องใช้วิธีการเจียรระไน (Grinding)
- ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง Alloyed Group 3 เพิ่มความแข็งและเพิ่มเสถียรภาพความแข็งให้กับเนื้อเชื่อม
- การให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (Preheating and Postheating) ต้องปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตโดยเคร่งครัด
- ตัวอย่างใช้งานเช่นเชื่อมพอกแข็งเครื่องมือตัดแกนหมุนเครื่องจักรใบมีดเครื่องตัดใบมีดกรรไกร ขอบตัดดอกเจาะ ปลายดอกเจาะ

2.5 Alloy Group 5

- เป็นลวดเชื่อมเติม (Filler Metal) ชนิดเหล็กกล้าโครเมียม (Cr Steel Type) ปริมาณคาร์บอนต่ำพิเศษ (Low C)
- ปริมาณธาตุโครเมียมผสมระหว่าง 5 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณธาตุคาร์บอนต่ำสุดถึง 0.20 เปอร์เซ็นต์
- โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite)
- ใช้เชื่อมพอกแข็งโลหะงานเหล็กกล้าโครงสร้างความแข็งแรงต่ำ
- ส่วนผสมของธาตุคาร์บอน (C) และโครเมียม (Cr) ให้คาร์ไบด์ แข็ง กลิ้งตบแต่งด้วยเครื่องจักรไม่ได้
- การให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (Preheating and Postheating) ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต
- ตัวอย่างใช้งานเช่นเชื่อมเสริมขนาด (Weld Built-Up) ด้านทานการสึกหรอเมื่อมีการ ขูดขีด (Scaling) ในบรรยากาศแก๊สไข่ม้วน (ซิลเฟอร์) ถ้าเนื้อเชื่อมมีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Cr) สูงถึง 12 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่านี้ จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ด้วย
- ตัวอย่างการใช้งานเช่น เชื่อมพอกแข็งชิ้นส่วนของวาล์ว, ตัวกด (Plunger) และชิ้นส่วนของเตาอบ

2.6 Alloy Group 6

- คล้ายผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมพอกแข็ง Alloyed Group 5 แต่มีส่วนผสมปริมาณธาตุคาร์บอนสูงเนื้อเชื่อมจึงความแข็งแรงสูงกว่า 500 HB และมีความต้านทานการเกิดสนิมต่ำกว่า
- เนื้อเชื่อมสามารถชุบแข็งตัวเองในอากาศ (Air Hardening) ตบแต่งวิธีกลโดยการเจียรระไน (Grinding)
- ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheating) ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส
- ตัวอย่างการใช้งานเช่นเชื่อมพอกเครื่องมือตัด ใบมีดเครื่องตัดลูกรีดเหล็กงานรีดเย็น

2.7 Alloy Group 7

- ให้เนื้อเชื่อมคล้ายกับเหล็กกล้าแข็งแมงกานีส (Mn Hard Steel Types) อาจเพิ่มธาตุผสมอื่นๆ
- เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็งเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานที่ต้องการความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work Hardening) เช่นงานกดอัดหรือตีกระแทกด้วยค้อน ความแข็งจะเพิ่มขึ้นจาก 180 ถึง 550 HB
- เนื้อเชื่อมไม่เหมาะสมใช้งานด้านทานการสึกหรอแบบเสียดสีหรือครูดถู (Abrasive Wear)

- เนื้อเชื่อมที่ได้จาก Alloyed Group 7 ไม่เหมาะสมใช้งานในสภาวะปกติ แต่จะเหมาะสมใช้งานที่อุณหภูมิเย็นจัด โดยที่ยังคงความเหนียวและแข็งแรง (Toughness)

- มีข้อดีเหมาะสมใช้งานเชื่อมซ่อมบำรุงหน้าค้อน

- ตัวอย่างการใช้งานอื่นๆ ใช้เชื่อมเสริมขนาด (Weld Built-Up) เป็นบริเวณกว้าง เช่น การสึกหรอของแผ่นกันสึกอาจเชื่อมกันสึกหรือใช้เทคนิคการเชื่อมเป็นแบบ ตาข่าย แผ่นพื้นของลูกโมหิน ปากเครื่องบดแร่ สลักเกลียว

2.8 Alloy Group 8

- มีความเหนียวแข็งแรงสูงกว่า Alloyed Group 7

- สมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work Hardening) ลดลงแต่ความต้านทานการเกิดสนิมสูงเพิ่มขึ้น

- ไม่ต้องใช้กรรมวิธีการทางความร้อนในการเชื่อมและการปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน

- สามารถกลึงตบแต่งด้วยเครื่องจักรกลได้ไม่เป็นแม่เหล็ก

- ตัวอย่างการใช้งาน ส่วนประกอบของปากเครื่องบดที่ใช้แรงไม่มากนักเชื่อมพอกล้อรถไฟ ทางแยกรางและรางรถไฟ ชิ้นส่วนใบกังหันไอน้ำ

2.9 Alloy Group 9

- โลหะเติม (Filler Metal) มีส่วนผสมเทียบเท่าลวดเชื่อม Cr-Ni Austenite ที่ใช้เชื่อมรอยต่อเชื่อม

- ใช้เชื่อมเหล็กกล้าส่วนผสมชนิดเดียวกับลวดเชื่อม ใช้เชื่อมเหล็กกล้า Cr-Steel และใช้เชื่อมเหล็กกล้าโครงสร้างทั่วไป

- ที่สำคัญเนื้อเชื่อมมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนดีพอ

- เนื้อเชื่อมสามารถใช้งานอุณหภูมิเย็นจัดโดยที่ยังคงความเหนียวแข็งแรงสูง

- สามารถกลึงตบแต่งด้วยเครื่องจักรได้

- ตัวอย่างการใช้งาน เชื่อมพอกเสริมผิวต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) หรือเชื่อมพอกเสริมต้านทานความร้อน

2.10 Alloy Group 10

- เนื้อเชื่อมคล้ายกับการเพิ่มธาตุคาร์บอนให้กับเหล็กกล้า Cr-Steel ที่ผิวแต่ไม่หลอมรวมในรูปคาร์ไบด์

- ปริมาณธาตุคาร์บอนสูง 2 ถึง 7 เปอร์เซนต์ ปริมาณโครเมียมสูงถึงสูงสุด 40 เปอร์เซนต์

- เนื้อเชื่อมประกอบด้วยคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex Carbide) กระจายตัวอยู่บนพื้นแข็งตัวเริ่มต้นออสเทนไนต์ (Austenite Matrix)

- ความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุคาร์บอน

- ตบแต่งเนื้อได้โดยวิธีการเจียระไน
- ความไวต่อการแตกร้าวลดลงโดยการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat)
- เนื้อเชื่อมต้านการสึกหรอแบบขัดถูสูง (High Resistance Abrasive Wear)

3. ลวดเชื่อมปริมาณเหล็กต่ำ (Filler Metal Low in Iron) แบ่งออกเป็น Alloy group 20 – Alloy Group 23

3.1 Alloy Group 20

- โลหะเติม (Filler Metal) เป็นโลหะผสม Co-Cr Alloy มีสมบัติต้านทานการสึกหรอ (Wear), ต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion) และต้านทานการทำปฏิกิริยาออกซิเจน (Oxidation) ที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก

- รักษาระดับความแข็ง (Hardness) ที่อุณหภูมิสูงถึง 600 องศาเซลเซียส ได้ดีมาก
- ชนิดที่มีส่วนผสมของปริมาณธาตุคาร์บอนสูง จะใช้งานที่ต้องการความแข็งสูงและความต้านทานการสึกหรอสูงตามที่ต้องการ
- แนะนำให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheating) ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และควบคุมอัตราการเย็นตัวอย่างช้าๆ และไม่จำเป็นต้องใช้กรรมวิธีปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนใดๆ เพิ่มอีก
- ตัวอย่างการใช้งาน ใช้เชื่อมข้อต่อวาล์ว บ่าวาล์วไอเสียเครื่องยนต์ เพล่าปั๊ม และชิ้นส่วนที่เครื่องยนต์ เครื่องจักรกล ที่มีการกัดกร่อนและสึกกร่อนรุนแรง

3.2 Alloy Group 21

- คุณสมบัติของเนื้อเชื่อมขึ้นอยู่กับโลหะ Cr-Carbide หรือ Co-Carbide
- โดยทั่วไปจะอัดโลหะผสมคาร์ไบด์ W-Carbide หรือ Cr-Carbide ในรูปแบบโลหะซินเตอร์เป็นแท่งลวด (Rod) หรืออัดอยู่ในแกนลวดม้วน (Core Wire) หรือ ในแกนเส้นลวดเชื่อม (Cored Rod)
- เนื้อเชื่อมต้านทานการสึกหรอสูง ความเหนียวแข็งแรง (Toughness) ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของผงคาร์ไบด์ ในพื้นโลหะอ่อนที่แข็งตัวเริ่มต้น (Binder Matrix)
- แนะนำให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheating) ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และควบคุมอัตราการเย็นตัวอย่างช้าๆ และไม่จำเป็นต้องใช้กรรมวิธีปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนใดๆ
- ตัวอย่างการใช้งาน ใช้เชื่อมส่วนประกอบของเครื่องมือ เครื่องจักรย่อยหิน ดอกเจาะ และสกรูอัดในอุตสาหกรรมเซรามิค

3.3 Alloy Group 22

- เนื้อโลหะเชื่อมได้จากลวดโลหะเติม (Filler Metal) นิกเกิล โครเมียมโบรอน (Ni-Cr-B Alloys)

- ลดแรงเสียดทาน ด้านทานการสึกหรอสูง และให้ค่าความแข็งดีมาก ที่อุณหภูมิสูง
- ความแข็งที่อุณหภูมิห้องจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มส่วนผสมของธาตุ Ni-Cr-B ความแข็งสูง 30 ถึง 60 HRC

- เนื้อเชื่อมสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส
- ใช้เชื่อมพอกทำเหล็กแม่พิมพ์ร้อนกดอัดโลหะร้อนจนมีสภาพอ่อนตัวหรือจำกัดอุณหภูมิขึ้นรูป

- การให้ความร้อนก่อนกระบวนการเชื่อม (Preheating) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และไม่จำเป็นต้องใช้กรรมวิธีปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนใดๆ เพิ่มอีก

- ตัวอย่างการใช้งานเชื่อมพอกผิวแข็งวาล์ว สกรูเกลียวหนอนเพล่าปั๊มผสมคอนกรีต และเพล่าปั๊มอื่นๆ

3.4 Alloy Group 23

- ลวดโลหะเติม (Filler Metal) นิกเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม (Ni-Cr-Mo Alloys)
- เชื่อมสามารถใช้งานดีมากที่อุณหภูมิสูง
- สามารถเพิ่มความแข็งขึ้นอีกโดยกรรมวิธีการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่เหมาะสม

- ตัวอย่างการใช้งานเชื่อมพอกผิวแข็งเครื่องมืองานร้อน หน้าสัมผัสวาล์วในอุตสาหกรรมเคมี เชื่อมพอกคมตัดใบมีดตัดโลหะงานที่อุณหภูมิสูง

3.5 Alloy Group 30

- ลวดโลหะเติมทองแดง-ดีบุก (Cu-Sn Alloys) ส่วนผสมดีบุก 6 ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ มีส่วนผสมของธาตุฟอสฟอรัส (P) สูงสุดไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์

- เนื้อเชื่อมมีความแข็งอยู่ระหว่าง 60 – 120 HB ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของดีบุก (Sn)
- ลวดเติม (Filler Metal) โลหะผสมกลุ่มนี้แตกต่างจากกลุ่มอื่นๆมีความต้านทานการสึกหรอแบบลื่นไถลระหว่างผิวสูงมากและมีสมบัติการลื่นไหลต่อเนื่องดีมาก และมีความต้านทานต่อการละลายของเกลือและกรดสูงมาก

ตารางที่ 2-10 การแบ่งกลุ่ม (Classification) ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555 Part 1

Alloy group	ชนิดของโลหะลวดเชื่อมเติม (Filler metal) หรือ เนื้อเชื่อม (Weld metal)
1	เหล็กกล้าไม่ผสม (Un-Alloyed Steel) ส่วนผสมธาตุคาร์บอนสูงสุด 4 เปอร์เซ็นต์ หรือเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) ส่วนผสมธาตุคาร์บอนสูงสุด 4 เปอร์เซ็นต์ และธาตุผสมอื่นๆได้แก่ Cr, Mn, Mo, Ni รวมกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
2	เหล็กกล้าไม่ผสม (Un-Alloyed Steel) ส่วนผสมธาตุคาร์บอนมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ หรือเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) ส่วนผสมธาตุคาร์บอนมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ และธาตุผสมอื่นๆได้แก่ Cr, Mn, Mo, Ni รวมกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
3	เหล็กกล้าผสมที่มีสมบัติการใช้งานขึ้นรูปแบบร้อน (Hot Working Steels)
4	เหล็กกล้าผสมที่มีสมบัติการใช้งานรอบสูง (High Speed Steel)
5	เหล็กกล้าที่ผสมธาตุ Cr มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน (C) ต่ำถึง สูงสุดไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์
6	เหล็กกล้าที่ผสมธาตุ Cr มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมของธาตุคาร์บอน (C) >0.2 เปอร์เซ็นต์ ถึง ≤ 2.0 เปอร์เซ็นต์
7	เหล็กกล้าแมงกานีสอสเทนนิติกส่วนผสมของ Mn 11 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์มีธาตุ C > 0.5 เปอร์เซ็นต์ผสมธาตุ Ni ≤ 3 เปอร์เซ็นต์
8	โลหะผสม Cr-Ni-Mn Austenites
9	เหล็กกล้า Cr-Ni Steels ด้านทานการเกิดสนิม ด้านทานกรดและทนความร้อน
10	เหล็กกล้ามีธาตุ C สูง และ Cr เป็นธาตุผสมสูง และธาตุผสมที่ให้คาร์ไบด์อื่น
20	โลหะผสมที่มีโลหะโคบอลต์ (Co) เป็นโลหะพื้น ธาตุผสมสำคัญคือ Cr-W alloyed โดยอาจเพิ่มหรือไม่เพิ่มธาตุผสม Ni และ Mo
21	โลหะพื้นคาร์ไบด์ ในรูปโลหะซินเตอร์, โลหะหล่อหรือแกนโลหะ (Cored)
22	โลหะผสมที่มีโลหะนิกเกิล (Ni) เป็นโลหะพื้นธาตุผสมสำคัญคือ Cr, Cr-B alloyed
23	โลหะผสมที่มีโลหะนิกเกิล (Ni) เป็นโลหะพื้นธาตุผสมสำคัญคือ Mo และผสมหรือไม่ผสมธาตุ Cr
30	โลหะผสมที่มีโลหะทองแดง (Cu) เป็นโลหะพื้นธาตุผสมสำคัญคือดีบุก (Sn)
31	โลหะผสมที่มีโลหะทองแดง (Cu) เป็นโลหะพื้นธาตุผสมสำคัญคืออลูมิเนียม (Al)
32	โลหะผสมที่มีโลหะทองแดง (Cu) เป็นโลหะพื้นธาตุผสมสำคัญคือนิกเกิล (Ni)

ที่มา : DIN 8555 Part 1 November 1983

การกำหนดสัญลักษณ์ลวดเชื่อม (Designation) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1) ชื่อลวดเชื่อมได้แก่ Filler Rod, Electrode, Filler Wire, Wire Electrode, Cored Wire, Cored Wire Electrode

2) Standard Number (DIN 8555)

3) อักษรย่อกำหนดลักษณะพิเศษเฉพาะของลวดเชื่อม อักษรย่อที่ใช้เขียนสัญลักษณ์ลวดเชื่อม ประกอบด้วย สัญลักษณ์กระบวนการเชื่อม (Welding Process)

G = Gas Welding : กระบวนการเชื่อมแก๊ส

E = Manual-Arc Welding : กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าอาร์กด้วยมือ

MF = Metal-Arc Welding Using Cored Wire Electrodes : กระบวนการเชื่อม

TIG = Tungsten Inert Gas Welding : กระบวนการเชื่อมทิก

MIG = Metal Shielding Gas Welding : กระบวนการเชื่อมมิก

SAW = Submerged-Arc Welding : กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์

2. อักษรกำหนดกลุ่มโลหะผสม Alloyed Group

3. อักษรกำหนดกระบวนการผลิตลวดเชื่อม GW = Rolled ,วิธีรีด GO = Cast ,วิธีหล่อ GZ = Drawn, วิธีดึงผ่านแบบ GS = Sintered, วิธีอัดโลหะผง GF = Cored, วิธีบรรจุลงในแกนลวด UM = Covered, วิธีหุ้มฟลักซ์

4. ตัวเลขกำหนดค่าความแข็งของเนื้อเชื่อม (Weld Metal)

ตารางที่ 2-11 ระดับความแข็งของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) (DIN 8555 Part 1 November 1983)

ระดับความแข็ง (Hardness Level)	ช่วงความแข็ง (Hardness Range)
150	125 ถึง 175 HB
200	มากกว่า 175 ถึง 225 HB
250	มากกว่า 225 ถึง 275 HB
300	มากกว่า 275 ถึง 325 HB
350	มากกว่า 325 ถึง 375 HB
400	มากกว่า 375 ถึง 450 HB
40	37 ถึง 42 HRC
45	มากกว่า 42 ถึง 47 HRC
50	มากกว่า 47 ถึง 52 HRC

ตารางที่ 2-11 ระดับความแข็งของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) (DIN 8555 Part 1 November 1983) ต่อ

55	มากกว่า 52 ถึง 57 HRC
60	มากกว่า 57 ถึง 62 HRC
65	มากกว่า 62 ถึง 67 HRC
70	มากกว่า 67 HRC

5. อักษรแสดงสมบัติหรือคุณลักษณะของเนื้อเชื่อม

C= Corrosion Resistance : ต้านทานการกัดกร่อน

G= Resistance to Abrasive Area : ต้านทานการสึกหรอแบบเสียดสี

K= Capable of Work Hardening : แข็งเนื่องจากการใช้งาน โดยถูกค้อนทุบ

ถูกแรงกระแทก เช่นกรณีเหล็กกล้าแข็งแมงกานีส (Mn-Hard Steel)

N= Non-Magnetizable : ไม่เป็นแม่เหล็ก

P= Impact Resistance : ต้านทานแรงกระแทก

R= Rust Resistance : ต้านทานการเกิดสนิม

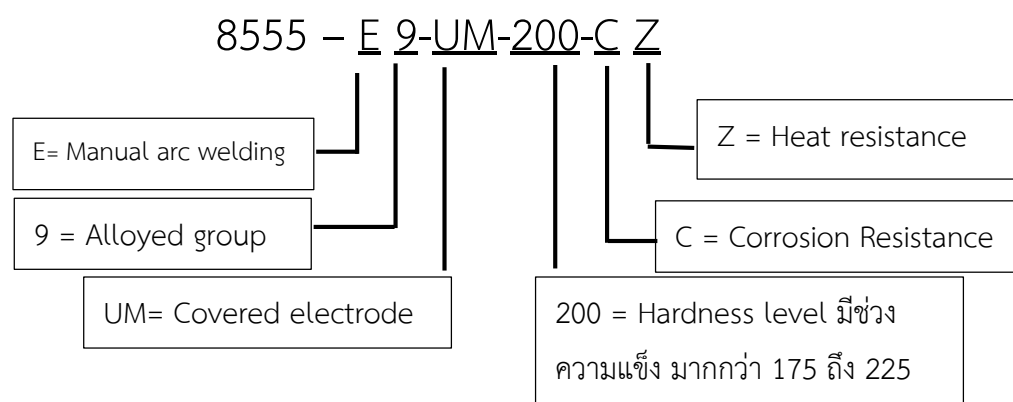
S= Cutting Ability : ความสามารถในการตัดเช่นเหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steel)

T= High Temperature Strength as for High Temperature Tools Steel : เหล็กกล้าทน

ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง

Z= Heat Resistance (Non-Scaling) : เหล็กกล้าทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า

600 องศาเซลเซียส (ไม่เกิดสะเก็ดร้อนที่ผิว)



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างสัญลักษณ์ลวดเชื่อมพอกแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555 Part 1

ที่มา : DIN 8555 Part 1 November 1983

2.4 การพอกผิวแข็ง

ทางเลือกหนึ่งในการป้องกันการสึกหรอของวัสดุ คือการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอให้กับชิ้นงานเฉพาะที่พื้นผิวภายนอกเท่านั้น เนื่องจากการสึกหรอมักจะเริ่มเกิดจากผิวภายนอกทั้งสิ้น กระบวนการที่นิยมใช้ในการป้องกันการสึกหรอของวัสดุ คือการเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Hard Facing by With Coated Electrode Arc Welding) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวเหมือนกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คแบบธรรมดาด้วยอิเล็กโทรดที่มีสารพอกหุ้ม ดังนั้นในการเชื่อมรอยต่างๆ จะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม การตั้งมุมอิเล็กโทรด แรงเคลื่อนขณะอาร์กการเชื่อม และส่วนประกอบของสารพอกหุ้ม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผิวที่จะเชื่อมพอก รวมทั้งการเดินแนวเชื่อมจะใช้วิธีสายหรือไม่สายอิเล็กโทรดก็ได้

2.4.1 ความสามารถรับการเชื่อมได้ของโลหะงาน (Weld Ability of Base Metal)

ตารางที่ 2-12 การควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat) และอุณหภูมิ

ชนิดของเหล็กกล้า	ค่าสมมูลคาร์บอน – Ceq. (%)	อุณหภูมิ Preheatและอุณหภูมิระหว่างชั้นเชื่อม
Carbon Steel Low Steel	สูงสุด 0.3 มากกว่า 0.3 ถึงสูงสุด 0.4 มากกว่า 0.4 ถึงสูงสุด 0.5 มากกว่า 0.5 ถึงสูงสุด 0.6 มากกว่า 0.6 ถึงสูงสุด 0.7 มากกว่า 0.7 ถึงสูงสุด 0.8 มากกว่า 0.8	สูงสุด 100 องศาเซลเซียส ต่ำสุด 100 องศาเซลเซียส ต่ำสุด 150 องศาเซลเซียส ต่ำสุด 200 องศาเซลเซียส ต่ำสุด 250 องศาเซลเซียส ต่ำสุด 300 องศาเซลเซียส ต่ำสุด 350 องศาเซลเซียส
High Cr Steel	ไม่ต้องใช้ (N/A)	ต่ำสุด 400 องศาเซลเซียส
13%Mn Steel	ไม่ต้องใช้ (N/A)	ไม่ต้อง Preheat Interpass Temperature : เย็นตัวเร็ว
Cr – Ni Stainless Steel	ไม่ต้องใช้ (N/A)	ไม่ต้อง Preheat Interpass Temperature : สูงสุด 150 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่มีการหมุนหรือกระแทก จะมีความต้านทานการสึกหรอซึ่งโดยสภาพการใช้งานแล้ว จะมีความสามารถรับการเชื่อมได้ต่ำ (Poor Weld Ability) ถึงแม้ว่าในบางกรณีจะเลือกใช้วัสดุที่สามารถทำการเชื่อมได้ง่ายเช่น เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low-Alloyed Steel) แล้วก็ตามเพราะวัสดุจะเกิดการล้าตัว ชนิดเหล็กกล้าที่ใช้ทำชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่สำคัญของรถแทรกเตอร์ทั่วไป

จำเป็นต้องให้ความร้อนอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่อาจเกิดจากความร้อนสะสมที่ได้รับในขณะที่เชื่อมอุณหภูมิที่ใช้ Preheat จะกำหนดโดยค่าสมมูลคาร์บอน (Carbon Equivalent : Ceq. or CE) ระหว่างเชื่อม (Interpass Temperature) ตามค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสมมูล (Ceq.)

$$Ceq.(%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} \quad (\text{สมการที่ 1-1})$$

ที่มา : Yamamoto (2001)

2.4.2 การเชื่อมรองพื้น (Under-Laying)

การเชื่อมรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกแข็ง จะใช้บ่อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณี ที่การหลอมรวมเข้าด้วยกันระหว่างโลหะงานและลวดเชื่อมพอกแข็งมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวสูง หรือในกรณีที่รอยต่อผิวหน้าร่วมระหว่างโลหะงานและลวดเชื่อมพอกแข็งไม่แข็งแรง ในการเชื่อมพอกแข็งซ่อมผิวหน้างานที่สึกหรอจำเป็นที่จะต้องเชื่อมรองพื้นผิวหน้างานก่อน

ตารางที่ 2-13 การเชื่อมเข้าด้วยกันระหว่างโลหะงาน ลวดเชื่อมรองพื้นและลวดเชื่อมพอกแข็ง

โลหะงาน (Type of Metal)	ลวดเชื่อมรองพื้น (Under-laying Filler-metal)	ลวดเชื่อมพอกแข็ง (Hardfacing Filler-metal)
Carbon Steel Low -alloy Steel	Low-hydrogen Mild Steel Type Low-hardness Pearlitic Type Cr-Ni Stainless Steel Type Low-C : 16 Mn-16 Cr Type	High-hardness Pearlitic Type Martensitic Type High-Mn Austenitic High-Cr Iron Type
High-Mn Steel	Cr-Ni Stainless Steel Type Low-C : 16 Mn-16 Cr Type	13% Mn Type Martensitic Type

ที่มา : Yamamoto (2001)

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ

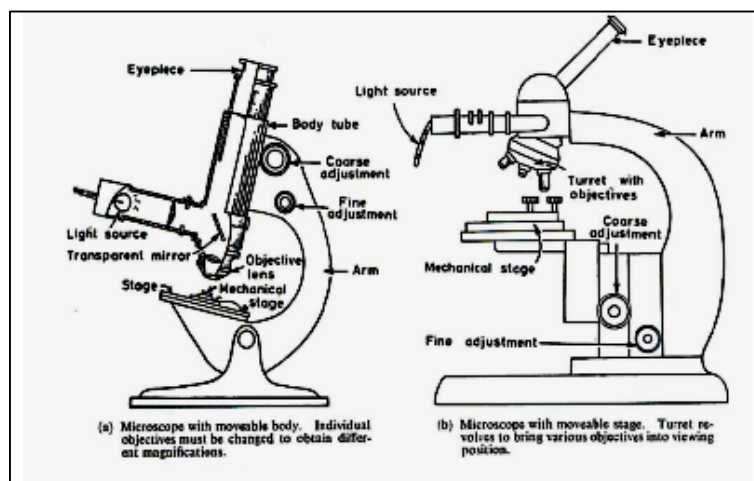
การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะมี 2 แบบ คือ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) โดยการตรวจสอบดังกล่าว จะทำเพื่อตรวจสอบโครงสร้างโลหะ สารมลทิน ความโตของขนาดเกรน หรือวิเคราะห์หาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว ข้อมูลที่ได้จากตรวจสอบโครงสร้างสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตวัสดุ หรือทราบถึงสาเหตุการเสื่อมสภาพของวัสดุได้ โดยการตรวจสอบโครงสร้างนั้นสามารถทำได้หลายลักษณะ ซึ่งจะมีวิธีการและจุดประสงค์ที่แตกต่างกันคือ

2.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า โดยการเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบนั้นไม่ยุ่งยากมาก เพราะจะพิจารณาที่ผิวหน้า เช่น ดูรอยร้าว รอยแตก หน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด รูพรุนภายในของโลหะ การแยกชั้นของผลึก และปริมาณธาตุผสมในโลหะ เป็นต้น ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างดังกล่าวนี้มีวิธีการตรวจสอบหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และจุดประสงค์ของการตรวจสอบ โดยมีรายละเอียดในแต่ละวิธีการดังนี้

2.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงในการตรวจสอบ โดยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (Optical microscope) จากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า ซึ่ง กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงสำหรับงานทางโลหะวิทยาอาจมีหลายลักษณะ เช่น ชนิดที่ตัวโครงสร้างของกล้องสามารถเคลื่อนย้ายได้ หรือกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ฐานแท่นรองรับชิ้นงานตัวอย่างสามารถเลื่อนไปมาได้ รูปที่ 2.9 แต่ถ้าเป็นกล้องที่ให้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่า โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้กับงานทางโลหะวิทยามีอยู่ 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope)



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

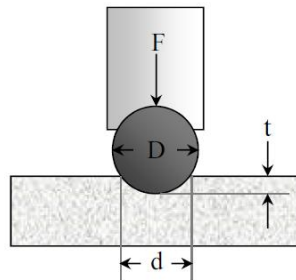
ที่มา : [http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Lab_3_Microstructural_Examination_](http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Lab_3_Microstructural_Examination_using_Reflective_Light_Optical_Microscope.pdf)
using_Reflective_Light_Optical_Microscope.pdf

2.6 การตรวจสอบความแข็ง (Hardness test)

ค่าความแข็งของวัสดุถือเป็นสมบัติเชิงกลพื้นฐานที่สามารถแสดงสมบัติโดยรวมของวัสดุนั้นได้ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความเหนียว การทนต่อแรงเสียดสี และการสึกหรอ เป็นต้น โดยการวัดค่าความแข็งในงานโลหะนั้นมี 3 วิธี คือ การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) และการทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) ปัจจุบันเครื่องวัดความแข็งส่วนใหญ่จะเป็นระบบอัตโนมัติ ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ง่ายและมีความแม่นยำสูง โดยผู้ทดลองต้องเลือกวิธีทดสอบให้เหมาะสมกับงานที่จะทดสอบ

2.6.1 การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด (F) รูปที่ 2.10 โดยคงค่าแรงกดไว้ประมาณ 10 ถึง 15 วินาที สำหรับวัสดุประเภทเหล็กกล้าหรือเหล็กกล้าผสม แต่โลหะที่มีความอ่อนกว่าเหล็ก เช่น อะลูมิเนียม หรือทองเหลือง จะต้องเพิ่มเวลาในการใช้แรงกดประมาณ 30 วินาที ซึ่งทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก (t) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย (d) ที่ได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉากกันสองค่า แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2.13 ลักษณะการกดลูกบอลในการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

ที่มา : http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/CV/Lab_5_Hardness.pdf

โดยเครื่องมือวัดต้องมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตรซึ่งลูกบอลที่ใช้เป็นหัวกดมีขนาด 10 มิลลิเมตรและสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 กิโลกรัมสูงสุดถึง 3,000 กิโลกรัม หน่วยความแข็งของการทดสอบแบบ บริเนลล์ คือ BHN หรือ HB ซึ่งค่าความแข็งจะคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกด ดังสมการที่ 1-2

$$\text{ความแข็งร็อกเวลล์ซี} = \frac{F}{A} - \frac{0.102F}{0.5\pi D[-\sqrt{(D^2-d^2)}]} \text{ HRC (สมการที่ 1-2)}$$

ข้อดี การวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์จะให้รอยกดที่กว้างและลึกเพราะหัวกดมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างทางจุลภาคจึงมีผลน้อยต่อค่าการทดสอบ (ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุที่ทดสอบ)

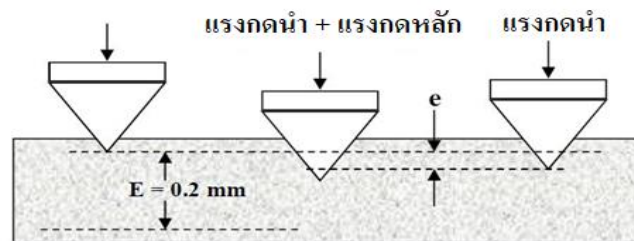
ข้อเสีย ค่าความแข็งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดจึงอาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ทำการทดสอบได้รวมถึงรอยกดมีขนาดใหญ่จึงไม่สามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานที่บางมากๆ หรือขนาดเล็กได้

หมายเหตุ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (d) ควรมีค่าอยู่ในช่วง $0.2D - 0.7D$ หรือประมาณ 2 - 7 มิลลิเมตร สำหรับลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพราะหารอยกดเล็กเกินไปจะทำให้ขอบของรอยกดไม่คมชัดส่งผลให้วัดความยาวได้ยากและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการอ่านค่าความยาวจะมากขึ้นและในทางตรงกันข้าม หากรอยกดมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการกดตัวของเนื้อชิ้นงานด้านข้างมาก

2.6.2 การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

การวัดความลึกของหัวกดที่ทำจากเพชรทรงกรวยหรือลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6-12.7 มิลลิเมตร และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (Minor load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วยการทดสอบจาก การใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 แบบ คือ ร็อกเวลล์-ซี (Rockwell C), ร็อกเวลล์-บี (Rockwell B) และร็อกเวลล์-เอ (Rockwell A)

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์-ซี ใช้หัวกดเพชรทรงกรวยมีมุมปลาย 120 องศา ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบจากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) อีก 140 kgf โดยค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่งและคงเหลือเพียงแรงกดนำ ซึ่งปลายหัวกดจะอยู่นิ่งตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะการกดลูกบอลในการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์

ที่มา : http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/CV/Lab_5_Hardness.pdf

ในการคำนวณเป็นค่าความแข็งจากรูปที่ 2.14 จะให้ค่า E คือ ค่าคงที่ (ซึ่งแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ส่วนละ 0.002 มิลลิเมตร) และให้ค่า e คือ ความลึกที่เกิดจากการเสียรูปอย่างถาวรจากการกด ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าความแข็งแบบร็อกเวลล์-ซี ได้ดังสมการที่ 1-3 สำหรับวัสดุที่ถูกกดเข้าไปลึกมากกว่า

0.2 มิลลิเมตรหรือวัสดุอ่อนจะไม่สามารถทำการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์-ซีได้ ในกรณีนี้ควรใช้การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์-บี หรือร็อกเวลล์-เอ แทน

$$\text{ความแข็งร็อกเวลล์ซี} = 100 - \frac{e}{0.002} HRC \quad (\text{สมการที่ 1-3})$$

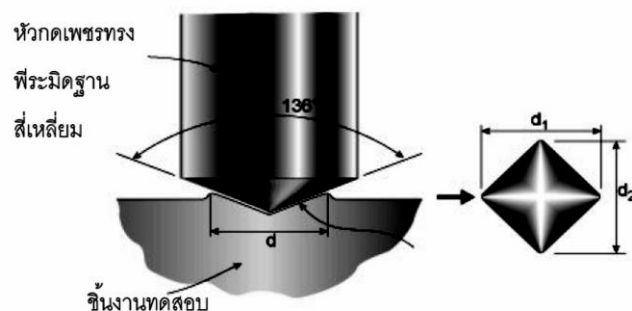
การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์-บี มีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์-ซี แต่มีหัวกดทำจากลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว หรือ 1.59 มิลลิเมตร ใช้แรงกดหลัก 90 kgf ซึ่งเหมาะกับการทดสอบวัสดุที่อ่อนเพราะมีการยืดช่วงของ e เป็น 0.26 มิลลิเมตร และแบ่งเป็น 130 ส่วน ส่วนละ 0.002 มิลลิเมตร ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าความแข็งแบบร็อกเวลล์-บี ได้ดังสมการที่ 1-4

$$\text{ความแข็งร็อกเวลล์บี} = 130 - \frac{e}{0.002} HRB \quad (\text{สมการที่ 1-4})$$

ซึ่งในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งเพราะที่เครื่องวัดจะมีเข็มชี้บอกค่าความแข็งอยู่แล้วหรือบางเครื่องเป็นระบบอัตโนมัติซึ่งแสดงค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้เลย

2.6.3 การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

การวัดความลึกของหัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศา ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสกดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด (F) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1- 120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงานการเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงาน ใช้เวลาประมาณ 15 วินาที และคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดให้นานเพิ่มขึ้นโดยเมื่อหัวกดถูกยกขึ้น จะทำการวัดขนาดรอยกดที่เกิดขึ้นจากการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็ง เพราะโดยทั่วไปเครื่องวัดจะสามารถแสดงค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้เลย หน่วยความแข็งของการทดสอบแบบบริเนลล์ คือ VHN หรือ HV



รูปที่ 2.15 ลักษณะการกดลูกบอลในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

ที่มา : http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/CV/Lab_5_Hardness.pdf

อนึ่ง ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความแข็ง ดังสมการที่ 1-5

$$\text{ความแข็งวิกเกอร์ส} = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวแรงกด}} = \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} = \frac{0.189F}{d^2} \quad (\text{สมการที่ 1-5})$$

ข้อดี หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำรอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูงสามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40x ได้ต้องไม่มีคราบน้ำมันรอยขีดข่วนหรือฟิล์มออกไซด์อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งจากวิธีการทดสอบที่ต่างกัน สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ โดยอ้างอิงจากตารางเทียบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E140-07 ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานผ่านการทดสอบจากเครื่องมือทดสอบที่ต่างกันได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-14

ตารางที่ 2-14 เปรียบเทียบค่าความแข็งของวิธีการทดสอบต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM E140-07

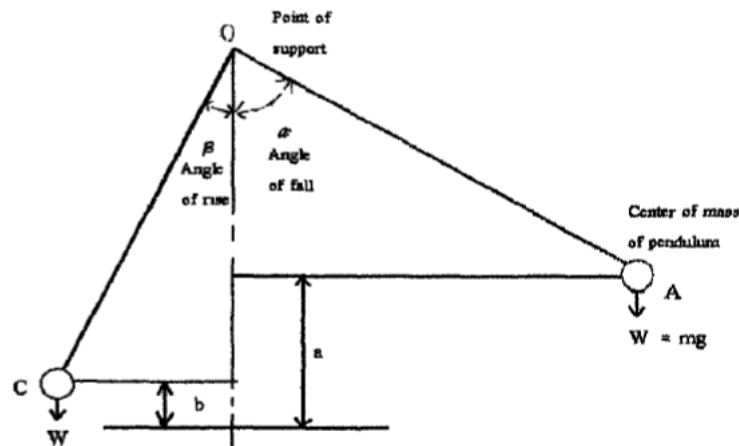
Rockwell C, 150 kgf (HRC)	Rockwell A, 60 kgf (HRA)	Rockwell B, 100 kgf (HRB)	Brinell 10-mm Standard Ball 3000-kgf (HB)	Brinell 10-mm Carbide Ball 3000-kgf (HB)	Vickers Hardness Number (HV)
68	85.6			...	940
67	85.0			...	900
66	84.5			...	865
65	83.9			(739)	832
64	83.4			(722)	800
63	82.8			(705)	772
62	82.3			(688)	746
61	81.8			(670)	720
60	81.2			(654)	697
59	80.7			634	674
58	80.1			615	653
57	79.6			595	633
56	79.0			577	613
55	78.5			560	595
54	78.0			543	577
53	77.4			525	560
52	76.8		(500)	512	544
51	76.3		(487)	496	528
50	75.9		(475)	481	513
49	75.2		(464)	469	498
48	74.7		451	455	484
47	74.1		442	443	471
46	73.6		432	432	458
45	73.1		421	421	446
44	72.5		409	409	434
43	72.0		400	400	423
42	71.5		390	390	412
41	70.9		381	381	402
40	70.4		371	371	392
39	69.9		362	362	382
38	69.4		353	353	372
37	68.9		344	344	363
36	68.4		336	336	354
35	67.9		327	327	345
34	67.4		319	319	336
33	66.8		311	311	327
32	66.3		301	301	318
31	65.8		294	294	310
30	65.3		286	286	302
29	64.8		279	279	294
28	64.3		271	271	286
27	63.8		264	264	279
26	63.3		258	258	272
25	62.8		253	253	266
24	62.4		247	247	260
23	62.0		243	243	254
22	61.5		237	237	248
21	61.0		231	231	243

2.7 การทดสอบด้วยแรงกระแทก (Impact test) [9]

การทดสอบแรงกระแทกเพื่อใช้ในการหาความทนทานในการแตกเปราะ และค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของโลหะ ซึ่งเป็นตัวแสดงเกี่ยวข้องกับความเหนียวโลหะชนิดต่างๆในสถานะอุณหภูมิใช้งานต่างๆกันและสามารถนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะต่างๆ เพื่อช่วยให้โลหะให้เหมาะสมกับงานด้านต่างๆ วัสดุหรือชิ้นงานเครื่องจักรที่รับแรงกระแทก อันเนื่องมาจากเคลื่อนที่ด้วยความเร็วพลังงาน จลน์กระทบกับวัสดุของเครื่องจักรนั้นไม่เพียงพอทำให้เกิดความเค้นขึ้น แต่ยังทำให้เปลี่ยนแปลง พลังงานอีกด้วยคือจะเกิดการถ่ายเทดกกลืน และแพร่กระจายพลังงานไปยังวัสดุ หรือชิ้นส่วนของ เครื่องจักรกลนั้นด้วย พลังงานกระแทกอาจดูดกลืนผ่านชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลได้หลายลักษณะ เช่น ในช่วงของการแปรรูปที่สามารถคืนรูปได้ในช่วงการแปรรูปถาวรในช่วงผลกระทบและผลของความเสียด ทานของเครื่องทดสอบเองอีกด้วย ในการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกลที่ได้รับแรงกระแทกนั้น จะพิจารณาถึงความสามารถ ของวัสดุในการที่ดูดกลืน หรืออมพลังงานกระแทกได้มากน้อยเท่าไร ถ้าวัสดุสามารถเก็บสะสม

พลังงานต่อหน่วยปริมาตร ตั้งแต่เริ่มต้นได้รับแรงกระแทกจนกระทั่งแตกหักไว้ได้สูงก็หมายความว่า วัสดุนั้นมีความเหนียวสูง (Toughness) หรือมีความแข็งแรงต่อการกระแทกสูง (Impact Strength) นั่นเอง โดยทั่วไปวัสดุที่มีความเหนียวแน่นสูงจะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทั้งพิคัดความเย็นหยุ่นและความเหนียวสูง แต่ที่น่าสนใจ สำหรับวัสดุหรือโลหะที่ถูกแรงกระแทกนั้น มักจะใช้ค่าพิคัดความเป็นสัดส่วน (Proportional Limit) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) สูงขึ้นกว่าเมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำๆ และนอกจากนั้นโลหะไม่อาจรับโครงสร้างภายในเพื่อกระจายความเค้นออกให้ทั่วเนื้อโลหะได้ง่าย ฉะนั้นผลของความเค้นอาจรวมอยู่ที่จุดๆเดียวในเนื้อโลหะหักที่จุดนั้นเสียก่อน ลักษณะเช่นนี้เป็นลักษณะที่เปราะ ในการวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระแทกนั้นได้นำเครื่องมือ และเทคนิคต่างๆ มาใช้อย่างมากเพื่อต้องการศึกษารายละเอียดของการแปรรูป และการแตกของวัสดุนั้นเนื่องมาจากผลการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ เช่นส่วนผสมอุณหภูมิขนาดรูปร่างของชิ้นทดสอบ และความเร็ว ของแรงกระแทก แต่จุดประสงค์ของการทดสอบไทเทเนี่ยมนั้น ก็ทำเพื่อศึกษาความเหนียวหรือเปราะ ของโลหะเมื่อถูกนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือที่อุณหภูมิสูง ในการทดสอบโดยแรงกระแทกส่วนใหญ่ก็เพื่อหาความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของ วัสดุภายใต้การกระแทกซึ่งทำได้โดยใช้ พลังงานกระแทกขึ้นทดสอบจนแตกหักตามมาตรฐาน กำหนดการทดสอบกระแทกไทเทเนี่ยมนั้นต้องใช้ค้อนเหวี่ยง (Pendulum Hammer) ดีขึ้นทดสอบเพียง ครั้งเดียวให้แตกหักภายใต้ภาวะกำหนด โดยขึ้นทดสอบจะต้องผ่านการตกแต่งผิวด้านเครื่องจักรให้ได้ รูปร่าง และมีร่องบากตามมาตรฐาน

สำหรับการทดสอบด้วนแรงกระทำวัสดุนั้น สำหรับการทดสอบกระแทกนั้น มักจะนิยมทดสอบโดยวิธี ค้อนเหวี่ยงกระแทก (Pendulum Test) สามารถเลือกใช้พลังงานกระแทกได้ 2 ขนาด คือ 15 Kgm และ 30 Kgm ซึ่งมีหลักการทดสอบดังรูป



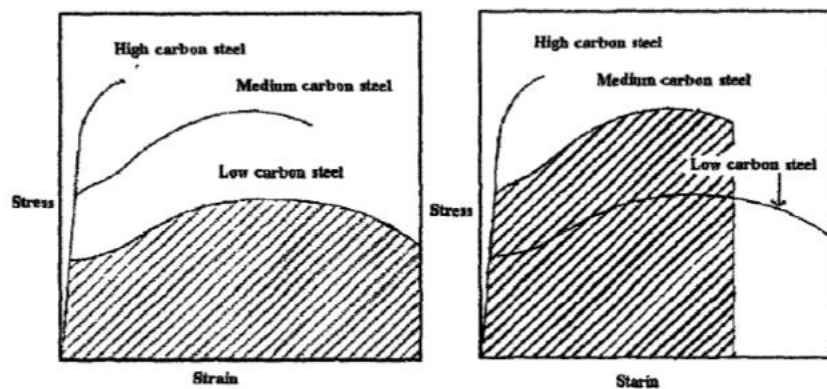
รูปที่ 2.16 หลักการทดสอบโดยการกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง

จากรูปที่ 2.16 สังเกตเห็นว่าหลักการเหมือนลูกตุ้มนาฬิกาซึ่ง จะสามารถคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้กระแทกขึ้นทดสอบได้จากผลต่างของระดับสูงต่ำของลูกตุ้มเมื่อเริ่มแกว่งและหลังจากที่ แกว่งไปกระแทกขึ้นทดสอบให้หักแล้ว ในการทดสอบโดยวิธีค้อนเหวี่ยงกระแทกนี้ จะเห็นว่า พลังงานศักย์ของค้อนเหวี่ยงก่อนปล่อย จากตำแหน่ง A หรือ mga หลังจากปล่อยพลังงานศักย์ลดลง และพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุด ก่อนกระแทกที่ตำแหน่ง B ปริมาณพลังงานที่จะทำให้ขึ้นทดสอบแตกหักจะแพร่กระจายไป แต่ เนื่องจากลูกตุ้มหรือค้อนยังคงเหวี่ยงต่อไปอีกนั่นก็คือ พลังงานจลน์ที่ยังคงเหลืออยู่ภายหลังกะแทก โดยพลังงานจลน์จะเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ และการทดสอบแรงกระแทกจะเสร็จสิ้น เมื่อค้อนเหวี่ยง มาถึงจุดไกลที่สุด คือตำแหน่ง C ซึ่งพลังงานศักย์มีค่าเป็น $mg b$ ดังนั้นผลต่างระหว่างศักย์ ที่ตำแหน่ง A และ C คือ พลังงานกระแทกที่ทำให้ขึ้นทดสอบแตกหัก โดยคำนวณได้ดังนี้

พลังงานก่อนกระแทก	$= mga = mgr (1 - \cos \alpha)$
พลังงานหลังกระแทก	$= mg b = mgr (1 - \cos \beta)$
พลังงานกระแทกขึ้นทดสอบ	$= mg (a - b) = mgr (\cos \beta - \cos \alpha)$

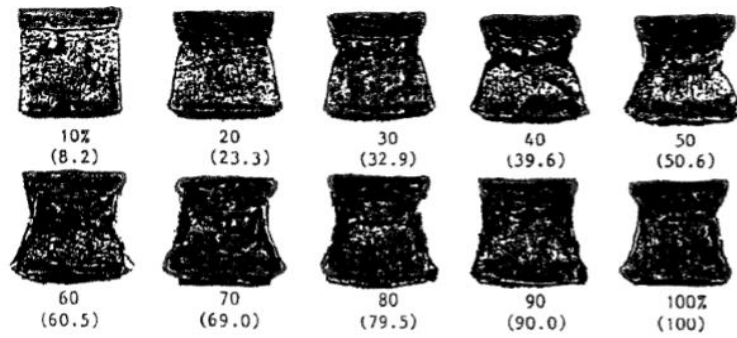
ในเมื่อ m = กำหนดให้มีหน่วยกิโลกรัม (Kg) $g = 9.806 \text{ m/s}^2$ β = มุมยกขึ้นภายหลัง กระแทกเป็นองศา r = รัศมีความยาวจากจุดศูนย์กลางหมุนถึงตำแหน่งตี สหุรีพลังงานกระแทก ขึ้นงานทดสอบจะมีค่าเป็นจุด สูงในเครื่องทดสอบจะอ่านค่าพลังงาน ได้โดยตรงจากสเกล ที่ถูกแบ่งเป็นหน่วยพลังงานไว้เป็นเป็นจุด ซึ่งการอ่านค่าพลังงานจะอ่านได้โดยตรง ในหน้าปัดของ เครื่องทดสอบโดยไม่ต้องคำนวณ

ความเหนียวแน่น หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการเก็บสะสมพลังงานต่อหน่วยปริมาตร ตั้งแต่เริ่มต้นได้รับ แรงจนกระทั่งเกิดการแตกหัก และความเหนียวแน่นยังสัมพันธ์กับความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) คือวัสดุที่มีความเหนียวแน่นสูงก็จะมี ความแข็งแรงต่อการกระแทก สูงและวัสดุที่มีความเหนียวแน่นต่ำก็จะมี ความแข็งแรงต่อการกระแทกต่ำ เมื่อมองถึงกราฟ ความเค้น-ความเครียดแล้ว ความเหนียวแน่นของวัสดุคือ พื้นที่ภายใต้กราฟ ทั้งหมดตลอดจนถึงช่วง จนแตกหักดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความเหนียวแน่นในความสัมพันธ์กับกราฟความเค้น-ความเค้น

จากรูปเห็นได้ว่า วัสดุที่มีความเหนียวแน่นสูง จะต้องมีความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวสูง โลหะที่มีความเหนียวแน่นมากจะยืดตัวได้มากเมื่อถูกแรงกระทำ นี่ขึ้นคือโลหะนี้สามารถ ถูกขึ้นรูปให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายกว่าโลหะที่มีความเหนียวแน่นน้อย การหาเปอร์เซ็นต์การแตกหัก แบบเปราะ $B (\%)$ สามารถได้จากการสังเกตดูผิวของรอยแตกหัก ของชิ้นงานโดยสามารถคำนวณได้จากสูตร $B (\%) = \frac{D}{A} \times 100$ A = พ.ท.ทั้งหมดของรอยแตกหัก D = พ.ท.ของรอยแตกแบบเปราะ ค่าเปอร์เซ็นต์ของรอยแตกเปราะควรจะน้อยที่สุดใกล้เคียง 5% อีกวิธีหนึ่งเปอร์เซ็นต์รอยแตกหัก แบบเปราะสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบได้กับรอยแตกหักหลายชนิดควรจะมีช่วงความแตกต่าง ของค่า รอยแตกหักแบบเปราะประมาณ 10% ดังรูปที่ 2.18



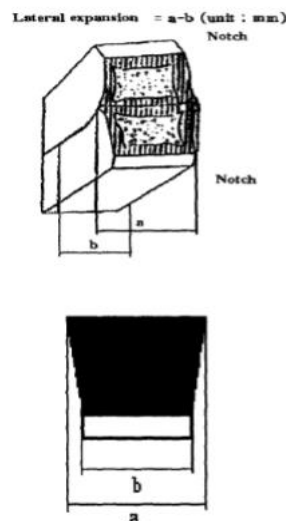
รูปที่ 2.18 ผิวยรอยแตกหักแบบต่างๆ

ถ้ารอยแตกหักของชิ้นทดสอบไม่แสดงไม่แสดงลักษณะการเปลี่ยนรูปร่าง ในการคำนวณ เปอร์เซนต์รอยแตกให้ใช้พื้นที่ภาคตัดขวางตรงตำแหน่งรอยบากทั้งหมดเป็นค่าแสดงพื้นที่ของ รอยแตกไว้



รูปที่ 2.19 ลักษณะรอยแตกแบบต่างๆ

สำหรับการวัดค่าการขยายตัวขวาง (Lateral Expansion) นำเอาชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบ แล้วมาทำการวัดขนาด a และ b ดังรูป ค่าผลต่างที่ได้จากการแสดงค่าของการขยายตัวตามขวาง ดังรูปที่ 2-20 การขยายตัวตามขวาง a-b (หน่วยเป็น : มม)



รูปที่ 2.20 การวัดค่าการขยายตัวแนวขวางจากรอยแตกหัก

2.8 การสึกกร่อนแบบเชาะร่อง (Gouging Abrasion)

การสึกกร่อนแบบเชาะร่อง (Gouging Abrasion) เป็นการสึกกร่อนแบบเสียดสีซึ่งเกิดในสภาวะที่มีความเค้นสูงมาก และมีแรงปะทะเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยซึ่งผิวที่เกิดสึกกร่อนจะมีลักษณะเป็นร่องลึกขนาดใหญ่ โดยการสึกกร่อนแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่มีความแข็งสูงเข้ามาตัดเฉือนที่ผิวของชิ้นงานด้วยแรงที่สูงพอ จนทำให้ผิวของชิ้นงานถูกขูดเป็นร่อง และมีเศษเนื้อของวัสดุที่เกิดการเสียดสีหลุดออกมาทำให้ที่บริเวณผิวของชิ้นงานเกิดร่องเป็นจำนวนมากตัวอย่างการสึกกร่อนแบบเชาะร่องที่มีความเร็วในการปะทะค่อนข้างต่ำ ได้แก่ผิวของชิ้นส่วนบริเวณหัวตักของเครื่องขุดตัก (Digger) เมื่อขุดดินก้อนหินเป็นต้นสำหรับการต้านทานการสึกกร่อนแบบเชาะร่อง ผิวโลหะจะต้องมีความแข็งสูงมากเพื่อลดแรงเฉือนจากเศษวัสดุที่เข้ามาเสียดสีนอกจากนี้ โลหะที่ใช้ควรมีความเหนียวสูง เพื่อลดการแตกร้าวที่เกิดจากแรงปะทะชั้นรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นด้วย

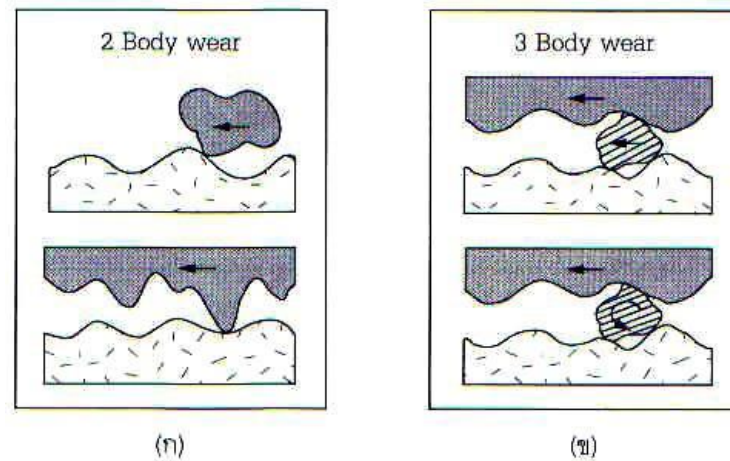
2.8.1 การสึกกร่อนแบบเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นสูง (High Stress Abrasion)

การสึกกร่อนแบบเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นสูง (High Stress Abrasion) เป็นการสึกกร่อนที่เกิดจากพื้นผิวสองพื้นผิวมาเสียดสีกันในสภาวะที่มีความเค้นสูงจนหลุดออกมาเป็นเศษเนื้อวัสดุและทำให้เกิดการสึกกร่อนต่อไปซึ่งการสึกกร่อนแบบเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นสูงนี้จะรวมไปถึงกรณีที่พื้นผิวมีความเค้น ณ ระหว่างจุดสัมผัสสูงด้วยนอกจากนี้ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรที่มีเศษผงสิ่งแปลกปลอมอยู่ระหว่างพื้นผิว ก็สามารถทำให้เกิดการสึกกร่อนแบบเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นสูงได้เหมือนกัน เช่นการสึกกร่อนของโซ่ที่ใช้ในระบบสายพานลำเลียงรอกดึงโซ่หรือระบบฟันเฟืองเป็นต้น

2.8.2 การสึกกร่อนแบบเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นต่ำหรือการสึกกร่อน (Low Stress Abrasion)

การสึกกร่อนแบบเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นต่ำหรือการสึกกร่อน (Low Stress Abrasion) เป็นการสึกกร่อนแบบเสียดสีในสภาวะที่มีความเค้นต่ำหมายถึงการสึกกร่อนที่ความเค้น ณ บริเวณจุดสัมผัสมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงของเศษวัสดุที่เข้ามาเสียดสีและก่อให้เกิดการสึกกร่อนโดยการสึกกร่อนลักษณะนี้จะเกิดในสภาวะที่เศษวัสดุแข็งสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระซึ่งอาจปะปนอยู่ในอากาศหรือของเหลวที่กำลังเข้ามาปะทะบริเวณผิวของชิ้นงาน ทำให้เกิดการชนระหว่างเศษวัสดุแข็งและผิวชิ้นงานในสภาวะที่มีความเค้นต่ำขึ้นเช่นในท่อลำเลียงทราย หรือสารละลายบดและอุปกรณ์ฟันทรายเป็นต้น ซึ่งรู้จักกันว่าเป็นการสึกกร่อนแบบกร่อนโดยทั่วไปแรงในการปะทะจะต่ำเพราะเศษวัสดุแข็งมีขนาดเล็กมาก ยกเว้นกรณีที่เศษวัสดุแข็งไปเกาะตัวกับสิ่งปลอมปนที่อยู่ในอากาศ หรือของเหลวก็จะทำให้มีน้ำหนักมากขึ้นจึงอาจทำให้แรงในการปะทะนั้นสูงขึ้นได้ ดังนั้นควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่าความแข็งสูง เพื่อด้านทานแรงตัดเฉือนสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน ควรเลือกใช้วัสดุที่ทนต่อการสึกกร่อน และการกัดกร่อนได้ด้วยการแบ่งประเภทของการสึกกร่อนอีกรูปแบบหนึ่งคือการแบ่งตามจำนวนเนื้อผิวสัมผัสได้แก่ การสึกกร่อนแบบสองเนื้อ (2 Body Wear Condition)

และการสึกหรอแบบสามเนื้อ (3 Body Wear Condition) การสึกหรอแบบสองเนื้อหมายถึงกรณีที่เศษวัสดุแข็งสัมผัสกับพื้นผิวเพียงหนึ่งพื้นผิวส่วนการสึกหรอชนิดสามเนื้อหมายถึงกรณีที่เศษวัสดุแข็งอยู่ระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่เลื่อนผ่านกันดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 (ก) การสึกหรอแบบสองเนื้อ (2 Body Wear)
และ(ข) การสึกหรอแบบสามเนื้อ (3 Body Wear)

2.8.3 ลักษณะความเป็นตัวขัดสี (Abrasive) ของเศษวัสดุแข็ง

ความเป็น Abrasive ของเศษวัสดุแข็งเป็นระดับความสามารถที่จะทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรเช่น

2.8.3.1 ความแข็ง

2.8.3.2 ความแข็งแรงหรือความทนต่อการบด

2.8.3.3 สมบัติทางกลของเศษวัสดุแข็งในการปะทะเช่นความเหนียว

2.8.3.4 รูปร่างและขนาดของเศษวัสดุแข็ง

2.8.3.5 ตัวกลางของไหลเช่นเศษวัสดุแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลวหรือไม่

ในการทดสอบการสึกหรอนั้นเศษวัสดุที่มีความแข็งสูง จะทำให้เกิดการสึกหรอบนผิวโลหะที่เร็วกว่า ในขณะที่เศษวัสดุที่มีความแข็งต่ำจะทำให้อัตราการสึกหรอลดลงแต่ กรณีที่เปรียบเทียบกันระหว่างโลหะกลุ่มเหล็ก จะมีอัตราการสึกหรอของผิวโลหะไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งความแข็งของเศษวัสดุมีผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ถ้าความแข็งของเศษวัสดุเปลี่ยน ก็จะทำให้อัตราการสึกหรอเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วยความเป็น Abrasive ของเศษวัสดุแข็งจะขึ้นกับรูปร่าง และความแข็งแรงแบบกด ซึ่งถ้ามีรูปร่างที่เป็นมุมเหลี่ยมและความแข็งแรงแบบกดสูงก็จะได้ไม่แตกง่าย และมีอัตราการสึกหรอของพื้นผิวที่ถูกเศษวัสดุแข็งเสียดสีสูงนอกจากนี้เมื่อขนาดของเศษวัสดุแข็งเล็กลง อัตราการสึกหรอก็จะลดลงด้วยเนื่องจากเศษวัสดุแข็งที่มีขนาดเล็กจะไหลตัวได้ง่ายกว่าเศษวัสดุแข็งที่มีขนาดใหญ่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสที่บริเวณผิวของชิ้นงานมีค่าต่ำกว่าอีก

ทั้งยังต้องพิจารณาถึงสภาวะแวดล้อมของการสึกหรอสมบัติ และสภาพผิวของชิ้นงานประกอบด้วย สำหรับการเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอจะต้องทำที่ภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่งถ้าหากมีสภาวะต่างกัน เช่น ขนาดของเศษวัสดุแข็ง แรงกด ความเร็วรอบ ฯลฯ ก็จะสามารถนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันได้เลย

2.8.4 ประโยชน์ของการทดสอบการสึกหรอ

2.8.4.1 เพื่อจัดลำดับของวัสดุและสารหล่อลื่นตามประสิทธิภาพการใช้งานในสภาวะการทดสอบที่มีความเที่ยงตรง ทำซ้ำได้ และมีผลเป็นที่ยอมรับ จากนั้นจึงเลือกได้วัสดุหรือสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปทดสอบในการใช้งานจริงอีกอีกครั้ง

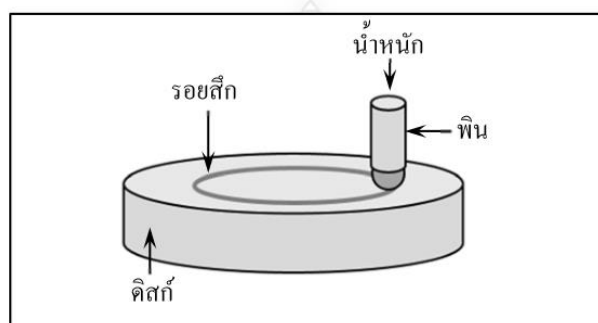
2.8.4.2 สามารถนำความเสียหายจากการสึกหรอที่เกิดขึ้นขณะทดสอบมาศึกษาเพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจถึงกลไกของการสึกหรอ รวมทั้งควรมีการทดสอบและเก็บข้อมูลในแต่ละช่วงเวลา เพื่อสังเกตกลไกการสึกหรออย่างละเอียดในห้องทดลอง ในกรณีที่ไม่สามารถทำการทดลองในสภาวะการทำงานจริงได้สิ่งที่ต้องระวังและปัญหาที่เกิดขึ้นในการแปลผลการทดลองของการทดสอบการสึกหรอ มีดังนี้

2.8.4.3 ต้องเชื่อถือได้และมีการทำซ้ำได้สามารถตัดสินว่าผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือได้มากเท่าไรกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบวัสดุต่างชนิด

2.8.4.4 มีความสามารถในการจัดลำดับวัสดุประเภทต่างๆ

2.8.4.5 สามารถนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ของการทดสอบภาคสนามหรือการใช้งานจริงได้

2.8.5 การทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-Disk) หรือการทดสอบการสึกหรอแบบไถ เป็นการทดสอบแบบหนึ่งที่ใช้ทั้งในห้องปฏิบัติการ และการใช้งานทั่วไป โดยจะทำการทดสอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดคู่กัน วัสดุชิ้นหนึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือแท่งทรงกระบอก ซึ่งเรียกว่าพิน ที่ถูกสวมด้วยลูกตุ้มเพื่อเพิ่มแรงกด วางตั้งฉาก และให้สัมผัสกับวัสดุอีกชิ้นหนึ่งที่มีลักษณะเป็นจานเรียกว่าดิสก์ โดยการทดสอบจะให้ดิสก์ หมุนในลักษณะวงกลมรอบตัวเอง เกิดการเสียดสีระหว่างผิววัสดุทั้งสอง จนเกิดเป็นร่องการเสียดสี ที่เรียกว่ารอยสึก [2]



รูปที่ 2.22 การทดสอบแบบพินออนดิสก์

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบสามารถใช้วัสดุได้หลากหลายชนิด หลากหลายประเภท แต่มีข้อกำหนดคือ ชิ้นงานต้องมีขนาดที่แน่นอน สามารถทนความเค้นที่เกิดขึ้น โดยไม่เกิดการโก่งงอในการทดสอบโดยทั่วไปชิ้นงานที่เป็นพินจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 10 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่เป็นดิสก์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-100 มิลลิเมตร มีความหนา 2-10 มิลลิเมตร และผิวของชิ้นทดสอบต้องมีความหยาบผิว (Ra) ไม่เกิน 0.8 ไมโครเมตร การวัดปริมาณการสึกหรอจะรายงานเป็นปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทั้งสองชิ้น ใน หน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร การคำนวณปริมาตรที่เกิดการสึกหรอสำหรับพินที่มีรูปร่างเรขาคณิตอื่น ๆ นอกเหนือไปจากทรงกระบอกให้ใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตที่เหมาะสม และอาจมีการใช้การประมาณการรวมด้วย โดยสมการในการคำนวณปริมาตรที่หายไปของพินและดิสก์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

คณะผู้วิจัย ได้จัดทำแผนงานต่างๆ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ข้อที่	กิจกรรมการวิจัย	เดือนที่							
		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	1-2	3
1	รวบรวมปัญหาการเสื่อมสภาพของค้อนฉีกอ้อยและวิเคราะห์งานวิจัยด้านงานเชื่อมที่เกี่ยวข้อง								
2	ประสานงานกับผู้ประกอบการ SME ที่ประสงค์ทำวิจัยเพื่อพัฒนาการเชื่อมพอกแข็งบนชิ้นงานตัวอย่าง								
3	จัดฝึกอบรมเกี่ยวกับความรู้โลหะวิทยา กระบวนการเชื่อมเพื่อการผลิตค้อนฉีกอ้อยให้กับบุคลากรของผู้ประกอบการ SME								
4	กำหนดพารามิเตอร์ในการทดลองเชื่อมพอกแข็ง								
5	ทดลองเชื่อมพอกแข็งตามแผนงานที่กำหนดไว้								
6	การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่ได้ทดลองทำขึ้น								
7	จัดทำเอกสารควบคุมคุณภาพงานเชื่อม (WPS/PQR)								
8	สรุปผลการดำเนินงาน และจัดทำศูนย์องค์ความรู้ด้านการพัฒนาและรักษามาตรฐานการผลิตค้อนฉีกอ้อยให้มีคุณภาพ								
9	จัดสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย								
10	จัดทำรายงานผลการดำเนินการ								
	รายงานความก้าวหน้า 1								
	รายงานความก้าวหน้า 2								
	รายงานฉบับสมบูรณ์								

3.1 การวิเคราะห์สภาพปัญหาการเสื่อมสภาพของค้อนฉีกอ้อยของโรงงาน

จากการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของค้อนฉีกอ้อยของโรงงานน้ำตาลและสินค้าของผู้ประกอบการ SME ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลเกี่ยวกับค้อนฉีกอ้อยของโรงงานน้ำตาล และได้นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์สภาพปัญหาของค้อนฉีกอ้อยของโรงงานเกี่ยวกับการสึกกร่อนของค้อนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และหาแนวทางในการพัฒนาค้อนฉีกอ้อยที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม โดยผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การมีเศษดินทรายและหิน ปะปนมากับต้นอ้อย

จากข้อมูลการสำรวจพบว่า ในขั้นตอนการใช้ค้อนฉีกอ้อยดินทรายและหิน ปะปนมากับต้นอ้อยอยู่เป็นประจำ โดยทางโรงงานน้ำตาลคาดว่ามาจาก 2 ประเด็น คือ

- เกิดจากการใช้รถตัดอ้อยตัดต้นอ้อย เนื่องจากใบตัดของรถตัดอ้อยไม่สามารถปรับระดับได้ เมื่อทำการตัดอ้อยในพื้นที่ที่มีระดับผิวดินต่างกัน ใบพัดนี้จะทำการตัดต้นอ้อยและบางส่วนก็ขุดเอาดินและหินติดมาด้วย
- เกิดจากรถคืบอ้อย โดยเมื่อชาวไร่อ้อยตัดอ้อยแล้วนำมากองรวมกันในไร่อ้อย จากนั้นจึงใช้รถคืบอ้อยมากีบกองอ้อยดังกล่าว ซึ่งขณะคืบอ้อยจะมีปลายของอุปกรณ์คืบอ้อยไปขุดและครูดเอาเศษดินทรายและหินใต้กองอ้อยปะปนมากับต้นอ้อยด้วย

การมีเศษดินทรายและหินปะปนมากับต้นอ้อยและผ่านเข้าไปในกระบวนการหีบอ้อยสามารถสร้างความเสียหายให้กับค้อนฉีกอ้อย เช่น เกิดการแตกหัก การสึกกร่อน และเครื่องจักรติดขัดไม่สามารถทำงานต่อได้ โดยทางโรงงานน้ำตาลพยายามตรวจสอบและคัดกรองเศษดินทรายและหินอยู่เป็นประจำ แต่เนื่องจากต้องหีบอ้อยในปริมาณมากและต่อเนื่องกันตลอดเวลา จึงอาจมีเศษดินทราย และหินผ่านเข้ามาถึงชุดค้อนฉีกอ้อย ทำให้เกิดความเสียหายและต้องหยุดซ่อมบำรุง



รูปที่ 3.1 เศษดินทรายและหิน ปะปนมากับต้นอ้อย

3.2 การเลือกลวดเชื่อม

จากข้อมูลการสำรวจพบว่า โรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ แต่ละแห่งมีการใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งหลากหลายยี่ห้อ และหลากหลายชนิด โดยการตัดสินใจสั่งซื้อลวดเชื่อมของแต่ละโรงงานส่วนใหญ่จะพิจารณาจากเหตุผลต่างๆ คือ

- ชนิดและประเภทของวัสดุที่ใช้ทำค้อนฉีกอ้อย
- การเปรียบเทียบคุณภาพและราคาของลวดเชื่อมพอกแข็ง
- ตามประสบการณ์และความเคยชินของช่างเชื่อมประจำโรงงาน
- ตามความเหมาะสมกับเครื่องเชื่อมประจำโรงงาน
- ตามคำแนะนำของผู้รับเหมาและพนักงานขายลวดเชื่อม

3.3 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพงานเชื่อมค้อนฉีกอ้อย

จากข้อมูลการสำรวจพบว่าผู้ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพงานเชื่อมค้อนฉีกอ้อยจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ

- หัวหน้างานแผนกชุดค้อนฉีกอ้อยหรือวิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุงของโรงงานน้ำตาล
- หัวหน้าช่างเชื่อมของบริษัทผู้รับเหมา

ทั้งนี้ การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพงานเชื่อมค้อนฉีกอ้อยของผู้ตรวจสอบทั้ง 2 กลุ่ม จะใช้การตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น โดยอาศัยการใช้ประสบการณ์ในการทำงานของหัวหน้างานและช่างเชื่อมมาตัดสินคุณภาพงานเชื่อม โดยมีโรงงานน้ำตาลหรือผู้รับเหมาเพียงไม่กี่แห่งที่จะใช้ผลการตรวจสอบแบบไม่ทำลายมาพิจารณาคุณภาพงานเชื่อมค้อนฉีกอ้อย เนื่องจากการตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อมแบบไม่ทำลายจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง รวมถึงต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานและผู้ตรวจสอบที่มีความเชี่ยวชาญมาวิเคราะห์ผล

3.3.1 การตรวจสอบประเภทค้อนฉีกอ้อยของโรงงานน้ำตาล

การสำรวจข้อมูลจากโรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี พบว่าค้อนฉีกอ้อยที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันที่เสียหายมีข้อมูลดังนี้

- เครื่องจักรเดินต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง
- ระยะเวลาในการใช้ค้อนฉีกอ้อยในการหีบอ้อยหีบ 106 วัน
- ค้อนฉีกอ้อย 1 ชุดจะใช้งาน 2 หน้า โดย 1 หน้าจะตีอ้อยได้เฉลี่ย 161,034.06 ตันอ้อย
- ค้อนฉีกอ้อย 1 ชุด มีค้อนทั้งหมด 96 ลูก ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A572 Gr.65



รูปที่ 3.2 สภาพค้อนฉีกอ้อยของโรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี

3.3.2 การสำรวจข้อมูลจากโรงงาน น้ำตาลมิตรผล สิงห์บุรี พบว่าค้อนฉีกอ้อยที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันที่เสียหายมีข้อมูลดังนี้

- เครื่องจักรเดินต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง
- ระยะเวลาในการใช้ค้อนฉีกอ้อยในการหีบอ้อยหีบ 21 วัน
- ค้อนฉีกอ้อย 1 ชุดจะใช้งาน 2 หน้า โดย 1 หน้าจะตีอ้อยได้เฉลี่ย 249,597 ตันอ้อย
- ค้อนฉีกอ้อย 1 ชุด มีค้อนทั้งหมด 144 ลูก ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A572Gr.65



รูปที่ 3.3 สภาพค้อนฉีกอ้อยของโรงงานน้ำตาลมิตรผล สิงห์บุรี

3.3.3 การสำรวจข้อมูลจากโรงงานน้ำตาล เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด มหาชน พบว่า ค้อนฉีกอ้อยที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันที่เสียหายมีข้อมูลดังนี้

- เครื่องจักรเดินต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง
- ระยะเวลาในการใช้ค้อนฉีกอ้อยในการหีบอ้อยหีบ 15 วัน
- ค้อนฉีกอ้อย 1 ชุดจะใช้เวลา 2 หน้า โดย 1 หน้าจะตีอ้อยได้เฉลี่ย 300,000 ตันอ้อย
- ค้อนฉีกอ้อย 1 ชุด มีค้อนทั้งหมด 240 ลูก ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A572 Gr.65



รูปที่ 3.4 สภาพค้อนฉีกอ้อยของเกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด (มหาชน)

3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

คณะผู้วิจัยได้มีการสำรวจความพร้อมของสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงหน่วยงานพันธมิตรต่างๆ ที่มีความสนใจและพร้อมจะให้ความสนับสนุนในด้านต่างๆ เช่น เครื่องเชื่อม หรือลวดเชื่อม ร่องพื้น ลวดเชื่อมพอกแข็ง ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ดังนี้

1. เครื่องเชื่อมไฟฟ้า SMAW/FCAW
2. เครื่องตัดงานโลหะ
3. เตาเผาให้ความร้อนสูง
4. เตาอบลวดเชื่อม
5. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด
6. ตลับเมตร และอุปกรณ์ตรวจสอบแบบพินิจ
7. เครื่องตรวจสอบด้วยผงแม่เหล็ก
8. กล้องจุลทรรศน์ OM
9. เครื่องขัดโลหะ
10. เครื่องเป่าลมร้อน
11. เครื่องทดสอบความแข็ง

12. เครื่องทดสอบแรงกระแทก
13. เครื่องทดสอบการสึกกร่อน
14. เครื่อง OES และ SEM และ XRD และ XRF และ EDS
15. วัสดุเกรด ASTM A572 Gr 65 หรือเทียบเท่า
16. ชิ้นงานค้อนฉีกอ้อยอ้างอิง
17. ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งชนิดต่างๆ (Hard facing electrode)
18. ลวดเชื่อมรองพื้นชนิดต่าง (Buffer layer filler metal)
19. อุปกรณ์อะไหล่หัวเชื่อม และค้อนเคาะแนวเชื่อม
20. เกจวัดแนวเชื่อม
21. หน้ากากและถุงมือช่างเชื่อม
22. เวอร์เนียคาลิปเปอร์
23. เครื่องเจียรไนและใบหินเจียรไน
24. กระดาษทราย 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200
25. น้ำยาทดสอบสารแทรกซึม
26. ผงแม่เหล็ก
27. นำยาเรซินหล่อชิ้นงาน น้ำยาสำหรับกัดกรดดูโครงสร้างโลหะ
28. เอทานอลทำความสะอาดชิ้นงาน
29. เครื่องทดสอบการสึกกร่อน
30. เครื่องล้างชิ้นงานระบบอัลตราโซนิก
31. อุปกรณ์เครื่องแก้ว และโถดูดความชื้น
32. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง
33. น้ำยาสำหรับกัดกรดดูโครงสร้างโลหะ
34. แผ่นสีกหาลาดขัดเงาชิ้นงาน

3.5 วัสดุที่ใช้ทดลอง

3.5.1 วัสดุงานเชื่อมชิ้นทดสอบงานเชื่อมพอกผิวแข็ง (Base metal)

วัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy Steel : HSLA) กรรมวิธีการผลิตรีดและอบปกติ (Normalized rolled) เป็นเหล็กกล้าเกรนละเอียด (Fine grain structural steel) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า HSLA ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการอุณหพลศาสตร์ (Thermomechanical) ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าโดยที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนต่ำ และธาตุผสมละเอียดที่ให้คาร์ไบด์และไนไตรด์เช่นโครเมียม โมลิบดีนัม ไททาเนียม

ไนโอเบียม วานาเดียม มาตรฐาน ASTM A572 Gr.65 ขนาดความกว้าง 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร สำหรับใช้เชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน Bench mark จำนวน 3 ชิ้น และ ใช้เป็นชิ้นทดลองงานเชื่อม 8 สภาวะ จำนวน 8 แผ่น ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนแผ่น ASTM A572 Gr.65 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3-2 ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) เหล็กกล้า ASTM A572 Grade 65

เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง ASTM A572 Grade 65								
Grade	ธาตุผสมสูงสุด [The Element Max (%)]							
	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Co
A572 Grade 65	0.23	0.4	1.35	0.04	0.05	0.06	0.015	0.05

Hangzhou, Zhejiang Province China. ได้รายงานผลการทดลองหาค่า Impact Strength อุณหภูมิใช้ทดสอบ CVN Charpy Test คือ 23°C ทดสอบหาความต้านทานแรงกระแทก บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ไว้ในหนังสือ HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015, John Wiley and Sons, p.937. ได้ค่าเฉลี่ย 293 จูล (J)

สมการที่ใช้คำนวณหาค่าสมมูลคาร์บอน (Carbon Equivalent : CE) เพื่อทำนายโครงสร้างบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ในการเชื่อม คือ

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Mn + \%S}{6} \right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right)$$

$$\text{แทนค่า } CE = 0.23 + \left(\frac{1.35+0.4}{6} \right) + \left(\frac{0+0+0.06}{5} \right) + \left(\frac{0+0.015}{15} \right)$$

ค่าสมมูลคาร์บอน (CE) = **0.533**

ที่มา : [American Welding Society](#) (AWS), 2010.

R. W. Hinton and R. K. Wiswesser (2008) ได้ทำการวิจัยทดลองประมาณการอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Minimum Preheat Temperature : PH) เป็นสูตรใช้ในการคำนวณดังนี้

$$T_{PH} = 450^{\circ}\text{C} \sqrt{CE - 0.42}$$

$$\text{แทนค่า } T_{PH} = 450 \sqrt{0.533 - 0.42} = 151.26 \approx 150^{\circ}\text{C}$$

สมการหาค่า CE จะมีค่าส่วนผสมเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าว บรรจุอยู่ในสูตรของการหาค่า CE ผลของค่าสมมูลคาร์บอน (Carbon Equivalent : CE) Wikipedia, the free encyclopedia แนะนำความยากง่ายในการเชื่อมหรือความสามารถรับการเชื่อมได้ (Weldability) และวิธีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) เพื่อป้องกันการแตกร้าวของโลหะงานบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ดังนี้

ตารางที่ 3-3 ค่าสมมูลคาร์บอน (CE) ใช้ทำนายความสามารถรับการเชื่อมได้ของเหล็กกล้าคาร์บอน

ค่า CE	ความสามารถรับการเชื่อมได้ (Weldability)
ต่ำสุดถึง 0.35	ดีเลิศ (Excellent) ดีเยี่ยม ไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคพิเศษ
0.36–0.40	ดีมาก (Very good) มีโอกาสเกิดแนวโครงสร้างมาร์เทนไซต์บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ควรเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำและต้องอบลวดเชื่อมก่อนทำการเชื่อม
0.41–0.45	ดี (Good) โอกาสเกิดการแตกร้าวสูง ต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อม 150°C.
0.46–0.50	พอใช้ (Fair) โอกาสเกิดการแตกร้าวสูง ต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม >150°C. ถึง 400°C.
Over 0.50	เลว (Poor) ต้อง Preheat ก่อนเชื่อม >200°C. และควร Postheat หลังการเชื่อม

3.5.2 ลวดเชื่อมรองพื้น (Buffer Covered Electrode)

ลวดเชื่อมโลหะหุ้มฟลักซ์กลุ่มลวดเชื่อมออสเทนนิติกสารพอกหุ้มชนิดรูไทล์ (Rutile Coated) ทำการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ชิ้นงานทดสอบ สภาวะที่ 1, 2, 5, และ 6 ใช้ลวดเชื่อมสารพอกหุ้มเครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4 มม. ยาว 400 มม. กระแสไฟเชื่อมที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำอยู่ระหว่าง 100 – 130 แอมแปร์ ส่วนผสมเคมีหลักในสารพอกหุ้มคือ โครเมียม - นิกเกิล - แมงกานีส (Fe-Cr-Ni-Mn) ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8-UM-200-KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13 : EFeCr-A5 หรือเกรด AWS A5.13 : EFeMnCr ได้เนื้อเชื่อม (Weld metal) กลุ่มเนื้อเชื่อมออสเทนนิติก 100% (Fully austenitic)

3.5.3 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing Covered Electrode)

3.5.3.1 ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็ง ในสภาวะที่ 1, 2, 3, และ 4 ใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งหุ้มฟลักซ์หรือลวดเชื่อมสารพอกหุ้มประสิทธิภาพสูงเครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 ขนาด $\varnothing$ 4 มม. ยาว 450 มม. กระแสไฟเชื่อมที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำอยู่ระหว่าง 140 – 200 แอมแปร์ เป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13 : EFeCr-EX Series Electrodes มีส่วนผสมของธาตุต่างๆที่ให้โลหะคาร์ไบด์ในเนื้อเชื่อมเช่น โมลิบดีนัม, วานาเดียม, ทังสเตน และ ไนโอเบียม (Mo, V, W, Nb) แนวเชื่อมหลังเชื่อมเสร็จได้เนื้อเชื่อม (Weld metal) กลุ่มเนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) ผสมคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide) นิยมใช้เชื่อมพอกชิ้นงานขุดเจาะดิน งานผลิตซิเมนต์ งานผลิตอิฐ งานขุดแร่ ชิ้นส่วนที่เสี่ยงต่อการสึกหรอหนัก งานสภาพแวดล้อมกัดกร่อนที่มีอุณหภูมิสูง

3.5.3.2 ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็ง ในสภาวะที่ 5, 6, 7, และ 8 ใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง หุ้มฟลักซ์หรือลวดเชื่อมสารพอกหุ้มชนิดรูทูล์ เครื่องหมายการค้า ESAB DUROID 650 ขนาด $\varnothing$ 4 มม. ยาว 450 มม. ที่มีธาตุผสมหลัก Fe, Cr, Mn ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-60-Z หรือเทียบได้กับ มาตรฐาน AWS A5.13 : EFeCr-E1 หรือ E2 ส่วนผสมเคมีหลักในสารพอกหุ้มคือ เหล็ก, โครเมียม, แมงกานีส (Fe, Cr, Mn) ให้เนื้อเชื่อม (Weld metal) ที่สามารถชุบแข็งในอากาศ (Air hardening) สามารถต้านทานการครูดถูที่รุนแรง (High abrasion resistant hardfacing) ต้านทานความเค้นแรง กระแทกกระหว่างโลหะกับสินแร่ ได้ปานกลาง (Moderate resistance impact) และต้านทานการกัดกร่อนและการเกิดสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ปานกลาง

จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีจะพบว่า ลวดเชื่อมสารพอกหุ้มประสิทธิภาพสูง ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ จะมีสมบัติเนื้อเชื่อม (Weld metal) เหนือกว่า ลวดเชื่อมสารพอกหุ้มชนิดรูทูล์ ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-60-Z ในด้านความแข็งแรง ความต้านทานการครูดถู (สัญลักษณ์ G) และความต้านทานการกัดกร่อน (สัญลักษณ์ R) เล็กน้อย

3.6 การกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลองเชื่อมพอกแข็ง

คณะผู้วิจัยได้ปรึกษาได้ประสานงานกับผู้ประกอบการ SME ทางบริษัท เวลดีงเวล จำกัด และบริษัท เค แอนด์ เอ็น อีเล็คทริก เวลแอนด์เซอร์วิส จำกัด ที่จำหน่ายลวดเชื่อมพอกแข็ง หรือการผลิต ค้อนฉีกอ้อยที่มีความประสงค์จะร่วมทำงานวิจัย เพื่อพัฒนาการเชื่อมพอกแข็งบนชิ้นงานตัวอย่าง ASTM A572 Gr. 65 ที่ใช้เป็นวัสดุอ้างอิง (Base metal) โดยเลือกลวดเชื่อมรองพื้นและลวดเชื่อมพอกแข็ง อย่างละ 2 ชนิด รวมถึง และกำหนดช่วงอุณหภูมิสำหรับควบคุมการให้ความร้อนก่อนหรือหลังการเชื่อมพอกแข็ง

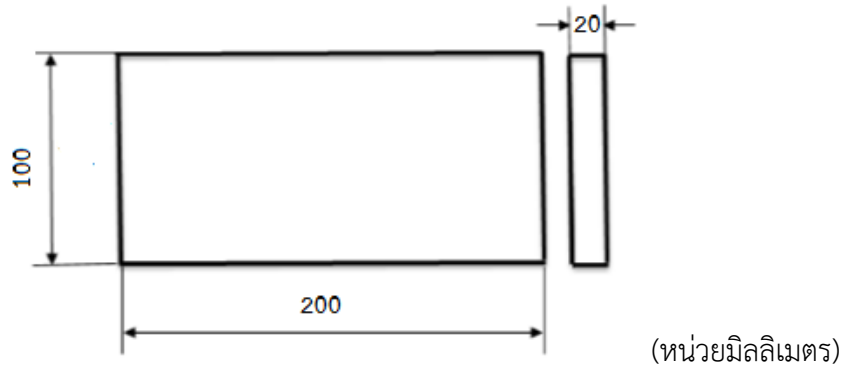
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง

การทดลอง สภาวะที่	ลวดเชื่อม รองพื้น	ลวดเชื่อมพอกแข็ง		ให้ความร้อนการเชื่อม (Preheat)		การควบคุมอุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อม (Interpass Temp. Control)	
	UTP63	UTP LEDURIT65	ESAB 650	ไม่มี	มี	ไม่มี	มี
1	√	√	—	—	√	—	√
2	√	√	—	—	√	—	√
3	—	√	—	√	—	—	√
4	—	√	—	√	—	—	√
5	√	—	√	—	√	—	√
6	√	—	√	—	√	—	√
7	—	—	√	√	—	—	√
8	—	—	√	√	—	—	√

หมายเหตุ สัญลักษณ์ — หมายถึง ไม่มีการใช้หรือปฏิบัติ, √ หมายถึง มีการใช้หรือปฏิบัติ

3.7 วิธีการดำเนินงาน

3.7.1 การเตรียมชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) ASTM A572 Gr.65 นำมาตัดด้วยเครื่องจักรกลให้ได้ขนาด 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 วัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) ASTM A572 Gr.65

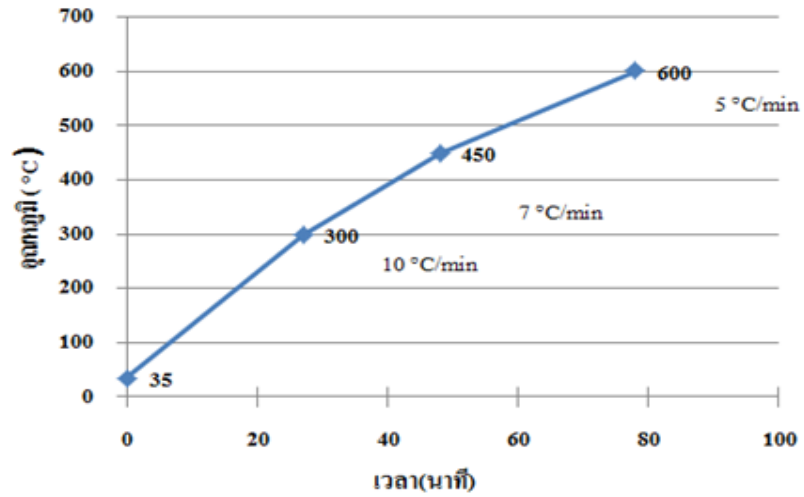
3.7.2 การทดสอบอัตราเร็วของการเพิ่มและอัตราการลดอุณหภูมิของเตาอุ่นชิ้นงาน และเตาอบ ลวดเชื่อมเนื่องจากเตาอบ (Furnace) แต่ละรุ่นมีอัตราเร็วในการให้ความร้อน (Heating Rate) และอัตราการลด (Cooling Rate) โดยเฉลี่ยไม่เท่ากัน ดังนั้น ก่อนทำการทดลองจึงต้องทำการทดสอบอัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิโดยเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับกำหนดค่าในกระบวนการทางความร้อน สำหรับวิธีการทดสอบ สามารถทำได้โดย เปิดเตาอุ่นชิ้นงาน และจับเวลาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้นในแต่ละช่วง จากนั้นนำค่าดังกล่าวมาคำนวณ ($\text{Heating Rate} = \Delta T / \text{Time (min)}$) และหาค่าเฉลี่ย เพื่อหาอัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิที่แท้จริงของเตาเผาในหน่วยองศาเซลเซียสต่อนาที ($^{\circ}\text{C/min}$)

ตารางที่ 3-5 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอุ่นชิ้นงาน

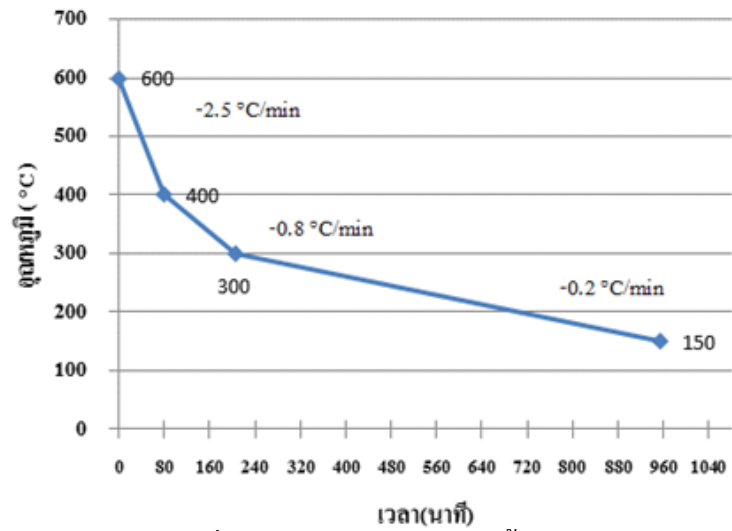
ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าเฉลี่ยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที)
35-600	22

ตารางที่ 3-6 อัตราการลดของอุณหภูมิของเตาอุ่นชิ้นงาน

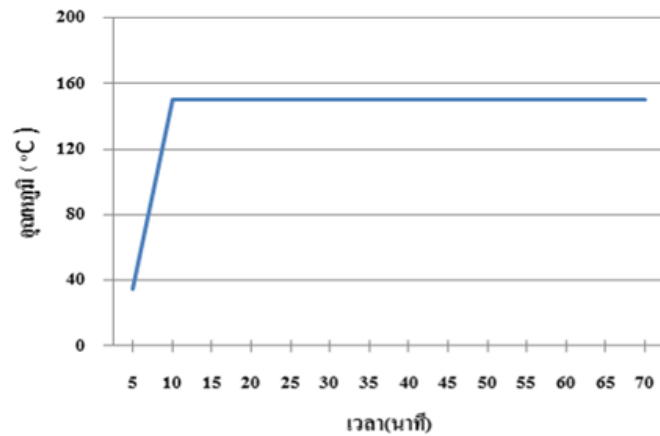
ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าเฉลี่ยอัตราการลดของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที)
550-400	2
399-300	0.8
299-150	0.2
199-50	0.1



รูปที่ 3.6 การให้อุณหภูมิในเตาอบขึ้นงานก่อนการเชื่อม



รูปที่ 3.7 การเย็นตัวในเตาอบขึ้นงาน



รูปที่ 3.8 การให้อุณหภูมิหลอดเชื่อม

3.7.3 การเตรียมอุปกรณ์การเชื่อมและการเตรียมชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง

คณะผู้วิจัย ได้จัดเตรียมสถานที่เชื่อม ชิ้นงานและลวดเชื่อม รวมถึงตรวจสอบความพร้อมของเครื่องเชื่อมให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน และมีการควบคุมการ สภาวะการเชื่อมให้สอดคล้องกับการผลิต ค้อนทุบอ้อยในท้องตลาด เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง (Benchmark) โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.9

	
เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทำวิจัย	ลวดเชื่อมพอกแข็งที่ใช้ในการทำวิจัย
 	
การทำ Preheat ก่อนทำการเชื่อมพอกแข็ง	การเชื่อมพอกแข็ง โดยไม่ทำการ Preheat ชิ้นงาน

รูปที่ 3.9 กิจกรรมเตรียมอุปกรณ์การเชื่อม และการเชื่อมพอกแข็งชิ้นงานตัวอย่างตามการผลิตค้อนทุบอ้อยในท้องตลาด (Benchmark)

3.7.4 การเตรียมอุปกรณ์การเชื่อมและการเตรียมชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งตามข้อเสนอของผู้วิจัย

คณะผู้วิจัย ได้จัดเตรียมสถานที่เชื่อม ชิ้นงานและลวดเชื่อม รวมถึงตรวจสอบความพร้อมของเครื่องเชื่อมให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน และมีการควบคุมการ สภาวะการเชื่อมให้สอดคล้องตามเงื่อนไขโครงการวิจัยและการตรวจสอบคุณภาพแนวเชื่อมและการทดสอบสมบัติทางกล

	
ตัวอย่างแนวการเชื่อมพอกแข็งบนชิ้นงานตัวอย่าง	การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบความแข็ง
	
	
ชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เตรียมตามการผลิตค้อนทุบอ้อยในท้องตลาด	

รูปที่ 3.10 การตรวจสอบคุณภาพแนวเชื่อมและตามเงื่อนไขโครงการวิจัย

3.8 การเชื่อมชิ้นงานพอกแข็งมาตรฐาน (Benchmark)

สร้างชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งมาตรฐาน (Benchmark) สำหรับเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชื่อมพอกตามเงื่อนไขต่างๆ ตามที่คณะผู้วิจัยได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมพอกแข็งขึ้นมาใหม่

ในการทดลองเชื่อมพอกแข็งชิ้นงานมาตรฐานมาตรฐาน (Benchmark) คณะผู้วิจัยใช้ชิ้นงานตัวอย่างจากโรงงาน จำนวน 3 ชิ้น เป็นวัสดุงานเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSAL) ASTM A572 Gr.65 ผู้วิจัยกำหนดค่าตัวแปรเชื่อมดังนี้ใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Electrode Arc Welding : SMAW) ลวดเชื่อมรองพื้นเครื่องหมายการค้า UTP 63 Ø ลวดเชื่อม 4 มม. ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP 110 Amps ลวดเชื่อมพอกแข็งเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65 ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP 150 Amps

ตารางที่ 3-7 ข้อมูลการเชื่อมพอกแข็งชิ้นงานมาตรฐาน (Benchmark)

ชื่อชิ้นงาน	การให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat)	เชื่อมรองพื้น		เชื่อมพอกแข็ง		อุณหภูมิอบลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง
		จำนวนแนวเชื่อม	จำนวนชั้นเชื่อม	จำนวนแนวเชื่อม	จำนวนชั้นเชื่อม	
Benchmark 1	ไม่ใช่	ไม่ใช่	ไม่ใช่	2	1	ไม่ใช่
Benchmark 2	150°C	ไม่ใช่	ไม่ใช่	2	1	ไม่ใช่
Benchmark 3	150°C	2	1	2	1	ไม่ใช่

3.9 การกำหนดขั้นตอนการการทดลองเชื่อมพอกแข็งชิ้นทดสอบค้อนทุบอ้อย

ในกระบวนการเชื่อมนั้นจะแบ่งแนวเชื่อมเป็นชั้น (Layer) แนวเชื่อมแต่ละชั้นแนวเชื่อมมีความยาวประมาณ 200 มิลลิเมตรโดยทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding : SMAW) ใช้ชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSAL) ASTM A572 Gr.65 ขณะทำการเชื่อมจะใช้เครื่องตรวจสอบโวลต์มิเตอร์ตรวจค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า และเครื่องวัดอุณหภูมิตรวจสอบอุณหภูมิในขณะทำการเชื่อมจริง โดยทำการเชื่อมดังต่อไปนี้

3.9.1 การเชื่อมพอกแข็งชิ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 สภาวะที่ 1 เชื่อมรองพื้น (Buffer) โดยให้ความร้อนที่ชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat) ที่ 150°C

เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้มเครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes แล้วทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555: E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

3.9.2 การเชื่อมพอกแข็งชิ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 สภาวะที่ 2 เชื่อมรองพื้น (Buffer) โดยไม่ให้ความร้อนที่ชิ้นงานก่อนการเชื่อม (No-preheat)

ทำการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้มเครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes แล้วทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65

ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes ปฏิบัติการเชื่อมที่ อุณหภูมิแวดล้อมปกติ หรืออุณหภูมิห้อง (Ambient Temperature)

3.9.3 การเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 สภาวะที่ 3 ไม่เชื่อมรองพื้น (Without buffer layer) แต่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Preheat) ที่ 150°C

ทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทกด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

3.9.4 การเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 สภาวะที่ 4 ไม่เชื่อมรองพื้น (Without buffer layer) และไม่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนทำการเชื่อม (No-preheat)

ทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 -ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes ปฏิบัติการเชื่อมที่อุณหภูมิบรรยากาศปกติ (Ambient Temperature)

3.9.5 การเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง ESAB DUROID 650 สภาวะที่ 5 เชื่อมรองพื้น (Buffer) โดยให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) 150°C

ทำการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes แล้วทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า ESAB DUROID 650 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม. ที่มีธาตุผสมหลัก Fe, Cr, Mn หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-E1 หรือ E2

3.9.6 การเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง ESAB DUROID 650 สภาวะที่ 6 เชื่อมรองพื้น (Buffer) โดยไม่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนการเชื่อม (No-preheat)

ทำการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes แล้วทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing)

ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า ESAB DUROID 650 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ที่มีธาตุผสมหลัก Fe, Cr, Mn หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000-EFeCr-E1 หรือ E2 ปฏิบัติการเชื่อมที่ อุณหภูมิบรรยากาศปกติ (Ambient Temperature)

3.9.7 การเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง ESAB DUROID 650 สภาวะที่ 7 ไม่เชื่อมรองพื้น (Without buffer layer) แต่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Preheat) 150°C

ทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า ESAB DUROID 650 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ที่มีธาตุผสมหลัก Fe, Cr, Mn หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 -EFeCr-E1 หรือ E2

3.9.8 การเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบด้วยเชื่อมพอกแข็ง ESAB DUROID 650 สภาวะที่ 8 ไม่เชื่อมรองพื้น (Without buffer layer) และไม่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนทำการเชื่อม (No-preheat)

ทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า ESAB DUROID 650 ขนาด $\varnothing$ 4 มม ยาว 450 มม ที่มีธาตุผสมหลัก Fe, Cr, Mn หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13 : 2000 - EFeCr-E1 หรือ E2 ปฏิบัติการเชื่อมที่อุณหภูมิบรรยากาศปกติ (Ambient Temperature)

บทที่ 4

ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง

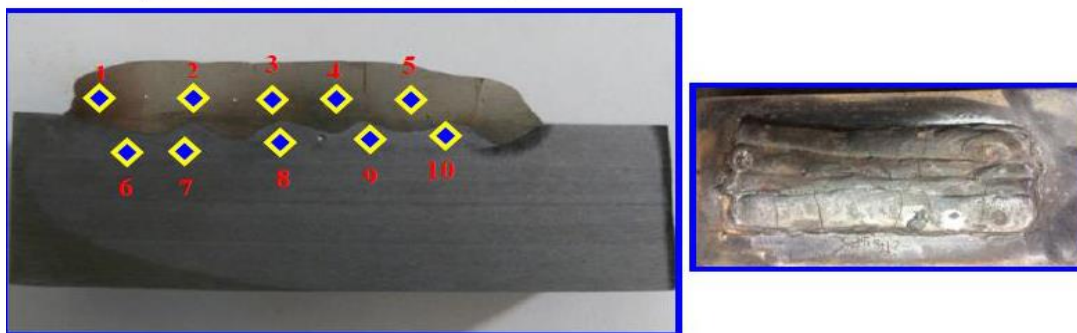
คณะผู้วิจัย ได้ทำการเตรียมชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งตัวอย่าง โดยมีการควบคุมสภาวะการเชื่อมตามเงื่อนไขของโครงการวิจัย โดยมีการสร้างชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งมาตรฐาน (Benchmark) สำหรับเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชื่อมพอกตามเงื่อนไขต่างๆ ตามที่คณะผู้วิจัยได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมพอกแข็งขึ้นมาใหม่ โดยมีรายละเอียดของผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างจากโรงงาน (ชิ้นงาน Benchmark) จำนวน 3 ชิ้น

ในการทดลองเชื่อมชิ้นงานตัวอย่างจากโรงงาน จำนวน 3 ชิ้น เป็นวัสดุงานเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A572 Gr.65 ผู้วิจัยกำหนดค่าตัวแปรเชื่อมดังนี้ใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Electrode Arc Welding : SMAW) ลวดเชื่อมรองพื้นเครื่องหมายการค้า UTP 63 Ø ลวดเชื่อม 4 มม ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP 110 Amps ลวดเชื่อมพอกแข็งเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65 ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP 150 Amps

4.1.1 ชิ้นงาน Benchmark 1 : ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) ASTM A572 Gr.65 เชื่อมพอกแข็งไม่ได้ให้ความร้อนที่ชิ้นงานก่อนเชื่อมพอกผิวแข็ง (No preheat) ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer) เชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65 จำนวน 2 แนว 1 ชิ้น

Result of Macro Hardness test



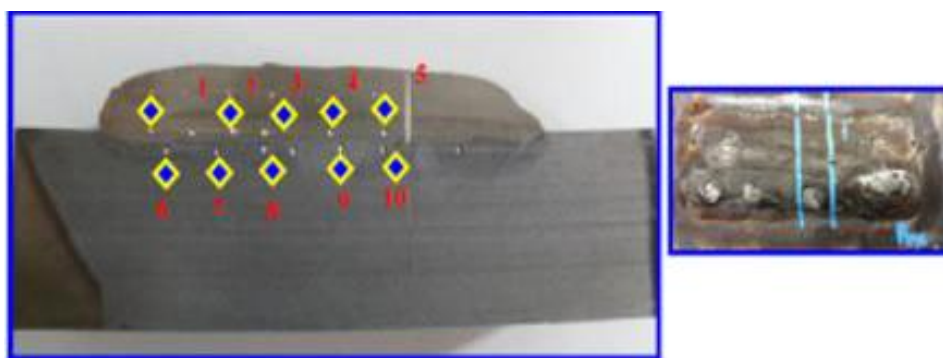
รูปที่ 4.1 ค่าทดสอบรับรองความแข็งชิ้นงาน Benchmark 1

ตารางที่ 4-1 ค่าทดสอบรับรองความแข็งแรงชิ้นงาน Benchmark 1

Hardness HRC					
Item	WM	WM	WM	WM	WM
UTP LEDURIT 65	62.0	62.8	63.0	62.1	63.6
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ
ASTM A572 Gr.65	3.1	2.6	1.4	2.4	3.2

ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของวัสดุเหล็กกล้าฯ ASTM A572 Gr.65 ที่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) เท่ากับ 8.14 HRC ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเนื้อเชื่อม (Weld metal) UTP LEDURIT 65 เท่ากับ 62.70 HRC

4.1.2 ชิ้นงาน Benchmark 2 : ชิ้นงาน ASTM A572 Gr.65 เชื่อมพอกแข็งให้ความร้อนชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) แก่ชิ้นงาน Benchmark 2 ด้วยเปลวไฟ ($\approx 150^{\circ}\text{C}$) โดยไม่เชื่อมรองพื้น (No buffer layer) / ไม่อบลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT65 จำนวน 2 แนว 1 ชั้นเชื่อม



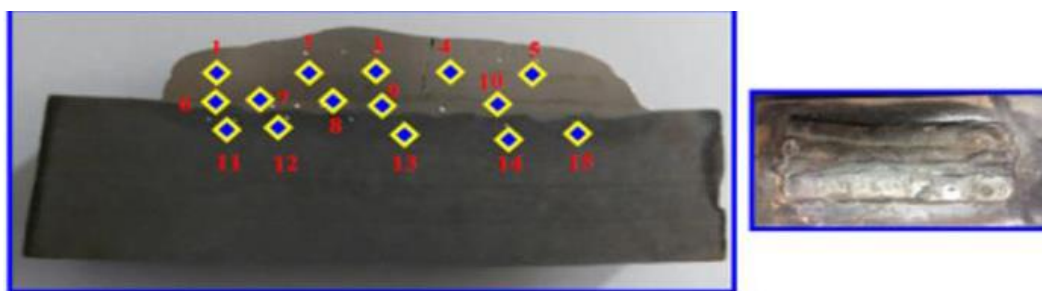
รูปที่ 4.2 ค่าทดสอบรับรองความแข็งแรงชิ้นงาน Benchmark 2 : Preheat 150°C

ตารางที่ 4-2 ค่าทดสอบรับรองความแข็งแรงชิ้นงาน Benchmark 2

Hardness HRC					
Item	WM	WM	WM	WM	WM
UTP LEDURIT 65	60.2	61.1	62.6	62.6	63.4
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ
ASTM A572 Gr.65	1.7	1.6	1.6	1.1	1.3

ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุเหล็กกล้าฯ ASTM A572 Gr.65 บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) เท่ากับ 1.06 HRC ค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อม (Weld metal) UTP LEDURIT 65 เท่ากับ 61.98 HRC

4.1.3 ชิ้นงาน Benchmark 3 : ชิ้นงาน ASTM A572 Gr.65



รูปที่ 4.3 ค่าทดสอบรับรองความแข็งชิ้นงาน Benchmark 3

ตารางที่ 4-3 ค่าทดสอบรับรองความแข็งชิ้นงาน Benchmark 3

Hardness HRC					
Item	WM	WM	WM	WM	WM
UTP LEDURIT 65	59.4	53.7	51.7	54.7	58.4
Item	WM-buffer	WM-buffer	WM-buffer	WM-buffer	WM-buffer
UTP 63	15.8	18.9	15.8	14.5	16.5
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ
ASTM A572 Gr.65	1.7	1.6	1.6	1.1	1.3

เชื่อมพอกแข็งชิ้นงาน Benchmark 3 ให้ความร้อนชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) ด้วยเปลวไฟ 150 °C เชื่อมรองพื้นด้วยลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP 63 ไม่อบลวดเชื่อม เชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65

ผลการทดลองได้ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุเหล็กกล้าฯ ASTM A572 Gr.65 บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) เท่ากับ 1.56 HRC ค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) UTP 63 เท่ากับ 16.36 HRC ค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อม (Weld metal) UTP LEDURIT65 เท่ากับ 55.58 HRC

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบค่าความแข็งชิ้นงานเชื่อม Benchmark 1, 2, 3

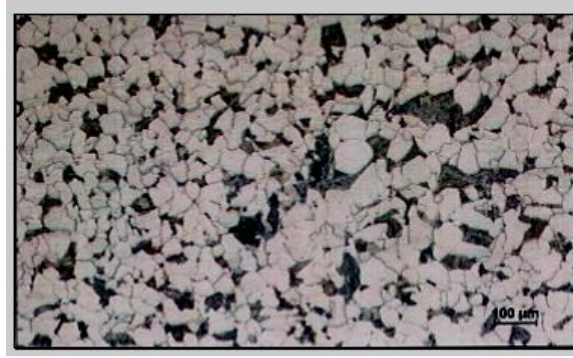
ขั้นตอนทดสอบ Benchmark	ให้ความร้อน ก่อนการเชื่อม (Preheat)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HRC)		
		บริเวณกระแทกร้อน (HAZ)	เนื้อเชื่อมรองพื้น(Weld buffer layer)	เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardfacing)
1	—	8.14	—	62.70
2	150°C	1.06	—	61.98
3	150°C	1.56	16.36	55.58

จากผลการทดลองพบว่าการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) แก่ชิ้นทดสอบ Benchmark 2 และ 3 มีผลอย่างมากที่ช่วยให้โลหะงานบริเวณกระแทกร้อน (HAZ) มีความแข็งลดลงจากไม่ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (No-preheat) แก่ชิ้นทดสอบ Benchmark 1 ประมาณ 8 เท่าตัว แต่ต้นทุนการ Preheat จะสูงมาก โดยเฉพาะชิ้นงานมีขนาดใหญ่หรือจำนวนมากต้องใช้เครื่องให้ความร้อนที่ทันสมัย ราคาแพง ส่วนผลการทดลองหาค่าความแข็งของผิวเนื้อเชื่อมพอกแข็งพบว่า ชิ้นทดสอบ Benchmark 3 ที่เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ก่อนเชื่อมพอกแข็ง มีค่าความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็งต่ำสุด เท่ากับ 55.58 HRC เพราะว่ามีเนื้อเชื่อมออสเทนนิติกจากลวดเชื่อม UTP 63 ที่เชื่อมรองพื้น (Buffer layer ละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็งมากประกอบกับเป็นการเชื่อมพอกทับเพียงชั้นเดียว จึงมีเนื้อเชื่อมรองพื้นละลายขึ้นมาผสมกับเนื้อโลหะเชื่อมจากลวดเชื่อมพอกผิวแข็งมาก

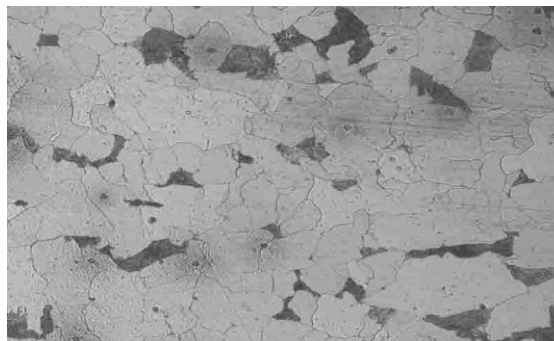
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4.2.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโลหะงาน (Base metal) ที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนด Benchmark เทียบกับโรงงานน้ำตาล

วัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) กรรมวิธีการผลิตเทคโนโลยีควบคุมทางกลประกอบกับหลักการอุณหพลศาสตร์ (Thermomechanical controlled) ควบคุมอัตราการเย็นตัวค่อนข้างเร็วกว่ากรรมวิธีผลิตเหล็กปกติ ทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ (Bainite) ซึ่งก็มีลักษณะเป็นเพิร์ลไลต์ละเอียด (Fine pearlite) และ เฟอไรท์ (Polygon ferrite) เป็นโครงสร้างที่มีความเหนียวแกร่งและแข็งแรงมีความสามารถรับการเชื่อมได้ดี (Fair weldability) ต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) $\geq 150^{\circ}\text{C}$ เพื่อลดความไวต่อการแตกร้าวในขณะเชื่อม



รูปที่ 4.4 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาค เฟอไรต์-เพิร์ลไลต์ เหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ที่กำลังขยาย 100 X



รูปที่ 4.5 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคเฟอไรต์-เพิร์ลไลต์ที่กำลังขยายเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ที่กำลังขยาย 500X

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในตำแหน่งเนื้อวัสดุ (Base Metal) พบว่าลักษณะที่เป็นสีขาว คือ โครงสร้างของเฟอไรต์ (Ferrite) คิดเป็นร้อยละ 55-60 ของโครงสร้างทั้งหมด และลักษณะที่เป็นสีดำ คือ โครงสร้างของเพิร์ลไลต์ (Pearlite) คิดเป็นร้อยละ 35-40 เปอร์เซนต์ ของโครงสร้างทั้งหมด

4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโลหะงานบริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone : HAZ)

วัสดุเหล็กกล้าฯ มาตรฐาน ASTM A572 Gr.65 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุบริเวณกระทบร้อน (HAZ) เป็นบริเวณเนื้อโลหะงานที่ติดชิดกับเนื้อเชื่อม (Weld metal) เพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคเดิม บริเวณกระทบร้อน (HAZ) เป็นบริเวณเนื้อโลหะงานที่ไม่หลอมละลายแต่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมสูงกว่าจุดวิกฤติ (Upper critical temperature) โครงสร้างเฟอไรต์ เบนไนท์และเพิร์ลไลต์ ละเอียด เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ ทำให้ธาตุคาร์บอนละลายรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับเหล็กใน

สถานะของแข็ง (Solid solution) ที่อุณหภูมิสูง (ปกติจะสูงกว่า 723°C) ในขณะที่เชื่อม ถ้าแนวเชื่อมมีอัตรา
การเย็นตัวสูง จะทำให้คาร์บอนบางส่วนไม่สามารถแพร่หนีกลับคืนสภาพโครงสร้างจุลภาคเดิมคือเฟอร์ไรต์
และเพิร์ลไลต์ได้ทัน จึงรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) กลายเป็นโครงสร้างเหล็ก
คาร์ไบด์แรงเย็น มาร์เทนไซต์ (Martensite : Fe_3C) ซึ่งแข็งเปราะ อาจเนื้อโลหะงานบริเวณกระทบร้อน
แตกหักง่าย



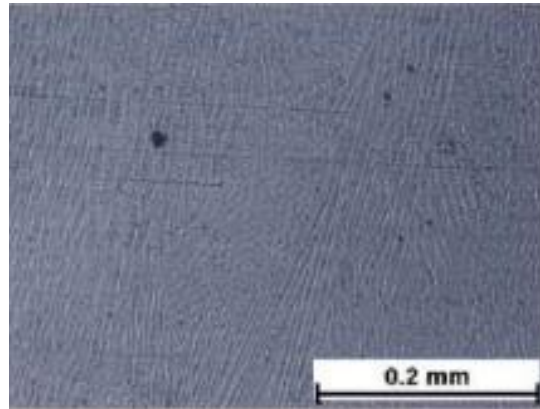
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะงานบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะงานบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ที่กำลังขยาย 500X

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในตำแหน่งบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) พบว่า
ลักษณะที่เป็นสีขาวคือโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ (Ferrite) คิดเป็นร้อยละ 65-70 เปอร์เซ็นต์ของโครงสร้าง
ทั้งหมด และลักษณะที่เป็นสีดำคือของโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเพิร์ลไลต์ละเอียด (Bainite)
คิดเป็นร้อยละ 15-20 เพิร์ลไลต์เดิมแตกตัวเป็นเพิร์ลไลต์ละเอียดเรียกว่าโครงสร้างเบนไนท์ (Bainite)
คิดเป็นร้อยละ 5-10 ของโครงสร้างทั้งหมด ส่งผลให้วัสดุมีลักษณะเกรนที่ละเอียด และมีความแข็งเพิ่มขึ้น

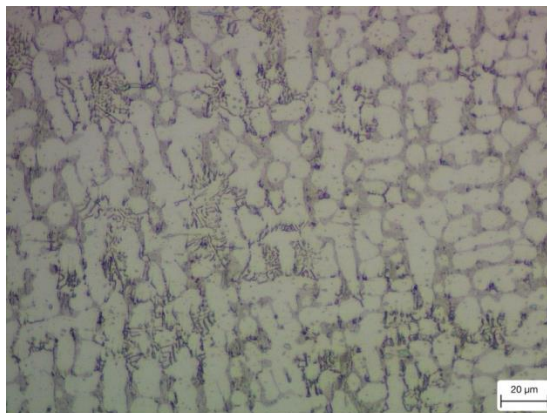
4.2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมรองพื้น Buffer 1ชั้นเชื่อม กำลังขยาย 100X

โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) เป็นโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) มีโครงสร้างออสเทนนิติกแมงกานีส ปริมาณโครเมียมสูง กระจายทั่วโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก

4.2.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Weld surfacing) 1 ชั้นเชื่อม กำลังขยาย 100X

โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมเป็นโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Chromium & Complex Carbide) กระจายอยู่บนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix)

4.3 ผลการทดสอบการเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบงานเชื่อมสภาวะการทดลองต่างๆ

ในการทดลองเชื่อมพอกแข็งจำลองค้อนฉีกอ้อยสภาวะต่างๆ คณะผู้วิจัยกำหนดแนวทางในการนำเสนอผลการทดลองดังนี้

- 1) รายงานผลการเชื่อมที่ใช้ตัวแปรเชื่อมที่ใช้ในแต่ละสภาวะการทดลอง
- 2) รายงานผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)
- 3) รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Report : Micro Structure Test)
- 4) รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาค (Test Report : Micro Hardness Test)
- 5) รายงานผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Test Report : Impact Test)
- 6) รายงานผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน (Test Report : Wear Testing)

4.3.1 การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 1 : ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat)

ทำการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งขึ้นงานวัสดุเกรด ASTM A572 Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มม สภาวะที่ 1 โดยให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) 150°C เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม ยาว 400 มม ค่ากระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC+/AC 100 - 130 Amps. เป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes หลังจากนั้นทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 450 มม กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC+/AC 140 - 200 Amps. จัดอยู่ในกลุ่มมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

4.3.1.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 1 : Preheating

4.3.1.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สภาวะที่ 1 จำนวน 4 ขึ้นทดสอบ

ตารางที่ 4-5 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)

ขึ้นงานที่	แนวเชื่อมที่	กระแสเชื่อม (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ความเร็วในการ เชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิที่ ขึ้นงานต่ำสุด °C	อุณหภูมิระหว่าง ขึ้นเชื่อมสูงสุด °C
1	1	110	DCEP	150	150	600
2	1	110	DCEP	150	150	600
3	1	110	DCEP	150	150	600
4	1	110	DCEP	150	150	600

ตารางที่ 4-6 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ชั้นงานที่	แนวเชื่อมที่	กระแสเชื่อม (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ความเร็วในการ เชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิที่ ชั้นงานต่ำสุด (°C)	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด (°C)
1	1	160	DCEP	150	150	600
2	1	160	DCEP	150	150	600
3	1	160	DCEP	150	150	600
4	1	160	DCEP	150	150	600

4.3.1.1.2 ชั้นทดสอบงานเชื่อม (Test Coupon) ที่ได้จากสภาวะทดลองที่ 1

(1) ชั้นงานทดสอบงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.10 ชั้นงานทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 1

(2) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : Pt)

นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบด้วยการตรวจสอบพินิจผิวแนวเชื่อมพอกแข็งไม่พบรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม นำไปตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึมเพื่อยืนยันผล ปรากฏผลไม่พบรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อมเช่นกัน

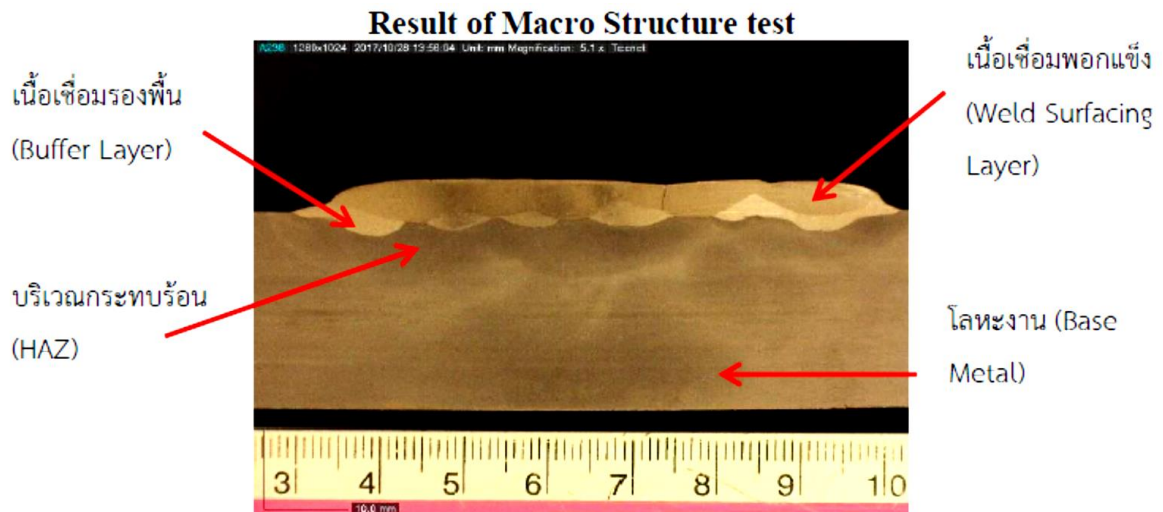


รูปที่ 4.11 ผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมแนวเชื่อมสภาวะที่ 1

4.3.1.2 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-7 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 1

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	UTP 63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 1

จากรูปที่ 4.12 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษา แบ่งออกได้ 4 บริเวณ คือ

1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Unaffected Zone)
2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ)
3. ชั้นแนวเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)
4. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer)

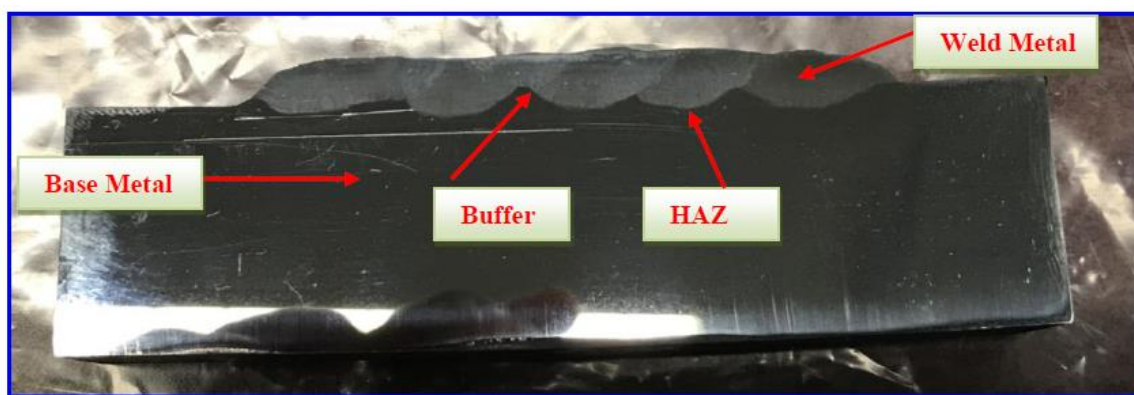
พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จะช่วยเพิ่มการยึดเกาะช่วยลดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง นิยมใช้ลวดเชื่อมที่ให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์หรือโครงสร้างออสเทนไนท์ หลักการเชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้ เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยาต้องการสมบัติจากความแข็งของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมช้ามากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.1.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Reprt : Mircro Structure Test)

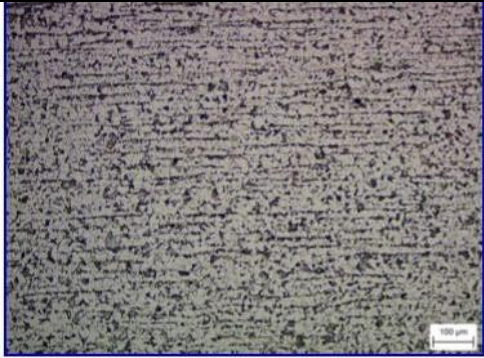
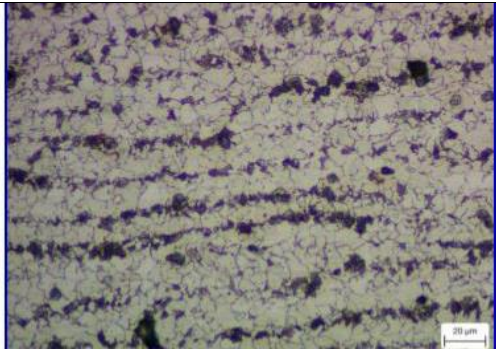
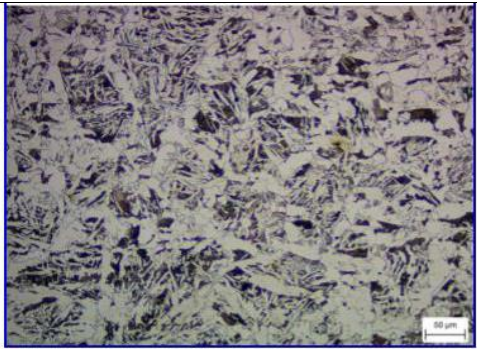
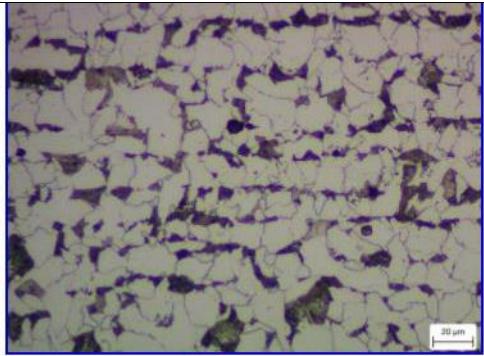
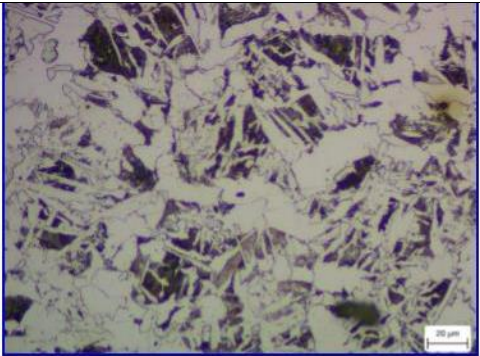
ตารางที่ 4-8 Test Peport : Micro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 1

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September/ 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	UTP 63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



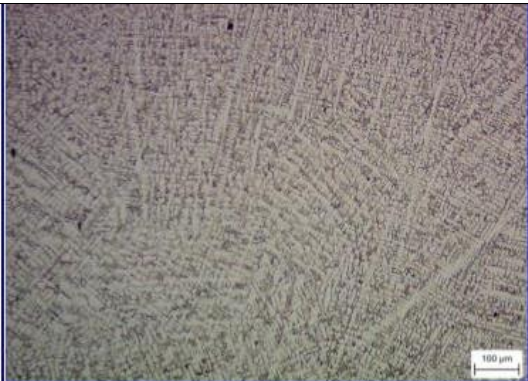
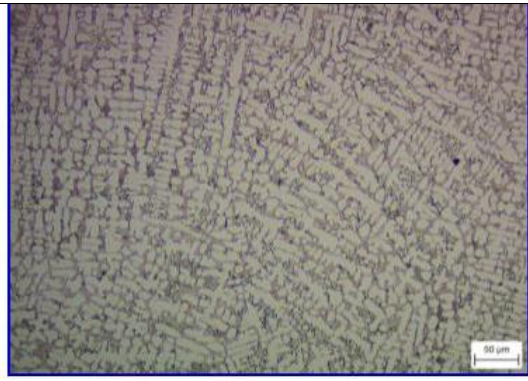
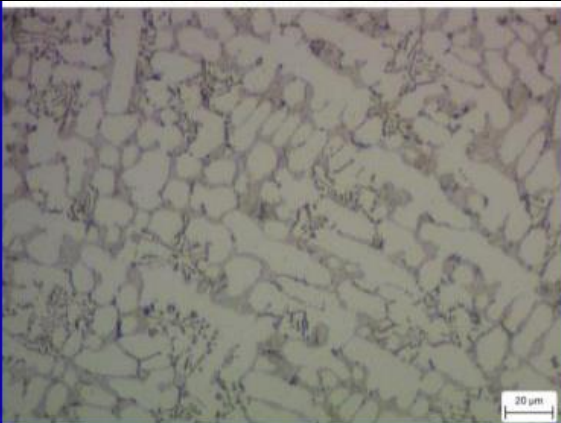
รูปที่ 4.13 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบทดลองเชื่อม สภาวะที่ 1

4.3.1.3.1 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะงานที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Un-affected Zone) ในการเชื่อมทดสอบ สภาวะที่ 1

ชิ้นงาน (Base Metal)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ)
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 100X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 100X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 500X
โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน ASTM A572 Gr.65 มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์และเพิร์ลไลต์ละเอียด พื้นสีขาวคือโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) แถบดำแทรกทั่วไปคือโครงสร้างเพิร์ลไลต์	บริเวณกระทบร้อนได้รับความร้อนสูงเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์และมีอัตราการเย็นตัวเร็วแต่เนื่องจากเหล็กกล้า HSLA มีส่วนผสมธาตุคาร์บอนน้อยเพียง 0.23% ทำให้จะปรากฏโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Fe_3C) เป็นแท่งเข็มสีเทาปรากฏกระจายตามแนวเขตพื้นที่กระทบร้อนไม่มากนักแทรกปะปนอยู่กับ โครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียดเห็นเป็นแถบสีดำ โครงสร้างจุลภาคทั้งสองกระจายอยู่บนโครงสร้างพื้น (Matrix) เฟอร์ไรท์ สีขาว

รูปที่ 4.14 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะงานที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Un-affected Zone) ในการเชื่อมทดสอบ สภาวะที่ 1

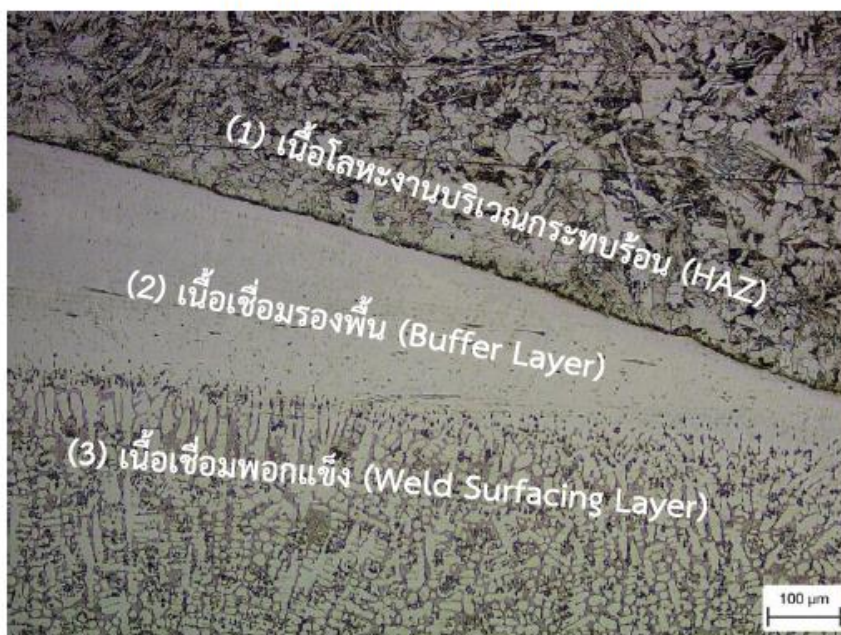
4.3.1.3.2 เปรียบเทียบผลภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมรองพื้นกับ แนวเชื่อมพอกแข็ง

แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer)	แนวเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)
 Buffer UTP63 Magnification 100X	 Weld UTP Ledurit65 Magnification 100X
 Buffer UTP63 Magnification 100X	 Weld UTP Ledurit65 Magnification 200X
เนื้อเชื่อม UTP 63 มีโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์แมงกานีส ปริมาณโครเมียมสูง เพิ่มคุณภาพเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-magnetized) มีความเหนียวแกร่งและจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อถูกแรงกระทำ (Work hardening) ลักษณะโครงสร้างออสเทนไนท์ที่รูปร่างเกรนจะเหมือนแผ่นหินกาบมาเรียงต่อกัน	
 Weld UTP Ledurit65 Magnification 500X	
เนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์และธาตุผสมคาร์ไบด์แข็งซ้อนเป็นโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็งสูงมาก จากภาพถ่ายจะเห็นโครงสร้างพื้น (Matrix) แถบสีขาวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์และธาตุผสมคาร์ไบด์แข็งซ้อน กระจายบนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic Matrix) ที่แข็งและเหนียวแกร่ง (Hard toughness) พื้นสีเทา	

รูปที่ 4.15 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมรองพื้นและบริเวณแนวเชื่อมพอกแข็ง
ในการทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 1

4.3.1.3.3 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 1

UTP Ledurit 65 + UTP63 + HAZ



HAZ : ASTM A572 Gr.65 + Buffer UTP63 + Weld UTP Ledurit65 - Magnification 50X

รูปที่ 4.16 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อน (HAZ) , แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) และแนวเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing layer) – ที่กำลังขยาย 50X

จากรูปที่ 4.16 สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

(1) เนื้อโลหะงานเหล็กกล้าฯ ASTM A572Gr.65 บริเวณกระตบร้อน (HAZ)

ได้รับความร้อนสูงจนเปลี่ยนโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ สามารถละลายธาตุคาร์บอน 0.23% เข้ารวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) บริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วจึงมีคาร์บอนบางส่วนเท่านั้น ที่สามารถรวมตัวกับธาตุเหล็กเป็นสารประกอบคาร์ไบด์เร่งเย็นมาร์เทนไซต์ (Fe_3C) ธาตุคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนสภาพเดิมได้ โครงสร้างเพิร์ลไลท์แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็วเกรนเพิร์ลไลท์จึงไม่มีโอกาสโตเต็มที่จึงได้เพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งและแข็งแรง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นขาวคือโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เห็นเป็นแท่งเข็มสีเทาเล็กน้อยแทรกปะปนอยู่กับโครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลท์ละเอียดเห็นเป็นแถบดำแทรกหนาแน่นสลับทั่วไป และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย จะมีโครงสร้างออสเทนไนท์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

(1) บริเวณเนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จากลวดเชื่อม UTP63

เห็นโครงสร้างจุลภาคออสเทนนิติก แมงกานีส ปริมาณโครเมียมสูง ด้านทานการกัดกร่อนสูงไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-magnetized) สังเกตเห็นเป็นพื้นเทา เป็นโครงสร้างเหนียวแกร่ง ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม มีสมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening)

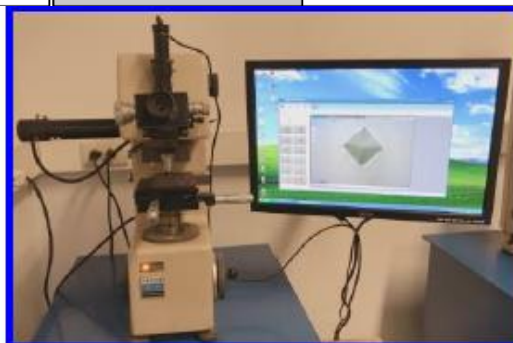
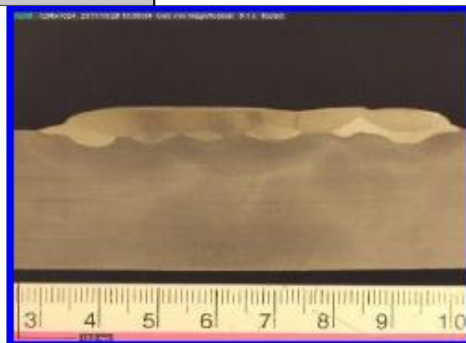
(2) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing layer) ลวดเชื่อม UTP LEDURIT65

ให้โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็นโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex Carbide) มองเห็นเป็นแถบสีขาวกระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) พื้นสีเทาที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย โครงสร้างจุลภาคจะปรากฏโครงสร้างออสเทนไนต์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex Carbide) เป็นโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็งสูงมาก ด้านทานการครูดถูสูง (Highly abrasion resistance)

4.3.1.4 รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาคขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสถานะที่ 1

ตารางที่ 4-9 Test Report : Micro Vicker Testing : สถานะที่ 1 : Heating control : Preheat 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	UTP 63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25 °C, 48% RH



รูปที่ 4.17 การทดสอบความแข็ง Micro Vickers Test ชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สถานะที่ 1

ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่1 เปรียบเทียบระหว่าง โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระทบร้อน (HAZ), เนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) และเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) : UTP 63 + UTP Ledurit 65 Preheat 150°C

หน่วย HV (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
UTP LEDURIT65	458.6 (46.0)	456.6 (45.9)	482.7 (47.9)	479.7 (47.7)	474.9 (47.3)	470.5 (46.96)
Item	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	ค่าเฉลี่ย
UTP63	254.4 (23.1)	246.2 (21.6)	254.5 (23.1)	239.1 (20.2)	232.4 (20.0)	245.32 (21.6)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572Gr.50	224.2 (20.0)	246.2 (21.6)	232.5 (20.0)	243.6 (21.1)	232.5 (20.0)	235.80 (20.54)
Item	Base	Base	Base	Base	Base	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572Gr.50	198.9 (14.0)	202.1 (16.0)	196.6 (13.5)	201.0 (16.0)	201.9 (16.0)	200.1 (15.1)

ความแข็งใช้อธิบายสภาพหรือสมบัติของวัสดุในการต้านแรงกระทำทางกลที่ จะทำให้เกิด การเปลี่ยนรูปทรงหรือขนาดอย่างถาวร หน่วยความแข็งที่ใช้ในการทดสอบ

จากตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่1 จะพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) เหล็กกล้า HSLA มาตรฐาน ASTM A572 Gr.65 ปริมาณคาร์บอน 0.23% ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 200.1 HV (15.1 HRC) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 235.8 HV (21.00 HRC) ความแข็งแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 35.7 HV (5.9 HRC) ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก ปกติเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลาง $\geq 0.3-0.8\%$ ถ้าไม่ควบคุมอัตราการเย็นของแนวเชื่อมให้ช้าๆ บริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ) จะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite : Fe_3C) ซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุดถึง 700HB (64 HRC หรือ 800HV) แสดงให้เห็นว่าจาก การทดลองเชื่อมในสภาวะที่ 1 บริเวณผลกระทบร้อน (Base metal) ยังคงโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์และ เพิร์ลไลต์ละเอียดแทรกอยู่หนาแน่นมากกว่าเนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A 572 Gr.65 บริเวณที่ไม่ได้รับ ผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Un-affected Zone) การที่โลหะงานปกติและบริเวณกระทบร้อน จากการเชื่อม (HAZ) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน แปลว่า แสดงถึงความปลอดภัยที่จะไม่เกิดการแตกร้าวใต้ แนวเชื่อม (No underbead cracking)

ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) ปกติเนื้อเชื่อมไม่มีโลหะงานละลายผสม (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP 63 ก่อนใช้งานมีค่าความแข็งมาตรฐานของเนื้อเชื่อมที่ไม่มีโลหะงานผสม (Weld un-dilution) จากผู้ผลิตกำหนดไว้ประมาณ 200 HB (15 HRC หรือ 199HV) เป็นลวดเชื่อมกลุ่มโครงสร้างจุลภาคอสเทนนิติกแมงกานีส โครเมียมสูง เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening) จากการใช้งานเพิ่มไปสูงได้ถึง 350 HB (38 HRC หรือ 361 HV) จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อมรองพื้นที่ได้ จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 1 ยังไม่ผ่านการใช้งานเท่ากับ 245.32 HV (21.6 HRC) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนด เนื่องจากมีเนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลายละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution of weld buffer layer)

สำหรับชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) ลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65 เป็นลวดเชื่อมให้เนื้อเชื่อม (Weld metal) กลุ่มโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide) มีค่าความแข็งเนื้อเชื่อม (Weld metal) ตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดดังนี้

ความแข็งเนื้อเชื่อมบริสุทธิ์ (Pure Weld Deposit)	ประมาณ 65 HRC
เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้า ปริมาณคาร์บอน (C) 0.15%	ประมาณ 58 HRC
เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้าแมงกานีสสูง (High Mn-steel)	ประมาณ 55 HRC

ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 1 ด้วยลวดเชื่อม UTP LEDURIT 65 ทับแนวเชื่อมรองพื้น UTP 63 ซึ่งให้เนื้อเชื่อมมีสมบัติเป็นเหล็กกล้าอสเทนนิติกแมงกานีสสูง พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อม UTP LEDURIT 65 ที่ได้ คือ 470.5 HV (46.96 HRC) ซึ่งความแข็งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้มาก เนื่องจากการเชื่อมพอกทับแนวเดียวจึงมีเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) UTP 63 หลอมละลายละลายขึ้นมาเจือผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Dilution of weld surfacing) จำนวนมากทำให้เนื้อเชื่อมพอกแข็งอ่อนตัวลง

4.3.1.5 รายงานผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 1

ในทางวัสดุศาสตร์และโลหะวิทยา ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานและความต้านทานต่อการเสียรูปก่อนการแตกหัก หนึ่งในคำจำกัดความที่นิยมใช้ทั่วไป ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือจำนวนพลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่วัสดุที่สามารถดูดกลืนพลังงาน (Absorb) ก่อนแตกหักหรืออาจกล่าวได้ว่า ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุเมื่อได้รับความเค้น (Stressed) เป็นค่าความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว (Strength and Ductility) ของวัสดุ

ความเหนียวแกร่ง (Toughness) สามารถกำหนดได้จากค่าพลังงานกลรวมใต้กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ที่ทำให้วัสดุแตกหักเสียรูปถาวรต่อหน่วยปริมาตรวัสดุ สามารถกำหนดความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\text{energy}}{\text{value}} = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon$$

เมื่อกำหนดให้

ϵ_f = ความเครียดที่จุดแตกหัก (Strain upon failure)

ϵ = ความเครียด (Strain)

σ = ความเค้น (Stress)

คำจำกัดความที่อาจใช้กันอีกคำหนึ่งคือ ความเหนียวแกร่ง (Toughness) หมายถึงความสามารถดูดซับพลังงานกลที่จุดแตกหักของของวัสดุ คือพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุ

4.3.1.5.1 ความเหนียวแกร่งและความแข็งแรง (Toughness and Strength)

ความเหนียวแกร่ง (Toughness) หมายถึงเนื้อเชื่อมที่จะใช้งานได้จะต้องมีทั้งค่าความแข็งแรง (Strong) และค่าความเหนียว (Ductility) คู่กัน ค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) มากหรือน้อยพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain diagram) ตัวอย่างวัสดุเปราะเช่นเซรามิคจะมีความแข็งแรงแต่จะมีความเหนียวต่ำมาก ในทางกลับกันวัสดุที่มีความเหนียวสูง (Very ductile material) มักจะมีความแข็งแรงต่ำและความทนทานในการใช้งานต่ำ ดังนั้นวัสดุที่ทนทานต่อการใช้งานจะต้องสามารถรับความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ได้สูง กล่าวได้ว่าความแข็งแรง (Strength) จะชี้ให้เห็นว่าวัสดุสามารถรับแรง (Load) ได้เท่าไรขณะที่ความเหนียวแกร่ง (Toughness) จะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุได้มากเท่าไรก่อนที่จะแตกหักเสียหาย (Rupturing)

4.3.1.5.2 หน่วยของความเหนียวแกร่ง (Unit of toughness)

การทดสอบแรงดึงหาความเหนียวแกร่ง หรือ Tensile toughness คือค่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเสียรูปถาวร (Deformation energy, U_T) หรือค่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเสียรูปถาวร (Deformation energy, U_T) วัสดุามีหน่วยเป็น จูล ต่อ ลูกบาศก์เมตร ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$) เป็นหน่วยเอสไอ (SI system) และในหน่วยวัดอังกฤษมีหน่วยเป็น นิ้ว-ปอนด์-แรง ต่อลูกบาศก์นิ้ว ($\text{in}\cdot\text{lbf}\cdot\text{in}^{-3}$) หน่วยวัด US Customary Unit $1.00 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-3} \simeq 0.000145 \text{ in}\cdot\text{lbf}\cdot\text{in}^{-3}$ and $1.00 \text{ in}\cdot\text{lbf}\cdot\text{in}^{-3} \simeq 6.89 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$

ในหน่วยวัดระบบเอสไอหน่วยของแรงดึงความเหนียวแกร่ง (Tensile toughness) สามารถคำนวณโดยใช้พื้นที่ข้างใต้ของกราฟความเค้น – ความเครียด (Stress- strain หรือ σ - ϵ curve) โดยกำหนดให้

$$U_T = \text{Area underneath the stress-strain } (\sigma-\epsilon) \text{ curve} = \sigma \times \epsilon$$

$$U_T = \text{Pa} \times \Delta L/L = (\text{N}\cdot\text{m}^{-2})\cdot(\text{unitless})$$

$$U_T = \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$U_T = \text{J}\cdot\text{m}^{-3}$$

ค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุ (Charpy Impact value) เป็นค่าพลังงานต่อหน่วยพื้นที่บริเวณรอยบาก มีหน่วยเป็น $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ (J/cm^2) หรือ ฟุต-ปอนด์ หรือ จูล (Joule : J)

จูล (Joule : J) เป็นหน่วยที่ใช้บอกปริมาณงานที่ทำ หรือ พลังงานที่ต้องการออกแรงจำนวน 1 นิวตัน เป็นระยะทาง 1 เมตร หรืออาจเรียกปริมาณงานที่ได้อีกอย่างหนึ่งว่า นิวตัน-เมตร ($\text{N}\cdot\text{m}$) และสามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากระทบชิ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับชิ้นทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วนจะส่งผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงรูปวัสดุจนแตกขาดถาวรซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแกร่งจะมีค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายการรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก จึงเป็นรายงานค่าพลังรับแรงกระแทกของวัสดุที่นำมาทำเป็นชิ้นทดสอบนั่นเอง และคำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกันเรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแรงกระแทกขึ้นเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 1 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 4-11 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 1 : Preheating control : Before 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	Preheat 100 °C and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	UTP 63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.18 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 1

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี มาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ชิ้นทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 × 10 มม บาร่องตัววัดตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มม ก้นร่องวีมีรัศมีความโค้ง 0.25 มม ชิ้นทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับชิ้นทดสอบห่างกัน 40 มม ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มม ชิ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางชิ้นทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้านคล้ายกับการกดตัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักงอชิ้นงานตามแนวร่องที่บาก

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 1 มาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

- (1) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3
- (2) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffering) จำนวน 3 ชิ้นคือ B1, B2 และ B3 ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4-12 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 1

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below Notch 8± 0.05 (mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.01	10.02	8.01	55.01	45°	68	84.3
W2	10.01	10.03	8.01	55.01	45°	76	
W3	10.03	10.03	8.02	55.04	45°	73	
Buffer-B1	10.01	10.01	8.01	55.02	45°	237	223
Buffer-B2	10.00	10.00	8.01	55.04	45°	240	
Buffer-B3	10.00	10.01	8.00	55.01	45°	192	

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance critira) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ > 60 จูล (J) ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT 65 บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ เว้นแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ โดยหลักการเชื่อมพอกแข็งเนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ UTP LEDURIT 65 จะแข็งแรง มีค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ต่ำกว่าเนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีส UTP 63 ดังนั้นถ้าผลการทดลองหาค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT 65 สูงกว่าค่าต่ำสุด ของค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 จึงสรุปได้ว่าผ่านขอบเขตการยอมรับตามบริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อม การวิเคราะห์ผลการทดสอบ สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4-13 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่1

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	80	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W2	83	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W3	90	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
Buffer-B1	237	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B2	240	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B3	192	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted

ค่า Impact Energy (J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld surfacing) ชั้นทดสอบ W1, W2 และ W3 UTP LEDURIT 65 ค่าสูง > 60 J ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับขั้นต่ำของเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffer : B1, B2 และ B3) UTP63 ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับทุกจุดที่ทำการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer : B1, B2 และ B3) เท่ากับ 223 จูล (J) และ เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing layer : W1, W2 และ W3) เท่ากับ 84.3 จูล (J) สูงกว่า 60 จูล (J) ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ทั้งสองชั้นแนวเชื่อม

4.3.2 การทดลองเชื่อมพอกแข็งสถานะที่ 2 : ไม่ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (No-preheat)

การเชื่อมขึ้นงาน สถานะที่ 2 วัสดุเหล็กกล้าเกรด ASTM A572Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มม ไม่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนการเชื่อม (No-preheat) ทำการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้มเครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม ยาว 400 มม กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC+/AC 100 - 130 Amps. เป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13 : 2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes แล้วทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทกด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้มเครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม ยาว 450 มม กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC+/AC 140 - 200 Amps. เป็นลวดเชื่อมจัดอยู่ในกลุ่มมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13 : 2000 - EFeCr-EX Series Electrodes ปฏิบัติการเชื่อมที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิห้อง (Ambient Temp)

4.3.2.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สถานะที่ 2 : No-preheating

4.3.2.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สถานะที่ 2 จำนวน 4 ชั้นทดสอบ

ตารางที่ 4-14 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมรองพื้น (Buffer layer)

ชั้นงานที่	แนวเชื่อม ชั้นที่	กระแส เชื่อม (A)	ขั้วกระแสไฟ เชื่อม	ความเร็วเฉลี่ยเดิน ลวดเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิชั้นงาน เริ่มต้นเชื่อม(°ซ)	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด (°C)
1	1	110	DCEP	150	≥27	600
2	1	110	DCEP	150	≥27	600
3	1	110	DCEP	150	≥27	600
4	1	110	DCEP	150	≥27	600

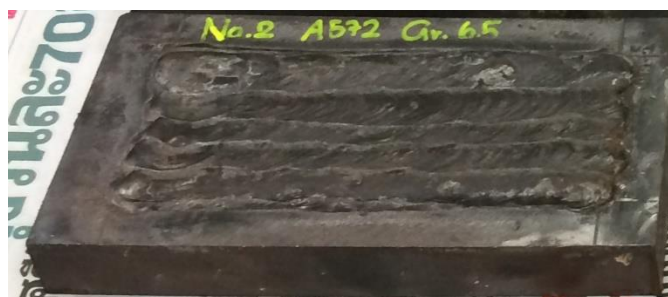
ตารางที่ 4-15 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมพอกแข็ง (Hardsurfacing)

ชั้นงานที่	แนวเชื่อม ชั้นที่	กระแส เชื่อม (A)	ขั้วกระแสไฟ เชื่อม	ความเร็วเฉลี่ยเดิน ลวดเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิชั้นงาน เริ่มต้นเชื่อม (°C)	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด (°C)
1	1	160	DCEP	150	≥27	600
2	1	160	DCEP	150	≥27	600
3	1	160	DCEP	150	≥27	600
4	1	160	DCEP	150	≥27	600

หมายเหตุ อุณหภูมิบริเวณโดยรอบ (Ambient Temperature) คืออุณหภูมิโดยรอบของสถานที่ ๆ ทำการทดลองเชื่อมชั้นงานพอกแข็ง มาตรฐานที่ใช้กันทั่วโลกอยู่ที่ ≥ 20 องศาเซลเซียส ในการทดลองเชื่อมในประเทศไทยใช้อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient Temperature) $\geq 27^{\circ}\text{C}$

4.3.2.1.2 ชั้นทดสอบงานเชื่อม (Test Coupon) ที่ได้จากสภาวะทดลองที่ 2

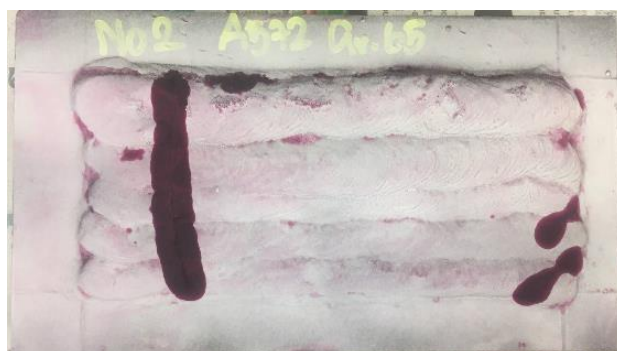
- (1) ชั้นงานทดสอบงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.19 ชั้นงานทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 2

- (2) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

เมื่อชั้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง นำชั้นงานไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบพินิจผิวแนวเชื่อมพอกแข็งไม่พบรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม จากนั้นจึงนำชั้นงานเชื่อมไปทำการตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึมเพื่อยืนยันผล ปรากฏว่าพบรอยแตกร้าวตัดขวางกับความยาวกับความยาวแนวเชื่อมที่ใกล้จุดเริ่มต้นแนวเชื่อม และพบรูพรุน (Porosity) ที่แอ่งปลายสุดแนวเชื่อม (Crater) และตามผิวแนวเชื่อมอีกเล็กน้อย



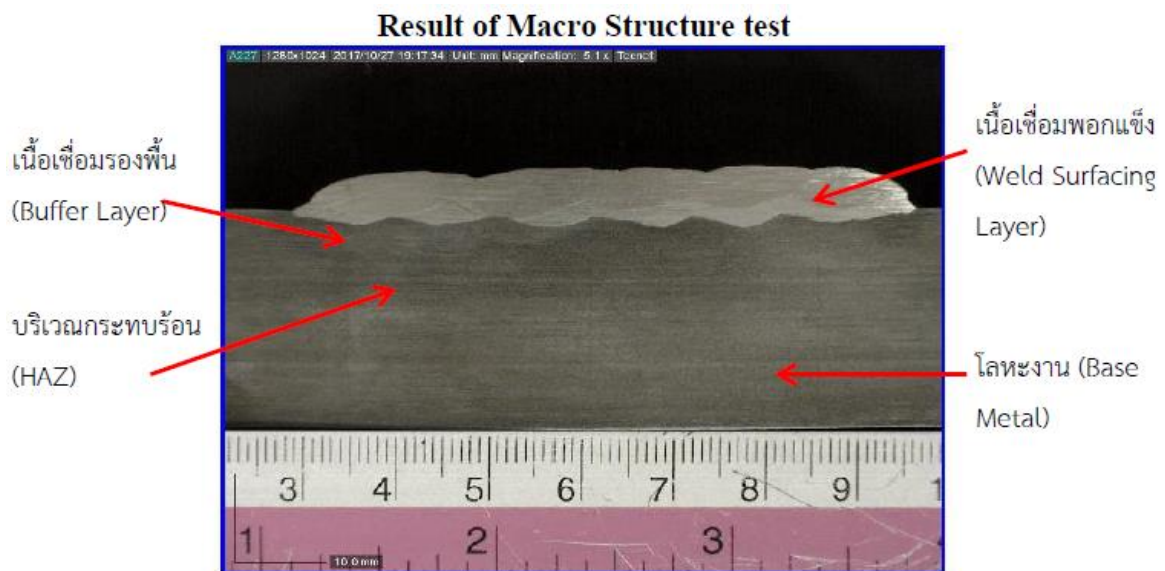
รูปที่ 4.20 การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม สภาวะที่ 2

การแตกร้าวที่ผิวหน้าเนื้อเชื่อมพอกแข็ง ถือเป็นเรื่องปกติธรรมดา เนื่องจากเนื้อเชื่อมพอกแข็งมีความเค้นตกค้างในเนื้อเชื่อมสูงและหดตัวรุนแรง การแตกร้าวที่ผิวหน้าเนื้อเชื่อมพอกแข็งเรียกว่า Check-cracking จะเกิดกับเนื้อเชื่อมตระกูลลวดเชื่อมโลหะคาร์ไบด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ ส่วนเนื้อเชื่อมออสเทนนิติก (Austenitic) และมาร์เทนซิติก (Martensitic) จะไม่เกิด Check-cracking ถ้าสามารถปฏิบัติงานตามขั้นตอนกำหนดการเชื่อม (WPS) ที่ถูกต้อง ลักษณะการแตกร้าวเนื้อเชื่อมจะแตกร้าวตั้งฉากกับความยาวแนวเชื่อม ยาว 3/8 นิ้ว ถึง 2 นิ้ว ลึกลอดความหนาเนื้อเชื่อมและจะไปหยุดแตกร้าวที่ผิวหน้างาน ปรากฏการณ์ Check-cracking เป็นการช่วยคลายความเค้นตกค้างในเนื้อเชื่อม ซึ่งถือเป็นเรื่องปกติ แต่จะต้องไม่แตกร้าวลามเข้าไปในเนื้อโลหะงาน มิฉะนั้นจะถือเป็นอันตรายอย่างยิ่ง ดังนั้นกรณีที่โลหะงาน (Base metal) มีความไวต่อการแตกร้าวร้อนสูง (Sensitivity cracking) จำเป็นต้องมีการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) เพื่อป้องกันโลหะงานแตกร้าว ไม่ควรทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกแข็งกับโลหะงานที่มีความไวต่อการแตกร้าวร้อนสูงโดยตรง

4.3.2.2 รายงานผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-16 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 2 : No-preheating Control

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	No Preheat and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	UTP 63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 2

จากรูปที่ 4.21 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษา แบ่งออกได้ 4 บริเวณ คือ

1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Unaffected Zone)
2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ)
3. ชั้นแนวเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)
4. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer)

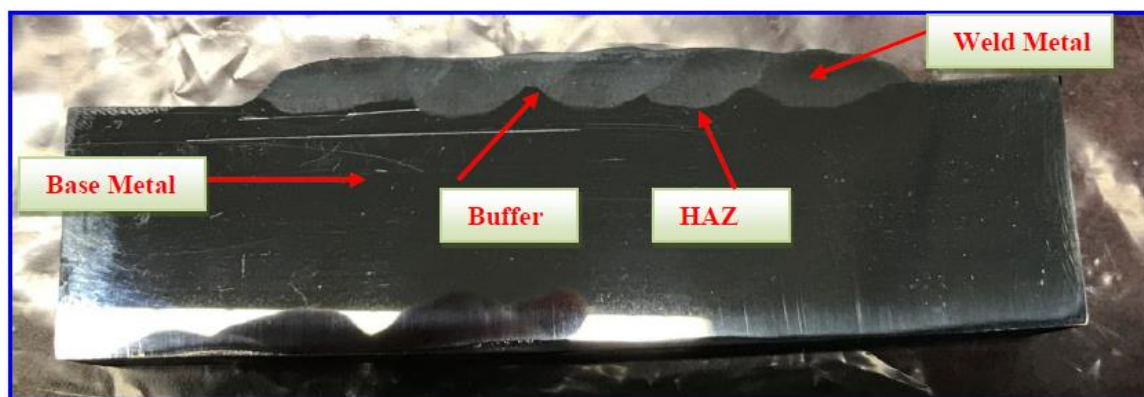
พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จะเพิ่มการยึดเกาะช่วยลดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง นิยมใช้ลวดเชื่อมที่ให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไลท์หรือโครงสร้างอสเทนไนต์ หลักการเชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้ เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยาต้องการสมบัติจากความแข็งของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมช้ามากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.2.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Report : Micro Structure Test

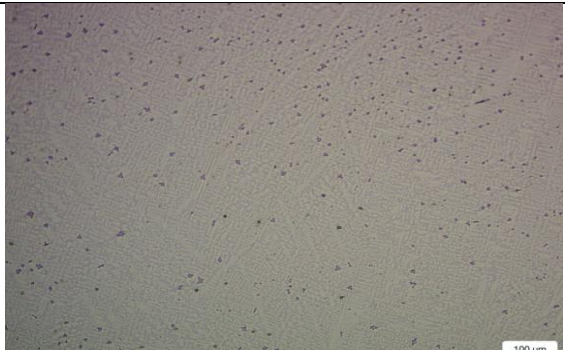
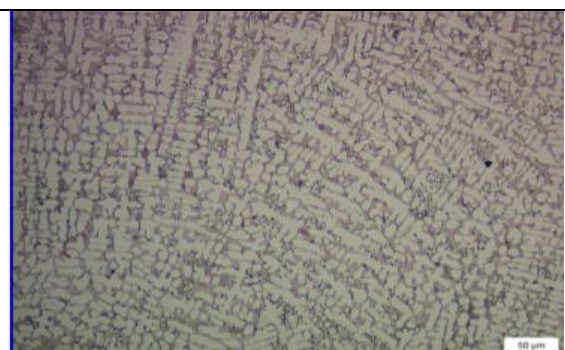
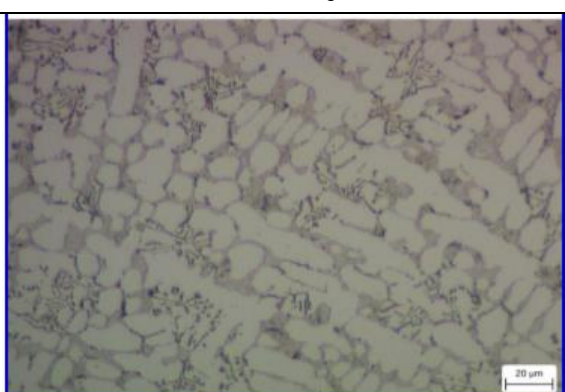
ตารางที่ 4-17 Test Report : Micro Vicker Testing : สภาวะที่ 2 : Heating Control : No-preheat and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September/ 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	No-preheat and and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	UTP 63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



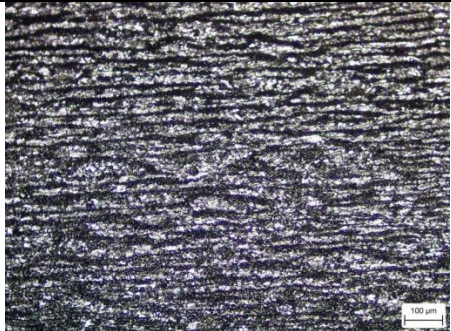
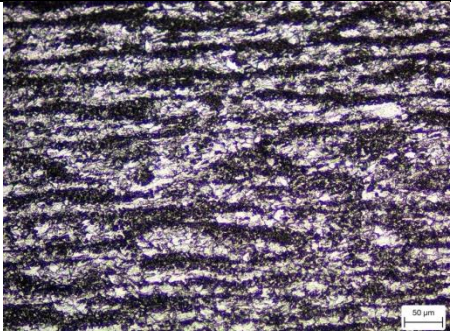
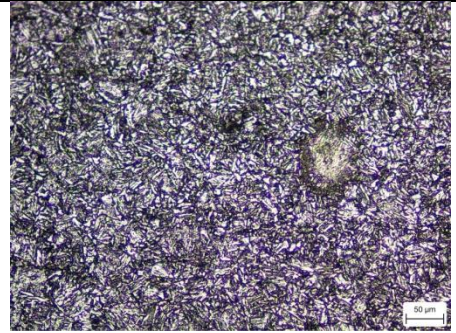
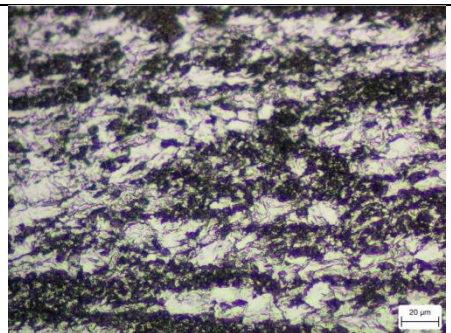
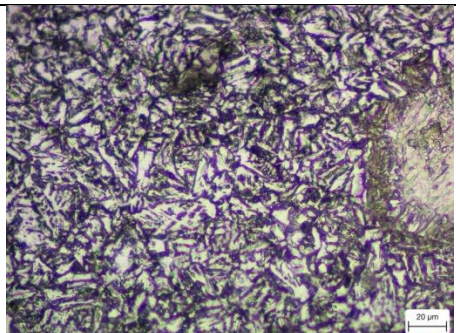
รูปที่ 4.22 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบทดลองเชื่อม สภาวะที่ 2

4.3.2.3.1 เปรียบเทียบผลภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) กับแนวเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer)	แนวเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)
 Buffer UTP63 Magnification 100X	 Weld UTP Ledurit 65 Magnification 100X
 Buffer UTP63 Magnification 200X	 Weld UTP Ledurit 65 Magnification 200X
เนื้อเชื่อมUTP 63 มีโครงสร้างจุลภาคอสเทนไนท์แมงกานีส มีความเหนียวและจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อถูกแรงกระทำ (Work hardening) มองเห็นลักษณะโครงสร้างอสเทนไนท์ เป็นสีเทา รูปร่างเกรน มีลักษณะเหมือนแผ่นหินกาบเล็กๆเรียงต่อกัน	 Weld UTP Ledurit 65 Magnification 500X
Weld UTP Ledurit 65 ลักษณะโครงสร้างพื้น (Matrix) โครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อนจะปรากฏเห็นโครเมียมและธาตุผสมให้คาร์ไบด์เชิงซ้อนแทรกเป็นแถบสีขาวกระจายบนโครงสร้างพื้นอสเทนนิติก (Austenitic matrix) ที่แข็งและเหนียวแกร่ง (Hard toughness)เห็นเป็นสีเทา Weld UTP Ledurit 65 มีโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็งแรงสูงมาก	

รูปที่ 4.23 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมและการเชื่อมโดยไม่ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (No-preheat) เชื่อมรองพื้นด้วยลวดเชื่อม UTP S63 มาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ + UTP Ledurit 65 มาตรฐาน DIN8555 : E10-UM-65-GRZ

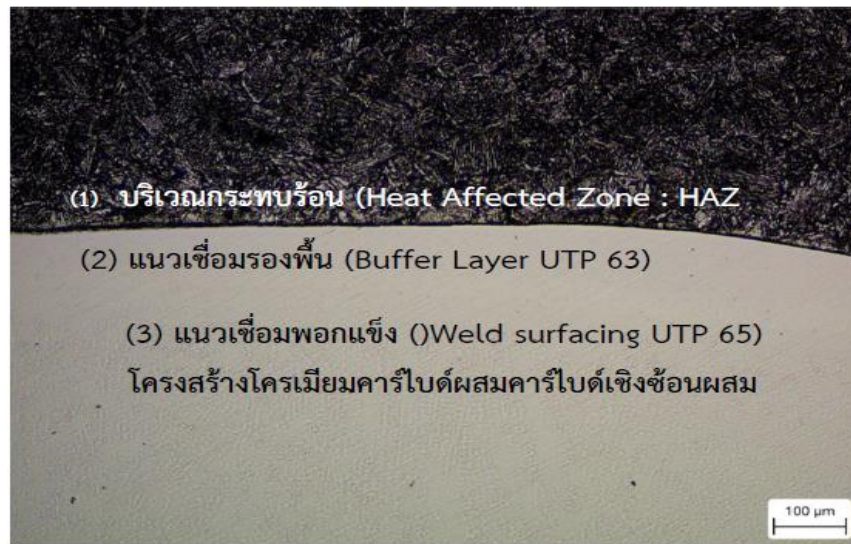
4.3.2.3.2 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่างเนื้อโลหะงาน ASTM A572Gr.65 กับ บริเวณ กระทบร้อน (HAZ)

Base Metal : ASTM A572 Gr.65	HAZ : ASTM A572 Gr.65
 Base Metal : ASTM A572Gr.65 Magification 100X	 HAZ : ASTM A572Gr.65 Magification 100X
 Base Metal : ASTM A572Gr.65 Magification 200X	 HAZ : ASTM A572Gr.65 Magification 200X
 Base Metal : ASTM A572Gr.65 Magification 500X	 HAZ : ASTM A572Gr.65 Magification 500X
โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้า HSLA - Base Metal - ASTM A572Gr65 มีโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (α-Ferrite matrix) ปรากฏเป็นพื้นสีขาว และมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์แถบสีดำและเพิร์ลไลต์ละเอียด กระจายทั่วไป กระบวนการผลิตโดยวิธีรีดร้อนและอบคืนตัว (Rolled-Thermomachanic Quenched and Tempered) ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงทั่วไป	โครงสร้างจุลภาค HAZ-ASTM A572Gr65 มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์น้อยมากเห็นเป็นเส้นสีเทาลักษณะคล้ายกับเข็มเนื่องจากมีปริมาณส่วนผสมของธาตุคาร์บอน 0.23% น้อยละลายเข้าไปในโครงสร้างออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิสูง และมีส่วนน้อยที่รวมตัวเป็นสารประกอบคาร์ไบด์โครงสร้างมาร์เทนไซต์ เมื่อเย็นตัวอย่างรวดเร็วลงมาที่อุณหภูมิปกติ ส่วนใหญ่จึงมีโครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลต์ละเอียดหรือเรียกว่าเบนไนท์ (Bainite) แถบดำเล็กๆแทรกทั่วไปบนโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ที่เห็นเป็นสีขาว จุดต่างขนาดใหญ่เป็นความผิดพลาดในการสร้างภาพหรือกั๊กกรด

รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม จากการเชื่อมทดสอบในสภาวะที่ 2

4.3.2.3.3 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดสอบที่ 2

UTP Ledurit65 + UTP63 + HAZ



UTP Ledurit 65 + UTP63 + HAZ Magnification 50X

รูปที่ 4.25 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมรองพื้น UTP 63 และเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT 65 และ บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 ในการทดสอบการเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 2

จากรูปที่ 4.25 เนื่องจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคมีกำลังขยายต่ำเพียง (500 X) สามารถแปลโครงสร้างจุลภาคไม่ชัดเจน อธิบายได้ดังนี้

(1) เนื้อโลหะงานหลักกล้าฯ ASTM A572Gr.65 บริเวณกระทบร้อน (HAZ)

ได้รับความร้อนสูงกว่าจุดวิกฤติจนโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ที่สามารถละลายธาตุคาร์บอน 0.23% เข้ารวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ได้ทั้งหมดบริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว จะมีคาร์บอนบางส่วนที่สามารถรวมตัวกับธาตุเหล็กเป็นสารประกอบคาร์ไบด์เร่งเย็นมาร์เทนไซต์ (Fe_3C) ธาตุคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนสภาพเดิมได้โครงสร้างเพิร์ลไลต์แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็วเกรนเพิร์ลไลต์จึงไม่มีโอกาสโตเต็มที่จึงได้เพิร์ลไลต์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งและแข็งแรง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นขาวคือโครงสร้างพื้น (Matrix) เฟอร์ไรท์ มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เห็นเป็นแท่งเข็มสีเทาเล็กน้อยแทรกปะปนอยู่กับโครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียดเห็นเป็นแถบดำแทรกสลับทั่วไป และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลายจะมีโครงสร้างออสเทนไนท์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

(2) บริเวณเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) จากลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP 63

จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์แมงกานีส ส่วนผสมโครเมียมสูง มีความเหนียวแกร่ง ความต้านทานการกัดกร่อนสูง ลักษณะภาพที่เห็นเป็นพื้นสีเทาจาง

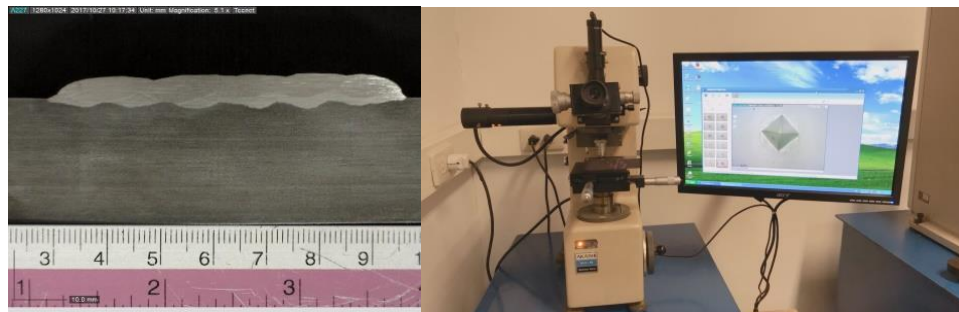
(3) บริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardfacing)

จะมีโครงสร้างจุลภาคหลักโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium Carbide) และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex Carbide) ลักษณะสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) จะมีลักษณะเป็นแถบสีขาวกระจายบนโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์แมงกานีส (Austenitic matrix) สีเทา

4.3.2.4 รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาค ขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 2

ตารางที่ 4-18 Test Report : Micro Vicker Testing : สภาวะที่ 2 : No-preheating Control

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW(DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600°C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	UTP S63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25 °C, 48% RH



รูปที่ 4.26 การทดสอบความแข็ง Macro Vicker Test ขึ้นทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 2

ตารางที่ 4-19 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่2 เปรียบเทียบระหว่าง โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระทบร้อน (HAZ), เนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) และเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) : UTP63 + UTP Ledurit 65 No-preheat

หน่วย HV (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
UTP LEDURIT 65	541.4 (51.8)	544.7 (52.0)	547.9 (52.2)	575.9 (53.9)	568.8 (53.5)	555.74 (52.68)
Item	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	ค่าเฉลี่ย
UTP S63	293.6 (29.0)	291.0 (28.6)	289.7 (28.5)	284.6 (27.8)	265.4 (24.9)	284.86 (27.76)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.50	214.9 (20.0)	212.4 (20.0)	222.6 (20.0)	213.2 (20.0)	214.9 (20.0)	215.60 (20.00)
Item	Base	Base	Base	Base	Base	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.50	212.4 (17.0)	208.4 (16.0)	218.2 (18.0)	216.6 (17.0)	206.8 (16.0)	214.48 (16.80)

ชิ้นงานทดสอบเชื่อมสภาวะที่ 2 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) ที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม มีค่าความแข็งเฉลี่ย 214.48 HV (16.80 HRC) กับบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 215.60 HV (17.50 HRC) ซึ่งเป็นความแข็งระดับปกติของโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์ และเพิร์ลไลต์ละเอียด เนื่องจากเหล็กกล้า HSLA มาตรฐาน ASTM A572 Gr.65 มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนน้อยเพียง 0.23% C ไม่เพียงพอที่จะรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) เกิดเป็นสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์หรือมาร์เทนไซต์ได้ การที่ค่าความแข็งโลหะงานบริเวณไม่ได้ผลกระทบร้อน (Un-affected zone) กับโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ) มีค่าความแข็งไม่แตกต่างกันมากนักจึงมีความปลอดภัยที่จะไม่เกิดการแตกร้าใต้แนวเชื่อม (No underbead cracking)

ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) ปกติเนื้อเชื่อม (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP 63 เป็นลวดเชื่อมกลุ่มโครงสร้างจุลภาคออสเทนนิติกแมงกานีส โครเมียมสูง จะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening) ดังนั้นค่าความแข็งเนื้อเชื่อมจากลวดเชื่อมไม่มีโลหะงานปนผสมเข้ามาปน (Un-dilution) ก่อนใช้งานจะมีค่าความแข็งที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ประมาณ 200 HB (15 HRC หรือ 199 HV) และเมื่อใช้งานไปจะเกิดความแข็งเพิ่มขึ้นจากการใช้งานขึ้นไปถึงได้ถึง 350 HB (38 HRC หรือ 361 HV) จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่2 พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้ คือ 284.86 HV (27.76 HRC) สูงกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนด เนื่องจากมีเนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ละลายละลายขึ้นมาเจือปนผสมในเนื้อเชื่อมรองพื้น (Dilution of weld buffer layer) สำหรับชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) ปกติลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65

เป็นลวดเชื่อมให้เนื้อเชื่อม (Weld metal) กลุ่มโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ มีค่าความแข็งตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดดังนี้

ความแข็งเนื้อเชื่อมบริสุทธิ์ (Pure Weld Deposit)	ประมาณ (approx.) 65 HRC
เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้า ปริมาณคาร์บอน (C) 0.15%	ประมาณ (approx.) 58 HRC
เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้าแมงกานีสสูง (High Mn-steel)	ประมาณ (approx.) 55 HRC

ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 2 พบว่าค่าความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) เฉลี่ยที่ได้ คือ 555.74 HV (52.68 HRC) ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ เนื่องจากการเชื่อมพอกทับแนวเดียวจึงมีเนื้อเชื่อมรองรับ (Weld buffer layer) UTP 63 โครงสร้างออสเทนนิติกแมงกานีสหลอมละลายเข้ามาเจือผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Dilution of weld surfacing) มาก ทำให้ความแข็งเนื้อเชื่อมด้อยคุณภาพลง

4.3.2.5 รายงานผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 2

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากระทบชิ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับชิ้นทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วนจะส่งถ่ายผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนรูปวัสดุ จนแตกขาดถาวรซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแกร่งจะมีค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย การรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก คำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกันเรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแรงกระแทกชิ้นเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 2 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 4-20 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 2 : No-preheating control : and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No.:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	UTP 63 + UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.27 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 2

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีมาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ชิ้นทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 × 10 มิลลิเมตร บากร่องตัววัดตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มิลลิเมตร ก้นร่องวีมีรัศมีความโค้ง 0.25 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับชิ้นทดสอบห่างกัน 40 มิลลิเมตร ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางชิ้นทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้านคล้ายกับการกดดัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักงอชิ้นงานตามแนวร่องที่บาก

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 2 มาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

- (1) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3
- (2) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffering) จำนวน 3 ชิ้นคือ B1, B2 และ B3

ตารางที่ 4-21 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 2

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below notch8± 0.05 (mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.01	10.02	8.01	55.01	45°	80	85.6
W2	10.01	10.03	8.01	55.01	45°	84	
W3	10.03	10.03	8.02	55.04	45°	93	
Buffer-B1	10.01	10.01	8.01	55.02	45°	237	216.33
Buffer-B2	10.00	10.00	8.01	55.04	45°	240	
Buffer-B3	10.00	10.01	8.00	55.01	45°	192	

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance critira) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ > 60 จูล (J) ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT65 บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ เว้นแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ โดยหลักการเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ UTP LEDURIT 65 แข็งเปราะ จะมีค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ต่ำกว่าเนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีส UTP63 ดังนั้นถ้าผลการทดลองหาค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT65 สูงกว่า ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) เนื้อเชื่อมรองพื้น UTP63 จึงสรุปได้ว่าผ่านขอบเขตการยอมรับตามบริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อม ผลการทดสอบวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4-22 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่ 2

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	80	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W2	84	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W3	93	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
Buffer-B1	237	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B2	240	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B3	192	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted

จากผลการทดสอบแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld surfacing) UTP ขึ้นทดสอบ W1, W2 และ W) มีค่าสูง > 60 J ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับขั้นต่ำของเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffer : B1, B2 และ B3) UTP63 ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับ (Accepted)

ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) เนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer : B1, B2 และ B3) เท่ากับ 216.33 จูล, (J) และเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing layer : W1, W2 และ W3) เท่ากับ 85.6 จูล (J) สูงกว่า 60 จูล (J) ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ทั้งสองชั้นแนวเชื่อม

4.3.3 การทดลองเชื่อมพอกแข็งสถานะที่ 3 : ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat)

การเชื่อมขึ้นงานวัสดุเกรด ASTM A572 Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร สถานะที่ 3 ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) แต่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Preheat) ที่ 150°C และทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้มเครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม ยาว 450 มม กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC⁺/AC 140 - 200 Amps. เป็นลวดเชื่อมจัดอยู่ในกลุ่มตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

4.3.3.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สถานะที่ 3 : Preheating 150°C.

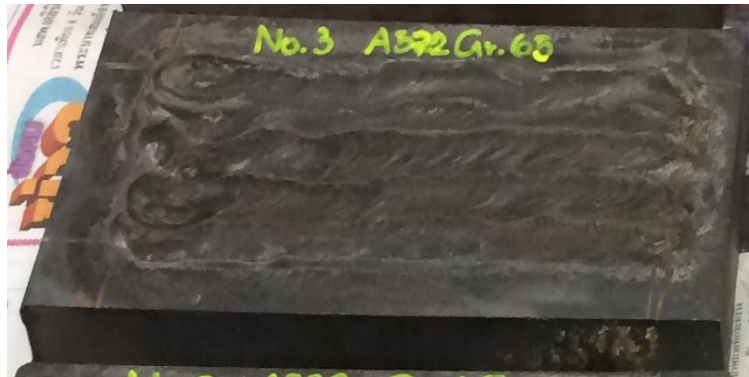
4.3.3.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สถานะที่ 3 จำนวน 3 ขึ้นทดสอบ

ตารางที่ 4-23 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็ง ด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 จำนวนชั้นเชื่อม 1 ชั้น

ขึ้นงานที่	แนวเชื่อม ชั้นที่	กระแสเชื่อม (A)	ขั้วกระแสไฟ เชื่อม	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิPreheat ขึ้นงาน(°ซ)	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด (°ซ)
1	1	160	DCEP	150	150	600
2	1	160	DCEP	150	150	600
3	1	160	DCEP	150	150	600

4.3.3.1.2 ขั้นตอนสอบงานเชื่อมที่ได้จากสภาวะการทดลองที่ 3

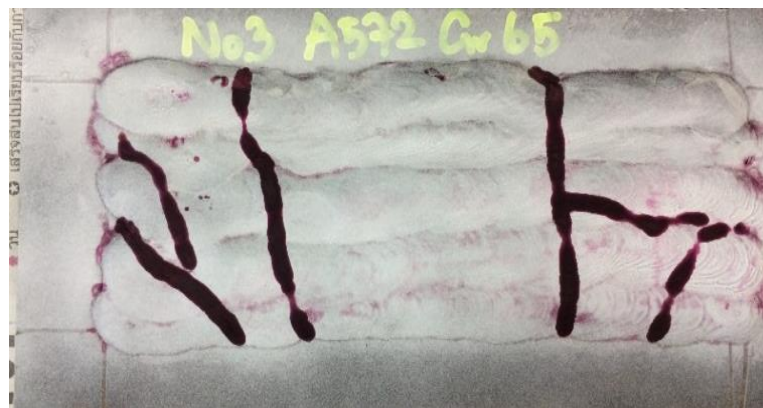
(1) ขั้นตอนทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 3



รูปที่ 4.28 ขั้นตอนทดสอบการเชื่อมการทดลอง สภาวะที่ 3

(2) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่3 ที่เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบด้วยการตรวจสอบพินิจไม่พบว่ามีรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม ทุกขั้นตอน แต่เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมทดสอบไปทำการตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT) พบว่ามีรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม ในทิศทางที่ตัดขวางกับความยาวแนวเชื่อมทุกขั้นตอน ทั้ง 3 ขั้นตอน

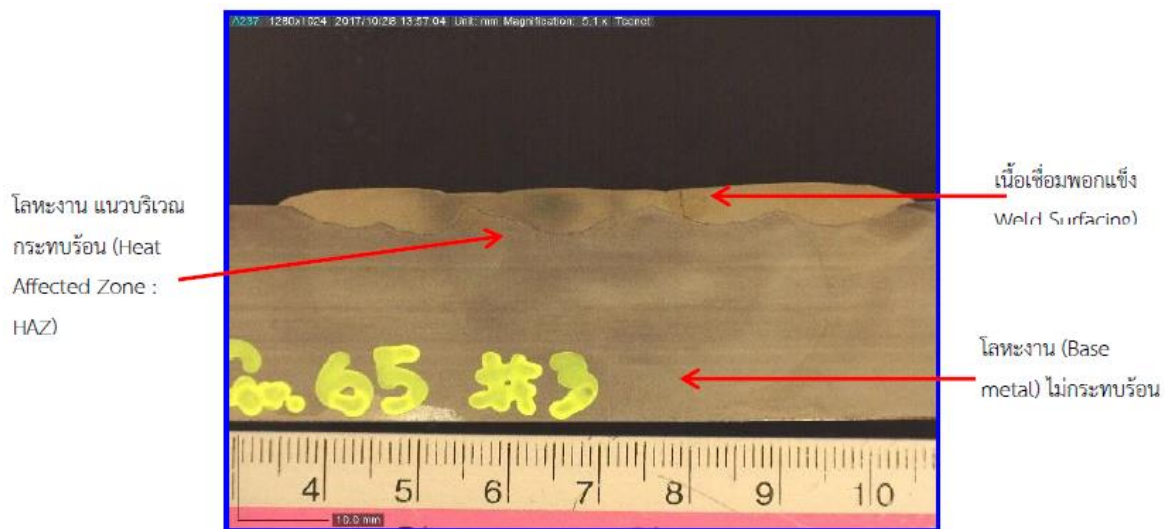


รูปที่ 4.29 ผลการตรวจสอบรอยร้าวด้วยของเหลวแทรกซึมผิวหน้าแนวเชื่อมชิ้นงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 3

4.3.3.2 รายงานผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-24 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 3

PQR No.:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 3

จากรูปที่ 4.30 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษา แบ่งออกได้ 3 บริเวณคือ 1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (Unaffected Zone) 2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (HAZ) 3. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer) พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

การไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) จะทำให้ขาดตัวกลางช่วยยึดเกาะ อาจมีผลต่อความรุนแรงที่จะเกิดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง เนื่องจากขาดความยืดหยุ่นระหว่างชั้นเชื่อม หลักการเชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้

เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยา ต้องการสมบัติจากความแข็งแรงของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมซ้ำมากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.3.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Report : Micro Structure Test)

ตารางที่ 4.25 Test Report : Micro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่ 3

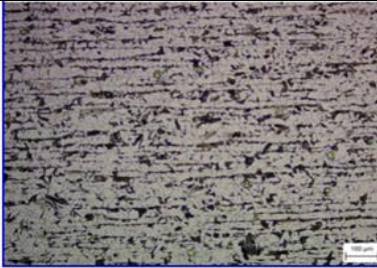
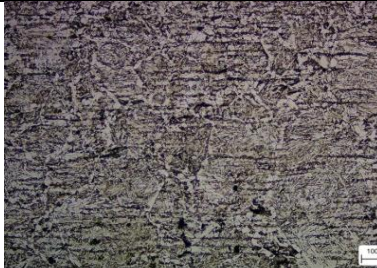
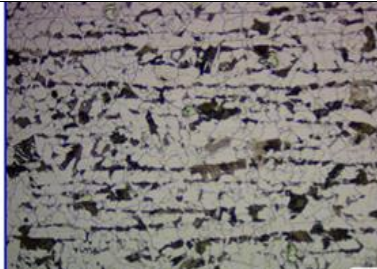
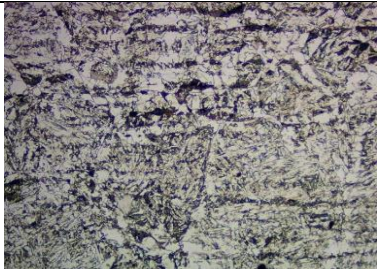
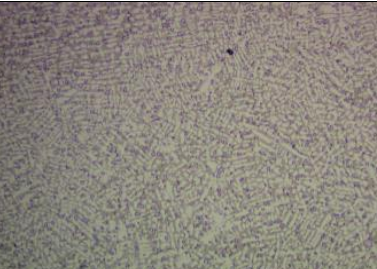
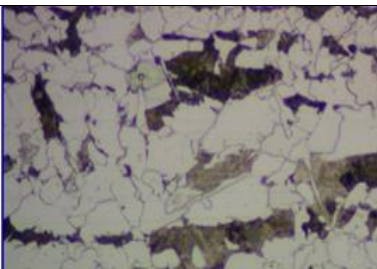
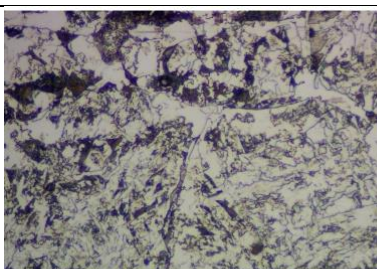
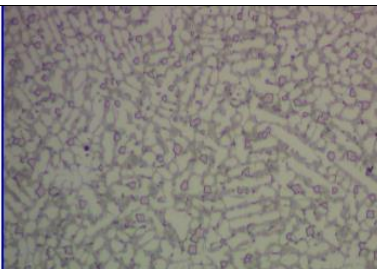
PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



รูปที่ 4.31 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบทดลองงานเชื่อม สภาวะที่ 3

4.3.3.3.1 เปรียบเทียบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคระหว่างโลหะงานที่ไม่มีผลกระทบร้อน (Un-affected zone) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และ บริเวณแนวเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ชิ้นงาน (Base Metal)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ)	บริเวณแนวเชื่อม (Weld)
----------------------	-----------------------	------------------------

		
ASTM A572Gr.65 – Magnification 100X	HAZ- magnification100X	UTP Ledurit65–Magnification100X
		
ASTM A572Gr.65 – Magnification 200X	HAZ- magnification200X	UTP Ledurit65–Magnification200X
		
ASTM A572Gr.65 – Magnification 500X	HAZ- magnification500X	UTP Ledurit65–Magnification200X
โครงสร้างจุลภาคโลหะงานที่ไม่ กระทบร้อน(Un-affected zone) พิจารณาจากภาพถ่ายสีขาวเป็นพื้น โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferite matrix) แถบสีดำเป็นโครงสร้างเพิร์ล ไลท์ และเพิร์ลไลท์ละเอียดแทรก ทั่วไป	โครงสร้างจุลภาคโลหะงานบริเวณ กระทบร้อน (HAZ) ปรากฏโครงสร้าง เบนไนท์หรือเพิร์ลไลท์ละเอียดแถบสี ดำกระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้น เฟอร์ไรท์(Ferrite Maxtric) สีขาว ไม่ ค่อยปรากฏ มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เป็นเส้นเข็มสีเทาเนื่องจาก เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65มีCอยู่เพียง0.23%	โครงสร้างจุลภาคโลหะงานบริเวณเนื้อ เชื่อมพอกแข็ง(Weld metal) เห็น แถบสีขาวคือโครงสร้างโครเมียมคาร์ ไบด์และคาร์บ์ดีแข็งซ้อน กระจายทั่วไป บนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) สีเทา โครงสร้าง จุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์จะแข็ง ต้านทานการครูดสูง

รูปที่ 4.32 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม สภาวะที่ 3

4.3.3.3.2 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 3

UTP Ledurit65 + HAZ – ASTM A572 Gr.65



Weld Structure : Magnification 50X

รูปที่ 4.33 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อม จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 3

จากรูปที่ 4.33 สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

(1) เนื้อโลหะงานเหล็กกล้าฯ ASTM A572Gr.65

เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65 ผลิตจากกรรมวิธีรีดร้อนและอบคืนตัว (Rolled Thermomechanically Quenched and Tempered) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์และเพิร์ลไลต์ละเอียด โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) พิจารณาจากรูปเป็นพื้นสีขาว ส่วนโครงสร้างเพิร์ลไลต์และเพิร์ลไลต์ละเอียดจะเป็นแถบสีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์

(2) บริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone : HAZ) เหล็กกล้าฯ ASTM A572Gr.65

บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนสูงจนเปลี่ยนโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่สามารถละลายธาตุคาร์บอน 0.23% เข้ารวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ได้หมดเมื่อแนวเชื่อมมีอัตราการเย็นสูง คาร์บอนบางส่วนจะรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ได้ไม่มากนักเกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์เร่งเย็นมาร์เทนไซต์ (Fe_3C) ธาตุคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนสภาพเดิมได้โครงสร้างเพิร์ลไลต์แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็วเกรนเพิร์ลไลต์จึงไม่มีโอกาสโตเต็มที่ จึงได้เพิร์ลไลต์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งและแข็งแรง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นขาวคือโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite : Fe_3C) ที่เห็นเป็นแท่งเข็มสีเทาเล็กน้อยแทรกปะปนอยู่กับโครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียด (Fine pearlite or Benite) แถบดำแทรกสลับ

กระจายหนาแน่นทั่วไป และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย จะมีโครงสร้างออสเทนไนต์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

(3) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

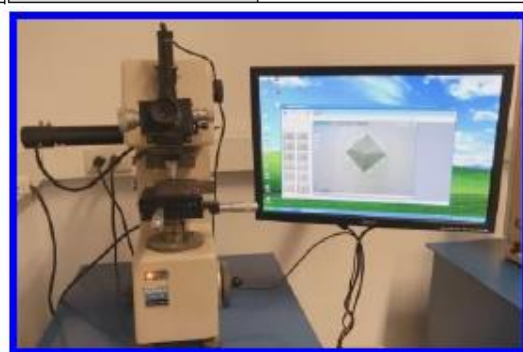
ปกติชั้นเชื่อมแรกจะมีส่วนของโลหะเนื้องาน (Base metal) ละลายขึ้นมาผสม (Dilution) และจะค่อยๆ จางลงไปในชั้นเชื่อมที่ 2 หรือ ชั้นที่ 3 ในการทดลองเป็นการเชื่อมชั้นเดียวทำให้มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไลท์ (Ferrite-Pearlite) จากโลหะงาน ASTM 572 Gr.65 หลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) มาก เนื้อเชื่อมพอกแข็งมีโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide) เช่น โคบอลต์ วานาเดียม ทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะเห็นสังเกตเห็นในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคเป็นแถบสีขาวกระจายอยู่บนโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ (Austenite matrix) เห็นเป็นพื้นสีเทา

การที่มีเนื้อโลหะงาน ASTM A572Gr.65 หลอมละลายขึ้นมาเจือปนกับโลหะเชื่อมที่กำลังหลอมละลาย (Weld dilution in weld surfacing)) มีผลทำให้ความแข็งเนื้อเชื่อม UTP Ledurit 65 ลดลง

4.3.3.4 รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาค ชิ้นงานทดสอบเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 3

ตารางที่ 4-26 Test Report : Micro Vicker Testing : สภาวะที่ 3 : Heating Control : Preheat 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass temp. 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25 °C, 48% RH



รูปที่ 4.34 การทดสอบความแข็ง Micro Vickers Test ชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 3

ตารางที่ 4-27 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่ 3 เปรียบเทียบระหว่าง โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระตบร้อน (HAZ), และเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) : ASTM A572 Gr.65 + UTP Ledurit 65 – Preheat

หน่วย HV (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
UTP LEDURIT 65	436.6 (44.2)	435.1 (44.1)	442.2 (44.7)	432.8 (43.9)	412.7 (42.1)	431.88 (43.80)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	243.1 (21.0)	246.2 (21.6)	238.1 (20.0)	238.1 (20.2)	239.6 (20.3)	241.02 (20.62)
Item	Base	Base	Base	Base	Base	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	201.2 (16.0)	196.9 (13.5)	189.5 (13.0)	192.8 (13.0)	195.4 (13.5)	195.36 (13.8)

ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 3 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 195.36 HV (13.8 HRC) กับบริเวณกระตบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 241.02 HV (20.62 HRC) พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกันพอสมควรแต่ไม่แสดงถึงความเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ซึ่งจะมีความแข็งสูงมากได้ถึง 800 HV ความแตกต่างของความแข็งดังกล่าว แสดงว่าบริเวณกระตบร้อน (HAZ) มีอัตราการเย็นตัวสูงหรือเร็วมาก แต่เนื่องจากมีปริมาณของธาตุคาร์บอนในเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 เพียง 0.23% ไม่เพียงพอที่จะรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) เป็นสารประกอบคาร์ไบด์ได้ทำให้ บริเวณกระตบร้อน (HAZ) โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Benite) การที่แนวเชื่อมเย็นตัวเร็วส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการไม่ทำการเชื่อมรองพื่นก่อนเชื่อมพอกแข็ง (No buffer layer) เพราะการเชื่อมรองพื่นเท่ากับเป็นการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมพอกแข็ง (Preheat) ไปในตัว ความแข็งเพิ่มขึ้น ในบริเวณกระตบร้อน (HAZ) จากการเชื่อมไม่ถึงกับเปราะหรือแตกง่าย แต่อาจจะมีผลต่อการยึดเกาะกับเนื้อเชื่อมพอกแข็งไม่แข็งแรง

ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมพอกแข็งเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65 เป็นลวดเชื่อมที่ให้เนื้อเชื่อมกลุ่มโครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน มีค่าความแข็งตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดดังนี้

ความแข็งเนื้อเชื่อมบริสุทธิ์ (Pure Weld Deposit)

ประมาณ (approx.) 65 HRC

เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้า ปริมาณคาร์บอน (C) 0.15%	ประมาณ (approx.) 58 HRC
เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้าแมงกานีสสูง (High Mn-steel)	ประมาณ (approx.) 55 HRC

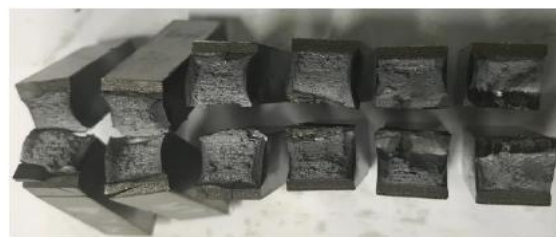
ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 3 พบว่าค่าความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) เฉลี่ยที่ได้ คือ 431.88 HV (43.80 HRC) ซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้มาก สืบเนื่องมาจากการเชื่อมพอกทับระหว่างลวดเชื่อมพอกแข็งกับโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 โดยตรงและเป็นการเชื่อมทับแนวเดียวจึงทำให้เนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลายลายขึ้นมาปนผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็งมาก (Dilution of weld surfacing) ทำให้เนื้อเชื่อมพอกแข็งด้อยคุณภาพลง

4.3.3.5 ผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 3

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับพลังงานได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากระทบชิ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับขึ้นทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วนจะส่งผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนแตกขาดถาวรซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแกร่งจะมีค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย การรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก คำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกันเรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 4-28 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 3 : Preheating 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.35 ขั้นตอนทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 3

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีมาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ขั้นตอนทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 × 10 มิลลิเมตร บาร่องตัววัดตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มิลลิเมตร ก้นร่องวีมีรัศมีความโค้ง 0.25 มิลลิเมตร ขั้นตอนทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับขั้นตอนทดสอบห่างกัน 40 มิลลิเมตร ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มิลลิเมตร ขั้นตอนทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางขั้นตอนทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้านคล้ายกับการกดดัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักงอขึ้นงานตามแนวร่องที่บาก

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแรงกระแทกชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 3 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus

shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 4-29 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 3

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below notch 8± 0.05 (mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.00	10.02	8.00	55.01	45°	86	85
W2	10.01	10.00	8.01	55.01	45°	92	
W3	10.00	10.01	8.01	55.00	45°	77	
HAZ-B1	10.01	10.01	8.01	55.02	45°	129	113.66
HAZ-B2	10.01	10.00	8.01	55.00	45°	126	
HAZ-B3	10.00	10.01	8.00	55.01	45°	86	

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 3 มาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

- (1) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3
- (2) ชิ้นทดสอบโลหะงานบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) จำนวน 3 ชิ้นคือ HAZ-B1, HAZ-B2 และ HAZ-B3

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance Criteria) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกลหรือความสามารถรับแรงกระแทกวัสดุเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 อ้างอิงผลการทดลองของบริษัทผู้ผลิต ทดสอบแรงกระแทก ที่ -50°C ≥215 จูล (J) ความสามารถรับแรงกระแทกบริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ) วัสดุ ASTM A572 Gr.65 ในการทดสอบที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อมปกติ อ้างอิงผลงานวิจัยของ Hangzhou, Zhejiang Province China. ได้รายงานผลการทดลองหาค่า Impact Strength อุณหภูมิใช้ทดสอบ CVN Carpy Test คือ 23°C ทดสอบหาความต้านทานแรงกระแทก บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ไว้ในหนังสือ HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015, John Wiley and Sons, p.937. ได้ค่าเฉลี่ย 293 จูล (J)

ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT65 บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ เว้นแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ ในการทดลองสภาวะที่ 3

ยึดถือตามขอบเขตการยอมรับตามสภาวะการทดลองที่ 1 และ 2 คือถือกำหนดความสามารถรับแรงกระแทก (Impact Strength) เนื้อเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ UTP LEDURIT 65 ≥ 60 จูล (J) ผลการทดสอบวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4-30 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่ 3

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	86	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W2	92	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W3	77	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
HAZ-B1	129	ที่ 23°C คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B2	126	ที่ 23°C. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B3	86	ที่ 23°C. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected

จากผลการทดสอบแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld surfacing) UTP LEDURIT65 ขึ้นทดสอบ W1 = 86 J, W2 = 92 J และ W3 = 77 J ซึ่งมากกว่า > 60 จูล (J) ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงกระแทก 85 จูล (J) ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า > 60 J แสดงว่าผ่านการยอมรับผลการทดสอบ (Accepted)

ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 บริเวณแนวกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ขึ้นทดสอบ HAZ-B1 = 129 J, HAZ-B2 = 126 J และ HAZ-B3 = 86 J ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ย 113.66 จูล (J) ซึ่งต่ำกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า ≥ 293 จูล (J) 60 J แสดงว่าไม่ผ่านการยอมรับผลการทดสอบ (Rejected) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงแนวบริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีโครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ (Benite) หนาแน่น มีความแข็งสูง แข็งแรง ไม่แตกเปราะง่าย สามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนได้ง่าย

4.3.4 การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 4 : ไม่ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (No-preheat)

การเชื่อมชิ้นงานวัสดุเกรด ASTM A572 Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร สภาวะที่ 4 ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) ไม่ให้ความร้อนชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (No-preheat) และทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP Ledurit 65 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 450 มม. กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC⁺/AC 140 - 200 Amps. เป็นลวดเชื่อมจัดอยู่ในกลุ่มตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

4.3.4.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 4 : No-preheating

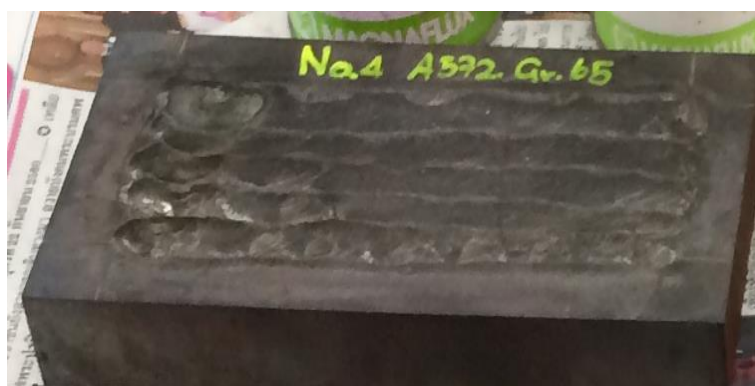
4.3.4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สภาวะที่ 4 จำนวน 3 ขั้นตอน

ตารางที่ 4-31 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็ง ด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 จำนวนชั้นเชื่อม 1 ชั้น

ชิ้นงานที่	แนวเชื่อม ชั้นที่	กระแสเชื่อม (A)	ขั้วกระแสไฟ เชื่อม	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิPreheat ชิ้นงาน (°C)	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด (°C)
1	1	160	DCEP	150	$\geq 27^{\circ}\text{C}$	600
2	1	160	DCEP	150	$\geq 27^{\circ}\text{C}$	600
3	1	160	DCEP	150	$\geq 27^{\circ}\text{C}$	600

4.3.4.1.2 ขั้นตอนงานเชื่อมที่ได้จากสภาวะการทดลองที่ 4

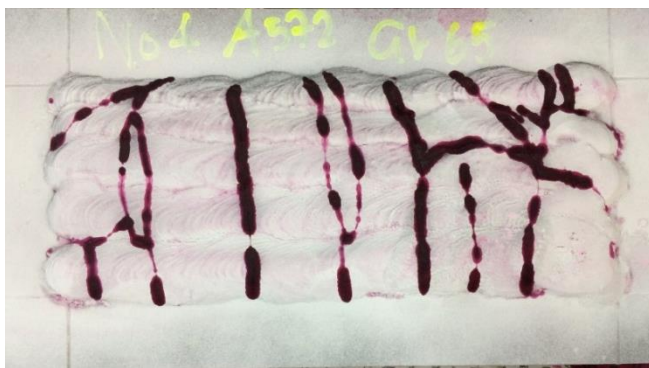
(3) ชิ้นงานทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 4



รูปที่ 4.36 ขั้นตอนการเชื่อมการทดลอง สภาวะที่ 4

(4) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 4 ที่เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบด้วยการตรวจสอบพินิจไม่พบว่ามีรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม ทุกชิ้นทดสอบ แต่เมื่อนำ ชิ้นงานเชื่อมทดสอบไปทำการตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT) พบว่ามีรอย แตกร้าวที่แนวเชื่อม ในทิศทางที่ตัดขวางกับความยาวแนวเชื่อมทุกชิ้นทดสอบ ทั้ง 3 ชิ้นทดสอบ

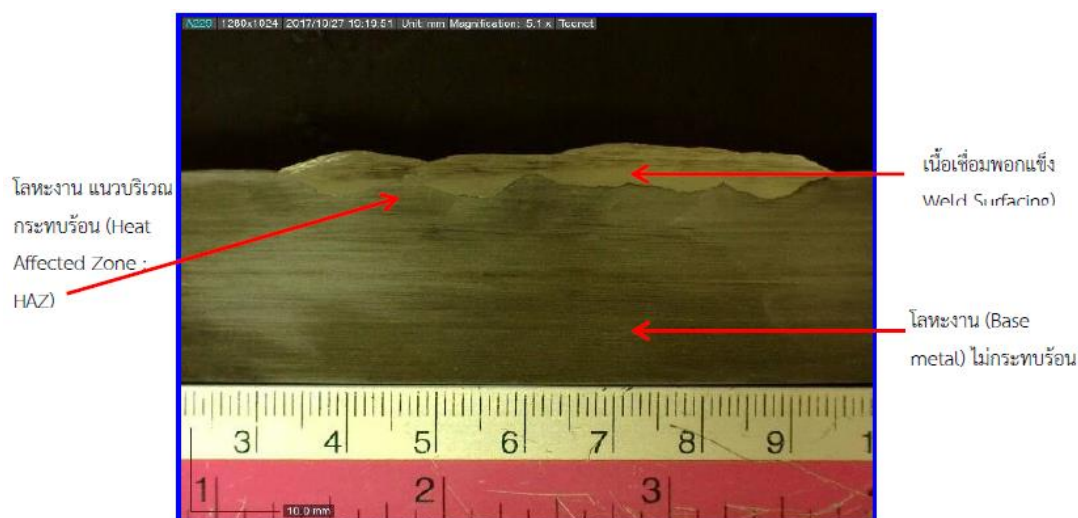


รูปที่ 4.37 ผลการตรวจสอบรอยร้าวด้วยของเหลวแทรกซึมผิวหน้าแนวเชื่อมชิ้นงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 4

4.3.4.2 รายงานผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-32 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 4

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	No Preheat and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH



รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 4

จากรูปที่ 4.38 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษา แบ่งออกได้ 3 บริเวณคือ 1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (Unaffected Zone) 2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (HAZ) 3. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer) พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

การไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) จะทำให้ขาดตัวกลางช่วยยึดเกาะ อาจมีผลต่อความรุนแรงที่จะเกิดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง เนื่องจากขาดความยืดหยุ่นระหว่างชั้นเชื่อม หลักการเชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้ เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยาต้องการสมบัติจากความแข็งของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมช้ามากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.4.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Report : Micro Structure Test)

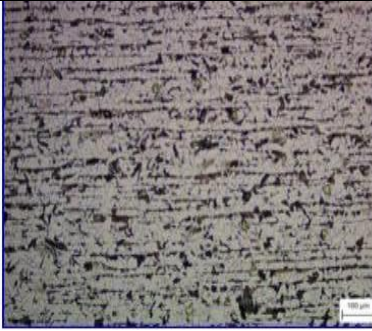
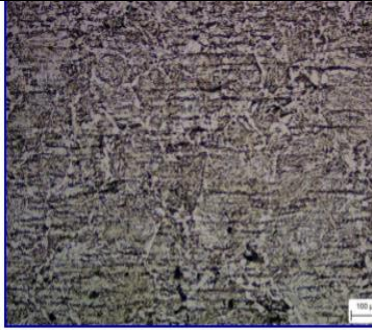
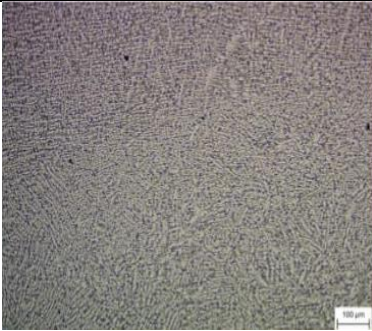
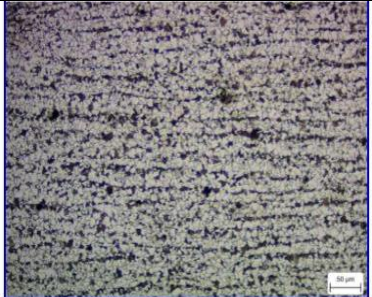
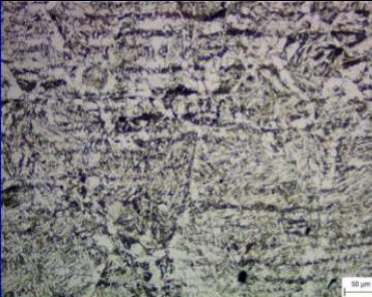
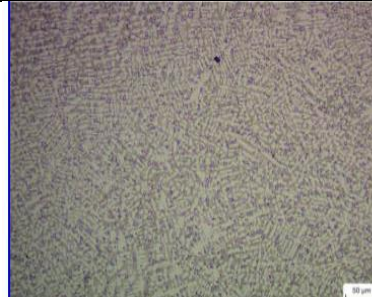
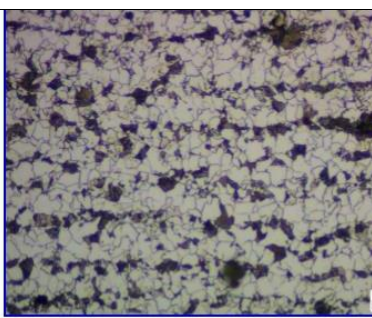
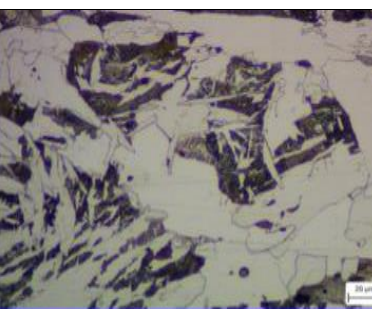
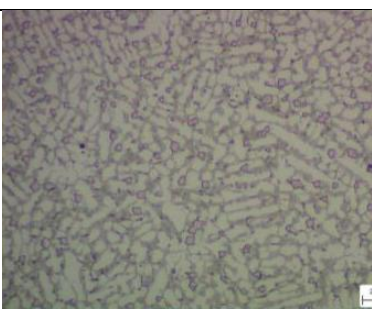
ตารางที่ 4.33 Test Report : Micro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่ 4

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	No-preheat and and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



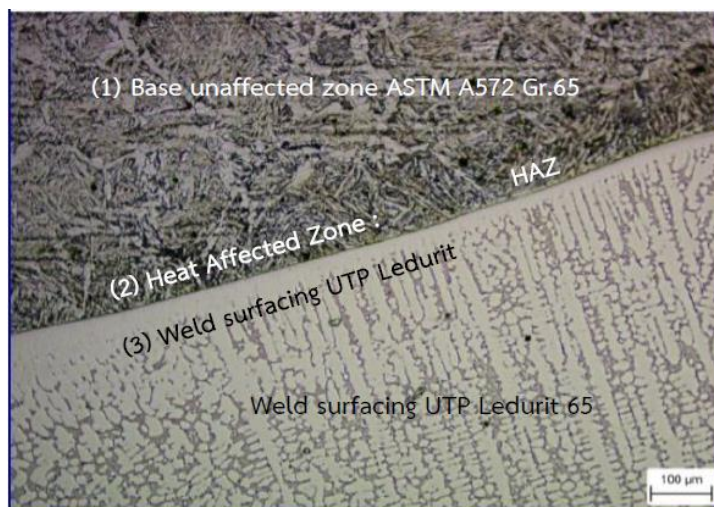
รูปที่ 4.39 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบทดลองงานเชื่อม สภาวะที่ 4

4.3.4.3.1 เปรียบเทียบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคระหว่างโลหะงานที่ไม่มีผลกระทบร้อน (Un-affected zone) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และ บริเวณแนวเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ชิ้นงาน (Base Metal)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ)	บริเวณแนวเชื่อม (Weld)
 ASTM A572 Gr.65 Magnification100X	 HAZ A572 Gr.65 Magnification100X	 UTP Ledurit 65 Magnification100X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification200X	 HAZ A572 Gr.65 Magnification200X	 UTP Ledurit 65 Magnification100X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification500X	 HAZ A572 Gr.65 Magnification500X	 UTP Ledurit 65 Magnification100X
โครงสร้างจุลภาคโลหะงานที่ไม่มี กระทบร้อน(Un-affected zone) เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ พื้น สีขาวเป็นโครงสร้างพื้นโครงสร้าง เฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) แดบสีดำ โครงสร้างเพิร์ลไลท์	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected zone : HAZ) พิจารณาจากภาพถ่ายสีขาวเป็นพื้น โครงสร้างเฟอร์ไรท์ แดบสีดำเป็น โครงสร้างเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบน ไนท์ (Fine pearlite or Benite)	โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) พิจารณาจาก ภาพถ่ายแถบสีขาวเป็นโครเมียมคาร์ ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน กระจาย แทรกอยู่บนโครงสร้างพื้นออสเทน นิติก (Austenitic matrix) พื้นสีเทา

รูปที่ 4.40 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม สภาวะที่ 4

4.3.4.3.2 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 4



รูปที่ 4.41 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อม จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 4

จากรูปที่ 4.41 สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

(4) เนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572Gr.65

เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65 ผลิตจากกรรมวิธีรีดร้อน ชุบและอบคืนตัว (Rolled Thermomechanically Quenched and Tempered) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์และเพิร์ลไลท์ละเอียด โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) พิจารณาจากรูปเป็นพื้นสีขาว ส่วนโครงสร้างเพิร์ลไลท์และเพิร์ลไลท์ละเอียดจะเป็นแถบสีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์

(5) บริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone : HAZ) เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65

บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนสูงจากการเชื่อม จนโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์สามารถละลายธาตุคาร์บอน 0.23% เข้ารวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) บริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วคาร์บอนบางส่วนจึงรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) เป็นสารประกอบคาร์ไบด์เรย์นาร์เทนไซด์ (Fe_3C) ธาตุคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนสภาพเดิมได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์ (Pearlite) แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็วเกรนเพิร์ลไลท์จึงไม่มีโอกาสโตเต็มที่ จึงได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งและแข็งแรง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นขาวคือโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) มีโครงสร้างมาร์เทนไซด์ (Martensite) ที่เห็นเป็นแท่งเข็มสีเทาเล็กน้อยแทรกปะปนอยู่กับโครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลท์ละเอียด (Fine pearlite or Benite) แถบดำแทรกสลับกระจายหนาแน่นทั่วไป และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย จะมีโครงสร้างออสเทน

ไนท์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึด และป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

(6) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

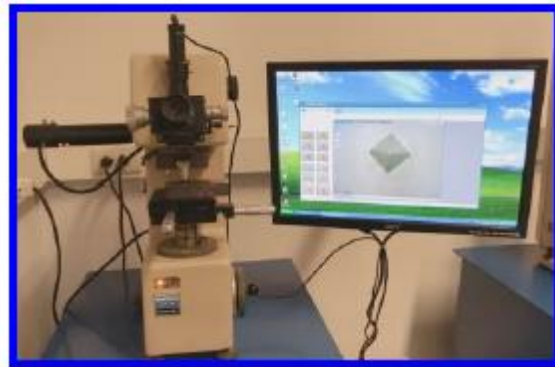
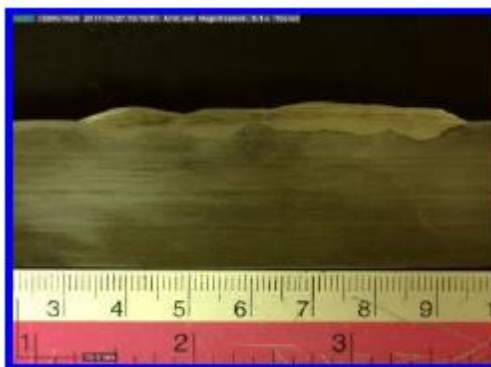
ปกติชั้นเชื่อมแรกจะมีส่วนของโลหะเนื้องาน (Base metal) ละลายขึ้นมาผสม (Dilution) และจะค่อยๆ จางลงในชั้นเชื่อมที่ 2 หรือ ชั้นที่ 3 ในการทดลองเป็นเชื่อมชั้นเดียวทำให้มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ (Ferrite-Pearlite) จากโลหะงาน ASTM 572 Gr.65 หลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Dilution of Weld metal) ที่มีโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide) มาก มีผลทำให้ความแข็งเนื้อเชื่อม UTP Ledurit 65 ลดลง

ข้อพิจารณา โครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์เชิงซ้อน จะสังเกตเห็นเป็นแถบสีขาวแทรกตัวอยู่บนโลหะพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) สีเทา เป็นโครงสร้างที่แข็งมาก ธาตุที่รวมตัวให้คาร์ไบด์เชิงซ้อนเช่นโคบอลต์ วานาเดียม ทั้งสแตน

4.3.4.4 รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาค ชิ้นงานทดสอบเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 4

ตารางที่ 4-34 Test Report : Micro Vicker Testing : สภาวะที่ 4 : Heating Control : No-preheat and Interpass Temperature Control 600°C max

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600°C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25 °C, 48% RH



รูปที่ 4.42 การทดสอบความแข็ง Micro Vickers Test ชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 4

ตารางที่ 4-35 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่ 4 เปรียบเทียบระหว่าง โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระพร้อน (HAZ), และ เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) : ASTM A572 Gr.65 + UTP Ledurit 65 – Preheat

หน่วย HV (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
UTP LEDURIT 65	436.6 (44.2)	435.1 (44.1)	442.2 (44.7)	432.8 (43.9)	412.7 (42.1)	431.88 (43.80)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	232.5 (20.0)	257.6 (23.6)	260.9 (24.1)	238.1 (20.0)	227.0 (20.0)	243.22 (21.54)
Item	Base	Base	Base	Base	Base	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	201.2 (16.0)	196.9 (13.5)	189.5 (13.0)	192.8 (13.0)	195.4 (13.5)	195.36 (13.80)

ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 4 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 195.36 HV (13.80 HRC) กับบริเวณกระพร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 243.22 HV (21.54 HRC) พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกัน 47.86 HV (7.74 HRC) ก็ห่างพอสมควร แต่เมื่อพิจารณาความแข็งบริเวณกระพร้อน (HAZ) เหล็กกล้า HSLA ASTM A572Gr.65 มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนน้อย 0.23% พบว่าความแข็งระดับ 243.22 HV (21.54 HRC) ยังไม่ถึงระดับโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (Martensite) แต่เป็นความแข็งระดับโครงสร้างเฟอร์ไรต์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Benite) เนื่องจากแนวเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวสูงหรือเร็วมาก ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการไม่ทำการเชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมพอกแข็ง (No buffer layer) เพราะการเชื่อมรองพื้นเท่ากับการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมพอกแข็ง (Preheat) ไปในตัว โครงสร้าง HAZ ไม่ถึงกับเปราะหรือแตกง่าย เพราะไม่ใช่โครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่จะมีผลต่อการยึดเกาะกับเนื้อเชื่อมพอกแข็งไม่แข็งแรง

ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมพอกแข็งเครื่องหมายการค้า UTP LEDURIT 65 เป็นลวดเชื่อมที่ให้เนื้อเชื่อมกลุ่มโครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน มีค่าความแข็งตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดดังนี้

ความแข็งเนื้อเชื่อมบริสุทธิ์ (Pure Weld Deposit)	ประมาณ 65 HRC
เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้า ปริมาณคาร์บอน (C) 0.15%	ประมาณ 58 HRC
เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้าแมงกานีสสูง (High Mn-steel)	ประมาณ 55 HRC

ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 4 พบว่าค่าความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) เฉลี่ยที่ได้ คือ 431.88 HV (43.80 HRC) ซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้มาก เนื่องมาจากการเชื่อมพอกทับระหว่างลวดเชื่อมพอกแข็งกับโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 โดยตรงและเป็นการเชื่อมทับแนวเดียวจึงทำให้เนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลายละลายขึ้นมาปนผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็งมาก (High dilution of weld surfacing) ทำให้เนื้อเชื่อมด้อยคุณภาพลง

4.3.3.5 ผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 4

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากระทบชิ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบารองอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับขึ้นทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วนจะส่งผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนแตกขาดถาวรซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแกร่งจะมีค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายการรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก คำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกันเรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 4-36 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 4 : No-preheating and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.50	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	UTP Ledurit 65	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.43 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 4

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีมาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ชิ้นทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10×10 มิลลิเมตร บากร่องตัววัดตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มิลลิเมตร ก้นร่องวีมีรัศมีความโค้ง 0.25 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับชิ้นทดสอบห่างกัน 40 มิลลิเมตร ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางชิ้นทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้านคล้ายกับการกดดัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักงอชิ้นงานตามแนวร่องที่บาก

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแรงกระแทกชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 4 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 4-37 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 4

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below notch 8± 0.05 (mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.00	10.01	8.01	55.01	45°	87	85
W2	10.01	10.01	8.01	55.01	45°	95	
W3	10.03	10.03	8.01	55.01	45°	73	
HAZ-B1	10.01	10.02	8.01	55.02	45°	135	128.66
HAZ-B2	10.00	10.00	8.01	55.02	45°	128	
HAZ-B3	10.00	10.01	8.00	55.01	45°	123	

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 4 มาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

- (1) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3
- (2) ชิ้นทดสอบโลหะงานบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) จำนวน 3 ชิ้นคือ HAZ-B1, HAZ-B2 และ HAZ-B3

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance Criteria) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกลหรือความสามารถรับแรงกระแทกวัสดุเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 อ้างอิงผลการทดลองของบริษัทผู้ผลิต ทดสอบแรงกระแทก ที่ -50°C ≥215 จูล (J)

ความสามารถรับแรงกระแทกบริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ) วัสดุ ASTM A572 Gr.65 ในการทดสอบที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อมปกติ อ้างอิงผลงานวิจัยของ Hangzhou, Zhejiang Province China. ได้รายงานผลการทดลองหาค่า Impact Strength อุณหภูมิใช้ทดสอบ CVN Carpy Test คือ 23°C ทดสอบหาความต้านทานแรงกระแทก บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ไว้ในหนังสือ HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015, John Wiley and Sons, p.937. ได้ค่าเฉลี่ย 293 จูล (J)

ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT65 บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ เว้นแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ ในการทดลองสภาวะที่4 ยึดถือตามขอบเขตการยอมรับตามสภาวะการทดลองที่ 1 ถึง 3 คือถือกำหนดความสามารถรับแรงกระแทก (Impact Strength) เนื้อเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน UTP LEDURIT 65 ≥60 จูล (J) ผลการทดสอบวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4-38 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่ 4

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	87	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W2	95	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W3	73	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
HAZ-B1	135	ที่ 23°C. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B2	128	ที่ 23°C. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B3	123	ที่ 23°C. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected

จากผลการทดสอบแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง UTP LEDURIT65 (Weld surfacing) ขึ้นทดสอบ W1 = 87 J, W2 = 95 J และ W3 = 73 J ซึ่งมากกว่า >60 จูล (J) ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงกระแทก 85 จูล (J) ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า > 60 J แสดงว่าผ่านการยอมรับผลการทดสอบ (Accepted)

ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 บริเวณแนวกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ขึ้นทดสอบ HAZ-B1 = 135 J, HAZ-B2 = 128 J และ HAZ-B3 = 123 J ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ย 128.66 จูล (J) ซึ่งต่ำกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า ≥ 293 จูล (J) 60 J แสดงว่าไม่ผ่านการยอมรับผลการทดสอบ (Rejected) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงแนวบริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีโครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ (Benite) หนาแน่น มีความแข็งสูง แข็งแรง ไม่แตกเปราะง่าย สามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนได้ง่าย

4.3.5 การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 5 : ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat)

ทำการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งขึ้นงานวัสดุเกรด ASTM A572 Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร สภาวะที่ 5 โดยให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) 150°C เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 400 มม. ค่ากระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC⁺/AC 100 - 130 Amps. เป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes หลังจากนั้นทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า DUROID 650 ESAB ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 450 มม. กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC^{+/-}, AC 130 - 170 Amps. จัดอยู่ในกลุ่มมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

4.3.5.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 5 : Preheating

4.3.5.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สภาวะที่ 5 จำนวน 4 ขั้นตอนทดสอบ

ตารางที่ 4-39 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)

ชิ้นงานที่	แนวเชื่อมที่	กระแสเชื่อม (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิที่ขึ้นงาน ต่ำสุด °C	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด °C
1	1	110	DCEP	150	150	600
2	1	110	DCEP	150	150	600
3	1	110	DCEP	150	150	600
4	1	110	DCEP	150	150	600

ตารางที่ 4-40 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ชิ้นงานที่	แนวเชื่อมที่	กระแสเชื่อม (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิที่ขึ้นงาน ต่ำสุด °C	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด °C
1	1	160	DCEP	150	150	600
2	1	160	DCEP	150	150	600
3	1	160	DCEP	150	150	600
4	1	160	DCEP	150	150	600

4.3.5.1.2 ขั้นตอนทดสอบงานเชื่อม (Test Coupon) ที่ได้จากสภาวะทดลองที่ 5

(2) ชิ้นงานทดสอบงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 5



รูปที่ 4.44 ชิ้นงานทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 5

- (3) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)
นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบด้วยการตรวจสอบพินิจผิวแนวเชื่อมพอกแข็งไม่พบรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม นำไปตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึมเพื่อยืนยันผล ปรากฏผลไม่พบรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อมเช่นกัน

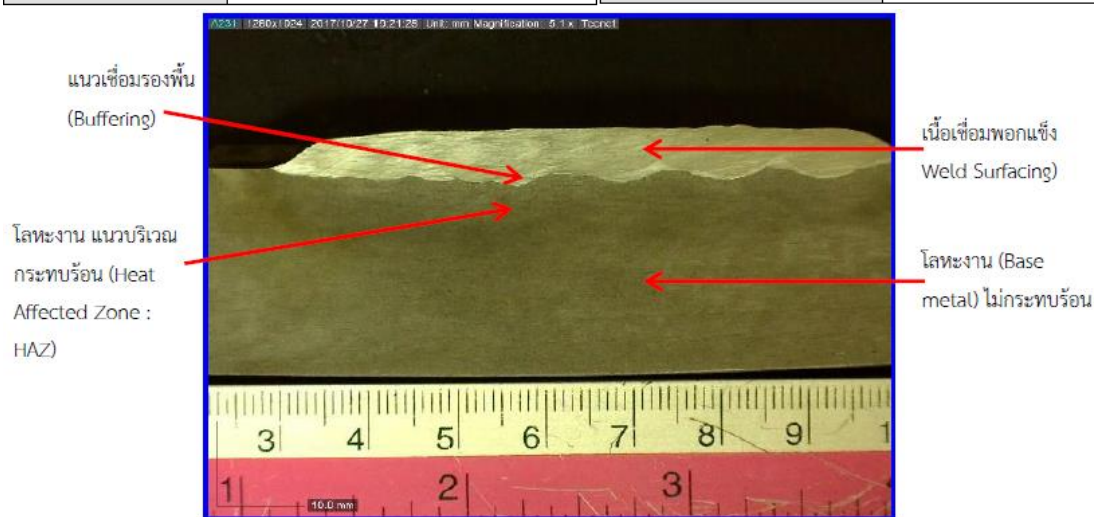


รูปที่ 4.45 ผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมแนวเชื่อมสภาวะที่ 5

4.3.5.2 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-41 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 5

PQR No.:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	UTP 63 + DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH



รูปที่ 4.46 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 5

จากรูปที่ 4.46 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษา แบ่งออกได้ 4 บริเวณคือ 1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (Unaffected Zone) 2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (HAZ) 3. ชั้นแนวเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer) 4. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer) พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

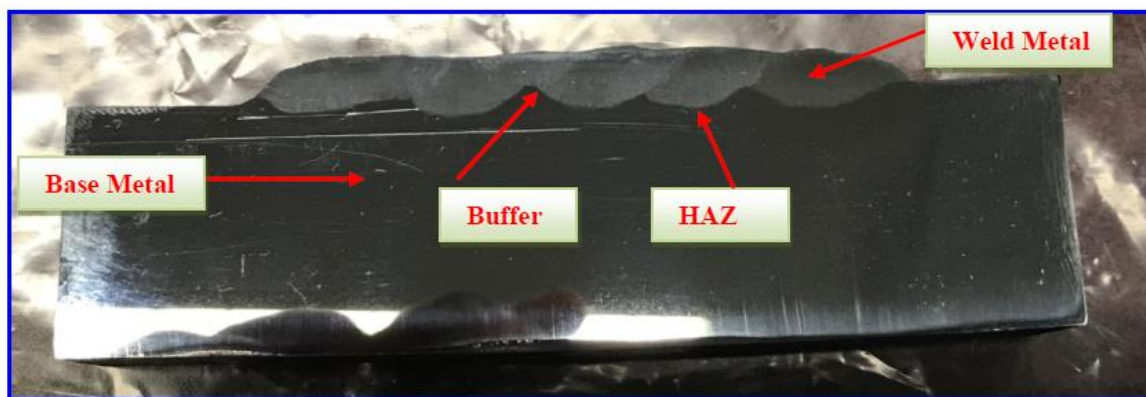
แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จะช่วยเพิ่มการยึดเกาะช่วยลดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง นิยมใช้ลวดเชื่อมที่ให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์หรือโครงสร้างออสเทนไนท์ หลักการ

เชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้ เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยาต้องการสมบัติจากความแข็งของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมซ้ำมากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.5.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Reprt : Mircro Structure Test)

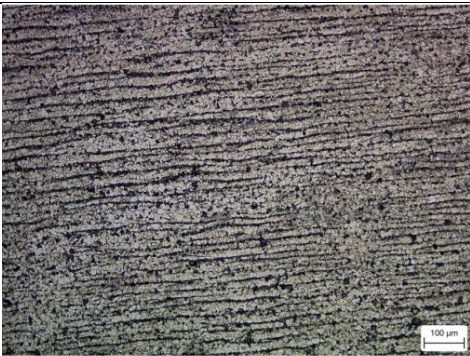
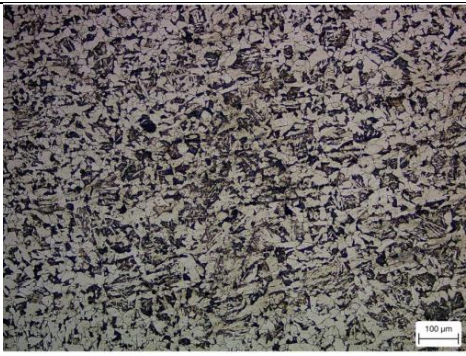
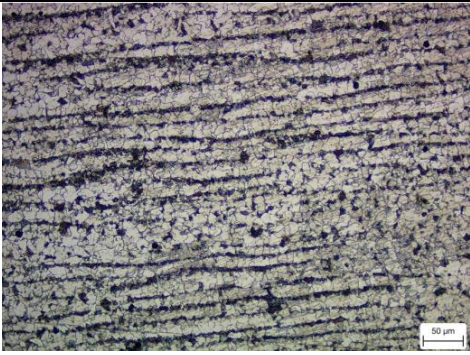
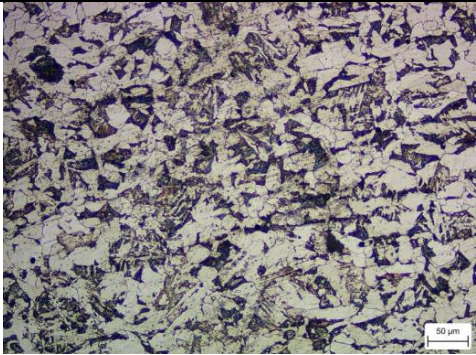
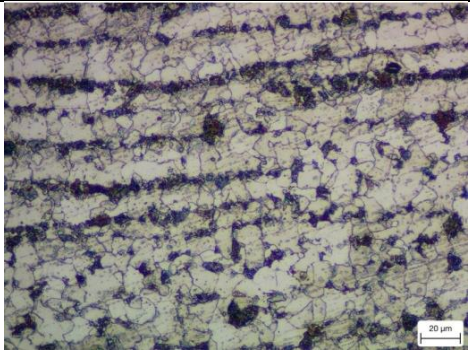
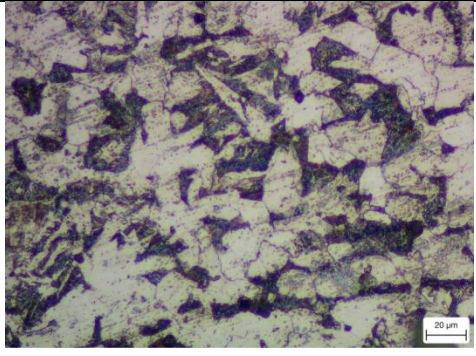
ตารางที่ 4-42 Test Peport : Micro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 5

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September/ 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	UTP 63 + DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



รูปที่ 4.47 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบทดลองเชื่อม สภาวะที่ 5

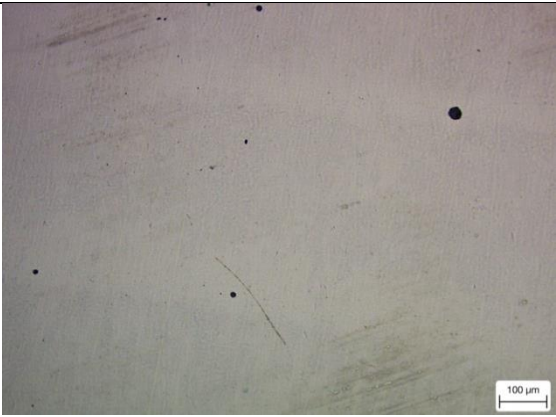
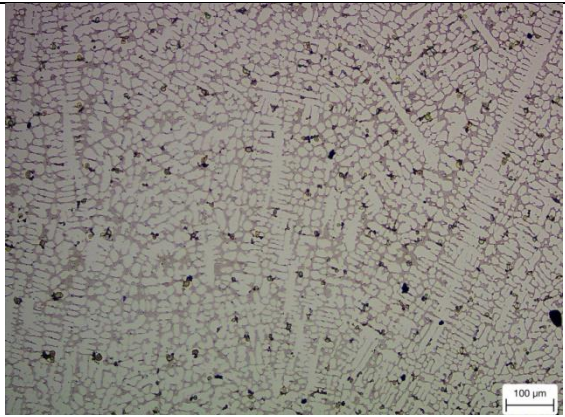
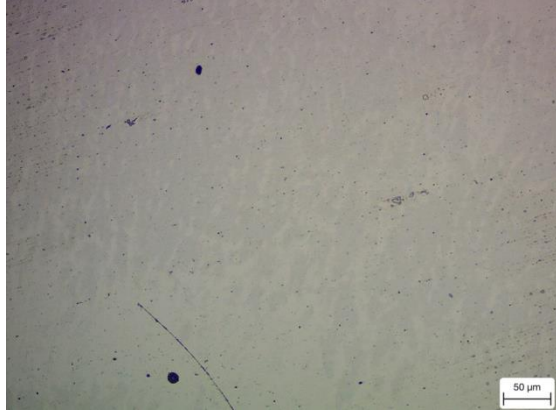
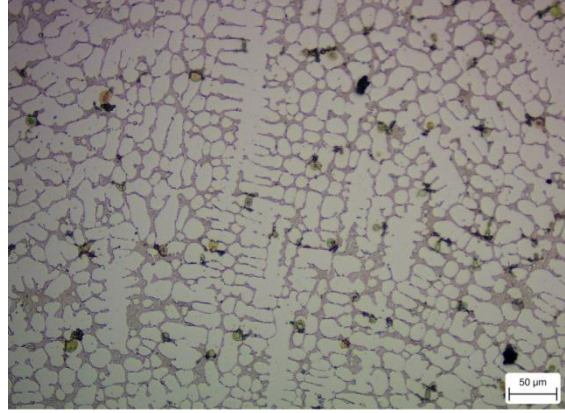
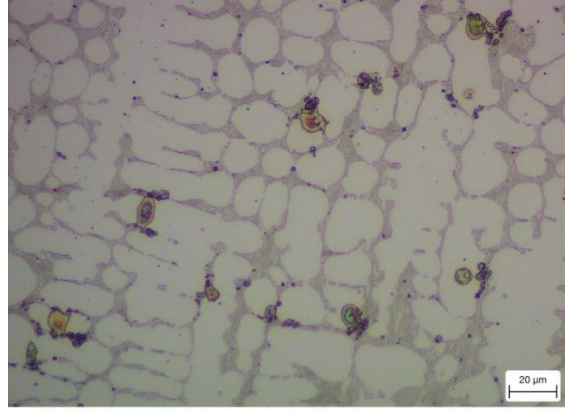
4.3.5.3.1เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะงานที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (Un-affected Zone) ในการเชื่อมทดสอบ สภาวะที่ 5

ชิ้นงาน (Base Metal)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ)
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 100X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 100X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 500X
โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน ASTM A572 Gr.65 ผลิตจากการรมวิธีรีดร้อน ชุบและอบคืนตัว (Rolled – Thermomachanic Quenched & Tempered) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์ และเพิร์ลไลต์ละเอียด แฉบดำแทรกกระจายทั่วไป บนโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) สีขาว	บริเวณกระทบร้อนได้รับความร้อนสูงเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์และมีอัตราการณ์ตัวสูงเนื่องจากเหล็กกล้า HSLA มีส่วนผสมธาตุคาร์บอนน้อยเพียง 0.23% ทำให้จะปรากฏโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Fe_3C) เป็นแท่งเข็มสีเทาปรากฏกระจายตามแนวเขตพื้นที่กระทบร้อนเล็กน้อย โครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียดเห็นเป็นแถบสีดำ โครงสร้างจุลภาคทั้งสองกระจายอยู่บนโครงสร้างพื้น (Matrix) เฟอร์ไรท์ สีขาว

รูปที่ 4.48 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะงานที่ไม่ได้

รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Un-affected Zone) ในการเชื่อมทดสอบ สภาวะที่ 5

4.3.5.3.2 เปรียบเทียบผลภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมรองพื้นกับ แนวเชื่อมพอกแข็ง

แนวเชื่อมรองพื้น (Buffering)	บริเวณแนวเชื่อม (Weld)
 UTP 63 Buffer Layer Magnification 100X	 DUROID 650 ESAB Weld Surface Layer Magnification 100X
 UTP 63 Buffer Layer Magnification 100X	 DUROID 650 ESAB Weld Surface Layer Magnification 100X
เนื้อเชื่อมรองพื้นลวดเชื่อม UTP 63 โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมออสเทนไนท์แมงกานีส (FeMnCr austenitic steel) กระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) มีคุณลักษณะความแข็งจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening)	
 DUROID 650 ESAB Weld Surface Layer Magnification 100X	
เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) ลวดเชื่อม DUROID 650 ESAB ให้โครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) เห็นเป็นแถบสีขาว กระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) พื้นสีเทา	

รูปที่ 4.49 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อน , แนวเชื่อมรองพื้นและบริเวณแนวเชื่อมพอกแข็ง ในการทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 5

4.3.5.3.3 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 5



รูปที่ 4.50 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (HAZ) , แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) และแนวเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing layer) - Magnification 50X

รูปที่ 4.50 สามารถอธิบายได้ดังนี้

(1) เนื้อโลหะงานเหล็กกล้าฯ ASTM A572Gr.65 บริเวณกระทบร้อน (HAZ)

ได้รับความร้อนสูงกว่าจุดวิกฤติจนเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนท์ แต่เนื่องจากเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 มีธาตุคาร์บอนปริมาณ 0.23% ถูกละลายเข้ากับเหล็กกล้าในสถานะของแข็ง (Solid Solution) เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจึงมีปริมาณคาร์บอนน้อยมากที่รวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) เป็นเหล็กคาร์ไบด์เร่งเย็นหรือโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite : Fe_3C) คาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนโครงสร้างจุลภาคเดิม แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงทำให้เกรนโครงสร้างเฟอร์ไรท์ไม่สามารถโตเต็มที่ทำได้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ละเอียด (Fine-Pearlite or Benite) ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคของ HAZ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นแท่งเข็มสี่เหลี่ยม และเฟอร์ไรท์ละเอียดเห็นแถบสีดำกระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้น (Matrix) เฟอร์ไรท์ที่เห็นเป็นพื้นสีขาว และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย จะมีโครงสร้างออสเทนไนท์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

(2)บริเวณเนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จากลวดเชื่อม UTP63

เห็นโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) และมีโครงสร้างจุลภาคออสเทนนิติก แมงกานีสปริมาณโครเมียมสูง (FeMnCr Austenitic) กระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้น เป็นโครงสร้างเหนียวช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม มีสมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening)

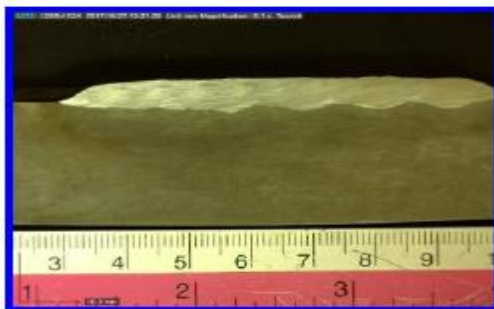
(3) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing layer) ลวดเชื่อม UTP LEDURIT65

ให้โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็นโครเมียมคาร์ไบด์และสารประกอบเชิงซ้อน (Chromium & Complex carbide) จากภาพถ่ายจะสังเกตเห็นเป็นแถบสีขาว กระจายฝังอยู่บนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) สีพื้นเทาที่แข็งและเหนียวแกร่ง (Hard toughness) โครเมียมคาร์ไบด์และสารประกอบเชิงซ้อน เป็นโครงสร้างจุลภาคที่แข็งมีความสามารถต้านทานการครูดสูง (Highly abrasion resistance) และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย เส้นแบ่งเขตโครงสร้างจุลภาค จะปรากฏโครงสร้างออสเทนไนต์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

4.3.5.4 รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาคขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสถานะที่ 5

ตารางที่ 4-43 Test Report : Micro Vicker Testing : สถานะที่ 5 : Heating control : Preheat 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September/ 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass temp. 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	UTP 63 + DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25 °C, 48% RH



รูปที่ 4.51 การทดสอบความแข็ง Micro Vickers Test ชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สถานะที่ 5

ตารางที่ 4-44 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 5 เปรียบเทียบระหว่าง โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระทบร้อน (HAZ), เนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) และเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) : UTP 63 + DUROID 650 ESAB Preheat 150°C

หน่วย HB (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
ESAB 650	442.7 (44.7)	449.1 (45.3)	451.6 (45.5)	452.1 (45.5)	447.8 (45.1)	448.66 (45.22)
Item	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	ค่าเฉลี่ย
UTP63	374.7(38.3)	369.5 (37.7)	373.2 (38.1)	359.1 (36.6)	369.5 (37.7)	369.2 (37.69)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572Gr.65	236.3(20.2)	248.4(22.0)	243.1 (21.5)	254.4(23.1)	252.3 (22.7)	246.86 (21.90)
Item	Base	Base	Base	Base	Base	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572Gr.50	198.9 (14.0)	202.1 (16.0)	196.6 (13.5)	201.0 (16.0)	201.9 (16.5)	200.10 (15.10)

ความแข็งใช้อธิบายสภาพหรือสมบัติของวัสดุในการต้านแรงกระทำทางกลที่ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทรง หรือขนาดอย่างถาวร หน่วยความแข็งที่ใช้ในการทดสอบ

จากตารางที่ 4-31 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 5 จะพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 200.10 HV (15.10 HRC) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 246.86 HV (21.90 HRC) พบว่าค่าความแข็ง แตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 46.70 HV (6.80 HRC) ซึ่งต่างกันในระดับความแข็งโครงสร้างเฟอร์ไร-เพิร์ลไลท์เนื้อ ของโลหะงานเหล็กกล้า HSLA : ASTM A572 G.65 ที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม กับความแข็ง โครงสร้างเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนท์ไนท์ (Benite) ของโลหะงาน ASTM A572 G.65 บริเวณกระทบร้อน จากการเชื่อม (HAZ) แปลว่า HAZ มีแนวโครงสร้างแข็งและแข็งแรงไม่เปราะหรือไม่แตกร้าวย่าง เพราะ ไม่ใช่โครงสร้างคาร์ไบด์เร่งเย็น มาร์เทนไซต์ แสดงถึงความปลอดภัยที่จะไม่เกิดการแตกร้าได้แนวเชื่อม (No underbead cracking)

ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) ปกติเนื้อเชื่อมไม่มีโลหะงานละลายผสม (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP 63 ก่อนใช้งานมีค่าความแข็งมาตรฐานของ เนื้อเชื่อมที่ไม่มีโลหะงานผสม (Weld un-dilution) จากผู้ผลิตกำหนดไว้ประมาณ 200 HB (15 HRC หรือ 199 HV) เป็นลวดเชื่อมกลุ่มโครงสร้างจุลภาคออสเทนนิติกแมงกานีสโครเมียมสูง เนื้อเชื่อมจะมีความแข็ง เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening) เพิ่มไปสูงได้ถึง 350 HB (38 HRC หรือ 361 HV) จากการ ทดลองพบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อมรองพื้นที่ได้ จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 5 ยังไม่ผ่านการ ใช้ งานเท่ากับ 369.2 HV (37.69 HRC) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนด เนื่องจากมีเนื้อโลหะงาน เหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลายละลายขึ้นมาเจือปนในเนื้อเชื่อมรองพื้น (Dilution of weld buffer layer)

สำหรับชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) ลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า DUROID 650 ESAB เป็นลวดเชื่อมให้เนื้อเชื่อม (Weld metal) กลุ่มโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide) มีค่าความแข็งเนื้อเชื่อม (Weld metal) ตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดอยู่ระหว่าง 55 ถึง 58 HRC

ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 5 ด้วยลวดเชื่อม DUROID 650 ESAB ทับแนวเชื่อมรองพื้น UTP 63 ซึ่งให้เนื้อเชื่อมมีสมบัติเป็นเหล็กกล้าอสเทนนิติกแมงกานีส โครเมียมสูง พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB ที่ได้ คือ 448.66 HV (45.22 HRC) ซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้มาก เนื่องจากการเชื่อมพอกทับแนวเดียวจึงมีเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) UTP 63 หลอมละลายขึ้นมาเจือผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Dilution of weld surfacing) จำนวนมาก ทำให้เนื้อเชื่อมพอกแข็งอ่อนตัวลง

4.3.5.5 รายงานผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 5

ในทางวัสดุศาสตร์และโลหะวิทยา ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานและความต้านทานต่อการเสียรูปก่อนการแตกหัก หนึ่งในคำจำกัดความที่นิยมใช้ทั่วไป ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือจำนวนพลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่วัสดุที่สามารถดูดกลืนพลังงาน (Absorb) ก่อนแตกหักหรืออาจกล่าวได้ว่า ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุเมื่อได้รับความเค้น (Stressed) เป็นค่าความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว (Strength and Ductility) ของวัสดุ

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากระทบชิ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับชิ้นทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วนจะส่งผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนรูปวัสดุ จนแตกขาดถาวรซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแข็งแรงจะมีค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย การรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก จึงเป็นรายงานค่าพลังรับแรงกระแทกของวัสดุที่นำมาทำเป็นชิ้นทดสอบนั่นเอง และคำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกันเรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแรงกระแทกชิ้นเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 5 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน

ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 4-45 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 5 : Preheating control : Before 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	UTP 63 + DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.52 ขึ้นทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 5

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี มาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ขึ้นทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 × 10 มิลลิเมตร บากร่องตัววัดตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มิลลิเมตร ก้นร่องมีรัศมีความโค้ง 0.25 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับขึ้นทดสอบห่างกัน 40 มิลลิเมตร ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางขึ้นทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้าน

คล้ายกับการกดตัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักเห่งขึ้นงานตามแนวร่องที่บาก

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 5 มาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

(3) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3

(4) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffering) จำนวน 3 ชิ้นคือ B1, B2 และ B3

ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4-46 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 5

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below notch 8± 0.05 (mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.01	10.02	8.01	55.01	45°	87	87
W2	10.01	10.03	8.01	55.01	45°	92	
W3	10.00	10.00	8.02	55.02	45°	82	
B1	10.01	10.01	8.01	55.02	45°	195	194
B2	10.00	10.00	8.01	55.04	45°	201	
B3	10.00	10.01	8.00	55.01	45°	186	

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance critira) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ > 60 จูล (J) ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB กรณีใช้ บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ วันแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ จึงถือขอบเขตการยอมรับ ตามสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยหลักการเชื่อมพอกแข็งเนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ จะแข็งแรง มีค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ต่ำกว่า เนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีส UTP 63 ดังนั้นถ้าผลการทดลองหาค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB สูงกว่าค่าต่ำสุด ของค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 จึงสรุปได้ว่าผ่านขอบเขตการยอมรับตามบริษัทผู้ผลิตแล้ว

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4-47 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่ 5

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	87	เนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB > 60 J	Accepted
W2	92	เนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB > 60 J	Accepted
W3	82	เนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB > 60 J	Accepted
Buffer-B1	195	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B2	201	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B3	186	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted

ค่า Impact Energy (J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld surfacing : W1, W2 และ W3) DUROID 650 ESAB มีค่าสูง > 60 J ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับขั้นต่ำของเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffer : B1, B2 และ B3) UTP63 ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับทุกจุดที่ทำการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) เนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer : B1, B2 และ B3) เท่ากับ 194 จูล (J) เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld surfacing layer : W1, W2 และ W3) เท่ากับ 87 จูล (J) สูงกว่า 60 จูล (J) ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ทั้งสองชั้นแนวเชื่อม

4.3.6 การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 6 : ไม่ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (No-preheat)

ทำการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งขึ้นงานวัสดุเกรด ASTM A572 Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร สภาวะที่ 6 โดยไม่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนการเชื่อม (No-preheat) เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า UTP 63 ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 400 มม. ค่ากระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC⁺/AC 100 - 130 Amps. เป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 – EFeMnCr, EFeCr-A5 Electrodes หลังจากนั้นทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า DUROID 650 ESAB ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 450 มม. กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC^{+/-}, AC 130 - 170 Amps. จัดอยู่ในกลุ่มมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

4.3.6.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 6 : No-preheating

4.3.6.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สภาวะที่ 6 จำนวน 4 ขั้นตอนทดสอบ

ตารางที่ 4-48 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)

ชั้นงานที่	แนวเชื่อมที่	กระแสเชื่อม (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิที่ชั้นงาน ต่ำสุด °C	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด °C
1	1	110	DCEP	150	150	600
2	1	110	DCEP	150	150	600
3	1	110	DCEP	150	150	600
4	1	110	DCEP	150	150	600

ตารางที่ 4-49 ค่าตัวแปรที่ใช้เชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ชั้นงานที่	แนวเชื่อมที่	กระแสเชื่อม (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิที่ชั้นงาน ต่ำสุด °C	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด °C
1	1	160	DCEP	150	150	600
2	1	160	DCEP	150	150	600
3	1	160	DCEP	150	150	600
4	1	160	DCEP	150	150	600

4.3.6.1.2 ขั้นตอนทดสอบงานเชื่อม (Test Coupon) ที่ได้จากสภาวะทดลองที่ 6

(1) ขั้นตอนทดสอบงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 6



รูปที่ 4.53 ขั้นตอนทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 6

(2) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม(Penetrant Testing : PT)
นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบด้วยการตรวจสอบพินิจผิวแนวเชื่อมพอกแข็งไม่พบรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม นำไปตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึมเพื่อยืนยันผล ปรากฏพบรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อมแนวแรก



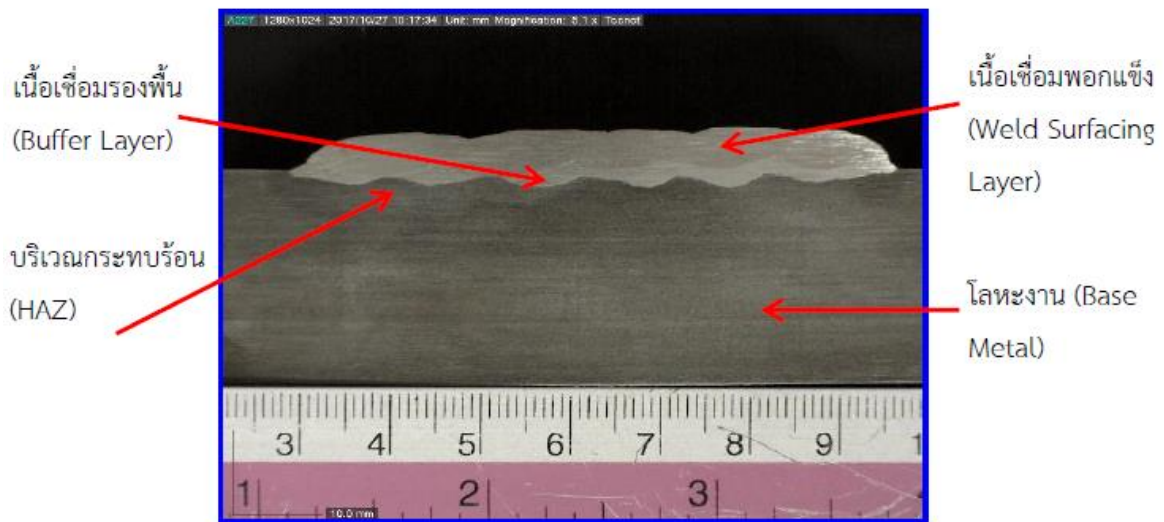
รูปที่ 4.54 ผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมแนวเชื่อมสภาวะที่ 6

4.3.6.2 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-50 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 6

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	UTP S63 + DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH

Result of Macro Structure test



รูปที่ 4.55 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้าง
จุลภาคส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 6

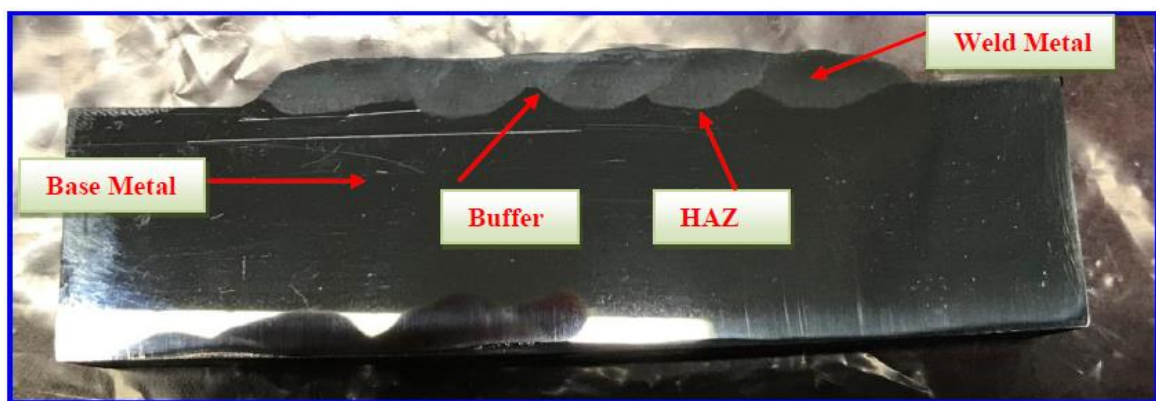
จากรูปที่ 4.55 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษ แบ่งออกได้ 4 บริเวณคือ 1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (Unaffected Zone) 2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (HAZ) 3. ชั้นแนวเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer) 4. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer) พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จะช่วยเพิ่มการยึดเกาะช่วยลดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง นิยมใช้ลวดเชื่อมที่ให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์หรือโครงสร้างออสเทนไนท์ หลักการเชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้ เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยาต้องการสมบัติจากความแข็งของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมช้ามากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.6.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Reprt : Mircro Structure Test)

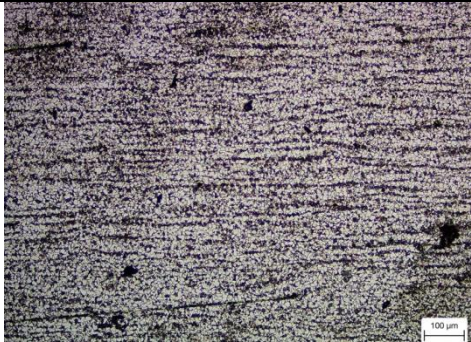
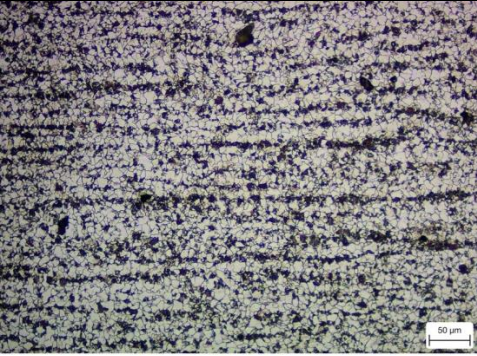
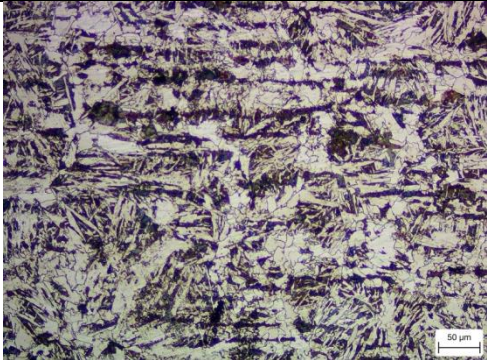
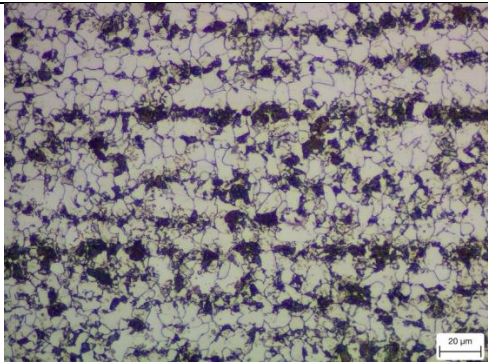
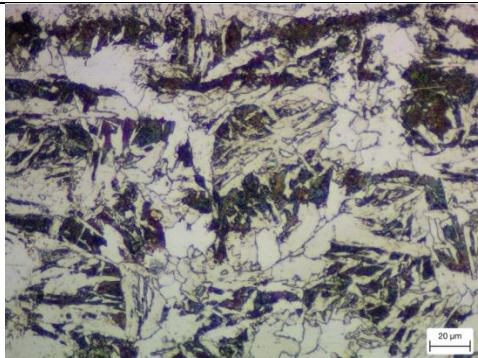
ตารางที่ 4-51 Test Report : Micro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 6

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September/ 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	No-preheat and and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	UTP 63 + DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



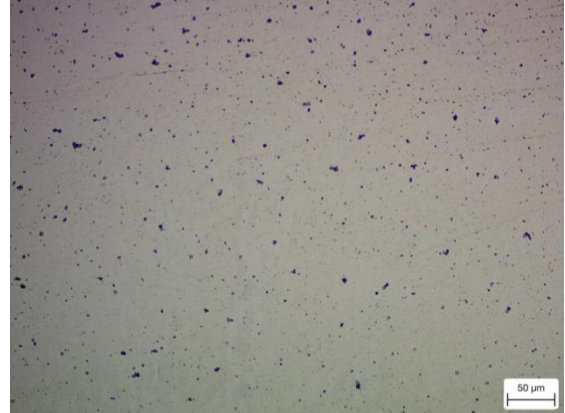
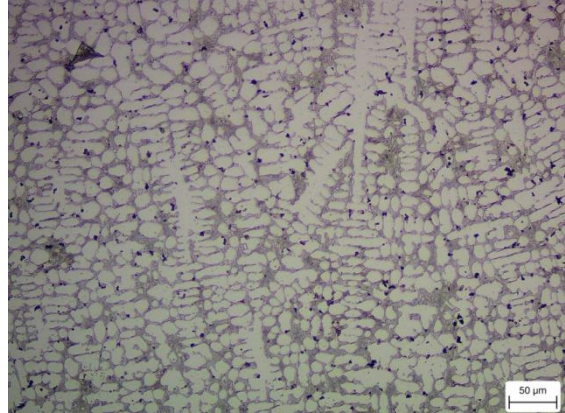
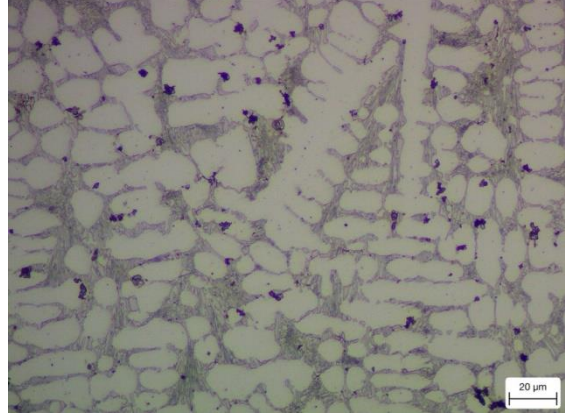
รูปที่ 4.56 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบทดลองเชื่อม สภาวะที่ 6

4.3.6.3.1 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะงานที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Un-affected Zone) ในการเชื่อมทดสอบ สภาวะที่ 6

ชิ้นงาน (Base Metal)	บริเวณกระตบร้อน (HAZ)
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 100X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 100X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification 200X	 HAZ : ASTM A572 Gr.65 Magnification 500X
โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน ASTM A572 Gr.65 ผลิตจากกรรมวิธีรีดร้อน ชุบ และอบคืนตัว (Rolled – Thermomachanic Quenched & Tempered) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์และเพิร์ลไลต์ละเอียด พื้นขาวคือโครงสร้างเฟอร์ไรท์ แถบดำแทรกทั่วไปคือโครงสร้างเพิร์ลไลต์และเพิร์ลไลต์ละเอียด	บริเวณกระตบร้อนได้รับความร้อนสูงเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์และมีอัตราเกรนโตขึ้นเนื่องจากเหล็กกล้า HSLA มีส่วนผสมคาร์บอนน้อยเพียง 0.23% มีธาตุ C รวมตัวกับ Fe เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์(Fe_3C) แท่งเข็มสีเทาเล็กน้อยปรากฏกระจายตามแนวเขตพื้นที่กระตบร้อน โครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียดเห็นเป็นแถบสีดำ โครงสร้างจุลภาคทั้งสองกระจายอยู่บนโครงสร้างพื้น (Matrix) เฟอร์ไรท์ สีขาว

รูปที่ 4.57 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะงานที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Un-affected Zone) ในการเชื่อมทดสอบ สภาวะที่ 6

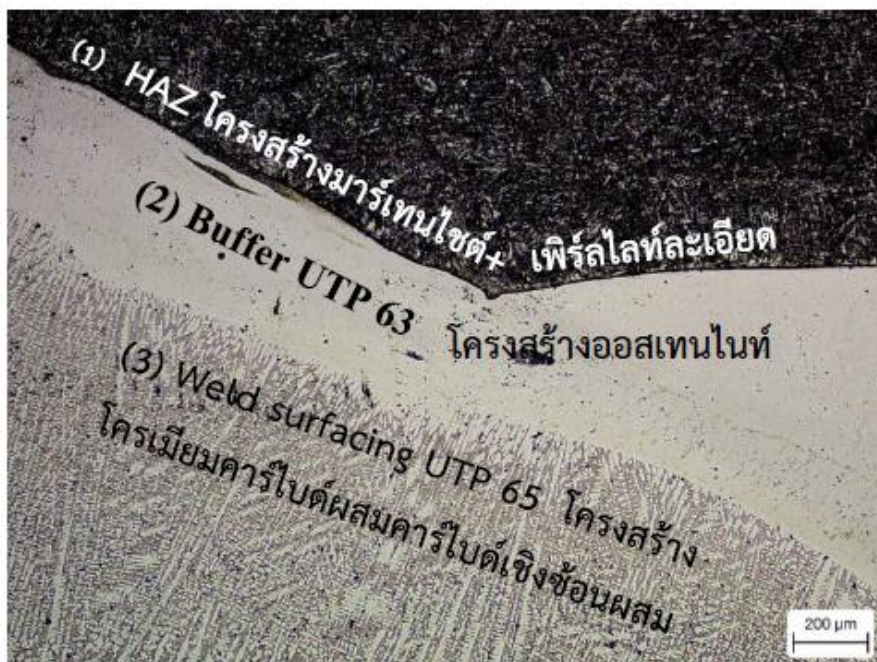
4.3.6.3.2 เปรียบเทียบผลภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมรองพื้นกับ แนวเชื่อมพอกแข็ง

แนวเชื่อมรองพื้น (Buffering)	บริเวณแนวเชื่อม (Weld)
 UTP 63 Buffer Layer Magnification 100X	 DUROID 650 ESAB Weld Surface Layer Magnification 100X
 UTP 63 Buffer Layer Magnification 100X	 DUROID 650 ESAB Weld Surface Layer Magnification 100X
เนื้อเชื่อมรองพื้นลวดเชื่อม UTP 63 มี โครงสร้างพื้น ออสเทนไนท์ (Austenite matrix) เป็นพื้นสีเทาและมี โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์แมงกานีส โครเมียมสูง (FeMnCr Austenite) กระจายทั่วโครงสร้างพื้น มีคุณลักษณะความแข็งจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening)	 DUROID 650 ESAB Weld Surface Layer Magnification 100X
เนื้อเชื่อมพอกแข็ง ลวดเชื่อม DUROID 650 ESAB ให้โครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) และคาร์ไบด์ เชนซ็อน ลักษณะเป็นแถบขาวกระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้นออสเทนไนติก (Austenitic matrix) ที่เห็นเป็นพื้นเทา	

รูปที่ 4.58 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อน , แนวเชื่อมรองพื้นและบริเวณแนวเชื่อมพอกแข็ง ในการทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 6

4.3.6.3.3 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 6

UTP Ledurit65 + UTP63 + HAZ



UTP Ledurit 65 + UTP63 + HAZ Magnification 100X

รูปที่ 4.59 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อน (HAZ) , แนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) และแนวเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing layer) - Magnification 100X

รูปที่ 4.59 แยกอธิบายได้ดังนี้

(1) (เนื้อโลหะงานหลักกล้าฯ ASTM A572Gr.65 บริเวณกระตบร้อน (HAZ))

ได้รับความร้อนสูงกว่าจุดวิกฤติ ทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ ที่อุณหภูมิสูง สามารถละลายธาตุคาร์บอน (C) 0.23% เข้ารวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ในสภาวะ สารละลายของแข็ง (Solid Solution) ทั้งหมด บริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวสูงมากคาร์บอนบางส่วน แยกตัวไม่ทันจึงรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) กลายเป็นสารประกอบคาร์ไบด์เร่งเย็นมาร์เทนไซต์ (Fe_3C) ธาตุคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนสภาพเดิม เป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็ว เกรนเพิร์ลไลต์จึงไม่มีโอกาสโตเต็มที่จึงได้เพิร์ลไลต์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งและแข็งแรง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นขาวคือโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ที่เห็นเป็นแท่งเข็มสีเทาเล็กน้อย แทรกปะปนอยู่กับ โครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียดที่เห็นเป็นแถบดำแทรกสลับทั่วไป และที่ใกล้แนวเส้นแบ่ง

เขตหลอมละลาย จะมีโครงสร้างออสเทนไนต์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

(2) บริเวณเนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จากลวดเชื่อม UTP63

โครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างพื้นออสเทนไนติก (Austenitic matrix) สังเกตเห็นเป็นพื้นเทา และมีโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนติกแมงกานีส โครเมียมสูง (FeMnCr Austenitic) แทรกกระจายทั่วไป เป็นโครงสร้างเหนียว ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม มีสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening)

(3) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing layer) ลวดเชื่อม UTP LEDURIT65

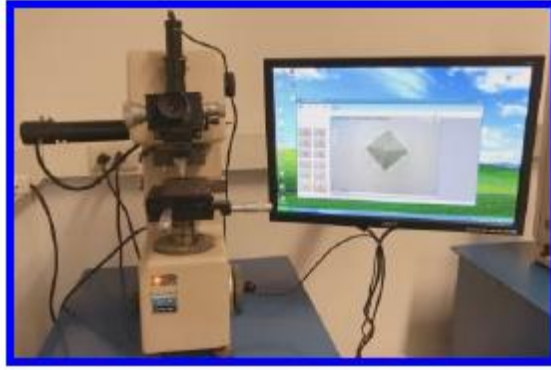
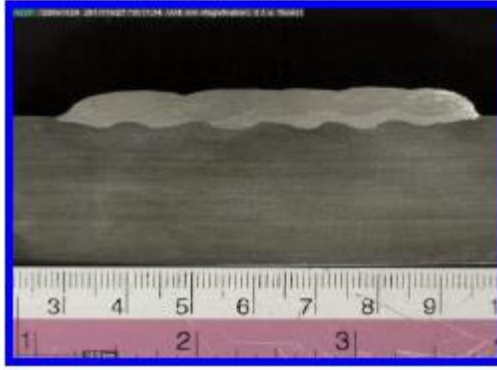
ให้โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็นโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex Carbide) แถบสีขาวกระจายบนพื้นโครงสร้างพื้นออสเทนไนติก (Austenitic matrix) ที่เห็นเป็นพื้นสีเทา ไกล่แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย ที่แนวเส้นแบ่งเขตโครงสร้างจุลภาค จะปรากฏโครงสร้างออสเทนไนต์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม แต่ถ้าเชื่อมพอกแข็งชั้นเดียวจะทำให้ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB ลดลงมาก

ไม่พบจุดบกพร่องที่เส้นแบ่งเขตหลอมละลาย (Fusion Line) และไม่พบจุดบกพร่องในเนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) และเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

4.3.6.4 รายงานผลการทดสอบความแข็งแรงจุลภาคขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสถานะที่ 6

ตารางที่ 4-52 Test Report : Micro Vicker Testing : สถานะที่ 6 : Heating control : No-preheat and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600°C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	UTP S63 + DURIOD 650 ESAB	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25 °C, 48% RH



รูปที่ 4.60 การทดสอบความแข็ง Micro Vickers Test ชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 6

ตารางที่ 4-53 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่6 เปรียบเทียบระหว่าง โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระทบร้อน (HAZ), เนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) และเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) : UTP 63 + DUROID 650 ESAB

หน่วย HV (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
ESAB 650	413.8 (42.2)	405.0 (41.3)	429.7 (43.6)	430.5 (43.7)	420.6 (42.8)	419.92 (42.72)
Item	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	Buffer	ค่าเฉลี่ย
UTP63	243.0(21.0)	252.3 (22.7)	256.1 (23.4)	239.6 (20.3)	251.2 (22.6)	248.44 (22.00)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572Gr.65	226.1 (20.0)	238.1 (20.2)	246.1 (21.6)	244.2 (21.2)	241.1 (20.6)	239.12 (20.72)
Item	Base	Base	Base	Base	Base	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572Gr.65	198.9 (14.0)	202.1 (16.0)	196.6 (13.5)	201.0 (16.0)	201.9 (16.0)	200.1 (15.10)

ความแข็งใช้อธิบายสภาพหรือสมบัติของวัสดุในการต้านแรงกระทำทางกล ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทรงหรือขนาดอย่างถาวร หน่วยความแข็งที่ใช้ในการทดสอบ

จากตารางที่ 4-53 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่6 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 200.1 HV (15.10 HRC) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 239.12 HV (20.72 HRC) พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกันเล็กน้อยเท่ากับ 39.02 HV (5.62 HRC) ซึ่งมีค่าแตกต่างไม่สูงมาก ปกติ โลหะงานเหล็กกล้า HSLA : ASTM A572 Gr.65 บริเวณไม่ได้ผลกระทบร้อน (Base metal) จะมีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไลท์ และเพิร์ลไลท์ละเอียด ดังนั้นการที่โลหะงานบริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกับบริเวณไม่กระทบร้อน แปลว่าแนวกระทบร้อน HAZ มีแนวโครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ไม่ใช่คาร์ไบด์มาร์เทนไซด์ที่มีความแข็งสูงกว่านี้มาก ความแข็งที่ใกล้เคียงกันแสดง ถึงความปลอดภัยที่จะไม่เกิดการแตกร้าวใต้แนวเชื่อม (No underbead cracking)

ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) ปกติเนื้อเชื่อมไม่มีโลหะงานละลายผสม (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า UTP 63 ก่อนใช้งานมีค่าความแข็งมาตรฐานของเนื้อเชื่อมที่ไม่มีโลหะงานผสม (Weld un-dilution) จากผู้ผลิตกำหนดไว้ประมาณ 200 HB (15 HRC หรือ 199 HV) เป็นลวดเชื่อมกลุ่มโครงสร้างจุลภาคออสเทนนิติกแมงกานีส โครเมียมสูง เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน (Work hardening) เพิ่มไปสูงได้ถึง 350 HB (38 HRC หรือ 361 HV) จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อมรองพื้นที่ได้ จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 6 ยังไม่ผ่านการใช้งานเท่ากับ 248.44 HV (20.00 HRC) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนด เนื่องจากมีเนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลายละลายขึ้นมาเจือปนในเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld dilution in buffer layer) มาก

สำหรับชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) ลวดเชื่อมเครื่องหมายการค้า DUROID 650 ESAB เป็นลวดเชื่อมให้เนื้อเชื่อม (Weld metal) กลุ่มโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Chromium and Complex carbide) มีค่าความแข็งเนื้อเชื่อม (Weld metal) ตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดอยู่ระหว่าง 55 ถึง 58 HRC

ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 6 ด้วยลวดเชื่อม DUROID 650 ESAB ทับแนวเชื่อมรองพื้น UTP 63 ซึ่งให้เนื้อเชื่อมมีสมบัติเป็นเหล็กกล้าออสเทนนิติกแมงกานีส โครเมียมสูง พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB ที่ได้ คือ 419.226 HV (42.72 HRC) ซึ่งความแข็งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้มาก เนื่องจากการเชื่อมพอกทับแนวเดียวจึงมีเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld buffer layer) UTP 63 หลอมละลายละลายขึ้นมาเจือผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Dilution in weld surfacing) จำนวนมาก ทำให้ความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็งอ่อนตัวลง

4.3.6.5 รายงานผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 6

ในทางวัสดุศาสตร์และโลหะวิทยา ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานและความต้านทานต่อการเสียรูปก่อนการแตกหัก หนึ่งในคำจำกัดความที่นิยมใช้ทั่วไป ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือจำนวนพลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่วัสดุที่สามารถดูดกลืนพลังงาน (Absorb) ก่อนแตกหักหรืออาจกล่าวได้ว่า ความเหนียวแกร่งของวัสดุ (Toughness) คือความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุเมื่อได้รับความเค้น (Stressed) เป็นค่าความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว (Strength and Ductility) ของวัสดุ

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากระทบชิ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับชิ้นทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วน

จะส่งผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงรูปวัสดุ จนแตกขาดการซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแกร่งจะมีค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย การรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก จึงเป็นรายงานค่าพลังรับแรงกระแทกของวัสดุที่นำมาทำเป็นชิ้นทดสอบนั่นเอง และคำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกัน เรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแรงกระแทกชิ้นเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 6 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบ เทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 6 ดังนี้

ตารางที่ 4-54 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 6 : No-preheating control : Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	UTP S63 + DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.61 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 6

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี มาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ขึ้นทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 × 10 มิลลิเมตร บากร่องตัววัดตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มิลลิเมตร ก้นร่องวีมีรัศมีความโค้ง 0.25 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับขึ้นทดสอบห่างกัน 40 มิลลิเมตร ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางขึ้นทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้านคล้ายกับการกดดัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักงอขึ้นงานตามแนวร่องที่บาก

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 6 มาทำการเตรียมขึ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนขึ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

- (1) ขึ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3
- (2) ขึ้นทดสอบเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffering) จำนวน 3 ชิ้นคือ B1, B2 และ B3 ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4-55 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 6

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below notch 8± 0.05(mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.00	10.02	8.01	55.01	45°	79	80.3
W2	10.00	10.03	8.01	55.01	45°	75	
W3	10.03	10.01	8.02	55.00	45°	87	
B1	10.01	10.01	8.00	55.00	45°	201	199.3
B2	10.00	10.00	8.01	55.04	45°	205	
B3	10.00	10.01	8.01	55.01	45°	192	

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance criteria) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ > 60 จูล (J) ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB กรณีใช้ บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ วันแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ จึงถือขอบเขตการยอมรับ ตามสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยหลักการเชื่อมพอกแข็งเนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์จะแข็งเปราะ มีค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ต่ำกว่า เนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีส UTP 63 ดังนั้นถ้าผลการทดลองหาค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB สูงกว่าค่าต่ำสุด ของค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 จึงสรุปได้ว่าผ่านขอบเขตการยอมรับตามบริษัทผู้ผลิตตลอดเชื่อม การวิเคราะห์ผลการทดสอบ สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4-56 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่ 6

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	79	เนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB > 60 J	Accepted
W2	75	เนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB > 60 J	Accepted
W3	87	เนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB > 60 J	Accepted
Buffer-B1	201	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B2	205	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted
Buffer-B3	192	เนื้อเชื่อม UTP 63 > 60 J	Accepted

หมายเหตุ Impact Energy (J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld surfacing : W1, W2 และ W3) DUROID 650 ESAB มีค่าสูง > 60 J ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับขั้นต่ำของเนื้อเชื่อมรองพื้น (Weld Buffer : B1, B2 และ B3) UTP63 ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับทุกจุดที่ทำการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) เนื้อเชื่อมรองพื้น (Buffer layer : B1, B2 และ B3) เท่ากับ 199.3 จูล (J) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing layer : W1, W2 และ W3) เท่ากับ 80.3 จูล (J) สูงกว่า 69 จูล (J) ถือว่าผ่านขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ทั้งสองชิ้นแนวเชื่อม

4.3.7 การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 7 : ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat)

การเชื่อมขึ้นงานวัสดุเกรด ASTM A572 Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร สภาวะที่ 7 ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) แต่ให้ความร้อนที่ขึ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Preheat) ที่ 150°C และทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ด้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า DUROID 650 ESAB ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 450 มม. กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้ DC+/AC 130 - 170 Amps. เป็นลวดเชื่อมจัดอยู่ในกลุ่มตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

4.3.7.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 7 : Preheating 150°C

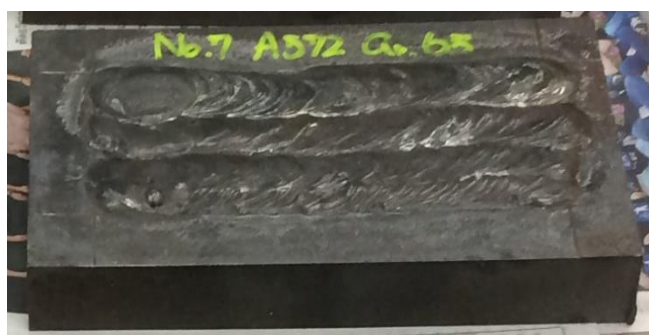
4.3.7.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สภาวะที่ 7 จำนวน 3 ขั้นตอนทดสอบ

ตารางที่ 4-57 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็ง ด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB จำนวนชั้นเชื่อม 1 ชั้น

ชั้นงานที่	แนวเชื่อม ชั้นที่	กระแสเชื่อม (A)	ขั้วกระแสไฟ เชื่อม	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิPreheat ชั้นงาน(°C)	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด (°C)
1	1	160	DCEP	150	150	600
2	1	160	DCEP	150	150	600
3	1	160	DCEP	150	150	600

4.3.7.1.2 ขั้นตอนทดสอบงานเชื่อมที่ได้จากสภาวะการทดลองที่ 7

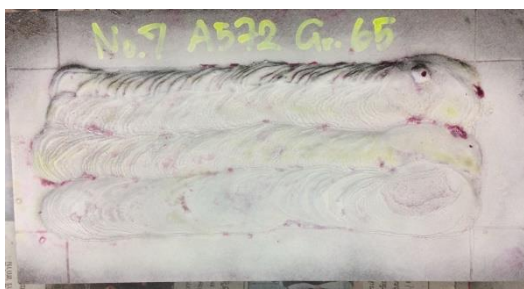
- (1) ขั้นตอนทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 7



รูปที่ 4.62 ขั้นตอนทดสอบการเชื่อมการทดลอง สภาวะที่ 7

(2) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งสถานะที่ 7 ที่เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบด้วยการตรวจสอบพินิจไม่พบว่ามีรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม ทุกชิ้นทดสอบ และนำชิ้นงานเชื่อมทดสอบไปทำการตรวจสอบผลยืนยันด้วยของเหลวแทรกซึม ไม่พบว่ามีรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม จัดอยู่ในระดับไม่มีรอยแตกร้าว แต่มีรูพรุน (Porosity) เกิดขึ้นที่แนวเชื่อมทั้ง 3 ชิ้นเนื่องจากไม่ได้ทำการอบลดเชื่อมและชิ้นงานไม่สะอาดพอ

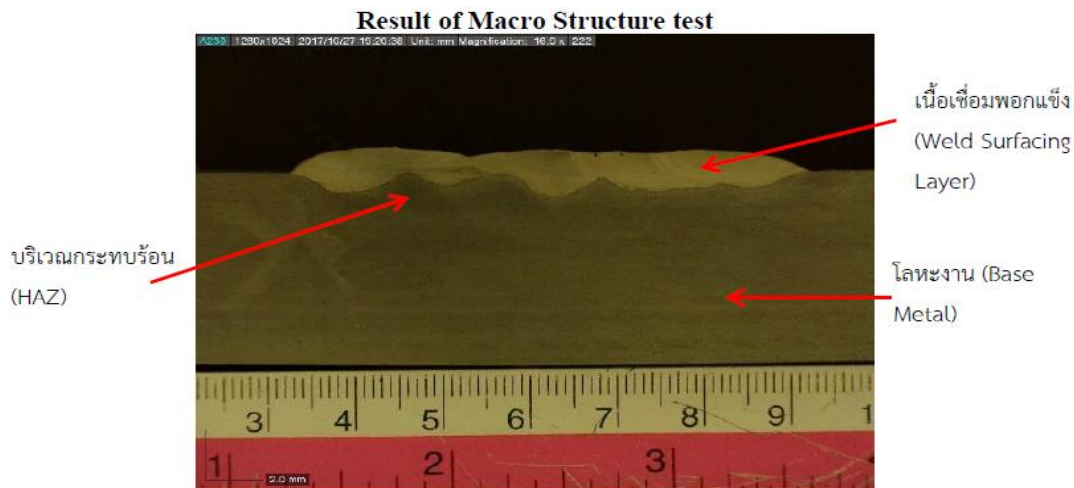


รูปที่ 4.63 ผลการตรวจสอบรอยร้าวด้วยของเหลวแทรกซึมผิวหน้าแนวเชื่อมชิ้นงานเชื่อมทดลอง สถานะที่ 7

4.3.7.2 รายงานผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-58 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสถานะที่ 7

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH



รูปที่ 4.64 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 7

จากรูปที่ 4.64 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษา แบ่งออกได้ 3 บริเวณคือ 1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (Unaffected Zone) 2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (HAZ) 3. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer) พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

การไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) จะทำให้ขาดตัวกลางช่วยยึดเกาะ อาจมีผลต่อความรุนแรงที่จะเกิดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง เนื่องจากขาดความยืดหยุ่นระหว่างชั้นเชื่อม หลักการเชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้ เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยาต้องการสมบัติจากความแข็งของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมช้ามากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.7.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Report : Micro Structure Test)

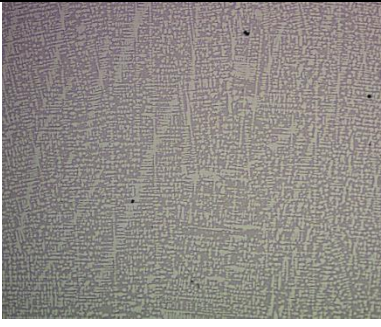
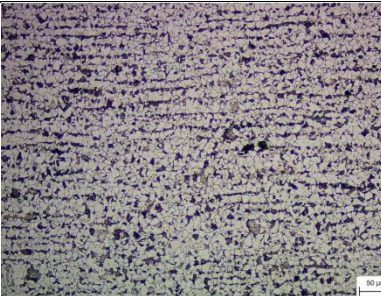
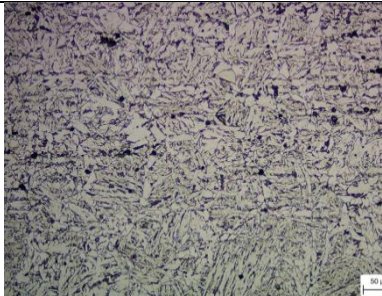
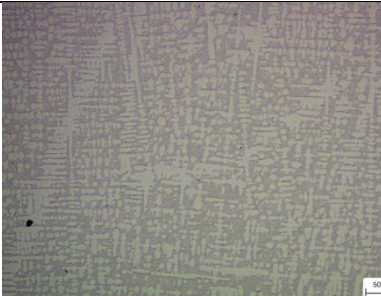
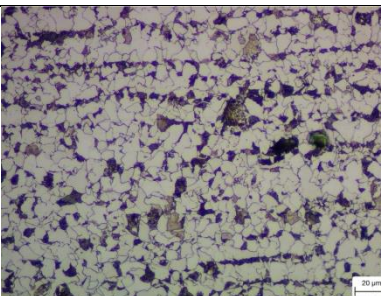
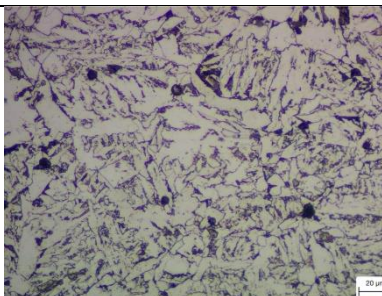
ตารางที่ 4-59 Test Report : Micro Structure Test การทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่ 7

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



รูปที่ 4.65 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นทดสอบทดลองงานเชื่อม สภาวะที่ 7

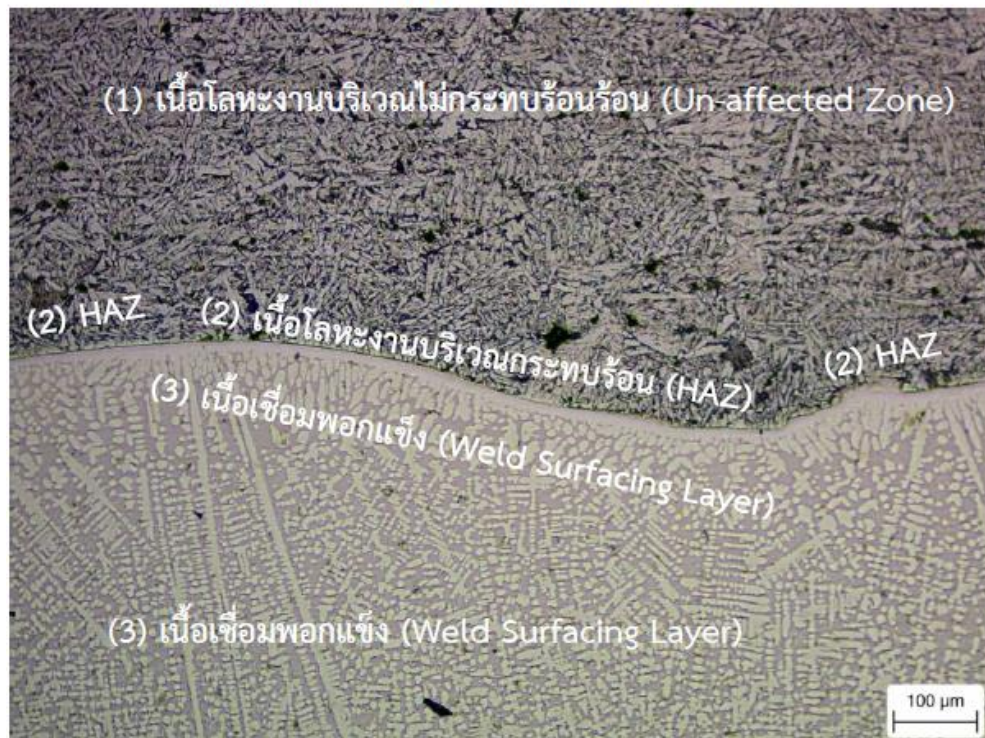
4.3.7.3.1 เปรียบเทียบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคระหว่างโลหะงานที่ไม่มีผลกระทบร้อน (Un-affected zone) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และ บริเวณแนวเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ชิ้นงาน (Base Metal)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ)	บริเวณแนวเชื่อม (Weld)
ASTM A572Gr.65 – Magnification 100X	 HAZ- magnification100X	 DUROID 650 ESAB –Magnification100X
 ASTM A572Gr.65 – Magnification 200X	 HAZ- magnification200X	 DUROID 650 ESAB–Magnification200X
 ASTM A572Gr.65 – Magnification 500X	 HAZ- magnification500X	 DUROID 650 ESAB –Magnification200X
โครงสร้างจุลภาคโลหะงานที่ไม่มี กระทบร้อน(Un-affected zone) พิจารณาจากภาพถ่ายสีขาวเป็นพื้น โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) แอบสีดำเป็นโครงสร้างเพิร์ล ไลต์ และเพิร์ลไลต์ละเอียดแทรก ทั่วไป	โครงสร้างจุลภาคโลหะงานบริเวณ กระทบร้อน (HAZ) ปรากฏโครงสร้าง เบนไนท์หรือเพิร์ลไลต์ละเอียดแอบสี ดำกระจายทั่วไปบนโครงสร้างพื้น เฟอร์ไรท์(Ferrite Maxtric) สีขาว ไม่ ค่อยปรากฏ มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เป็นเส้นเข็มสีเทาเนื่องจาก เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65มีCอยู่เพียง0.23%	โครงสร้างจุลภาคโลหะงานบริเวณเนื้อ เชื่อมพอกแข็ง(Weld metal) เห็น แอบสีขาวคือโครงสร้างโครเมียมคาร์ ไบด์และคาร์บได์เชิงซ้อน กระจายทั่วไป บนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) สีเทา โครงสร้าง จุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์จะแข็ง ต้านทานการครูดสูง

รูปที่ 4.66 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม สภาวะที่ 7

4.3.7.3.2 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 7

DUROID 650 EAB + HAZ ASTM A572 Gr.65



HAZ : ASTM A572 Gr.65 + Weld DUROID 650 ESAB - Magnification 50X

รูปที่ 4.67 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อม จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 7

จากรูปที่ 4.67 สามารถอธิบายได้ดังนี้

(1) โลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572Gr.65 บริเวณไม่กระทบร้อน (UN-affected Zone)

เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65 ผลิตจากกรรมวิธีรีดร้อน ชุบและอบคืนตัว (Rolled Thermomechanical Quenched and Tempered) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์และเพิร์ลไลท์ละเอียด โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) พิจารณาจากรูปเป็นพื้นสีขาว ส่วนโครงสร้างเพิร์ลไลท์และเพิร์ลไลท์ละเอียดจะเป็นแถบสีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์

(2) บริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone : HAZ) เหล็กกล้า HSLA : ASTM A572 Gr.65

บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนสูงจนเปลี่ยนโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์สามารถละลายธาตุคาร์บอน 0.23% เข้ารวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ได้หมดเมื่อแนวเชื่อมมีอัตราการเย็นสูง คาร์บอนบางส่วนจะรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ได้ไม่มากนักเกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์เร่งเย็นมาร์เทนไซต์ (Fe_3C) ธาตุคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนสภาพเดิมได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็วเกรน

เฟิร์ลไลท์จึงไม่มีโอกาสโตเต็มที่ จึงได้เฟิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งและแข็งแรง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นขาวคือโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite : Fe_3C) ที่เห็นเป็นแท่งเข็มสีเทาเล็กน้อยแทรกปะปนอยู่กับโครงสร้างเบนไนท์หรือเฟิร์ลไลท์ละเอียด (Fine pearlite or Benite) แถบดำแทรกสลับกระจายหนาแน่นทั่วไป และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย จะมีโครงสร้างออสเทนไนท์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

(3) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) : DUROID 650 ESAB

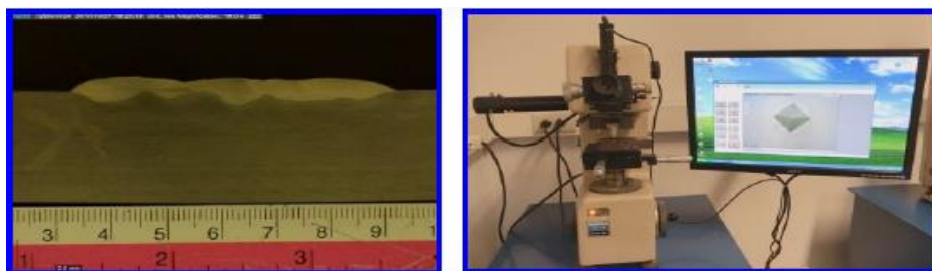
ปกติชั้นเชื่อมแรกจะมีส่วนของโลหะเนื้องาน (Base metal) ละลายขึ้นมาผสม (Dilution) และจะค่อยๆ จางลงไปในชั้นเชื่อมที่ 2 หรือ ชั้นที่ 3 ในการทดลองเป็นการเชื่อมชั้นเดียวทำให้มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เฟิร์ลไลท์ (Ferrite-Pearlite) จากโลหะงาน ASTM 572 Gr.65 หลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) มาก เนื้อเชื่อมพอกแข็งมีโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide) เช่นโคบอลท์ วานาเดียม ทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะเห็นสังเกตเห็นในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคเป็นแถบสีขาว กระจายอยู่บนโครงสร้างพื้นออสเทนไนท์ (Austenite matrix) เห็นเป็นพื้นสีเทา

การที่มีเนื้อโลหะงาน ASTM A572Gr.65 หลอมละลายขึ้นมาเจือปนกับโลหะเชื่อมที่กำลังหลอมละลาย (Weld dilution in weld surfacing)) มีผลทำให้ความแข็งแรงเนื้อเชื่อม DUROID 650 ESAB ลดลง

4.3.7.4 รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาค ชิ้นงานทดสอบเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 7

ตารางที่ 4-60 Test Report : Micro Vicker Testing : สภาวะที่ 7 : Heating Control : Preheat 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	Preheat 150°C and Interpass temp. 600°C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25°C , 48% RH



รูปที่ 4.68 การทดสอบความแข็ง Micro Vickers Test ชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 7

ตารางที่ 4-61 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่3 เปรียบเทียบระหว่าง โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระตบร้อน (HAZ), และ เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) : ASTM A572 Gr.65 + DURIOD 650 ESAB – Preheat

หน่วย HV (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
ESAB 650	512.6 (50.0)	515.7 (50.2)	459.4 (46.1)	512.6 (50.0)	459.4 (48.8)	491.94 (49.02)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	232.5 (20.0)	257.6 (23.6)	260.9 (24.1)	238.1 (20.0)	227.0 (20.0)	243.22 (21.54)
Item	Base Metal	Base Metal	Base Metal	Base Metal	Base Metal	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	199.2 (15.0)	212.4 (17.0)	207.6 (16.0)	214.1 (17.0)	216.6 (17.0)	209.98 (16.40)

ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 7 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 195.36 HV (16.40 HRC) กับบริเวณกระตบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 243.22 HB (21.54 HRC) พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกัน 33.24 HV (5.14 HRC) ความแตกต่างที่ใกล้เคียง แสดงว่า บริเวณกระตบร้อน (HAZ) ที่มีอัตราการเย็นตัวสูงหรือเร็วมากจะมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or benite) เมื่อเทียบกับโลหะงาน ASTM A572Gr.65 0.23%C ที่มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์ (Ferrite-pearlite) บริเวณไม่กระตบร้อน

การที่ไม่ทำการเชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมพอกแข็ง (No buffer layer) ทำให้แนวเชื่อมเย็นตัวเร็วขึ้น เพราะการเชื่อมรองพื้นเท่ากับเป็นการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมพอกแข็ง (Preheat) ไปในตัว มีผลทำให้บริเวณกระตบร้อน (HAZ) มีโครงสร้างเบนไนท์หนาแน่นแต่มีคาร์ไบด์มาแทนไฮโดรเจนน้อยมาก ซึ่งแข็งเพิ่มขึ้นจากเนื้อโลหะเดิมบริเวณไม่ได้รับกระตบร้อนจากการเชื่อม แต่ไม่ถึงกับเปราะหรือแตกง่าย เพราะโครงสร้าง HAZ ไม่ใช่โครงสร้างมาร์เทนไซด์ แต่จะมีผลต่อการยึดเกาะกับเนื้อเชื่อมพอกแข็งไม่แข็งแรง

ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมพอกแข็งเครื่องหมายการค้า DURIOD 650 ESAB เป็นลวดเชื่อมที่ให้เนื้อเชื่อมกลุ่มโครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน มีค่าความแข็งตามบริษัทผู้ผลิตกำหนด ระหว่าง 55 ถึง 58 HRC

ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 7 พบว่าค่าความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)เฉลี่ยที่ได้คือ 491.94 HV (49.02 HRC) ซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้มาก สืบเนื่องมาจากการเชื่อมพอกทับระหว่างลวดเชื่อมพอกแข็งกับโลหะงานโดยตรง และเป็นการเชื่อมทับแนวเดียวจึงทำให้เนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลายละลายขึ้นมาปนผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็งมาก (High dilution of weld surfacing) ทำให้เนื้อเชื่อมพอกแข็งด้วยคุณภาพมีความแข็งลดลง

4.3.7.5 ผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 7

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากกระทบขึ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับขึ้นทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วนจะส่งผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนรูปวัสดุ จนแตกขาดถาวรซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแกร่งจะมีค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย การรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก คำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกันเรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 4-62 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 7 : Preheating 150°C and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	Preheat 150 °C and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.69 ขั้นตอนทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 7

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีมาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ขั้นตอนทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 × 10 มิลลิเมตร บากร่องตัววีตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มิลลิเมตร ก้นร่องวีมีรัศมีความโค้ง 0.25 มิลลิเมตร ขั้นตอนทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับขั้นตอนทดสอบห่างกัน 40 มิลลิเมตร ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มิลลิเมตร ขั้นตอนทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางขั้นตอนทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้านคล้ายกับการกดดัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักงอขึ้นงานตามแนวร่องที่บาก

ได้ทำการทดสอบแรงกระแทกชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 7 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า ใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ขั้นตอนงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 4-63 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 7

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below notch 8± 0.05(mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.01	10.02	8.01	55.01	45°	86	79.33
W2	10.00	10.01	8.01	55.01	45°	76	
W3	10.03	10.03	8.00	55.02	45°	76	
B1	10.01	10.01	8.01	55.01	45°	135	136
B2	10.01	10.01	8.01	55.04	45°	138	
B3	10.00	10.01	8.00	55.01	45°	135	

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 7 มาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

- (1) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3
- (2) ชิ้นทดสอบโลหะงานบริเวณกระแทกร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) จำนวน 3 ชิ้นคือ HAZ-B1, HAZ-B2 และ HAZ-B3

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance Criteria) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกลหรือความสามารถรับแรงกระแทกวัสดุเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 อ้างอิงผลการทดลองของบริษัทผู้ผลิต ทดสอบแรงกระแทก ที่ -50°C ≥215 จูล (J) ความสามารถรับแรงกระแทกบริเวณกระแทกร้อนจากการเชื่อม (HAZ) วัสดุ ASTM A572 Gr.65 ในการทดสอบที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อมปกติ อ้างอิงผลงานวิจัยของ Hangzhou, Zhejiang Province China. ได้รายงานผลการทดลองหาค่า Impact Strength อุณหภูมิใช้ทดสอบ CVN Carpy Test คือ 23°C ทดสอบหาความต้านทานแรงกระแทก บริเวณกระแทกร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ไว้ในหนังสือ HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015, John Wiley and Sons, p.937. ได้ค่าเฉลี่ย 293 จูล (J)

ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ เว้นแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ ในการทดลองสภาวะที่ 7 ยึดถือตามขอบเขตการยอมรับตามสภาวะการทดลองที่ 1 ถึง 6 คือถือกำหนดความสามารถรับแรงกระแทก (Impact Strength) เนื้อเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ DURIOD 650 ESAB ≥60 จูล (J)

ผลการทดสอบวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4-64 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่ 7

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	86	เนื้อเชื่อม DURIOD 650 ESAB > 60 J	Accepted
W2	76	เนื้อเชื่อม DURIOD 650 ESAB > 60 J	Accepted
W3	76	เนื้อเชื่อม DURIOD 650 ESAB > 60 J	Accepted
HAZ-B1	135	ที่ 23 ^o ซ. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B2	138	ที่ 23 ^o ซ. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B3	135	ที่ 23 ^o ซ. คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected

จากผลการทดสอบแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง UTP LEDURIT65 (Weld surfacing) ขึ้นทดสอบ W1 = 86 J, W2 = 76 J และ W3 = 76 J ซึ่งมากกว่า >60 จูล (J) ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงกระแทก 79.33 จูล (J) ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า > 60 J แสดงว่าผ่านการยอมรับผลการทดสอบ (Accepted)

ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 บริเวณแนวกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ขึ้นทดสอบ HAZ-B1 = 135 J, HAZ-B2 = 138 J และ HAZ-B3 = 135 J ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ย 136 จูล (J) ซึ่งต่ำกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า ≥ 293 จูล (J) 60 J แสดงว่าไม่ผ่านการยอมรับผลการทดสอบ (Rejected) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงแนวบริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีโครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ (Benite) หนาแน่น มีความแข็งสูง แข็งแรง ไม่แตกเปราะง่าย สามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนได้ง่าย

4.3.8 การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 8 : ไม่ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม (No-preheat)

การเชื่อมขึ้นงานวัสดุเกรด ASTM A572 Gr.65 ขนาด 100 x 200 x 20 มิลลิเมตร สภาวะที่ 4 ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) ไม่ให้ความร้อนขึ้นงานก่อนทำการเชื่อม (No-preheat) และทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing) ต้านทานแรงกระแทก ด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เครื่องหมายการค้า DUROID 650 ESAB ขนาด $\varnothing$ 4.0 มม. ยาว 450 มม. กระแสไฟที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้เลือกใช้

DC+/AC 130 - 170 Amps. เป็นลวดเชื่อมจัดอยู่ในกลุ่มตามมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes

4.3.8.1 รายงานผลการใช้ตัวแปรเชื่อมในการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 8 : No-preheating

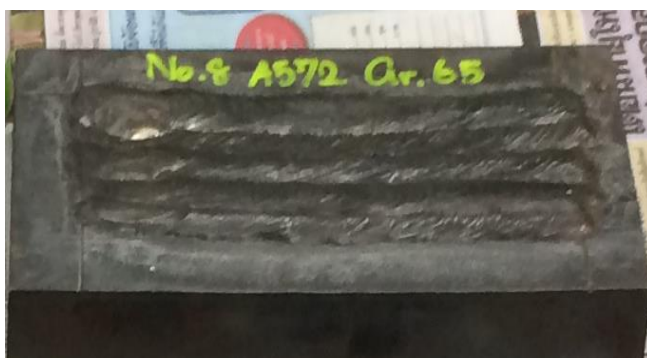
4.3.8.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม สภาวะที่ 8 จำนวน 3 ขั้นตอน

ตารางที่ 4-65 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็ง ด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB จำนวน ชั้นเชื่อม 1 ชั้น

ชั้นงานที่	แนวเชื่อม ชั้นที่	กระแสเชื่อม (A)	ขั้วกระแสไฟ เชื่อม	ความเร็วในการ เชื่อม(mm/min)	อุณหภูมิPreheat ชั้นงาน(°ซ)	อุณหภูมิระหว่าง ชั้นเชื่อมสูงสุด (°ซ)
1	1	160	DCEP	150	$\geq 27^{\circ}\text{C}$	600
2	1	160	DCEP	150	$\geq 27^{\circ}\text{C}$	600
3	1	160	DCEP	150	$\geq 27^{\circ}\text{C}$	600

4.3.8.1.2 ขั้นตอนทดสอบงานเชื่อมที่ได้จากสภาวะการทดลองที่ 8

(1) ขั้นตอนทดสอบการเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 8



รูปที่ 4.70 ขั้นตอนทดสอบการเชื่อมการทดลอง สภาวะที่ 8

(2) การตรวจสอบรอยร้าวผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะที่ 4 ที่เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ไปทำความสะอาด แล้วทำการตรวจสอบด้วยการตรวจสอบพินิจไม่พบว่ามีรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม ทุกขั้นตอน แต่เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมทดสอบไปทำการตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึม (Penetrant Testing : PT) พบว่ามีรอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม ในทิศทางที่ตัดขวางกับความยาวแนวเชื่อมที่จุดเริ่มต้นแนวเชื่อม 1 ใน 3 ขั้นตอน



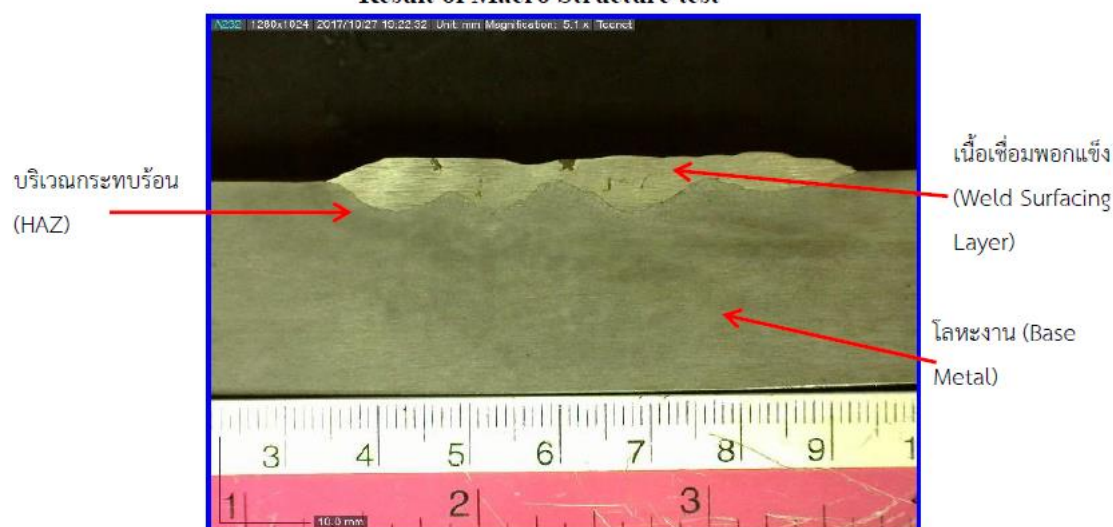
รูปที่ 4.71 ผลการตรวจสอบรอยร้าวด้วยของเหลวแทรกซึมผิวหน้าแนวเชื่อมชิ้นงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 8

4.3.8.2 รายงานผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)

ตารางที่ 4-66 Test Report : Macro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 8

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Macro Structure Testing
Heating Control:	No preheating Control and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	Dino-Lite Digital Microscope AM4115
Filler Metal:	ESAB	Equipment's Capacity:	-
		Ambient Temp.:	24 °C, 48 % RH

Result of Macro Structure test



รูปที่ 4.72 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อนำไปกำหนดจุดส่องกล้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 8

จากรูปที่ 4.72 พื้นที่หน้าตัดแนวเชื่อมโครงสร้างมหภาคที่ทำการศึกษ แบ่งออกได้ 3 บริเวณคือ

1. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Unaffected Zone)
2. เนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ)
3. ชั้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Surfacing weld metal layer)

พื้นที่ดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ใช้กำหนดจุดเพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และใช้เป็นตำแหน่งกำหนดจุดทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Vickerd Testing) ต่อไป

การไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) จะทำให้ขาดตัวกลางช่วยยึดเกาะ อาจมีผลต่อความรุนแรงที่จะเกิดความเค้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง เนื่องจากขาดความยืดหยุ่นระหว่างชั้นเชื่อม หลักการเชื่อมพอกแข็งต้องใช้กระแสเชื่อมต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดเท่าที่สามารถจะปฏิบัติได้ เพื่อป้องกันมิให้โลหะเนื้องานหลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมมากเกินไป หรือในทางโลหะวิทยาต้องการสมบัติจากความแข็งของเนื้อลวดเชื่อมโดยตรง หรือเรียกว่าต้องการให้เกิด Dilution ในการเชื่อมต่ำสุดนั่นเอง กรณีการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสเชื่อมสูงเกินไปหรือเดินแนวเชื่อมช้ามากเกินไป จะส่งผลให้เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal) ที่ได้รับมีคุณภาพต่ำกว่าที่บริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้มาก

4.3.8.3 รายงานผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Report : Micro Structure Test)

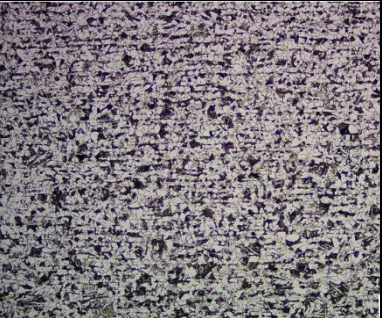
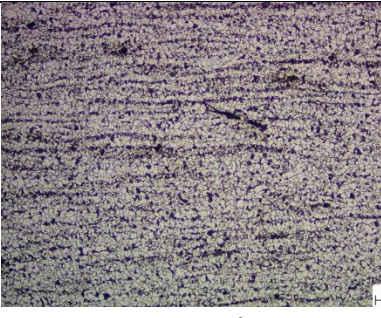
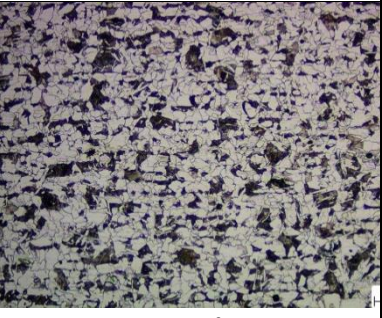
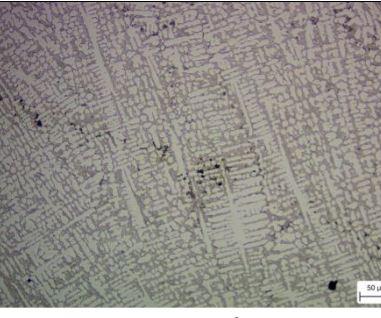
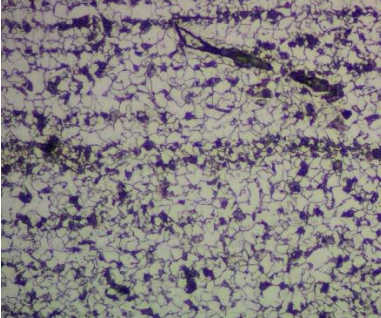
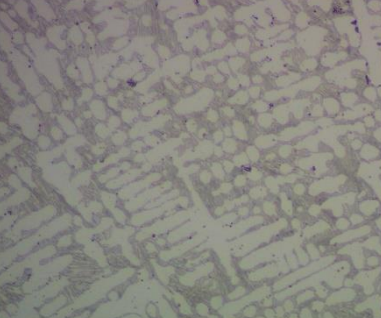
ตารางที่ 4.67 Test Report : Micro Structure Test การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่ 8

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September/ 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Structure Testing
Heating Control:	No-preheat and and Interpass Temperature Control 600 °C max.	Equipment / Serial No.:	ZIESS Primotech
Filler Metal:	DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Maximum 1000x
		Ambient Temp.:	23.6 °C, 56 % RH



รูปที่ 4.73 แสดงจุดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบทดลองงานเชื่อม สภาวะที่ 8

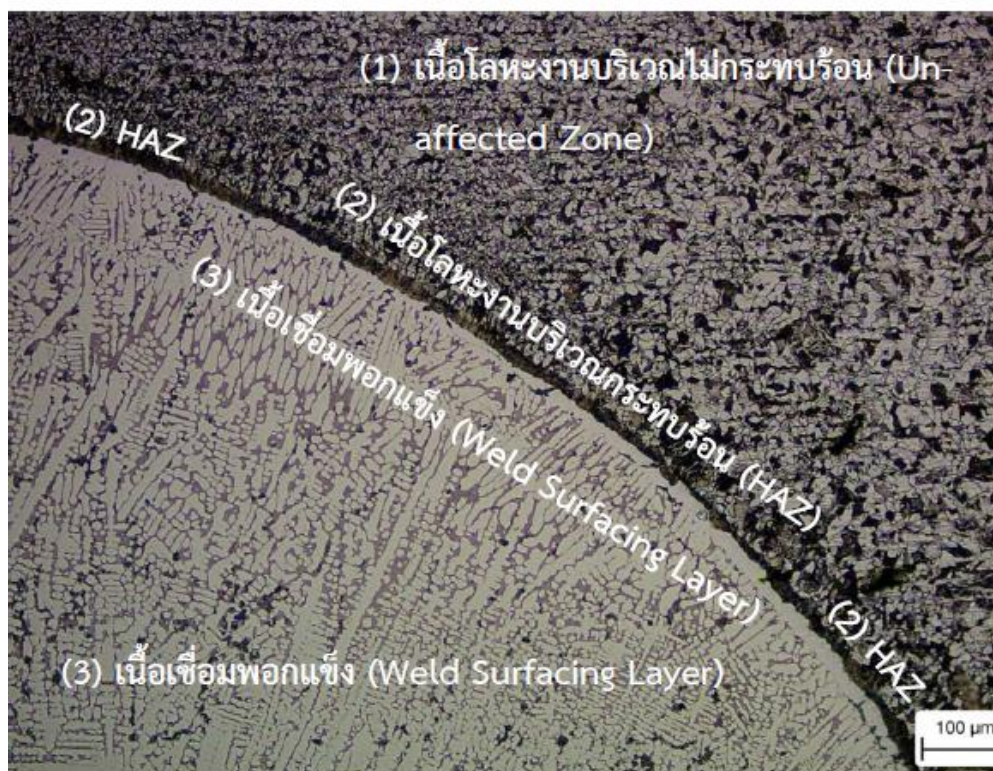
4.3.8.3.1 เปรียบเทียบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคระหว่างโลหะงานที่ไม่มีผลกระทบร้อน (Un-affected zone) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และ บริเวณแนวเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ชิ้นงาน (Base Metal)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ)	บริเวณแนวเชื่อม (Weld)
 ASTM A572 Gr.65 Magnification100X	 HAZ A572 Gr.65 Magnification100X	 DURIOD 650 ESAB Magnification100X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification200X	 HAZ A572 Gr.65 Magnification200X	 DURIOD 650 ESAB Magnification100X
 ASTM A572 Gr.65 Magnification500X	HAZ A572 Gr.65 Magnification500X	 DURIOD 650 ESAB Magnification100X
โครงสร้างจุลภาคโลหะงานที่ไม่มีผลกระทบร้อน(Un-affected zone) เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ พื้นสีขาวเป็นโครงสร้างพื้นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) แอบสีดำโครงสร้างเพิร์ลไลท์	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected zone : HAZ) พิจารณาจากภาพถ่ายสีขาวเป็นพื้นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ แอบสีดำเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite)	โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) พิจารณาจากภาพถ่ายแอบสีขาวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน กระจายแทรกอยู่บนโครงสร้างพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) พื้นสีเทา

รูปที่ 4.74 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม สภาวะที่ 8

4.3.8.3.2 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 8

DUROID 650 EAB + HAZ ASTM A572 Gr.65



HAZ : ASTM A572 Gr.65 + Weld DUROID 650 ESAB - Magnification 50X

รูปที่ 4.75 ลักษณะภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อม จากการทดลองเชื่อม สภาวะที่ 8

จากรูปที่ 4.75 สามารถอธิบายได้ดังนี้

(1) โลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572Gr.65 บริเวณไม่กระทบร้อน (UN-affected Zone)

เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65 ผลิตจากกรรมวิธีรีดร้อน ชุบและอบคืนตัว (Rolled Thermomechanical Quenched and Tempered) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์และเพิร์ลไลท์ละเอียด โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) พิจารณาจากรูปเป็นพื้นสีขาว ส่วนโครงสร้างเพิร์ลไลท์และเพิร์ลไลท์ละเอียดจะเป็นแถบสีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์

(2) บริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone : HAZ)

เหล็กกล้า ASTM A572Gr.65 บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนสูงจากการเชื่อม จนโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์สามารถละลายธาตุคาร์บอน 0.23% เข้ารวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ได้ทั้งหมด บริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วคาร์บอนบางส่วนจึงรวมตัวกับธาตุเหล็ก (Fe) เป็นสารประกอบคาร์ไบด์เร่งเย็นมาร์

เทนไซด์ (Fe_3C) ธาตุคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลับคืนสภาพเดิมได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์ (Pearlite) แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็วเกรนเพิร์ลไลท์จึงไม่มีโอกาสโตเต็มที่ จึงได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือเบนไนท์ (Fine pearlite or Benite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งและแข็งแรง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นขาวคือโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) มีโครงสร้างมาร์เทนไซด์ (Martensite) ที่เห็นเป็นแท่งเข็มสี่เหลี่ยมเล็กน้อยแทรกปะปนอยู่กับโครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลท์ละเอียด (Fine pearlite or Benite) แถบดำแทรกสลับกระจายหนาแน่นทั่วไป และที่ใกล้แนวเส้นแบ่งเขตหลอมละลาย จะมีโครงสร้างออสเทนไนท์จากเนื้อเชื่อม UTP63 หลอมละลายขึ้นมาเจือปน (Dilution) หนาแน่น ช่วยเสริมเรื่องการจับยึดและป้องกันการแตกหลุดร่อนระหว่างชั้นเชื่อม

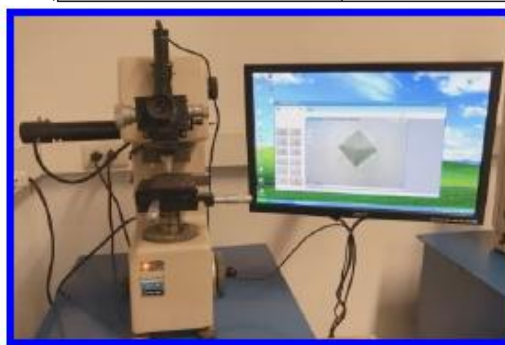
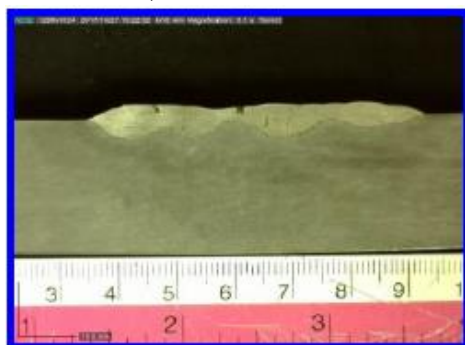
(3) เนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing)

ปกติชั้นเชื่อมแรกจะมีส่วนของโลหะเนื้องาน (Base metal) ละลายขึ้นมาผสม (Dilution) และจะค่อยๆ จางลงในชั้นเชื่อมที่ 2 หรือ ชั้นที่ 3 ในการทดลองเป็นเชื่อมชั้นเดียวทำให้มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ (Ferrite-Pearlite) จากโลหะงาน ASTM 572 Gr.65 หลอมละลายขึ้นมาผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Dilution of Weld metal) ที่มีโครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide) มาก มีผลทำให้ความแข็งเนื้อเชื่อม DURIOD 650 ESAB ลดลง

ข้อพิจารณา โครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์เชิงซ้อน จะสังเกตเห็นเป็นแถบสีขาวแทรกตัวอยู่บนโลหะพื้นออสเทนนิติก (Austenitic matrix) สี่เหลี่ยม เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงมาก ธาตุที่รวมตัวให้คาร์ไบด์เชิงซ้อนเช่นโคบอลต์ วานาเดียม ทั้งสแตน

4.3.8.3 รายงานผลการทดสอบความแข็งจุลภาค ชิ้นงานทดสอบเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 8
 ตารางที่ 4-68 Test Report : Micro Vicker Testing : สภาวะที่ 8 : Heating Control : No-preheat
 and Interpass Temperature Control 600°C max

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	23 / October / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Micro Vickers Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600°C max.	Equipment / Serial No.:	AKASHI 49683 MVK III
Filler Metal:	DUROID 650 ESAB	Equipment's Capacity:	1 Kg-100g
		Ambient Temp.:	25 °C, 48% RH



รูปที่ 4.76 การทดสอบความแข็ง Micro Vickers Test ชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 8

ตารางที่ 4-69 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็ง สภาวะที่ 8 เปรียบเทียบระหว่าง
 โลหะงาน (Base metal), บริเวณกระแทกร้อน (HAZ), และ เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง (Weld hardfacing) :
 ASTM A572 Gr.65 + DUROID 650 ESAB – Preheat

หน่วย HV (HRC) - Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC						
Item	Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	ค่าเฉลี่ย
DUROID 650 ESAB	458.6(46.0)	456.6(45.9)	458.6 (46.0)	456.6 (45.9)	474.9(47.3)	461.06 (46.22)
Item	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	HAZ	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	242.1 (20.8)	236.2 (20.0)	234.4 (20.0)	235.2 (20.0)	233.4 (20.0)	236.26 (20.16)
Item	Base Metal	Base Metal	Base Metal	Base Metal	Base Metal	ค่าเฉลี่ย
ASTM A572 Gr.65	199.2 (15.0)	212.4 (17.0)	207.6 (16.0)	214.1 (17.0)	216.6 (17.0)	209.98 (16.40)

การทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบเชื่อมพอกผิวแข็งสภาวะการทดลองที่ 8 พบว่าเมื่อ
 เปรียบเทียบระหว่างความแข็งของโลหะงาน (Base metal) เหล็กกล้า ASTM A572 G.65 ส่วนผสม
 0.23%C บริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม (Un-affected Zone) โครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์-

เพิร์ลไลท์และเพิร์ลไลต์ละเอียด มีค่าความแข็งเฉลี่ย 209.98 HV (16.40 HRC) เปรียบเทียบกับบริเวณ กระทบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 236.26 HV (20.16 HRC) พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกัน 26.08 HV (3.76 HRC) ค่าความแข็งไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่า บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีโครงสร้างคล้าย กับเนื้อโลหะงานที่ไม่กระทบร้อนเพียงแต่ HAZ มีโครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลท์ละเอียดหรือโครงสร้างเบนไนท์ หนาแน่นกว่า การเชื่อมพอกแข็งโดยไม่ทำการเชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมพอกแข็ง (No buffer layer) จะทำให้ แนวเชื่อมเย็นตัวลงมาอย่างรวดเร็ว เพราะการเชื่อมรองพื้นเท่ากับเป็นการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมพอก แข็ง (Preheat) ไปในตัว บริเวณกระทบร้อน (HAZ) โอกาสที่บริเวณกระทบร้อนจะมีโครงสร้างคาร์ไบด์ มาแทนไฮต์นอยมากเนื่องจากเหล็กกล้า HSLA ASTM A572Gr.65 มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนน้อย 0.23% มีความแข็งเพิ่มขึ้นจากเนื้อโลหะเดิมบริเวณไม่ได้รับกระทบร้อนจากการเชื่อมไม่มากนัก แต่ไม่ถึงกับเปราะ หรือแตกง่าย เพราะโครงสร้าง HAZ ไม่ใช่โครงสร้างมาร์เทนไซด์ แต่จะมีผลต่อการยึดเกาะกับเนื้อเชื่อม พอกแข็งไม่แข็งแรง

ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Pure weld metal) ของลวดเชื่อมพอกแข็งเครื่องหมาย การค้า DUROID 650 ESAB เป็นลวดเชื่อมที่ให้เนื้อเชื่อมกลุ่มโครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์ เชิงซ้อน มีค่าความแข็งตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดอยู่ระหว่าง 55 ถึง 58 HRC

ในการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็งสภาวะที่ 8 พบว่าค่าความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld surfacing) เฉลี่ยที่ได้ คือ 461.06 HV (46.22 HRC) ซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ มาก เนื่องจากเป็นการเชื่อมพอกทับระหว่างลวดเชื่อมพอกแข็งกับโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 โดยตรงและเป็นการเชื่อมทับแนวเดียวจึงทำให้เนื้อโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลาย ลายขึ้นมาปนผสมในเนื้อเชื่อมพอกแข็งมาก (High dilution of weld surfacing) ทำให้เนื้อเชื่อมด้อย คุณภาพความแข็งลดลง

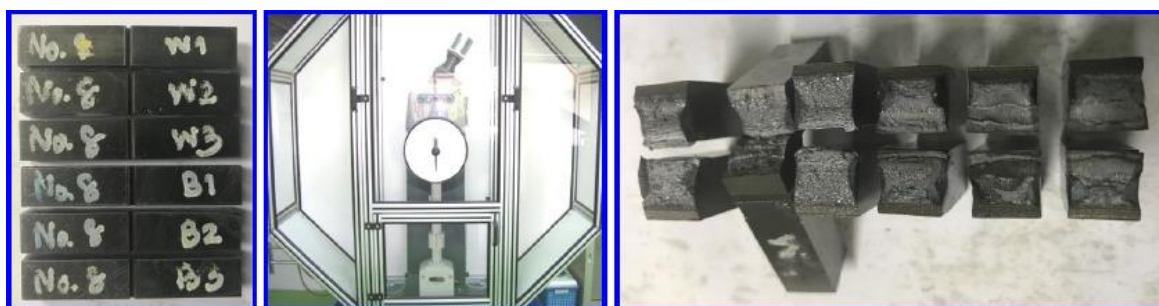
4.3.8.4 ผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ขึ้นทดสอบงานเชื่อมทดลอง สภาวะที่ 8

การทดสอบแรงกระแทกเป็นวิธีการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุว่า มีความสามารถดูดซับ พลังงานกลได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหักเสียหาย ในการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักที่ทราบ ค่าน้ำหนักแน่นอนเหวี่ยงลงมากระทบชิ้นทดสอบมาตรฐาน ที่ถูกบากร่องอยู่ตรงกลางชิ้นงานเพื่อบังคับชิ้น ทดสอบแตกขาดออกจากกันตรงรอยบาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลและความเร็วของตุ้มน้ำหนักบางส่วน จะส่งผ่านพลังงานให้กับชิ้นทดสอบ พลังงานที่ถูกถ่ายให้ชิ้นทดสอบจะถูกใช้ไปเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนรูปวัสดุ จน แตกขาดถาวรซึ่งเรียกพลังงานในส่วนนี้ว่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) วัสดุที่มีความแกร่งจะมี ค่ารับพลังงานแรงกระแทกสูงในขณะที่วัสดุเปราะจะมีค่าพลังงานรับแรงกระแทกต่ำ วัสดุที่มีความ เหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่า ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย

การรายงานผลการทดสอบแรงกระแทก คำตอบที่ได้จะใช้ประเมินผลว่าวัสดุมีความเหนียวและความแข็งแรงประกอบกันเรียกว่าค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 4-70 Test Report : Impact Testing : สภาวะที่ 8 : No-preheating and Interpass Temperature Control 600°C max.

PQR No:		Position:	-
Project Name:	-	Received Date:	25 / September / 2017
Project No.:		Tested Date:	06 / December / 2017
Process:	SMAW (DCEP)	Standard of Test:	ASME Section IX 2015 Edition
Material Specification:	ASTM A572 Gr.65	Type of Test:	Impact Testing
Heating Control:	No-preheat and Interpass Temperature Control 600 °C	Equipment / Serial No.:	Impact Testing Machine
Filler Metal:	DURIOD 650 ESAB	Equipment's Capacity:	Swick / Roell 450 Joules
		Ambient Temp.:	26 °C, 61% RH



รูปที่ 4.77 ขึ้นทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 8

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีมาตรฐานที่เป็นแม่แบบการกำหนดวิธีทดสอบ คือมาตรฐานทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM E23 ขึ้นทดสอบเรียกว่า V-notch Charpy Specimen มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาว 55 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 × 10 มิลลิเมตร บากร่องตัววัดตรงกลางร่องเป็นมุม 45 องศา ลึก 2.0 มิลลิเมตร ก้นร่องวีมีรัศมีความโค้ง 0.25 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบจะวางอยู่บนแท่นเครื่องทดสอบแรงกระแทกในแนวนอน โดยมีจุดรองรับขึ้นทดสอบห่างกัน 40 มิลลิเมตร ค้อนกระแทกมีลักษณะเป็นสันมีมุมปลายค้อน 30 องศา ตรงสันตีเป็นขอบกว้าง 4.0 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งปลายค้อน 0.25 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะหันร่องบากอยู่ตรงกันข้ามกับด้านที่หน้ากระแทกของค้อนจะตีเข้ามา การวางขึ้นทดสอบลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงตีและแรงต้านคล้ายกับการกดดัด 3 จุด (3 Point Bending) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะคล้ายกับการหักงอขึ้นงานตามแนวร่องที่บาก

การทดสอบแรงกระแทกชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะที่ 8 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าใช้ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process : SMAW) ตามมาตรฐาน ASME Section IX 2015 Edition - QW-170 NOTCH-TOUGHNESS TESTS : QW-171 NOTCH-TOUGHNESS TESTS — CHARPY V-NOTCH ขั้นตอนการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเทียบได้กับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E208 (Test procedures and apparatus shall conform to the requirements of ASTM Specification E208) ได้ผลการทดลองทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) ชิ้นทดสอบงานเชื่อมทดลองสภาวะที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 4-71 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V-notch Impact Test ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp.) สภาวะที่ 8

Specimen No.	Height 10± 0.05 (mm.)	Width 10 ± 0.05 (mm.)	Height below notch 8± 0.05 (mm.)	Length 55± 0.60 (mm.)	V- notch Angle (45± 2°)	Impact Energy (J)	Average (J)
W1	10.00	10.01	8.01	55.01	45°	79	77
W2	10.01	10.01	8.01	55.01	45°	76	
W3	10.03	10.03	8.01	55.01	45°	76	
HAZ-B1	10.01	10.02	8.01	55.02	45°	136	135
HAZ-B2	10.00	10.00	8.01	55.02	45°	134	
HAZ-B3	10.00	10.01	8.00	55.01	45°	135	

คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานทดลองเชื่อมพอกแข็ง (Test Coupon) สภาวะที่ 8 มาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ V-notch Charpy Specimen ตามมาตรฐาน ASTM E23 จำนวนชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังนี้

- (1) ชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardsurfacing) จำนวน 3 ชิ้นคือ W1, W2 และ W3
- (2) ชิ้นทดสอบโลหะงานบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) จำนวน 3 ชิ้นคือ HAZ-B1, HAZ-B2 และ HAZ-B3

ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบแรงกระแทก (Acceptance Criteria) ค่าความสามารถดูดซับพลังงานกลหรือความสามารถรับแรงกระแทกวัสดุเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 อ้างอิงผลการทดลองของบริษัทผู้ผลิต ทดสอบแรงกระแทก ที่ -50°C ≥215 จูล (J)

ความสามารถรับแรงกระแทกบริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (HAZ) วัสดุ ASTM A572 Gr.65 ในการทดสอบที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อมปกติ อ้างอิงผลงานวิจัยของ Hangzhou, Zhejiang Province China. ได้รายงานผลการทดลองหาค่า Impact Strength อุณหภูมิใช้ทดสอบ CVN Carpy Test คือ 23°C ทดสอบหาความต้านทานแรงกระแทก บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของ เหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ไว้ในหนังสือ HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015, John Wiley and Sons, p.937. ได้ค่าเฉลี่ย 293 จูล (J)

ส่วนค่าความสามารถดูดซับพลังงานกล (Impact Strength) ของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT65 บริษัทผู้ผลิตไม่ได้กำหนดไว้ เว้นแต่มีข้อกำหนดใช้งานเฉพาะ ในการทดลองสถานะที่ 8 ยึดถือตามขอบเขตการยอมรับตามสภาวะการทดลองที่ 1 ถึง 7 คือถือกำหนดความสามารถรับแรงกระแทก (Impact Strength) เนื้อเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน DUROID 650 ESAB ≥ 60 จูล (J) ผลการทดสอบวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4-72 การประเมินผลขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ Impact Testing สภาวะที่ 8

Specimen No.	Impact Energy (J)	ขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบตามมาตรฐานผู้ผลิตกำหนด ต่ำสุด (J)	ผลการประเมิน ผ่าน (Accepted) หรือ ไม่ผ่านการยอมรับ (Rejected)
W1	79	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W2	76	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
W3	76	เนื้อเชื่อม UTP LIDURIT 65 > 60 J	Accepted
HAZ-B1	136	ที่ 23°C คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B2	134	ที่ 23°C คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected
HAZ-B3	135	ที่ 23°C คือ ≥ 293 จูล (J)	Rejected

จากผลการทดสอบแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง UTP LEDURIT65 (Weld surfacing) ขึ้นทดสอบ W1 = 79 J, W2 = 76 J และ W3 = 76 J ซึ่งมากกว่า > 60 จูล (J) ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงกระแทก 77 จูล (J) ซึ่งสูงกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า > 60 J แสดงว่าผ่านการยอมรับผลการทดสอบ (Accepted)

ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Energy : J) ของโลหะงาน ASTM A572 Gr.65 บริเวณ
แนวกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ขึ้นทดสอบ HAZ-B1 = 136 J, HAZ-B2 = 134 J และ
HAZ-B3 = 135 J ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ ทั้ง 3 ขึ้นทดสอบและมีค่าเฉลี่ย 135 จูล (J)
ซึ่งต่ำกว่าขอบเขตการยอมรับที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ ต้องมีค่า ≥ 293 จูล (J) 60 J แสดงว่าไม่ผ่าน
การยอมรับผลการทดสอบ (Rejected) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงแนวบริเวณกระทบร้อน (HAZ) มี
โครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ (Benite) หนาแน่น มีความแข็งสูง แข็งแรง ไม่แตกเปราะง่าย สามารถปรับปรุง
คุณภาพด้วยความร้อนได้ง่าย

4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบการเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบงานเชื่อมสภาวะการทดลองต่างๆ

4.4.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค

ผลเปรียบเทียบการทดสอบโครงสร้างมหภาค สภาวะการทดลอง ที่ 1 – 8 เห็นได้ชัดว่า สภาวะ
การทดลองที่ 3 สภาวะการทดลองที่ 4 ที่ไม่ทำการเชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) ก่อนการเชื่อมพอก
แข็ง จะเกิดความเค้นตกค้างที่ชั้นแนวเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing layer) สูงมาก ทำให้แนวเชื่อมพอก
ผิวแข็งเกิดการแตกร้าวตัดขวางกับความยาวแนวเชื่อมมากกว่าสภาวะการทดลองที่ทำการเชื่อมรองพื้นก่อน
การเชื่อมพอกผิวแข็ง อย่างไรก็ตามในการเชื่อมพอกแข็งที่ให้น้ำเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์
เชิงซ้อน การแตกร้าวที่แนวเชื่อมพอกแข็งดังกล่าว ไม่เป็นอันตรายต่อการใช้งานถือเป็นการคลายความเค้น
ที่น้ำเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ออกไปเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า Check cracking แต่ต้องระวังอย่าให้
รอยแตกร้าวดังกล่าวแตกลามเข้าไปในเนื้อโลหะงานบริเวณกระทบร้อนซึ่งจะเป็นอันตรายต่อการใช้งาน
อย่างมาก

ในการเชื่อมพอกแข็งขึ้นทดสอบสภาวะทดลองที่ 7 และ สภาวะทดลองที่ 8 ซึ่งไม่ได้ทำการเชื่อม
รองพื้น (No-buffer layer) ก่อนทำการเชื่อมชั้นพอกแข็งเช่นกัน แต่ไม่เกิดปรากฏการณ์แตกร้าว Check
cracking เนื่องจากเกิดความเค้นตกค้างที่น้ำเชื่อมชั้นพอกแข็งน้อยกว่า เป็นผลมาจากทำการเชื่อมชั้นพอก
แข็ง (Hardsurfacing layer) ชั้นเดียว (Single layer) จึงเป็นไปได้ที่แนวเชื่อมเกิด Dilution สูง ทำให้น้ำ
เชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ ไม่เกิดการแตกร้าว

ส่วนขึ้นทดสอบในสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 5 และ 6 ที่ทำการเชื่อมรองพื้นด้วยลวดเชื่อมออสเทน
นิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง UTP63 ก่อนทำการเชื่อมชั้นพอกแข็ง ลวดเชื่อมรองพื้นจะทำหน้าที่ช่วยใน
การจับยึดน้ำเชื่อมชั้นพอกแข็งและมีความยืดหยุ่นสูงกว่าบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า ASTM A572
Gr.65 ทำให้ลดความเค้นตกค้างในน้ำเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ชั้นพอกแข็งลงได้มาก จึงไม่เกิดปรากฏการณ์
แตกร้าว Check cracking หรือโอกาสเกิดน้อยมาก

ผลการทดสอบการเชื่อมพอกแข็งค้อนฉีกอ้อย ในสภาวะการทดลองที่ 1 – 8 ตามตารางที่ 4-73 พบว่าการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) เหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 150°ซ. ไม่มีผลต่อความรุนแรงของการเกิดปรากฏการณ์แตกร้าว Check cracking เนื่องมาจากค่าคาร์บอนสมมูลที่คำนวณได้ไม่สูงมากนัก ชิ้นงานมีขนาดเล็กมีผลทำให้แนวเชื่อมที่เชื่อมเสร็จก่อนจะ Preheat แนวเชื่อมที่เชื่อมตามภายหลัง

ตารางที่ 4-73 เปรียบเทียบผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค งานเชื่อมพอกแข็งสภาวะการทดลองที่ 1 - 8

สภาวะการทดลอง	การให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat)	โลหะงานไม่กระทบร้อน(Un-affect zone)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ)	ชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer layer)	ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardfacing)	เกิด Check Cracks
สภาวะที่ 1	150°ซ.	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ¹⁾	เนื้อเชื่อม UTP 63	เนื้อเชื่อม Ledurit UTP 65	ไม่เกิด
สภาวะที่ 2	—	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ¹⁾	เนื้อเชื่อม UTP 63	เนื้อเชื่อม Ledurit UTP 65	น้อยมาก
สภาวะที่ 3	150°ซ.	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ¹⁾	—	เนื้อเชื่อม Ledurit UTP 65	มาก
สภาวะที่ 4	—	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ¹⁾	—	เนื้อเชื่อม Ledurit UTP 65	มากที่สุด
สภาวะที่ 5	150°ซ.	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ²⁾	เนื้อเชื่อม UTP 63	เนื้อเชื่อม ESAB 650	ไม่เกิด
สภาวะที่ 6	—	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ²⁾	เนื้อเชื่อม UTP 63	เนื้อเชื่อม ESAB 650	น้อยมาก
สภาวะที่ 7	150°ซ.	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ²⁾	—	เนื้อเชื่อม ESAB 650	น้อยมาก
สภาวะที่ 8	—	ASTM A572 Gr.65	ASTM A572 Gr.65 ²⁾	—	เนื้อเชื่อม ESAB 650	ไม่เกิด

หมายเหตุ ¹⁾ เป็นบริเวณกระทบร้อนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดจากชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)

²⁾ เป็นบริเวณกระทบร้อนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดจากชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardfacing)

4.4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลเปรียบเทียบการทดสอบโครงสร้างมหภาค สภาวะการทดลองที่ 1 – 8 จากตารางที่ 4-74 เห็นได้ชัดว่าการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) 150°ซ. และ ไม่ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (No-preheat) โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone : HAZ) ของโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 จะได้โครงสร้างเบนไนท์หรือเพิร์ลไลท์ละเอียดเหมือนกัน

โครงสร้างบริเวณกระตบร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ที่เกิดในโลหะงานหลักกล้า ASTM A572 Gr.65 ในการทดลองเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ สภาวะการทดลอง ที่ 1, 2, 5 และ 6 เกิดจากเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง และ สภาวะการทดลอง ที่ 3, 4, 7 และ 8 กรณีเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน โดยไม่ทำการเชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมพอกแข็ง

ตารางที่ 4-74 เปรียบเทียบผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคนเชื่อมพอกแข็งสภาวะการทดลองที่ 1- 8

สภาวะการทดลอง	การให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat)	โลหะงานไม่กระตบร้อน(Un - affect zone)	บริเวณกระตบร้อน (HAZ)	ชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer layer)	ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld Hardfacing)
สภาวะที่ 1	150°ซ.	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ¹⁾	ออสเทนนิติก-แมงกานีส ³⁾	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน
สภาวะที่ 2	—	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ¹⁾	ออสเทนนิติก-แมงกานีส ³⁾	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน
สภาวะที่ 3	150°ซ.	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ¹⁾	—	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน
สภาวะที่ 4	—	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ¹⁾	—	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน
สภาวะที่ 5	150°ซ.	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ²⁾	ออสเทนนิติก-แมงกานีส ³⁾	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน
สภาวะที่ 6	—	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ²⁾	ออสเทนนิติก-แมงกานีส ³⁾	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน
สภาวะที่ 7	150°ซ.	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ²⁾	—	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน
สภาวะที่ 8	—	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	เพิร์ลไลต์ ละเอียด ²⁾	—	โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน

หมายเหตุ ¹⁾ เป็นบริเวณกระตบร้อนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดจากชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer)

²⁾ เป็นบริเวณกระตบร้อนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดจากชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardfacing)

³⁾ โครงสร้างเนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีสปริมาณโครเมียมสูง

การเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ด้วยลวดเชื่อมออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง UTP 63 มาตรฐาน DIN8555 Group 8 : E 8 UM 200 KRZ และ การไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) ก่อนการเชื่อมพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 1 – 5 ด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 และ DUROID 650 ESAB มาตรฐาน DIN8555 : E 10-UM-65-GRZ จะได้เนื้อเชื่อมพอกแข็งโครงสร้างจุลภาค

โครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน เช่นเดียวกัน

4.4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็ง

4.4.3.1 ความแข็งบริเวณกระแทกร้อน (Hardness of HAZ)

ผลการทดสอบความแข็งขึ้นทดสอบเชื่อมพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 1 – 8 ตามตารางที่ 4-75 พบว่าการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) แก่ขึ้นทดสอบเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 150^oซ. บริเวณ HAZ มีความแข็งสูงสุด 246.86 HV (21.9 HRC) ต่ำสุด 241.02 HV (20.62 HRC) และการไม่ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (No-reheat) บริเวณ HAZ มีความแข็งสูงสุด 243.22 HV (21.54 HRC) ต่ำสุด 215.60 HV (16.80 HRC) จะพบว่าค่าความแข็งใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าการ Preheat 150^oซ. หรือไม่ทำการ Preheat ก่อนการเชื่อม ความแข็งบริเวณกระแทกร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ของเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ก็มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4-75 เปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็งขึ้นทดสอบงานเชื่อมพอกแข็งสภาวะการทดลองที่1– 8

ค่าเฉลี่ยความแข็งส่วนต่างๆของขึ้นทดสอบงานเชื่อม									
หน่วย HV(HRC)-Hardness HV 0.3Kgf Convert HRC									
สภาวะการทดลอง	Preheat Temp.°C	Base metal	ลำดับที่	HAZ	ลำดับที่	Buffer layer	ลำดับที่	Weld surfacing	ลำดับที่
สภาวะที่ 1	150	200.10 (15.1)	6	235.80 (20.54)	7	245.32 (21.6)	4	470.50 (46.96)	3
สภาวะที่ 2	—	214.48 (16.80)	7	215.60 (20.00)	8	284.86 (27.76)	2	555.74 (52.68)	1
สภาวะที่ 3	150	195.36 (13.80)	3	241.02 (20.62)	2	—	—	431.88 (43.80)	6
สภาวะที่ 4	—	195.36 (20.00)	2	243.22 (21.54)	1	—	—	431.88 (43.80)	6
สภาวะที่ 5	150	200.10 (13.80)	1	246.86 (21.9)	3	369.2 (37.69)	1	448.66 (45.22)	5
สภาวะที่ 6	—	200.10 (15.10)	4	239.12 (20.72)	5	248.44 (22.00)	3	419.92 (42.72)	7
สภาวะที่ 7	150	209.98 (16.40)	2	243.22 (21.54)	4	—	—	491.94 (49.02)	2
สภาวะที่ 8	—	209.98 (16.40)	5	236.26 (20.16)	6	—	—	461.06 (46.22)	4

4.4.3.2 ความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้น (Hardness of Buffer layer)

ผลการทดสอบความแข็งชั้นทดสอบเชื่อมพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 1 – 8 ตามตารางที่ 4-75 ถ้าให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) ที่ 150°C. แก่ชิ้นงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ก่อนการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) พบว่าค่าความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง ในสภาวะการทดลองที่ 5 มีค่าความแข็งสูงสุด 369.2 HV (37.69 HRC) ซึ่งค่าความแข็งดังกล่าว มีค่าสูงโดดเด่นมากกว่าการทดลองสภาวะอื่นๆ อันเป็นผลเนื่องมาจาก เกิด Dilution ต่ำขณะปฏิบัติการเชื่อม คือมีการหลอมละลายจากเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 เข้าไปผสมกับน้ำโลหะเชื่อมต่ำมาก ทำให้ได้ความแข็งจากลวดเชื่อมออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง ตามที่ผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนด ส่วนความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้นต่ำสุด (Buffer layer) กรณี Preheat เป็นสภาวะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 245.32 HV (21.6 HRC)

กรณีไม่ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (No-preheat) แก่ชิ้นงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ก่อนการเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) พบว่าค่าความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง ในสภาวะการทดลองที่ 2 มีค่าความแข็งสูงสุด 384.86 HV (27.76 HRC) 284.86 ส่วนความแข็งเนื้อเชื่อมรองพื้นต่ำสุด (Buffer layer) กรณี Preheat เป็นสภาวะการทดลองที่ 6 เท่ากับ 248.44 HV (22.00 HRC)

สรุปได้ว่าการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) หรือไม่ให้ความร้อน (No-preheat) แก่ชิ้นงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ไม่มีผลทำให้ความแข็งของเนื้อเชื่อมรองพื้น (Hardness of Buffer layer) แตกต่างกัน

4.4.3.3 ความแข็งเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Hardness of Weld surfacing layer)

ความแข็งเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 1 - 4 ผู้ผลิตลวดเชื่อม UTP Ledurit 65 กำหนดว่าเชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้า ปริมาณคาร์บอน (C) 0.15% ประมาณ (approx.) 58 HRC

ความแข็งเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 5 – 8 ผู้ผลิตลวดเชื่อม DUROID 650 ESAB กำหนดค่าความแข็งเนื้อเชื่อมอยู่ระหว่าง 55 ถึง 58 HRC

จากตารางที่ 4-75 แยกพิจารณาความแข็งของชั้นเชื่อมพอกแข็งออกได้ 4 กรณีคือ

- (1) กรณี Preheat 150°C. + เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer) ในสภาวะการทดลองที่ 1 และ 5

เนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 1 มีค่าความแข็งสูงสุด 470.50 HV (46.96 HRC) และสภาวะการทดลองที่ 5 มีค่าความแข็งต่ำสุด 448.66 HV (45.22 HRC)

- (2) กรณี No-preheat + เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer)

เนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 2 มีค่าความแข็งสูงสุด 555.74 HV (52.68 HRC) และสภาวะการทดลองที่ 6 มีค่าความแข็งต่ำสุด 419.92 HV (42.72 HRC)

- (3) กรณี Preheat 150°C. ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer)

เนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 7 มีค่าความแข็งสูงสุด 491.94 HV (49.02 HRC) และสภาวะการทดลองที่ 3 มีค่าความแข็งต่ำสุด 431.88 HV (43.80 HRC)

- (4) กรณี No-preheat ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer)

เนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 8 มีค่าความแข็งสูงสุด 461.06 HV (46.22 HRC) และสภาวะการทดลองที่ 4 มีค่าความแข็งต่ำสุด 431.88 HV (43.80 HRC)

ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง จากสภาวะการทดลอง 1 - 8 จะต่ำกว่าค่าความแข็งที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากมี Dilution ในการเชื่อมสูง เนื่องจากเนื้อเชื่อมออสเทนนิติกแมงกานีส โครเมียมสูง จากชั้นเชื่อมรองพื้นละลายขึ้นมาผสมกับโลหะเชื่อมจากลวดเชื่อมพอกแข็งสูงมากในขณะหลอมละลาย

สรุปได้ว่าการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) หรือไม่ให้ความร้อน (No-preheat) แก่ชิ้นงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ไม่มีผลต่อความแข็งของชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็ง แต่การเชื่อมรองพื้นมีความจำเป็นต่อการเกาะยึดของชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็งสูง ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกแข็งขึ้นอยู่กับคุณภาพลวดเชื่อมและการควบคุม Dilution ให้ต่ำสุดเช่นใช้เทคนิคควบคุมความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเร็วสุดเท่าที่ทำได้

4.4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

โลหะงาน (Base metal) ASTM A572 Gr.65 มีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่รับรองจากผู้ผลิต ≥ 215 จูล ที่อุณหภูมิทดสอบ - 50°C. เกณฑ์การตัดสินผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกกำหนดจากขอบเขตการยอมรับดังนี้

- 1) บริเวณกระแทกร้อนจากการเชื่อมของเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 Acceptance criteria at 23°C ≥ 293 จูล (J) อ้างอิงผลงานวิจัยของ Hangzhou, Zhejiang Province China. (John Wiley and Sons, p.937.)

- 2) เนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง (DIN 8555 Group 8) เนื้อเชื่อมรองพื้น UTP 63 ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้คือ > 60 จูล (J) Acceptance criteria at Room temperature
- 3) เนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ (DIN 8555 Group 10) ซึ่งแข็งและเปราะ กำหนดขอบเขตการยอมรับไว้ไม่ต่ำกว่าค่าความต้านแรงกระแทกของเนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีส ≥ 60 จูล (J) Acceptance criteria at Room temperature

ผลการทดสอบความแข็งแรงการเชื่อมพอกแข็ง ในสภาวะการทดลองที่ 1 – 8 ตามตารางที่ 4-76 แยกพิจารณาความต้านทานแรงกระแทกส่วนต่างๆของแนวเชื่อมพอกแข็งออกได้ 4 กรณีคือ

- (1) กรณี Preheat 150°C . + เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer) สภาวะการทดลองที่ 1 และ 5 ได้ทำการตัดชิ้นทดสอบ Subspecimen ทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกดังนี้
 - ก. ชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ที่อยู่ติดกับเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ ได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก ในสภาวะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 223 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะการทดลองที่ 5 เท่ากับ 194 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง > 60 จูล (J) ถือว่า ผ่านขอบเขตการยอมรับ
 - ข. ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardsurfacing) ได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก สภาวะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 84.3 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะการทดลองที่ 5 เท่ากับ 80.3 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง > 60 จูล (J) ถือว่า ผ่านขอบเขตการยอมรับ
- (2) กรณี No-preheat + เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer) สภาวะการทดลองที่ 2 และ 6 ได้ทำการตัดชิ้นทดสอบ Subspecimen ทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกดังนี้
 - ก. ชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ที่อยู่ติดกับเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ ได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก สภาวะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 216.3 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะการทดลองที่ 6 เท่ากับ 199.3 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง > 60 จูล (J) ถือว่า ผ่านขอบเขตการยอมรับ
 - ข. ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardsurfacing) ได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก สภาวะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 85.6 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะการทดลองที่ 6 เท่ากับ 80.3 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง > 60 จูล (J) ถือว่า ผ่านขอบเขตการยอมรับ

- (3) กรณี Preheat 150°C. ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer) สภาวะการทดลองที่ 3 และ 7 ได้ทำการตัดชิ้นทดสอบ Subspecimen ทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกดังนี้
- ก. การทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกบริเวณกระแทกร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ซึ่งไม่ได้ทำการเชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) ก่อนการเชื่อมชั้นพอกแข็ง ทำให้บริเวณ HAZ ของ เหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ที่ใช้การทดสอบสภาวะดังกล่าวอยู่ติดชิดกับเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์โดยตรงได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก ในสภาวะการทดลองที่ 3 เท่ากับ 123.7 จูล (J) ที่อุณหภูมิทดสอบ 23°C. ในสภาวะการทดลองที่ 7 เท่ากับ 136 จูล (J) ที่อุณหภูมิทดสอบ 23°C. ซึ่งต่ำกว่าค่า ≥ 293 จูล (J) ถือว่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ไม่ผ่านขอบเขตการยอมรับ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าถ้าไม่ทำการเชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมพอกแข็ง แม้จะทำการ Preheat 150°C. ขึ้นงานก่อนทำการเชื่อมพอกแข็งแล้วก็ตาม แต่ยังมีแนวโน้มจะเกิดปัญหาการแตกหลุดร้อนของเนื้อเชื่อมพอกแข็งออกจากบริเวณ HAZ สูงมาก
- ข. ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardsurfacing) ได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก สภาวะการทดลองที่ 3 เท่ากับ 85 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะการทดลองที่ 7 เท่ากับ 70.3 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง > 60 จูล (J) ถือว่า ผ่านขอบเขตการยอมรับ
- (4) กรณี No-preheat ไม่เชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) + เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardfacing layer) สภาวะการทดลองที่ 4 และ 8 ได้ทำการตัดชิ้นทดสอบ Subspecimen ทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกดังนี้
- ก. การทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกบริเวณกระแทกร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ซึ่งไม่ได้ทำการ Preheat ขึ้นงานก่อนการเชื่อม และไม่ได้ทำการเชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) ก่อนการเชื่อมชั้นพอกแข็ง ทำให้บริเวณ HAZ ของ เหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 ที่ใช้การทดสอบสภาวะดังกล่าวอยู่ติดชิดกับเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์โดยตรงได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก สภาวะการทดลองที่ 4 เท่ากับ 128.7 จูล (J) ที่อุณหภูมิทดสอบ 23°C. สภาวะการทดลองที่ 8 เท่ากับ 135 จูล (J) ที่อุณหภูมิทดสอบ 23°C. ซึ่งต่ำกว่าค่า ≥ 293 จูล (J) ถือว่า ไม่ผ่านขอบเขตการยอมรับ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าถ้าไม่ทำการเชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมพอกแข็ง มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาการแตกหลุดร้อนของเนื้อเชื่อมพอกแข็งออกจากบริเวณ HAZ สูงมาก

- ข. ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Weld hardsurfacing) ได้ค่าความต้านทานแรงกระแทก สภาวะการทดลองที่ 4 เท่ากับ 85 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ สภาวะการทดลองที่ 8 เท่ากับ 77 จูล (J) ที่อุณหภูมิห้อง > 60 จูล (J) ถือว่า ผ่านขอบเขตการยอมรับ

ตารางที่ 4-76 เปรียบเทียบผลการทดสอบแรงกระแทกงานเชื่อมพอกแข็ง สภาวะการทดลองที่ 1 – 8

ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงกระแทก (Average of Impact strength) หน่วย จูล (J)														
สภาวะการทดลองที่	Preheat °C	Base metal at -50°C	HAZ - Base metal	ลำดับที่	Acceptance	Test Result	Buffer Layer	ลำดับที่	Acceptance criteria at Room	Test Result	Weld surfacing	ลำดับที่	Acceptance criteria at Room	Test Result
1	150	$\geq 215^{1)}$	—	—	—	—	223	1	> 60	Accepted ²⁾	84.3	4	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾
2	—	$\geq 215^{1)}$	—	—	—	—	216.3	2	> 60	Accepted ²⁾	85.6	2	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾
3	150	$\geq 215^{1)}$	123.7	4	≥ 293	Rejected ²⁾	—	—	—	—	85	3	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾
4	—	$\geq 215^{1)}$	128.7	3	≥ 293	Rejected ²⁾	—	—	—	—	85	3	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾
5	150	$\geq 215^{1)}$	—	—	—	—	194	4	> 60	Accepted ²⁾	87	1	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾
6	—	$\geq 215^{1)}$	—	—	—	—	199.3	3	> 60	Accepted ²⁾	80.3	5	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾
7	150	$\geq 215^{1)}$	136	1	≥ 293	Rejected ²⁾	—	—	—	—	79.3	6	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾
8	—	$\geq 215^{1)}$	135	2	≥ 293	Rejected ²⁾	—	—	—	—	77	7	$> 60^{1)}$	Accepted ¹⁾

หมายเหตุ ¹⁾ ตามข้อกำหนดของบริษัท , ²⁾ เทียบเคียงกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.5 รายงานผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน (Test Report : Wear Testing)

การทดสอบการสึกหรอแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (dry sliding condition) กระทำโดยใช้เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Phoenix Tribology : T88) วิธีการทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน ASTM G99 ทดสอบภายใต้แรงกด 50 นิวตัน ด้วยความเร็วรอบ 200 rpm เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำหมุดและแผ่นจานที่ผ่านการทดสอบไปชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 4.78 เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์

จากการทดสอบการสึกกร่อนการทดสอบการสึกกร่อนแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (dry sliding condition) กระทำโดยใช้เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Phoenix Tribology : T88) วิธีการทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน ASTM G99 ทดสอบภายใต้แรงกด 50 นิวตัน ด้วยความเร็วรอบ 200 rpm เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง โดยทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อพิจารณาการสึกกร่อน (g/hr) จากผลต่างของน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ต่อระยะเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลดังตารางที่ ตารางที่ 4-60 และรูปที่ 4.79



รูปที่ 4.78 (a) อัตราการสึกกร่อนของวัสดุ ASTM A572 G65 ที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยสภาวะต่างๆ

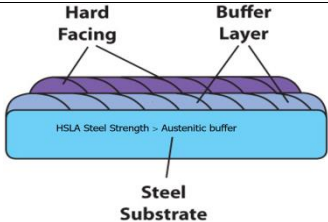
ตารางที่ 4-73 อัตราการสึกกร่อนของวัสดุ ASTM A572 ที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยสภาวะต่างๆ

สภาวะการทดลอง	น้ำหนักของชิ้นงาน		อัตราการสึกกร่อน kg/hr
	ก่อนการทดสอบ (kg)	หลังการทดสอบ (kg)	
1	0.9236	0.9234	0.0002
2	0.9338	0.9294	0.0044
3	0.9235	0.9231	0.0004
4	0.9361	0.9340	0.0021
5	0.9382	0.9346	0.0036
6	0.9315	0.9296	0.0050
7	0.9248	0.9211	0.0037
8	0.9250	0.9210	0.0040

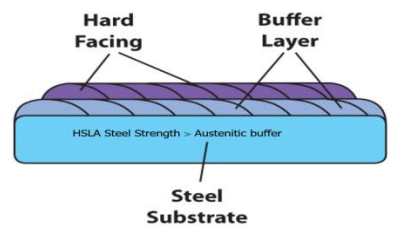
จากตารางที่ 4-73 ผลการทดสอบพบว่า บริเวณของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมจะมีลักษณะเป็นรอยตามยาวรอบวงกลมจากการเสียดสีแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (dry sliding condition) กระทำโดยใช้เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Phoenix Tribology : T88) และจากการคำนวณอัตราการสึกกร่อนของวัสดุ ASTM A572 G65 มีค่า เท่ากับ 0.0237 kg/hr และชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยสภาวะต่างๆ มีอัตราการสึกกร่อนที่ใกล้เคียงกันคือ 0.0021- 0.0050 kg/hr จากข้อมูลดังกล่าวเห็นได้ว่าผิวของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งนั้นทนต่อสภาวะการสึกกร่อนเสียดสีแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่นได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเชื่อมรองพื้นที่เป็นวัสดุพื้นฐานค่อนข้างมาก อีกทั้งในการเชื่อมที่มีการควบคุมอุณหภูมิขณะเชื่อมไม่ส่งผลทำให้ผิวของแนวเชื่อมเสียหายบริเวณการเชื่อมพอกแข็งต่อการสึกกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ

4.6 เอกสารข้อกำหนดรายละเอียดขั้นตอนการเชื่อม (WPS)

ใบบันทึกข้อกำหนดรายละเอียดขั้นตอนการเชื่อม [WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)]							
ชื่อหน่วยงานฯ...CIT, KMUTNB.....				ปรับปรุง (Revision) ครั้งที่ ...1....ว/ด/ป (Date).....27 May 2017.....			
เอกสาร WPS หมายเลข (No.) ...001.....				โดย (By) ...รองศาสตราจารย์ตรีเนตร ...อิงสัมพันธุ์เจริญ.....			
รับรองโดยเอกสาร PQR หมายเลข (No.).....001.....				อนุญาตโดย (Authorized by).....ว/ด/ป (Date).....			
กระบวนการเชื่อม [Welding Process(es)] : Shielded Metal Electrode Arc Welding (SMAW)				ชนิดการเชื่อม ☒ เชื่อมมือ (Manual) ☐ กึ่งอัตโนมัติ Semi-automatic ☐ ขับด้วยกลไก (Mechanized) ☐ อัตโนมัติ (Automatic)			
การออกแบบรอยต่อ (Joint design used) ☒ เชื่อมพอกแข็งบนแผ่นโลหะ (Hardsurfacing on Plate) ☒ Single side ☐ Double side ความนูนแนวเชื่อมสูงสุด (Maximum height convex bead) : 3 มม. ระยะเกลยเชื่อมซ้อนแนว : 1 / 3 จำนวนชั้นเชื่อมรองพื้น (Maximum of buffer layer) : 2 ชั้น จำนวนชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Maximum of weld hardsurfacing layer) 2 ชั้น				ลวดเชื่อม (Filler metal) ลวดเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ☐ AWS Specification : AWS A5.13 : EFeMnCr UTP 63 ☒ DIN8555 Classification : E 8-UM-200-KRZ เครื่องหมายการค้าลวดเชื่อม (Filler metal trade name) : UTP.63 ชนิดสารพอกหุ้มลวดเชื่อม (Type of Covering) : Rutile coated, fully austenitic CrNiMn stick electrode อุณหภูมิอบลวดเชื่อม (Electrode Dryer Temperature) : 2 h / 250 – 300° C. ขนาดลวดเชื่อม : $\varnothing 4.0 \times 400$ มม. ลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardsurfacing layer) ☐ AWS Specification : AWS A5.13 : EFeCr-EX Series Electrodes ☒ DIN 8555 Classification : E 10-UM-65-GRZ เครื่องหมายการค้าลวดเชื่อม (Filler metal trade name) : UTP. LEPUVIT. 65. DURQID 650 ESAB ชนิดสารพอกหุ้มลวดเชื่อม (Type of Covering) : High-efficiency... stick electrode without slag อุณหภูมิอบลวดเชื่อม (Electrode Dryer Temperature) : 2h/300°C. ขนาดลวดเชื่อม : $\varnothing 4.0 \times 450$ มม.			
โลหะงาน (Base metal) มาตรฐานวัสดุ (Material Spec.) : ASTM เกรดวัสดุ (Type or Grade) : A572 Gr.65 สมบัติทางเคมี/ทางกล (Chemical Analysis and Mech. Prop.) : C. 0.23%, Si. 0.4%, Mn. 0.4%, P. 0.04%, S. 0.050%, V. 0.06%, 0.015%, Cr. 0.05% ความหนา (Thickness) : 20 มม.				ทำเชื่อม (Welding Position) ทำเชื่อมต่อบารอง [Position(es) of Groove] : 1G ทิศทางการเชื่อม (Welding progression) : NA ☐ เชื่อมขึ้น (Up) ☐ เชื่อมลง (Down)			
เทคนิค (Welding Technique) การควบคุมลวดเชื่อม : ใช้เชื่อมด้วยมือ (Manual arc) การเดินแนวเชื่อม : ☒ ไม่ส่ายลวดเชื่อม (Stringer bead) ☐ ส่ายลวดเชื่อม (Weave bead) จำนวนชั้นเชื่อมพอกสูงสุด : ☒ เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จำนวน2..... ชั้น ☒ เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Buffer layer) สูงสุด จำนวน2..... ชั้น การเคาะนวด คลายความเค้นตกค้างจากการเชื่อม ☐ วิธีการ (Peening) : NA ☐ วิธีการอื่นๆ (Others) (โปรดระบุ)				การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) ☒ อุณหภูมิ preheat ชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ต่ำสุด : 150°C (ถ้าใช้) ☒ อุณหภูมิ preheat ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing) layer) ต่ำสุด : 150°C (ถ้าใช้) วิธีการให้ความร้อน : ☒ เตาอบ ☐ หัวเผา ☐ อื่นๆ (ระบุ) อุณหภูมิระหว่างชั้นเชื่อมสูงสุด (Interpass temperature (max.) : 600°C คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Characteristics) กระแสไฟเชื่อม (Welding Current) ☐ AC ☒ DCEP ☐ DCEN ☐ Pulse ☐ อื่นๆ ปริมาณความร้อนเข้า (Heat Input) สูงสุด ..NA.. หน่วย kJ/in หรือ kJ/mm			
ตารางกำหนดการตั้งค่าตัวแปรในการเชื่อม (WELDING PARAMETERS)							
ชั้นแนวเชื่อม [Weld of Layer(s)]	กระบวนการเชื่อม (Process)	ลวดเชื่อม (Filler Metal)		กระแสไฟเชื่อม		โวลต์ (Volt)	ความเร็วเชื่อม (Travel Speed) (mm/min)
		ชั้นเชื่อมพอกแข็ง	ขนาด $\varnothing$ ลวดเชื่อม (มม.)	ชนิดและขั้วกระแสไฟฟ้า	☒ แอมป์ (Amps)		
1	SMAW	Buffer layer	4	DCEP	110	24	150
2	SMAW	Weld hardsurfacing layer	4	DCEP	160	24	150

การออกแบบชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง (Joint detail for hardsurfacing : การเชื่อมพอกแข็งค้อนผัดอ้อย วิธีเชื่อมพอกแข็งบนแผ่นโลหะ (Hardsurfacing on Plate) ☒ Single side ☐ Double side	
ชนิดเครื่องเชื่อม (Type of Welding Machine) : Constant Current (CC)	เครื่องหมายการค้า : FRONIUS Model : MAGIG.WAVE 2600

4.7 การจัดทำใบบันทึกผลการทดสอบรับรองขั้นตอนการเชื่อม (PQR)

ใบบันทึกผลการทดสอบรับรอง WPS [PROCEDURE SPECIFICATION RECORD (PQR)]							
ชื่อและที่อยู่บริษัท (Company name and address)001.....							
หมายเลข Procedure Qualification Record (PQR. No.)001.....							
รับรอง WPS หมายเลข (WPS. No.)001.....							
กระบวนการเชื่อม (Welding Process) : ☒ SMAW ☐ GTAW ☐ GMAW ☐ FCAW-S ☐ อื่นๆ							
รอยต่อ (Joints) ☒ เชื่อมพอกแข็งบนแผ่นโลหะ (Hardsurfacing on Plate) ☒ Single side ☐ Double side ความนูนแนวเชื่อมสูงสุด (Maximum height convex bead) : 3 มม. ระยะเกลยเชื่อมซ้อนแนว : 1 / 3 จำนวนชั้นเชื่อมรองพื้น (Maximum of buffer layer) : 2 ชั้น จำนวนชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Maximum of weld hardsurfacing layer) : 2 ชั้น				การออกแบบชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง : การเชื่อมพอกแข็งค้อนดักอ้อย 			
โลหะงาน (Base metal) มาตรฐานวัสดุ (Material Spec.) : ASTM เกรดวัสดุ (Type or Grade) : A572 G65 สมบัติทางเคมี/ทางกล (Chemical Analysis and Mech. Prop.) : C. 0.23%, Si. 0.4%, Mn. 0.4%, P. 0.04%, S. 0.050%, V. 0.06%, 0.015%, Cr. 0.05% ความหนา (Thickness) : 20 มม.				ท่าเชื่อม (Welding Position) ท่าเชื่อมต่อบาครอง [Position(es) of Groove] : 1G ทิศทางการเชื่อม (Welding progression) : NA ☐ เชื่อมขึ้น(Up) ☐ เชื่อมลง (Down)			
ลวดเชื่อม (Filler metal) ลวดเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ☐ AWS Specification : AWS A5.13 : EFeMnCr UTP 63 ☒ DIN8555 Classification : E 8-UM-200-KRZ เครื่องหมายการค้าลวดเชื่อม (Filler metal trade name) : UTP-63 ชนิดสารพอกหุ้มลวดเชื่อม (Type of Covering) : Rutile coated, fully austenitic CrNiMn stick electrode อุณหภูมิอบลวดเชื่อม (Electrode Dryer Temperature) : 2 h / 250 – 300° C. ขนาดลวดเชื่อม : Ø 4.0 X 400 มม. ลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardsurfacing layer) ☐ AWS Specification : AWS A5.13 : EFeCr-EX Series Electrodes ☒ DIN 8555 Classification : E 10-UM-65-GRZ เครื่องหมายการค้าลวดเชื่อม (Filler metal trade name) : UTP-LEDURITE-65, DURQID 650 ESAB ชนิดสารพอกหุ้มลวดเชื่อม (Type of Covering) : High-efficiency, stick electrode without slag อุณหภูมิอบลวดเชื่อม (Electrode Dryer Temperature) : 2h/300° C. ขนาดลวดเชื่อม : Ø 4.0 X 450 มม.				การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) ☒ อุณหภูมิ preheat ชั้นเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ต่ำสุด : 150°C (ถ้าใช้) ☒ อุณหภูมิ preheat ชั้นเชื่อมพอกแข็ง (Hard surfacing) layer) ต่ำสุด : 150°C (ถ้าใช้) วิธีการให้ความร้อน : ☒ เตาอบ ☐ หัวเผา ☐ อื่นๆ (ระบุ) อุณหภูมิระหว่างชั้นเชื่อมสูงสุด (Interpass temperature (max.) : 600°C			
				คุณลักษณะทางไฟฟ้า (Electrical Characteristics) กระแสไฟเชื่อม (Welding Current) ☐ AC ☒ DCEP ☐ DCEN ☐ Pulse ☐ อื่นๆ ปริมาณความร้อนเข้า (Heat Input) สูงสุด .. NA .. หน่วย kJ/in หรือ kJ/mm			
เทคนิค (Welding Technique) การควบคุมลวดเชื่อม : ใช้เชื่อมด้วยมือ (Manual arc) การเดินแนวเชื่อม : ☒ ไม่ส่ายลวดเชื่อม (Stringer bead) ☐ ส่ายลวดเชื่อม (Weave bead) จำนวนชั้นเชื่อมพอกสูงสุด : ☒ เชื่อมรองพื้น (Buffer layer) จำนวน2..... ชั้น ☒ เชื่อมชั้นพอกแข็ง (Buffer layer) สูงสุด จำนวน2..... ชั้น การเคาะนวด คลายความเค้นตกค้างจากการเชื่อม ☐ วิธีการ (Peening) : NA ☐ วิธีการอื่นๆ (Others) (โปรดระบุ)							
ตารางกำหนดการตั้งค่าตัวแปรในการเชื่อม (WELDING PARAMETERS)							
ชั้นแนวเชื่อม [Weld of Layer(s)]	กระบวนการ เชื่อม (Process)	ลวดเชื่อม (Filler Metal)		กระแสไฟเชื่อม		โวลท์ (Volt)	ความเร็วเชื่อม (Travel Speed) (mm/min)
		ชั้นเชื่อมพอกแข็ง	ขนาด Ø ลวด เชื่อม (มม.)	ชนิดและขั้วกระแสไฟฟ้า (Polarity)	แอมป์ (Amps)		
1	SMAW	Buffer layer	4	DCEP	110	24	150
2	SMAW	Weld hardsurfacing layer	4	DCEP	160	24	150

ผลการทดสอบงานเชื่อมพอกแข็ง (TEST RESULTS)

ผลการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) มาตรฐานทดสอบที่ใช้อ้างอิง : ASME Section IX 2015 – QW-144 ผลการทดลองที่ 2 : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) ผลการทดลองที่ 5 : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) ไม่พบความผิดปกติใดๆที่แนวเชื่อมชั้นงานเชื่อมรองพื้นและชั้นเชื่อมพอกแข็ง	ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค (MACRO-EXAMINATION — PROCEDURE SPECIMENS) มาตรฐานทดสอบที่ใช้อ้างอิง : ASME Section IX 2015 – QW-183 ผลการทดลองที่ 2 : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) ผลการทดลองที่ 5 : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed)		
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Test) : มาตรฐานทดสอบที่ใช้อ้างอิง : ASTM E3			
ผลการทดลองที่ 2 : Heat Affected Zone (HAZ) : Benite structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Buffer layer : Austenitic manganese high chromium structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Weld hardsurfacing : Chromium carbide and Complex carbide structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed)	ผลการทดลองที่ 5 : Heat Affected Zone (HAZ) : Benite structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Buffer layer : Austenitic manganese high chromium structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Weld hardsurfacing : Chromium carbide and Complex carbide structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed)		
ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness test) : มาตรฐานทดสอบที่ใช้อ้างอิง : ASTM E23			
ผลการทดลองที่ 2 : Buffer layer : ≥1 Layer : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Weld hardsurfacing : 1 Layer : ☐ ผ่าน (Passed) ☒ ไม่ผ่าน (Non-passed) : สาเหตุ : High dilution 2 Layer : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) : สาเหตุ : Low dilution	ผลการทดลองที่ 5 : Buffer layer : ≥1 Layer : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Weld hardsurfacing : 1 Layer : ☐ ผ่าน (Passed) ☒ ไม่ผ่าน (Non-passed) : สาเหตุ : High dilution 2 Layer : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) : สาเหตุ : Low dilution		
ผลการทดสอบแรงกระแทก (Microstructure Test) : มาตรฐานทดสอบที่ใช้อ้างอิง : ASME Section IX 2015 – QW-170			
ผลการทดลองที่ 2 : Heat Affected Zone (HAZ) : .NA Buffer layer : Austenitic manganese high chromium structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Weld hardsurfacing : Chromium carbide and Complex carbide structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed)	ผลการทดลองที่ 5 : Heat Affected Zone (HAZ) : .NA Buffer layer : Austenitic manganese high chromium structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed) Weld hardsurfacing : Chromium carbide and Complex carbide structure ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed)		
การทดสอบการทดสอบการสึกหรอบแบบโลด (Wear Test) : มาตรฐานทดสอบที่ใช้อ้างอิง (Standards) : ASTM G99			
ชิ้นงานจาก สภาวะการทดลองที่	น้ำหนักของชิ้นงาน		อัตราการสึกกร่อน
	ก่อนการทดสอบ (kg)	หลังการทดสอบ (kg)	kg/hr
2	0.9338	0.9294	0.0044
6	0.9315	0.9296	0.0050
ผลการทดลองที่ 2 : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed)	ผลการทดลองที่ 5 : ☒ ผ่าน (Passed) ☐ ไม่ผ่าน (Non-passed)		

4.8 การประเมินราคาค้อนฉีกอ้อย

การประเมินราคาค้อนฉีกอ้อยสามารถทำได้โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. วัสดุ ASTM A 572 เกรด 65

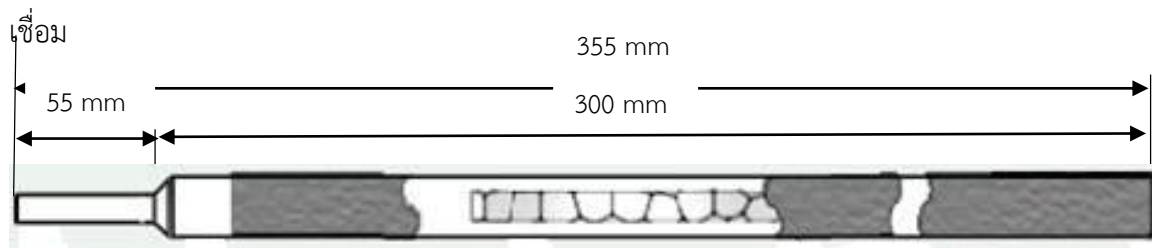
- ราคาวัสดุ 20 บาทต่อ 1 กิโลกรัม $\times$ 25 kg (น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ผลิตค้อนฉีกอ้อย) = 500.00 บาท

2. ลวดเชื่อมรองพื้น

- ราคาลวด ราคา 380 บาทต่อ 1 กิโลกรัม $\times$ 1.80 kg (น้ำหนักของลวดที่ใช้เชื่อม) = 684 บาท
- คำนวณค่าร้อยละประสิทธิภาพการเชื่อมจากการสูญเสียโคนลวดเชื่อมและฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อม
 $[100 \times (\text{Electrode Length} - \text{Stub}) / \text{Electrode Length}] \times \text{Deposition Efficiency}$
 $[100 \times (355 - 55) / 355] \times 0.75 = 64\%$ (ลวดที่มีมวล 100% จะใช้เชื่อมได้ 64%)
- ดังนั้น ราคาของลวด 684 + 199 (36% ของลวด) = 883 บาท

หมายเหตุ: Electrode Length = ความยาวของลวด Stub = ปลายของลวดเชื่อม

Deposition Efficiency = สัดส่วนประสิทธิภาพการเชื่อมไฟฟ้าที่สูญเสียมวลของฟลักซ์หุ้มลวด



3. ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง UTP Ledurit 65

- ราคาลวด ราคา 580 บาทต่อ 1 กิโลกรัม $\times$ 2.80 kg (น้ำหนักของลวดที่ใช้เชื่อม) = 1,624 บาท
- คำนวณค่าร้อยละประสิทธิภาพการเชื่อมจากการสูญเสียปลายลวดเชื่อมและฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อม
 $[100 \times (\text{Electrode Length} - \text{Stub}) / \text{Electrode Length}] \times \text{Deposition Efficiency}$
 $[100 \times (355 - 55) / 355] \times 0.75 = 64\%$ (ลวดที่มีมวล 100% จะใช้เชื่อมได้ 64%)
- ดังนั้น ราคาของลวด 1,624 + 547.2 (36% ของลวด) = 2,172 บาท

หมายเหตุ: Electrode Length = ความยาวของลวด Stub = ปลายลวดเชื่อม

Deposition Efficiency = สัดส่วนประสิทธิภาพการเชื่อมไฟฟ้าที่สูญเสียมวลของฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อมไฟฟ้า

4. หมวดค่าจ้างแรงงาน

- ค่าจ้างการตัดและเชื่อมชิ้นงาน 500 บาทต่อวัน (8 ชั่วโมงทำงาน) / 4 ชิ้น = 125.00 บาท

5. ค่าต้นทุนพลังงาน

- การเชื่อมรองพื้น 5 บาท/kWh x 25 V x 106 A / 1000) x (1.80+ 0.52 kg) / 1 kg/h) = 30.74 บาท

- การเชื่อมผิวแข็ง 5 บาท/kWh x 30 V x 168 A / 1000) x (2.80 + 0.94 kg) / 1 kg/h) = 94.248 บาท

- การอบชิ้นงาน 5 บาท/kWh x 2 kWh x [(2 h x 150/300°C) + (2 h x 300/300°C)] = 30.00 บาท

- แก๊ส LPG (การอุ่นชิ้นงาน) 13 บาทต่อลิตร x 0.1 ลิตร = 2.60 บาท

6. รวมราคาที่เกิดขึ้นทั้งหมด

= 500 + 883 + 2,172 + 125 + 30.74 + 94.248 + 30 + 2.60 = 3,807.588 บาท

หมายเหตุ: ราคาประเมินของค้อนฉีกอ้อยต้นแบบ

จากผลการประเมินราคาค้อนฉีกอ้อยพบว่า ต้นทุนการผลิตค้อนฉีกอ้อยต่อชิ้น มีราคา 3,807.588 บาท ซึ่งใกล้เคียงกับราคาค้อนฉีกอ้อยที่โรงงานน้ำตาลบ้านโป่งผลิต (ประมาณ 3,500-4,000 บาท/ชิ้น) โดยราคาที่แตกต่างกัน (ประมาณ 300-400 บาท) ขึ้นอยู่กับวัสดุและคุณภาพลวดเชื่อมที่มีราคาสูง อาทิเช่น ราคาต่อจำนวนที่สั่งผลิต ยี่ห้อ-เกรด และมาตรฐานของวัสดุ ค่าแรงของช่างเชื่อม รวมถึงต้นทุนพลังงานจากกระบวนการควบคุมความร้อน และอื่นๆ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากข้อมูลทางด้านสมบัติและต้นทุนการผลิตสามารถบ่งชี้ให้เห็นว่าค้อนฉีกอ้อยต้นแบบที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีศักยภาพที่จะผลักดันไปสู่อุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

4.9 การจัดอบรมเพื่อถ่ายทอดความรู้และผลการประเมินความรู้และความพึงพอใจของผู้เข้าอบรม รวมถึงเอกสารประชาสัมพันธ์

ผู้ดำเนินโครงการวิจัยได้จัดอบรมเพื่อถ่ายทอดความรู้เชิงวิชาการ ให้กับภาครัฐและเอกชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคลากรของกลุ่มอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องและภาคการศึกษา ได้แก่ สำนักงานอ้อยและน้ำตาล โรงงานน้ำตาล บริษัทจำหน่ายลวดเชื่อมและเครื่องเชื่อม บริษัทรับเหมาการเชื่อมพอกผิวแข็ง รวมถึงบุคลากรของมหาวิทยาลัย โดยงานสัมมนาวิชาการ “การพัฒนาค้อนฉีกอ้อยที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม” ได้จัดขึ้น ณ โรงแรมปรีณัฐ กรุงเทพมหานคร ในวันอังคารที่ 17 กรกฎาคม 2561 เวลา 09.00-16.00 น.จำนวนผู้เข้าร่วมทั้งสิ้น 53 ท่าน ผู้จัดทำเอกสารประชาสัมพันธ์ข้อมูลการงานวิจัยนี้สามารถสร้างองค์ความรู้ในการพัฒนากระบวนการผลิตค้อนฉีกอ้อยที่มีความต้านทานการเสื่อมสภาพ และสามารถนำสูตรการเชื่อมพอกแข็งไปต่อยอดสู่การผลิตผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ และสามารถยกระดับวิธีการตรวจสอบสินค้าของผู้ผลิตค้อน

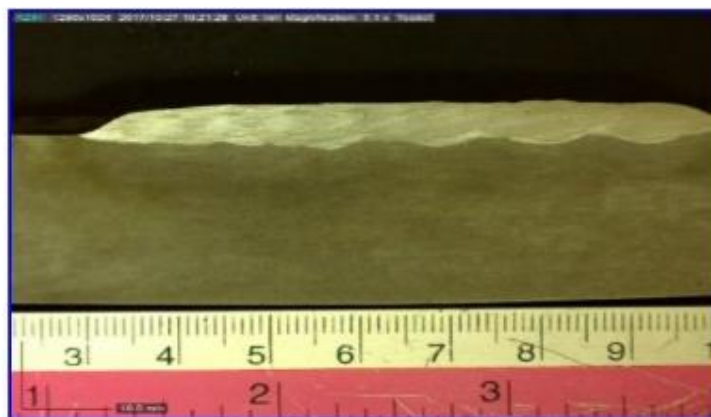
ฉีกอ้อยและการเชื่อมพอกแข็งให้เป็นที่ยอมรับ ตามมาตรฐานสากลให้กับภาครัฐและเอกชน ดังรายละเอียด
 ที่แสดงในภาพผนวก



รูปที่ 4.79 การบรรยายสรุปผลการวิจัยในการสัมมนาวิชาการ ณ โรงแรมปรีณส์ตัน กรุงเทพฯ

ตารางที่ 4-74 ผลการประเมินความรู้และความพึงพอใจของผู้เข้าอบรมการพัฒนาคือนักอ้อยที่มีสมบัติ
ด้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม

สรุปประเมินผลการฝึกอบรม /EVALUATION									
ภายใต้โครงการวิจัย เรื่อง "การพัฒนาคือนักอ้อยที่มีสมบัติด้านทานการเสื่อมสภาพ ด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม "									
เรื่อง “การเพิ่มความต้านทานการเสื่อมสภาพของชั้นผิวพอกแข็งบนคือนักอ้อย									
วันที่ 17 กรกฎาคม 2561 เวลา 09.00-16.00 น.									
สถานที่ฝึกอบรม ณ ห้องอบรม โรงแรมปรีณัฐ กรุงเทพมหานคร									
ผู้ตอบแบบสอบถาม		ชาย		หญิง					
		43		10	ตอบแบบสอบถาม 53 คน				
ที่	รายการประเมิน	5	4	3	2	1	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์	อยู่ในระดับ
ด้านกระบวนการ/ขั้นตอนการให้บริการ									
1	การประชาสัมพันธ์โครงการอย่างทั่วถึง	31	18	4			4.51	90%	มากที่สุด
2	ขั้นตอนการลงทะเบียน / รับเอกสาร	28	20	5			4.43	89%	มาก
	รวม						4.47	89%	มาก
ด้านสิ่งอำนวยความสะดวก									
1	การให้บริการและอำนวยความสะดวกของเจ้าหน้าที่	20	28	5			4.28	86%	มาก
2	สถานที่จัดอบรมสะอาดและมีความเหมาะสม	27	20	6			4.40	88%	มาก
3	ความพร้อมของวัสดุ / วัสดุทัศนูปกรณ์	25	17	11			4.26	85%	มาก
4	การบริการอาหารกลางวัน / อาหารว่างและเครื่องดื่ม	26	25	2			4.45	89%	มาก
	รวม						4.35	87%	มาก
ด้านคุณภาพการให้บริการ หลักสูตรฝึกอบรมและเนื้อหาหลักสูตร									
1	เนื้อหาและหลักสูตรตรงกับความต้องการ	15	37	1			4.26	85%	มาก
2	สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้	26	23	4			4.42	88%	มาก
3	เอกสารประกอบการฝึกอบรมมีความเหมาะสม	18	28	7			4.21	84%	มาก
4	การฝึกอบรมช่วยเพิ่มพูนความรู้	26	21	6			4.38	88%	มาก
	รวม						4.32	86%	มาก
ความพึงพอใจในภาพรวมของการอบรมครั้งนี้									
	ความพึงพอใจในภาพรวมของการอบรมครั้งนี้	28	22	3			4.47	89%	มาก



รูปที่ 4.80 ตัวอย่างชิ้นงานพอกแข็ง และการตรวจสอบโดยวิธีสารแทรกซึม และการตรวจดูโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองเชื่อมพอกแข็งจำลองค้อนฉีกอ้อยสภาวะต่างๆ คณะผู้วิจัยได้สรุปและอภิปรายผลการทดลองหลักๆดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ข้อมูลสำคัญที่ใช้เชื่อมพอกแข็งในแต่ละสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลหลักที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง ในแต่ละสภาวะการทดลอง

สภาวะการทดลองที่	ลวดเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) ¹⁾	ลวดเชื่อมพอกแข็ง (Weld hard surfacing) ²⁾		ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) 150°C.		การควบคุมอุณหภูมิระหว่างชั้นเชื่อม (Interpass Temp. Control) 600°C (max.)	
	UTP 63	UTP LEDURIT65	ESAB 650	ไม่มี	มี	ไม่มี	มี
1	✓	✓	—	—	✓	—	✓
2	✓	✓	—	—	✓	—	✓
3	—	✓	—	✓	—	—	✓
4	—	✓	—	✓	—	—	✓
5	✓	—	✓	—	✓	—	✓
6	✓	—	✓	—	✓	—	✓
7	—	—	✓	✓	—	—	✓
8	—	—	✓	✓	—	—	✓

หมายเหตุ สัญลักษณ์ — หมายถึง ไม่มีการใช้หรือปฏิบัติ, ✓ หมายถึง มีการใช้หรือปฏิบัติ

- ¹⁾ ลวดเชื่อมรองพื้น UTP 63 มาตรฐาน DIN 8555 : E 8-UM-200-KRZ ขนาด Ø 4 มม. ยาว 400 มม.
- ²⁾ ลวดเชื่อมพอกแข็ง UTP LEDURIT65, DUROID 650 ESAB มาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-60-Z ขนาด Ø 4 มม. ยาว 450 มม.

5.1.2 สรุปผลการทดลอง สภาวะการทดลองที่ 1 - 8

คณะผู้วิจัยได้สรุปผลการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองออกมา 5 ด้านคือ

- 1) การทดสอบโครงสร้างมหภาค (Test Report : Macro Structure Test)
- 2) ทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Test Report : Micro Structure Test)
- 3) การทดสอบความแข็งจุลภาค (Test Report : Micro Hardness Test)
- 4) การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Test Report : Impact Test)
- 5) การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน (Test Report : Wear Testing)

5.1.3 ข้อสรุปผลการทดลอง

นำผลการทดสอบจากสภาวะการทดลองที่ 1 - 8 จาก บทที่ 4 มาสรุปผล เพื่อใช้ตัดสินใจเลือกใช้ สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด เพื่อจะนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงในงานเชื่อมซ่อมบำรุงค้อนฉีกอ้อย ได้ข้อสรุปดังแสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 สรุปผลสภาวะการทดลองที่ 1 - 8

สภาวะการทดลอง	ต้นทุน Preheat	โครงสร้างมหภาค	โครงสร้างจุลภาค			ความแข็งจุลภาค (HRC)			ความต้านทานแรงกระแทก		
		เกิด Check cracking	HAZ	Buffer lay	Over lay	HAZ	Buffer lay	Over lay	HAZ	Buffer lay	Over lay
1	มี	ไม่ปรากฏ	B	AMn	CrC	20.5	21.60	46.9	×	Acc.	Acc.
2	ไม่มี	น้อยที่สุด	B	AMn	CrC	20.0	7.76)	52.6	×	Acc.	Acc.
3	มี	มาก	B	×	CrC	20.6	×	43.8	Rej.	×	Acc.
4	ไม่มี	มากที่สุด	B	×	CrC	21.5	×	43.8	Rej.	×	Acc.
5	มี	ไม่ปรากฏ	B	AMn	CrC	21.9	37.69	45.2	×	Acc.	Acc.
6	ไม่มี	น้อยที่สุด	B	AMn	CrC	20.7	22.00	42.7	×	Acc.	Acc.
7	มี	น้อยที่สุด	B	×	CrC	21.5	×	49.0	Rej.	×	Acc.
8	ไม่มี	ไม่ปรากฏ	B	×	CrC	20.1	×	46.2	Rej.	×	Acc.

หมายเหตุ

B หมายถึง โครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ (Benite) หรือ เฟิร์ลไลท์ละเอียด

AMn หมายถึง โครงสร้างจุลภาคออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง

CrC หมายถึง โครงสร้างจุลภาคโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน

Rej. หมายถึง ปฏิเสธ ไม่ยอมรับหรือไม่ผ่านการประเมิน

Acc. หมายถึง ยอมรับ หรือ ผ่านการประเมิน

×

หมายถึง ไม่มีการทดลอง หรือไม่มีการทดสอบ

จากข้อสรุปผลการทดลองใน ตารางที่ 5-2 จะพบว่าสภาวะการทดลองที่ 3, 4, 7 และ 8 ที่ไม่ได้ทำการเชื่อมรองพื้น (No-buffer layer) ทำให้เนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld surfacing) เกาะยึดกับบริเวณกระแทกร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ของโลหะงานเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 โดยตรงทำให้เกิดความยืดหยุ่นเกิดความเค้นตกค้างขณะที่เนื้อเชื่อมเย็นตัวสูง (High residual stress) ทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่เนื้อเชื่อมในทิศทางตัดขวางกับความยาวแนวเชื่อม ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ปกติช่วยคลายความเค้นในเนื้อเชื่อมตระกูลโครเมียมคาร์ไบด์ เป็นศัพท์เทคนิคใช้เรียกกันทั่วไปว่า “Check cracking” ที่เห็นได้ชัดเจนในสภาวะการทดลองที่ 3 และ 4 ผลของความเค้นตกค้างจากการเชื่อมสูงดังกล่าว จะเป็นสาเหตุทำให้เนื้อเชื่อมพอกแข็งหลุดร่อนออกจากผิวโลหะงานได้ง่ายและรุนแรงที่สุดคืออาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวขึ้นในเนื้อโลหะงานเหล็กกล้าบริเวณ HAZ หรือเกิดปัญหาการแตกร้าวใต้แนวเชื่อม (Under bead cracking) ได้ง่าย และจากข้อมูลในตารางที่ 5-2 ในการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกจึงพบว่าผลการทดสอบค่าความเหนียวแกร่ง (Toughness) ของโลหะงานบริเวณ HAZ ในสภาวะการทดลองที่ 3, 4, 7 และ 8 ไม่ผ่านของเขตการยอมรับ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องตัดสภาวะการทดลองที่ 3, 4, 7 และ 8 ออกจากทางเลือกการนำไปใช้ปฏิบัติงานเชื่อมซ่อมบำรุงค้อนฉีกอ้อยในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ดังรายละเอียด สรุปไว้ในตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 สรุปผลการวิเคราะห์สภาวะการทดลองที่ 1 – 8 เพื่อตัดสินใจเลือกนำไปใช้ในงานเชื่อมซ่อมบำรุงค้อนฉีกอ้อย ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

สภาวะการทดลอง	คุณภาพการนำไปใช้เชื่อมซ่อมบำรุงค้อนฉีกอ้อย	เหตุผลประกอบการตัดสินใจ	การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม	ผลเปรียบเทียบที่สำคัญ ระหว่างกรณี Preheat และ No-preheat	ความต้านทานแรงกระแทก		
					HAZ	Buffer lay	Over lay
1 และ 5	เหมาะสม	เนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีสจะช่วยให้เสริมแรงยึดเกาะเนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ ในชั้นพอกแข็ง ป้องกันการหลุดร่อนของชั้นเชื่อมพอกแข็ง	Preheat 150°ซ.	ไม่มีผลต่อโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรง HAZ ของโลหะงาน ความแข็งแรงชั้นเชื่อมรองพื้น และความแข็งแรงเนื้อเชื่อม ในชั้นพอกแข็ง	×	Acc.	Acc.
2 และ 6	เหมาะสม	ค่าความเหนียวแรง (Toughness) ไม่ผ่านขอบเขตการยอมรับผลการทดสอบ และการไม่มีชั้นเนื้อเชื่อมรองพื้นทำให้ขาดความยืดหยุ่นในการเกาะยึด ทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็งสูงมาก เป็นสาเหตุทำให้ชั้นเชื่อมพอกแข็ง หลุดร่อนออกจากโลหะงานได้ง่าย	No-preheat	ไม่มีผลต่อโครงสร้างมหภาค ไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ไม่มีผลต่อความแข็งแรง HAZ ของโลหะงาน และ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง	×	Acc.	Acc.
3 และ 7	ไม่ควรเลือกใช้	ไม่มีชั้นเนื้อเชื่อมรองพื้นทำให้ขาดความยืดหยุ่นในการเกาะยึด ทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็งสูงมาก เป็นสาเหตุทำให้ชั้นเชื่อมพอกแข็ง หลุดร่อนออกจากโลหะงานได้ง่าย	Preheat 150°ซ.	ไม่มีผลต่อโครงสร้างมหภาค ไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ไม่มีผลต่อความแข็งแรง HAZ ของโลหะงาน และ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง	Rej.	×	Acc.
4 และ 8	ไม่ควรเลือกใช้	ไม่มีชั้นเนื้อเชื่อมรองพื้นทำให้ขาดความยืดหยุ่นในการเกาะยึด ทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชั้นเนื้อเชื่อมพอกแข็งสูงมาก เป็นสาเหตุทำให้ชั้นเชื่อมพอกแข็ง หลุดร่อนออกจากโลหะงานได้ง่าย	No-preheat	ไม่มีผลต่อโครงสร้างมหภาค ไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ไม่มีผลต่อความแข็งแรง HAZ ของโลหะงาน และ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง	Rej.	×	Acc.

หมายเหตุ

Rej. หมายถึง ปฏิเสธ ไม่ยอมรับหรือ ไม่ผ่านการประเมิน

Acc. หมายถึง ยอมรับ หรือ ผ่านการประเมิน

×

ตารางที่ 5-4 เหตุผลประกอบการตัดสินใจเลือก สภาวะการทดลองที่ 2 และ 6 ไปใช้ในงานเชื่อมซ่อมบำรุงค้อนฉีกอ้อยในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

สภาวะการทดลอง	ลดต้นทุน (No-preheat)	เชื่อมรองพื้น (Buffer layer)	โครงสร้างมหภาค	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ	ความแข็งแรง	ความต้านทานแรงกระแทก
2 ¹⁾	ค่า CE ที่คำนวณได้จากเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 เท่ากับ 0.533 ไม่สูงมาก ประกอบกับ	ด้วยลวดเชื่อม ออสเทนนิติก แมงกานีสชนิดโครเมียมสูงเป็นตัวกลางเพิ่มการเกาะยึดให้กับ	เนื้อเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ไม่เกิดรอยแตกร้าวตัดขวางกับความยาวแนวเชื่อม (Check cracking)	โครงสร้างเฟอร์ไรต์ละเอียดหรือเบนไนท์เช่นเดียวกับสภาวะการทดลองที่ 1 และ 5	ค่าความแข็งแรงของโลหะงานบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ค่าความแข็งแรงเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้นและค่าความแข็งแรงเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งไม่แตกต่างจากสภาวะการทดลองที่ 1 และ 5	ค่าความต้านทานแรงกระแทกของเนื้อเชื่อมรองพื้นและเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งทดสอบผ่านของเขตการยอมรับตามที่ผู้ผลิตกำหนด
6 ²⁾	ชิ้นงานมีขนาดเล็ก แนวเชื่อมที่เชื่อมเสร็จแล้วจะเป็นการให้ความร้อนชิ้นงานก่อนเชื่อมแนวเชื่อมต่อไปในตัวโดยอัตโนมัติ	เนื้อเชื่อมพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ป้องกันการแตกหลุดร้อนของเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง				

หมายเหตุ

- 1) การเชื่อมทดลองสภาวะที่ 2 ใช้ลวดเชื่อม UTP LEDURIT 65 เป็นลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง
- 2) การเชื่อมทดลองสภาวะที่ 6 ใช้ลวดเชื่อม DUROID 650 ESAB เป็นลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง

ลวดเชื่อมทั้งสองเครื่องหมายการค้า เป็นลวดเชื่อมอยู่ในกลุ่มมาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ หรือเทียบได้กับมาตรฐาน AWS A5.13:2000 - EFeCr-EX Series Electrodes เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมธาตุโครเมียมสูงได้ถึง 23.5 % โดยน้ำหนัก และมีส่วนผสมของธาตุที่ทำให้คาร์ไบด์อื่นๆ ได้แก่ ไนโอเบียม วานาเดียม ทั้งสแตน ให้เนื้อเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเหล็กโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) และคาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex carbide)

จากข้อสรุปผลการทดลองใน ตารางที่ 5-3 และ 5-4 ใช้เป็นเหตุผลที่ใช้ตัดสินใจเลือกสภาวะการทดลองที่ 2 และ 5 ในการเชื่อมซ่อมบำรุงเชื่อมพอกแข็งค้อนฉีกอ้อยโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยผู้ประกอบการ สามารถเลือกใช้ข้อกำหนดการเชื่อม สภาวะการทดลองที่ 2 หรือ สภาวะการทดลองที่ 6 อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อนำไปใช้ปฏิบัติงานเชื่อมซ่อมบำรุงเชื่อมพอกแข็งค้อนฉีกอ้อยได้อย่างเหมาะสมและมีคุณภาพสูง

5.1.4 การทดสอบการสึกกร่อนแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (dry sliding condition) กระทำโดยใช้เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Phoenix Tribology : T88) วิธีการทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน ASTM G99 ทดสอบภายใต้แรงกด 50 นิวตัน ด้วยความเร็วรอบ 200 rpm เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง โดยทดสอบที่ 8 สภาวะต่างๆ ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อพิจารณาการสึกกร่อน (g/hr) จากผลต่างของน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ต่อระยะเวลา 10 ชั่วโมงจากผลการทดสอบ พบว่า บริเวณของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมจะมีลักษณะเป็นรอยตามยาวรอบวงกลมจากการเสียดสีแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (dry sliding condition) กระทำโดยใช้เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Phoenix Tribology : T88) และจากการคำนวณอัตราการสึกกร่อนของวัสดุ ASTM A572 G65 มีค่า เท่ากับ 0.0237 kg/hr และชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยสภาวะต่างๆ มีอัตราการสึกกร่อนที่ใกล้เคียงกันคือ 0.0021- 0.0050 kg/hr จากข้อมูลดังกล่าวเห็นได้ว่าผิวของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งนั้นทนต่อสภาวะการสึกกร่อนเสียดสีแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่นได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเชื่อมรองพื้นที่เป็นวัสดุพื้นฐานค่อนข้างมาก อีกทั้งในการเชื่อมที่มีการควบคุมอุณหภูมิขณะเชื่อมไม่ส่งผลทำให้ผิวของแนวเชื่อมเสียหายบริเวณการเชื่อมพอกแข็งต่อการสึกกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

การทดลองสภาวะ 1 ถึง 8 เป็นการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมโลหะชนิดหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding : SMAW) แต่ละสภาวะการทดลองมีการกำหนดตัวแปรการเชื่อม (Welding Variables) ใช้ในการทดลองสำคัญดังนี้

1) รอยต่อ (Joints)

เป็นการเชื่อมพอกแข็งเพื่อต้านทานการสึกหรอเน้นการเตรียมความสะอาดชิ้นงานด้วยวิธีกลก่อนการเชื่อม ในทุกสภาวะการทดลอง 1 - 8

2) โลหะงาน (Base Metal)

เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง ASTM A572 Gr.65 มีปริมาณส่วนผสมธาตุคาร์บอนต่ำ ป้องกันการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ ที่บริเวณกระแทกร้อน (HAZ) จากการเชื่อม ในทุกสภาวะการทดลอง 1 – 8 พบว่า โครงสร้างจุลภาค HAZ เป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ละเอียดหรือเบนไนท์

3) ลวดเชื่อม

ก. ใช้ลวดเชื่อมออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง UTP 63 มาตรฐาน DIN 8555 : E 8 UM 200 KRZ ขนาด $\varnothing 4 \times 400$ มม. เป็นลวดเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) เพื่อเสริมการเกาะยึดชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งกับโลหะงาน ในการเชื่อมสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 5 และ 6

- ข. ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง UTP Ledurit 65 มาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ ขนาด $\varnothing 4 \times 450$ มม. ให้เนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน เป็นลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardsurfacing layer) ในการเชื่อมสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4
- ค. ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง DUROID 650 ESAB มาตรฐาน DIN 8555 : E 10-UM-65-GRZ ให้เนื้อเชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์และคาร์ไบด์เชิงซ้อน เป็นลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardsurfacing) ในการเชื่อมสภาวะการทดลองที่ 5, 6, 7 และ 8

การเลือกใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งต่างเครื่องหมายการค้า เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาค โครงสร้างมหภาค และสมบัติทางกลด้านความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก พบว่าใกล้เคียงกัน

4) ท่าเชื่อม

ทำการทดลองเชื่อม สภาวะการทดลองที่ 1 – 8 ในท่าราบ (Flat welding positions)

5) การ Preheat

อุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) คือ 150°C . ได้จากการคำนวณค่าคาร์บอนสมมูลย์ (Carbon equivalent : CE) จุดประสงค์เพื่อไล่ความชื้นและลดอัตราการเย็นตัวเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่โลหะงาน บริเวณ HAZ ในการเชื่อมสภาวะการทดลองที่ 1, 3, 5, 7 ผลการทดลองปรากฏว่า การ Preheat ขึ้นงานหลักกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง ASTM A572 Gr.65 ที่อุณหภูมิ 150°C . เมื่อเทียบกับการไม่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการเชื่อมพอกแข็ง (No-preheat) สภาวะการทดลองที่ 2, 4, 6, 8 ไม่ส่งผลความแตกต่างในทุกด้านผลของการทดลอง เนื่องจากชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่ทดลองมีขนาดเล็กและความร้อนจากการเชื่อมชั้นเชื่อมแรกจะเป็นการให้ความร้อนก่อนเชื่อมชั้นเชื่อมทับในชั้นเชื่อมที่เชื่อมภายหลังในตัว

6) คุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

ก. เป็นเครื่องเชื่อมระบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Constant current : CC) เลือกใช้ขั้วกระแสไฟเชื่อม DCEP หรือ DC^+ ตามคำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อมทั้งแนวเชื่อมรองพื้น (Buffer layer) และแนวเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Weld hardsurfacing layer) การใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP หรือ DC^+ มีผลทำให้ความร้อนส่วนใหญ่อยู่ที่ปลายลวดเชื่อม ทำให้ลวดเชื่อมละลายง่าย เชื่อมง่ายขึ้น

- ข. ตั้งค่ากระแสไฟเชื่อมชั้นเชื่อมรองพื้นในสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 5 และ 6 เท่ากับ 110 แอมป์ และค่ากระแสไฟเชื่อมชั้นเชื่อมพอกแข็ง 160 แอมป์ ในสภาวะการทดลองที่ 1 ถึง 8
- ค. ตั้งค่ากระแสไฟเชื่อมชั้นเชื่อมพอกแข็ง 160 แอมป์ ในสภาวะการทดลองที่ 1 ถึง 8 กระแสไฟเชื่อมชั้นพอกแข็ง 160 แอมป์ มีผลทำให้ Dilution จากเนื้อเชื่อมชั้นเชื่อมรองพื้นละลายขึ้นมาผสมกับโลหะเชื่อมมาก มีผลทำให้ความแข็งเนื้อเชื่อมพอกแข็งต่ำกว่าที่ผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนด

7) เทคนิคการเชื่อม

- ก. ใช้เทคนิคเดินแนวเชื่อมแบบเส้นเชื่อม (Stringer bead) เพื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อมลด ปริมาณ Dilution ลง
- ข. เชื่อมรองพื้น 1 ชั้น ในสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 5 และ 6 โอกาสเกิด Dilution สูง เนื่องจากเนื้อเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 หลอมละลายขึ้นมาผสมกับเนื้อเชื่อมออสเทนนิติกแมงกานีสชนิดโครเมียมสูง ทำให้เนื้อเชื่อมรองพื้นออสเทนนิติกแมงกานีส มีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น
- ค. เชื่อมชั้นพอกแข็ง 1 ชั้น ในสภาวะการทดลองที่ 1 ถึง 8 โอกาสเกิด Dilution สูง ทำให้ ความแข็งเนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็ง มีความแข็งลดลงจากที่ผู้ผลิตลวดเชื่อมกำหนดไว้ เนื่องจากเนื้อเชื่อมออสเทนนิติกแมงกานีสจากชั้นเชื่อมรองพื้น ในสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 5 และ 6 หรือเนื่องจากเนื้อเหล็กกล้า ASTM A572 Gr.65 กรณีไม่เชื่อมรองพื้นก่อน เชื่อมพอกแข็งในสภาวะการทดลองที่ 3, 4, 7 และ 8 หลอมละลายขึ้นมาผสมกับเนื้อ เชื่อมโครเมียมคาร์ไบด์ ขณะแนวเชื่อมหลอมละลายสูง

5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

ในการทดลองเชื่อมพอกแข็งค้อนฉีกอ้อย ในครั้งต่อไปคณะผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการวิจัย 2 แนวทางดังนี้

5.3.1 วิจัยทดลองกำหนด Welding Procedure Specification : WPS ที่เหมาะสม ใช้เชื่อม ช่อมค้อนฉีกอ้อยและติดตั้งใช้งานจริง เพื่อทำการศึกษาและเก็บข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้นในด้าน ความล้าตัว (Fatigue) ความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) เพื่อพัฒนายืดอายุการใช้งาน ค้อนฉีกอ้อยที่ผ่านการเชื่อมซ่อมบำรุง

5.3.2 การเลือกใช้ลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม (Covered Electrode) ที่เหมาะสมมาใช้ในการ ทดลอง ลวดเชื่อมพอกแข็งที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมจะผลิตตามมาตรฐาน DIN 8555 หรือเทียบได้กับ มาตรฐาน AWS A 5.13 จำเป็นต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งที่สามารถทราบส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) และการนำไปใช้งาน Applications) อย่างละเอียด

เอกสารอ้างอิง

1. ยงยุทธ ดุลยกุล, เดช เหมือนขาว และสมยศ กวางตุ้ง, (2555) “ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของการเชื่อมพอกผิววัสดุ เหล็ก AS3678 เกรด 350” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555, p.1169-1174.
2. สุพร ฤทธิภักดี (2554) “พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554, p. 2070-2075.
3. ไพฑูรย์ วชิรวงศ์ภิญโญ งานเชื่อมและงานโลหะแผ่นเบื้องต้น ปีที่พิมพ์ กันยายน 2548
4. มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงคองเหล็กกรุปพรรณด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ.2551
5. ชูชาติ ดั่งวงศ์.การทดสอบงานเชื่อมแบบทำลายสภาพ.พิมพ์ครั้งที่1.กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
6. สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์.โลหะวิทยาเบื้องต้น.กรุงเทพมหานคร:ซีเอ็ดยูเคชั่น,2553.
7. วิลเลียมดีคอลลิสจูนีเยร์ วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน กรุงเทพฯ : ท็อป, 2548
8. AWS B2.1:2005, An American National Standard, Specification for Welding Procedure and Performance Qualification.
9. AWS B2.1/B2.1M-BMG:2009-ADD1, An American National Standard “Base Metal Grouping for Welding Procedure and Performance Qualification.
10. ASTM G65-16: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
11. K.M. Kenchireddy, C.T. Jayadeva, A. Sreenivasan, “Influence of Material Characteristics on The Abrasive Wear Response of Some Hardfacing Alloys, Global Journal Of Engineering Science And Researches (2014), Vol.1 (5), pp. 12-21.
12. F. Franek, E. Badisch, M. Kirchgaßner, Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials, FME Transactions (2009) Vol.37, pp.61-70.
13. A.L.GÓMEZ, C.F.CAÑÓN,D.E. RAMÍREZ, “Hard faced welded tips in shredder hummers: Technique and economical performance.” Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol (2007) Vol.26, p. 1364-1372.
14. J.C. Gutierrez, L.M. León, A. Toro, The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, Wear (2005), Vol. 259, pp. 52–61.

15. S. Aggarwal, Effect of temperature and time on stress relief of steel welds, Engineering, 2015
16. M. F. Buchely, J. C. Gutierrez, L. M. León, and A. Toro, "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys," *Wear*, vol. 259, pp. 52-61, 2005.
17. K. Yang, S. Yu, Y. Li, and C. Li, "Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy," *Applied Surface Science*, vol. 254, pp. 5023-5027, 2008.
18. S. Chatterjee and T. K. Pal, "Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 61-69, 2006.
19. S. Selvi, S. P. Sankaran, and R. Srivatsavan, "Comparative study of hardfacing of valve seat ring using MMAW process," *Journal of Materials*
20. American Society of Mechanical Engineers Section II Volume 2 2015
21. M. Kirchgaßner, E. Badisch, and F. Franek, "Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact," *Wear*, vol. 265, pp. 772-779, 8/25/ 2008
22. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys M.F. Buchely, J.C. Gutierrez, L.M. León, A. Toro *Wear* 259 (2005) 52–61
23. John J. Coronado, Holman F. Caicedo and Adolfo L. Gómez. 2009. The effects of Welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International* 42, 745–749.
24. V.E. Buchanan, P.H. Shipway, D.G. McCartney. 2007. Microstructure and abrasive wear Behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear* 263 (2007) 99–110.

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค SEM-EDS

สภาวะที่ 1

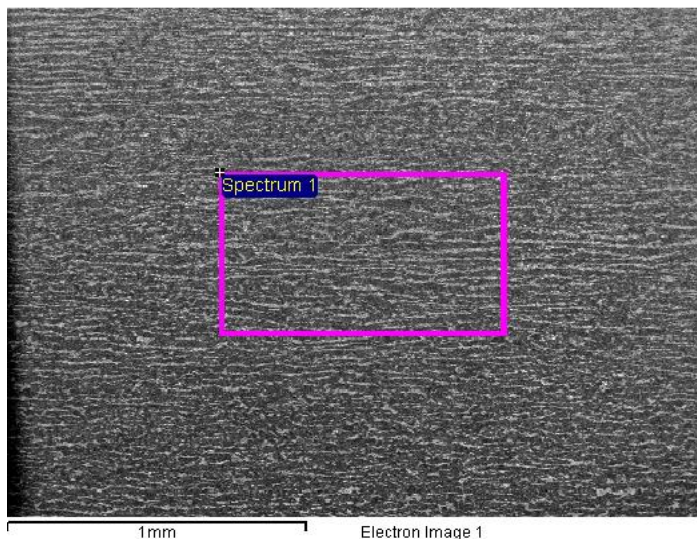
สภาวะที่ 1-BASE

12/22/2017 10:28:16 AM

Spectrum processing :
Peaks possibly omitted : 0.240,
7.830 keV

Processing option : All elements
analyzed (Normalised)
Number of iterations = 1

Standard :
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

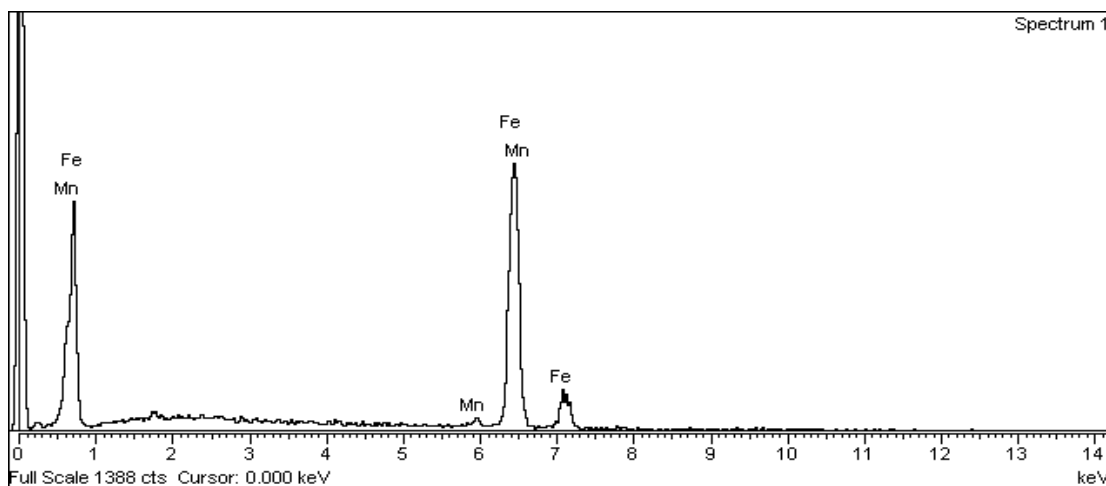


Element	Weight%	Atomic%
Mn K	2.35	2.39
Fe K	97.65	97.61
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1
Collected : 22-Dec-2017 10:25 AM
Livetime (s) : 60.00
Real time (s) : 63.59
Detector : Silicon
Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0
Elevation (deg) : 35.0
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 50 X
Accelerating voltage (kV) : 15.00
Process time : 5



สภาวะที่ 1 BUFFER+HAZ

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.750, 9.760 keV

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations = 2

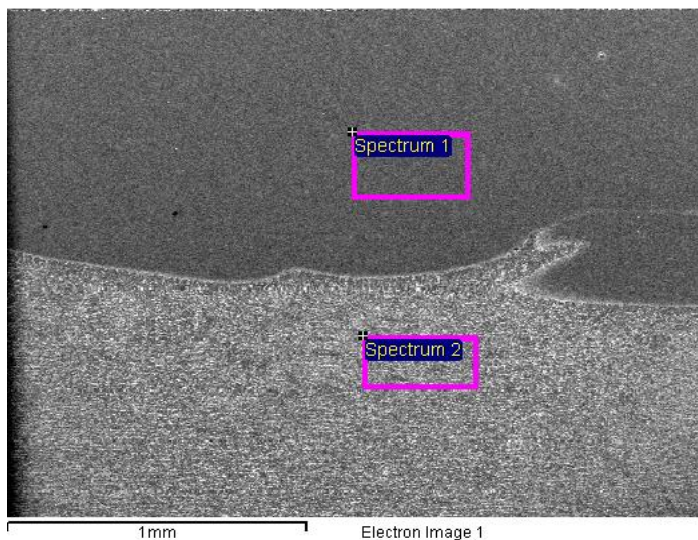
Standard :

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	Weight%	Atomic%
Cr K	16.66	17.73
Mn K	3.43	3.46
Fe K	72.62	71.95
Ni K	7.28	6.87
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1

Collected : 22-Dec-2017 10:17 AM

Livetime (s) : 60.00

Real time (s) : 64.05

Detector : Silicon

Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0

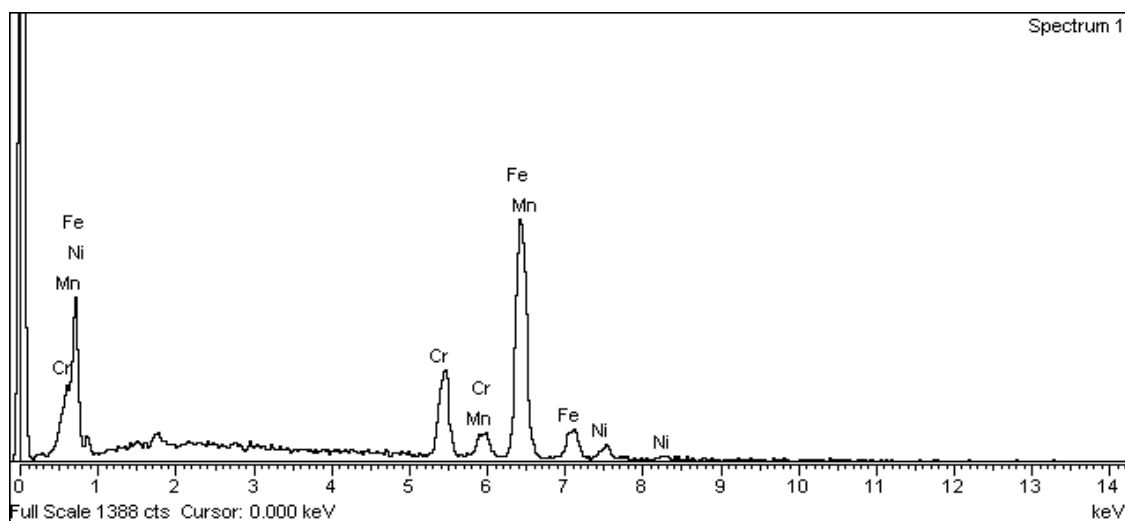
Elevation (deg) : 35.0

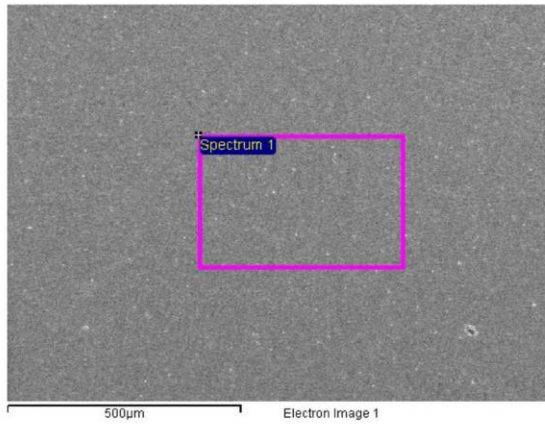
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 50 X

Accelerating voltage (kV) : 15.00

Process time : 5





Label : Spectrum 1
 Collected : 22-Dec-2017 10:14 AM
 Livetime (s) : 60.01
 Real time (s) : 63.62
 Detector : Silicon
 Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0
 Elevation (deg) : 35.0
 Azimuth (deg) : 0.0

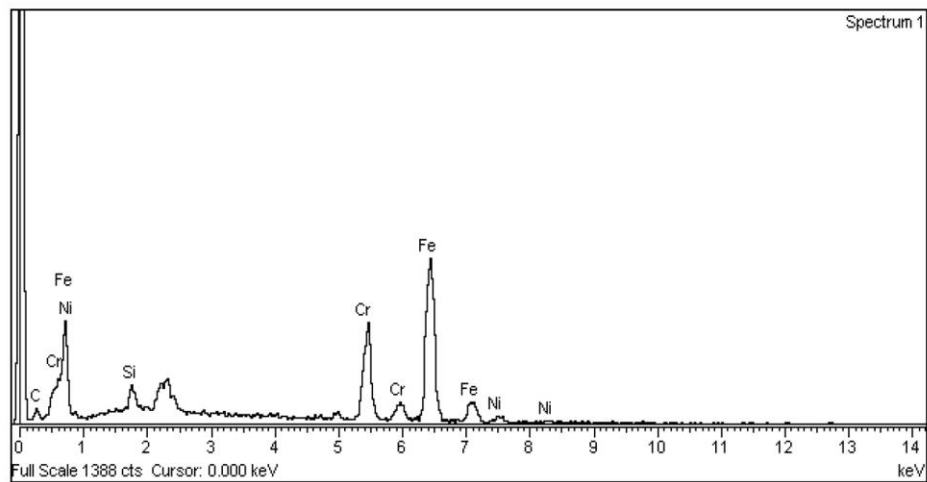
Magnification : 100 X
 Accelerating voltage (kV) : 15.00
 Process time : 5

Spectrum processing :
 Peaks possibly omitted : 2.189, 2.310 keV

Processing option : All elements analyzed
 (Normalised)
 Number of iterations = 3

Standard :
 C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	5.60	21.05
Si K	1.89	3.04
Cr K	22.07	19.16
Fe K	66.27	53.56
Ni K	4.16	3.20
Totals	100.00	

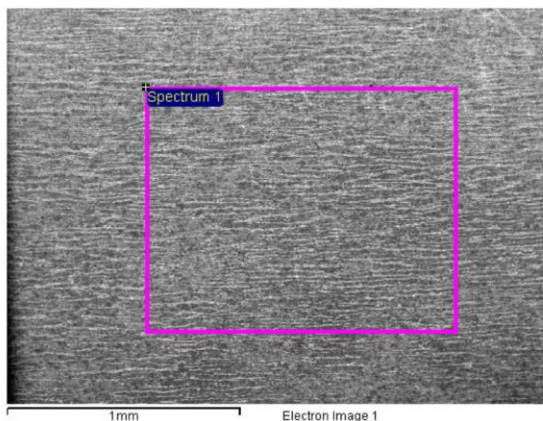


Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

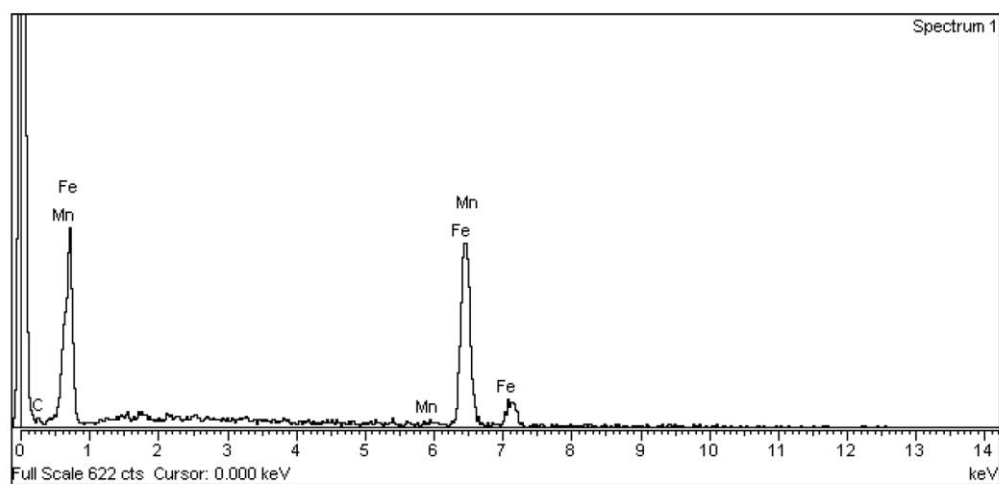
Element	Weight%	Atomic%
C K	5.75	22.10
Mn K	1.95	1.64
Fe K	92.30	76.26
Totals	100.00	

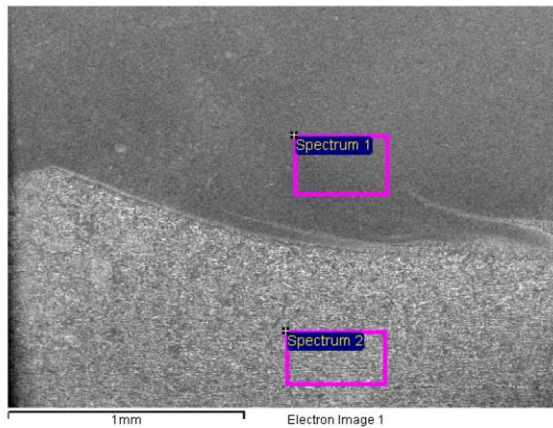


Label : Spectrum 1
Collected : 9-Jan-2018 11:08 AM
Livetime (s) : 60.00
Real time (s) : 62.12
Detector : Silicon
Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0
Elevation (deg) : 35.0
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 50 X
Accelerating voltage (kV) : 15.00
Process time : 5





Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :

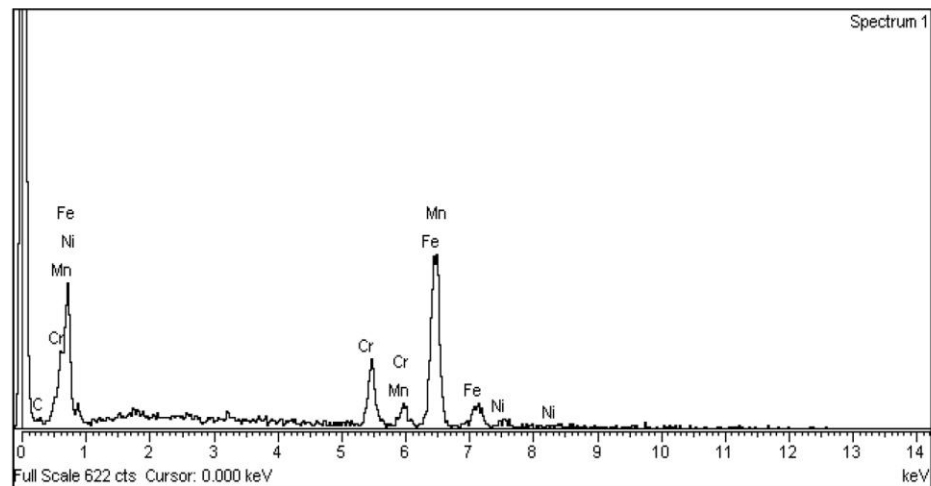
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

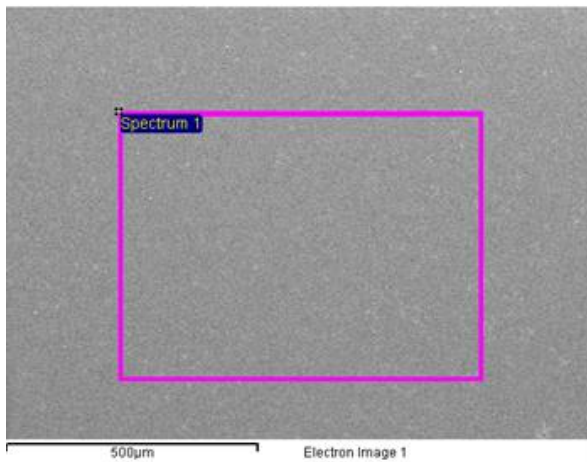
Element	Weight%	Atomic%
C K	5.73	21.86
Cr K	17.00	14.99
Mn K	5.17	4.31
Fe K	63.78	52.35
Ni K	8.32	6.50
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1
Collected : 9-Jan-2018 11:02 AM
Livetime (s) : 60.00
Real time (s) : 62.35
Detector : Silicon
Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0
Elevation (deg) : 35.0
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 50 X
Accelerating voltage (kV) : 15.00
Process time : 5





Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 10:55 AM

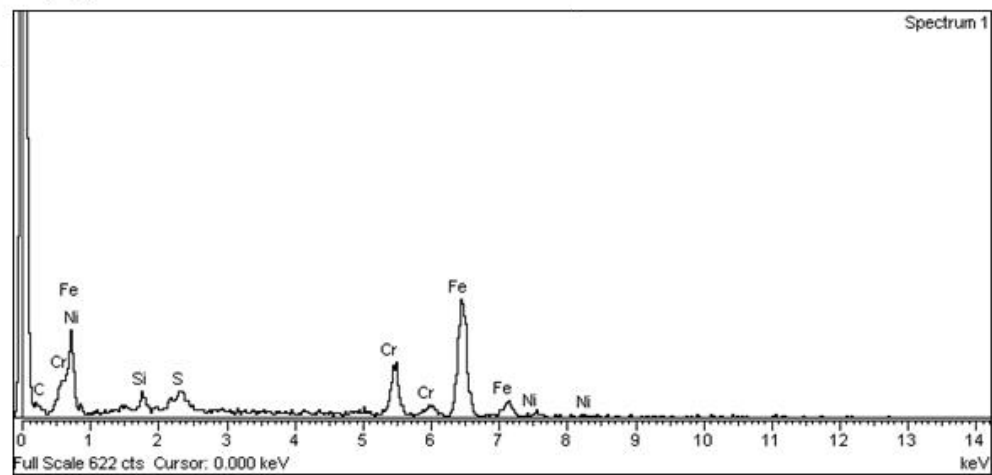
Livetime(s): 60.02

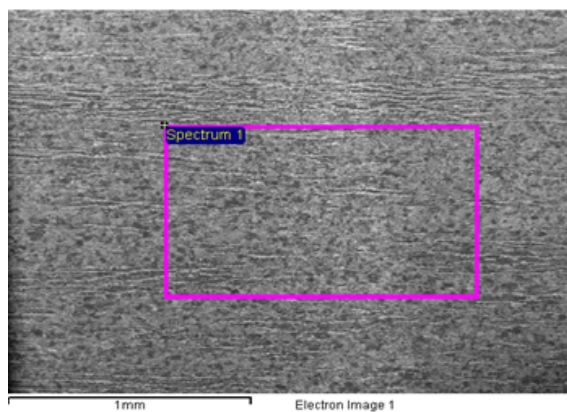
Real time(s): 62.13

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations=2

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 02:24 PM

Livetime(s): 60.02

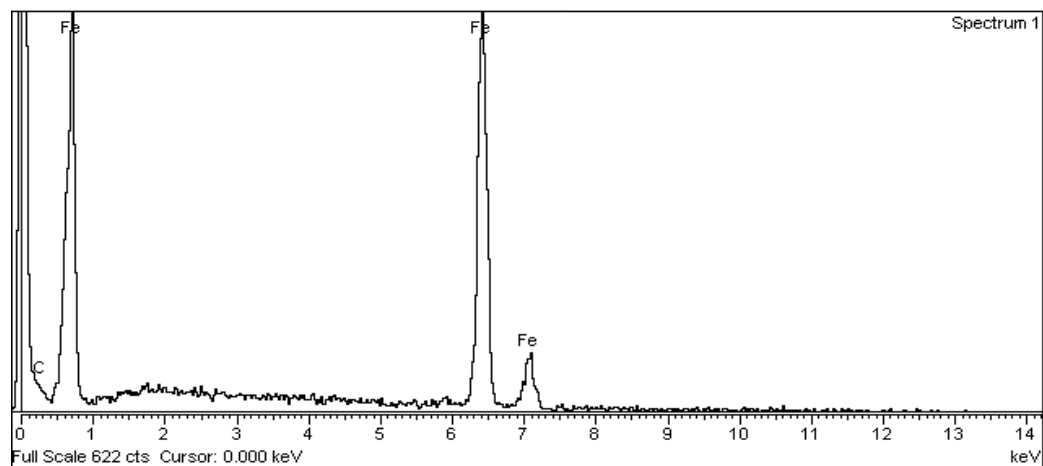
Real time(s): 63.01

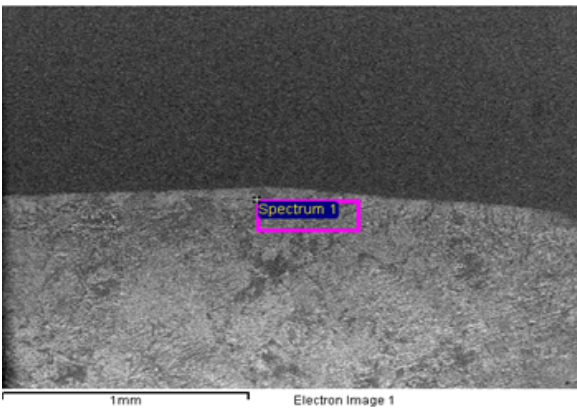
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations= 2

Standard:

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 02:21 PM

Livetime(s): 60.00

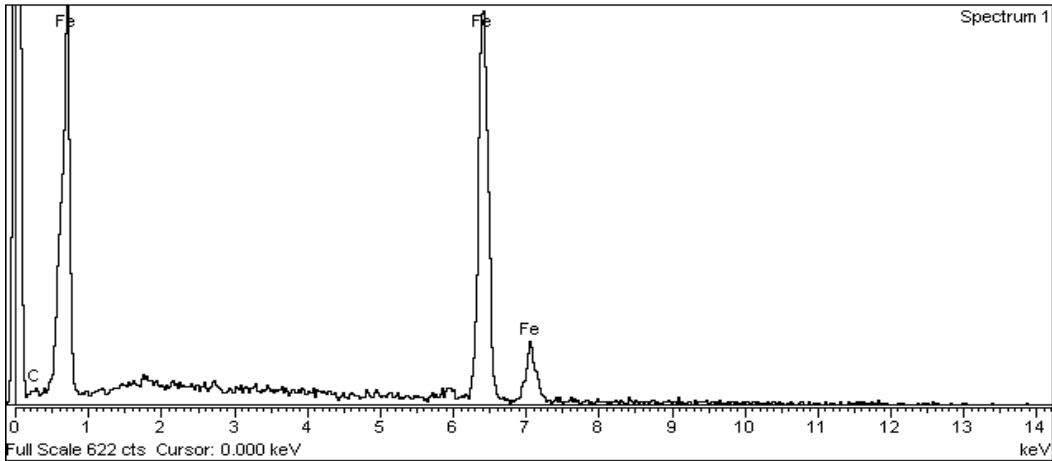
Realtime(s): 62.99

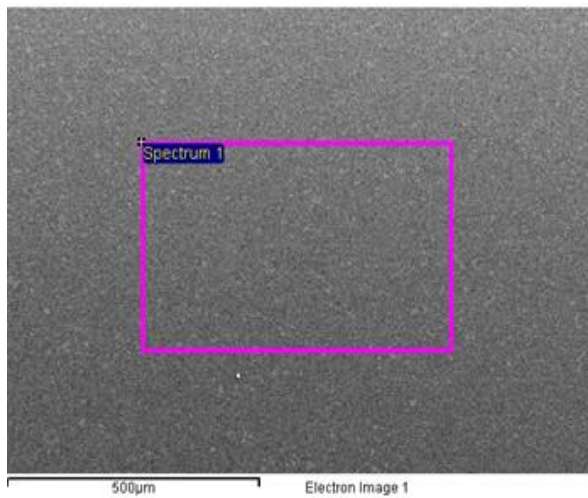
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 02:16 PM

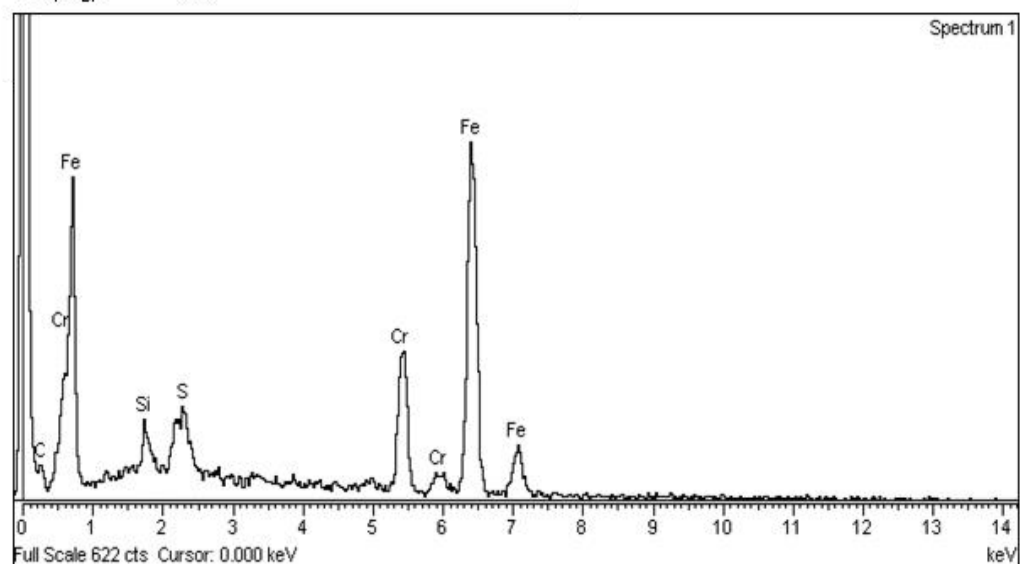
Livetime(s): 60.01

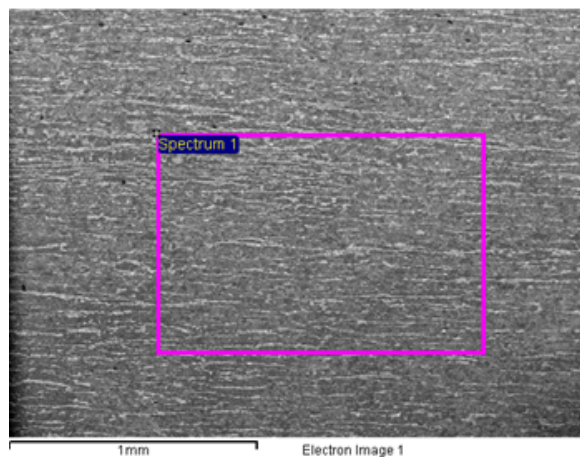
Realtime(s): 63.17

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations= 2

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 11:41 AM

Livetime(s): 60.00

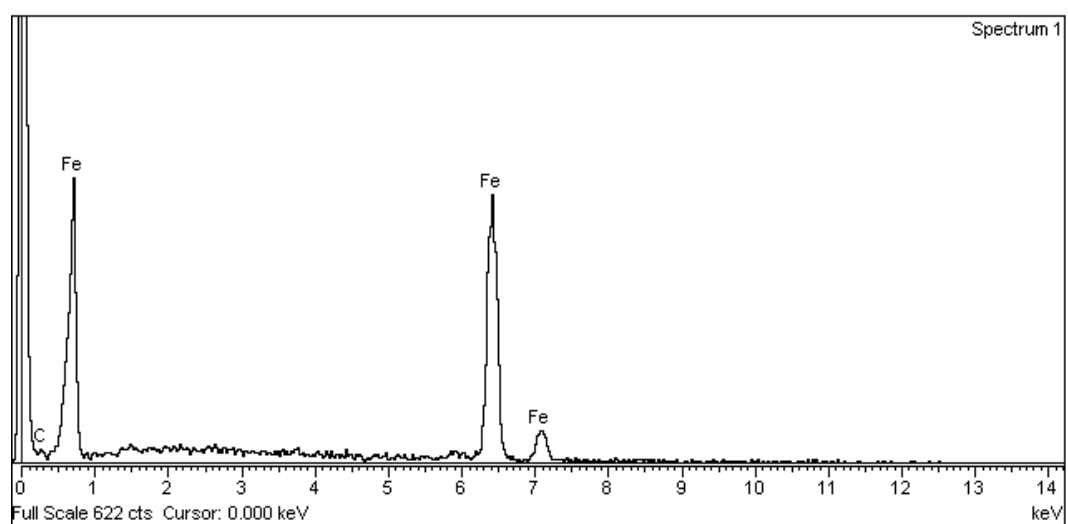
Real time(s): 62.28

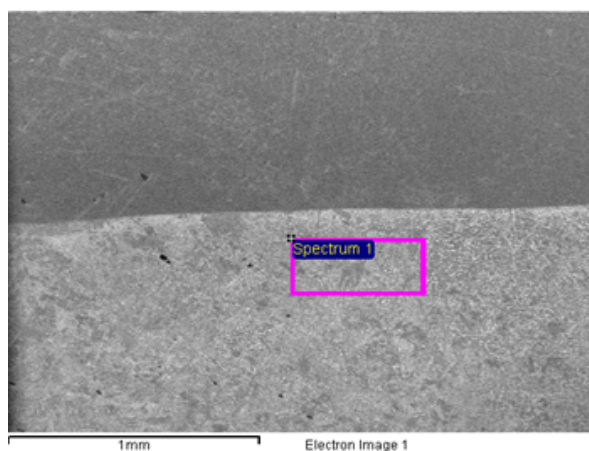
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations= 2

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 11:37 AM

Livetime(s): 60.00

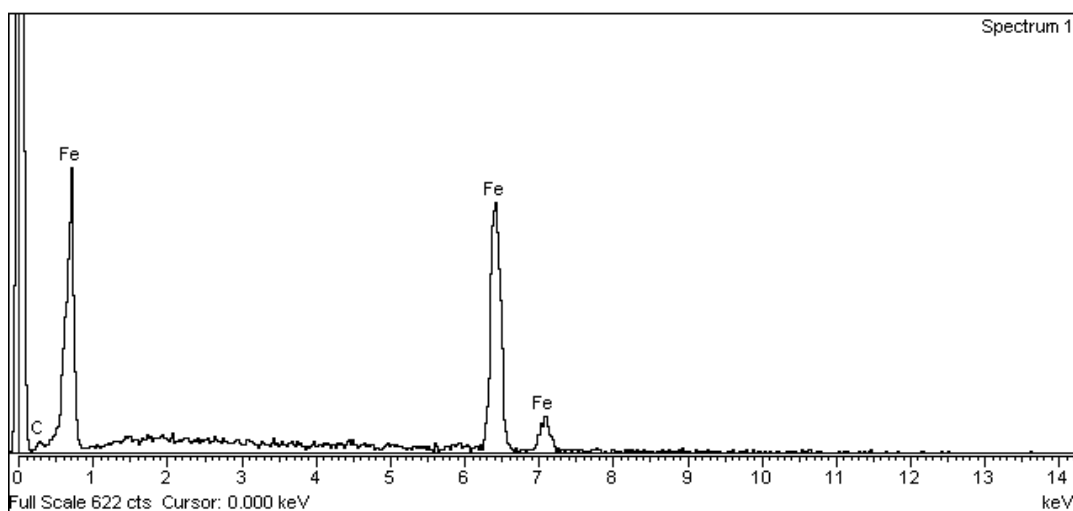
Realtime(s): 62.36

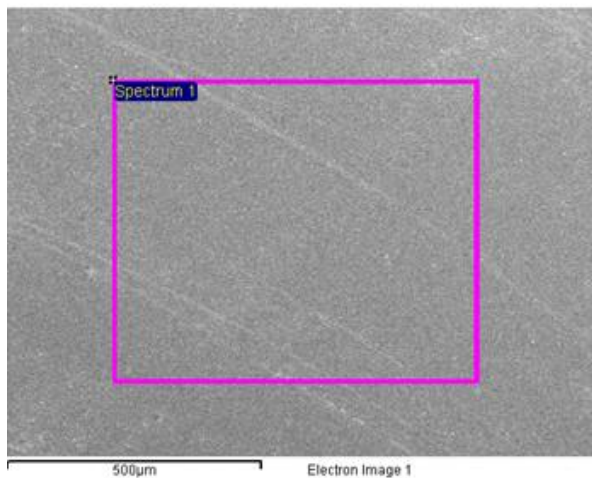
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 11:32 AM

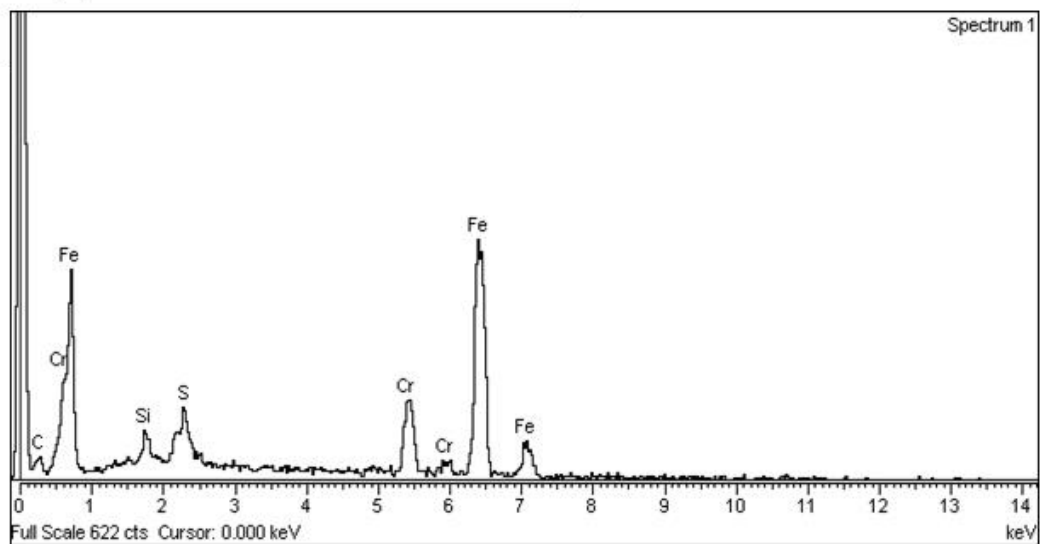
Livetime(s): 60.00

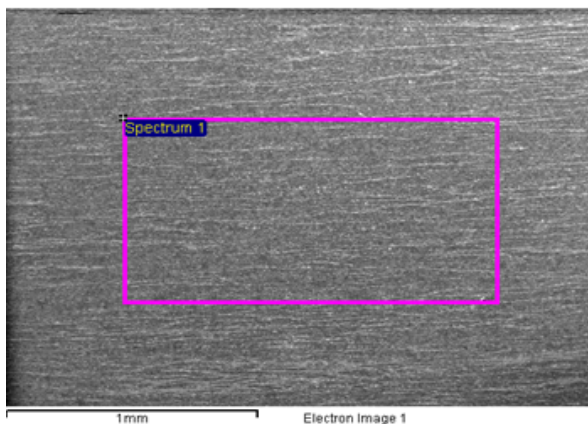
Real time(s): 62.51

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0





Spectrum processing:

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations= 3

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
---------	---------	---------

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 01:24 PM

Livetime(s): 59.99

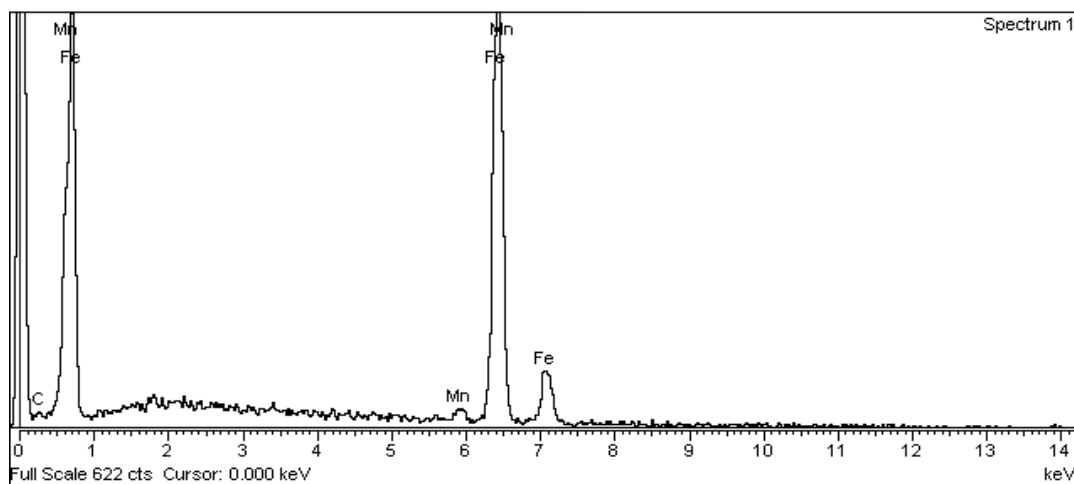
Realtime(s): 63.00

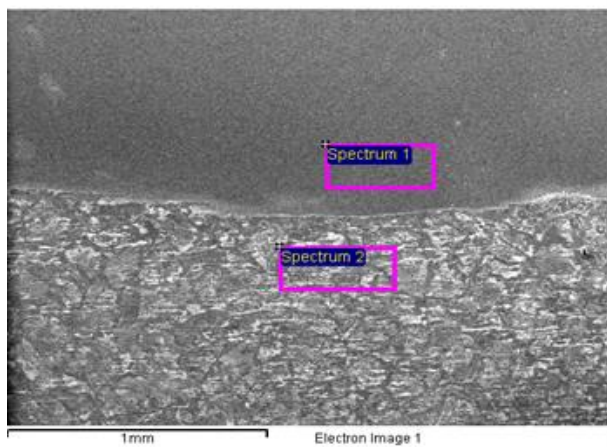
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 01:18 PM

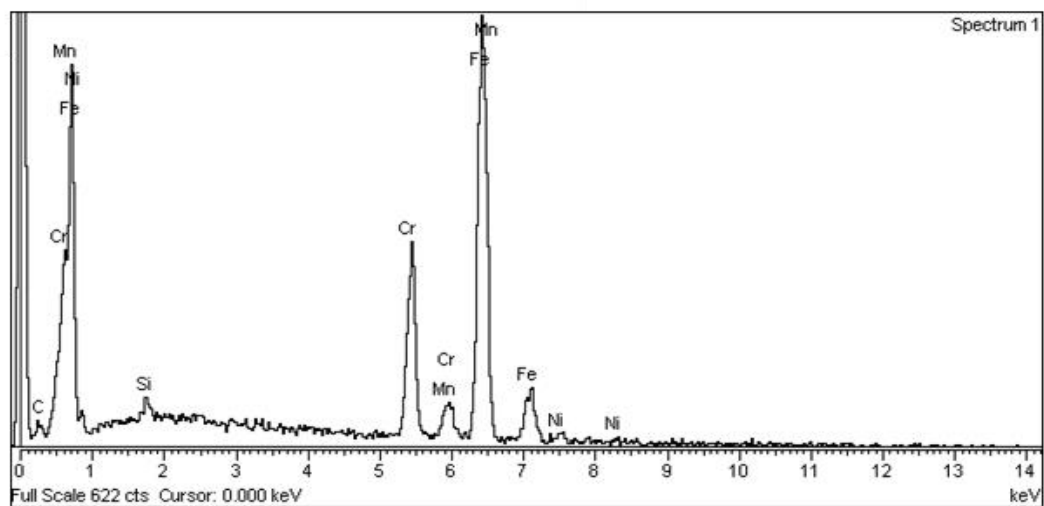
Livetime(s): 60.00

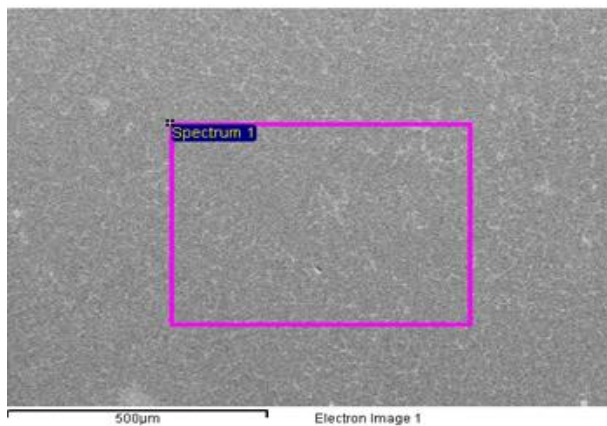
Realtime(s): 63.22

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0





Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 01:11 PM

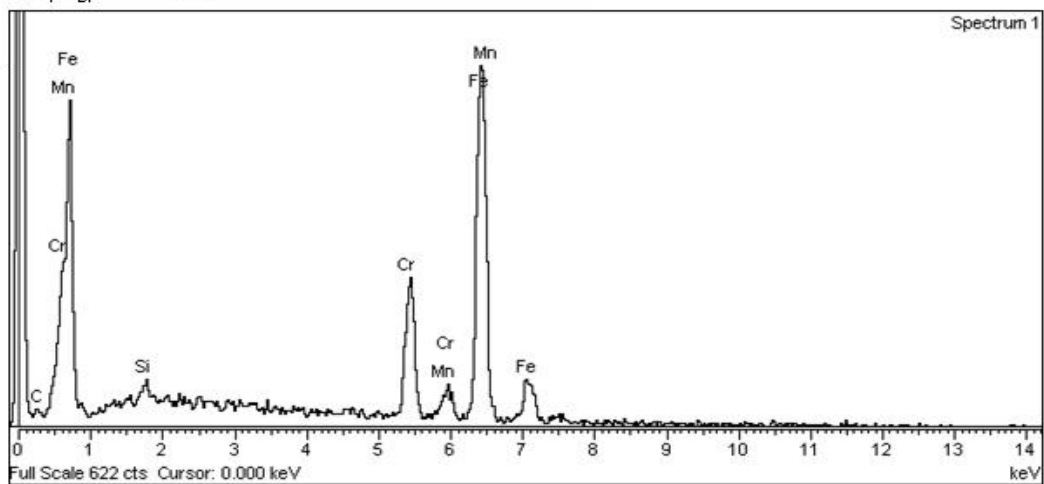
Livetime(s): 59.99

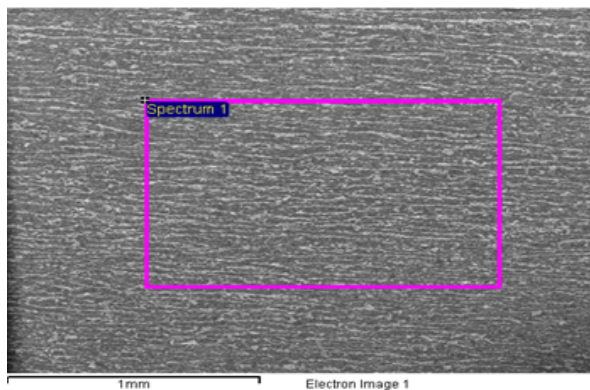
Realtime(s): 63.11

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations= 2

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 01:54 PM

Livetime(s): 59.99

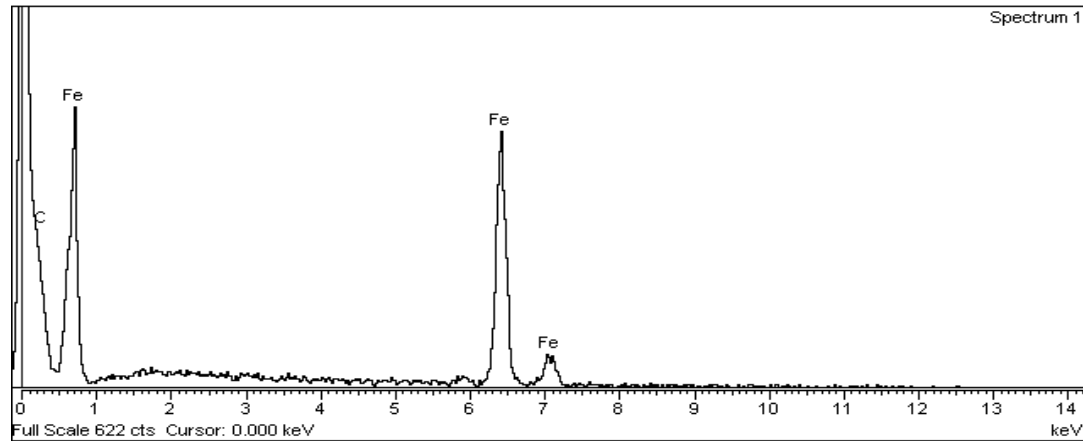
Real time(s): 62.80

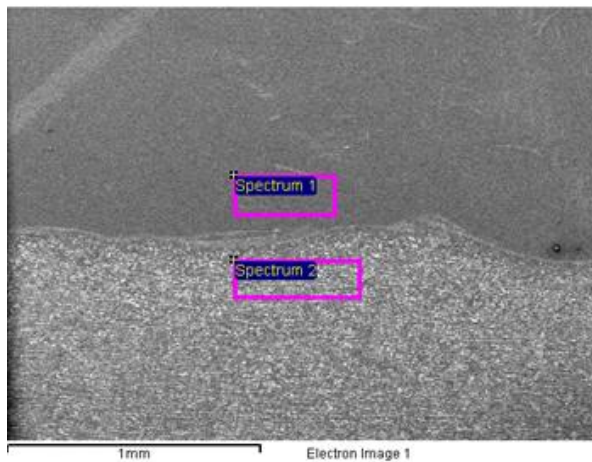
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 01:49 PM

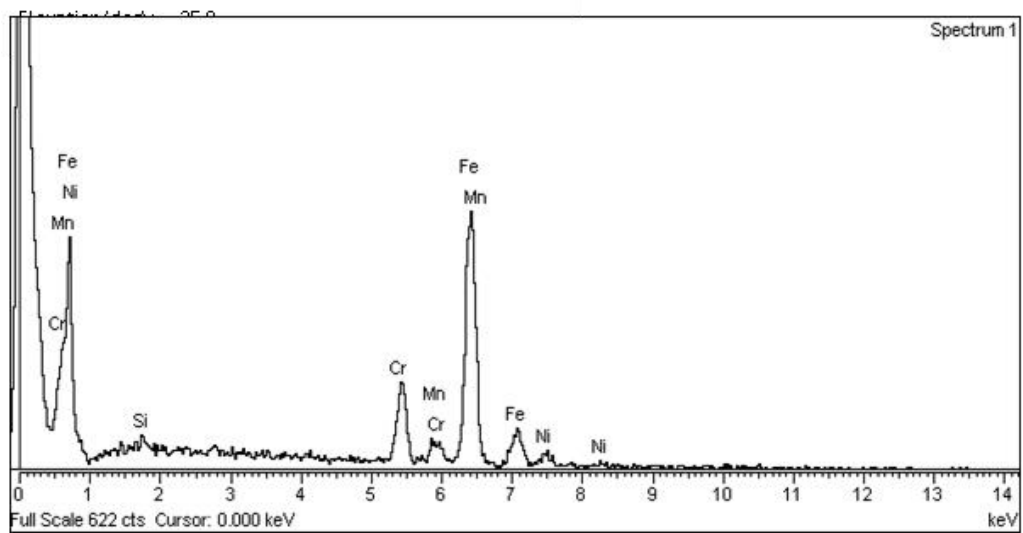
Livetime(s): 60.00

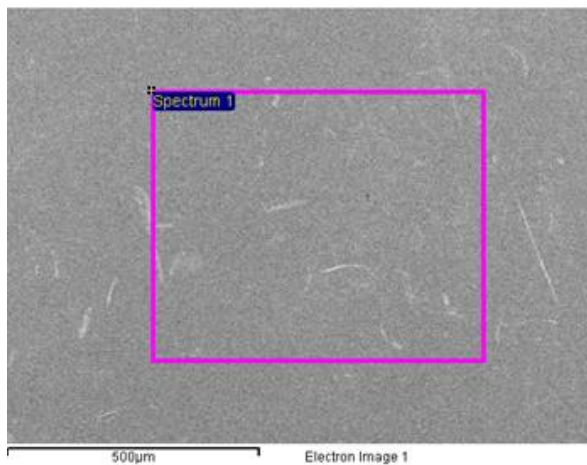
Realtime(s): 63.50

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0





Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 01:41 PM

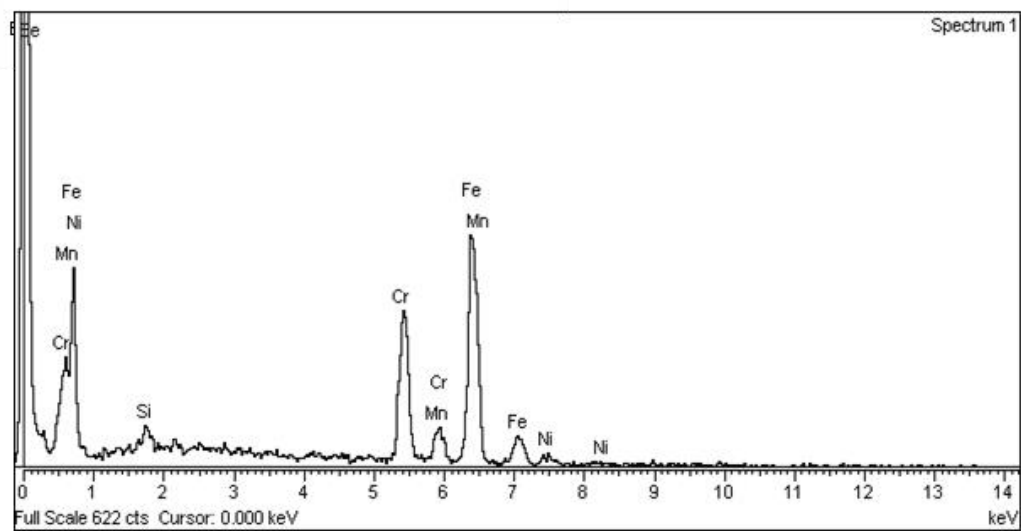
Livetime(s): 59.98

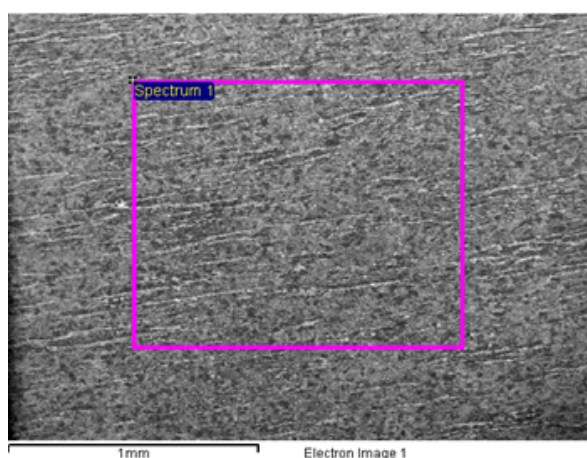
Realtime(s): 62.63

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0





Spectrum processing:

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations=2

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
---------	---------	---------

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 02:37 PM

Livetime(s): 60.00

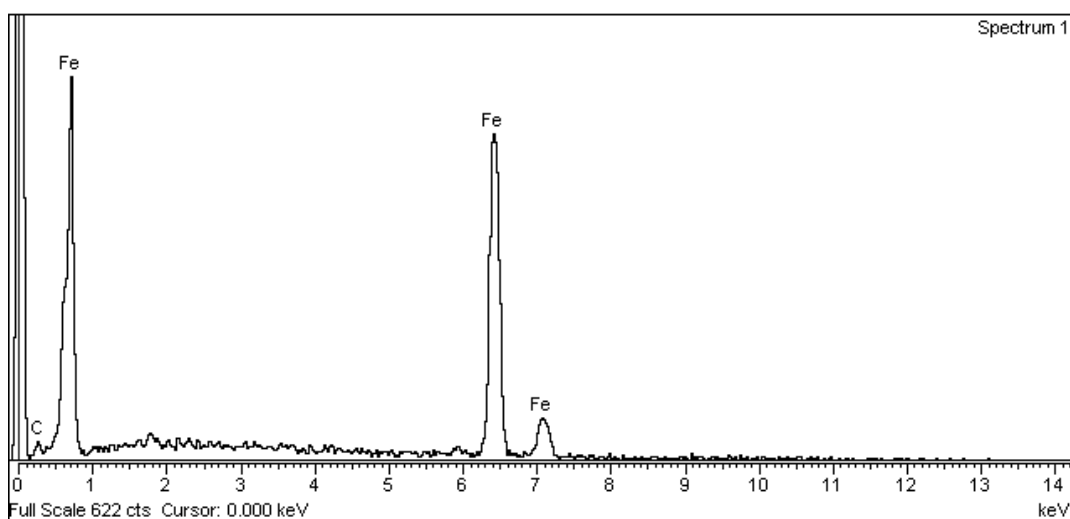
Realtime(s): 62.59

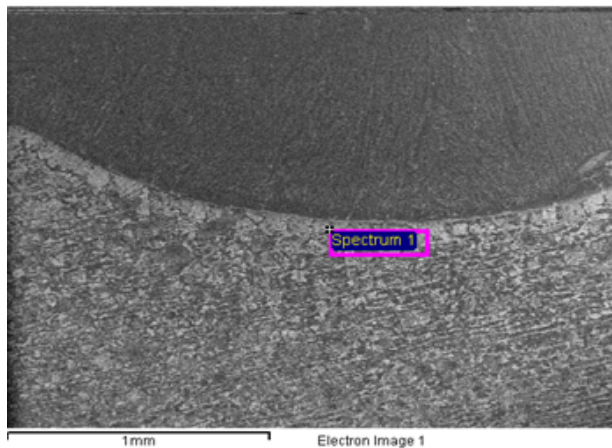
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations=3

Standard:

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
---------	---------	---------

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 02:35 PM

Livetime(s): 60.00

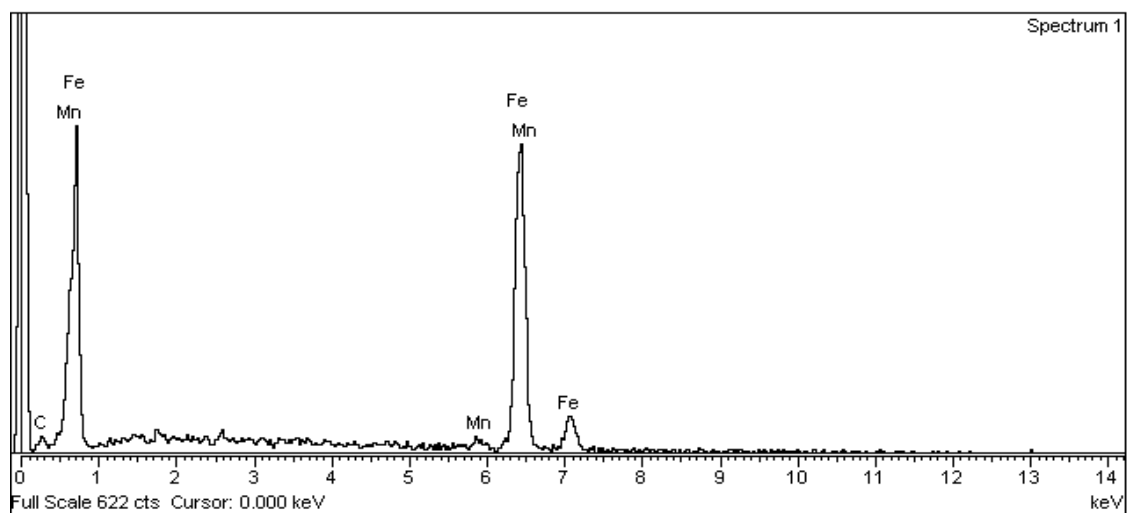
Real time(s): 62.48

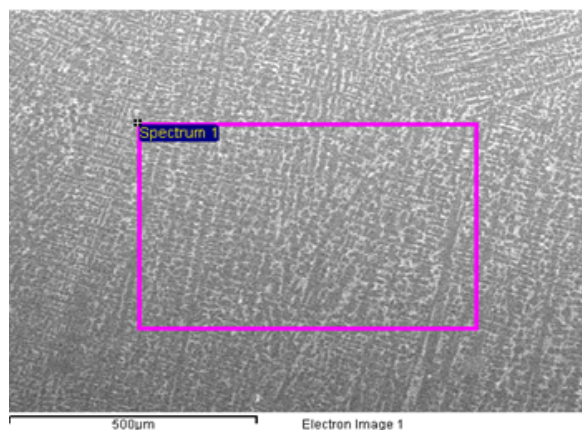
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations= 3

Standard :

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 02:31 PM

Livetime(s): 60.01

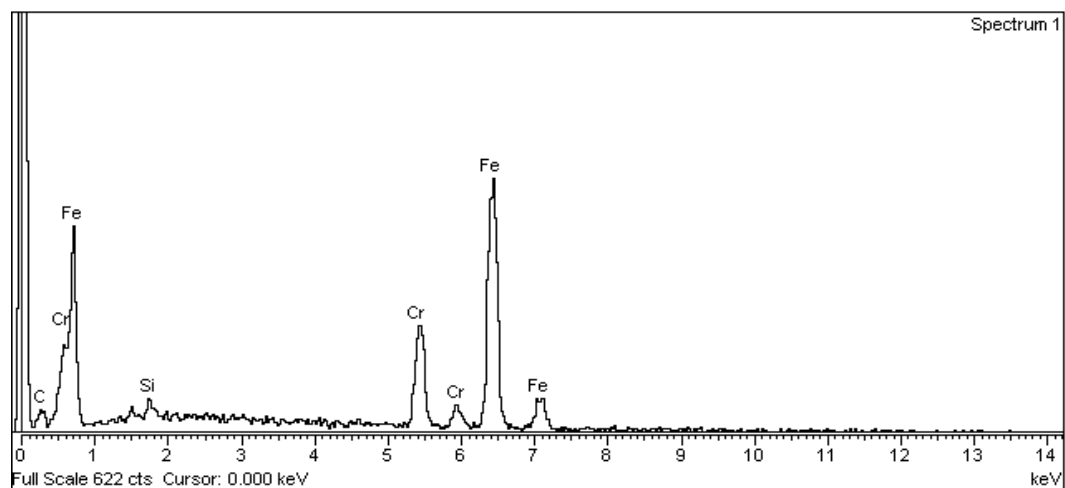
Real time(s): 62.65

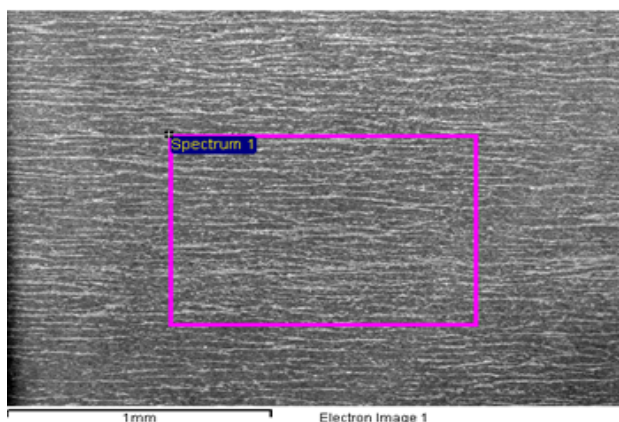
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Spectrum processing:

No peaks omitted

Processing option: All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations=3

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
---------	---------	---------

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 11:25 AM

Livetime(s): 60.01

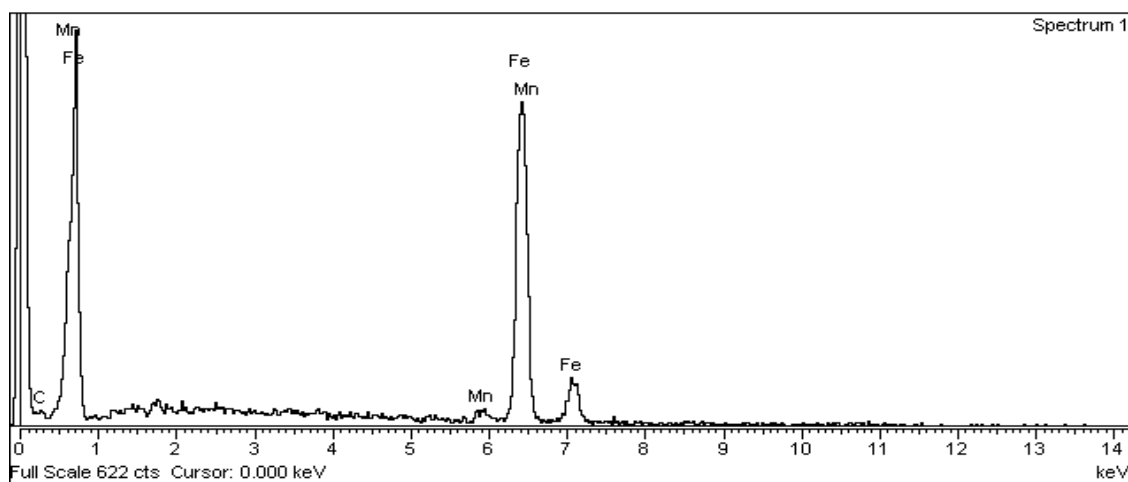
Realtime(s): 62.67

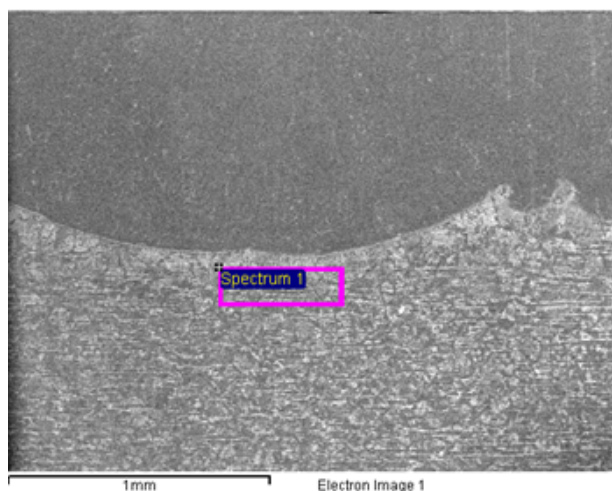
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations= 2

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 11:21 AM

Livetime(s): 60.00

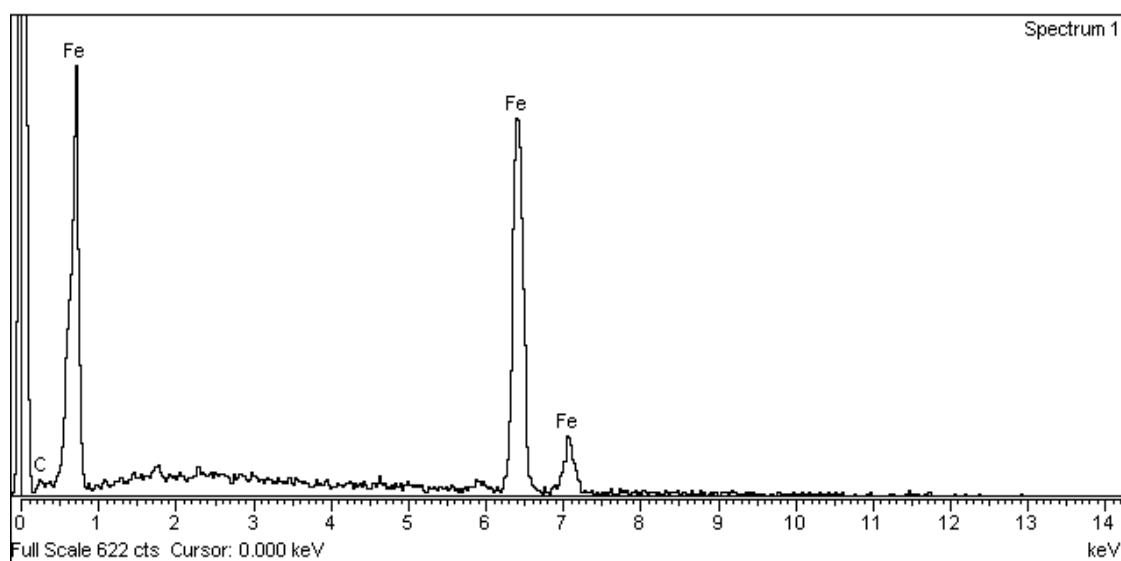
Realtime(s): 62.75

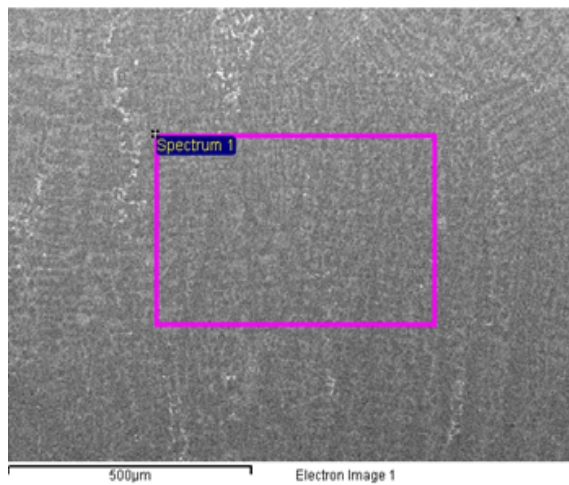
Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0





Spectrum processing:

No peaks omitted

Processing option: All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations=3

Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Label: Spectrum1

Collected: 9-Jan-2018 11:17 AM

Livetime(s): 60.01

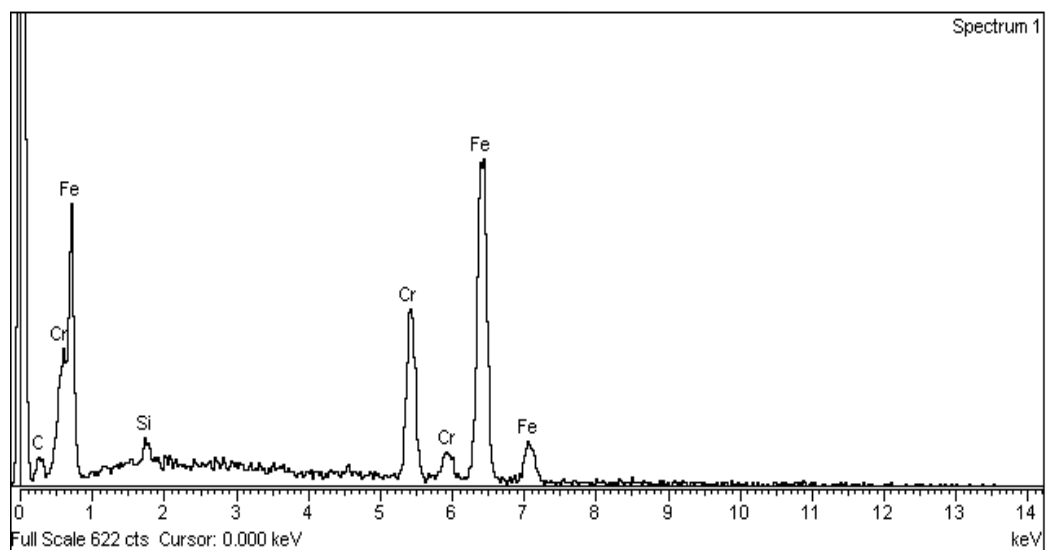
Realtime(s): 62.96

Detector: Silicon

Window: SATW

Tilt(deg): 0.0

Elevation(deg): 35.0



ภาคผนวก ข.

รายชื่อผู้เข้าอบรมสัมมนา

โครงการวิจัย การพัฒนาคือนฉีกอ้อยที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วย
เทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม



King Mongkut's University of Technology North Bangkok
SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800
Tel. +66 2 555-2000 Ext. 1512-13



รายชื่อผู้เข้ารับการอบรม

โครงการวิจัย เรื่อง “การพัฒนาคอนกรีตอัดฉีดที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม”

วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-16.00 น.

สถานที่ ณ ห้องอบรม โรงแรมปรีณัฐ กรุงเทพมหานคร

No.	ชื่อ - นามสกุล (Name)	ลายมือชื่อ (Signature)	โทรศัพท์ (Telephone)	หมายเหตุ (Remark)
		17 กรกฎาคม 2561		
1.	นายรัชย์ สกฤตสมบัติ	รัชย์ สกฤตสมบัติ		
2.	นายปิยะกร บุญรินทร์	ปิยะกร บุญรินทร์	092-6401446	
3.	นายกันตภพ บุญสม	กันตภพ บุญสม	093-6242133	
4.	นายพงศกร กวินกุลชาติ	พงศกร กวินกุลชาติ	089-9820651	
5.	นายปิยะ วงศ์อินทร์	ปิยะ	085-3887003	K&N
6.	นายมนูญ เพ็ญสูงเนิน	มนูญ	086-5756900	K&N
7.	นายกรณ์วัฒน์ ศุภชัยภัทรดิษฐ์	กรณ์วัฒน์		K&N
8.	นายวันชัย แก้วฉลาด	วันชัย		
9.	นายคานวน ระรื่น	คานวน		
10.	นายพรพล เพิ่มศรีสุข	พรพล	091 006 2818	นักวิชาการ
11.	นายสฤกษ์ จันทระประทีป	สฤกษ์	090 896 6537	นักวิชาการ
12.	นายธนเดช หาญธนพงศ์	ธนเดช	089 8900471	นักวิชาการ



King Mongkut's University of Technology North Bangkok
SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800
Tel. +66 2 555-2000 Ext. 1512-13



รายชื่อผู้เข้ารับการอบรม

โครงการวิจัย เรื่อง “การพัฒนาค้อนนิกอ้อยที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม”

วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-16.00 น.

สถานที่ ณ ห้องอบรม โรงแรมปรินซ์ตัน กรุงเทพฯ

No.	ชื่อ - นามสกุล (Name)	ลายมือชื่อ (Signature)	โทรศัพท์ (Telephone)	หมายเหตุ (Remark)
		17 กรกฎาคม 2561		
13.	นายเสริมศักดิ์ สมบัติ		0818535145	สว.ว.ว.ว.
14.	นายจักรพรรดิ ดีแสน		080 783 850	สว.ว.ว.ว.
15.	นายชูชาติ ตัวสงค์		081-5442547	ฟร.
16.	รองศาสตราจารย์ดร.นิตยา ยิ่งสัมพันธ์เจริญ		188-267-1220	สว.ว.
17.	ดร.นครินทร์ ศรีสุวรรณ		0892277585	สว.พ.
18.	ดร.อรรถพล แก้ววิลัย		095 4496649	สว.พ.
19.	นายเอกรัตน์ สุวรรณเพชร		089 4600330	KTIS
20.	นายสรวิทย์ บุตรเมฆ		0628219534	KTIS
21.	นายสมศักดิ์ ศรีสวัสดิ์		092032650	KTIS
22.	นายปริญญา บุญสา		0866556095	สว.พ.
23.	นายกรวิชัย อ่างบุญตา		0952167198	สว.พ.
24.	นายโอฬาร วิเวก		062-6359944	สว.พ.



King Mongkut's University of Technology North Bangkok
SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800
Tel. +66 2 555-2000 Ext. 1512-13



รายชื่อผู้เข้าร่วมการอบรม

โครงการวิจัย เรื่อง “การพัฒนาคอนดิชั่นย่อยที่มีสมบัติด้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม”

วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-16.00 น.

สถานที่ ณ ห้องอบรม โรงแรมปรีณัฐ กรุงเทพมหานคร

No.	ชื่อ - นามสกุล (Name)	ลายมือชื่อ (Signature)	โทรศัพท์ (Telephone)	หมายเหตุ (Remark)
		17 กรกฎาคม 2561		
25.	น.ส.นัฐลินี ปัญโญ	นัฐลินี		มจพ
26.	นายเตชิน กลิ่นซ้อน	เตชิน		มจพ.
27.	นายวิวัฒน์ นิยมรัตน์	วิวัฒน์		มจพ
28.	นายเผ่าภาคิน ว่องสวัสดิ์	เผ่าภาคิน		มจพ
29.	นายอลงกรณ์ กิริติชวัลกุล	อลงกรณ์		มจพ
30.	นายเกษมศิษฐ์ อภินรเศรษฐ์	เกษมศิษฐ์	1813114566	นท. 17 ก.ค. 61
31.	นายสุพัฒน์ คามบุตร	สุพัฒน์		นท. 17 ก.ค. 61
32.	นายสมพงษ์ เกียะขุนทด	สมพงษ์		มจพ
33.	นายสมภพ มณีวรรณ	สมภพ		นท. 17 ก.ค. 61
34.	ดร.ชญานี ทิพย์เสมอ	ชญานี		มจพ
35.	ดร.ธรรมนุญ ทวีชัย	ธรรมนุญ		นท. 17 ก.ค. 61
36.	น.ส.ลักขมัย อังกรรัชต์	ลักขมัย		มจพ.
37.	คุณเจตนาพงศ์ พาโลมัส	เจตนาพงศ์		มจพ.



King Mongkut's University of Technology North Bangkok
SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800
Tel. +66 2 555-2000 Ext. 1512-13



รายชื่อผู้เข้าร่วมอบรม

โครงการวิจัย เรื่อง “การพัฒนาคอนกรีตอัดฉีดที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม”

วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-16.00 น.

สถานที่ ณ ห้องอบรม โรงแรมปรีณัฐ กรุงเทพมหานคร

No.	ชื่อ - นามสกุล (Name)	ลายมือชื่อ (Signature)	โทรศัพท์ (Telephone)	หมายเหตุ (Remark)
		17 กรกฎาคม 2561		
38.	นายรุ่งโรจน์ เหลืองประสาทร			ม.จ.ม.
39.	นายกษิตเดช ศรีช่วย		090-7246385	ม.จ.พ.
40.	นายหนึ่งฤทัย คำศรี			ม.จ.พ.
41.	นายพชรพล ศิลาคุปต์		083-3555089	ลจจ.
42.	นายจุฑารัตน์ สีดางาม		093-7111721	ม.จ.พ.
43.	นายปฐมพร พึ่งเหยี่ยว			ม.จ.พ.
44.	นายสุวบุญ ปาดอน			
45.	นายภัทรพล ขุดินันธนกุล		097-227-8989	ม.จ.พ.
46.	นายเกษมศิษฐ์ อภินรเศรษฐ์			ม.ว.ค.ต.ม.ว.ค.
47.	นายสุพัฒน์ คามบุตร			
48.	นายสมพงษ์ เกียะขุนทด			
49.	นายสมภาพ มณีวรรณ			ม.จ.พ.
50.	น.ส.ณัฏฐนิชา อินทร์จันทร์			ม.จ.พ.



King Mongkut's University of Technology North Bangkok
SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800
Tel. +66 2 555-2000 Ext. 1512-13



รายชื่อผู้เข้ารับการอบรม

โครงการวิจัย เรื่อง “การพัฒนาคือนิกออยที่มีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อมและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อม”

วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-16.00 น.

สถานที่ ณ ห้องอบรม โรงแรมปรีณัฐ กรุงเทพมหานคร

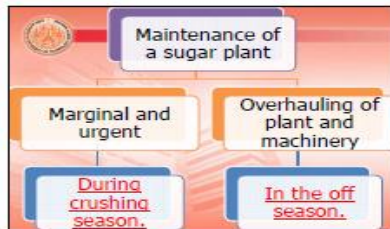
No.	ชื่อ - นามสกุล (Name)	ลายมือชื่อ (Signature)	โทรศัพท์ (Telephone)	หมายเหตุ (Remark)
		17 กรกฎาคม 2561		
51.	อรรถพร ทวีใจ		036-2174360	อ. ตรี อรรถพร ทวีใจ
52.	จิราธิปไตย แฟง			ผอ.ฟ
53.	วิศิษฐ์ อดุลย์สิน			อ.วิศิษฐ์
54.	นิพนธ์ มานะธรรม			ผอ.นิพนธ์
55.	เมธีธร วัฒน			อ.เมธี
56.	ประเสริฐ ภูมิไธ			ผอ.พ.
57.				
58.				
59.				
60.				
61.				
62.				
63.				

ภาคผนวก ค.

เอกสารการจัดอบรมเพื่อถ่ายทอดความรู้และประชาสัมพันธ์



Sugar Industries
is one of the
world's leading
agro-industries.



Purchase Qty. / Reference FOB Price	
1	100-999 kg US \$8
2	1,000-9,999 kg US \$7.8
3	10,000-19,999 kg US \$7.5
4	20,000+ kg US \$6.8

Sugar Machinery Parts Fibrizor Hammers Tips

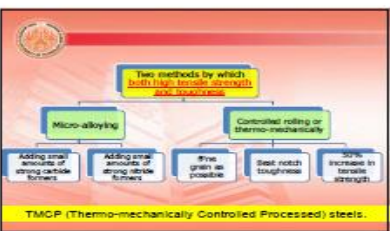
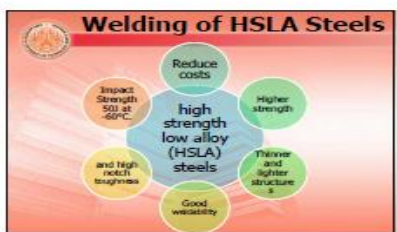
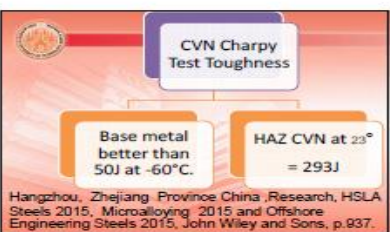




วัสดุทำค้อนฉีกอ้อย (Material)

เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy Steel : HSLA)

เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง ASTM A572 Grade 65								
Grade	ธาตุผสมสูงสุด [The Element Max (%)]							
	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Co
A572 Grade 65	0.23	0.4	1.35	0.04	0.05	0.06	0.015	0.05





ค่าสมมูลคาร์บอน (Carbon Equivalent : CE)

ทำนายโครงสร้าง HAZ การเชื่อม ที่จะเกิดขึ้น

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Mn + \%Si}{6} \right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right)$$

$$CE = 0.23 + \left(\frac{1.35 + 0.4}{6} \right) + \left(\frac{0 + 0 + 0.06}{5} \right) + \left(\frac{0 + 0.015}{15} \right)$$

ค่าสมมูลคาร์บอน (CE) = **0.533**

ที่มา : American Welding Society (AWS), 2010.

สมการที่ใช้คำนวณค่าอุณหภูมิให้ความร้อนก่อนการเชื่อมเพื่อป้องกันการแตกร้าวคือ

$$T_{PH} = 450^{\circ}\text{C} \sqrt{CE} - 0.42$$

แทนค่า

$$= 450 \sqrt{0.533} - 0.42$$

$$= 151.26 \approx 150^{\circ}\text{C}$$

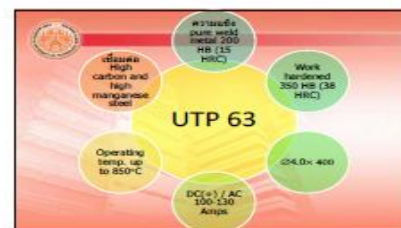
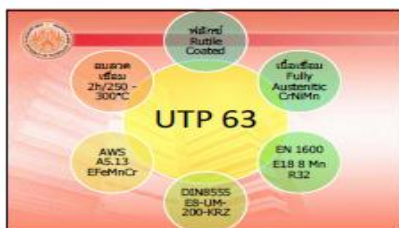
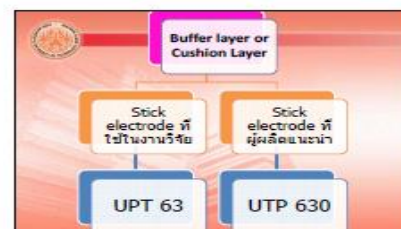

- วัตถุประสงค์หลัก Preheat งานเชื่อม**
- 1 ป้องกันการขยายตัวไม่สมดุลบริเวณเชื่อม
 - 2 ป้องกันการขยายตัวไม่สมดุลบริเวณเชื่อม
 - 3 ไม่ความชื้น / คราบน้ำมันไฮโดรคาร์บอน / H₂
 - 4 ลดความเค้นตกค้างจากการเชื่อม

ค่า CE	ความสามารถในการเชื่อมได้ (Weldability)
ต่ำสุดถึง 0.35	ดีเลิศ (Excellent) ต่ำเยี่ยม ไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคพิเศษ
0.36-0.40	ดีมาก (Very good) มีโอกาสเกิดแนวโครงสร้างมาร์เทนไซต์บริเวณผลกระทบความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ควรเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำและต้องอบลวดเชื่อมก่อนทำการเชื่อม
0.41-0.45	ดี (Good) โอกาสเกิดการแตกร้าวสูง ต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อม 150°ซ.
0.46-0.50	พอใช้ (Fair) โอกาสเกิดการแตกร้าวสูง ต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม >150°ซ. ถึง 400°ซ.
Over 0.50	เลว (Poor) ต้อง Preheat ก่อนเชื่อม >200°ซ. และควร Postheat หลังการเชื่อม

- Post Weld Heat Treatment (PWHT)**
- 1 คลายความเค้นตกค้างหลังการเชื่อม (Stress relieving)
 - 2 ป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นจากการกัดกร่อน (Prevention of SCC)
 - 3 ทำให้เนื้อเชื่อมและบริเวณกระทบความร้อนหรือ HAZ คลายความแข็งลง (Softening)
 - 4 ป้องกันการแตกร้าวจากการแพร่ของไฮโดรเจน (HIC)
 - 5 ตบแต่งชิ้นงานหลังการเชื่อมได้ง่ายขึ้น (Easy in machining)

- ปัจจัยที่ทำให้ PWHT ประสบความสำเร็จ**
- 1 อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate)
 - 2 อุณหภูมิให้ความร้อนสูงสุด (Soak Temperature)
 - 3 ระยะเวลาเผาแช่อุณหภูมิสูงสุด (Soak Time)
 - 4 ความคุมอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate)

การทดสอบการกัดกร่อน	วัสดุเชื่อมทองเหลือง	อัตราเชื่อมทองเหลือง		ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat)		ค่าความเค้นตกค้างหลังการเชื่อม (Residual Stress)	
		UTP LEDUR 165	ESAB 650	ไม่มี	มี	ไม่มี	มี
1	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C
2	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C
3	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C
4	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C
5	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C
6	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C
7	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C
8	✓	✓	✓	150°C	150°C	600°C	600°C



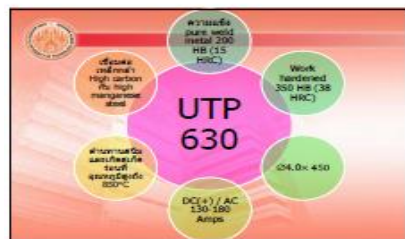
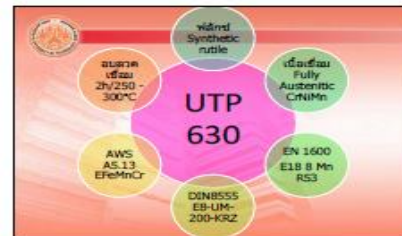
UTP 63

Mechanical properties of the weld metal

Yield strength $R_{p0.2}$	Tensile strength R_m Mpa	Elongation A %	Impact strength K_u Joule
>350	>600	>40	>60

Weld metal analysis in %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
0.1	0.5	5.5	19.0	8.5	Balance



UTP 630

Mechanical properties of the weld metal

Yield strength $R_{p0.2}$	Tensile strength R_m Mpa	Elongation A %	Impact strength K_u Joule
>350	>600	>40	>60

Weld metal analysis in %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
0.1	0.8	6.0	19.0	9.0	Balance

