

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกต่อสมบัติผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิว
เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140

TIG WELDING PARAMETERS AFFECTING PROPERTIES OF
ALUMINUM CLADDED METAL ON AISI4140 LOW ALLOY STEEL
SURFACE

ปิยธิดา ตูนังกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
และการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกต่อสมบัติผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิว
เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140

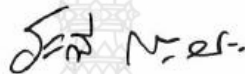
ปิยธิดา ตันงกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
และการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกต่อสมบัติผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140
TIG Welding Parameters Affecting Properties of Aluminum Cladded Metal on AISI4140 Low Alloy Steel Surface

ชื่อ - นามสกุล นางสาวปิยธิดา ตุนั่งกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2566

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ระพี กาญจนะ, วศ.ด.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์พิชัย จันทรมณี, ปร.ด.)



กรรมการ

(อาจารย์ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์, วศ.ด.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.)

วันที่ 11 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกต่อสมบัติผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวปิยธิดา ตุ่นกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ คือ 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิก (Tungsten Inert gas welding: TIG Welding) ที่มีผลต่อสมบัติของโลหะเคลือบอะลูมิเนียม (Aluminum clad metal) บนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 และ 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140

วัสดุในการทดลอง คือ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่มีความกว้าง 75 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และหนา 13 มิลลิเมตร โลหะเคลือบอะลูมิเนียมถูกสร้างบนพื้นผิวเหล็กกล้าด้วยกระบวนการเชื่อมทิก ตัวแปรการเชื่อม (Welding parameters) ในการทดลองนี้ประกอบด้วยกระแสเชื่อม (Welding current) คือ 75-175 แอมแปร์ ความเร็วของการเดินเชื่อม (Welding speed) คือ 75-175 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะซ้อนแนว (Weld overlap distance) ร้อยละ 10-40 ของความกว้างของโลหะเคลือบอะลูมิเนียม (Aluminum clad metal width) ชิ้นงานเชื่อมถูกทำการตรวจสอบสมบัติประกอบด้วยรูปร่างโลหะเคลือบอะลูมิเนียม ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มกระแสเชื่อมและการลดความเร็วของการเดินเชื่อมส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มความกว้างโลหะเคลือบอะลูมิเนียม ความกว้างของพื้นที่กระทบร้อน การหลอมลึกของโลหะเคลือบอะลูมิเนียม และความลึกของพื้นที่กระทบร้อน อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสเชื่อมและการลดความเร็วของการเดินเชื่อมนี้ทำให้ความหนาของแนวเชื่อมลดลง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมและเหล็กที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อม (Weld metal: WM) และโลหะฐาน (Base metal: BM) ความหนาของชั้นสารประกอบกึ่งโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นและความเร็วของการเดินเชื่อมลดลง การเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมและลดปริมาณเหล็กในชั้นสารประกอบกึ่งโลหะส่งผลทำให้ความแข็งที่ชั้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานมีค่าเพิ่มขึ้นการเพิ่มระยะซ้อนแนวส่งผลทำให้เกิดการลดขนาดโครงสร้างเดนไดรท์ในโลหะเชื่อม โครงสร้างเดนไดรท์ที่มีขนาดเล็กแสดงปริมาณอะลูมิเนียมในแกนเดนไดรท์ที่มีค่าต่ำกว่าปริมาณอะลูมิเนียมในช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรท์

คำสำคัญ: เหล็กกล้าผสมต่ำ ชั้นเคลือบอะลูมิเนียม การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สเฉื่อย

Thesis Title	TIG Welding Parameters Affecting Properties of Aluminum Cladded Metal on AISI4140 Low Alloy Steel Surface
Name-Surname	Miss Piyatida Toonangkul
Program	Industrial and Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2023

ABSTRACT

The purposes of this thesis were: 1) to investigate the influence of Tungsten Inert Gas (TIG) Welding parameters on the properties of aluminum cladded metal (ACM) on AISI4140 low-alloy steel surface and 2) to study a relation of microstructure and mechanical properties of aluminum cladded metal on AISI4140 low-alloy steel.

The experimental material was AISI4140 low-alloy steel with a width of 75 mm, a length of 150 mm, and a thickness of 13 mm. ACM was formed on the steel surface by a TIG welding process. Welding parameters in this experiment consisted of welding current 75-175 amperes, welding speed 75-175 mm per minute, and welding overlap distance ranging from 10-40% of the width of the ACM. The welded piece was examined for properties consisting of ACM geometries, hardness, and microstructure.

The results of the experiment were summarized as follows. Increasing welding current and decreasing welding speed resulted in increasing an ACM bead width, a heat affected zone (HAZ) width, an ACM penetration, and HAZ depth. However, increasing the welding current and decreasing the welding speed decrease the convexity of a weld reinforcement. Microstructure examination showed a formation of an intermetallic compound (IMC) which was a combination of aluminum and iron at the weld metal (WM) and the base metal (BM) interface. The IMC thickness tended to increase as the welding current increased and the welding speed decreased. Increasing the aluminum content and decreasing the iron content in the IMC layer resulted in the increase in the hardness of the WM and the BM interface. The increase of the overlapping distance resulted in a grain refinement of a WM dendrite structure. Smaller dendrite structure revealed the aluminum content in the dendrite arms was lower than the aluminum content in the space between the dendrite arms.

Keywords: low-alloy steel, aluminum cladded layer, TIG Welding



กิตติกรรมประกาศ

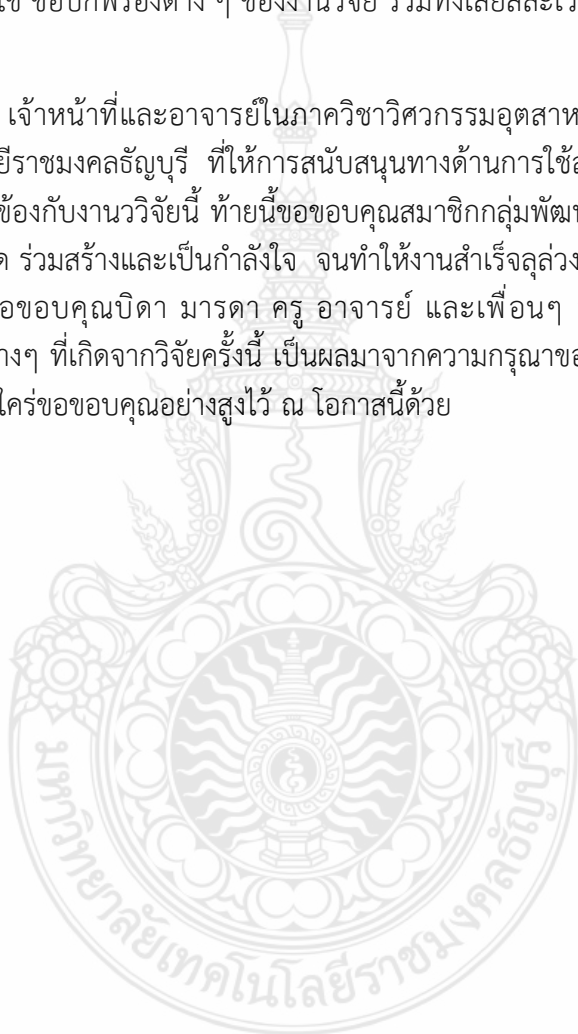
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ได้ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ ประธานกรรมการสอบ และกรรมการสอบ ดร.ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่และอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบทุกชนิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ท้ายนี้ขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุทุกท่านที่สนับสนุน ร่วมคิด ร่วมสร้างและเป็นกำลังใจ จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ประโยชน์และความรู้ต่างๆ ที่เกิดจากวิจัยครั้งนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ปิยธิดา ตุนั่งกุล



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 วัสดุทดลอง.....	15
2.2 การเชื่อมโลหะ.....	20
2.3 เครื่องเชื่อม.....	24
2.4 การทดสอบสมบัติโลหะเชื่อม.....	24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	29
3.1 วัสดุทดลอง.....	30
3.2 กระบวนการสร้างชิ้นพอกอะลูมิเนียม.....	31
3.3 การทดสอบสมบัติงานเชื่อม.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	42
4.1 อิทธิพลกระแสเชื่อมตึงที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็ก กล้าผสม AISI4140.....	42
4.2 อิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อมตึงที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมอะลูมิเนียม บนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140.....	51
4.3 อิทธิพลระยะซ้อนเกยที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็ก กล้าผสม AISI4140.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ลักษณะโครงสร้างมหภาค.....	80
ภาคผนวก ข.....	87
รูปร่างของแนวเชื่อม.....	87
ภาคผนวก ค.....	90
โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม.....	90
ภาคผนวก ง.....	106
ความแข็ง.....	106
ภาคผนวก จ.....	111
การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมี.....	111
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	160

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของลวดทั้งสแตนเลสและส่วนผสมของลวดทั้งสแตนเลสรูปแบบของ แท่งทั้งสแตน.....	23
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าคาร์บอน AISI4140.....	30
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียม AWS-ER 1100.....	32
ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนขาเข้า.....	32
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสมบูรณ์แนวเชื่อมและตัวแปรการเชื่อม.....	60
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีที่ตำแหน่งตรวจสอบ I และ II.....	68
ตารางที่ 4.3 ส่วนผสมทางเคมีที่ตำแหน่งตรวจสอบ I และ II.....	70



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุคเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์.....	18
รูปที่ 2.2 แผนภูมิ T.T.T. Diagram ของวัสดุ AISI 4140.....	19
รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม.....	20
รูปที่ 2.4 ตำแหน่งต่างๆของท่าเชื่อม.....	21
รูปที่ 2.5 ทิศทางการขีดกระดาษทราย.....	25
รูปที่ 2.6 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์.....	26
รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินโครงการ.....	29
รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดลองในการเชื่อม.....	30
รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมทิกที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงาน.....	31
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อม.....	32
รูปที่ 3.5 ภาพจำลองแนวเชื่อมซ้อนแนว 2 แนวที่ระยะการเชื่อมซ้อนแนวแตกต่าง.....	33
รูปที่ 3.6 เครื่องตัดด้วยใบตัดเสียดสีความเร็วรอบสูง.....	34
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการตัดและตรวจสอบสมบัติของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนเหล็กกล้าผสมต่ำ.....	35
รูปที่ 3.8 การขีดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้าง.....	35
รูปที่ 3.9 กล้องถ่ายภาพกำลังขยายต่ำเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	36
รูปที่ 3.10 ภาพร่างการวัดขนาดโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อม 1 แนว.....	36
รูปที่ 3.11 การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	37
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกอะลูมิเนียม 1 แนวบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ.....	38
รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์.....	38
รูปที่ 3.14 แนวการวัดความแข็งโลหะเชื่อม.....	39
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการวัดความแข็งที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมพอกอะลูมิเนียมและเหล็กกล้า ผสมต่ำ.....	39
รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope; SEM)28	
รูปที่ 3.17 บริเวณตำแหน่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	40
รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่าง และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	41
รูปที่ 4.2 ผลการวัดรูปร่างของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่าง และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	43
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อม ด้วยกระแสเชื่อม150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	44

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4	ความแข็งแรงผ่านแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่างกัน และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	45
รูปที่ 4.5	การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐานและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	47
รูปที่ 4.6	การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	48
รูปที่ 4.7	ความหนาของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	49
รูปที่ 4.8	การเปรียบเทียบโครงสร้างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที.....	50
รูปที่ 4.9	จุดบกพร่องในโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	51
รูปที่ 4.10	โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	52
รูปที่ 4.11	รูปร่างของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที...	53
รูปที่ 4.12	ความแข็งแรงดึงฉากกับพื้นผิวแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	54
รูปที่ 4.13	ความแข็งแรงเฉาะพื้นที่กำหนดของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	55
รูปที่ 4.14	โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐานและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	56

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15	โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	57
รูปที่ 4.16	ความหนาของชั้นการรวมตัวบนผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	58
รูปที่ 4.17	รอยแตกร้าวได้แนวเชื่อมในพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม ก. 100 มิลลิเมตรต่อนาที และ ข. 125 มิลลิเมตรต่อนาที.....	58
รูปที่ 4.18	โครงสร้างเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	59
รูปที่ 4.19	ระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที.....	59
รูปที่ 4.20	โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%.....	61
รูปที่ 4.21	การวัดขนาดของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%.....	62
รูปที่ 4.22	ขนาดรูปร่างของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%.....	63
รูปที่ 4.23	อัตราส่วนระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมและความนูน, ระยะหลอมลึก.....	63
รูปที่ 4.24	ความแข็งแนวเชื่อมตั้งฉากแนวเชื่อมอะลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%.....	64
รูปที่ 4.25	ความแข็งเฉลี่ยแนวเชื่อมตั้งฉากแนวเชื่อมอะลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%..	66
รูปที่ 4.26	การวัดการกระจายพลังงานโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าผสมต่ำที่ระยะซ้อนแนว 10 และ 40%.....	67
รูปที่ 4.27	การวัดการกระจายพลังงานโครงสร้างเดนไดรต์ในโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมที่ระยะซ้อนแนว 10 และ 40%.....	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คุณภาพของเหล็กกล้าที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเป็นเรื่องสำคัญ เช่น การนำมาใช้ใน อุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ เป็นต้น เนื่องจากเหล็กกล้ามักเกิดการสึกหรอ (Wear) และการกัดกร่อน (Corrosion) จึงทำให้มีอายุการใช้งานที่น้อยลงหรือเสื่อมสภาพลงเมื่อเวลาผ่านไป เพราะเหตุนี้จึงได้ทำ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพื้นผิวให้มีความแข็งแรงและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นกับการนำไปใช้ [1] ซึ่ง ปัจจุบัน มีวิธีการที่สามารถทำให้วัสดุเกิดความแข็งแรงที่ ผิวชิ้นงานได้ คือการพอกหุ้มพื้นผิว (Cladding) เป็นการสร้างชั้นพอกหุ้มบนพื้นผิวของโลหะที่ 1 หรือโลหะฐาน ด้วยโลหะชนิดที่ 2 หรือ โลหะพอกหุ้ม การพอกหุ้มพื้นผิวมักเป็นเพิ่มสมบัติบางประการที่โลหะฐานขาดหายไป และสามารถหา ได้ในโลหะพอกที่เติมเข้าไป เช่น ตัวอย่างการพอกชั้นอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กเพื่อเพิ่มความต้านทาน การกัดกร่อนของเหล็กกล้า โดยทั่วไปชั้นพอกหุ้มมักมีความหนามากกว่า 3 มิลลิเมตร วิธีการในการพอก ผิวสามารถทำได้โดยพอกด้วยการรีด (Roll cladding) [2] การพอกแข็งด้วยการเชื่อมประสาน (Brazed cladding) [3] การเชื่อมเลเซอร์[4,5] การพ่นละอองร้อน (Thermal spray) [6] นอกจากนี้การพอก สามารถเกิดขึ้นได้โดยการอาศัยแหล่งความร้อนจากกระบวนการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมอาร์กโลหะ แก๊สคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) [7] การเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored arc welding: FCAW) การเชื่อมอาร์กคลุมหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) [8,9] การเชื่อมอาร์ก ทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding: GTAW) [10,11] การเชื่อมอาร์กพลาสมา (Plasma arc welding: PAW) หรือการเชื่อมอิเล็กโตรสแลก (Electroslag welding: ESW) เป็นต้น [12] เนื่องจากการนำอะลูมิเนียมมาทำการเคลือบผิวเหล็กส่งผลให้เห็นถึง การเกิดสมบัติต่างๆที่ต้องการ รวมถึงการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ เหล็ก เนื่องจากการเพิ่มอะลูมิเนียมลงไปทำให้เกิดความแข็งแรงและการ ต้านทานการกัดกร่อน หรือการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้ [2]

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชั้นพอกอะลูมิเนียมบนผิวเหล็กกล้าค่อนข้างมาก เช่นการสร้างชั้นพอกหุ้มอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าด้วยการรีดเย็นอะลูมิเนียม AA1100 บนพื้นผิว เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L [2] ได้ทำการเพิ่มโลหะผสมต่างๆ ที่มีสมบัติในการเสริมความแข็งแรงลงไป ในชั้นพอกหุ้มอะลูมิเนียมสามารถส่งผลทำให้ชั้นพอกหุ้มอะลูมิเนียมมีความแข็งแรง และความต้านทาน

การสึกหรอเพิ่มขึ้นได้ หรือการแสดงค่าความแข็งและความแข็งแรงของการพอกหุ้มผิวอะลูมิเนียมสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการลดพื้นที่หน้าตัด การลดพื้นที่หน้าตัดนี้ส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียดที่พบก่อให้เกิดเฟสมาเทนไซต์ในเหล็กกล้า พบได้จากการสร้างชั้นพอกอะลูมิเนียม AA1060 ลงบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [13] หรือการสร้างชั้นผิวเคลือบอะลูมิเนียมผสมบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม [14] และในการสร้างชั้นพอกหุ้มอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้ากระบวนการเชื่อมเป็นหนึ่งในวิธีการที่น่าสนใจในการการสร้างพอกหุ้มพื้นผิว เนื่องจากในขั้นตอนการเชื่อมนั้นสามารถเติมโลหะเสริมแรงต่างๆ เข้าไปในบ่อหลอมละลายและทำให้เกิดการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมได้ และการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมในชั้นการรวมตัวทำให้เกิดผิวเคลือบขึ้นในระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน [15-17] ยิ่งทำให้ความแข็งของชั้นผิวการรวมตัวระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานมีค่าเพิ่มขึ้น [15] อย่างไรก็ตามที่ผ่านมามีรายงานวิจัยค่อนข้างจำกัดที่ได้รายงานผลในการสร้างชั้นพอกหุ้มพื้นผิวอะลูมิเนียมด้วยการอาศัยความร้อนจากการเชื่อมอาร์ก แต่ผลการทดลองอื่นๆ ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการสร้างชั้นพอกหุ้มพื้นผิว ที่สามารถเติมโลหะผสมเสริมแรงลงไปและทำให้เกิดการเพิ่มสมบัติทางกลได้ [18-20] และจากการเปรียบเทียบจากงานวิจัยข้างต้นพบว่า กระบวนการเชื่อมที่มีค่าใช้จ่ายน้อย ไม่มีความซับซ้อนในการเชื่อม และมีข้อดีหลายข้อคือกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม หรือการเชื่อมทิกซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมที่อาร์กเสถียรและสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็ก [21]

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้ ผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวคิดที่จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลความร้อนขาเข้าที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติชั้นเคลือบผิวอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140

1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและความแข็งของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140

1.3.2 ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)

1.3.3 แก๊สปกคลุม CO₂ 99.99%

1.3.4 โลหะเติม คือ ลวดเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด AWS - ER1100

1.3.5 แท่งทั้งสะเตนอิเล็กโทรดที่ใช้ คือ หัวแดง (WT-20)

1.3.6 ตัวแปรที่ใช้ คือ กระแสไฟ และความเร็วในการเดินเชื่อม โดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อม คือ 75 100 125 150 และ 175 A และความเร็วในการเดินเชื่อม ที่ 75 100 125 150 และ 175 มิลลิเมตรต่อนาที

1.3.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลความร้อนขาเข้าจากการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติชั้นเคลือบผิวอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140

1.4.2 ทราบถึงตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ด้วย

1.4.3 เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา พัฒนาและต่อยอดไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุทดลอง

เหล็กกล้าผสม(Alloy steel) [22] คือเหล็กที่ผสมธาตุต่างๆนอกเหนือไปจากธาตุคาร์บอน และธาตุบางตัวที่ติดมาเนื่องจากกรรมวิธีการถลุง (แมงกานีส ซิลิกอน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส) การผสมธาตุต่างๆ ลงไป ในเหล็กที่มีธาตุผสมมากมายหลายธาตุซึ่งแต่ละธาตุจะให้ผลต่อเหล็กแตกต่างกัน ประการที่เหล็กคาร์บอนให้สมบัติเหล่านั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำไม่ สามารถใช้งานได้ดีถึงแม้ว่าการผสมธาตุต่างๆลงไปในเหล็กจะทำให้เหล็กมีราคาสูงขึ้นก็ตามความมุ่งหมายของการผสมธาตุดังกล่าวมีหลายประการคือเพิ่มสมบัติด้านชุบแข็งปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติเพิ่มสมบัติด้านทานการสึกหรอ อันเนื่องมาจากการเสียดสีขณะใช้งานเพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทกและปรับปรุงสมบัติด้านแม่เหล็ก

เหล็กที่ธาตุผสมอยู่หลากหลายในแต่ละธาตุมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เห็นถึงบทบาทของธาตุต่างๆที่แยกออกเป็นกลุ่ม เช่น กลุ่มเพื่อเสถียรภาพของออสเตนไนท์ กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ กลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์และกลุ่มรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ เป็นต้น

ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเตนไนท์ และกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ ธาตุในกลุ่มนี้จะมี ความแตกต่างของการลวกหรือเพิ่มอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด ดังเช่น ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเตนไนท์ จะมีบทบาทของธาตุที่จะลดอุณหภูมิของเส้น A3 ให้ต่ำลงและเพิ่มอุณหภูมิของเส้น A4 ให้สูงขึ้น แสดง ในภาพที่ 2.1 ซึ่งส่งผลทำให้ ขยายอาณาเขตของออสเตนไนท์ ซึ่งธาตุในกลุ่มนี้จะมีระบบผลึกเป็น Face centered cubic และจะละลายได้ดีในออสเตนไนท์ โดยมีธาตุที่สำคัญ คือ ธาตุนิเกิลแมงกานีส และคาร์บอน ซึ่งจะแตกต่างกับกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ ที่จะลดอุณหภูมิของเส้น A4 แต่จะเพิ่มอุณหภูมิของเส้น A3 ให้สูงขึ้น จึงทำให้อาณาเขตของเฟอร์ไรท์กว้างขึ้น และมีระบบผลึกเป็น Body centered cubic ละลายได้ดีในเฟอร์ไรท์ ส่วนกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ ตามการแบ่งบทบาทของธาตุ เป็นกลุ่มนั้น ธาตุในกลุ่มนี้มีหลากหลายธาตุ ดังเช่น ธาตุโครเมียม ทังสแตน โมลิบดีนัม วาเนเดียมและนิโอเบียม และเมื่อผสมธาตุเหล่านี้ในเหล็กที่มีคาร์บอนจะเกิดการรวมตัวให้คาร์ไบด์ในลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป และกลุ่มสุดท้าย กลุ่มรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ ธาตุในกลุ่มนี้จะรวมถึงธาตุที่อยู่ในกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนสามารถรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ได้ อีกด้วย

2.1.1 บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า [23]

นิกเกิล (Ni) มีคุณสมบัติในการเพิ่มความแข็งแรงของการชุบในเหล็ก และช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนออสเทนไนท์ให้เป็นมาร์เทนไซต์ที่ต่ำลง การที่มีนิกเกิลผสมอยู่ในเหล็กจำนวนมากจะทำให้เกิดการสร้างโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้โดยการทำการอบปกติ (Normalizing) ทำให้เพิ่มคุณสมบัติทางด้านการเชื่อม (Weld ability) และเพิ่มความแข็งแรงมากขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดความเหนียวที่ลดลง

แมงกานีส (Mn) มีคุณสมบัติคล้ายกับนิกเกิลที่มีความสามารถชุบแข็งให้กับเหล็กแต่มีผลรุนแรงกว่านิกเกิล 2 เท่ารวมถึงความเหนียวที่ลดลงแต่มีความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับแมงกานีสจะมีข้อเสียตรงที่จะทำให้เกิดความเปราะของเหล็กและยังไม่ทนทานต่อแรงกระแทก

โครเมียม (Cr) มีคุณสมบัติของการอบชุบได้ดีโดยใช้กับเหล็กทำให้ความแข็งมีสภาพที่นานเมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่สูงเมื่อผสมโครเมียมปริมาณสูงจะช่วยให้เกิดสมบัติการอบชุบ (Secondary hardening) แต่อาจจะทำให้เกิดการเปราะขึ้นได้เมื่อนำไปอบคืนไฟ (Temper brittleness) แต่แมงกานีสจะมีความเปราะที่รุนแรงกว่า

โมลิบดีนัม (Mo) มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับโครเมียมเนื่องจากมีความสามารถในการชุบแข็งแต่ถ้าผสมไม่เกิน 1% จะสามารถต้านทานความร้อนและไม่ทำให้ความแข็งมีค่าลดลง แต่โมลิบดีนัมเมื่อนำไปทำการอบชุบสิ่งที่เกิดคือไม่มีผลต่อการอบคืนไฟ แต่ก็ยังคงสภาพความแข็งไว้ได้เป็นอย่างดี ในอุณหภูมิไม่เกิน 600°C และยังทำให้ค่าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

วานาเดียม (V) มีคุณสมบัติทำให้เหล็กมีขนาดเกรนละเอียดได้ดีมากเพราะว่าวานาเดียมคาร์ไบด์มีเสถียรภาพสูงที่ไม่ทำให้เกิดการสลายตัวได้ง่าย คงสภาพความแข็งไว้ได้เป็นอย่างดี ในอุณหภูมิสูงเพิ่มความสามารถในด้านการชุบแข็งเมื่อผสมวานาเดียมเกินกว่า 0.04% ให้คุณสมบัติทางด้านอบชุบ (Secondary hardening) ที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C - 700 °C โดยไม่มีผลด้านความเปราะ (Temper brittleness)

ทังสเตน (W) มีคุณสมบัติทำให้เหล็กเกิดความแข็งแรงที่สูงมีความสามารถในการชุบแข็งแต่จะมีผลน้อยกว่าโมลิบดีนัมประมาณครึ่งหนึ่งรักษาความแข็งไว้ได้ถึงสภาพร้อนแดง (Red Hardness) ให้ผลทางด้านอบชุบ (Secondary hardening) โดยไม่มีแนวโน้มทำให้เกิดความเปราะ (Temper brittleness)

ไทเทเนียม (Ti) มีคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง แต่เมื่อนำไปอบชุบ (Secondary hardening) เกิดค่าน้อยมากและไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดความเปราะ (Temper brittleness) และเมื่อนำไปอบคืนไฟในอุณหภูมิสูงพบว่าค่าความแข็งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ซิลิกอน (Si) มีคุณสมบัติในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์โดยเฉพาะเพิ่มความแข็งแรงที่จุดครากของเหล็กให้สูงขึ้น ไม่มีความสามารถในการชุบแข็ง สมบัติทางด้านเชื่อมของเหล็กไม่ดีเมื่อผสมซิลิกอนสูงและไม่มีส่วนช่วย อดชุบ (Secondary hardening) และ ความเปราะ (Temper brittleness)

อะลูมิเนียม (Al) มีคุณสมบัติในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์เพิ่มสมบัติด้านความสามารถในการชุบแข็งได้เล็กน้อยและไม่มีความสามารถทางด้านอบชุบ (Secondary hardening) และความเปราะ (Temper brittleness)

โคบอลต์ (Co) มีคุณสมบัติในการเพิ่มความแข็งให้กับเฟอร์ไรต์แบบเดียวกับอะลูมิเนียม แต่เกิดการลดความสามารถในการชุบแข็งและคงสภาพความแข็งไว้ได้เป็นอย่างดี ในอุณหภูมิไม่มีผลด้าน ออบซุบ (Secondary hardening) และ ความเปราะ (Temper brittleness) ความแข็ง (Red hardness)

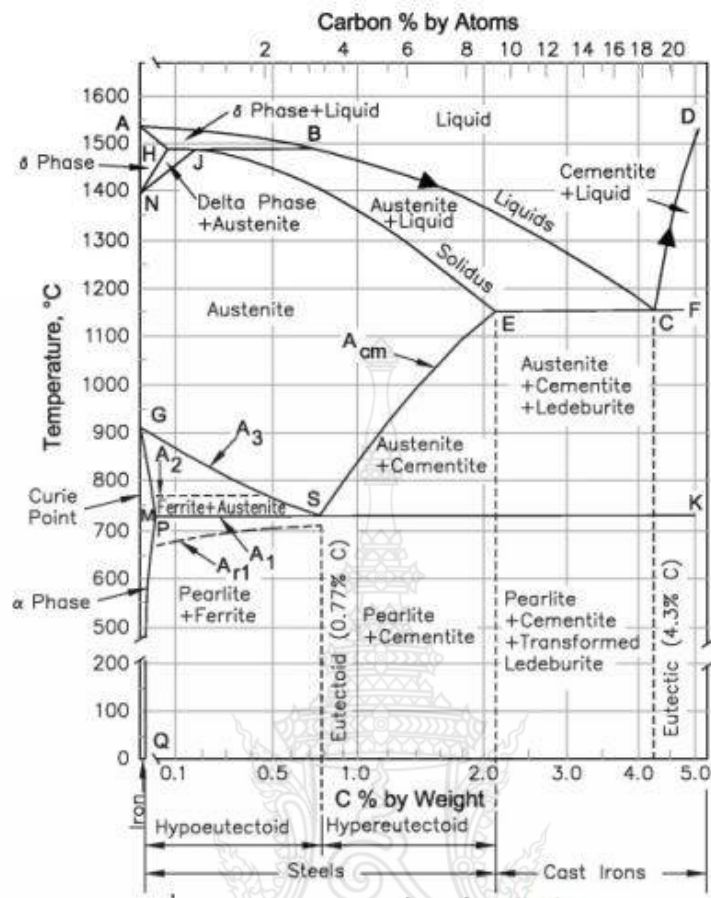
2.1.2 ชนิดของเหล็กกล้าผสม

เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมรวมกันน้อยกว่า 8% ธาตุ ที่ผสมอยู่คือ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม ปริมาณของธาตุที่ใช้ผสมแต่ละตัวจะไม่มาก ประมาณ 1- 2% ผลจากการผสมทำให้เหล็กสามารถชุบแข็งได้ มีความแข็งแรงสูงเหมาะสำหรับการทำ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น เฟือง เพลาข้อเหวี่ยง เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะต้องใช้งานในสภาพชุบแข็งและอบ อ่อนเสมอ จึงจะมีความแข็งแรงสูง

เหล็กกล้าผสมสูง (High alloy steel) เหล็กประเภทนี้ จะถูกปรับปรุงสมบัติสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่าง ซึ่งก็จะมีธาตุผสมรวมกันมากกว่า 8% เหล็กกล้าทนความร้อน ทนการเสียดสี และเหล็กกล้าทนการกัดกร่อน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้า เครื่องมือ ดังนี้

1) เหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless steel) หรือเรียกอีกอย่างว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนมากผลิตจากเตาไฟฟ้าเหล็กกล้า กลุ่มนี้ทนต่อการผุกร่อน หรือต้านการเป็นสนิมได้ดี ธาตุที่มีบทบาท มากได้แก่ โครเมียมที่ผสมเข้าไปในเนื้อเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆขึ้นที่ผิวของเหล็ก ฟิล์มนี้จะมี ความแข็งแรง สูง โปร่งใส ยึดติดกับผิวเหล็กได้ดี มีความหนาแน่นสูงและไม่มีรูพรุน นอกจากโครเมียม แล้วเหล็กกล้าไร้สนิมยังมีธาตุอื่นผสมอยู่อีก เช่น โมลิบดีนัม นิกเกิล และแมงกานีส เป็นต้น

2) เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steel) เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม โม ลิบดีนัม นิกเกิล วาเนเดียม โคบอลต์และไทเทเนียม เกินกว่า 5% และมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.8 – 2.2% ธาตุผสมเหล่านี้สามารถเพิ่มสมบัติพิเศษให้กับเหล็กกล้าเครื่องมือโดยเฉพาะเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง ที่รักษาคมมิตัดโลหะได้ดีถึงแม้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจนผิวของคมตัดร้อนมีสีแดงสมบัตินี้ เรียกว่า ความ แข็งขณะร้อน เช่น ดอกกัด (End mill) มีดกลึง มีดไส เครื่องมือทำเกลียวใน (Tap) และเครื่องมือทำ เกลียวนอก (Die) การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือลักษณะการใช้งาน เหล็กเครื่องมือปริมาณของธาตุผสมและลักษณะการชุบแข็ง



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบต์ [24]

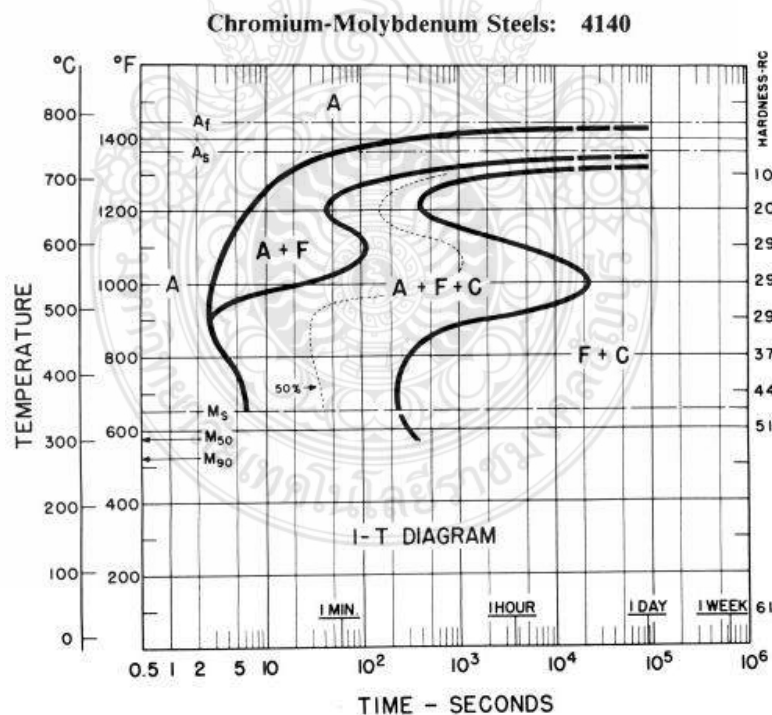
การแบ่งแยกชนิดของเหล็ก โดยใช้แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบต์นั้นเป็นการแบ่งแยกโดยการยึดเอาโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก ซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างลำบากสำหรับวิศวกรในการนำไปใช้งานจริง ด้วยเหตุนี้สมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American iron and steel institute: AISI) และสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งอเมริกา (American society of mechanical engineering: ASME) จึงได้คิดค้นระบบในการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าในการนำไปใช้งานโดยการกำหนดตัวเลขขึ้นมาใช้ในการเรียก 4 ตัว ให้ตัวเลขสองตัวแรกหมายถึงธาตุผสมหลักในเหล็กกล้านั้น ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้าย หมายถึงปริมาณคาร์บอนในเหล็ก ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้า AISI1040 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4% (ตัวเลข 40) เหล็กกล้า SAE10120 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2% (ตัวเลข 120) เป็นต้น ตัวอย่างของเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากนั้นเหล็กกล้าสามารถแบ่งกลุ่มได้ตามส่วนผสมทางเคมี หรือรูปแบบการผลิตเหล็กกล้านั้น ๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้ เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็น 7 ธาตุผสมหลักมีปริมาณไม่เกิน 2% และประกอบไปด้วยซิลิกอนไม่เกิน 0.6% และแมงกานีสไม่เกิน 1.65% หรือ

เหล็กกล้าดีคาบูไรซ์ (Decarburized steel) ที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.05% เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (Ultra-low carbon steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณไม่เกิน 0.03% และซิลิกอนและแมงกานีสเล็กน้อย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณ 0.04-0.15% เป็นวัสดุในการทำตัวถังและโครงสร้างรถยนต์ และการใช้งานอื่นๆ มากมาย

2.1.3 สมบัติและการใช้เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่มีโครเมียมและโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมสำคัญ ในการเพิ่มความแข็งแรงความสามารถในการชุบแข็งความต้านทานต่อการสึกหรอและความเหนียวแกร่งที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนผสมใกล้เคียงกัน และสามารถทำการชุบผิวแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเฉพาะผิวได้สามารถต้านทานการล้าตัว (Fatigue) ได้ดีชุบแข็งง่ายในสารชุบที่เป็นน้ำมันและสามารถชุบแข็งให้มีความแข็งได้สูงสุดถึง 60 HRC

ลักษณะการใช้งานในการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น เฟลาข้อเหวี่ยง ข้อต่อก้านพวงมาลัย เฟลาล้อ ก้านสูบ ชิ้นส่วนปั้มน้ำ เฟืองเครื่องจักรขนาดใหญ่ หน้าจานประแจ ปากกาจับชิ้นงานและยังนิยมใช้ทำชิ้นส่วนรถไฟ เฟลาเครื่องจักร เฟืองเครื่องจักรขนาดใหญ่ สกรูและน็อต รวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูงอื่นๆ



รูปที่ 2.2 แผนภูมิ T.T.T. ของวัสดุ AISI 4140 [25]

แผนภูมินี้ บางครั้งเรียกว่า แผนภูมิ T.T.T. Diagram เป็นแผนภูมิที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะที่เหล็กนั้นถูกทำให้เย็นตัวภายในเวลาที่กำหนดไว้ จาก แผนภูมิ สมดุลเหล็กกับคาร์ไบด์จะพบได้ดังนี้

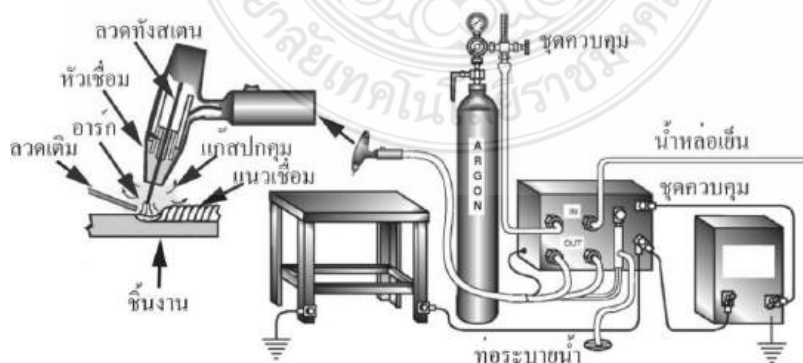
1. เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์เมื่อถูกอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A1 เล็กน้อยเพิร์ลไรท์จะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ สำหรับ
2. เฟอร์ไรท์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนท์ก็เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหนือเส้น A3

แต่แตกต่างจากเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ตรงที่เมื่อถูกอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไลท์จะ เปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนท์ ถ้าอบให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกจนอุณหภูมิเกินกว่าเส้น ACM ซีเมนต์ไต้ดที่ เหลืออยู่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนท์เช่นเดียวกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถ้าจะปรับปรุง โครงสร้าง ของเหล็กก็จะต้องอบเหล็กนั้นๆ ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนท์ เสียก่อน และ หลังจากนั้นจึงทำให้ออสเทนไนท์เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างอื่นๆ ตามที่เราต้องการซึ่ง โครงสร้าง ดังกล่าวนั้นจะพบอยู่ในแผนภูมิ T.T.T. Diagram ดังภาพที่ 2.2

2.2 การเชื่อมโลหะ [26]

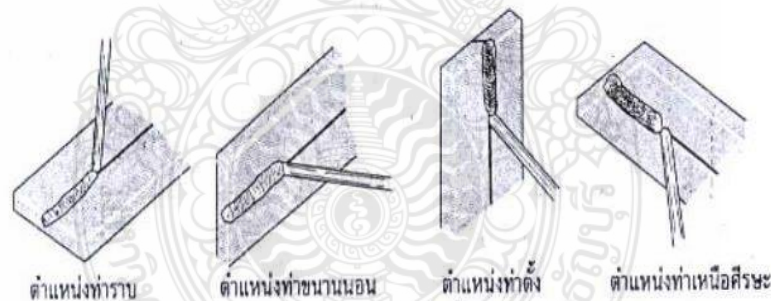
2.2.1 การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม

การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding: GTAW) หรือการเชื่อม TIG (Tungsten inert gas welding) หมายถึง การเชื่อมโลหะโดยใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์ก ระหว่างลวดทั้งสะเตนกับชิ้นงาน โดยมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลายบางตำราอาจเรียกกระบวนการเชื่อมนี้ว่าเฮลิอาร์ค (Heliarc) หรือเฮลิเวลด์ (Heliweld) ซึ่งเป็นชื่อเดิมของ กระบวนการที่ใช้แก๊สเฉื่อยเพื่อมาทำการปกคลุมแนวเชื่อมและการใช้แก๊สทำให้ไม่มีบรรยากาศภายนอก เข้ามาทำปฏิกิริยาตรงบริเวณที่เชื่อม



รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม [27]

ทำให้คุณภาพของแนวเชื่อมที่มีคุณภาพสูง และไม่แนะนำให้ทำการเชื่อมโลหะหนาเนื่องจากยังเป็นปัญหาในเรื่องให้ความร้อนแก่โลหะ จึงไม่สามารถเชื่อมได้ด้วยการเชื่อม อื่นที่มีการให้พลังงานแก่รอยเชื่อมสูง โดยความร้อนที่ใช้ในการหลอมละลายพื้นผิวที่ต้องการเชื่อมมา อุปกรณ์สำคัญของการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2.3 ประกอบไปด้วย เครื่องเชื่อม สายไฟเชื่อมและท่อส่งแก๊ส ท่อบรรจุแก๊ส แท่งทังสเตนอิเล็กโทรด ลวดเชื่อม และมือเชื่อม โดยการอาร์คระหว่างแท่งทังสเตนและโลหะที่ต้องการเชื่อม โดยทั่วไปใช้แท่งทังสเตนที่มีส่วนผสมทางเคมีของ W และ 2%wt ThO₂) [14] และชิ้นงานเชื่อมรายละเอียดแท่งทังสเตนอิเล็กโทรดแสดงในตารางที่ 2.1 และเมื่อได้ทำการเชื่อมบนชิ้นงานแท่งทังสเตนจะไม่เกิดการหลอมรวมกับชิ้นงานหรือไม่ได้ถูกเติมลงไปในปีบ่อที่ทำการหลอมละลาย ในระหว่างที่ได้เริ่มทำการเชื่อมช่างหรือผู้ที่ทำการเชื่อมจะดำเนินการโดยการเปิดสวิทซ์ที่หัวของหัวเชื่อมเพื่อให้การเชื่อมเริ่มต้นโดยมีแก๊สลงมากคลุมในบริเวณพื้นที่การอาร์คเกิดขึ้น จึงทำให้โลหะเชื่อมและโลหะฐานก่อเกิดการรวมตัวกันได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการแนวเชื่อมที่มีสมบัติดังต้องการ ควรมีการเติมลวดเชื่อมลงไปในช่วงบ่อหลอมละลายเพื่อให้เกิดการปรับปรุงสมบัติของโลหะเชื่อมต่อไป และเมื่อพิจารณาถึงกระบวนการเชื่อมของอาร์คโลหะจะพบได้ว่าท่าเชื่อมพื้นฐานในการเชื่อมประกอบไปด้วยท่าราบ ดังรูปที่ 2.4 และตำแหน่งต่างๆของท่าเชื่อม ดังนี้



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งต่างๆของท่าเชื่อม [28]

1.ท่าราบ คือ การเชื่อมต่อเกยท่าราบเป็นแบบของรอยต่อที่นิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรม ทุกๆด้าน ไม่เสียเวลาในการเตรียมงาน รอยต่อเกยจะมีความแข็งแรงสูงสุดเมื่อเชื่อมรอยต่อทั้งสองด้าน การเคลื่อนไหวลวดเชื่อมจะเป็นลักษณะเดินหน้า ถอยหลัง ไปตามแนวเชื่อม มุมของลวดเชื่อมในขณะที่เชื่อมประมาณ 45 – 60 องศา ดังรูปที่ 2.4

2.ท่าขนานนอน การเชื่อมท่าขนานจะมีความแตกต่างจากการเชื่อมแบบอื่นๆ คือ ต้องใช้มุม
ลวดที่มีมุม 20 องศา ในการเชื่อม

3.ท่าตั้ง แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

1.การเชื่อมขึ้น (Up Hill) คือการให้ลวดตั้งฉากกับชิ้นงานและในการเอียงลวดควรไม่เกิน 10
องศา

2.การเชื่อมลง (Down Hill) คือการให้ลวดตั้งฉากกับชิ้นงานและลวดต้องทำมุมขึ้น 15-20
องศา และถ้าเมื่อมีสแลคให้ลดระยะการอาร์กลง พร้อมกับเพิ่มความเร็วในการเชื่อม

4.ท่าเชื่อมเหนือศีรษะ คือ การปรับขนาดของกระแสไฟต้องให้สูงไว้ และใช้ระยะอาร์คสั้น ๆ
บังคับให้ลวดเชื่อมตั้งฉากกับพื้นผิวโลหะงาน และทำมุมเอียงประมาณไม่เกิน 10 องศา ตามทิศทาง
ที่ลวดเชื่อมเคลื่อนที่ไป แต่มีท่าที่เป็นอันตรายอย่างมากในการเชื่อมดังรูปที่ 2.4

2.2.2 การเลือกกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม

กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล มี 3 ประเภท ดังนี้

1. กระแสตรงขั้วลบ (DCEN) ให้ลวดเชื่อมเป็นขั้วลบ

2. กระแสตรงขั้วบวก (DCEP) ให้ลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก

3. กระแสสลับความถี่สูง

1. กระแสตรงขั้วลบ (dcen) ให้ลวดเชื่อมเป็น ขั้วลบ (Direct Current Electrode
Negative)

การต่อด้วยวิธีนี้ความร้อนจะเกิดที่ชิ้นงานมากกว่าในอัตรา 70 : 30 โดยอยู่ที่อิเล็กโทรด
30% ชิ้นงาน 70% แท่งทั้งสแตนเลสจะมีขนาดเล็กกว่ากระแสตรงขั้วบวก และใช้กระแสไฟสูงกว่า ดังนั้นรอย
เชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีความแคบและหลอมละลายลึก

2. กระแสตรงขั้วบวก (DCEP) ให้ลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก (Direct Current Electrode
Positive)

การต่อด้วยวิธีนี้ความร้อนจะเกิดที่มากกว่าอิเล็กโทรดในอัตรา 70 : 30 โดยอยู่ที่
อิเล็กโทรด 70% ชิ้นงาน 30% ดังนั้น แท่งทั้งสแตนเลสจะมีขนาดโตกว่าการต่อกระแสไฟเชื่อมด้วยวิธีอื่นๆ
รอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีรอยกว้างและซึมลึกน้อย การต่อแบบนี้นำมาใช้ในการเชื่อมทิกน้อยมาก ในการ
ต่อกระแสตรงทั้ง 2 แบบนี้สามารถเชื่อมโลหะได้ทุกชนิดยกเว้นอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม

3. กระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current – High Frequency : ACHF)

การต่อดัวยวิธีนี้ใช้ระบบความถี่สูงอย่างต่อเนื่องขณะเชื่อมทำให้เริ่มต้นเชื่อมได้ง่ายโดยกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบจะทำให้ชิ้นงานมีความร้อนมาก ให้มีรอยเชื่อมกว้างและการซึมลึกดี ดังรูปที่ 4.4 และในขณะเดียวกันกระแสไฟฟ้าขั้วบวกจะช่วยจัดออกไซด์ที่เคลือบผิวของโลหะให้แตกออกจากกัน ก่อนที่ชิ้นงานจะหลอมละลาย กระแสไฟฟ้าจะช่วยขจัดสิ่งสกปรกออกได้อีกด้วย ความร้อนจะเกิดที่อิเล็กโทรดและชิ้นงานเท่าๆ กัน โดยอยู่ที่อิเล็กโทรด 50% ชิ้นงาน 50%

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของแท่งทั้งสแตน [29]

มาตรฐาน AWS	ส่วนผสมทางเคมี	สีของปลายแท่งทั้งสแตน
EWP	ทั้งสแตนบริสุทธิ์	เขียว
EWTh-1	เติม 1% ธอเรียม	เหลือง
EWTh-2	เติม 2% ธอเรียม	แดง
EWZr	เติม 0.25-0.5% ธอเรียม	น้ำตาล
EWCe-2	เติม 2% ซีเรียม	ส้ม
EWL a-1	เติม 1% แลนธาอิม	ดำ

ข้อมูลในตารางที่ 2.1 ได้แสดงถึงการแบ่งกลุ่มของแท่งทั้งสแตนออกเป็นกลุ่ม และมีความหมายของเลขและตัวอักษร คือ EWP เป็นแท่งทั้งสแตนบริสุทธิ์ ใช้สำหรับงานโลหะทั่วไป ส่วน EWCe – 2 เป็นแท่งทั้งสแตนกลุ่มใหม่ มีส่วนผสมของซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide) หรือ เซีย (Ceria) ที่ช่วยให้การเริ่มต้นอาร์กดี การอาร์กสม่ำเสมอ และลดอัตราการสึกกร่อน แตกต่างจากEWLa – 1 เป็นแท่งทั้งสแตนที่มีส่วนผสมแลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum oxide) หรือแลนธา (Lanthana) ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลในการเชื่อมคล้ายกับแท่งทั้งสแตน EWCe – 2 EWTh – 1 และ EWTh – 2 มีส่วนผสมของทอเรียมออกไซด์ (Thorium oxide) หรือทอเรีย (Thoria) 1 เปอร์เซ็นต์ และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ Thoria เป็นธาตุกัมมันตรังสีระดับต่ำ เมื่อผสมอยู่ในแท่งทั้งสแตนไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายแท่งทั้งสแตนชนิดนี้ออกแบบไว้สำหรับใช้กระแสตรง ให้การเริ่มต้นอาร์กที่ดี อาร์กสม่ำเสมอและสามารถใช้เชื่อมที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง แท่งทั้งสแตนชนิด 2 เปอร์เซ็นต์ให้ผลการเริ่มต้นอาร์กสม่ำเสมอและใช้กระแสเชื่อมได้สูงกว่าชนิด 1 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 การนำกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สคลุมไปใช้

กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สคลุม สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ ได้แก่ การเชื่อมด้วยมือ (Manual) กิ่งอัตโนมัติ การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สคลุม เป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะทนความร้อน อลูมิเนียม ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น และสิ่งที่ไม่ควรนำมาทำการเชื่อมทิก คือ ตะกั่ว และสังกะสี เพราะวัสดุทั้งสองมีจุดหลอมตัวที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีอุณหภูมิในตัวที่แตกต่างกับอุณหภูมิของเปลวอาร์กอย่างมาก แต่เมื่อการหลอมละลายเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอส่วนโลหะที่มีจุดหลอมตัวสูง

สามารถเชื่อม ด้วยทิกได้ดี แต่ถ้าโลหะดังกล่าวเคลือบไว้ด้วยตะกั่ว สังกะสีตีบุกแคดเมียมหรืออะลูมิเนียม จะต้องใช้ วิธีเชื่อมที่พิเศษ วิธีป้องกันควรกำจัดวัสดุเคลือบบนโลหะออกก่อนที่จะทำการเชื่อมและเมื่อเชื่อมเสร็จ แล้วจึงซ่อมแซมใหม่

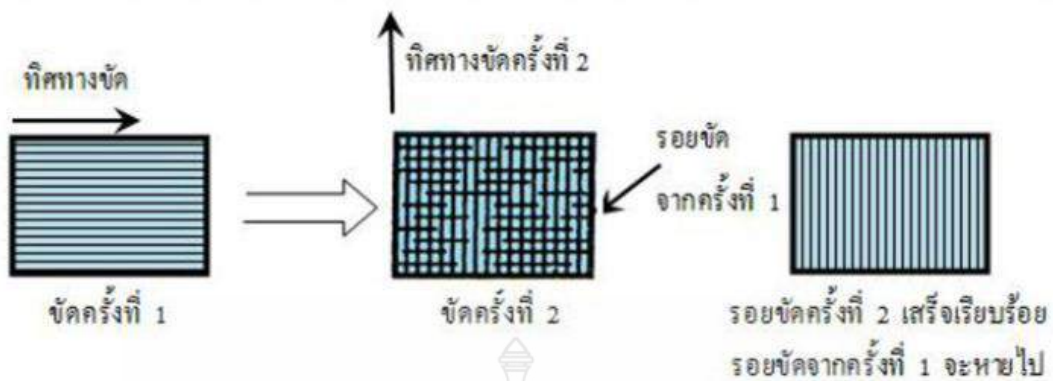
2.3 เครื่องเชื่อม [26]

เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสกลุ่ม ควรเป็นเครื่องเชื่อมที่มีการออกแบบเป็นพิเศษ มีทั้งกระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับ โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมจะเป็นแบบทรานฟอเมอร์-เรกติไฟเออร์(Transformer – Rectifier) หรือเครื่องแบบเจเนอเรเตอร์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า หรือเครื่องยนต์ก็ได้รวมไปถึงเครื่องเชื่อมแบบอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำมาใช้งานได้สะดวกและมี ฟังก์ชันเพื่อให้สะดวกมากยิ่งขึ้น เครื่องเชื่อมจะมีระบบผลิตความถี่สูงและคงที่ (High Frequency –Constant – Current) ติดตั้งไว้ด้วย สำหรับกรณีที่เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าสลับระบบความถี่สูงจะถูกใช้อย่างต่อเนื่อง กรณีที่เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าตรงสวิตซ์ความถี่สูงจะเริ่มใช้ในการเริ่มต้นอาร์ก ในแบบทรานฟอเมอร์เรกติไฟเออร์ผู้ปฏิบัติเลือกกระแสไฟฟ้าเชื่อมตามลักษณะของชิ้นงานได้คือ กระแสตรงขั้วลบ (DCEN)ให้ลวดเชื่อมเป็นขั้วลบ และกระแสตรงขั้วบวก (DCEP) ให้ลวดเชื่อมเป็นขั้วบวกและกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) โดยกระแสไฟฟ้าตรงใช้เชื่อมกับพวกเหล็กสะแตนเลสเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กหล่อ เงิน ทองแดง นิกเกิลและนิกเกิลผสมส่วนกระแสไฟฟ้าสลับเหมาะสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเครื่องเชื่อมจะเรียกว่าเครื่องเชื่อมทิก ปัจจุบันมีการพัฒนาออกแบบให้มีช่วงกระแสเชื่อมได้ 0.5–400 แอมแปร์ และอาร์ตโวลต์เตจ 10-30 โวลต์และมีรอบทำงาน (Duty Cycle) 60%

2.4 การทดสอบสมบัติโลหะเชื่อม

2.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยา

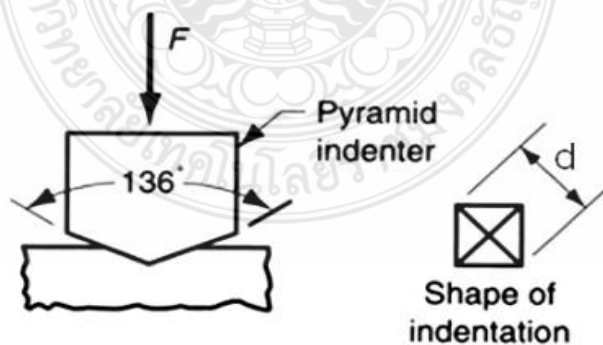
ทำได้โดยการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค นำชิ้นงานมาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายโดยทำการขัดกระดาษไปในทิศทางแนวเดียวกันจากนั้นเปลี่ยนเป็นขัดขวางตั้งฉากกับรอยขัดกระดาษทรายรอยเดิม ดังรูปที่ 2.4 ด้วยเครื่องขัด ซึ่งความละเอียดของกระดาษทรายเริ่มต้นที่เบอร์ 150-1500 ตามลำดับ หลังจากขัดกระดาษทรายแล้วนำชิ้นงานมาขัดด้วยผงเพชร (Diamond paste) ซึ่งผงเพชรที่ใช้โดยทั่วไปมีขนาดประมาณ 1 ไมครอน แล้วนำแอลกอฮอล์มาฉีดลงบนผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวแนวเชื่อมให้จนเป็นเงา แล้วทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วนำไปทำความสะอาดในเครื่องสั่นระบบอัลตราโซนิคประมาณ 60 วินาที แล้วนำไปเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน จากนั้นนำชิ้นงานมากัดผิวหน้า สำหรับการทดสอบโครงสร้างมหภาคของอะลูมิเนียมผสม การใช้กรดกัดจะต้องมีผสมของประกอบด้วยสารละลายไนตรัส 5% และพอกัดเสร็จทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดทำให้แห้งด้วยการเป่าลมร้อน เพื่อแสดงขอบเกรน รายละเอียดในเกรน และจุดบกพร่องต่างๆ ซึ่งสามารถทดสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตามพื้นที่ที่กำหนด



รูปที่ 2.5 ทิศทางการขีดกระดาดหลาย [14]

2.4.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง หมายถึงค่าความแข็งของวัสดุและเป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานการขีดข่วนให้เกิดรอยบนพื้นผิวโลหะ โดยการทดสอบความแข็งสามารถแบ่งออกได้หลายแบบดังนี้ การทดสอบความแข็งบริเวณ การทดสอบความแข็งร็อกเวล และการทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส แต่การทดสอบที่เห็นว่ามีเหมาะสมกับการวิจัยนี้คือ การทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบนี้สามารถทำการตรวจสอบในรูปแบบของโครงสร้างทางโลหะวิทยาได้ดี โดยเราจะใช้มุมของหัวกดเพชรมีค่าประมาณ 136° ดังรูปที่ 2.9 โดยเราจะใช้แรงในการกดประมาณ 50 กิโลกรัม แต่ส่วนใหญ่ในการทดสอบโดยการใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สจะใช้แรงที่มากกว่า หรือน้อยกว่า 50 กิโลกรัม เป็นต้น แรงที่ใช้กด ควรค้างไว้ที่ขึ้นทดสอบประมาณ 10 วินาที ในการทดสอบความแข็งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากในการทดสอบในการทดสอบความแข็งของชิ้นงานขึ้นอยู่กับ โครงสร้างจุลภาพ หรือกรรมวิธีต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส [30]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชาญชัย วิเศษสมุน และคณะ [31] ได้ศึกษาผลการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมร่วมกับการอบคืนตัวรอยเชื่อม ต่อสมบัติการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ST37 โดยกำหนดปัจจัยคือ 250 A และความเร็วในการเชื่อม 400 mm/min ในการศึกษาใช้เครื่องเชื่อม EWM รุ่น P351 ใช้ลวดเชื่อมรหัส ER 705-6 ใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอน 80% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 20% โดยนำชิ้นงานมาเชื่อมทับแนวตั้งตั้งแต่ 10-100 % และนำไปตัดในช่วง เพอร์เซ็น 10-100% แล้วนำเหล็กไปทดสอบหาคุณภาพทางกลด้านความแข็ง และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน พบว่า ในช่วงการเชื่อมทับแนว 80-90% ได้ค่าสมบัติทางกลด้านความแข็งที่ดีที่สุดและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน และบริเวณผลกระทบร้อนหลังจากการเชื่อมอบคืนตัวรอยเชื่อม โดยการเชื่อมทับแนวเม็ดเกรนจะมีขนาดใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับเนื้อชิ้นงานเชื่อม ทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานดีกว่าก่อนการอบคืนตัวรอยเชื่อม

ไพโรจน์ บุญเกิด [26] ได้ศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมต่อสมบัติของรอยต่อท่อต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI3041/AISI316 โดยใช้วัสดุในการทดลองคือ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI3041/AISI316 มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 mm และมีความหนา 1.2 mm มีขนาดยาว 190 mm รอยต่อชนถูกทำการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมด้วยตัวแปรการเชื่อม ประกอบด้วย การเชื่อมเดินแนวไม่เติมลวดเชื่อม กระแสเชื่อม 25-65A และความเร็วเดินแนวเชื่อม 80-110 mm/min ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมถูกเตรียมด้วยวิธีทางกลเพื่อทดสอบและตรวจสอบสมบัติต่างๆของรอยต่อชน ประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงดึง การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค และมีการทดสอบความแข็ง ซึ่งมีผลการทดลองที่ได้คือ การเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงการยึดตัวลดลง และค่าความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบช่องว่างระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิ ได้ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงดึงการยึดตัวและความแข็งของโลหะเชื่อม ตัวแปรที่เหมาะสมทำให้เกิดความแข็งแรงดึง 606.18 N/mm การยึดตัว 45.19% และค่าความแข็งของโลหะเชื่อม 190 HV พบได้ที่ตัวแปรจากการเชื่อมที่กระแสเชื่อม 45A และความเร็วเดินแนวเชื่อม 90 mm/min

จกมล ศรีธรร [32] ได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการเชื่อมต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมพอกผิวแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยสแตนเลสคาร์ไบด์หลอมเหลวโดยทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมทิกและกระบวนการเชื่อมแก๊สบนเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และใช้ลวดเติมทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ในการพอกผิวแข็งโดยจะทำการเชื่อมชิ้นงานโดยใช้ความเร็วและกระแสไฟที่ต่างกันเพื่อศึกษาว่าความเร็วและกระแสว่ามีผลต่อคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงหรือไม่การเชื่อมชิ้นงานด้วยกระแสไฟที่ 110A ให้ลักษณะแนวเชื่อมที่สมบูรณ์และมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งความสูงและความกว้างของแนวเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม 11.2 เซนติเมตรต่อนาทีที่กระแส 110A จะให้แนวเชื่อมที่มีลักษณะการซึมลึกดีมีรอยเชื่อมเป็นเกร็ดสวยงามเหมาะสมต่อการเชื่อมที่สุด ส่วนกระแสไฟต่ำและสูง เกินไป

ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม เนื่องจากการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ทำให้ไม่เหมาะกับการเชื่อมจากการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีนและการเชื่อมแบบทิก พบว่าการเชื่อมพอกผิวแข็งเติมหน้าบนชิ้นงานเหล็กกล้า SS400 แบบการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยแก๊สอะเซทิลีน จะมีค่าความแข็งแรงอยู่ที่ 868.86 HV ซึ่งมากกว่าการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบทิกที่มีความแข็งแรงอยู่ 664.56 HV เพราะบริเวณผิวของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งแบบแก๊สอะเซทิลีน จะมีการกระจายตัวของเม็ดทั้งเตนคาร์ไบด์อยู่บริเวณผิวของรอยเชื่อม ส่วนการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบทิกการกระจายตัวของเม็ดทั้งเตนคาร์ไบด์จะอยู่บริเวณท้องของแนวเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมจะประกอบด้วยเฟอไรต์และเพอร์ไรต์ที่มีเกรนละเอียด ทั้งนี้ความเร็วในการเชื่อมจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมอีกด้วย

สุรียา ประสมทองและ สุรียา น้ำแก้ว [33] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมลวดเชื่อมอะลูมิเนียมต่อสมบัติทางกล และส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุม พบว่าความเร็วในการเติมลวดเชื่อมที่ 10 เมตร/นาที มีอัตราการสึกกร่อนต่ำสุด ที่ 0.123 กรัม/นาที โครงสร้างในแนวเชื่อมไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากปริมาณอะลูมิเนียมลดลงส่งผลให้ไม่ก่อให้เกิดสารประกอบที่มีความแข็งแรงภายในแนวเชื่อม ปฏิกริยาอุทกเกิดขึ้นแทรกกระจายตัวบนโครงสร้างของ $FeAl_3$ และไม่พบรอยแตกร้าวในแนวเชื่อมเมื่อลดความเร็วในการเติมลวดเชื่อมอะลูมิเนียม แต่เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนประกอบทางเคมีของการเติมลวด 15 เมตร/นาที พบว่า มีการกระจายตัวของอะลูมิเนียมมากกว่าเหล็กมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบยูเทคติก $FeAl$ สลับกับโครงสร้างลามัลลายูเทคติก $FeAl_2$ และมีรอยแตกร้าวในแนวเชื่อม

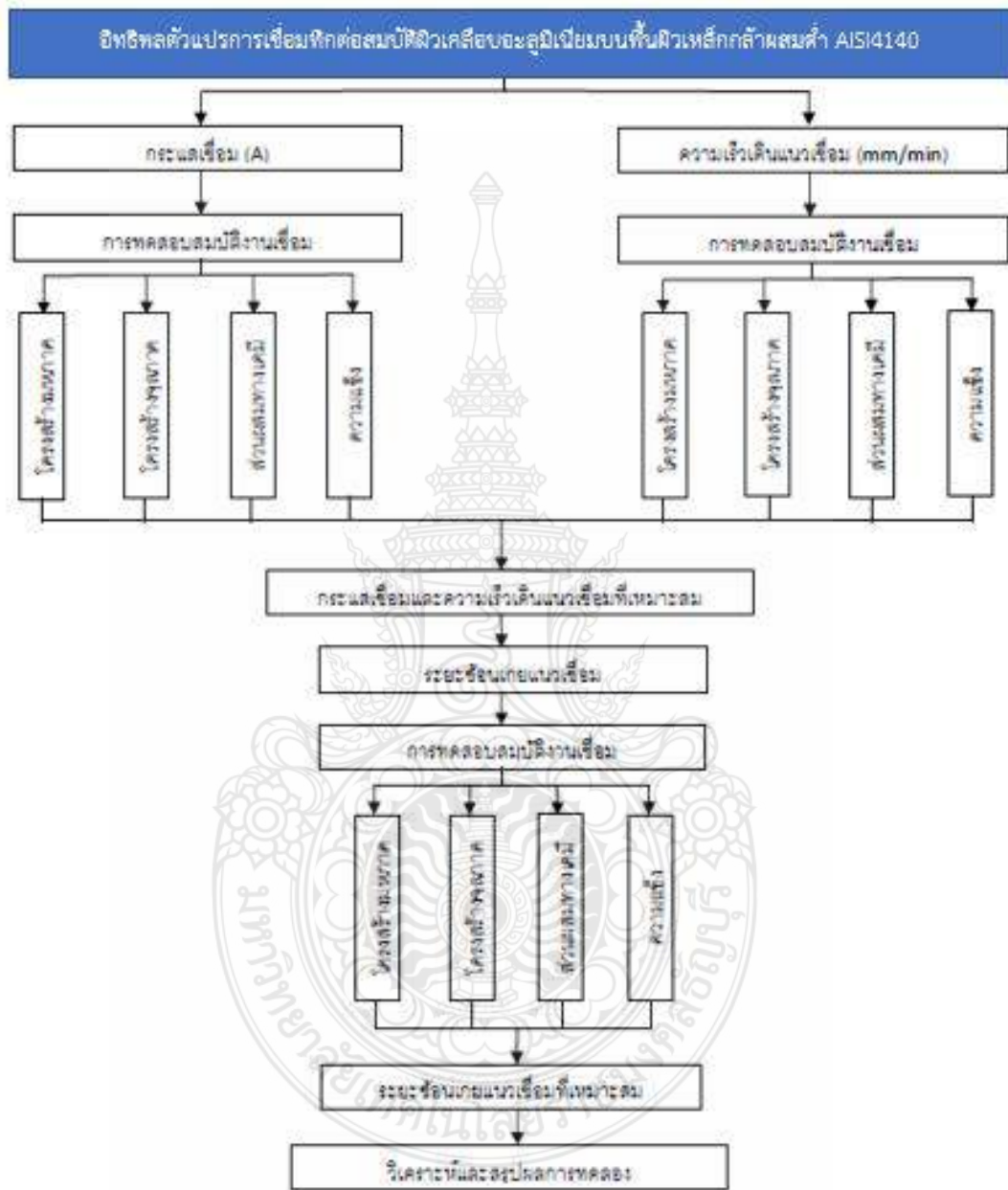
ประจักษ์ บัวอาจ [14] การสร้างชั้นผิวเคลือบอะลูมิเนียมผสมบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมโดยทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 170- 200 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนว 100 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการป้อนลวด 200 - 800 มิลลิเมตรต่อนาที และจำนวนแนวเชื่อมอะลูมิเนียม 1 - 3 ชั้น ผลการทดลองที่ได้คือ ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมให้ความแข็งแรงสูงสุด 846.3 Hv และเปอร์เซ็นต์การที่สูญเสียน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 1.04 % พบได้ว่าการเชื่อมทับแนว 2 ชั้น กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนว 100 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการป้อนลวด 200 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเกิดการเชื่อมทับที่มีจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นและกระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงสูงขึ้น อะลูมิเนียมและพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของผิวสัมผัสรอยต่อการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมทำให้ความแข็งแรงของชั้นผิวสัมผัสรอยต่อมีความแข็งแรงและต้านทานการสึกหรอสูง

Wen Wang et al. [34] ได้ทำการปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนของพลาสติกดีคูเหล็กเหนียวนำ (plasticity steel twinning-induced) โดยอะลูมิเนียมแบบจุ่มร้อนพร้อมกับการกระจายความร้อนตามมาพบว่าชั้นเคลือบประกอบด้วยเฟส Al $FeAl_3$ และ Fe_2Al_5 ในสภาวะจุ่มร้อนในขณะที่เฟส Fe_3Al พบว่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า TWIP ได้รับการปรับปรุงโดยมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้อินเทอร์เมทัลลิก (intermetallics) สามารถลดอัตราการสึกกร่อนได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเคลือบพื้นผิวเชื่อมอะลูมิเนียมบนเหล็กกล้าเมื่อทำการเคลือบและในการเคลือบอะลูมิเนียมบนเหล็กกล้าแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าความร้อนเข้าส่งผลโดยตรงกับค่าความแข็งและค่าความสมบูรณ์ที่เพิ่มขึ้น [14] และค่าความร้อนเข้าที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่การรวมตัวของพื้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน มีชั้นการรวมตัวที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความเหนียวที่เพิ่มขึ้นแต่ยิ่งค่าความร้อนเข้าเพิ่มขึ้นมากอาจส่งผลให้ค่าความเหนียวเปลี่ยนเป็นความเปราะ ในการเคลือบครั้งนี้ใช้กับเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 เนื่องจากเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 เป็นกลุ่มเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากมีโมลิบดีนัม และโครเมียมเป็นส่วนผสมสำคัญ ในการเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการชุบแข็ง ความต้านทานต่อการสึกหรอโดยเฉพาะสำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น เพลาข้อเหวี่ยงข้อต่อก้านพวงมาลัย เพลาล้อ ก้านสูบ รวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูงอื่นๆ และเมื่อคำนึงถึงกระบวนการในการเชื่อมจะพบว่า กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมมีใช้อย่างแพร่หลาย และ เป็นกระบวนการเชื่อมที่ น่าสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมที่อาร์กเสถียรและสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็ก และไม่ใช่อเหล็ก ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินโครงการ “อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกต่อสมบัติผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140”

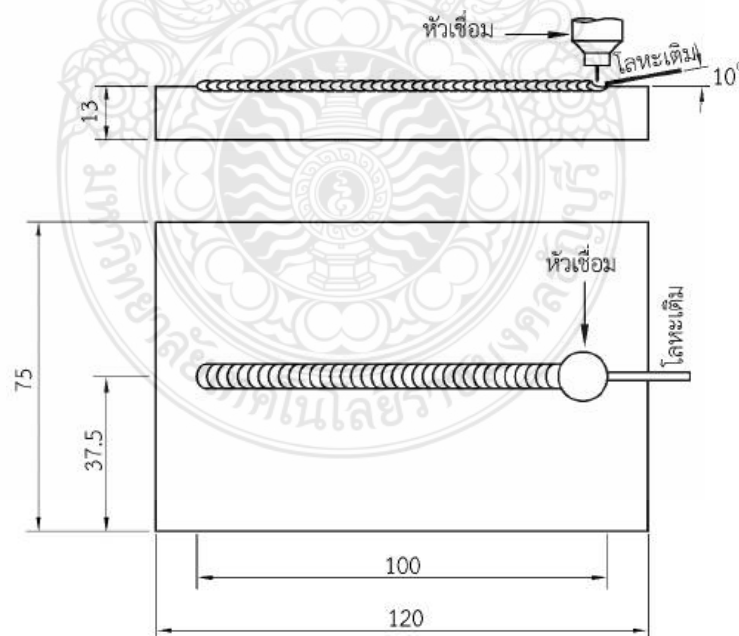
ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเรื่อง “อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกต่อสมบัติผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140” แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วย การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมสำคัญ 2 ตัวแปรหลัก คือ ความเร็วเดิน กระแสเชื่อม การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรการเชื่อม เพื่อหาค่าตัวแปรการเชื่อมเหมาะสมที่สามารถทำให้เกิดโลหะเชื่อมที่มีความแข็งสูงสุด ถูกดำเนินการ วิเคราะห์ และสรุปผลในบทต่อไป รายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอน AISI4140 แสดงส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 ถูกใช้เป็นโลหะฐานสำหรับการทดลองนี้ ทำการตัดให้มีขนาด ความกว้าง 75 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร และหนา 13 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าคาร์บอน AISI4140 (%น้ำหนัก)

โลหะผสม	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
AISI4140	0.38	0.15	0.75	0.80	0.15	สมดุล



รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดลองในการเชื่อม (หน่วย : mm)

3.2 กระบวนการสร้างชั้นพอกอะลูมิเนียม

กระบวนการสร้างชั้นพอกอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนทำได้โดยการใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม โดยการใช้เครื่องเชื่อมทิกกี้อี่ห้อ Fronius A-4600 Welds เครื่องเชื่อมชนิดนี้สามารถปรับความเร็วในการป้อนลวดได้ 10-1300 มิลลิเมตร/นาที ถูกออกแบบให้มีฝาครอบเปิด-ปิดได้สำหรับใส่ลวดเชื่อมแบบม้วนขนาด 300 มิลลิเมตร น้ำหนักไม่เกิน 15 กิโลกรัม มีลักษณะพิเศษคือ เครื่องสามารถนำลวดเชื่อมเติมลงได้อัตโนมัติดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมทิกกี้อใช้ในการเชื่อมชิ้นงาน

ลวดเชื่อมหรือโลหะเติม (Filler metal) ที่ใช้ในการเชื่อม คือ ลวดเชื่อมอะลูมิเนียม ER1100 โลหะเชื่อมที่ได้ทำให้เกิดสมบัติทางกลที่ดี ความสามารถในการเชื่อมที่ดี และความต้านทานการกัดกร่อน ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2 ลวดเชื่อมนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ถูกบรรจุเข้าสู่ชุดควบคุมลวดเติมดังรูปที่ 3.3 และถูกทำให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าเติมลงไปในพื้นที่การเชื่อมเท่ากับ 60 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นในการทำการทดลอง

ในการศึกษาตัวแปรการเชื่อมในการวิจัยนี้ ตัวแปรสำคัญที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนขาเข้า คือ กระแสเชื่อม และความเร็วเดินแนวเชื่อม ที่มีมีค่ากระแสเชื่อมมีค่า 75 100 125 150 และ 175 แอมแปร์ และค่าความเร็วเดินในการเชื่อมมีค่า 75 100 125 150 และ 175 มิลลิเมตรต่อ

นาที่ ที่ควบคุมความเร็วเคลื่อนที่ด้วยเครื่องเตาตัดแก๊สเดินบนรางเลื่อนเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.4 ถูกนำมาทำการเชื่อม โดยมีตัวแปรการเชื่อมที่ออกแบบไว้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียม AWS-ER 1100 (%น้ำหนัก)

โลหะผสม	Al	Si + Fe	Mn	are	Cu	Zn
AWS-ER1100	สมดุล	0.95	0.05	0.0003	0.125	0.010



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อม

ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนขาเข้า

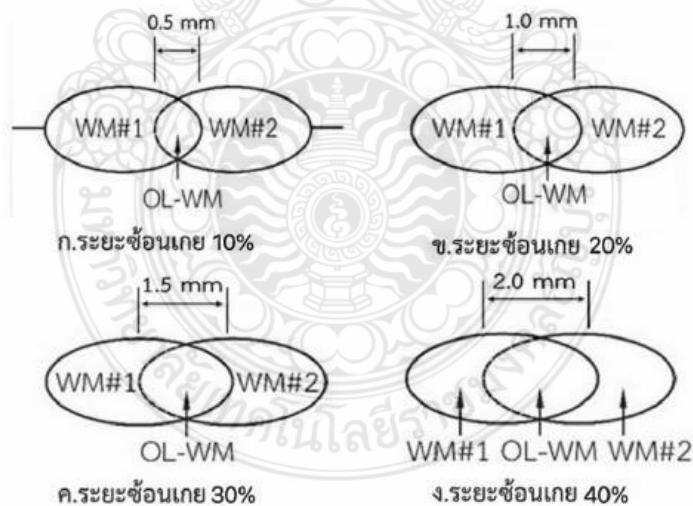
ตัวแปรการเชื่อม	ความเร็วเดินแนวเชื่อม (mm/min)					
	75	100	125	150	175	
กระแสเชื่อม (A)	75	×	×	×	×	×
	100	×	✓	✓	✓	✓
	125	×	✓	✓	✓	✓
	150	×	✓	✓	✓	✓
	175	×	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓ คือ สภาวะแนวเชื่อมสมบูรณ์ × คือ สภาวะแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์

การสร้างชิ้นพอกอะลูมิเนียมด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมในการศึกษานี้เป็นการเชื่อมแนวเดียวแบบไม่สายแนวเชื่อม การเชื่อมเป็นการเชื่อมแบบเทคนิคการเดินหน้า (Forward technique) กำหนดให้วางแท่งอิเล็กโทรดไว้ในแนวตั้งและทำมุมตั้งฉากกับพื้นระนาบ นอกจากนี้

โลหะถูกเติมลงด้านหน้าของการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด มุมที่ทำการเติมโลหะอยู่ที่ 10 องศา กับแนวระนาบ หรือทำมุม 80 องศากับแท่งอิเล็กโทรด และมีการเติมโลหะเติมแบบต่อเนื่องแบบอัตโนมัติ ด้วยอัตราการเติม 60 มิลลิเมตรต่อนาที การเชื่อมถูกทำการเชื่อมลงบนพื้นผิวของเหล็ก เป็นระยะทางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ที่กึ่งกลางชิ้นงานเชื่อมดังรูปที่ 3.2 ในการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมที่ประกอบด้วยกระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมถูกทำการเชื่อมเดินแนว 1 แนวเพื่อหาค่าตัวแปรกระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความแข็งสูงสุด หลังจากนั้นกระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เหมาะสมจะถูกนำไปทำการเชื่อมตัวแปรที่ 3 ต่อไป

การศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่ 3 คือ การศึกษาอิทธิพลของระยะซ้อนแนวที่มีผลต่อสมบัติของโลหะเชื่อมพอกอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ การเชื่อมเดินแนวแบบไม่ส่ายลวดเชื่อมแนวที่ 1 ถูกทำการเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีความยาว 100 มิลลิเมตร หลังจากนั้นแนวเชื่อมที่ 2 จะถูกเชื่อมซ้อนแนวบนแนวที่ 1 ด้วยระยะซ้อนแนวดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีค่าระยะซ้อนแนว 10 20 30 และ 40% โดยการกำหนดค่ามาจากความกว้างของโลหะเชื่อมที่ใช้กระแส 150 แอมแปร์ และความเร็วเดิน 150 มิลลิเมตรต่อนาทีที่มีค่าความกว้างแนวเชื่อมอยู่ที่ 5.15 mm ซึ่งเป็นตัวแปรที่เหมาะสมและชิ้นงานที่ได้ถูกนำไปทำการตรวจสอบสมบัติเพื่อหาค่าระยะซ้อนแนวที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 3.5 ภาพจำลองแนวเชื่อมซ้อนแนว 2 แนวที่ระยะการเชื่อมซ้อนแนวแตกต่าง

3.3 การทดสอบสมบัติงานเชื่อม

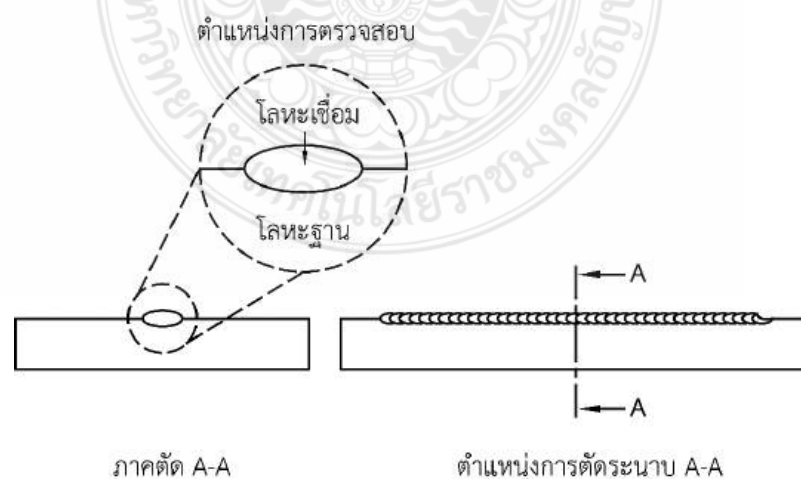
ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยตัวแปรที่กำหนดถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติโลหะเชื่อม โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดด้วยใบตัดเสียดสีความเร็วรอบสูงที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็น

โลหะเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำถูกนำไปตัดด้วยเครื่องตัดที่มีใบตัดเสียดสีความเร็วรอบสูงมีการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็นดังรูปที่ 3.6 การดำเนินการดังกล่าวทำให้โครงสร้างของโลหะเชื่อมและโลหะฐานเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื่องจากความร้อนน้อยที่สุดในแนวตามยาวของเหล็กกล้าผสมต่ำหรือแนวตัดขวางแนวเชื่อม ตำแหน่งที่เลือกนำมาใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยากำหนดให้ทำการตรวจสอบที่ทิศทางเดียวกับระนาบตั้งฉากโดยเป็นทิศทางเดียวกับการเดินแนวเชื่อมที่มีทิศทางการเดินแนวเชื่อมดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการตัดและตรวจสอบสมบัติของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนเหล็กกล้าผสมต่ำ



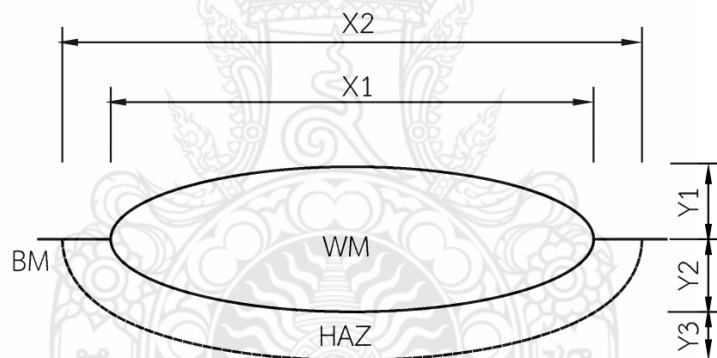
รูปที่ 3.8 การขัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้าง

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยเครื่องตัดด้วยใบตัดเสียดสีความเร็วรอบสูงถูกนำมาทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด โดยเริ่มต้นจากเบอร์ 150- 1500 ตามลำดับ ในขั้นตอนการขัดกระดาษทรายนำกระดาษทรายวางบนจานขัดในขณะที่เครื่องทำงานจะต้องเปิดน้ำไว้ตลอดเวลาการขัดหลังจากขัดกระดาษทรายแล้วนำชิ้นงานมาขัดด้วยผงเพชร (Diamond paste) ซึ่งผงเพชรที่มีขนาดประมาณ 1 ไมครอนเป็นการขัดผิวมันของชิ้นงานด้วยจานขัดชิ้นงานเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 3.8 จนกระทั่งชิ้นงานมีความมันเงาคล้ายกระจก ผิวหน้าที่ผ่านการเตรียมด้วยการขัด ถูกนำไปทำการกัดผิวหน้าที่มีส่วนผสมของกรดตามมาตรฐาน ASTM E407 [35] ประกอบด้วยสารละลายไนตรัส 5% จากนั้นใช้สาลีจุ่มลงในสารละลายและทาลงบนหน้าชิ้นงานทิ้งไว้ประมาณ 15 วินาที จากนั้นทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดทำให้แห้งด้วยการเป่าลมร้อน เพื่อแสดงขอบเกรน รายละเอียดในเกรน และ จุดบกพร่องต่างๆ ซึ่งสามารถทดสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตามพื้นที่ที่กำหนดด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่ำดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องถ่ายภาพกำลังขยายต่ำเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



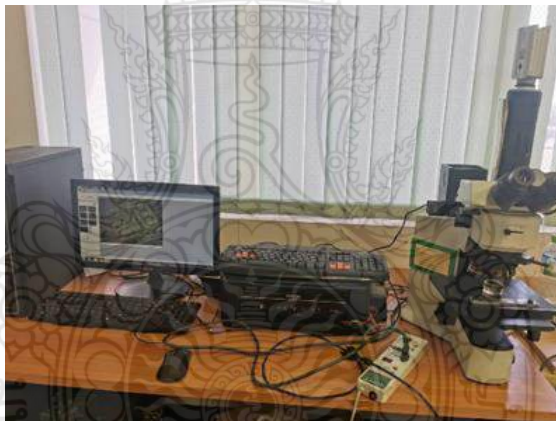
รูปที่ 3.10 ภาพร่างการวัดขนาดโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อม 1 แนว

ภาพร่างการวัดขนาดโครงสร้างมหภาคโลหะเชื่อมแนวที่ 1 ดังรูปที่ 3.10 ในการเปลี่ยนแปลงกระแสและความเร็วเดินในการเชื่อมนั้นทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีการตรวจสอบรูปร่างของแนวเชื่อม 1 แนวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้

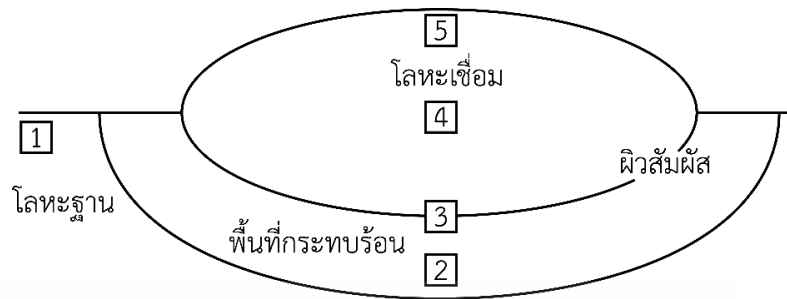
- ความกว้างของโลหะเชื่อม (Weld width: x_1)
- ความกว้างของพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affected zone width: x_2)
- ความนูนของโลหะเชื่อม (Weld convex: y_1)
- ระยะหลอมลึกของโลหะเชื่อม (Weld penetration: y_2)
- ระยะหลอมลึกของพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affected zone penetration: y_3)

ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมได้จาก ความกว้างของโลหะเชื่อม ความกว้างของพื้นที่กระทบร้อน ระยะหลอมลึกของโลหะเชื่อม และระยะหลอมลึกของพื้นที่กระทบร้อนที่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาของโลหะเชื่อมจะมีค่าลดลง เป็นต้น

ชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดด้วยสารละลายไนตรัส 5% เพื่อการแสดงรายละเอียดของเกรน และเฟสของโลหะเชื่อมและโลหะฐาน ถูกนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light optical microscope: LOM) ดังรูปที่ 3.11 ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม ความเร็วเดิน ทำการตรวจสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ คือ โลหะฐาน (Base metal: BM) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน (Interface of weld metal and base metal: IF) กึ่งกลางโลหะเชื่อม (Center of Weld metal: CWM) และผิวหน้าโลหะเชื่อม (Surface of Weld metal: CWM) และเมื่อได้ตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากการตรวจสอบ จึงทำการตรวจสอบความแข็งต่อไป



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง



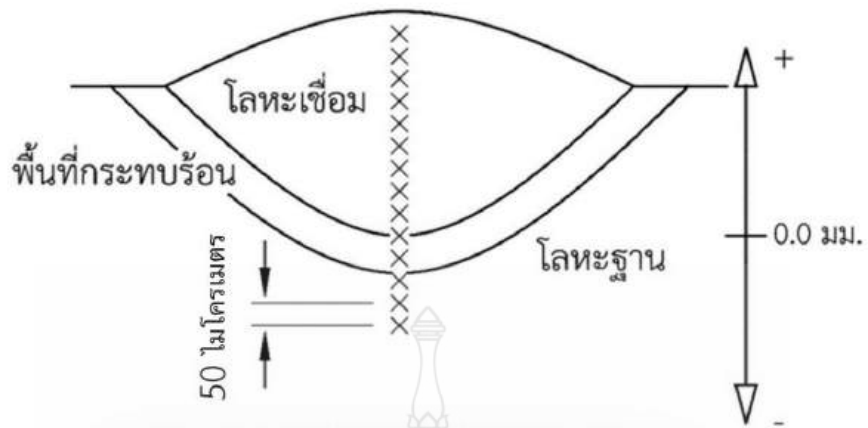
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกอะลูมิเนียม 1 แนวบนพื้นผิว เหล็กกล้าผสมต่ำ

3.3.3 การทดสอบความแข็ง

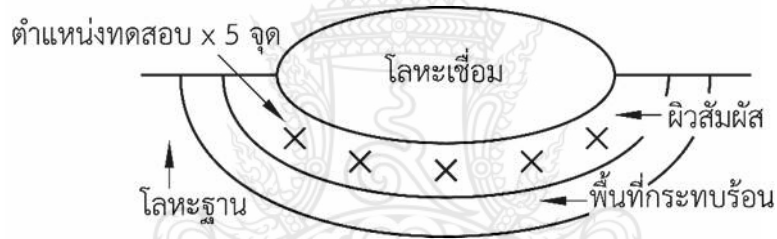
ชิ้นงานเชื่อมที่ได้ถูกนำมาทำการตัดออกเพื่อทำการทดสอบความแข็ง ในการทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมทำได้โดยใช้การทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ดังรูปที่ 3.13 สภาวะการทดสอบประกอบด้วยแรงกด 50 กรัมแรง และเวลาดำกดแช่ 10 วินาที โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วยส่วนที่ 1 คือการทดสอบแนวความแข็งจากพื้นผิวโลหะเชื่อมสู่โลหะฐาน (Hardness profile) ดังรูปที่ 3.14 และส่วนที่ 2 คือ การทดสอบเฉพาะตำแหน่งที่ประกอบด้วยความแข็งของโลหะเชื่อม พื้นผิวสัมผัส พื้นที่กระทบร้อน และพื้นที่โลหะฐาน ดังตัวอย่างของการทดสอบเฉพาะตำแหน่งผิวสัมผัสจำนวน 5 จุดในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์



รูปที่ 3.14 แนวการวัดความแข็งโลหะเชื่อม



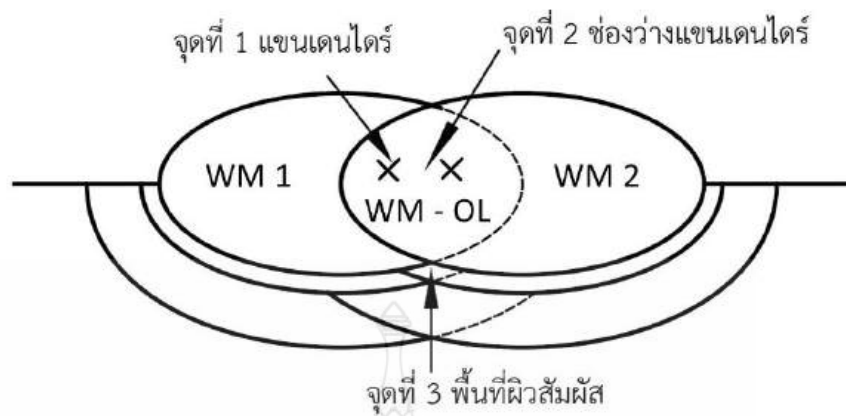
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการวัดความแข็งที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมพอกอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าผสม
ต่ำ

3.3.4 การวิเคราะห์หาราดต่างๆในชิ้นงานทดสอบโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบ ส่องกราด



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีของธาตุที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งโดยจะทำการตรวจสอบในตัวแปรแนวเชื่อมที่ 3 หลังจากที่ได้ตัวแปรที่เหมาะสมในตัวแปรที่ 1 แล้ว และจึงได้กำหนดตัวแปรคือ 10% 20% 30% และ 40% เพื่อทำการวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี สภาวะการทดสอบประกอบด้วยกำลังขยาย 2000 เท่า และความคมชัดที่ 15KV โดยแบ่งการตรวจสอบออกเป็น 3 จุด ประกอบด้วยจุดที่ 1 คือการวิเคราะห์ตรงแกนเดนไดรท์ จุดที่ 2 คือ การวิเคราะห์ตรงช่องว่างแกนเดนไดรท์ และจุดที่ 3 คือ การวิเคราะห์ตรงพื้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานเพื่อหาส่วนผสมทางเคมีหรือปริมาณธาตุในรอยเชื่อมตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 บริเวณตำแหน่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

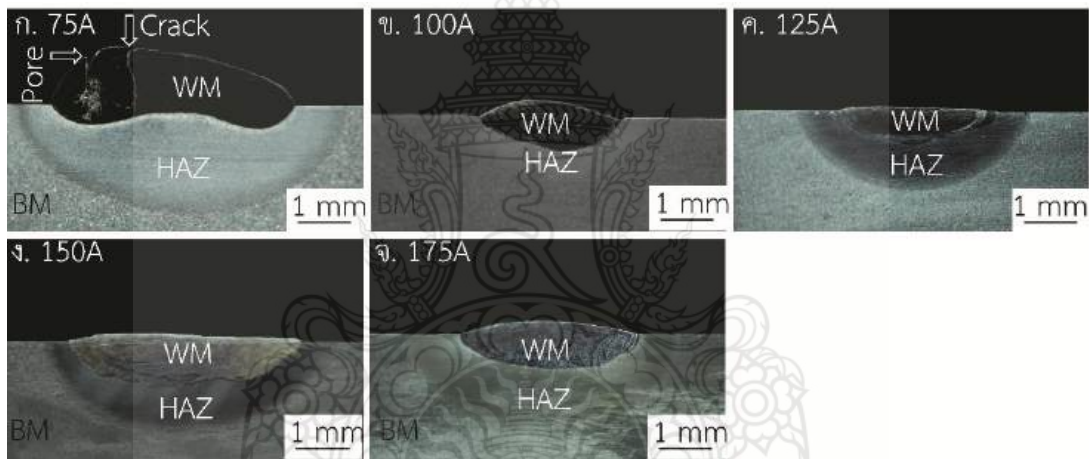


บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลกระแสเชื่อมทิกที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140

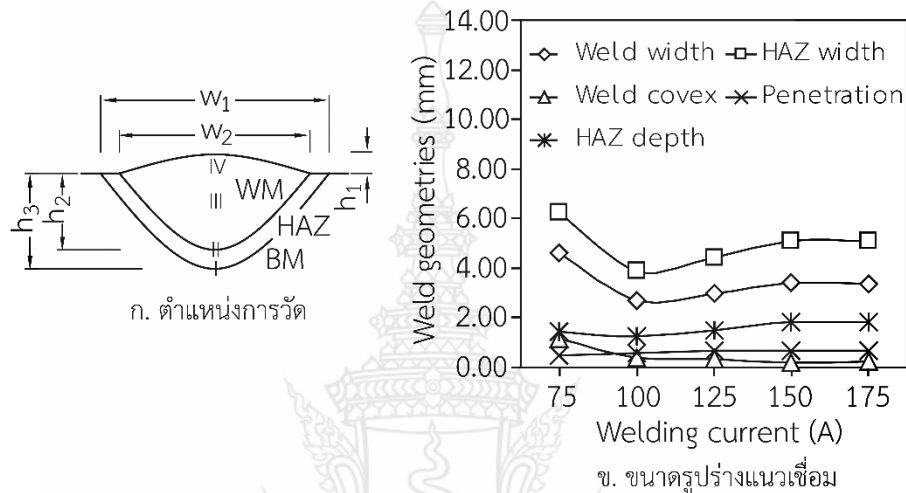
โลหะเชื่อมอะลูมิเนียมถูกทำการเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม หรือการเชื่อมทิก ตัวแปรการเชื่อมทิกที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของโลหะเชื่อมในหัวข้อนี้ประกอบด้วยกระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อทำการเชื่อมแบบเดินแนวไม่สายลวดเชื่อม (Bead-on-plate welding) จำนวน 1 แนว แนวเชื่อมถูกทำการเตรียมเพื่อทำการตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ประกอบด้วยการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา และการทดสอบความแข็งของโลหะเชื่อม ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่างกัน และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าแนวเชื่อมแบ่งเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วยพื้นที่โลหะเชื่อม (Weld metal: WM) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และพื้นที่โลหะฐาน (Base metal: BM) เมื่อกระแสเชื่อมต่ำ 75 แอมแปร์เมื่อถูกนำมาใช้เชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าเกิดความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม รอยแตกร้าว (Crack) เกิดการก่อตัวขึ้นและมีความยาวต่อเนื่องจากผิวหน้าแนวเชื่อมจนถึงโลหะฐาน นอกจากนี้รูพรุน (Pore) ที่มีลักษณะการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ก่อตัวขึ้นที่ด้านซ้ายของแนวเชื่อมดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 4.1

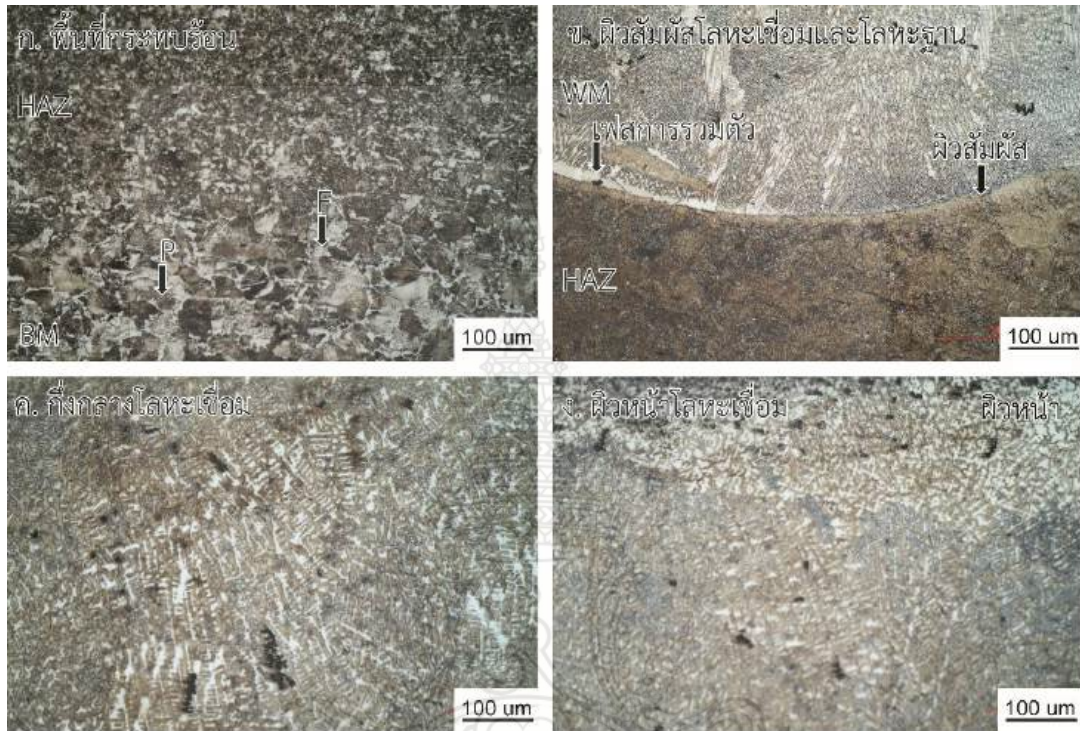
ก. นอกจากนั้นการหลอมลึกของโลหะเชื่อมลงสู่โลหะฐานค่อนข้างน้อย เนื่องจากความร้อนขาเข้าที่ให้แก่โลหะฐานมีค่าต่ำที่สุดในหัวข้อนี้ อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสเชื่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 100-175 แอมแปร์ โลหะเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ปราศจากจุดบกพร่อง เช่น รอยแตกร้าวหรือรูพรุนในโลหะเชื่อม ดังรูปที่ 4.1 ข.-จ. การหลอมละลายของโลหะเชื่อมที่กระแสสูงมีความเหมาะสมกว่าเนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานมีความราบเรียบและสม่ำเสมอว่าการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75 แอมแปร์



รูปที่ 4.2 ผลการวัดรูปร่างของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่างกัน และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อเปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของโลหะเชื่อมที่ได้ระหว่างกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ พบว่าแนวเชื่อมมีแนวโน้มของแนวเชื่อมที่มีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบขนาดของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่างกันจึงถูกดำเนินการโดยการเปรียบเทียบส่วนต่าง ๆ ของแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.2 ก. ประกอบด้วยความกว้างของแนวเชื่อม (Weld width: w_1) ความกว้างของพื้นที่กระทบร้อน (HAZ width: w_2) ความนูนของแนวเชื่อม (Weld convex: h_1) การหลอมลึก (Weld penetration: h_2) และความลึกของพื้นที่กระทบร้อน (HAZ depth: h_3) ที่กระแสเชื่อมต่ำ 75 แอมแปร์ การเกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ การเกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อม และการหลอมลึกของโลหะเชื่อมต่ำ ส่งผลทำให้ค่าความกว้างโลหะเชื่อม ความกว้างพื้นที่กระทบร้อน ความนูน และความลึกของพื้นที่กระทบร้อนมีค่าสูงสุด แต่มีค่าการหลอมลึกของโลหะเชื่อมต่ำสุด ในโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ เมื่อความร้อนขาเข้าพอเพียงในการหลอมละลายโลหะสวดเชื่อมและโลหะฐาน และเกิดเป็นโลหะเชื่อมสมบูรณ์จากการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ ขนาดแนวเชื่อมส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดแนวเชื่อมเมื่อ

กระแสเชื่อมเปลี่ยนแปลงระหว่าง 100-175 แอมแปร์ พบว่าความกว้างโลหะเชื่อม ความกว้างพื้นที่
 กระทบร้อน การหลอมลึก และความลึกของพื้นที่กระทบร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าความนูนของแนว
 เชื่อมมีแนวโน้มลดลง กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ คือจุดที่ทำให้เกิดความกว้างโลหะเชื่อม ความกว้าง
 พื้นที่กระทบร้อน การหลอมลึก และความลึกของพื้นที่กระทบร้อนสูงสุด และให้ค่าความนูนของแนว
 เชื่อมมีแนวโน้มต่ำสุด



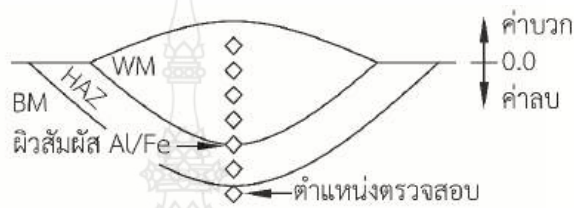
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วย
 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตร
 ต่อนาที ถูกนำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อจุดประสงค์ในการ
 ทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของแนวเชื่อม การ
 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคได้ทำการตรวจสอบพื้นที่ต่าง ๆ รวม 4 จุดดังรูปที่ 4.2 ก. ประกอบด้วย
 ตำแหน่งที่ I พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐานและพื้นที่กระทบร้อน ตำแหน่งที่ II พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง
 พื้นที่กระทบร้อนและโลหะเชื่อม ตำแหน่งที่ III พื้นที่กึ่งกลางโลหะเชื่อมอะลูมิเนียม และตำแหน่งที่ IV
 พื้นที่ผิวหน้าโลหะเชื่อม

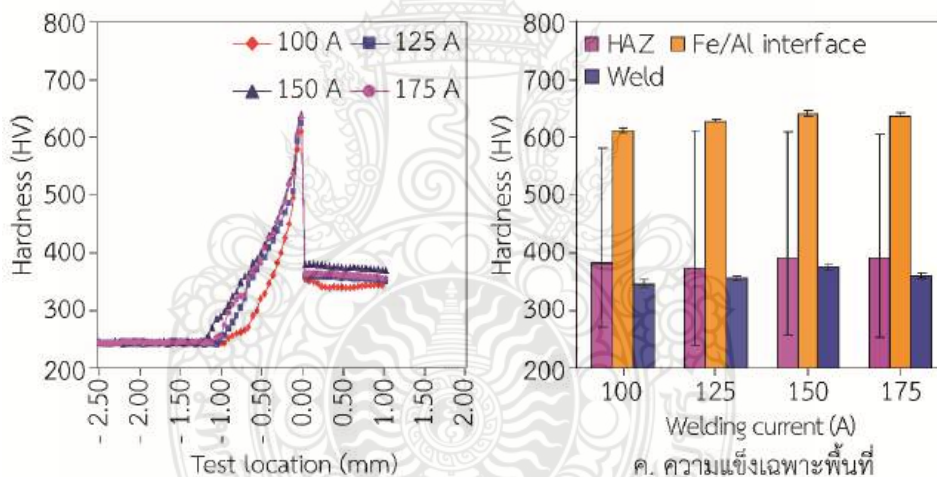
รูปที่ 4.3 ก. แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานและพื้นที่กระทบร้อน ที่ด้านล่างของ
 รูปภาพ คือ พื้นที่โลหะฐานเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสหลัก 2 เฟส คือ เฟส
 เพิลไลท์ (Pearlite: P) มีพื้นที่หลักสี่เหลี่ยม ที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูงเนื่องจากปริมาณคาร์บอนสูง
 และเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite: F) มีพื้นที่สีขาว ที่มีความแข็งต่ำและความสามารถในการยืดหยุ่นเนื่องจาก
 ปริมาณคาร์บอนต่ำ เฟสเพิลไลท์ที่แสดงด้วยลูกศรตัวพี่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและถูกล้อมรอบด้วยเฟส

เฟอไรท์ที่แสดงด้วยลูกศรเอฟ เฟสทั้งสองนี้จะมีขนาดเล็กและเกิดการรวมตัวเข้าด้วยกันเมื่อทำการตรวจสอบที่บริเวณพื้นที่กระทบบร้อน

การรวมตัวของเฟสเพิลไลท์และเพิลไลท์ที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นและสมบูรณ์เมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบบร้อนดังรูปที่ 4.3 ข. ที่ผิวสัมผัสแสดงความแตกต่างระหว่างพื้นที่กระทบบร้อนซึ่งไม่เกิดการหลอมละลายและพื้นที่โลหะเชื่อมอะลูมิเนียมที่เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวกลับเป็นโลหะเชื่อมซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเดนไดรท์ที่มีทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัสและพุ่งขึ้นสู่ผิวหน้าของแนวเชื่อม ที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบบร้อนพบพื้นที่การรวมตัวของโลหะเชื่อมและโลหะฐานเกิดเป็นเฟสอันดับสามสีขาว แต่มีความหนาของผิวสัมผัส (Interface thickness) ที่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวผิวสัมผัส



ก. ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง



ข. แนวความแข็งตั้งฉากผิวสัมผัส

ค. ความแข็งเฉพาะพื้นที่

รูปที่ 4.4 ความแข็งลากผ่านแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่าง และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมแสดงการก่อตัวของโครงสร้างเดนไดรท์ดังรูปที่ 4.3 ค. ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แสดงการแข็งตัวในสภาวะที่ไม่สมดุล ความแข็งสูงและมีความเปราะ [36] ต้นเดนไดรท์ (Primary dendrite arm) มีทิศทางชี้ไปด้านบนของแนวเชื่อมซึ่งเป็นทิศทางการเย็นตัวของโลหะเชื่อม นอกจากนั้นมีแขนเดนไดรท์ทุติยภูมิ (Secondary dendrite arm) ขนาดประมาณ 4-5 ไมโครเมตรแยกตั้งฉากออกมาจากต้นเดนไดรท์ โครงสร้างเดนไดรท์นี้มีขนาดของแขนเดนไดรท์ขึ้นกับอัตราการเย็นตัวของโลหะเชื่อม ดังพบได้เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างเดนไดรท์ที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.3 ง.

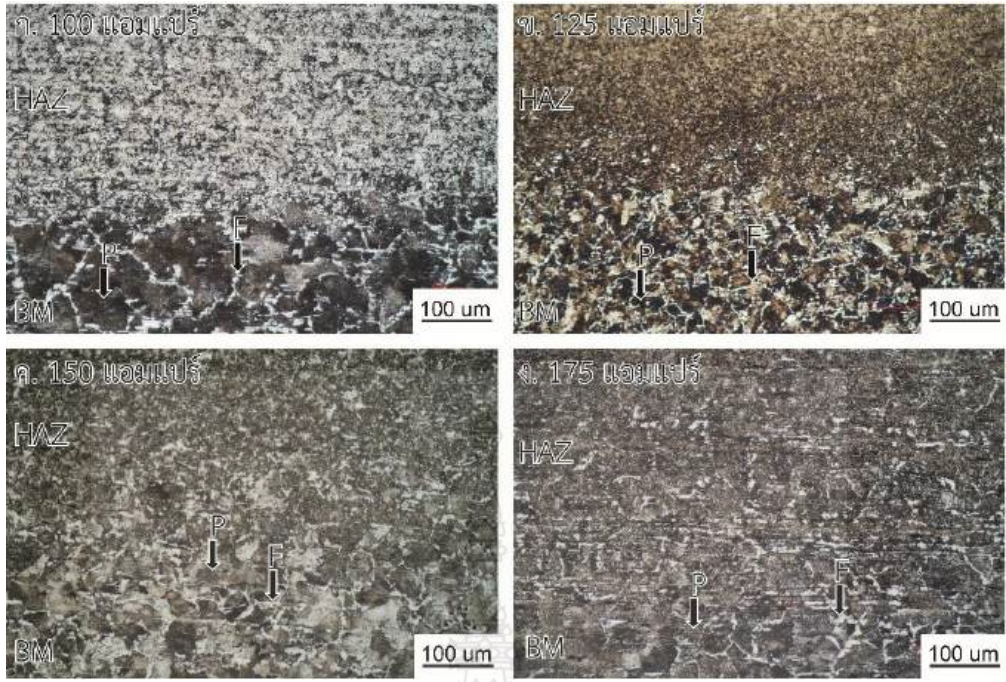
ชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาถูกทำการตรวจสอบความแข็งเพื่ออธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะวิทยาและความแข็ง การทดสอบความแข็งถูกดำเนินการโดยการใช้

แรงกด 300 กรัมแรงและเวลาดกดแค่ 10 วินาที ในการทดสอบความแข็งแบบแนวตั้งฉากผิวหน้าแนวเชื่อมถูกดำเนินการดังรูปที่ 4.4 ก. กำหนดให้จุดเริ่มต้นการทดสอบ หรือจุด 0.0 มิลลิเมตร คือตำแหน่งบนผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อน หากทำการทดสอบความแข็งที่ตำแหน่งค่าเป็นบวก คือ การทดสอบที่ตำแหน่งโลหะเชื่อม ขณะที่การทดสอบความแข็งที่ตำแหน่งค่าเป็นลบ คือ การทดสอบที่ตำแหน่งพื้นที่ที่กระทบร้อนและโลหะฐาน ระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ คือ 50 ไมโครเมตร

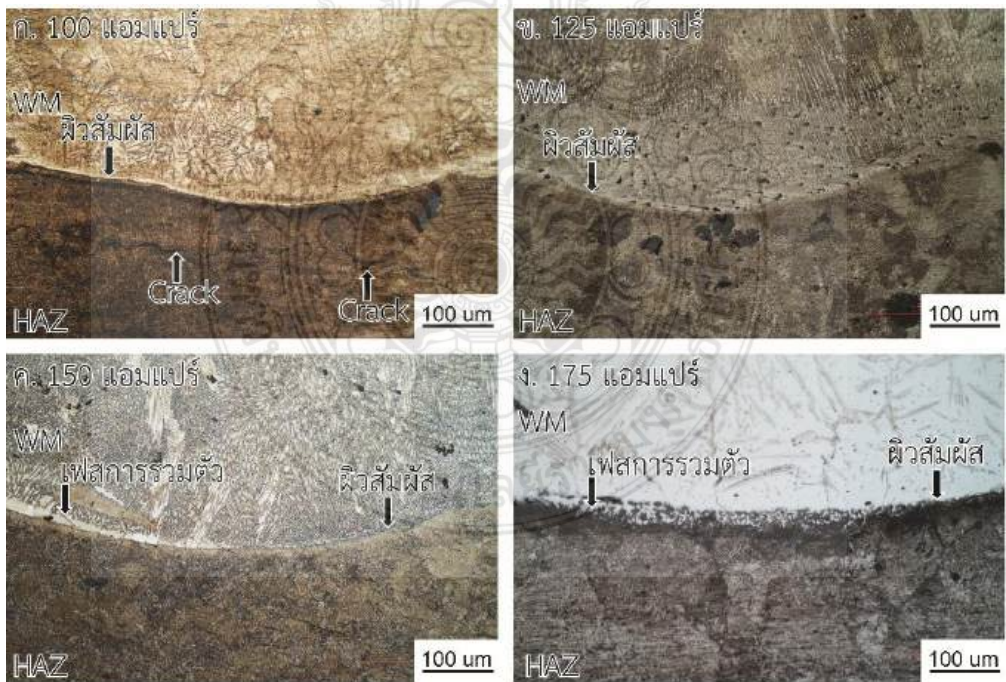
ผลการทดสอบความแข็งแบบแนวตั้งฉากผิวหน้าแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.4 ข. พบว่า โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที ที่โลหะฐานเหล็กกล้าผสมต่ำที่ไม่ได้รับผลกระทบความร้อนจากการเชื่อมมีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 240 HV ค่าความแข็งนี้มีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อนที่ระยะ 1.00 มิลลิเมตร ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นในพื้นที่ที่กระทบร้อนจนกระทั่งตำแหน่งการทดสอบ คือ ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อน หรือระยะ 0.0 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการลดขนาดของเกรนในพื้นที่ที่กระทบร้อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมดังที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.3 ก. และ ข. ความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนนี้มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 240-580 HV ที่ตำแหน่งผิวสัมผัสนี้ค่าความแข็งมีค่าสูงสุด 639 HV เนื่องจากตำแหน่งผิวสัมผัสเกิดเฟสการรวมตัวของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและโลหะฐานเหล็กกล้าดังรูปที่ 4.3 ข. หลังจากนั้นค่าความแข็งลดลงมาที่ประมาณ 353 HV เมื่อทำการตรวจสอบโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมที่ประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์ ค่าความแข็งของโลหะเชื่อมมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้พื้นผิวแนวเชื่อมเนื่องจากการลดขนาดของโครงสร้างเดนไดรต์ดังรูปที่ 4.3 ค. และ ง.

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแบบแนวตั้งฉากผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ ดังรูปที่ 4.4 ข. พบว่ากระแสเชื่อม 100 125 และ 175 แอมแปร์ แสดงค่าความแข็งต่ำกว่าเมื่อทำการทดสอบความแข็งในพื้นที่ที่กระทบร้อน ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อนและโลหะเชื่อม เมื่อนำค่าความแข็งแบบแนวตั้งฉากผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมมาสร้างกราฟความแข็งเฉพาะตำแหน่งการตรวจสอบดังรูปที่ 4.4 ค. พบว่าค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อน ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อน และโลหะเชื่อมมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100-150 แอมแปร์ และมีค่าคงที่เมื่อกระแสเชื่อมเปลี่ยนแปลงเป็น 175 แอมแปร์ การเพิ่มความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการลดขนาดของเกรนกลมมนที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที พบพื้นที่การรวมตัวของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและโลหะฐานเหล็กกล้าผสมต่ำในผิวสัมผัสที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ ความหนาของพื้นที่การรวมตัวค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแสต่ำ 100 แอมแปร์ และไม่มีความสม่ำเสมอเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 และ 175 แอมแปร์

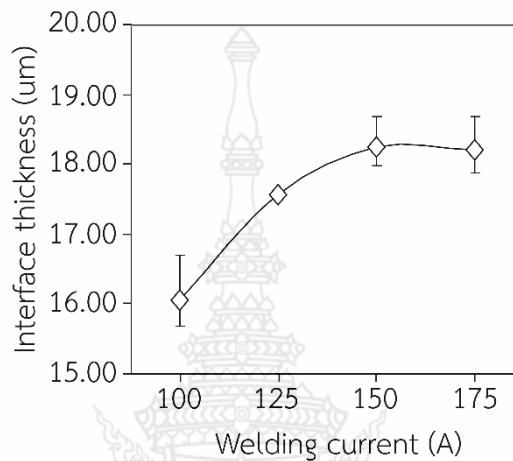


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐานและพื้นที่ที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที



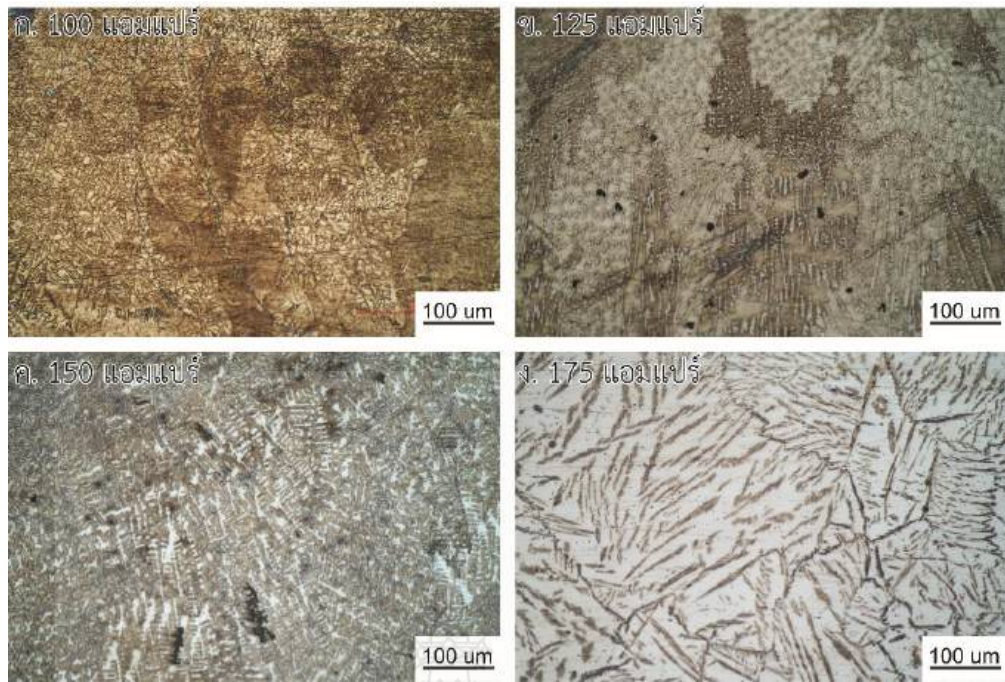
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบโครงสร้างผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

นอกจากนั้นเมื่อทำการพิจารณาพื้นที่การรวมตัวของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 175 แอมแปร์แล้ว พบว่ามีลักษณะคล้ายช่องตะแกรงไม่หนาแน่นเป็นแผ่นดังที่พบในพื้นที่การรวมตัวของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-150 แอมแปร์ ความหนาที่แตกต่างของพื้นที่การรวมตัวนี้ถูกทำการวัดและแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่ากระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มในการเพิ่มความหนาของพื้นที่การรวมตัวที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อน ค่าความหนาสูงสุด 639 HV พบได้เมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ แนวโน้มความหนาที่แตกต่างนี้สัมพันธ์โดยตรงทำให้ค่าความแข็งของผิวสัมผัสเกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.7 ความหนาของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าโครงสร้างเดนไดรต์มีขนาดของแขนเดนไดรต์ที่เล็กลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นและมีขนาดต้นเดนไดรต์ที่ยาวขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเท่ากับ 175 แอมแปร์ อย่างไรก็ตามเพื่อการเปรียบเทียบขนาดของเดนไดรต์ที่ตรวจสอบพบในโครงสร้างโลหะเชื่อม ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิจึงถูกทำการตรวจสอบดังรูปที่ 4.8 ก. ภาพร่างโครงสร้างเดนไดรต์ประกอบด้วยแขนปฐมภูมิ (Primary dendrite arm) หรือต้นเดนไดรต์ และแขนทุติยภูมิ (secondary dendrite arm) ในการตรวจสอบความแตกต่างระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ (Secondary dendrite arm spacing: SDAS) หรือค่า λ ในรูปที่ 4.8 ก. ถูกทำการวัดและทำการเฉลี่ยเพื่อบ่งบอกขนาดของเดนไดรต์ ค่า SDAS นี้จะแปรผกผันกับความแข็งและความแข็งแรง หากโครงสร้างเดนไดรต์มีค่า SDAS ต่ำ โลหะนั้นจะมีความแข็งและความแข็งแรงสูง [37] ผลของการวัดค่า SDAS ในรูปที่ 4.8 ข. พบว่าค่า SDAS มีแนวโน้มในการลดค่าลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น และแสดงค่า SDAS ต่ำสุดที่กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ การลดขนาดเดนไดรต์ลงนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-150 แอมแปร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบโครงสร้างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

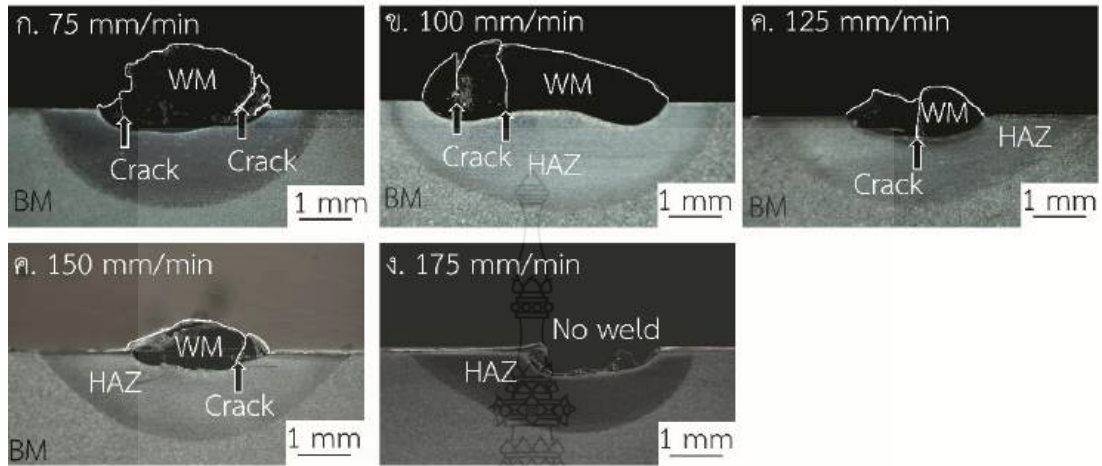
โลหะเชื่อมอะลูมิเนียมถูกเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยกระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมตีกที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่สำคัญมีดังนี้

- กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความกว้างของแนวเชื่อม การลดความนูนของแนวเชื่อม และการเพิ่มการหลอมลึกของโลหะเชื่อมสู่โลหะฐานเหล็กกล้าผสมต่ำ
- กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งของพื้นที่กระแทกร้อน ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน และโลหะเชื่อม
- การเพิ่มความแข็งของพื้นที่กระแทกร้อน ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน และโลหะเชื่อม เกิดขึ้นเนื่องจากการลดขนาดเกรนของพื้นที่กระแทกร้อน การเพิ่มความหนาของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานที่แสดงการรวมตัวเพิ่มขึ้นของอะลูมิเนียมและเหล็ก และการลดขนาดเดนไดรต์ในโลหะเชื่อม
- กระแสเชื่อมที่มีความเหมาะสมในการทำให้เกิดชั้นผิวเคลือบอะลูมิเนียมที่เกิดจากลวดเชื่อม ER1100 บนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 คือ กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์

4.2 อิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อมตีกที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140

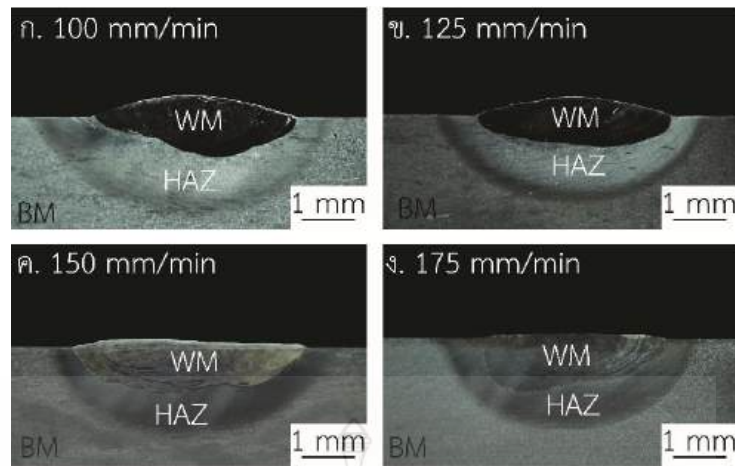
ในการเชื่อมโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำในหัวข้อนี้ กระแสเชื่อมตีกถูกกำหนดให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 75-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่า 75-175

มิลลิเมตรต่อนาที แนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำมาทำการศึกษา โครงสร้างโลหะวิทยาและความแข็ง เพื่อหาค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีความเหมาะสมต่อการศึกษาระยะเชื่อมในหัวข้อที่ 4.1 ต่อไป



รูปที่ 4.9 จุดบกพร่องในโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาที

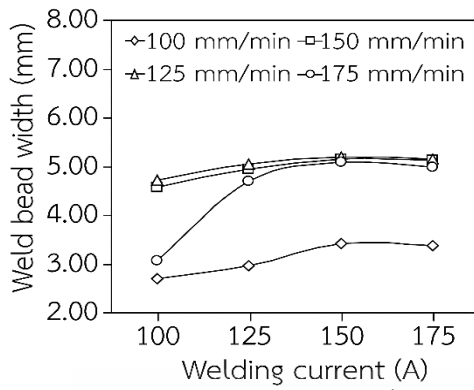
ในการเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที ในหัวข้อที่ 4.1 ที่ผ่านมา พบว่าโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ นั้นทำให้เกิดแนวเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ เกิดรอยแตกกร้าวและรูพรุนในโลหะเชื่อม และไม่เหมาะสมในการนำมาทำการเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าได้เนื่องจากความร้อนที่ได้มีค่าไม่เพียงพอในการทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วเดินที่มีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม กระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ ถูกนำมาเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าอีกครั้งด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาทีและทำให้ได้โครงสร้างมหภาคดังรูปที่ 4.9 ขนาดของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาทีแสดงความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม เช่น รูพรุนในโลหะเชื่อมอะลูมิเนียม และการแตกกร้าวในแนวเชื่อม แนวเชื่อมมีแนวโน้มที่มีขนาดลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความเร็วเดินแนวเชื่อมสูงสุด 175 มิลลิเมตรต่อนาที การหลอมละลายระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานไม่สามารถเกิดขึ้นได้



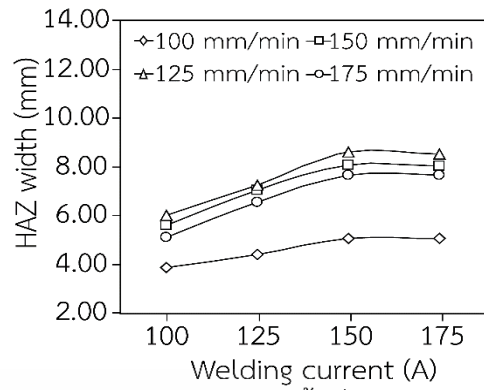
รูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วย กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ซึ่งเป็นกระแสเชื่อมที่ทำให้เกิดความแข็งสูงสุดที่โลหะเชื่อมและผิวสัมผัสในหัวข้อที่ 4.1 และความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาที ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคประกอบด้วยพื้นที่ 3 ส่วน คือ โลหะเชื่อม พื้นที่กระทบร้อน และโลหะฐาน เมื่อทำการตรวจสอบความไม่สมบูรณ์ของโลหะเชื่อม พบว่าจุดบกพร่อง เช่น รอยแตกร้าวและรูพรุน ไม่ก่อตัวขึ้นในแนวเชื่อมเหล่านี้ นอกจากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 แอมแปร์ พบว่าไม่มีการก่อตัวของรอยแตกร้าวและรูพรุนเกิดขึ้นในโลหะเชื่อมเช่นเดียวกัน

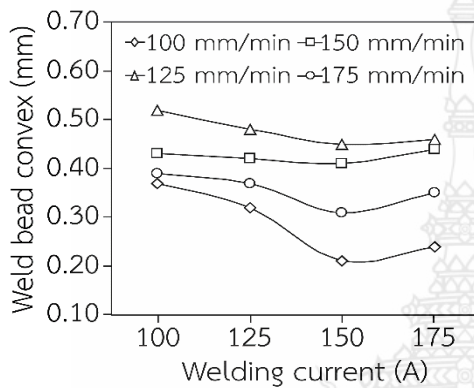
กระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ถูกนำมาทำการวัดขนาดของโลหะเชื่อม ประกอบด้วยความกว้างแนวเชื่อม ความกว้างพื้นที่กระทบร้อน ความนูนแนวเชื่อม การหลอมลึก และความลึกพื้นที่กระทบร้อน และแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อม กล่าวคือความเร็วเดินแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดการเพิ่มความกว้างแนวเชื่อม ความกว้างพื้นที่กระทบร้อน การหลอมลึก และความลึกพื้นที่กระทบร้อน ในทุกกระแสเชื่อม นอกจากนั้นความนูนของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นในทุกกระแสเชื่อมเช่นเดียวกัน ในกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าความกว้างแนวเชื่อมสูงสุด 5.15 มิลลิเมตร ความกว้างพื้นที่กระทบร้อนสูงสุด 8.09 มิลลิเมตร ความนูนแนวเชื่อมต่ำสุด 0.41 มิลลิเมตร การหลอมลึกสูงสุด 1.15 มิลลิเมตร และความลึกพื้นที่กระทบร้อนสูงสุด 2.59 มิลลิเมตร พบได้เมื่อใช้กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที



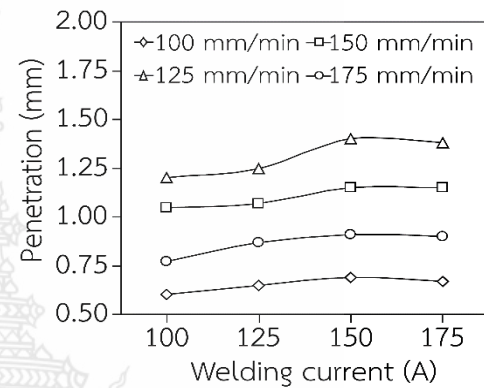
ก. ความกว้างแนวเชื่อม



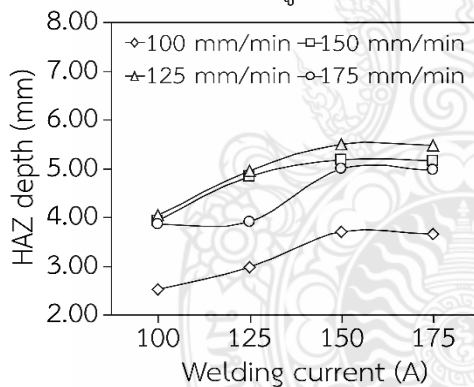
ข. ความกว้างพื้นที่กระทบร้อน



ค. ความนูนแนวเชื่อม

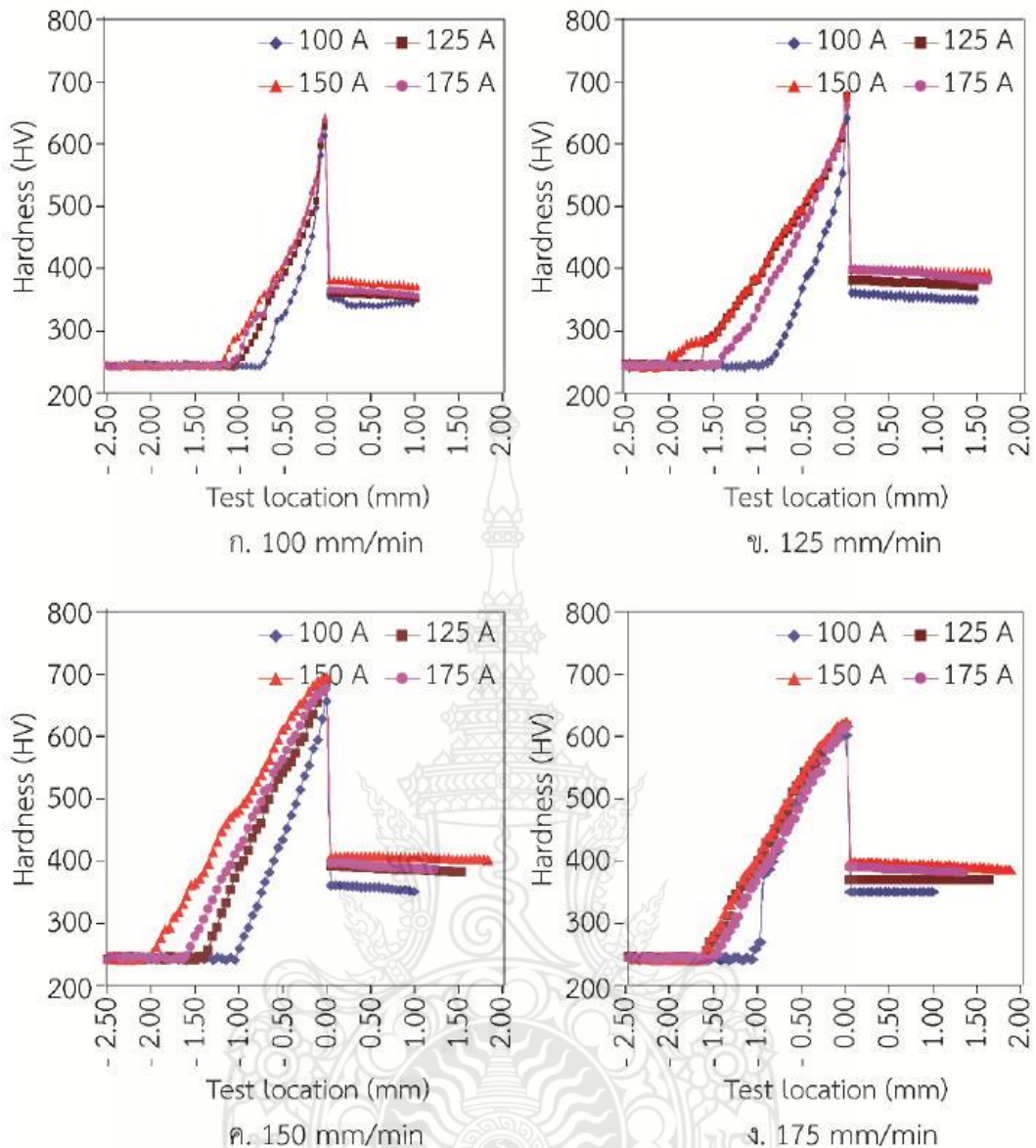


ง. การหลอมลึก



จ. ความลึกพื้นที่กระทบร้อน

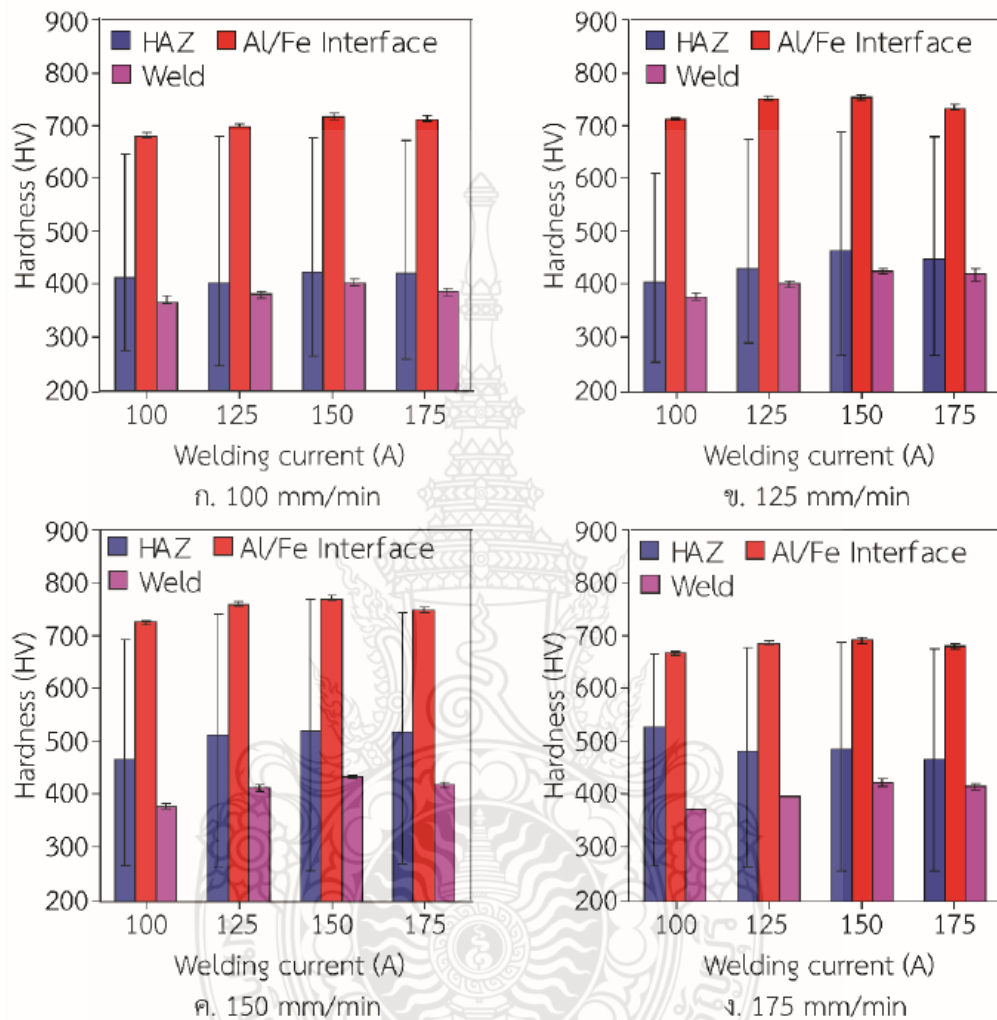
รูปที่ 4.11 รูปร่างของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.12 ความแข็งแนวตั้งฉากกับพื้นผิวแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที

ความแข็งของโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมที่มีความสมบูรณ์และทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ถูกแสดงดังรูปรูปที่ 4.12 ที่แสดงความแตกต่าง ค่าความแข็งวัดตามแนวตั้งฉากแสดงค่าความแข็งคล้ายในหัวข้อที่ 4.1 กล่าวคือความแข็งของโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการทดสอบในตำแหน่งพื้นที่ที่กระทร้อนเนื่องจากการลดขนาดของเกรนและเฟสเฟิลไลท์และเฟอไรท์ของโลหะฐาน ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งการทดสอบเข้าใกล้ผิวสัมผัสของรอยต่อ และแสดงค่าความแข็งสูงสุดที่ตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน หรือตำแหน่ง 0.0 มิลลิเมตร ของระยะการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.4 ก. หลังจากนั้นค่าความแข็งการทดสอบจะมีค่าลดลงเมื่อทำการทดสอบความแข็งในพื้นที่โลหะเชื่อม ค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระทร้อน ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน และโลหะเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ

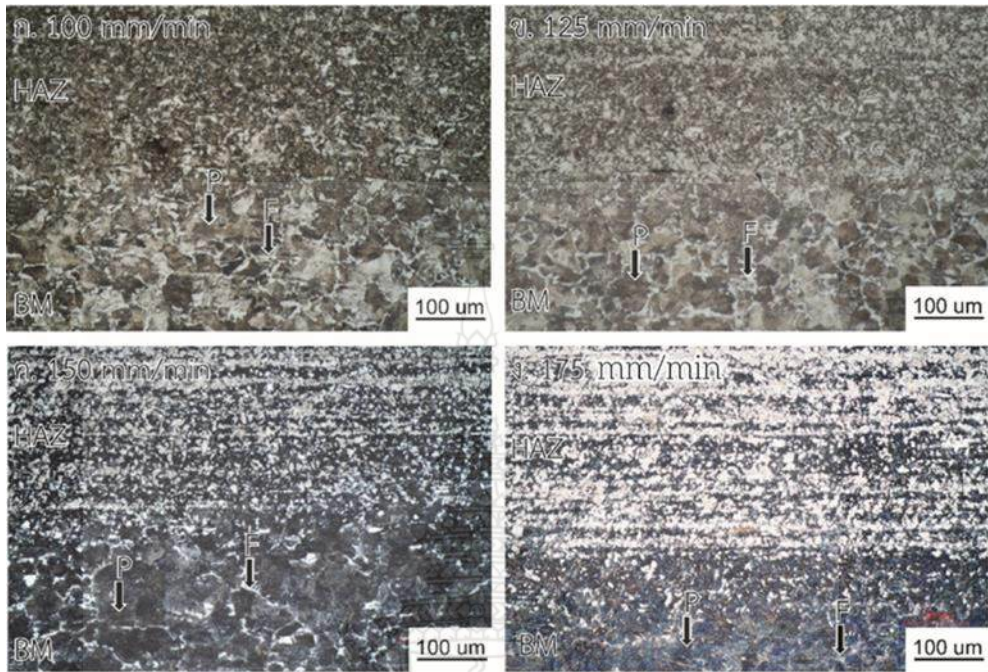
ความเร็วแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100-150 มิลลิเมตรต่อนาที และมีค่าคงที่เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 175 มิลลิเมตรต่อนาที อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ 100 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.12 ก. แนวโน้มการเพิ่มความแข็งในพื้นที่ที่กระทบร้อนมีค่าเพิ่มสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-150 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.13 ความแข็งเฉพาะพื้นที่ที่กำหนดของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที

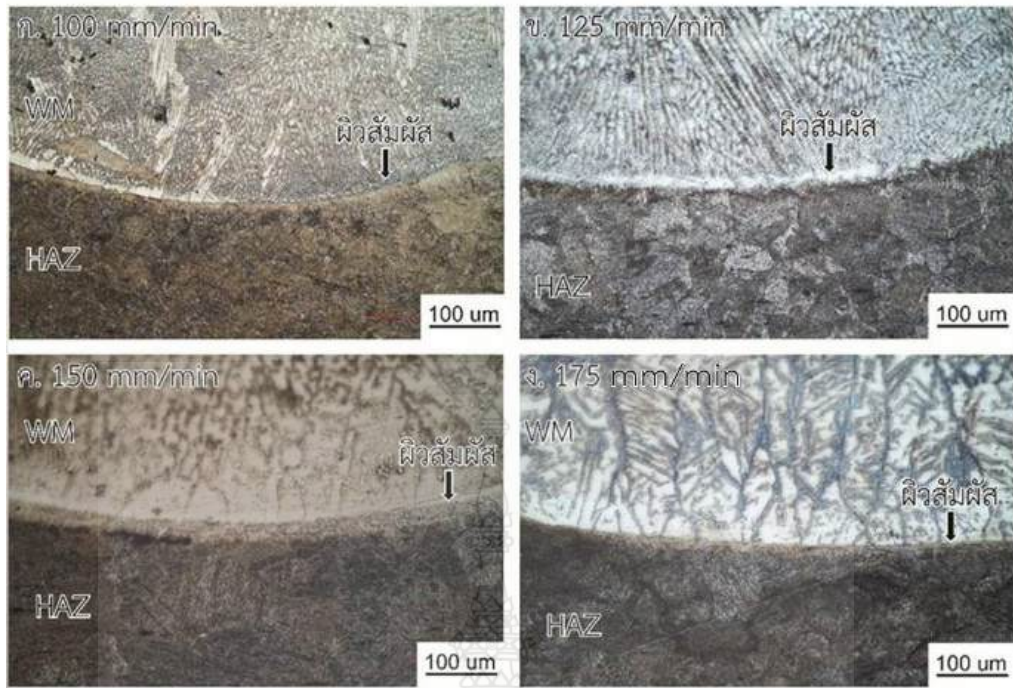
ความแข็งแนวตั้งฉากกับพื้นผิวแนวเชื่อมถูกนำมาแสดงในลักษณะค่าเฉลี่ยอีกครั้งดังรูปที่ 4.13 เพื่อแสดงค่าความแตกต่างของความแข็งเฉพาะพื้นที่ เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนของโลหะฐานดังรูปที่ 4.13 ก. พบว่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มในการเพิ่มความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อน ค่าแถบความผิดพลาด (Error bar) ที่มีค่าสูงนั้นเนื่องจากความลึกของพื้นที่ที่กระทบร้อนที่มีค่าสูงเมื่อกระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การเพิ่มความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนในพื้นที่ที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.14 เฟสเฟิลไลต์และเฟอไรต์ที่มีขนาดเล็กลงเมื่อเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อน และเกิดการรวมตัวสมบูรณ์ในพื้นที่ที่กระทบร้อน แสดงการลดลงของเกรนที่เกิดการรวมตัวที่มีขนาดลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.14

ก.-ค. อย่างไรก็ตามแถบรวมตัวสีขาวนี้มีแนวโน้มปรับตัวขึ้นเมื่อทำการตรวจสอบความแข็งในแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่ออนาทีดังรูปที่ 4.14 ง.

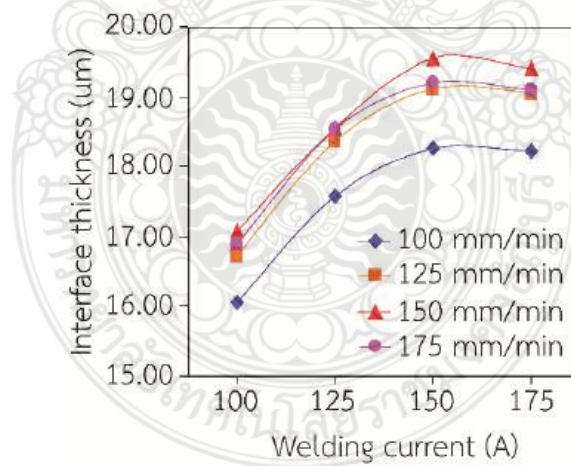


รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐานและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อม อะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่ออนาที

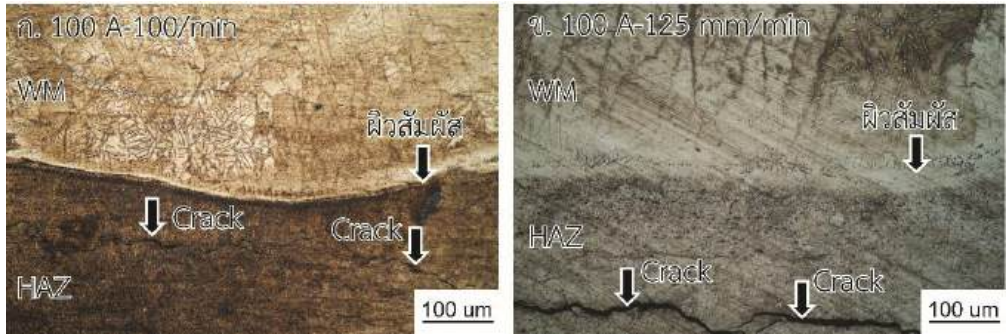
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่ออนาที โครงสร้างจุลภาคแสดงผิวสัมผัสของรอยต่อที่มีการรวมตัวมากขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรแสดงค่าความหนาของผิวสัมผัสที่มีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบความหนาของพื้นที่การรวมตัวที่ผิวสัมผัสนี้ พบว่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความหนาของพื้นที่การรวมตัวที่มีค่าเพิ่มขึ้น และแสดงค่าความหนาสูงสุดเมื่อใช้ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่ออนาทีในการเชื่อมชิ้นงานดังผล ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผิวสัมผัส ความเร็วเดินแนวเชื่อม และกระแสเชื่อมดังรูปที่ 4.16 นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและความแข็งของชั้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานแล้วพบว่า ความแข็งของพื้นที่การรวมตัวที่ผิวสัมผัสแปรผันโดยตรงกับความหนาของชั้นการรวมตัวของผิวสัมผัส ความสัมพันธ์นี้มีลักษณะคล้ายกับการเกิดการเพิ่มความแข็งของชั้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อม อะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที

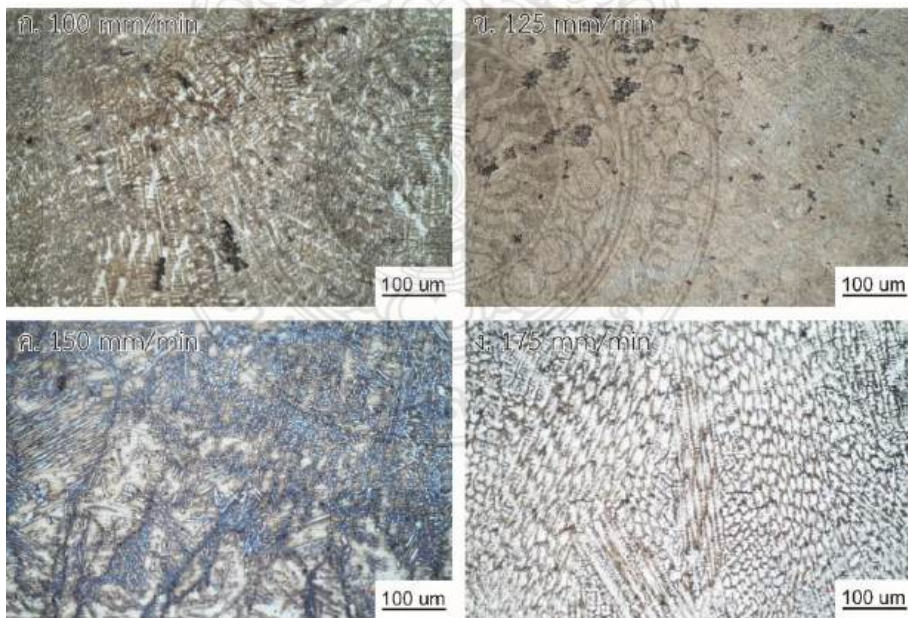


รูปที่ 4.16 ความหนาของชั้นการรวมตัวบนผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที

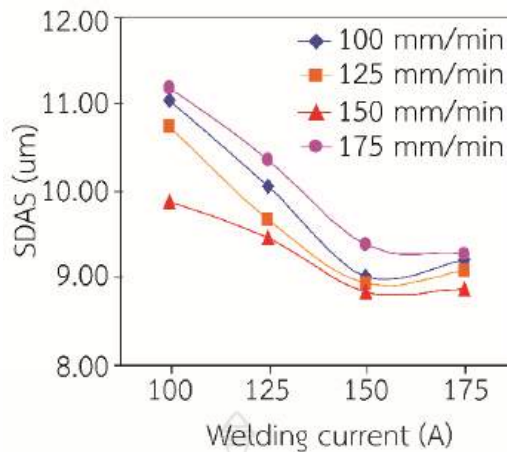


รูปที่ 4.17 รอยแตกร้าวใต้แนวเชื่อมในพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม ก. 100 มิลลิเมตรต่อนาที และ ข. 125 มิลลิเมตรต่อนาที

ถึงแม้ว่าการใช้กระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้เกิดแนวเชื่อมสมบูรณ์ปราศจากรอยแตกร้าว หรือรูพรุน แต่เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมที่เชื่อมความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.17 ก. และความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาทีดังรูปที่ 4.17 ข. พบว่าเมื่อใช้ความเร็วเดินแนวเชื่อมดังกล่าวก่อให้เกิดรอยแตกร้าวด้านล่างแนวเชื่อม (Under bead cracking) และมีความยาวต่อเนื่องตลอดความกว้างของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามรอยแตกร้าวสามารถตรวจสอบพบได้ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 และ 125 มิลลิเมตรเท่านั้น การเลือกใช้ความเร็วแนวเชื่อมทั้งสองที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์จึงต้องมีการพิจารณาเป็นพิเศษ



รูปที่ 4.18 โครงสร้างเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.19 ระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าโครงสร้างเดนไดรต์แสดงส่วนประกอบของต้นเดนไดรต์และแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิอย่างชัดเจน เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100-175 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดของแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิมีแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลง แต่ความยาวของต้นเดนไดรต์มีแนวโน้มในการเพิ่มขนาดขึ้นดังรูปที่ 4.18 ก.-ค. ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมสูงสุด 175 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดเดนไดรต์มีรูปร่างและขนาดที่กลมมนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเดนไดรต์ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำกว่า เมื่อทำการวัดขนาด SDAS โครงสร้างเดนไดรต์และแสดงผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4.19 พบว่ากระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า SDAS มีค่าลดลง การลดขนาดดังกล่าว เนื่องจากความเร็วเดินที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความร้อนสะสมในแนวเชื่อมที่ต่ำและง่ายต่อการกำจัดออกสู่บรรยากาศภายนอก แนวโน้มการลดขนาด SDAS นี้พบได้ในทุกกระแสเชื่อมและเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ความแข็งของโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมมีค่าเพิ่มขึ้นได้

โลหะเชื่อมอะลูมิเนียมถูกทำการเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-175 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

- แนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้ามีความสมบูรณ์เมื่อใช้กระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมดังตารางที่ 4.1

- ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการสร้างชั้นผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้า เนื่องจากความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ความหนาของแนวเชื่อมลดลง และการหลอมลึกของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น และทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น

- การเพิ่มความแข็งของแนวเชื่อมเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อมส่งผลทำให้เกิดเกรนที่เล็กละเอียด โครงสร้างเดนไดรต์ที่เล็กลง และความหนาผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสมบูรณ์แนวเชื่อมและตัวแปรการเชื่อม

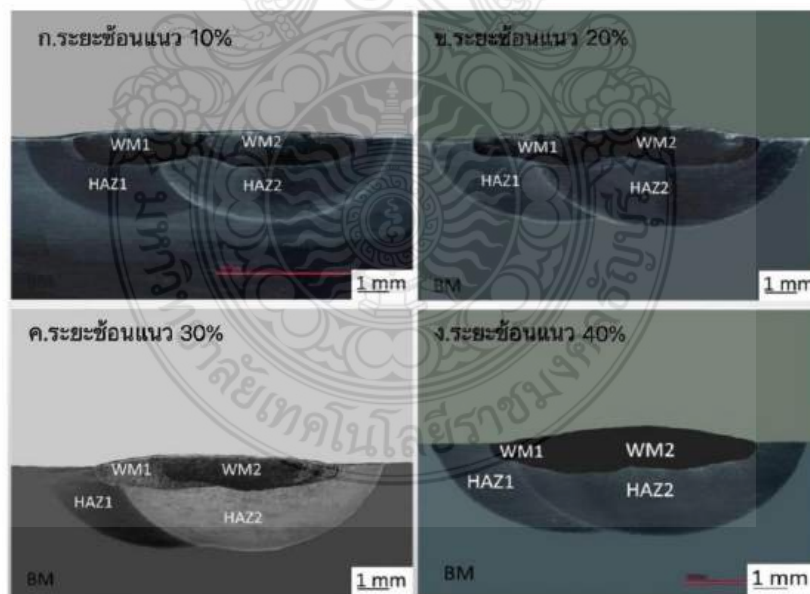
ตัวแปรการเชื่อม	กระแสเชื่อม
-----------------	-------------

		75 A	100 A	125 A	150 A	175 A
ความเร็วเดินแนว	75 mm/min	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁
	100 mm/min	X ₁	X ₂	√	√	√
	125 mm/min	X ₁	X ₂	√	√	√
	150 mm/min	X ₁	√	√	√	√
	175 mm/min	X ₁	√	√	√	√

หมายเหตุ ค่า X₁ หมายถึง การแตกร้าวที่โลหะเชื่อม ค่า X₂ หมายถึง การแตกร้าวใต้แนวเชื่อมในพื้นที่
 กระบร้อน และค่า √ หมายถึง แนวเชื่อมสมบูรณ์ปราศจากจุดบกพร่อง

4.3 อิทธิพลระยะซ้อนเกยที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าผสม AISI4140

โลหะเชื่อมอะลูมิเนียมถูกทำการเชื่อมซ้อนเกยบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ด้วย
 กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลูม หรือการเชื่อมทิก ตัวแปรการเชื่อมทิกที่ใช้ในการศึกษาสมบัติ
 ของโลหะเชื่อมในหัวข้อนี้ประกอบด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150
 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะซ้อนเกยที่มีระยะห่าง 10 20 30 และ 40% โดยการกำหนดค่ามาจากความ
 กว้างของโลหะเชื่อมและทำการหารเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ดังรูปที่ 3.5 จากนั้นได้ทำการเชื่อมแบบเดินแนวไม่
 ส่ายลวดเชื่อม (Bead-on-plate welding) จำนวน 2 แนว แนวเชื่อมถูกทำการเตรียมเพื่อทำการ
 ตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ประกอบด้วย การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา และการทดสอบความแข็งแรงของ
 โลหะเชื่อม ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

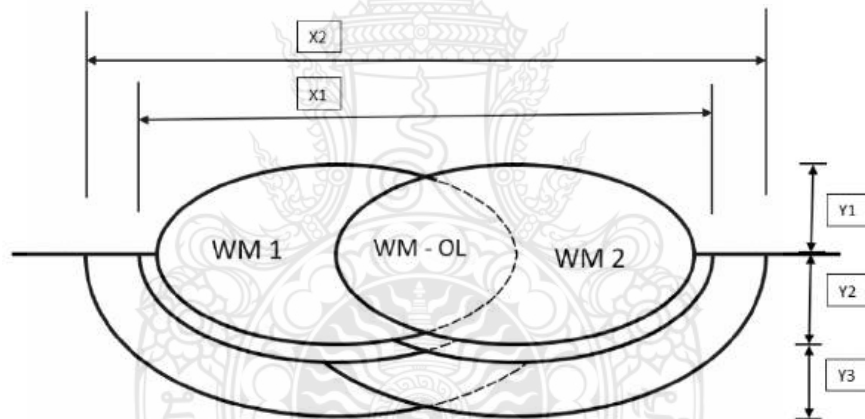


รูปที่ 4.20 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%

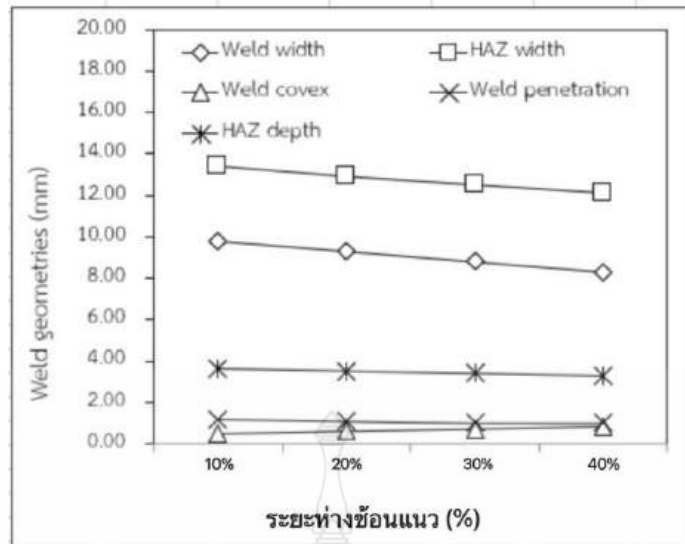
รูปที่ 4.20 แสดงโครงสร้างโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง
 10 – 40% ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที
 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคประกอบด้วยพื้นที่ 3 ส่วน คือ โลหะเชื่อม พื้นที่กระบร้อน และโลหะฐาน

เมื่อทำการตรวจสอบความไม่สมบูรณ์ของโลหะเชื่อม พบว่าจุดบกพร่อง เช่น รอยแตกร้าวและรูพรุน ไม่ก่อตัวขึ้นในแนวเชื่อมระยะข้อนี้ นอกจากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมระยะข้อนี้ 10 – 40% ที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 แอมแปร์ พบว่าไม่มีการก่อตัวของรอยแตกร้าวและรูพรุนเกิดขึ้นในโลหะเชื่อม

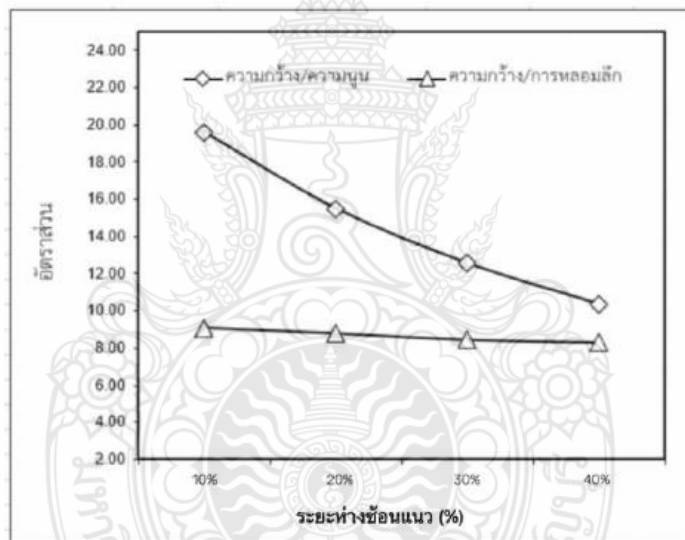
ระยะข้อนี้ 10 – 40% ถูกนำมาทำการวัดขนาดของโลหะเชื่อมประกอบด้วย ความกว้างแนวเชื่อม ความกว้างพื้นที่กระทบร้อน ความนูนแนวเชื่อม การหลอมลึก และความลึกพื้นที่กระทบร้อน และแสดงการวัดขนาดของแนวเชื่อมดังรูปที่ 4.21 การเชื่อมข้อนี้แนวทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแนวเชื่อม กล่าวคือระยะห่างของแนวเชื่อมที่ 10 – 40% มีแนวโน้มที่ทำให้เกิดการลดลงของความกว้างแนวเชื่อม ความกว้างพื้นที่กระทบร้อน การหลอมลึก และความลึกพื้นที่กระทบร้อน ในทุกระยะห่างของแนวเชื่อมที่ 10 – 40% นอกจากนั้นความนูนของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 ในระยะห่างที่ 10 – 40% พบว่าความกว้างแนวเชื่อมต่ำสุด 8.3 มิลลิเมตร ความกว้างพื้นที่กระทบร้อนต่ำสุด 11.5 มิลลิเมตร ความนูนแนวเชื่อมสูงสุด 0.7 มิลลิเมตร การหลอมลึกต่ำสุด 0.9 มิลลิเมตร และความลึกพื้นที่กระทบร้อนต่ำสุด 3.6 มิลลิเมตร พบได้เมื่อใช้กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาทีในการเชื่อมข้อนี้ระยะห่าง 40%



รูปที่ 4.21 การวัดขนาดของแนวเชื่อมอูมิเนียมเชื่อมข้อนี้ระยะห่าง 10 – 40%

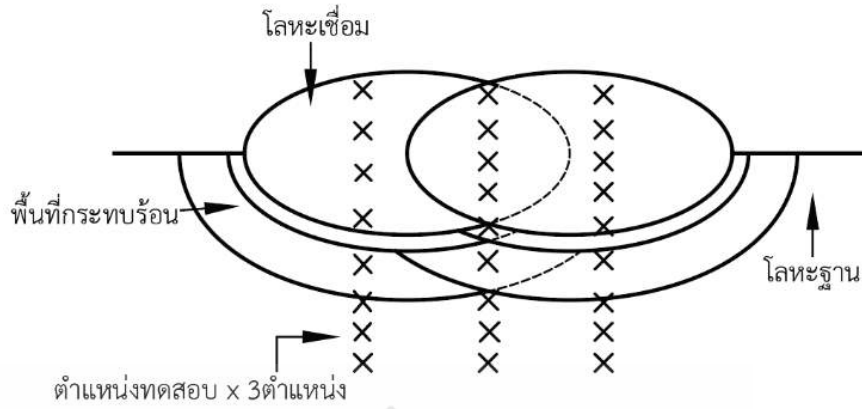


รูปที่ 4.22 ขนาดรูปร่างของแนวเชื่อมอลูมิเนียมเชื่อมแนวที่ระยะห่าง 10 - 40%

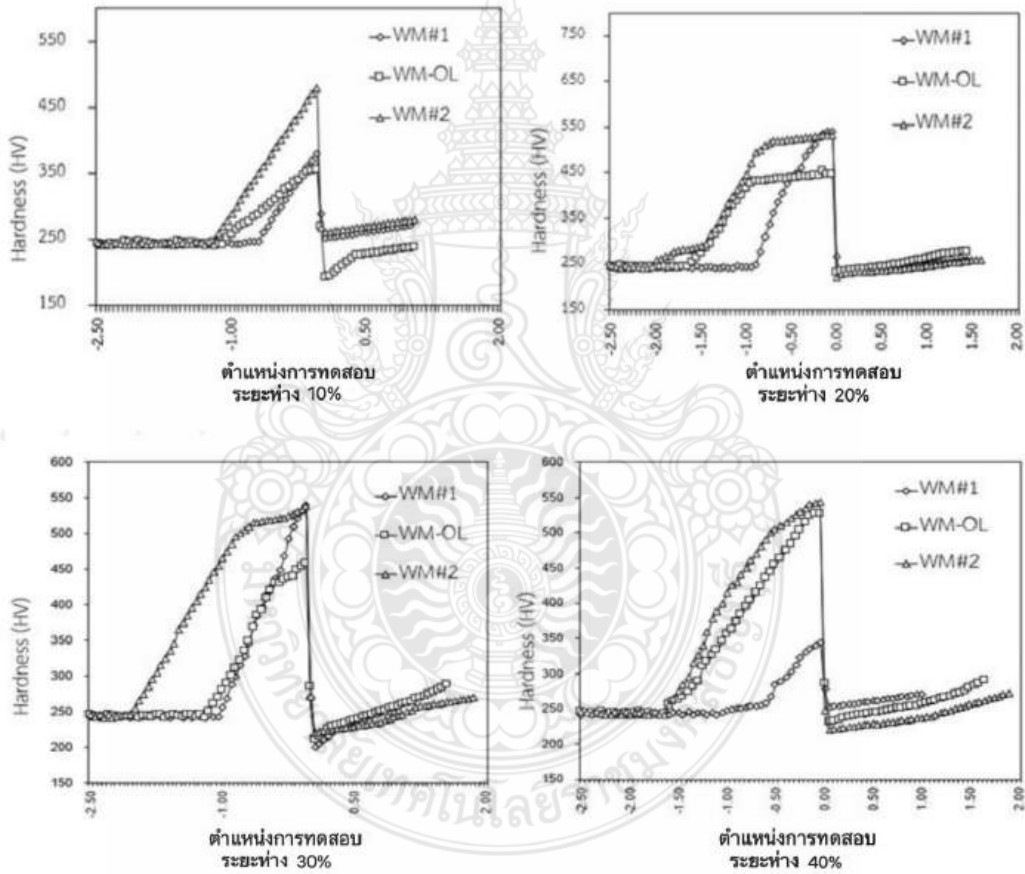


รูปที่ 4.23 อัตราส่วนระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมและความนูน, ระยะหลอมลึก

รูปที่ 4.23 อัตราส่วนระยะห่างความกว้างของแนวเชื่อมและความนูนระยะหลอมลึกเมื่อทำการหาค่าอัตราส่วนของความกว้างส่วนความนูนมีค่าที่แตกต่างกันเมื่อทำการเปรียบเทียบในระยะห่างของ 10 - 40% ค่าอัตราส่วนของ 10% มีค่า 19.6% เป็นค่าที่สูงสุดในตัวแปรอื่นและเมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความกว้างส่วนการหลอมลึก พบว่าค่าที่สูงสุดคือ 9.6% ในระยะห่างที่ 10%



ก. ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง



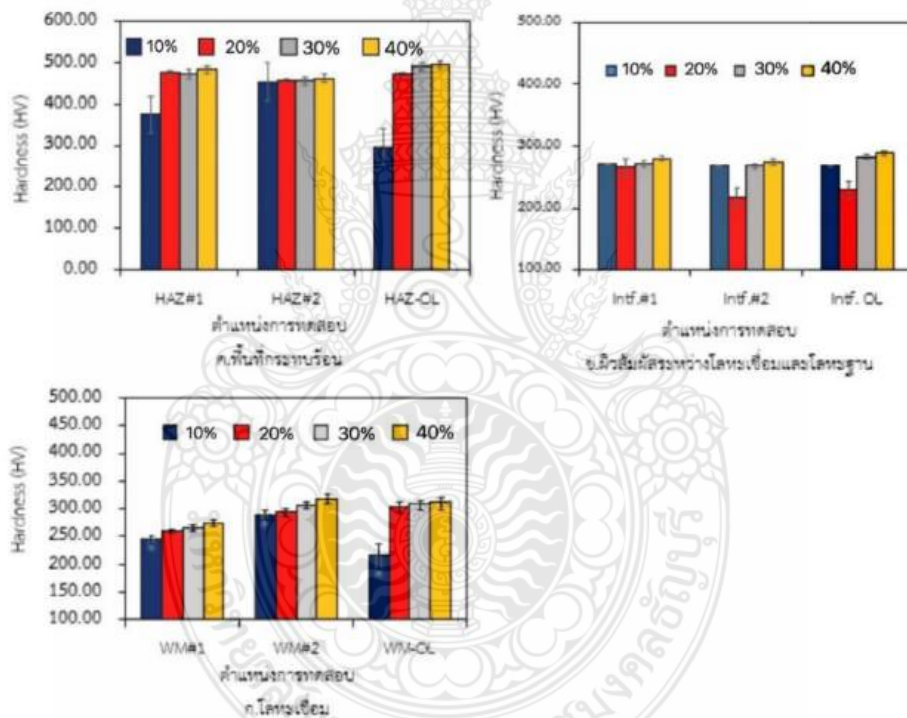
ข. แนวความแข็งตั้งฉากกับผิวสัมผัส

รูปที่ 4.24 ความแข็งแนวเชื่อมตั้งฉากแนวเชื่อมอลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%

ชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาถูกทำการตรวจสอบความแข็งเพื่ออธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะวิทยาและความแข็ง การทดสอบความแข็งถูกดำเนินการโดยการใช้แรงกด 300 กรัมแรงและเวลากดแช่ 10 วินาที ในการทดสอบความแข็งแบบแนวตั้งฉากผิวหน้าแนวเชื่อมถูกดำเนินการดังรูปที่ 4.24 ก. กำหนดให้จุดเริ่มต้นการทดสอบ คือตำแหน่งพื้นที่กระทบร้อนขึ้นไป

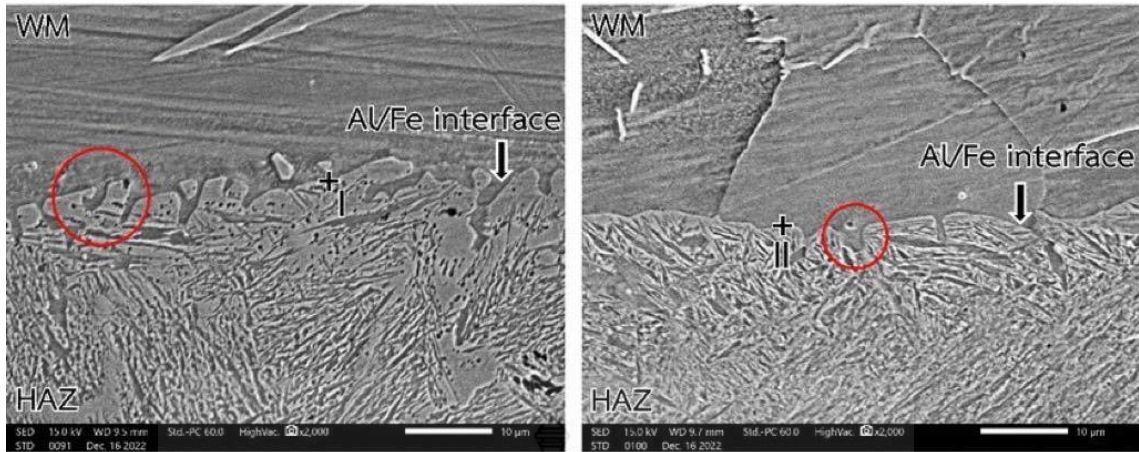
ถึงผิวสัมผัสและโลหะฐาน จุดการตรวจสอบจะมีทั้งหมด 3 จุด คือแนวเชื่อมที่ 1 ,จุดทับซ้อน และแนวเชื่อมที่ 2

ความแข็งของโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมที่มีความสมบูรณ์และทำการเชื่อมอลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40% ด้วยกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาทีถูกแสดงดังรูปที่ 4.24 ข. พบว่าค่าความแข็งของระยะห่างที่ 10 – 40% ในจุดการตรวจสอบทั้ง 3 จุด มีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อทำการตรวจสอบพบว่าความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการทดสอบในตำแหน่งพื้นที่ที่กระทบร้อนเนื่องจากการลดขนาดของเกรนและเฟสเฟิลไลท์และเฟอไรท์ของโลหะฐาน ค่าความแข็งมีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งการทดสอบเข้าใกล้ตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อถึงตำแหน่งการตรวจสอบของโลหะเชื่อมจนถึงผิวหน้าแนวเชื่อม แสดงในรูปที่ 4.24 ข. แตกต่างจากหัวข้อที่ 4.1 หลังจากนั้นค่าความแข็งการทดสอบจะมีค่าลดลงเมื่อทำการทดสอบความแข็งในพื้นที่โลหะเชื่อม ค่าความแข็งของพื้นที่กระทบร้อน ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน และโลหะเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะซ้อนเกยเพิ่มขึ้นจาก 10 – 40% และมีค่าคงที่เมื่อระยะซ้อนเกยเพิ่มขึ้นเป็น 40%



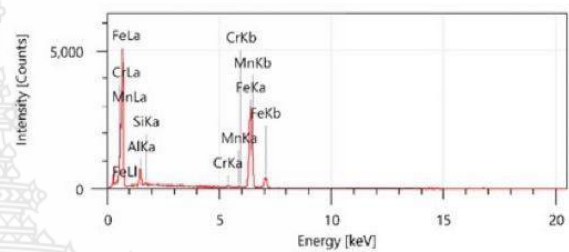
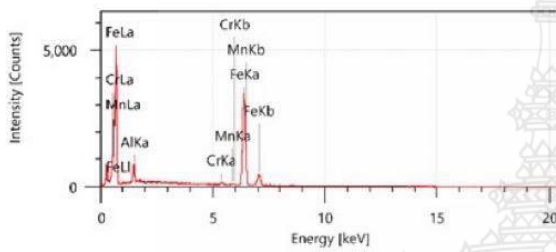
รูปที่ 4.25 ความแข็งเฉลี่ยแนวเชื่อมตั้งฉากแนวเชื่อมอลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40%

ความแข็งแนวตั้งฉากกับพื้นผิวแนวเชื่อมถูกนำมาแสดงในลักษณะค่าเฉลี่ยอีกครั้งดังรูปที่ 4.25 เพื่อแสดงค่าความแตกต่างของความแข็งเฉพาะพื้นที่ เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนของโลหะฐานดังรูปที่ 4.25 ก. พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะซ้อนเกยเพิ่มขึ้น



ก. ระยะซันแนว 10%

ข. ระยะซันแนว 40%



ค. การกระจายพลังงานระยะซันแนว 10%

ง. การกระจายพลังงานระยะซันแนว 40%

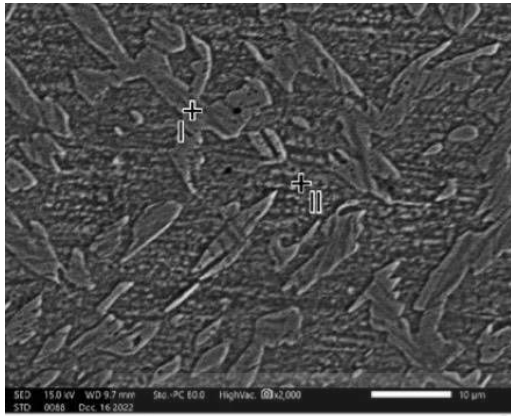
รูปที่ 4.26 การวัดการกระจายพลังงานโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าผสมต่ำที่ระยะซันแนว 10 และ 40%

รูปที่ 4.26 ก. และ ข. แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูงที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงความแตกต่างระหว่างตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและพื้นที่กระทบร้อนเหล็กกล้าผสมต่ำที่ทำการเชื่อมซันแนว 10 และ 40% ตามลำดับ การตรวจสอบพบว่าตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและพื้นที่กระทบร้อนเหล็กกล้าผสมต่ำที่เชื่อมด้วยระยะซันแนว 10% แสดงส่วนของผิวสัมผัสที่มีส่วนของเหล็กเป็นส่วน ๆ ยื่นเข้าสู่โลหะเชื่อมดังกล่าวที่ผิวสัมผัสในรูปที่ 4.26 ก. แต่เมื่อระยะซันแนวเพิ่มขึ้นเป็น 40% ลักษณะผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและพื้นที่กระทบร้อนเหล็กกล้าผสมต่ำมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และมีบางส่วนที่แสดงการยื่นเข้ารวมกันระหว่างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและพื้นที่กระทบร้อนเหล็กกล้าผสมต่ำดังกล่าวที่ผิวสัมผัสในรูปที่ 4.26 ข. ส่วนผสมทางเคมีของตำแหน่ง I และ II ในรูปที่ 4.26 ก. และ ข. ถูกนำไปทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีและได้การกระจายพลังงานดังกราฟในรูปที่ 4.26 ค. และ ง. สำหรับระยะซันแนว 10 และ 40% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาส่วนผสมทางเคมีในหน่วย %อะตอม พบว่าระยะซันแนว 10% แสดงปริมาณอะลูมิเนียม (Al) ต่ำกว่าระยะซันแนว 40% และแสดงปริมาณเหล็ก (Fe) มากกว่าระยะซันแนว 40% ดังตารางที่ 4.2 เมื่อนำค่าสัดส่วนปริมาณอะลูมิเนียมและเหล็กนำไปเปรียบเทียบกับระบบโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก พบว่าสัดส่วนปริมาณอะลูมิเนียมและเหล็กของระยะซันแนว 10 และ 40% มีค่าเท่ากับ 13.1 และ 12.9 ตามลำดับ ค่าสัดส่วนที่ได้นี้แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กเป็นสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ของระบบโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก ความแข็งแรงของสารประกอบกึ่งโลหะมักมีค่า

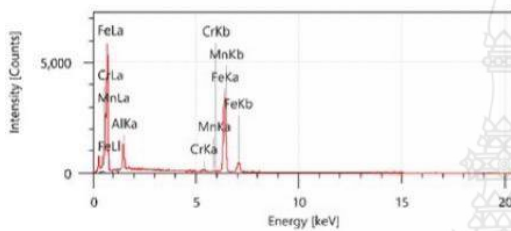
เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการเปลี่ยนแปลงของอะลูมิเนียมและเหล็ก สารประกอบกึ่งโลหะที่มีปริมาณเหล็กสูง (Iron-rich IMC) มักแสดงความแข็งต่ำ (Low hardness) และความแข็งแกร่งสูง (High toughness) ขณะที่สารประกอบกึ่งโลหะที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูง (Aluminum-rich IMC) มักแสดงความแข็ง (High hardness) และมีความเปราะ (High brittleness) สูง เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบของสารประกอบกึ่งโลหะในระบบโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก 5 รูปแบบ ความแข็งของสารประกอบกึ่งโลหะมักมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมจาก $Fe_3Al \Rightarrow FeAl \Rightarrow FeAl_2 \Rightarrow Fe_2Al_5 \Rightarrow FeAl_3$ ตามลำดับ [38-40] เมื่อพิจารณาสัดส่วนระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยระยะซ้อนเกย 10 และ 40% ดังตารางที่ 4.2 พบว่า ระยะซ้อนเกย 10% แสดงสัดส่วนระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีค่าสูงกว่าระยะซ้อนเกย 40% และแสดงให้เห็นว่าระยะซ้อนเกย 40% ซึ่งบ่งชี้ให้ทราบถึงปริมาณของอะลูมิเนียมที่สูงกว่าในสารประกอบกึ่งโลหะ และเป็นเหตุผลสำคัญแนวเชื่อมที่ระยะซ้อนเกย 40% แสดงความแข็งสูงกว่าระยะซ้อนเกย 10% นอกจากนี้สามารถกล่าวได้ว่าระยะซ้อนเกย 40% สามารถทำให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กได้มากกว่าระยะซ้อนเกย 10%

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีที่ตำแหน่งตรวจสอบ I และ II ในรูปที่ 4.26

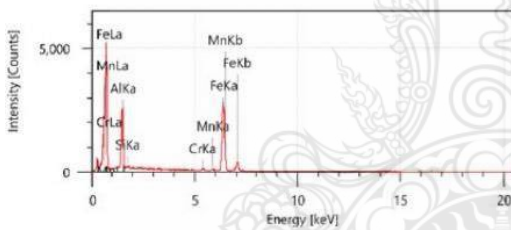
ตำแหน่งตรวจสอบ	ธาตุ (at%)					สัดส่วนโลหะผสม
	Al	Fe	Si	Cr	Mn	
ตำแหน่ง I	6.97	91.31	0.00	1.14	0.58	$Fe_{13.1}Al$
ตำแหน่ง II	7.07	91.04	0.38	0.99	0.52	$Fe_{12.9}Al$



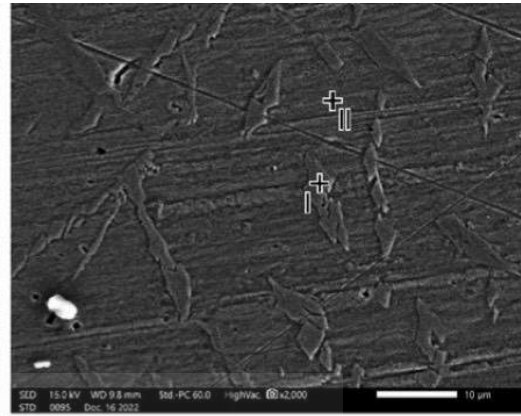
ก. ระยะชั้นแนว 10%



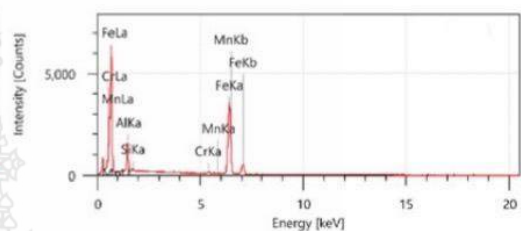
ค. การกระจายพลังงานของแกนเดนไดรต์
ที่ระยะชั้นแนว 10%



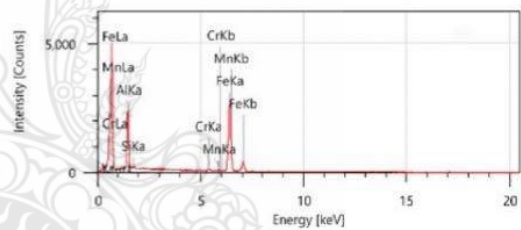
จ. การกระจายพลังงานของช่องว่างระหว่าง
แกนเดนไดรต์ที่ระยะชั้นแนว 10%



ข. ระยะชั้นแนว 40%



ง. การกระจายพลังงานของแกนเดนไดรต์
ที่ระยะชั้นแนว 40%



ฉ. การกระจายพลังงานของช่องว่างระหว่าง
แกนเดนไดรต์ที่ระยะชั้นแนว 40%

รูปที่ 4.27 การวัดการกระจายพลังงานโครงสร้างเดนไดรต์ในโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมที่ระยะชั้นแนว 10 และ 40%

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมในรูปที่ 4.27 ถูกนำมาทำการตรวจสอบที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และได้โครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 4.27 ก. และ ข. สำหรับโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมที่ระยะชั้นแนว 10 และ 40% ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมประกอบด้วยเดนไดรต์ที่มีขนาดแตกต่างกัน และเดนไดรต์ของระยะชั้นแนว 10% มีขนาดใหญ่กว่าระยะชั้นแนว 40% ดังตำแหน่งที่ I ในรูปที่ 4.27 ก. และ ข. และเป็นสาเหตุทำให้ความแข็งของโลหะเชื่อมที่ระยะชั้นแนว 10% มีความแข็งต่ำกว่าระยะชั้นแนว 40% ความแตกต่างของเดนไดรต์และช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์ที่แตกต่างสามารถส่งผลทำให้ความแข็งแตกต่างได้ เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้ส่วนผสมทางเคมีของเดนไดรต์ที่ตำแหน่งที่ I และส่วนผสมทางเคมีของเดนไดรต์ที่ตำแหน่งที่ II ของโลหะเชื่อมที่ระยะชั้นแนว 10 และ 40% ดังแสดงในรูปที่

4.27 ก. และ ข. จึงถูกนำไปทำการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน และได้ผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4.27 ค.-ง. และตารางที่ 4.3

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมระยะซ้อนเกย 10% ดังรูปที่ 4.27 ค. และ ตารางที่ 4.3 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมแสดงความแตกต่างที่บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงความแข็งของโลหะเชื่อม กล่าวคือปริมาณอะลูมิเนียมในเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมมีค่าต่ำกว่าปริมาณอะลูมิเนียมในช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์ และปริมาณเหล็กในเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าปริมาณเหล็กในช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์ ผลการวิเคราะห์สัดส่วนระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมของเดนไดรต์ และช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์มีค่าเท่ากับสารประกอบกึ่งโลหะ $Fe_{8.09}Al$ และ $Fe_{3.56}Al$ สัดส่วนระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมที่ตรวจพบนี้บ่งชี้ให้ทราบว่าความแข็งของช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์มีค่าสูงกว่าเดนไดรต์

โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยระยะซ้อนเกย 40% แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมของเดนไดรต์ และช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์คล้ายกับระยะซ้อนเกย 10% โดยมีค่าเท่ากับสารประกอบกึ่งโลหะ $Fe_{6.94}Al$ และ $Fe_{3.55}Al$ ขณะเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมที่ระยะซ้อนเกย 40% พบว่าความแข็งของช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์มีค่าสูงกว่าเดนไดรต์ และความแข็งของโลหะเชื่อมที่ระยะซ้อนเกย 40% มีค่าสูงกว่าระยะซ้อนเกย 10%

ตารางที่ 4.3 ส่วนผสมทางเคมีที่ตำแหน่งตรวจสอบ I และ II ในรูปที่ 4.27

ตำแหน่งตรวจสอบ	ธาตุ (at%)					สัดส่วนโลหะผสม
	Al	Fe	Si	Cr	Mn	
ตำแหน่ง I (10%)	10.79	87.39	0.00	1.13	0.68	$Fe_{8.09}Al$
ตำแหน่ง II (10%)	21.92	75.88	0.52	0.81	0.87	$Fe_{3.56}Al$
ตำแหน่ง I (40%)	12.24	84.99	0.68	1.16	0.92	$Fe_{6.94}Al$
ตำแหน่ง II (40%)	23.71	73.98	0.37	0.97	0.70	$Fe_{3.55}Al$

โลหะเชื่อมอะลูมิเนียมซ้อนแนวที่ระยะห่าง 10 – 40% ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

- แนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมซ้อนแนวบนพื้นผิวเหล็กกล้ามีความเหมาะสมเมื่อใช้ระยะซ้อนแนวที่ 40%
- ระยะห่างการเชื่อมซ้อนทับที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความเรียบเนียนมากขึ้น
- การเพิ่มความแข็งของแนวเชื่อมซ้อนทับเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนซ้อนทับแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดเกรนที่เล็กละเอียด และโครงสร้างเดนไดรต์ที่เล็กลง
- ระยะซ้อนเกยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณอะลูมิเนียมในเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมมีค่าต่ำกว่าปริมาณอะลูมิเนียมในช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์ และปริมาณเหล็กในเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าปริมาณเหล็กในช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยการทดลองการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีลและโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ใช้ตัวแปรคือ กระแสเชื่อม 75 – 175 A (Welding Current) ความเร็วเดิน 75 – 175 mm/min (Welding Speed) แล้วนำตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการเชื่อมและค่าความเร็วเดินไปทำการเชื่อมซ้อนเกยโดยใช้ตัวแปรคือ 10% 20% 30% และ 40% แล้วนำไปทำการทดสอบหาสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ผลการทดลองโดยมีสรุปดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งของพื้นที่กระทบร้อน ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน และโลหะเชื่อม

5.1.2 กระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีความเหมาะสมในการทำให้เกิดชั้นผิวเคลือบอะลูมิเนียมที่เกิดจากลวดเชื่อม ER1100 บนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 คือ กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และความเร็วเดิน 150 มิลลิเมตรต่อนาที

5.1.3 แนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมซ้อนแนวบนพื้นผิวเหล็กกล้ามีความเหมาะสมเมื่อใช้ระยะซ้อนแนวที่ 40%

5.1.4 การเพิ่มความแข็งของแนวเชื่อมซ้อนทับเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนซ้อนทับแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดเกรนที่เล็กลงและโครงสร้างเดนไดรต์ที่เล็กลง

5.1.5 การเพิ่มระยะซ้อนเกยที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นที่การรวมตัวมีค่าลดลงเนื่องจากความร้อนซ้อนทับเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรใช้การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) ในการวิเคราะห์ความถูกต้องของสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัวขึ้น

5.2.2 ควรศึกษาอิทธิพลอัตราการเติมโลหะเติม (Filler metal feeding rate) ที่มีผลต่อสมบัติของโลหะเคลือบเนื่องจากอัตราการเติมที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้เกิดการเพิ่มสมบัติทางกลของโลหะเคลือบได้

5.2.3 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกลอื่นๆ เช่น การสึกหรอควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

บรรณานุกรม

- [1] X. H. Wang, F. Han, X. M. Liu, S. Y. Qu, and Z. D. Zou, "Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 489, pp. 193-200, 8/20/ 2008.
- [2] H. R. Akramifard, H. Mirzadeh, and M. H. Parsa, "Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 613, pp. 232-239, 2014/09/08/ 2014.
- [3] X. Yue, P. He, J.C. Feng, J.H. Zhang and F.Q. Zhu, 2008. Microstructure and interfacial reaction of vacuum brazing titanium alloy to stainless steel using an AgCuTi filler metal, *Material Characterization* 59, 2008: 1721-1727
- [4] R. Mathew, P. R. Stoddart, D. Nolan, and Y. Durandet, "Microstructural refinement of aluminium-zinc-silicon coated steels," *Surface and Coatings Technology*, vol. 306, Part B, pp. 490-496, 11/25/ 2016.
- [5] J. P. Bergmann, M. Stambke, and S. Schmidt, "Influence of Aluminum Coating and Diffusion Affecting Additives on Dissimilar Laser Joining of Steel and Aluminum," *Physics Procedia*, vol. 41, pp. 190-198, 2013/01/01/ 2013.
- [6] ปนัดดา เชื้อเพ็ร็ด, วิศวกรรมพื้นผิว, ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุและเทคโนโลยีพื้นผิว ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, หน้า 61.
- [7] สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ, งานเชื่อมโลหะG, ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, หน้า 87-94.
- [8] C. Zhang, X. Song, P. Lu, X. Hu, "Effect of Microstructure on Mechanical Properties in Weldrepaired High Strength Low Alloy Steel." *Materials and Design* .36, pp.233-242,2012.
- [9] C. Fan, M. C. Chen, C. M. Chang, W. Wu, "Microstructure change caused by (Cr,Fe)₂₃C₆carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys." *Surface&Coatings Technology*Vol 201, pp. 908-912, 2006.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [10] H. X. Deng, H. J. Shi, S. Tsuruoka, H. C. Yu, B. Zhong, "Influence of welding technique and temperature on fatigue properties of steel deposited with Co-based alloy hardfacing coating." *International Journal of Fatigue*, Vol 35, pp. 63-70, 2012.
- [11] C. M. Chang, Y. C. Chen, W. Wu, "Microstructural and Abrasive Characteristics of High Carbon Fe-Cr-C Hardfacing Alloy." *Tribology International*, Vol 43, pp. 929-934, 2010.
- [12] N. Venkateswara Rao, G. Madhusudhan Reddy, and S. Nagarjuna, "Weld overlay cladding of high strength low alloy steel with austenitic stainless steel – Structure
- [13] C. Wang, Y. Jiang, J. Xie, D. Zhou, and X. Zhang, "Effect of the steel sheet surface hardening state on interfacial bonding strength of embedded aluminum–steel composite sheet produced by cold roll bonding process," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 652, pp. 51-58, 2016/01/15/ 2016.
- [14] ประจักษ์ บัวอาจ, การสร้างชั้นผิวเคลือบอะลูมิเนียมผสมบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุม, การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาเขต กำแพงแสน, ครั้งที่16, หน้าที่224.
- [15] A. B. Ibrahim, F. A. Al-Badour, A. Y. Adesina, and N. Merah. 2018. "Effect of process parameters on microstructural and mechanical properties of friction stir diffusion cladded ASTM A516-70 steel using 5052 Al alloy" *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34: 451-462.
- [16] G. Zhang, X. Yang, D. Zhu, and L. Zhang. 2020. "Cladding thick Al plate onto strong steel substrate using a novel process of multilayer-friction stir brazing (ML-FSB)" *Materials & Design*, vol. 185: 108232.
- [17] F. Otsubo, H. Era. 2018. "Cladding of Al Layer onto Mild Steel Substrate Using Al Powder and Its Structure and Properties" *MATERIALS TRANSACTIONS*, vol. 59 (10): 1585-1590.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [18] I.Hemmati, V. Ocelik, and J. T. M. De Hosson, "Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys," *Materials Letters*, vol. 84, pp. 69-72, 10/1/ 2012.
- [19] C.-M. Lin, C.-M. Chang, J.-H. Chen, and W. Wu, "The effects of additive elements on the microstructure characteristics and mechanical properties of Cr-Fe-C hard-facing alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 498, pp. 30-36, 5/21/ 2010.
- [20] M. Pleteriski, J. Tusek, T. Muhic, and L. Kosec, "Laser Cladding of Cold-Work Tool Steel by Pulse Shaping," *Journal of Materials Science Technology*, vol. 27, pp. 707-713, 2011.
- [21] H. Dai, X. Shen, and H. Wang, "Study on the Arc Pressure of TIG Welding under the Condition of Ar-Ar and Ar-He Supply Alternately," *Results in Physics*, vol. 10, 08/01 2018.
- [22] มนัส สติรจินดา, เหล็กกล้า. พิมพ์ครั้งที่5. กรุงเทพฯ:วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2539. หน้า 28-29
- [23] อนันต์ วงศ์กระจ่าง.ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2533. หน้า 77 - 79.
- [24] A.Yudiarto.extractivemetallurgy(online),2013.Available:http://extractivemetallurgy.blogspot.com/2013_10_01_archive.html (13 May 2015).
- [25] Bailey, Neil S., Tan, Wenda. and Shin, Yung C., (Abstract of "Predictive modeling and experimental results for residual stresses in laser hardening of AISI 4140 steel by a high power diode laser," *Surface and Coatings Technology(Electronic)*, Vol.203,2009. pp. 2003-2012), Available: ScienceDirect (5 April 2012)
- [26] http://www.pcat.ac.th/_files_school/00000831/data/00000831_1_20150521-120528.pdf
- [27] ไพโรจน์ บุญเกิด,"การศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมต่อสมบัติของรอยต่อท่อต่าง ชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI3041/AISI316"มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี,2558.
- [28] วิชิต เลื่อมใส สุรชัย ขจรเดชะศักดิ์ อุดม สมไสภา,"การศึกษาและพัฒนาวิธีการทำงานที่มีผลต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมแบบมิกซ์ "มหาวิทยาลัยบูรพา ,2554.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [29] L. Jeffus, *Welding and Metal Fabrication*. USA: Delmar Cengage Learning, 2012.
- [30] M.P. Groover "Fundamentals of Modren Manufacturing, Material, Processes and Systems" (2007) John Wiky & Sons, Inc., USA
- [31] ชาญชัย วิเศษสมุน อติเรก มากโกคา เดชมรงค์ รอดชุง และกุสิมา เกล็บจุ, "การศึกษาผล การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมร่วมกับการอบคืนตัวรอยเชื่อม ต่อสมบัติการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ต่ำST37" วิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก สถาบันการ อาชีวศึกษาภาคเหนือ 3
- [32] อาจารย์ดร.จกมลศรีธร, "การศึกษาผลกระทบของกระบวนการเชื่อมต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์หลอมเหลว" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557.
- [33] สุรียา ประสมทอง สุรียา น้ำแก้ว, "อิทธิพลของการเติมลวดเชื่อมอะลูมิเนียมต่อสมบัติทางกล และส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการเชื่อม อาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุม" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, 2562.
- [34] Wen Wang, Dan Wang, Fusheng Han "Improvement of corrosion resistance of twinning-induced plasticity steel by hot-dipping aluminum with subsequent thermal diffusion treatment" *journal Materials Letters* 248 (2019) 60–64
- [35] อนุสิทธิ์ อ่ำไพโรบลย์, "ปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น, 2550.
- [36] D. R. Askeland and P. P. Phule, *The Science and Engineering of Materials*. Toronto: Thompson Canada Limited, 2006, p. 854.
- [37] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนินท์ มีมนต์, and นรพร กลั่นประชา, *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพมหานคร: เซนเกจ เลินนิง (ประเทศไทย) จำกัด, 2553, p. 525.
- [38] S. Kobayashi and T. Yakou, "Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 338, no. 1–2, pp. 44-53, 12/15/ 2002, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00053-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00053-9).
- [39] K. Kimapong and T. Watanabe, "Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding," *Materials Transactions*, vol. 46, no. 4, pp. 835-841, 2005.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [40] K. Kimapong and T. Watanabe, "Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel,"
Welding Journal, vol. 84, no. 10, pp. 277s-282s, 2004.



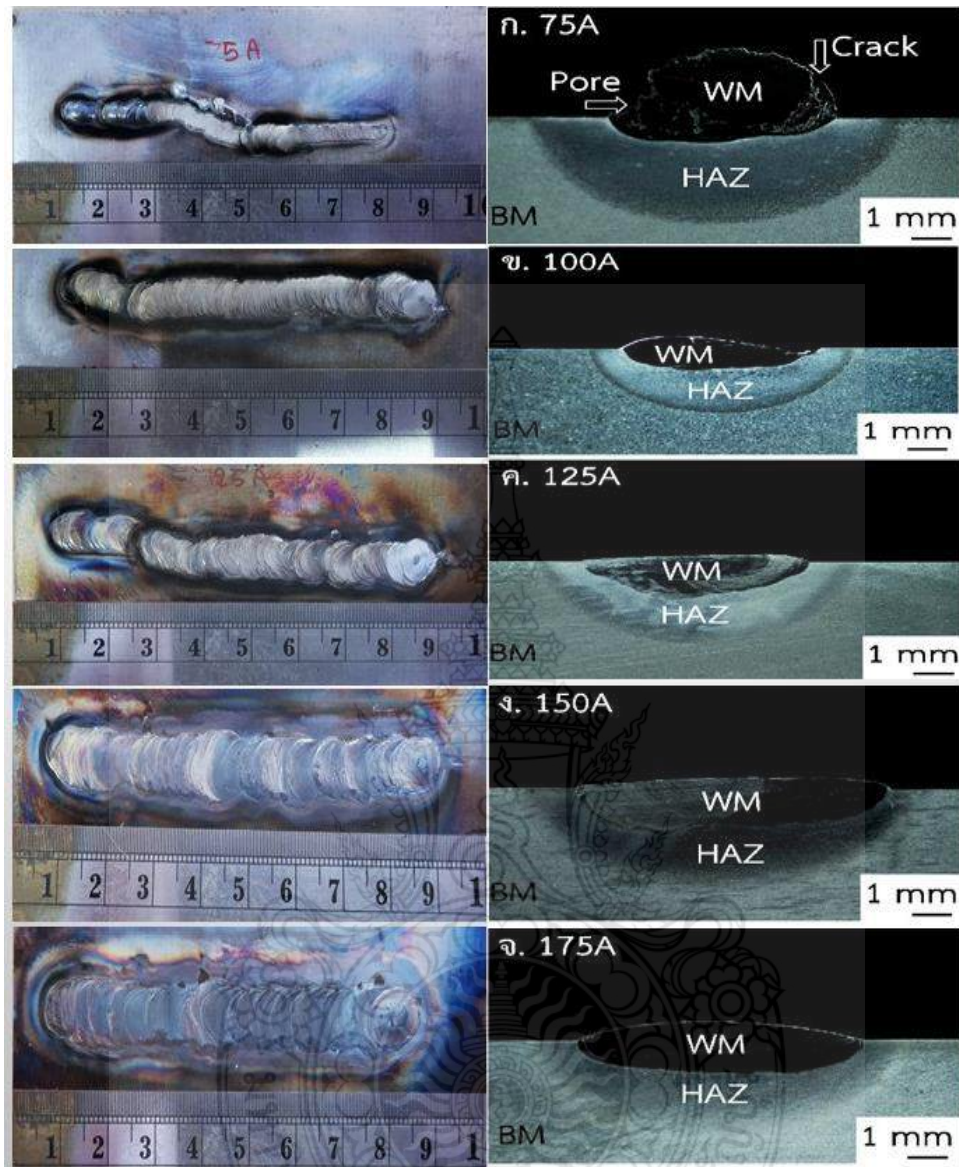
ภาคผนวก



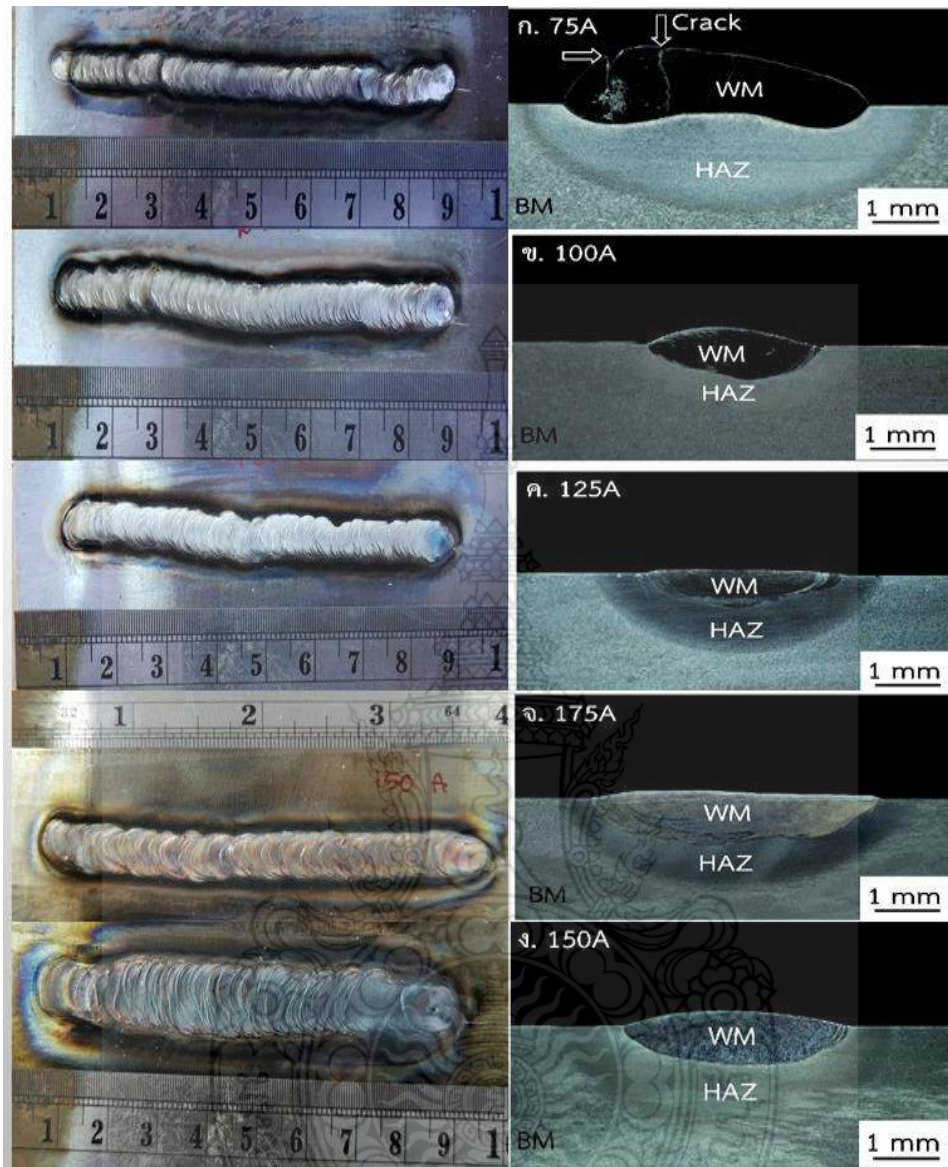
ภาคผนวก ก

ลักษณะโครงสร้างมหภาค

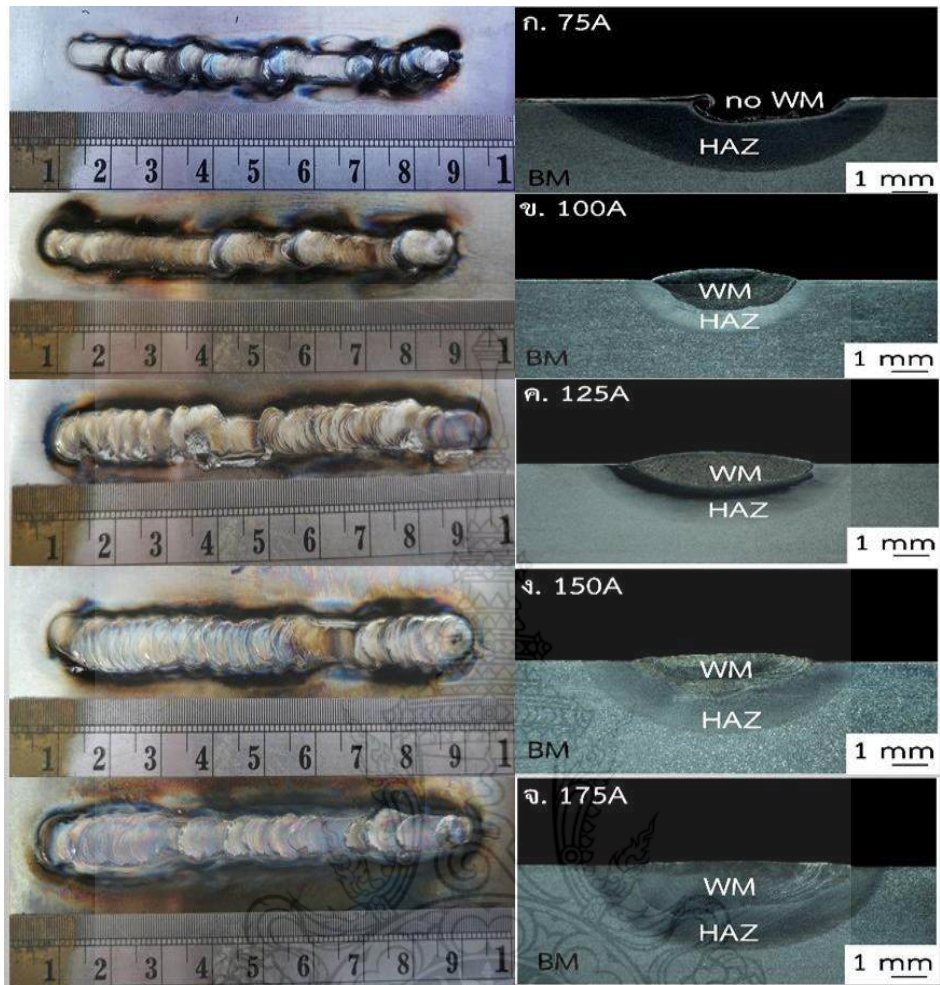




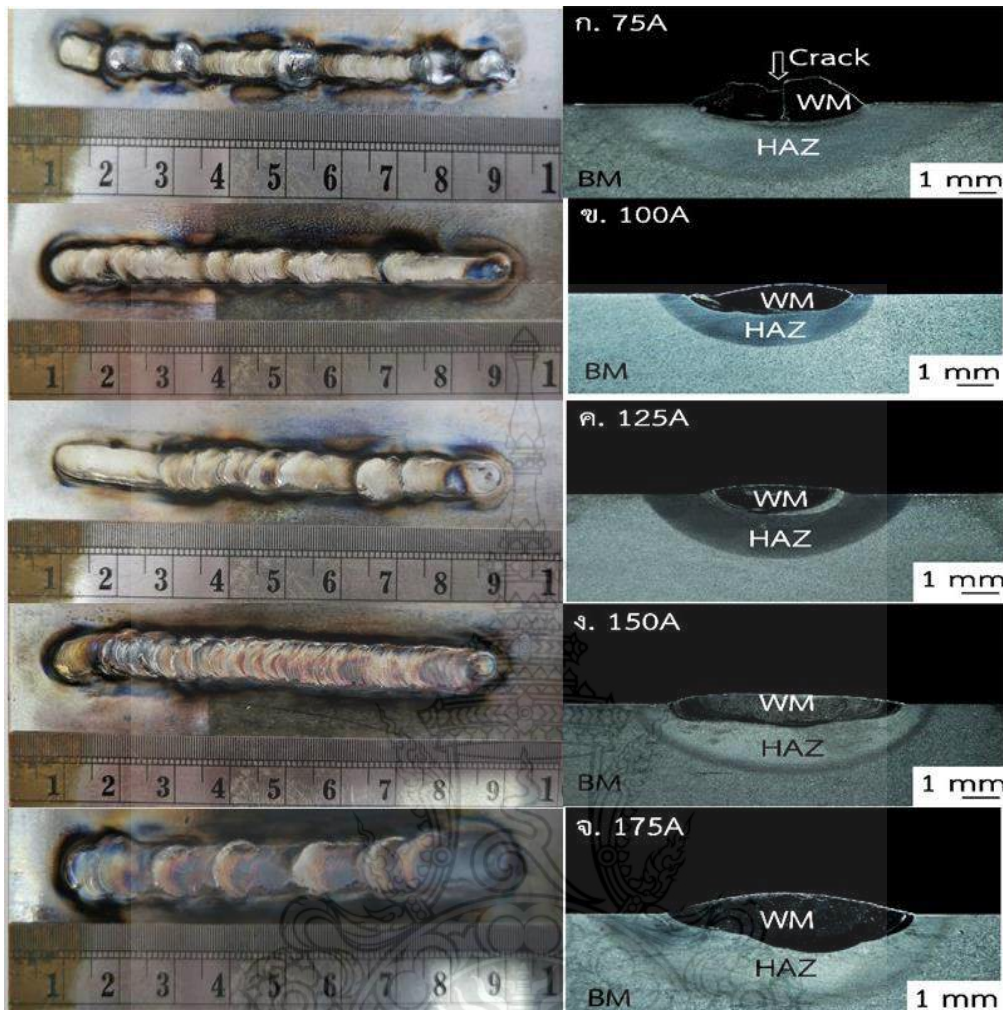
รูปที่ ก.1 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 75 มิลลิเมตร ต่อนาที



รูปที่ ก.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที

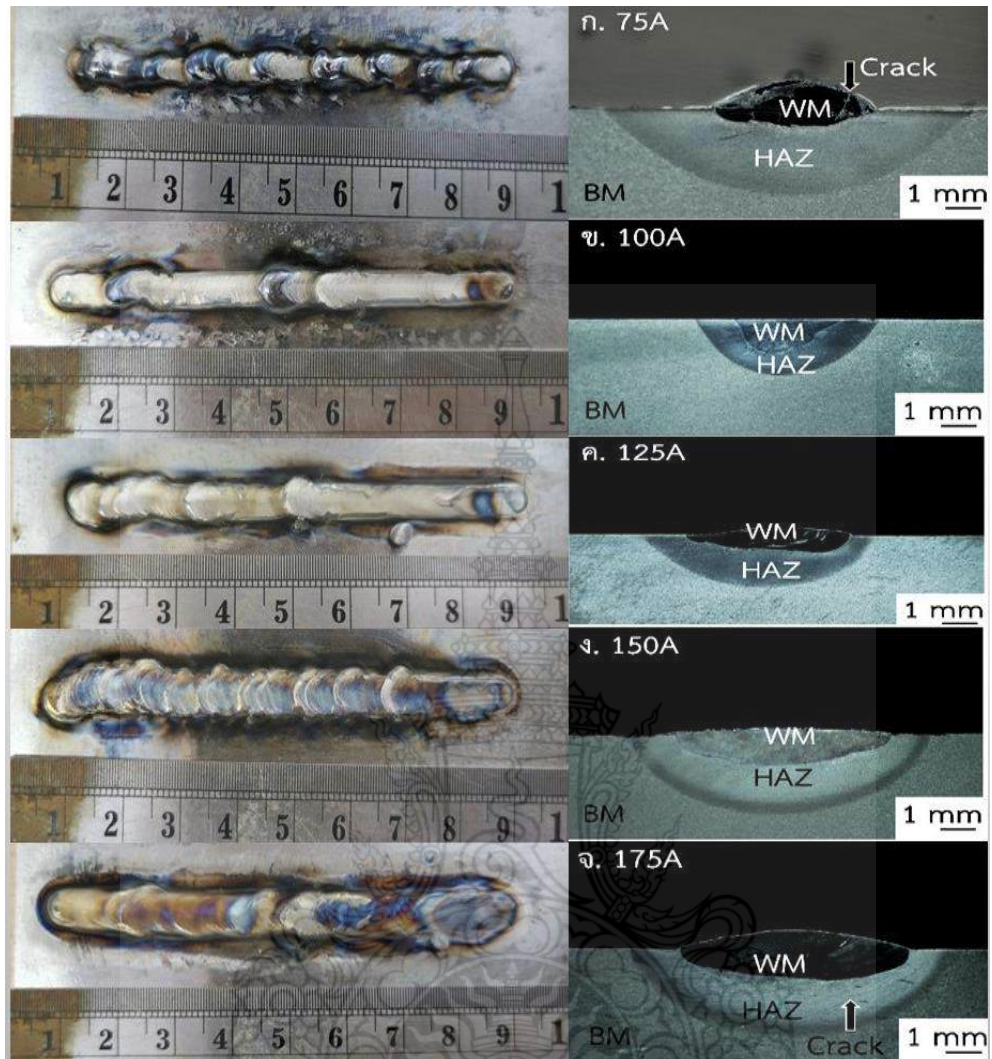


รูปที่ ก.3 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ ก.4 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที





รูปที่ ก.5 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่อนาที

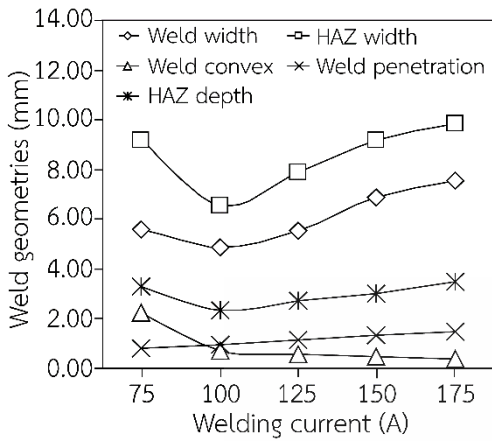


รูปที่ ก.6 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเชื่อมเกยที่กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ระยะร้อนแนว 10% 20% 30% และ 40%

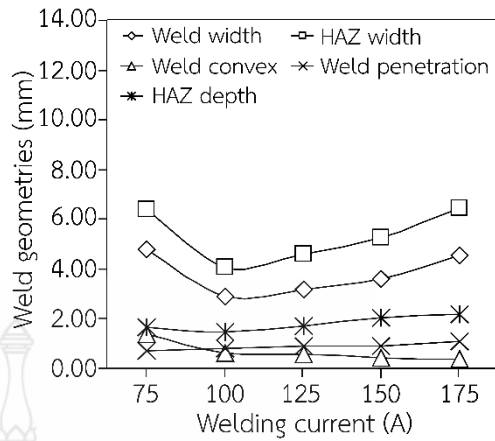
ภาคผนวก ข.

รูปร่างของแนวเชื่อม

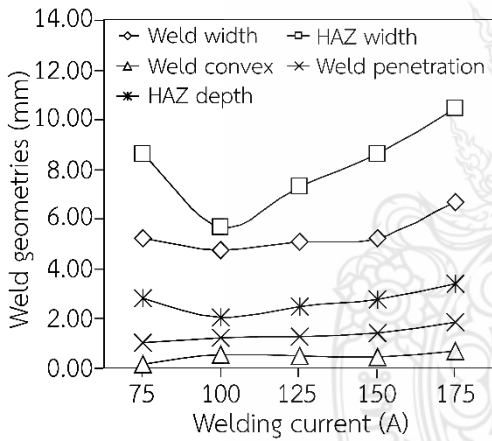




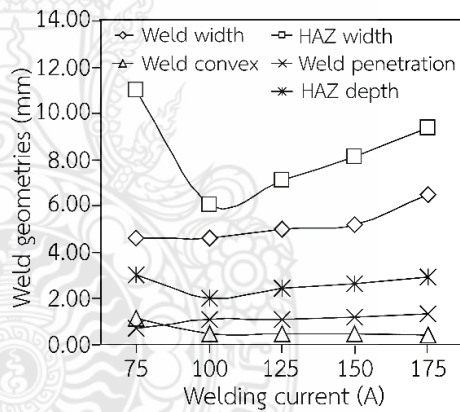
รูปที่ ข.1 กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์
ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที



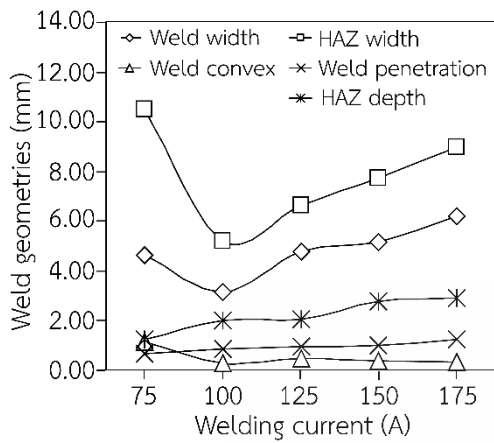
รูปที่ ข.2 กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์
ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที



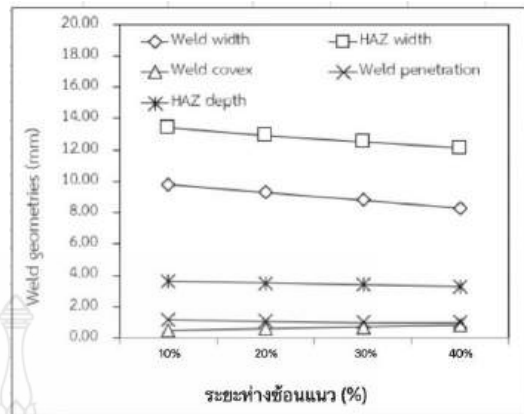
รูปที่ ข.3 กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์
ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ ข.4 กระแสเชื่อม 75 - 175 แอมแปร์
ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที



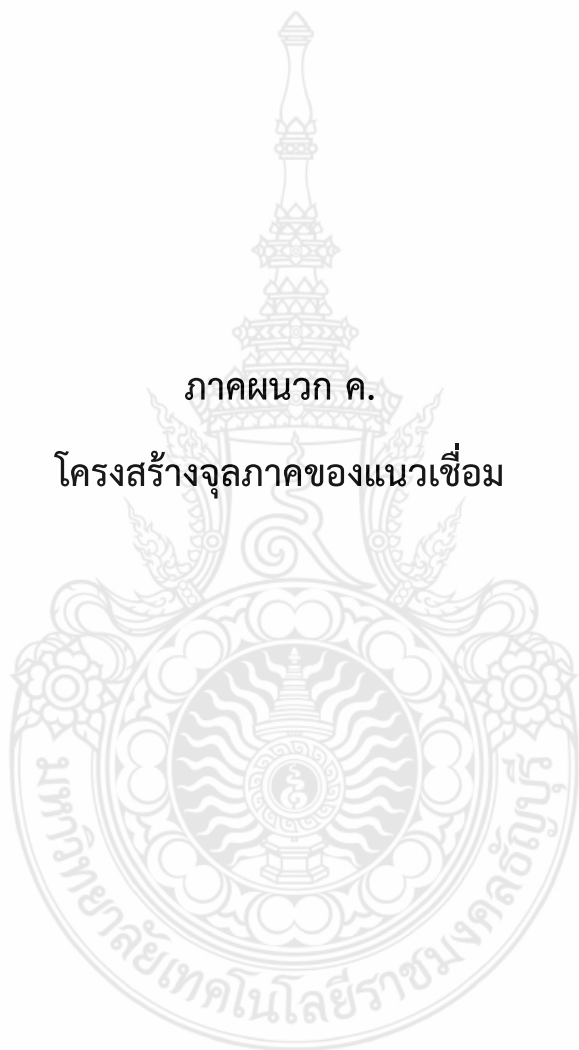
รูปที่ ข.5 กระแสเชื่อม 75 – 175 แอมแปร์
ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่อนาที

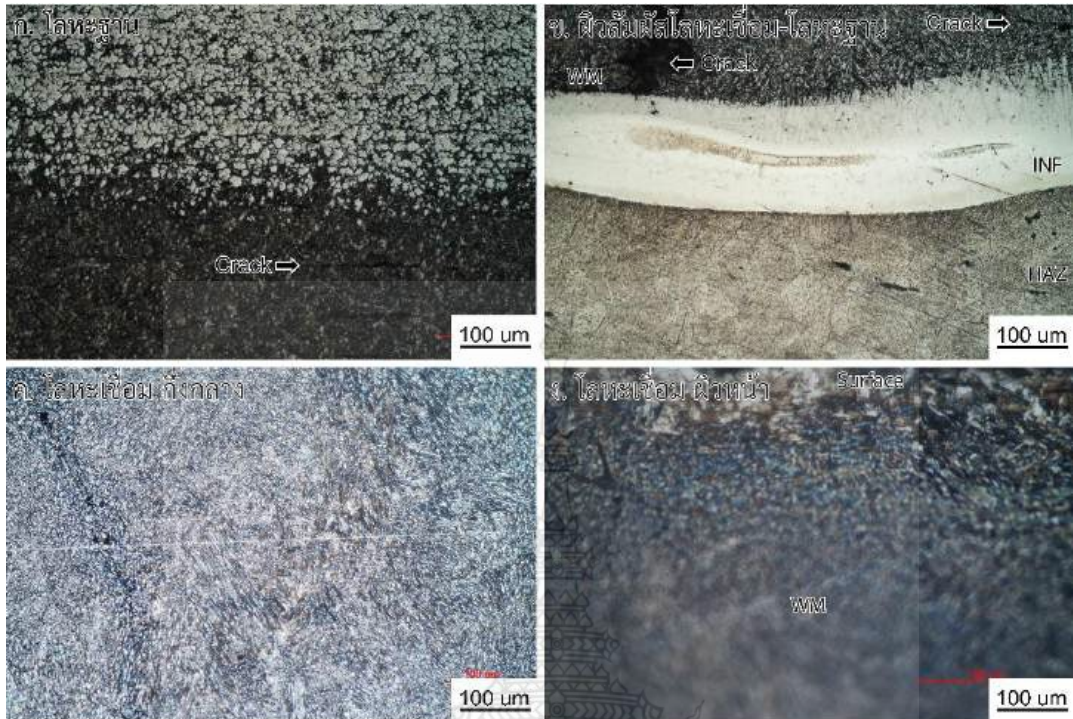


รูปที่ ข.6 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์
ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ระยะห่าง
10 – 40

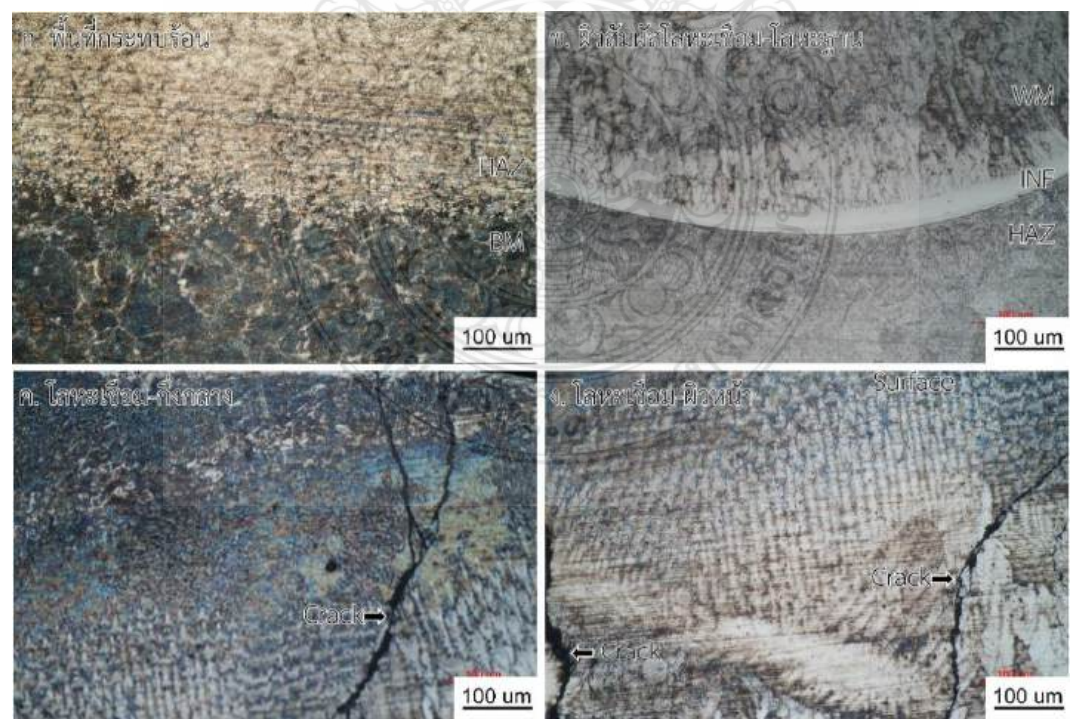


ภาคผนวก ค.
โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

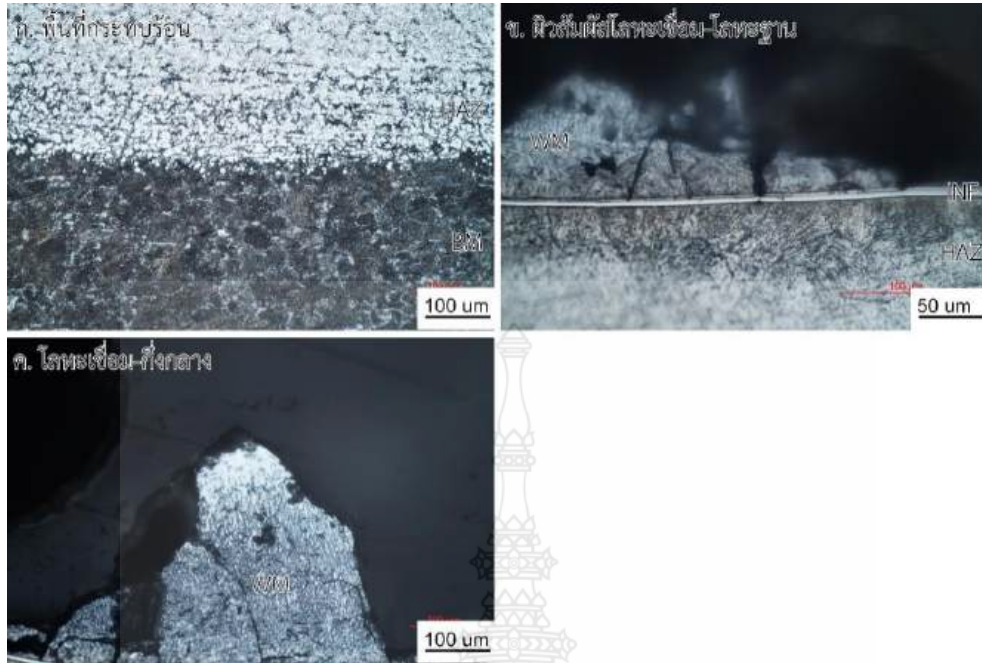




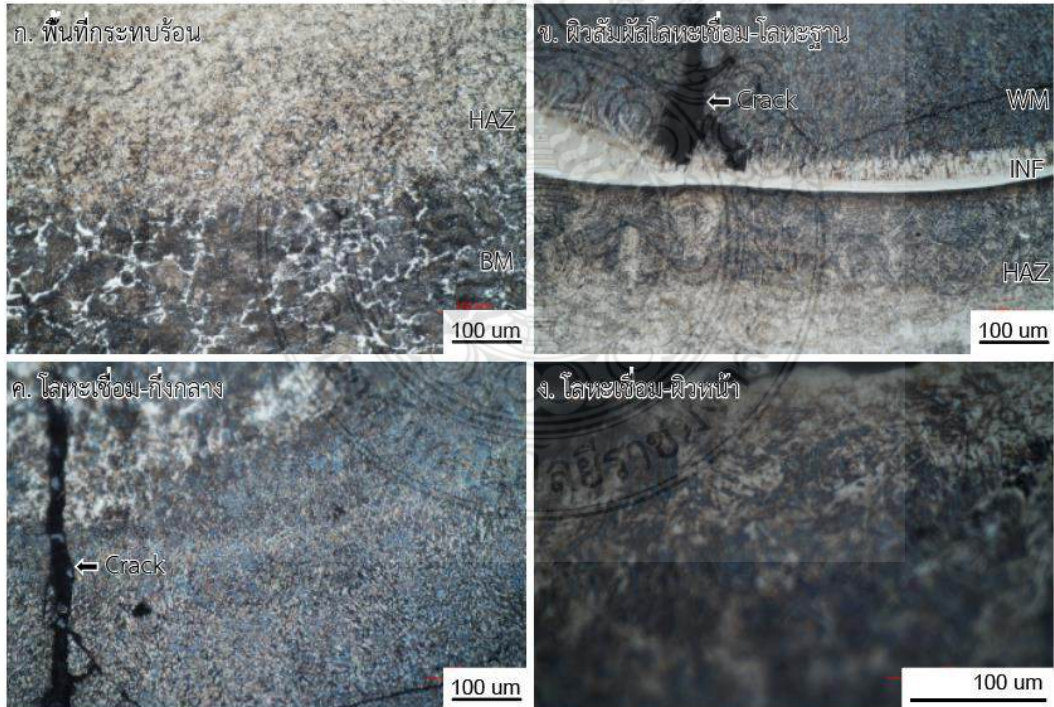
รูปที่ ค.1 กระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที



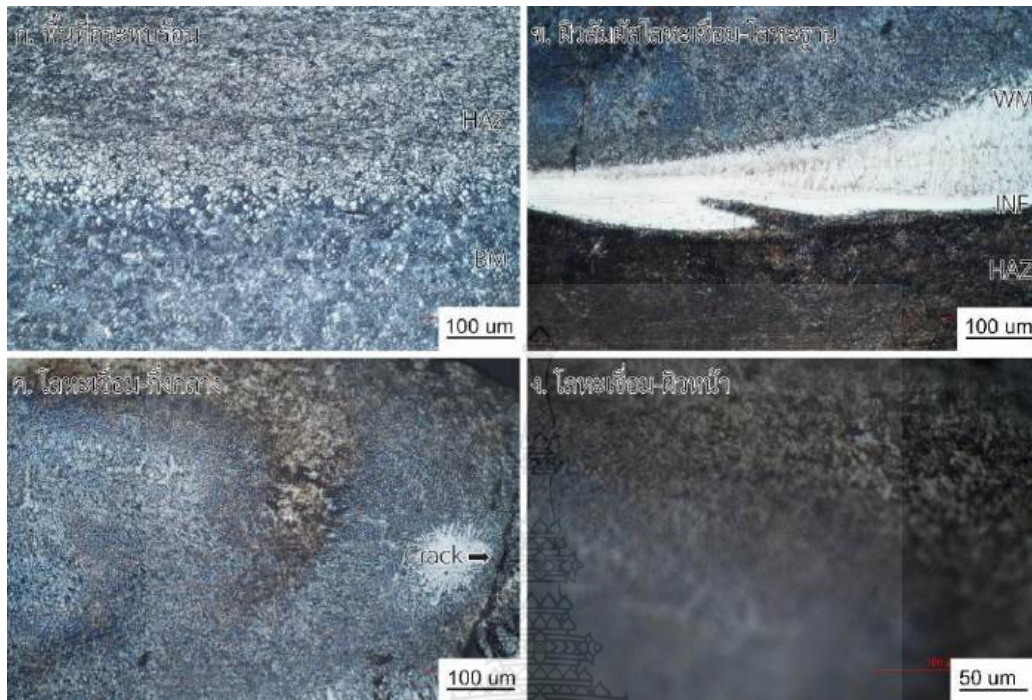
รูปที่ ค.2 กระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที



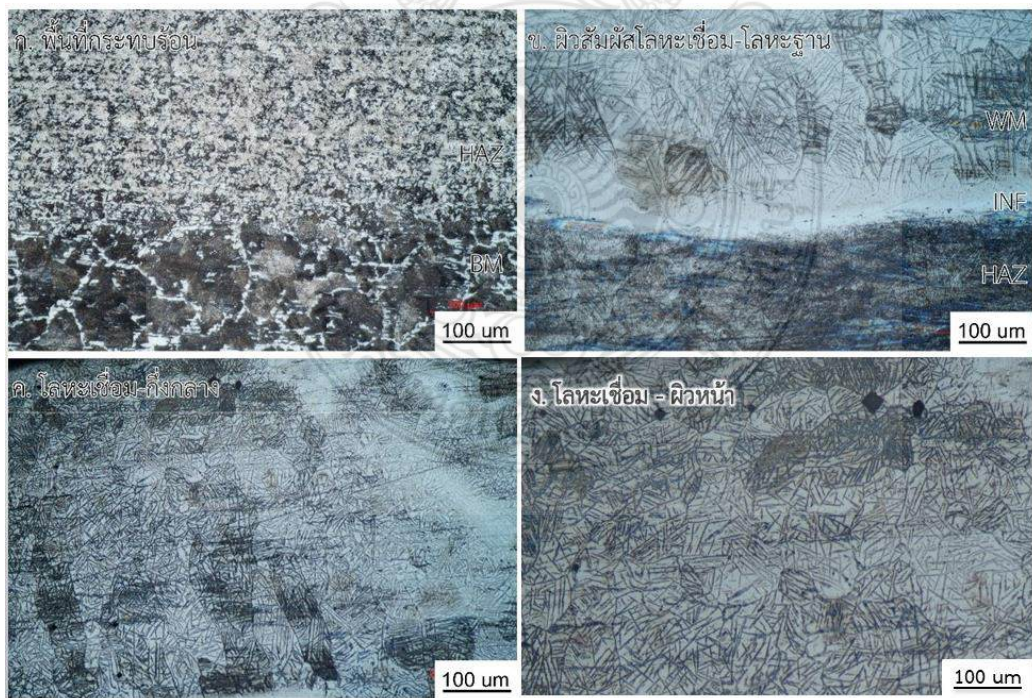
รูปที่ ค.3 กระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาที



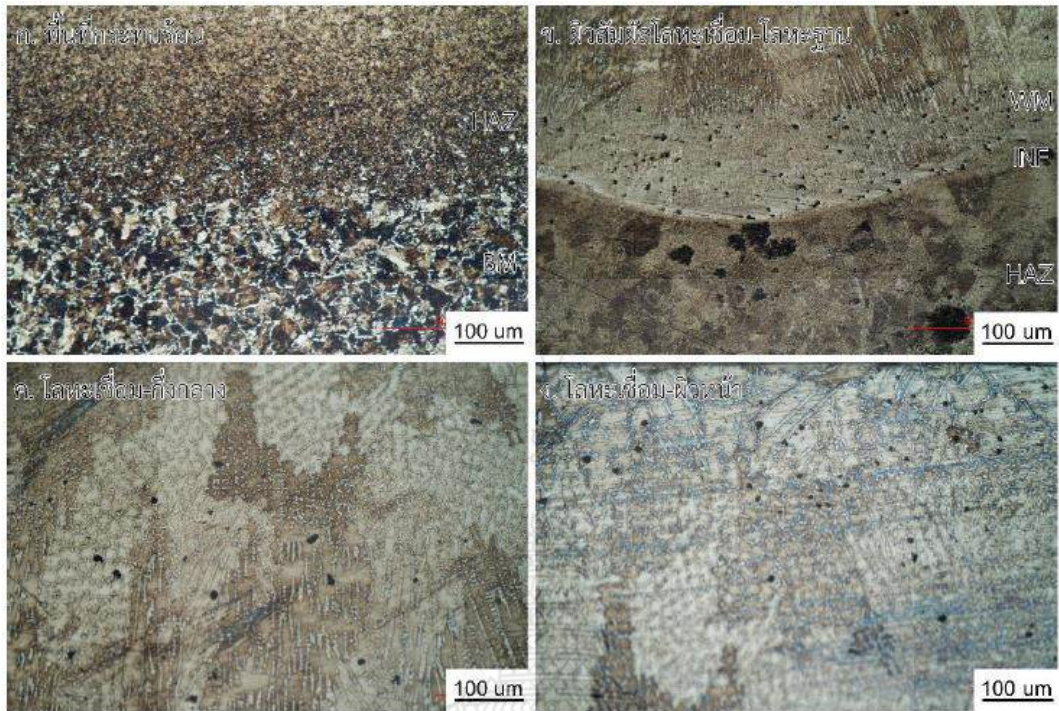
รูปที่ ค.4 กระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที



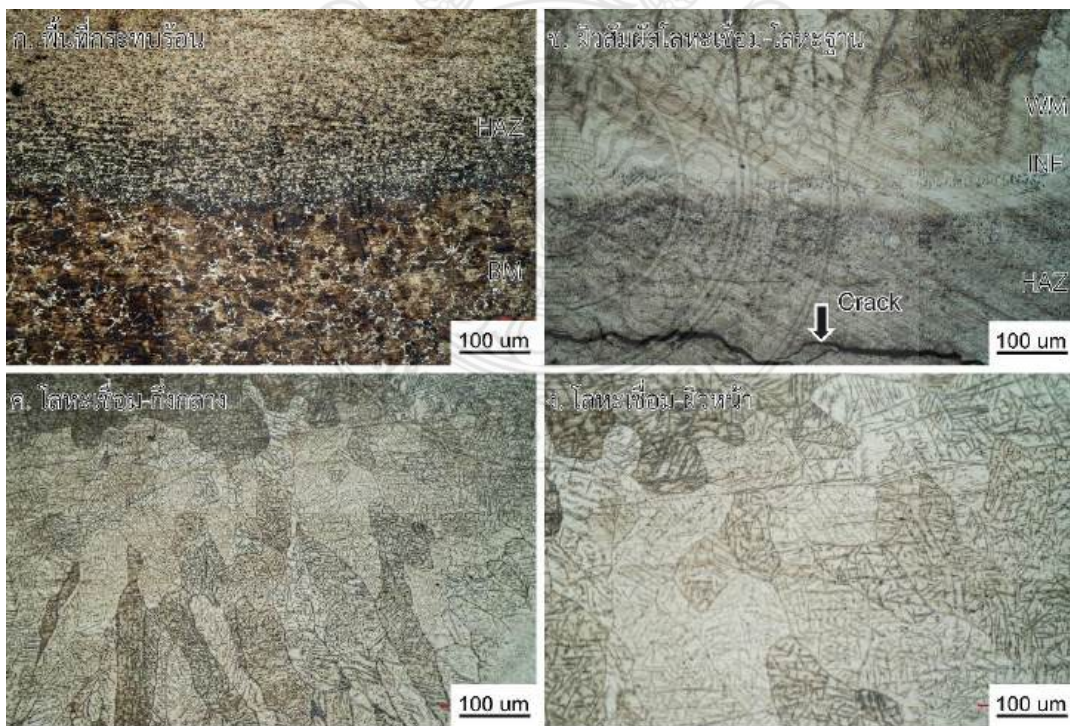
รูปที่ ค.5 กระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่อนาที



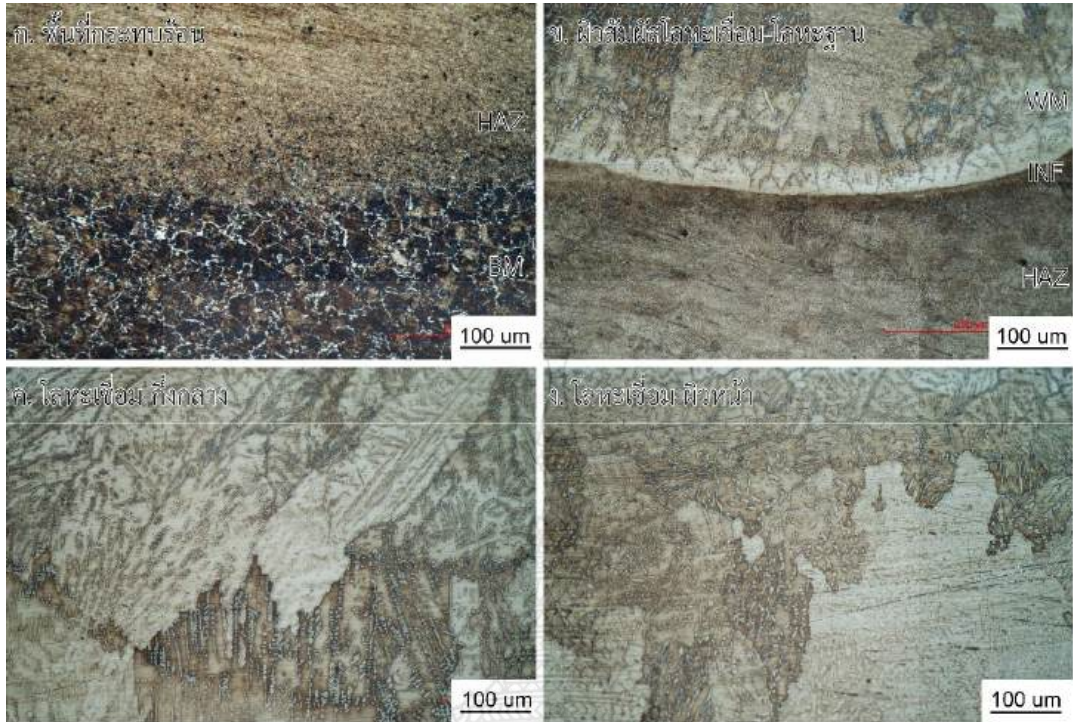
รูปที่ ค.6 กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที



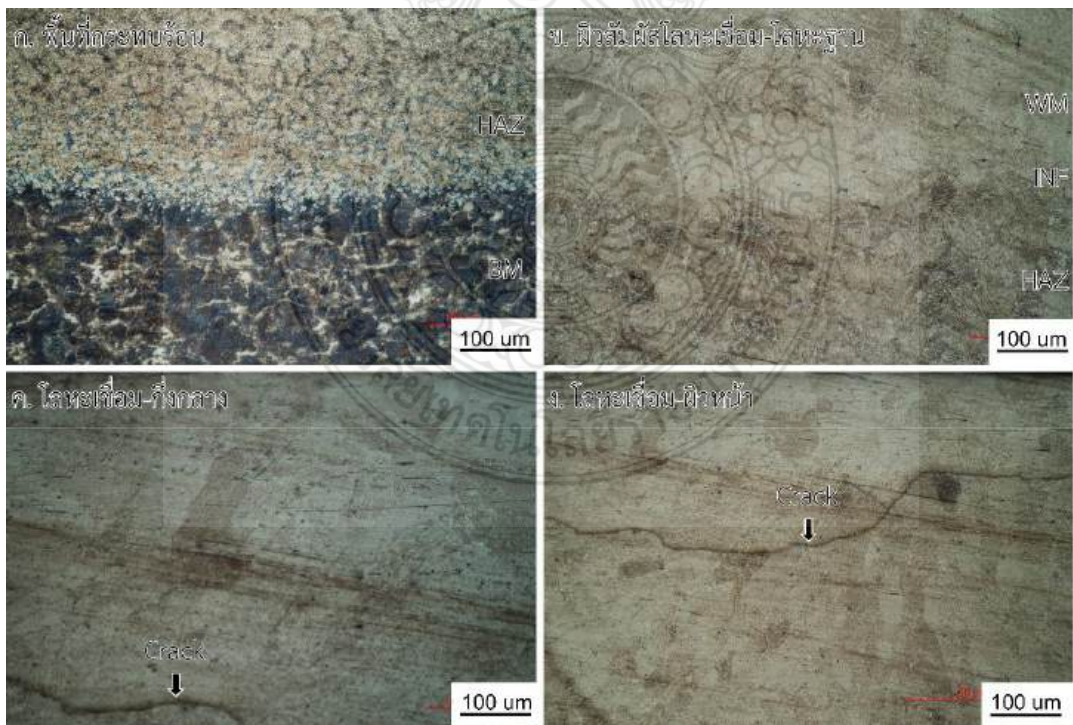
รูปที่ ค.7 กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที



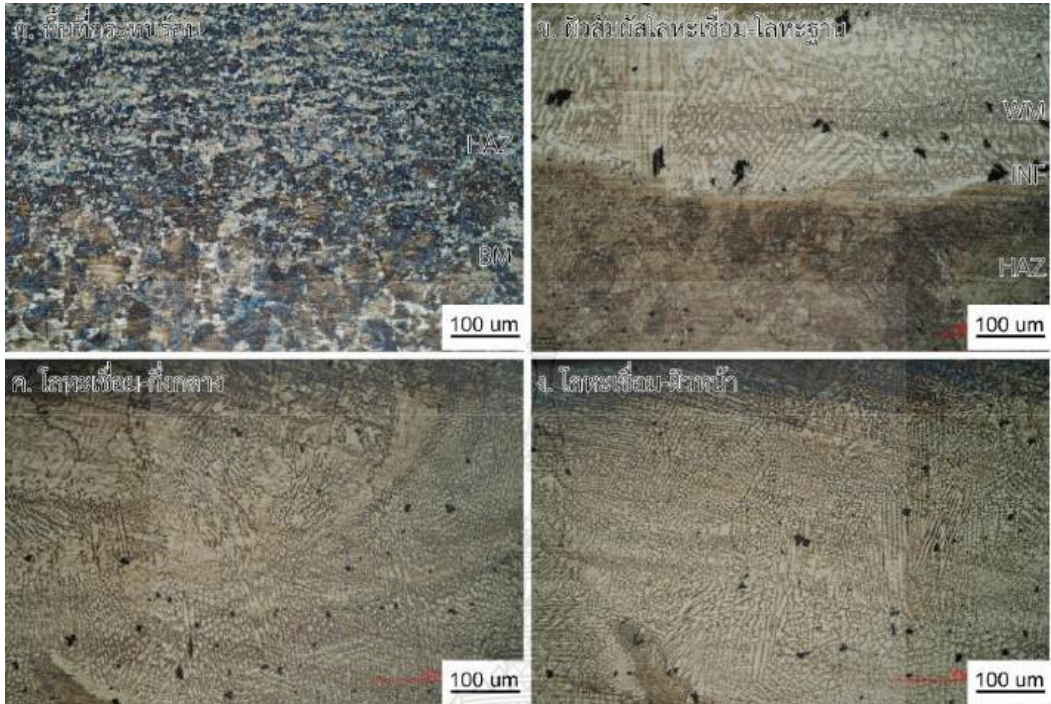
รูปที่ ค.8 กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาที



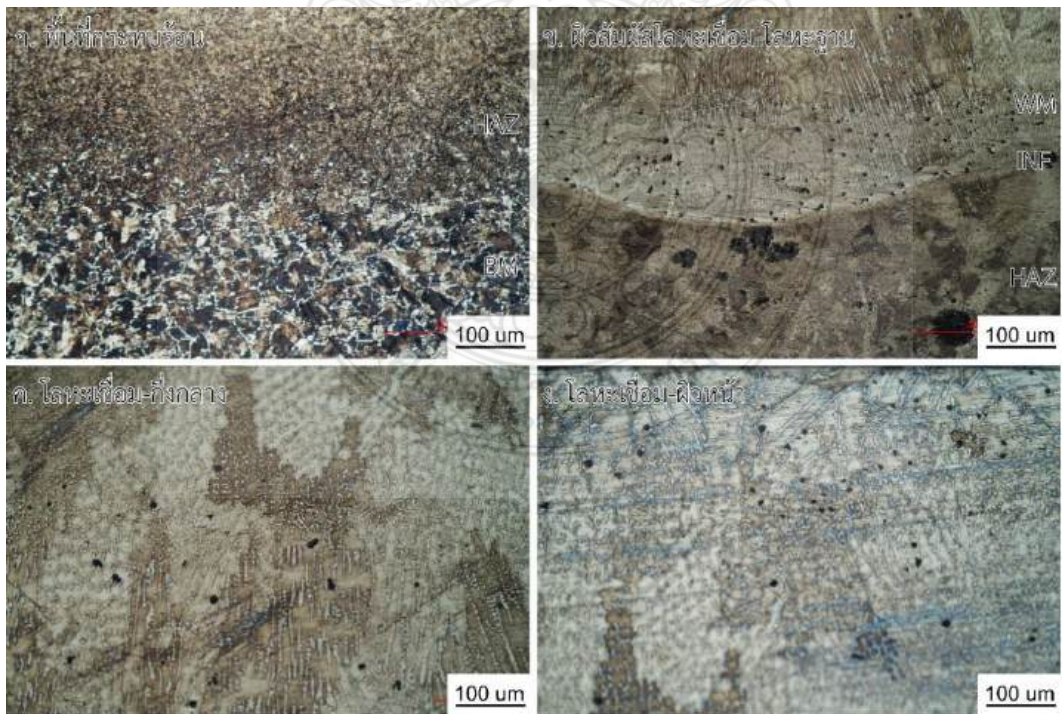
รูปที่ ค.9 กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที



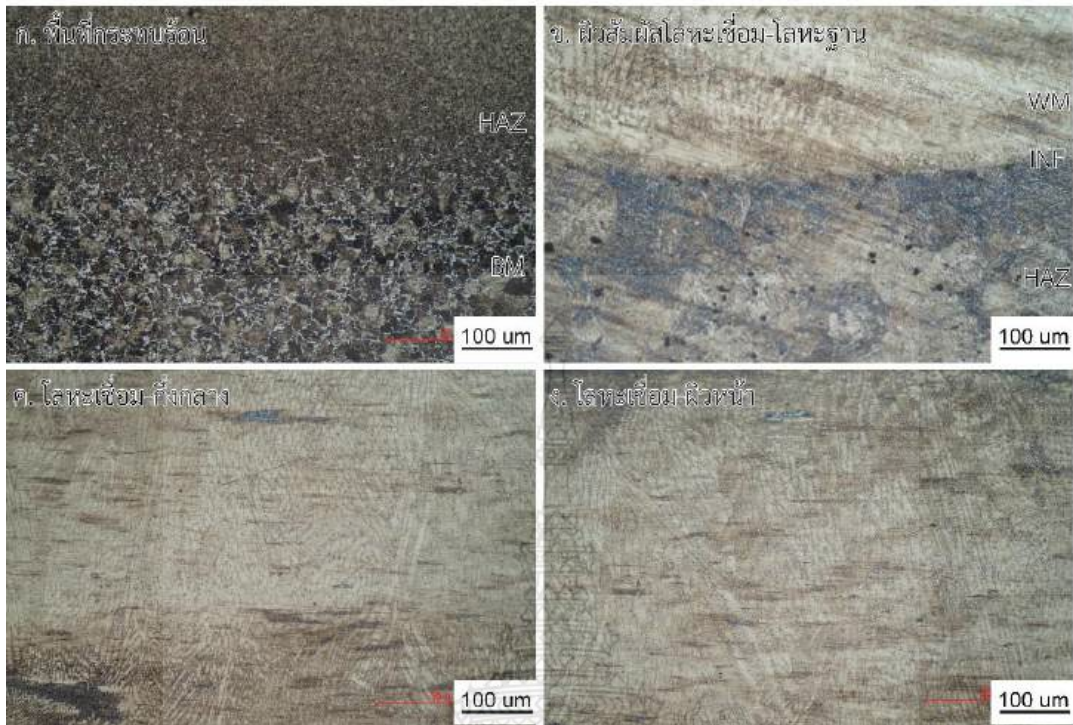
รูปที่ ค.10 กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่อนาที



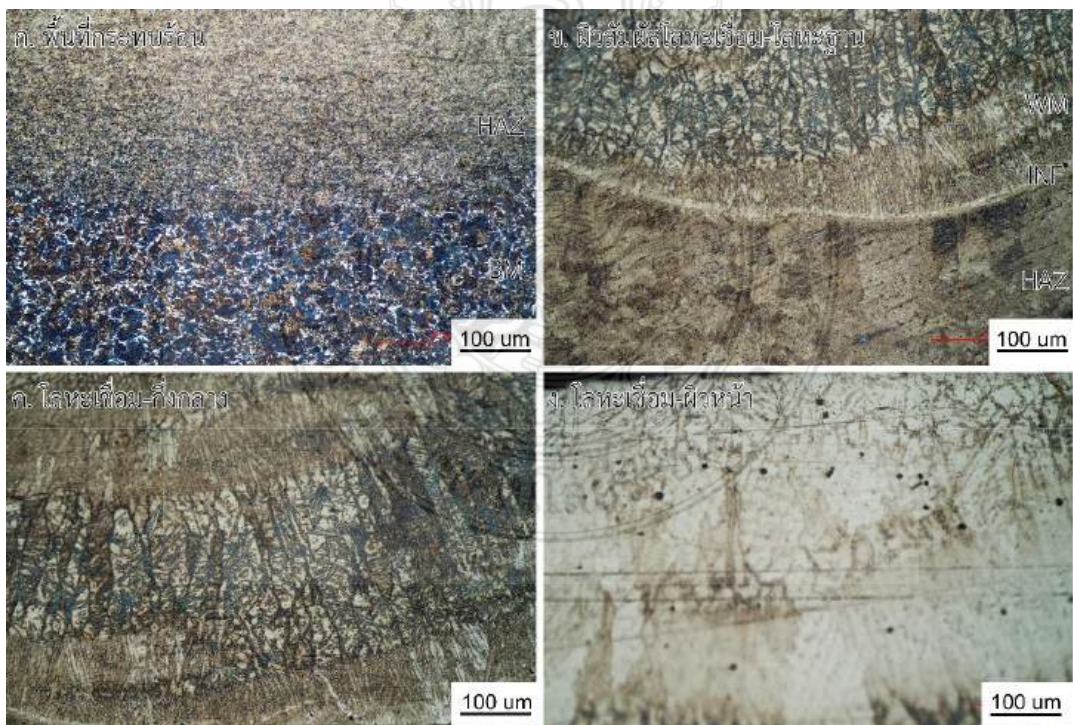
รูปที่ ค.11 กระแสเชื่อม 125 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที



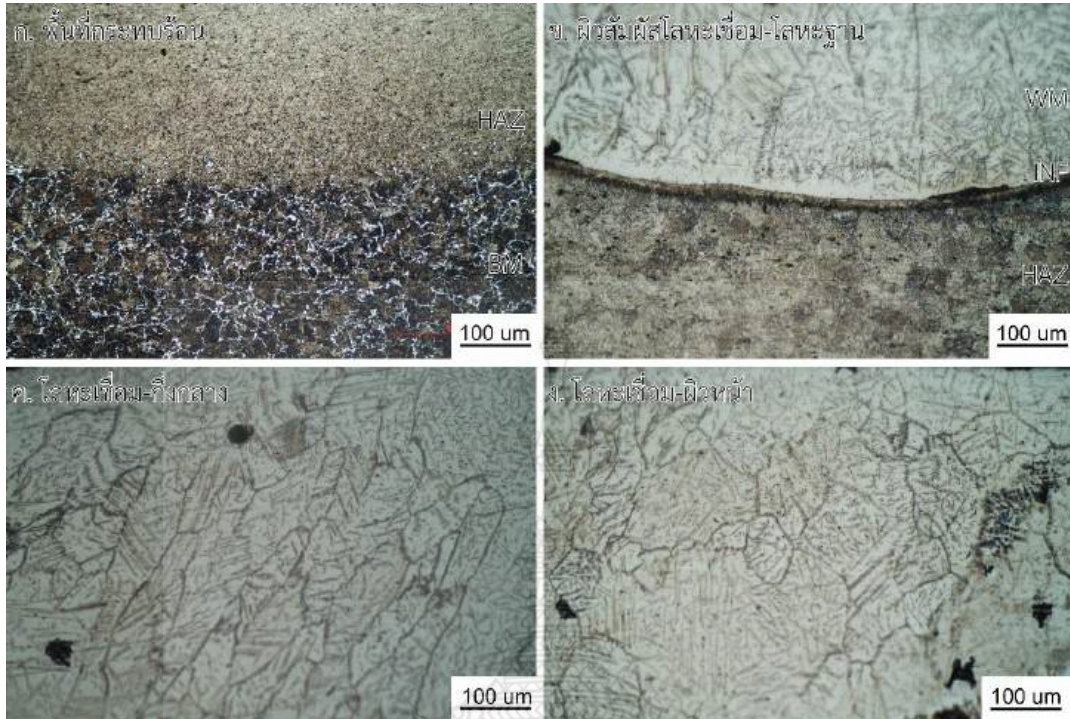
รูปที่ ค.12 กระแสเชื่อม 125 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที



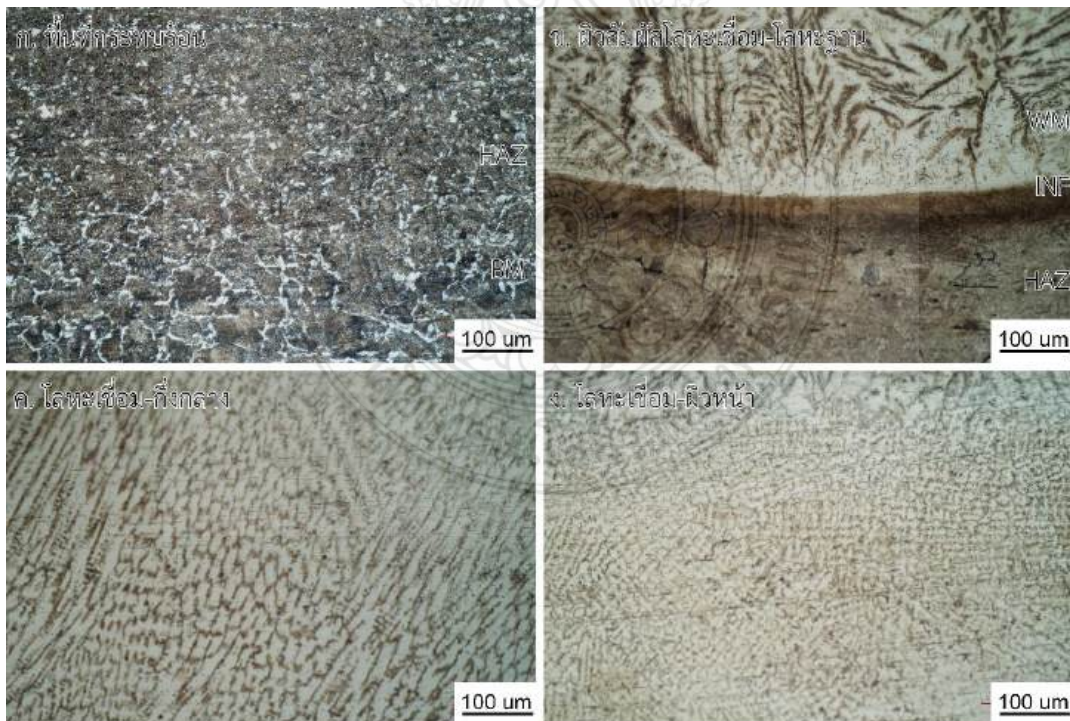
รูปที่ ค.13 กระแสเชื่อม 125 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาที



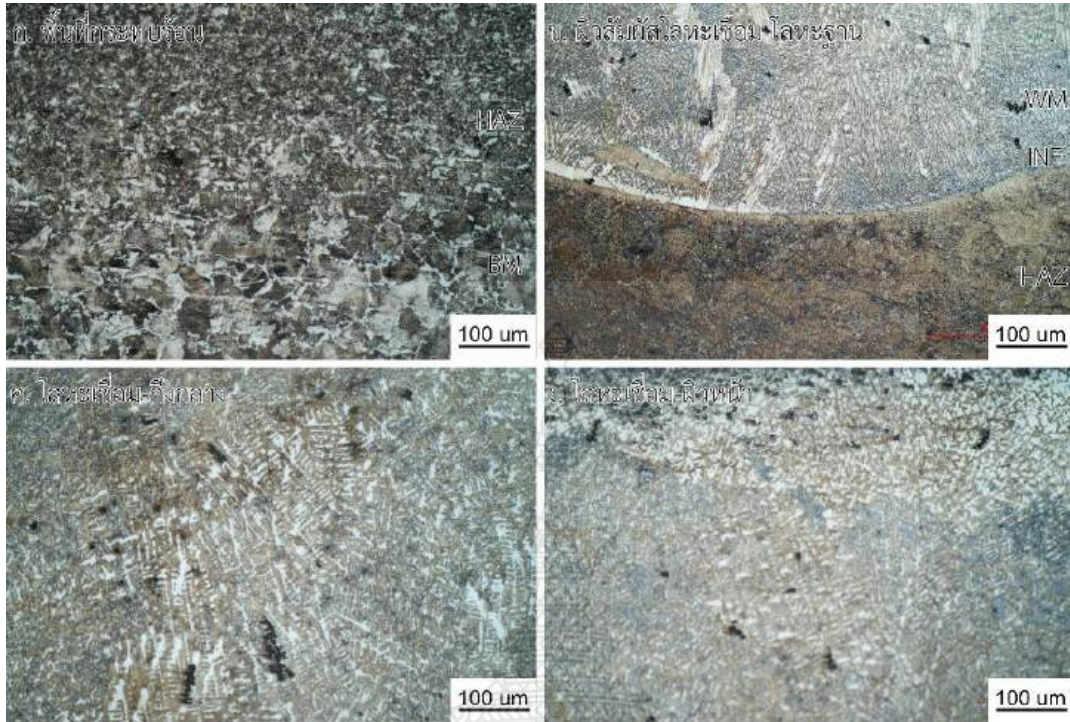
รูปที่ ค.14 กระแสเชื่อม 125 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที



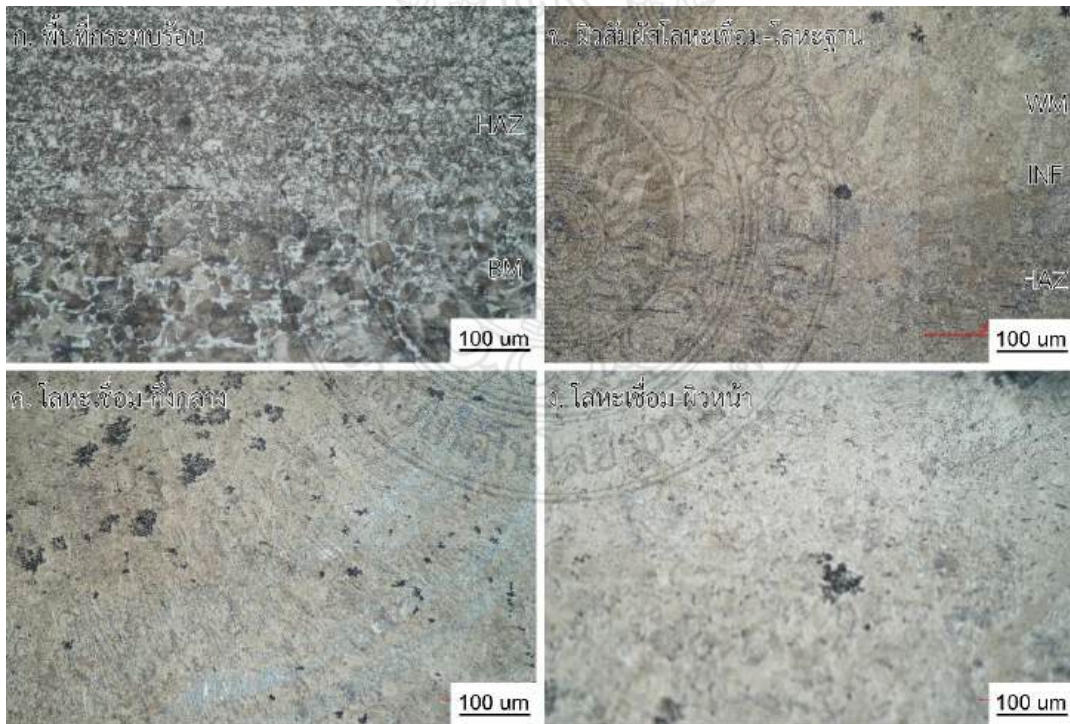
รูปที่ ค.15 กระแสเชื่อม 125 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่อนาที



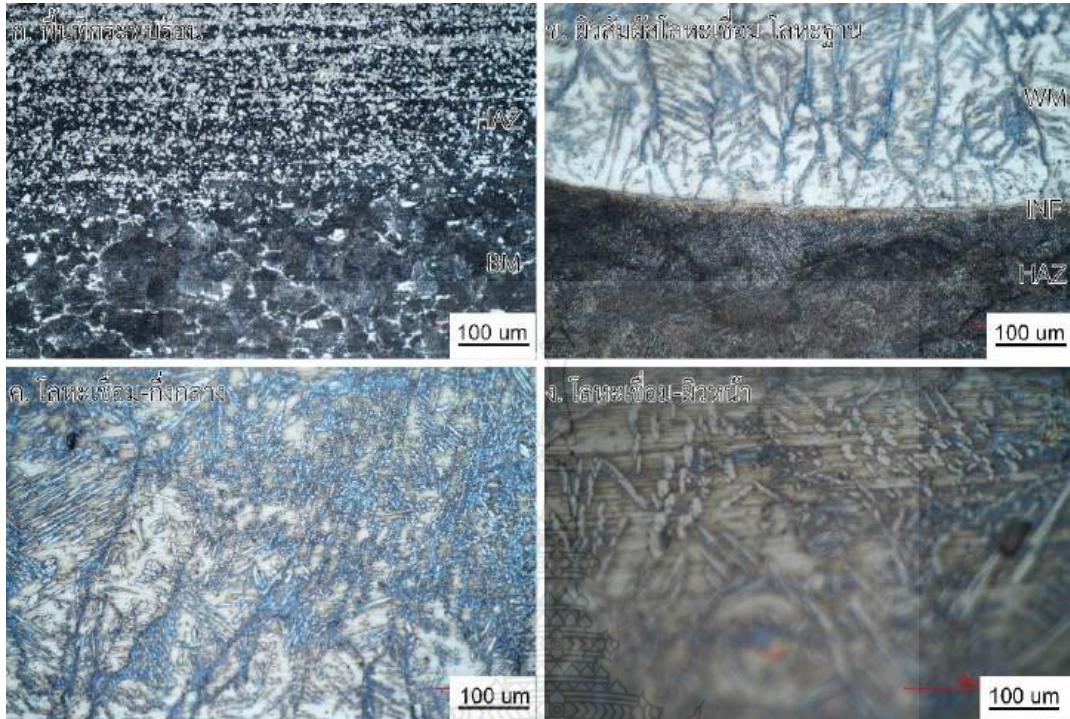
รูปที่ ค.16 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที



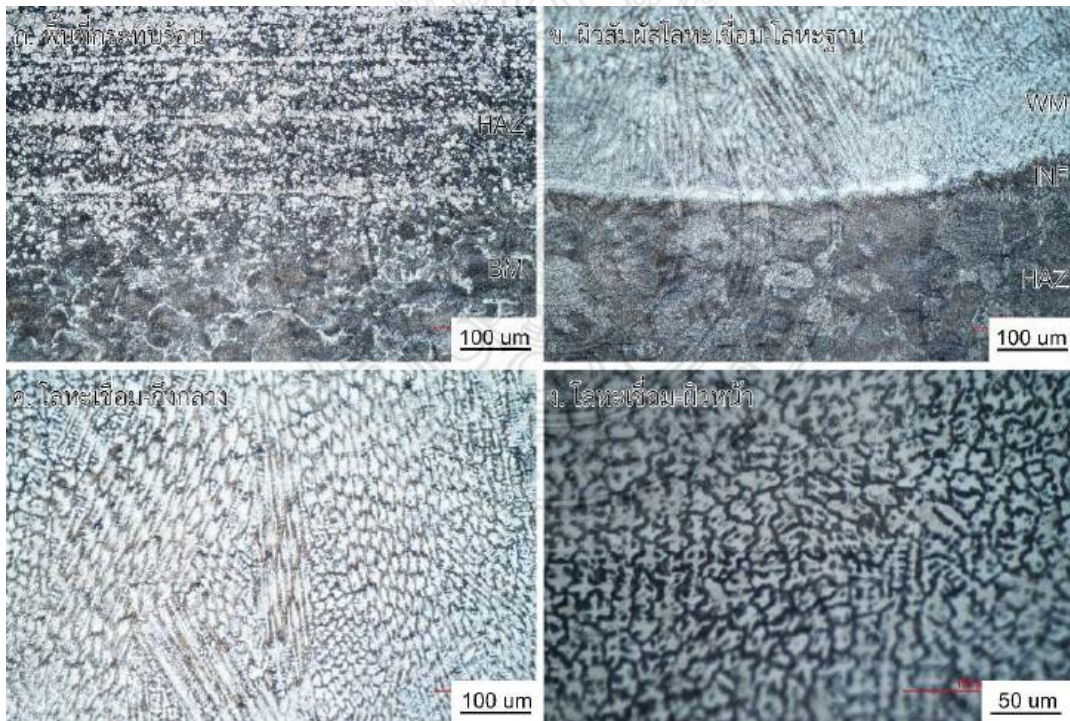
รูปที่ ค.17 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที



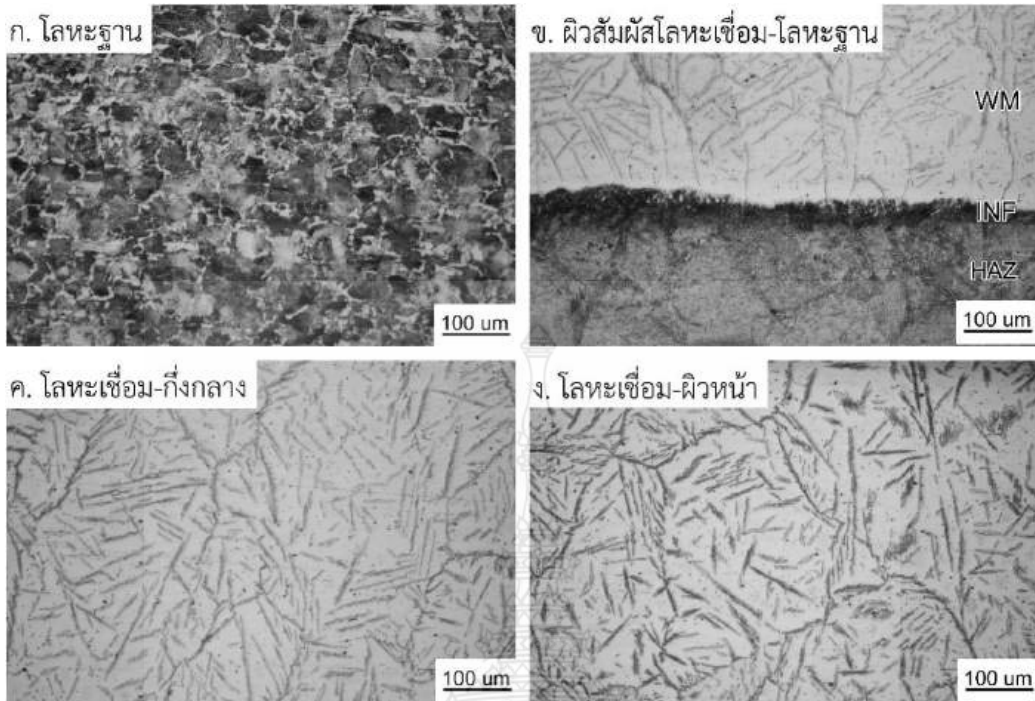
รูปที่ ค.18 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาที



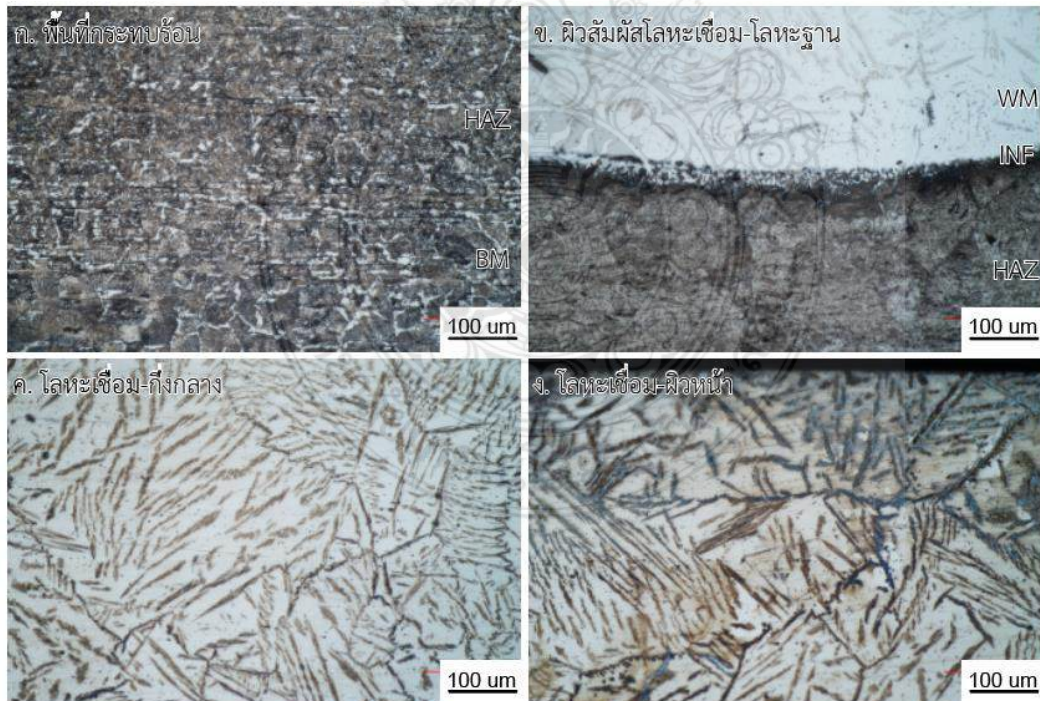
รูปที่ ค.19 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที



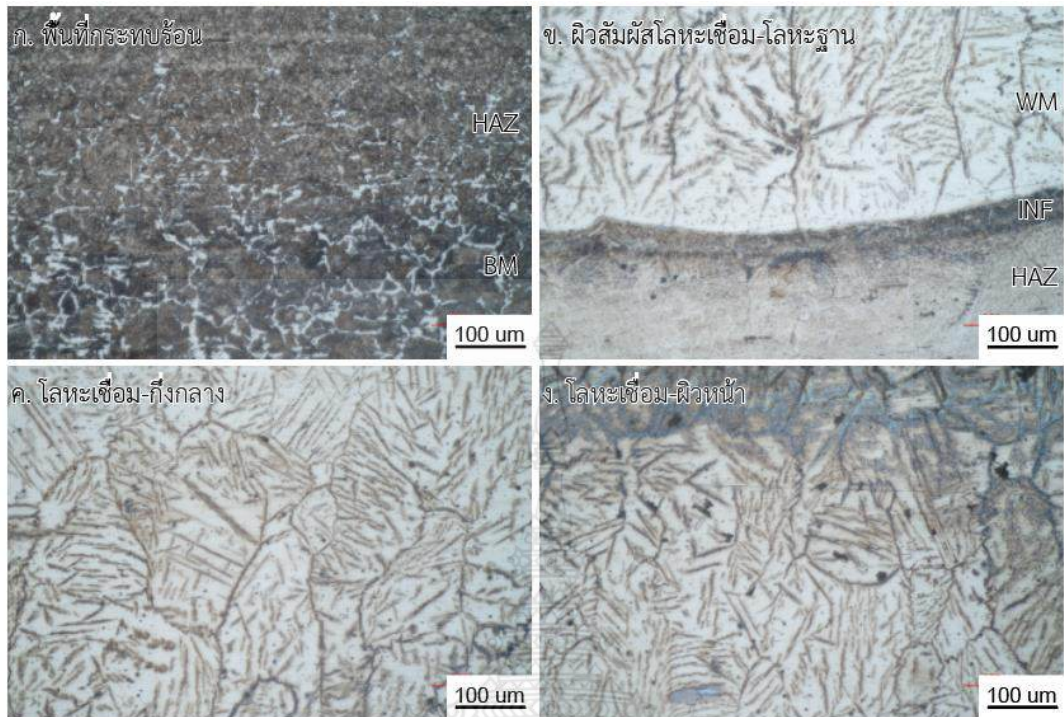
รูปที่ ค.20 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่อนาที



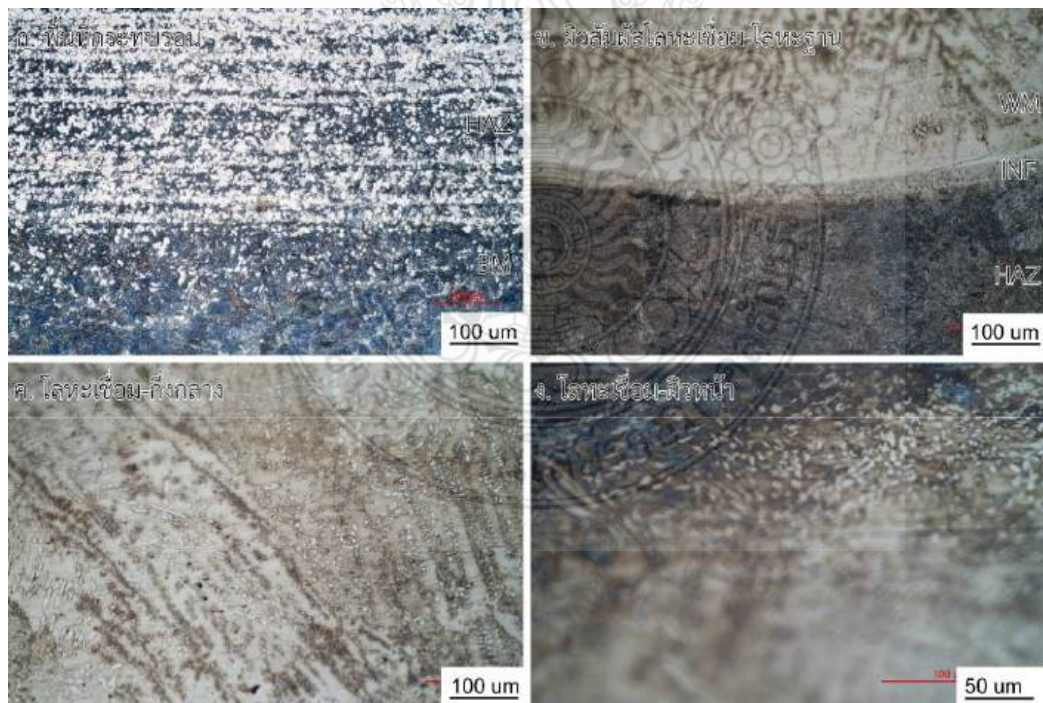
รูปที่ ค.21 กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที



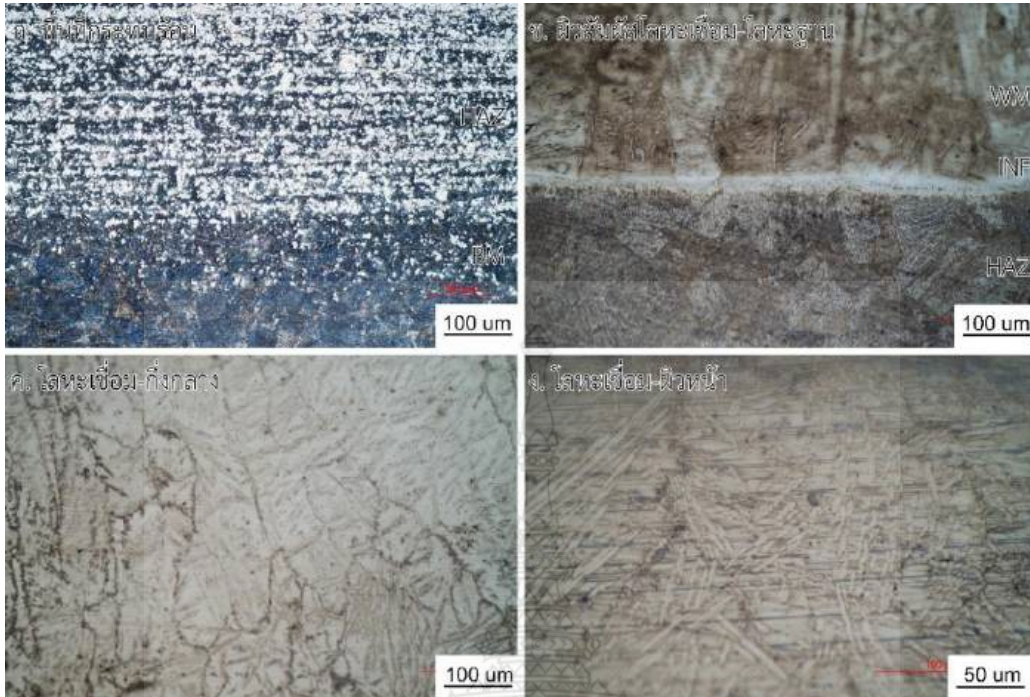
รูปที่ ค.22 กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที



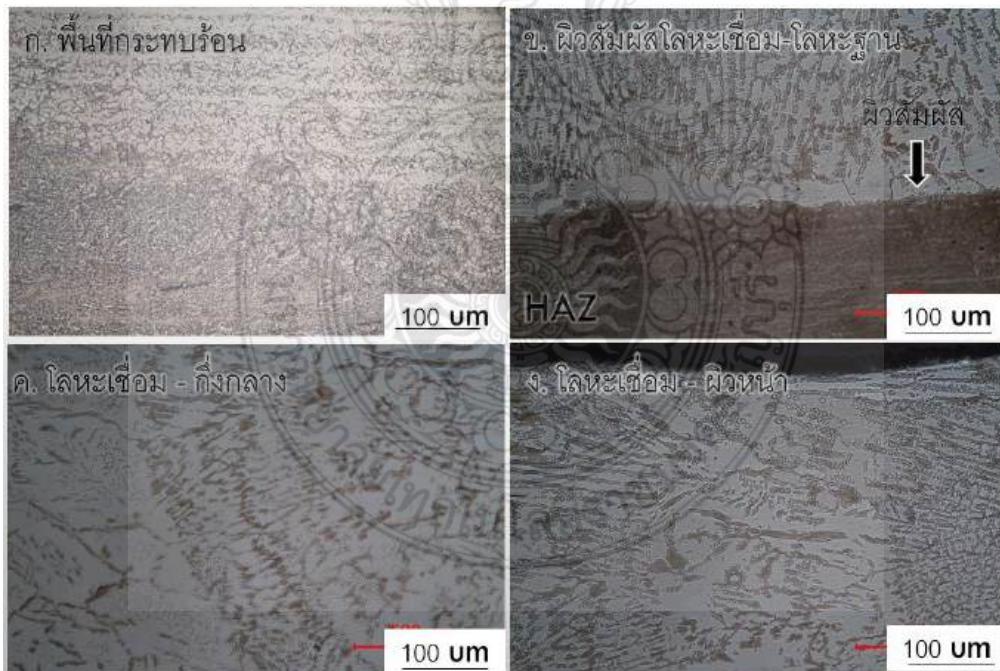
รูปที่ ค.23 กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มิลลิเมตรต่อนาที



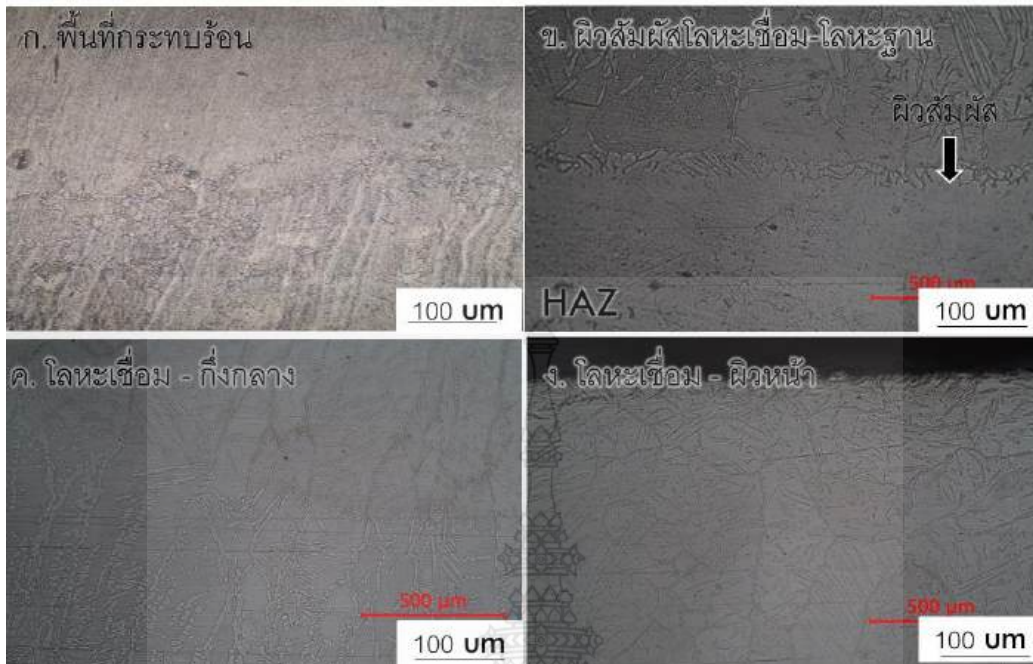
รูปที่ ค.24 กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที



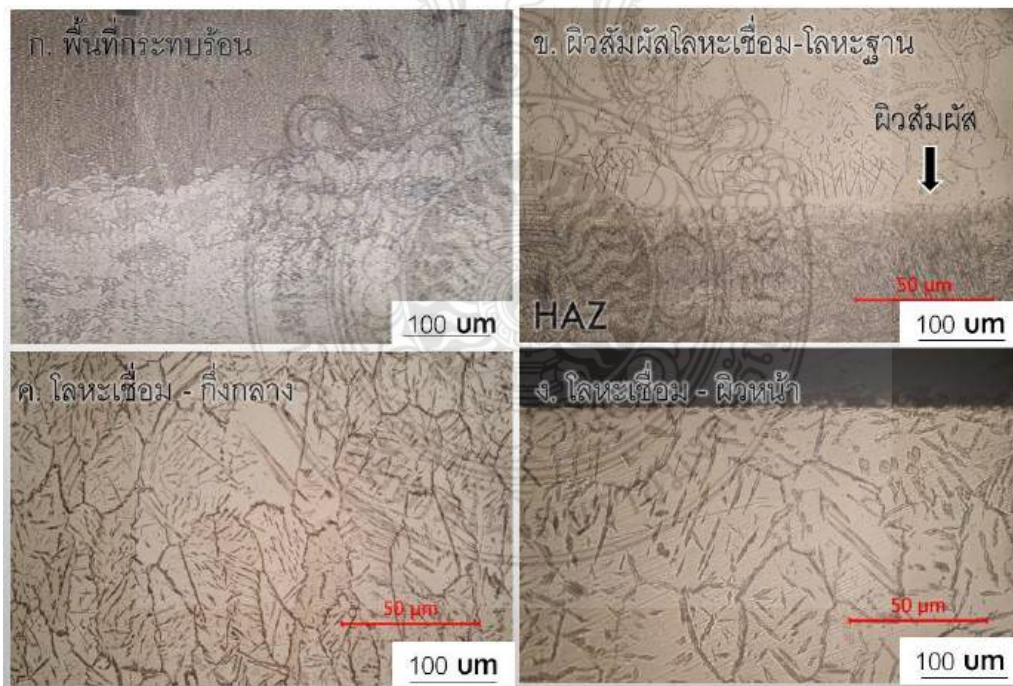
รูปที่ ค.25 กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มิลลิเมตรต่อนาที



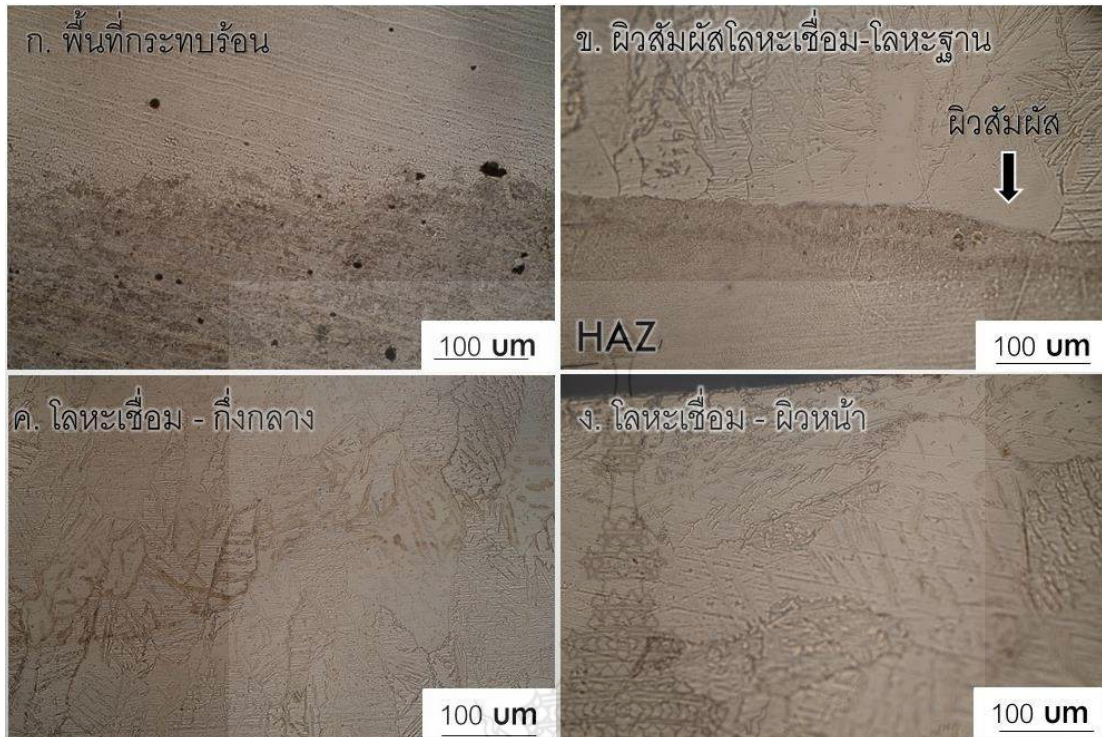
รูปที่ ค.26 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ระยะซ้อนแนว 10 %



รูปที่ ค.27 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ระยะซ้อนแนว 20%



รูปที่ ค.28 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ระยะซ้อนแนว 30%



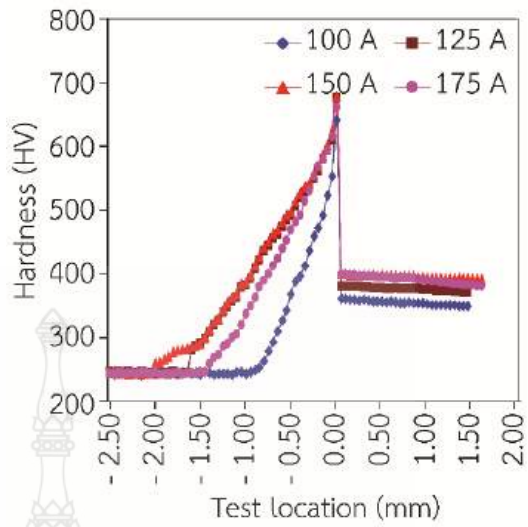
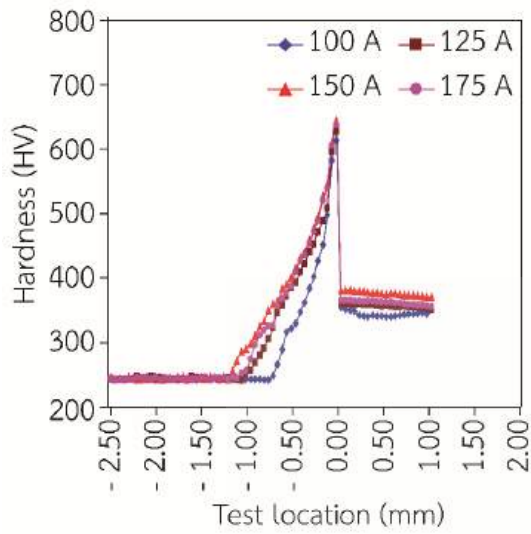
รูปที่ ค.29 กระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ระยะซ้อนแนว 40%



ภาคผนวก ง.

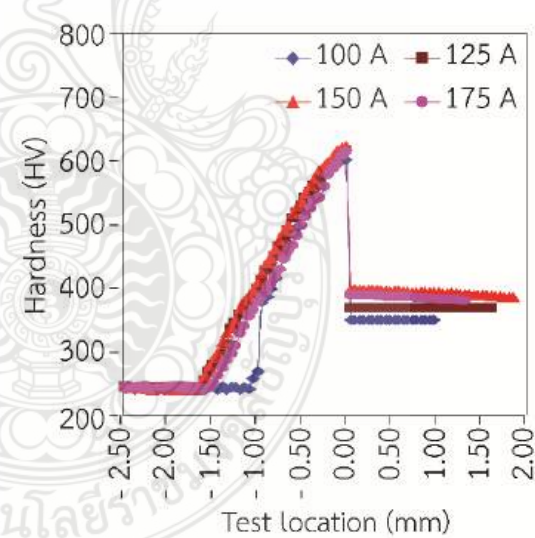
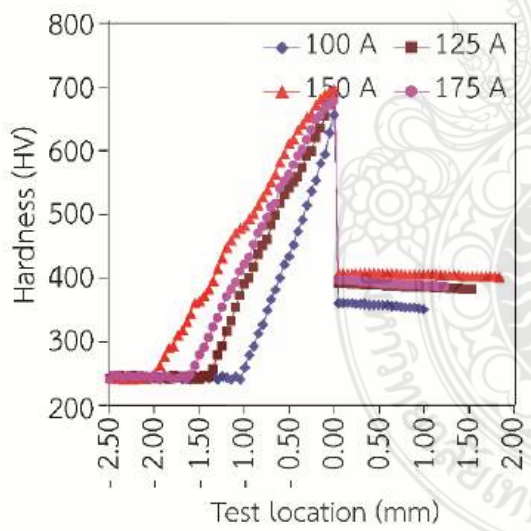
ความแข็ง





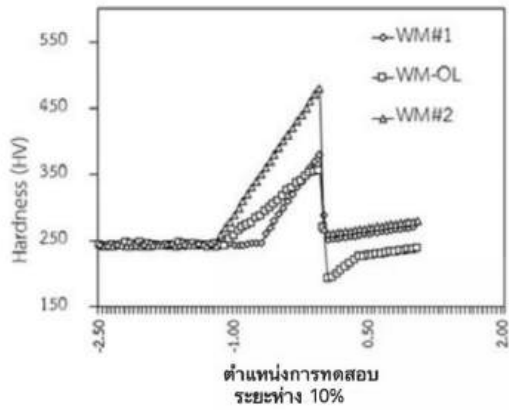
รูปที่ ง.1 ค่าความเร็วเดิน 100 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ ง.2 ค่าความเร็วเดิน 125 มิลลิเมตรต่อนาที

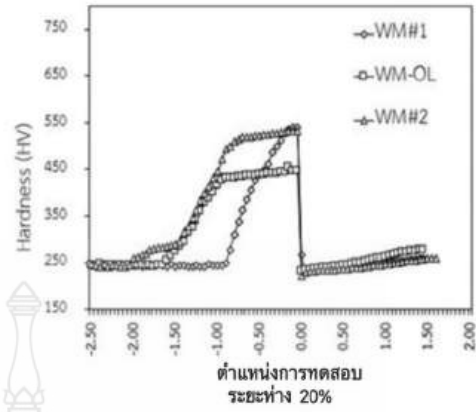


รูปที่ ง.3 ค่า ความเร็วเดิน 150 มิลลิเมตรต่อนาที

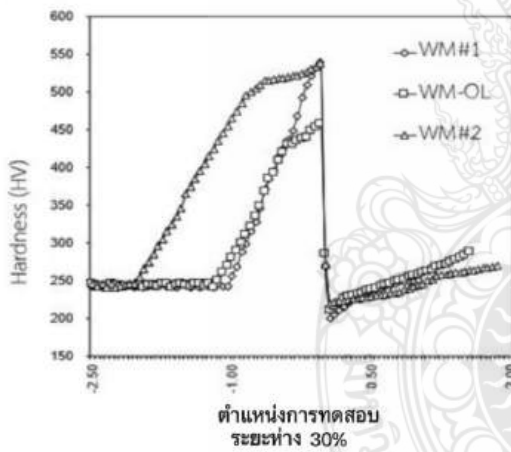
รูปที่ ง.4 ค่า ความเร็วเดิน 175 มิลลิเมตรต่อนาที



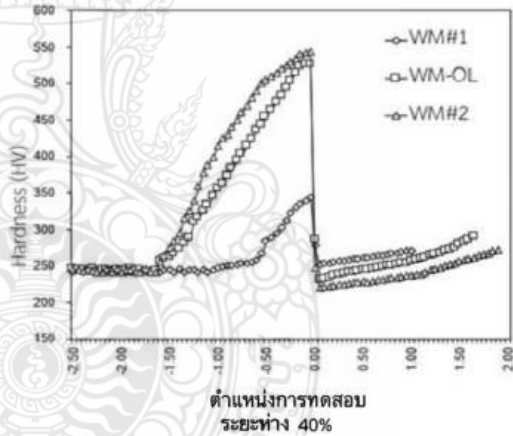
รูปที่ ๓.5 ค่าความแข็งของระยะซ้อนเกยที่ 10%



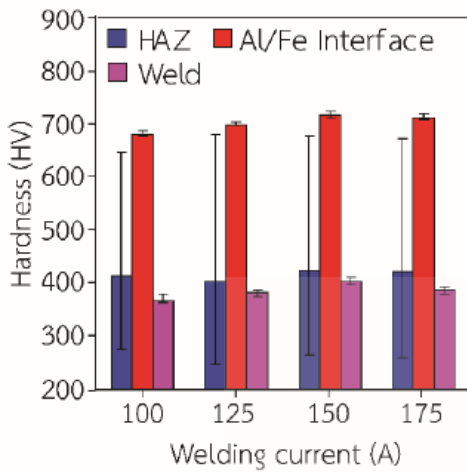
รูปที่ ๓.6 ค่าความแข็งของระยะซ้อนเกยที่ 20%



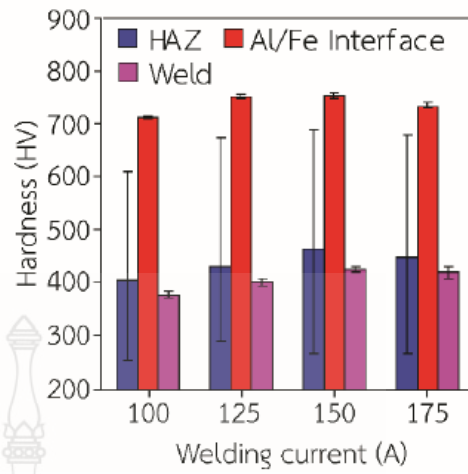
รูปที่ ๓.7 ค่าความแข็งของระยะซ้อนเกยที่ 30%



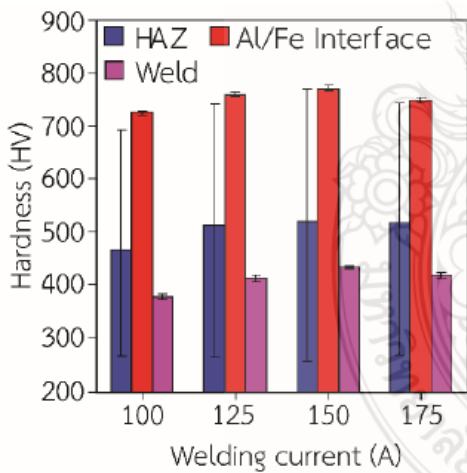
รูปที่ ๓.8 ค่าความแข็งของระยะซ้อนเกยที่ 40%



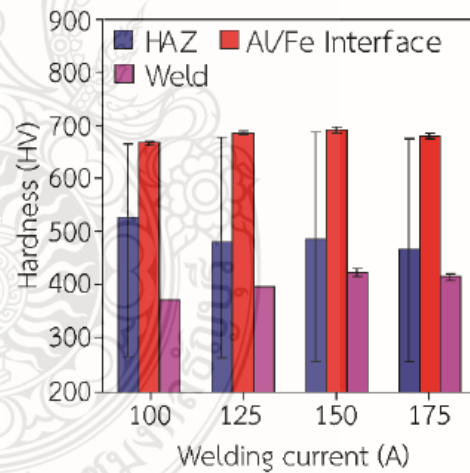
รูปที่ ง.9 ค่าความแข็งเฉพาะจุดของกระแผลเชื่อม 100 – 175 แอมแปร์ ความเร็วเดิน 100 มิลลิเมตรต่อนาที



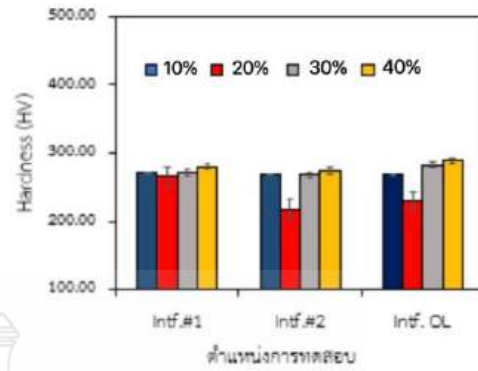
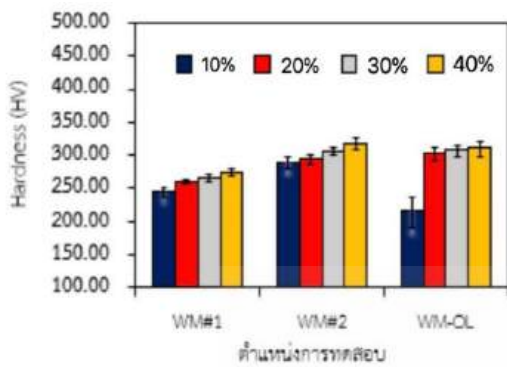
รูปที่ ง.10 ค่าความแข็งเฉพาะจุดของกระแผลเชื่อม 100 – 175 แอมแปร์ ความเร็วเดิน 125 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ ง.11 ค่าความแข็งเฉพาะจุดของกระแผลเชื่อม 100 – 175 แอมแปร์ ความเร็วเดิน 150 มิลลิเมตรต่อนาที

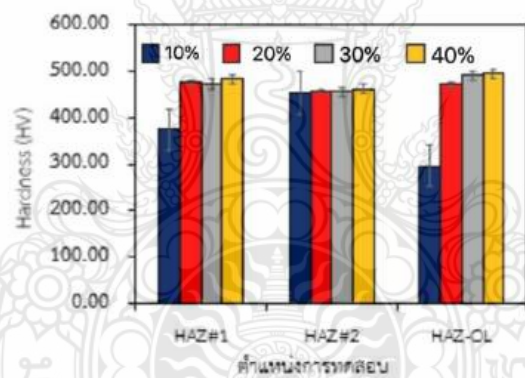


รูปที่ ง.12 ค่าความแข็งเฉพาะจุดของกระแผลเชื่อม 100 – 175 แอมแปร์ ความเร็วเดิน 175 มิลลิเมตรต่อนาที



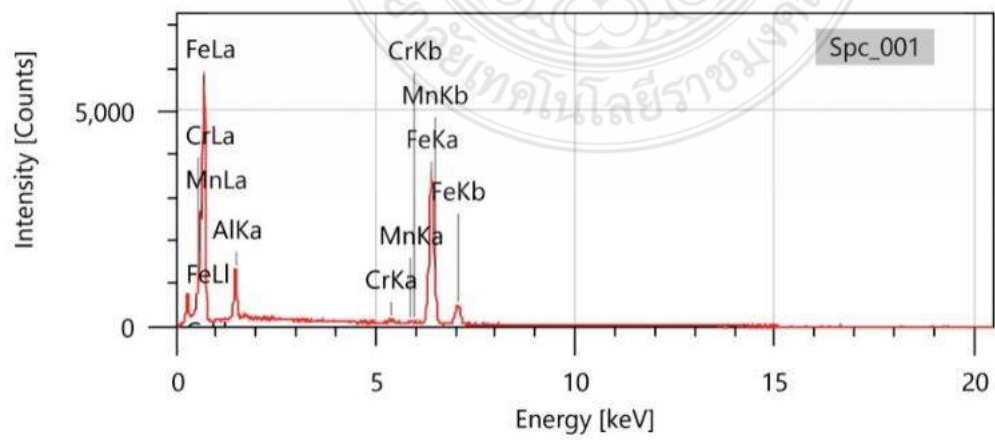
รูปที่ ง.13 ค่าความแข็งเฉพาะจุดของระยะชั้นเกยที่ 10-40% ในตำแหน่งโลหะเชื่อม

รูปที่ ง.14 ค่าความแข็งเฉพาะจุดของระยะชั้นเกยที่ 10-40% ในตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน

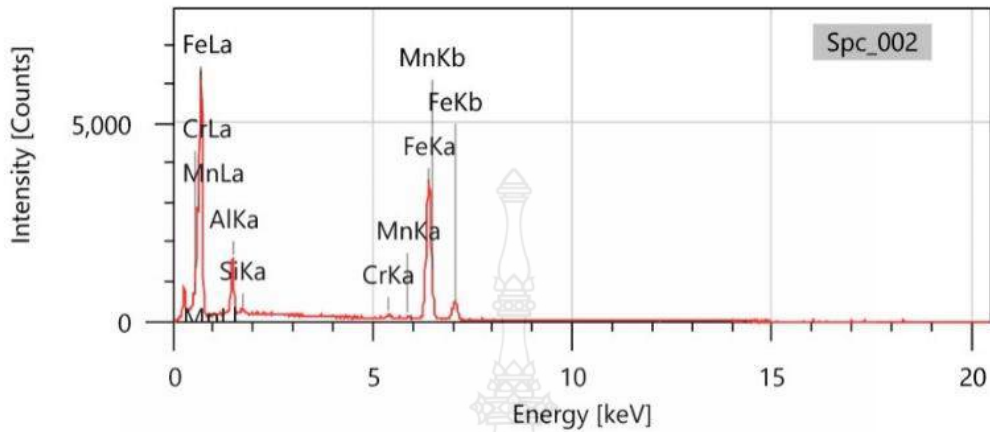


รูปที่ ง.15 ค่าความแข็งเฉพาะจุดของระยะชั้นเกยที่ 10-40% ในตำแหน่งพื้นที่กระทบร้อน

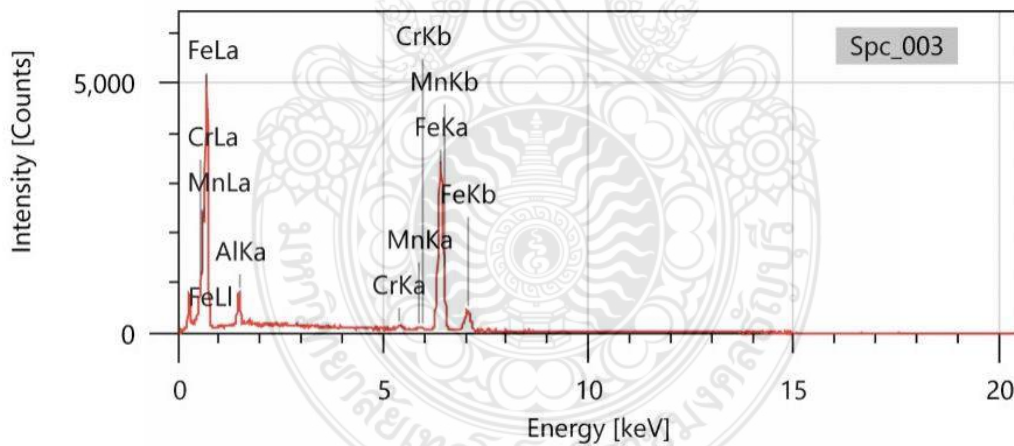
ภาคผนวก จ.
การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมี



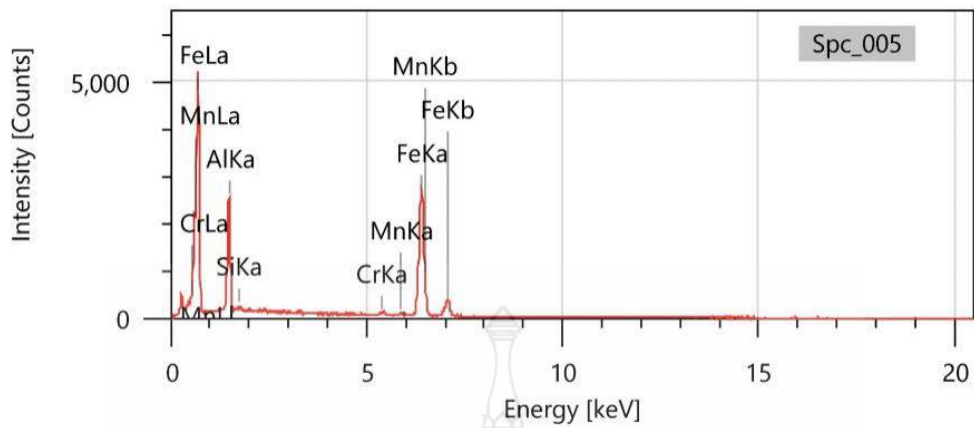
รูปที่ จ.1 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของระยะชั้นเกย ที่ระยะห่าง 10%จุดแกนเดรนไดร์



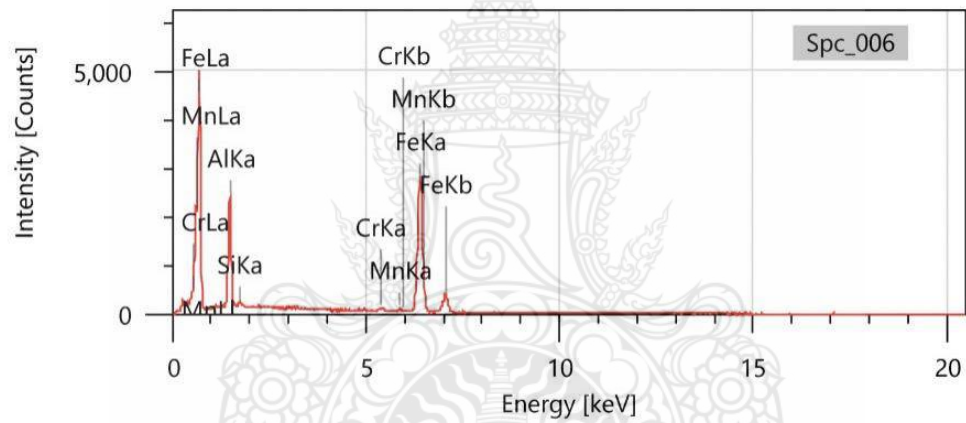
รูปที่ จ.2 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของระยะชั้นเกย ที่ระยะห่าง 10%จุดช่องว่างเดรนไดร์



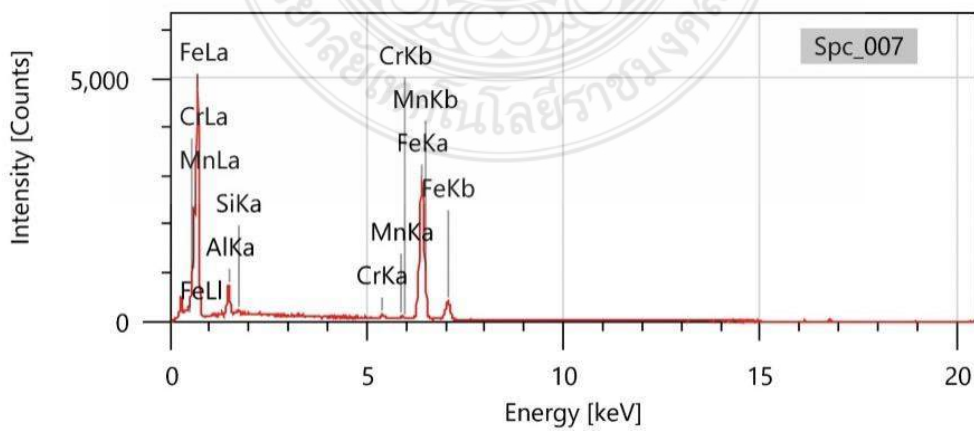
รูปที่ จ.3 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของระยะชั้นเกย ที่ระยะห่าง 10%จุดชั้นผิวสัมผัสโลหะ เชื่อมและโลหะฐาน



รูปที่ จ.4 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของระยะชั้นเกย ที่ระยะห่าง 40% จุดแขนเดรนใต้



รูปที่ จ.5 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของระยะชั้นเกย ที่ระยะห่าง 40% จุดช่องว่างเดรนใต้



รูปที่ จ.6 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของระยะซ้อนเกย ที่ระยะห่าง 40% จุดชั้นผิวสัมผัสโลหะ
เชื่อมและโลหะฐาน



อิทธิพลกระแสเชื่อมที่ต่อสมบัติของผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140
TIG Welding Current Affecting Properties of Aluminum Cladded Metal
on AISI4140 Low Alloy Steel Surface

ปิยธิดา ตูมังกูล ไพศาล ทองสงศ์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: kittipong.k@en.mail.rmutt.ac.th*

Piyatida Toonangkul, Paisan Thongsong, Kittipong Kimapong*
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
E-mail: kittipong.k@en.mail.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการประยุกต์การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สเฉื่อย (Gas tungsten arc welding: GTAW) หรือการเชื่อมทิก (TIG welding) ในการสร้างชั้นเคลือบผิวอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 อิทธิพลกระแสเชื่อมที่มีผลต่อรูปร่างโลหะเชื่อม ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ถูกทำการศึกษา ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มความกว้างและการหลอมลึกของโลหะเชื่อม แต่ลดความหนาของแนวเชื่อม การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมและเหล็กที่มีส่วนผสมระหว่างโลหะเชื่อม (Weld metal: WM) และโลหะฐาน (Base metal: BM) ความหนาของชั้นสารประกอบกึ่งโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมและลดปริมาณเหล็กในชั้นสารประกอบกึ่งโลหะส่งผลทำให้ความแข็งที่ชั้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ชั้นผิวเคลือบอะลูมิเนียม เหล็กกล้าผสมต่ำ การเชื่อมทิก

Abstract

This article aims to apply a gas tungsten arc welding (GTAW) or a tungsten inert gas welding (TIG welding) to create an aluminum cladded layer on AISI4140 low alloy steel surface. An effect of welding current on weld geometry, hardness, and microstructure of the aluminum coating layer on AISI4140 low alloy steel surface was investigated. The results of the experiment revealed that an increase of welding current resulted in increasing a weld bead width and a weld penetration but decreasing a weld reinforcement. Microstructure examination showed a formation of an intermetallic compound (IMC) which was a combination of aluminum and iron at the weld metal (WM) base metal (BM) interface. A thickness of IMC layer tended to increase with increasing welding current. Increasing aluminum amount and decreasing iron amount in this IMC layer resulted in increasing the hardness at the WM/BM interface.

Keywords: Aluminum cladded layer, Low alloy steel, TIG welding

1. บทนำ

ชิ้นส่วนเหล็กกล้าเมื่อถูกนำไปใช้งานและสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมในงานอุตสาหกรรมสำคัญ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ หรือการขนส่งระบบราง มักเกิดการสึกหรอ (Wear) และการกัดกร่อน (Corrosion) อย่างรวดเร็ว และส่งผลทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กกล้านั้นลดลง ด้วยเหตุนี้ชิ้นส่วนเหล็กกล้าจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวให้มีความเหมาะสมไปใช้งาน [1] การพัฒนาผิวเคลือบเพื่อป้องกันการพังทลายของพื้นผิวชิ้นส่วนโลหะในปัจจุบัน มักมีการประยุกต์ใช้ผิวเคลือบจำเพาะที่มีน้ำหนักเบาเพื่อห่อหุ้มพื้นผิวของชิ้นส่วนเหล็กกล้า และอะลูมิเนียมมักเป็นโลหะสำคัญที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรง และความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นส่วนเหล็กกล้า [2, 3] เนื่องจากผิวเคลือบอะลูมิเนียมที่เพิ่มเข้ามาสามารถทำให้เกิดสมบัติที่ต้องการ และก่อให้เกิดการลดน้ำหนักในโครงสร้างยานยนต์ หรือขนส่งระบบรางอื่น ๆ ที่ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเคลื่อนที่ของยานยนต์ ลดการใช้เชื้อเพลิง และเป็นการอนุรักษ์พลังงาน [2, 4]

ที่ผ่านมาชั้นอะลูมิเนียมถูกเคลือบบนพื้นผิวเหล็กกล้าด้วยวิธีการแตกต่าง เช่น กระบวนการเชื่อมเลเซอร์ (Laser welding: LW) [5] กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวน (Friction stir welding: FSW) [6, 7] หรือกระบวนการรีดโลหะผง (Powder metallurgical rolling process) [8] เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้สามารถทำให้เกิดผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าที่มีคุณภาพเหมาะสม และการเลือกตัวแปรการผลิตผิวเคลือบที่เหมาะสมสามารถส่งผลทำให้เกิดผิวเคลือบที่มีคุณภาพสูงได้ ในงานวิจัยเหล่านี้พบว่า การเพิ่มความร้อนเข้าในการผลิตผิวเคลือบส่งผลโดยตรงในการทำให้เกิดผิวเคลือบที่สมบูรณ์ [7] และทำให้เกิดการลดความหนาผิวเคลือบอะลูมิเนียม [5] อย่างไรก็ตามความร้อนเข้าที่มีค่าสูงมักทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะ เช่น Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมในชั้นการรวมตัวที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวเคลือบและโลหะฐาน [6-8] ที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น [6] และทำให้ความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) ของผิวเคลือบมีค่าลดลง [6, 7] นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงเฉือนของผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนเหล็กกล้าคาร์บอน SPCC นั้นสามารถลดลงได้เมื่อผิวเคลือบถูกนำไปทำการอบให้ความร้อนที่ระยะเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงขึ้น [8]

ด้วยข้อมูลการผลิตข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการสร้างผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำโดยการใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเด็นแก๊สคลุม หรือการเชื่อมทิก เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมที่ให้ค่าความร้อนหลอมลึกสูง และทำให้เกิดการกระจายความร้อนออกด้านข้างในปริมาณที่ต่ำ [9] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่น ๆ ดังกล่าวไว้ข้างต้น การเชื่อมทิกมีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการต่ำที่สุด งานวิจัยจึงมีจุดประสงค์ในการเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อมทิกที่มีผลต่อสมบัติสำคัญของผิวเคลือบอะลูมิเนียม เช่น รูปร่างแนวเชื่อม โครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของ

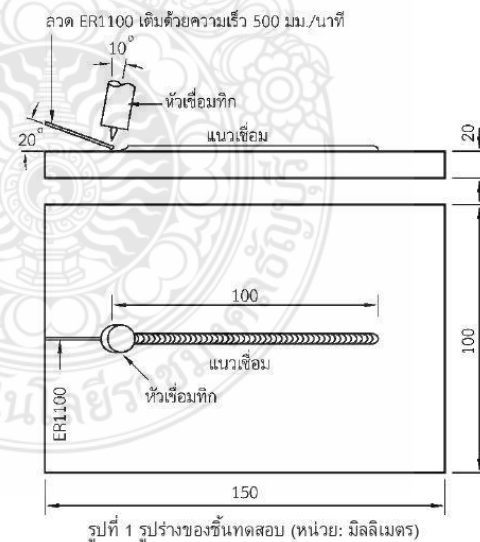
โลหะเชื่อม ผลการทดลองที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นส่วนเหล็กกล้าผสมต่ำได้ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

แผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำหนา 13 มิลลิเมตร ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 ถูกเตรียมให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตรดังรูปที่ 1 ผิวด้านบนของแผ่นเหล็กถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250 เพื่อกำจัดสนิมและทำสะอาดด้วยยาซีโตนและแอลกอฮอล์เพื่อกำจัดคราบสกปรกก่อนทำการเชื่อม

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (%น้ำหนัก)

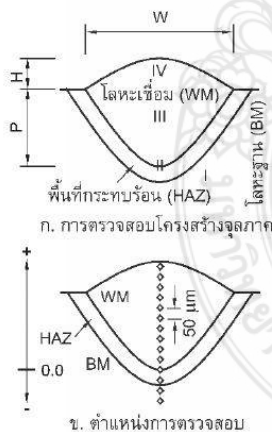
ธาตุ	เหล็กกล้า AISI4140	โลหะเติม ASW-ER1100
Fe	สมดุล	0.04
Al	-	สมดุล
C	0.39	-
Si	0.21	0.04
Mn	0.64	0.05
Cr	0.94	-
Mo	0.18	-
V	0.003	-
Cu	0.00	0.01
Zn	0.00	0.01



กระบวนการเชื่อมในการทดลองนี้ ใช้กระบวนการเชื่อมทิกบนอุปกรณ์ช่วยงานที่สามารถทำให้เกิดการเดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ ตัวแปร

การเชื่อมประกอบด้วยกระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที แท่งทั้งสแตน 2%WTH มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างปลายแท่งทั้งสแตนและผิวชิ้นงานเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร แท่งทั้งสแตนถูกปรับให้ทำมุม 90 องศาตลอดการเชื่อม แก๊สปกคลุม คือ แก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที โลหะเติมที่ใช้ในการเติมลงสู่พอลวมละลาย คือ ลวด AWS-ER1100 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 ที่อัตราป้อน 500 มิลลิเมตรต่อนาที และทำมุม 10 องศาที่พื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าดังรูปที่ 1

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนด ถูกนำไปทำการตัดด้วยใบตัดความเร็วสูงที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม ระบุตำแหน่งที่ได้ถูกนำไปทำการเตรียมพื้นผิว เพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย การขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-1500 ขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมครอนบนผ้าสักหลาด และกัดผิวหน้าด้วยสารละลายไนเตรล 5% ด้านเหล็กกล้า ขณะที่ด้านแนวเชื่อมอะลูมิเนียมไม่ถูกการกัดผิวหน้า พื้นผิวที่ผ่านการกัดถูกนำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ (Low magnification microscope) เพื่อตรวจสอบรูปร่างโลหะเชื่อมประกอบด้วยความกว้างของแนวเชื่อม (Bead width: W) ความหนาของแนวเชื่อม (Weld reinforcement: H) ระยะพอลวมลึกแนวเชื่อม (Weld penetration: P) และความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2 ก.



รูปที่ 2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง

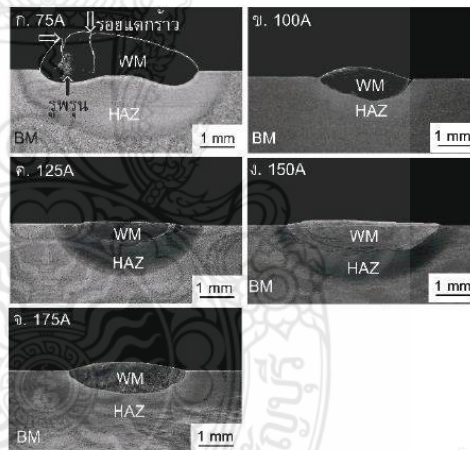
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคดำเนินการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light optical microscope: LOM) เพื่อทำการตรวจสอบรูปร่างเกรนที่ตำแหน่งที่ 1 (I) โลหะฐาน (Base metal: BM) ตำแหน่งที่ 2 (II) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน (Base metal and weld

metal interface) ตำแหน่งที่ 3 (III) ที่กลางโลหะเชื่อม (Weld metal: WM) และตำแหน่งที่ 4 (IV) ผิวหน้าโลหะเชื่อม ดังรูปที่ 2 ก.

การกระจายตัวของเฟส ส่วนผสมทางเคมี และลักษณะของโครงสร้างผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน ถูกทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่มีการต่อพ่วงด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry: EDS)

ความแข็งของโลหะเชื่อมถูกนำไปทำการทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์สโดยการใช้แรงกด 50 กรัมแรง และเวลากดแช่ 10 วินาที การทดสอบความแข็งถูกดำเนินการบนพื้นระนาบแนวตั้งฉากที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในแนวตั้งฉากผิวหน้าแนวเชื่อมลงสู่โลหะฐาน ระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ 2 จุดเท่ากับ 50 ไมโครเมตร และตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมและโลหะฐาน คือ จุดเริ่มต้นการทดสอบ 0.0 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 ข.

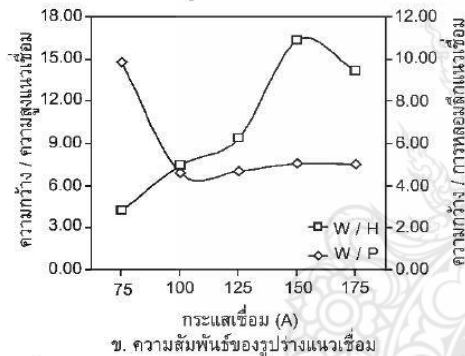
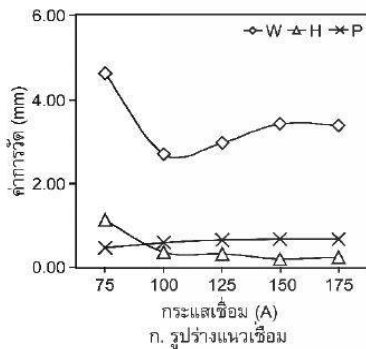
3. ผลการทดลอง



รูปที่ 3 โครงสร้างมหภาคแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนเหล็กกล้าผสมต่ำ

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 75-175 แอมแปร์ พบว่าโครงสร้างมหภาคแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วยโลหะฐาน พื้นที่กระทบร้อน และโลหะเชื่อม ที่กระแสเชื่อมต่ำ 75 แอมแปร์ ความร้อนเข้า (Heat input) มีค่าน้อย และเกิดการลอมลึกความร้อน (Heat penetration) ลงสู่โลหะฐานได้น้อย อย่างไรก็ตามความร้อนเข้าที่กระแสเชื่อมนี้สามารถทำให้โลหะเติม ER1100 หลอมละลายและเติมลงบนโลหะฐานได้ แต่เนื่องจากพื้นที่การลอมของโลหะฐานที่มีค่าน้อย อะลูมิเนียมหลอมเหลวจึงเติมลงในโลหะฐานไม่สมบูรณ์ และก่อให้เกิดจุดบกพร่อง เช่น รอยแตกร้าว และรูพรุนในโลหะเชื่อมขึ้นดังรูปที่ 3 ก. เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นประมาณ 100-175 แอมแปร์ ความร้อนเข้าเข้ามีค่าสูง

เพียงพอ ทำให้เกิดการหลอมลึกมีค่าสูงกว่า และบ่อหลอมละลายที่เพียงพอที่ทำให้เกิดการหลอมตัวระหว่างโลหะฐานและอะลูมิเนียมหลอมเหลวจนเกิดเป็นโลหะเชื่อมอะลูมิเนียมที่สมบูรณ์ ปราศจากจุดบกพร่องในโลหะเชื่อมและโลหะฐานดังรูปที่ 3 ข.-จ.

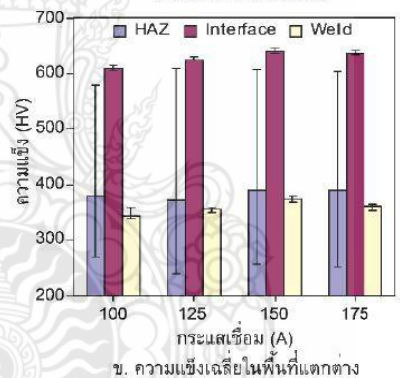
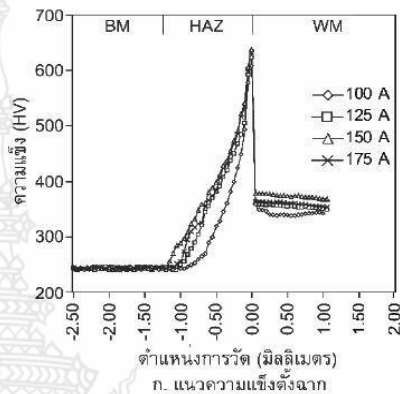


รูปที่ 4 รูปร่างของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ

กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้รูปร่างของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กกล้าเกิดการเปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการวัดเปรียบเทียบตำแหน่งแนวเชื่อมต่าง ๆ ดังรูปที่ 2 ก. ประกอบด้วยความกว้างแนวเชื่อม (W) ระยะหลอมลึก (P) และความหนาของแนวเชื่อม (H) ได้ผลการตรวจสอบขนาดของแนวเชื่อมดังรูปที่ 4 ก. พบว่าในกรณีการเชื่อมไม่สมบูรณ์เมื่อใช้กระแสเชื่อม 75 แอมแปร์ โลหะเชื่อมจะมีความกว้างและความหนาสูง แต่มีระยะการหลอมลึกต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ ซึ่งทำให้เกิดแนวเชื่อมสมบูรณ์ กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความกว้างและระยะการหลอมลึกของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความหนาของแนวเชื่อมมีค่าลดลง

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างของแนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่างกันโดยการพิจารณาตัวแปรรูปร่างแนวเชื่อมเสริมแรง (Reinforcement form factor: $RFF=W/H$) และตัวแปรรูปร่างการหลอมลึก (Penetration shape factor: $PSF=W/P$) ค่า RFF และ ค่า PSF ของแนวเชื่อมที่มีค่าสูงแสดงสมบัติแนวเชื่อมเคลือบผิวที่มีความเหมาะสม

[10] ผลของการเปรียบเทียบค่า RFF และค่า PSF ดังรูปที่ 4 ข. พบว่ากระแสเชื่อมที่ทำให้แนวเชื่อมสมบูรณ์ที่มีค่าสูงซึ่งส่งผลทำให้ค่า RFF และค่า PSF มีค่าสูงขึ้น และค่ากระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ แสดงค่า RFF และค่า PSF สูงสุด



รูปที่ 5 ความแข็งของผิวเคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำ

ผลการทดสอบความแข็งในแนวตั้งฉากแนวเชื่อมพบว่าความแข็งของโลหะฐานมีค่าเฉลี่ย 235 HV หลังจากนั้นความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดสอบความแข็งที่พื้นที่กระแทบร้อน และแสดงค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน หลังจากนั้นค่าความแข็งมีค่าต่ำลงเมื่อทำการทดสอบที่ตำแหน่งโลหะเชื่อมดังรูปที่ 5 ก. นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งตามแนวตั้งที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-175 แอมแปร์ พบว่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มของกระแสเชื่อมดังรูปที่ 5 ข.

การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งที่ทำการวัดและแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 5 นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของเฟสในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม ดังผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย

กระแสเชื่อม 150 แอมป์ ซึ่งเป็นชิ้นงานที่แสดงค่า RFF ค่า PSF และ ความแข็งเฉลี่ยสูงสุด

รูปที่ 6 ก. แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ซึ่งประกอบด้วยเฟสเฟอไรต์ (Pearlite: P) ซีซีเอ็ม ที่ถูก ล้อมรอบด้วยเฟสเฟอไรต์ (Ferrite: F) สีขาว ปริมาณเฟอไรต์ที่มี ปริมาณสูงขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนที่มีค่าสูงในเหล็กกล้าผสมต่ำ เมื่อ ตำแหน่งการตรวจสอบสูงขึ้นไปสู่พื้นที่ที่กระทบร้อน พบว่าเฟสเฟอไรต์ และเฟสเฟอไรต์ถูกปรับสภาพด้วยความร้อนให้มีขนาดเฟสที่เล็ก ละเอียดลง และเป็นสาเหตุทำให้ความแข็งของโลหะฐานในพื้นที่กระทบ ร้อนมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะฐาน

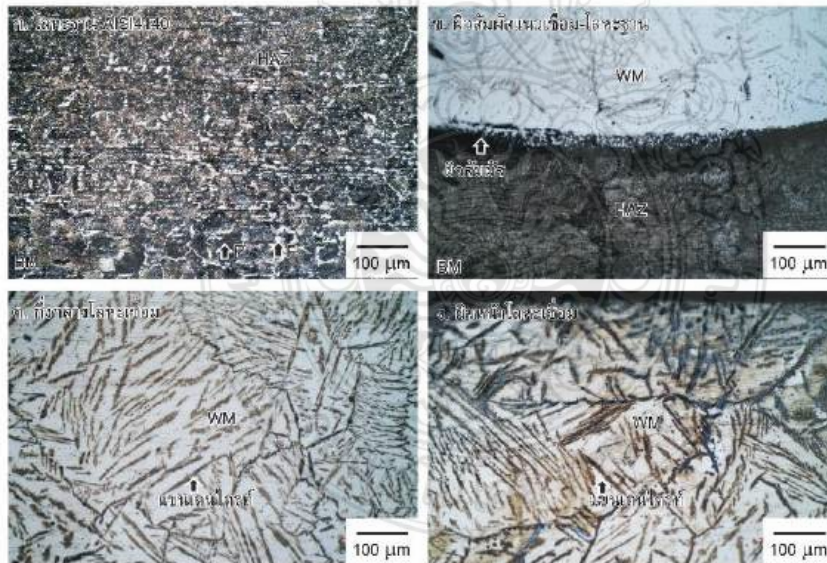
เฟสเฟอไรต์และเฟสเฟอไรต์ถูกปรับสภาพให้เล็กลงละเอียดลง จนกระทั่งเข้าสู่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานดังรูปที่ 6 ข. ผิวสัมผัสที่ทำการตรวจสอบนี้แสดงการรวมตัวและก่อเฟสที่ตามขึ้น และ แสดงความกว้างเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกระแสเชื่อมดังรูปที่ 7 ก. พื้นที่ เหนือผิวสัมผัส คือ พื้นที่โลหะเชื่อมที่แสดงโครงสร้างเดนไดรต์ซึ่งเป็น โครงสร้างโลหะที่เกิดจากการเย็นตัวไม่สมดุล

เมื่อทำการตรวจสอบกึ่งกลางของโลหะเชื่อมดังรูปที่ 6 ค. พบว่า โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์ขนาดใหญ่ ช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ หรือพื้นที่กึ่งกลางระหว่างเฟสสีดำ สองแนวมีขนาดของเดนไดรต์เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง

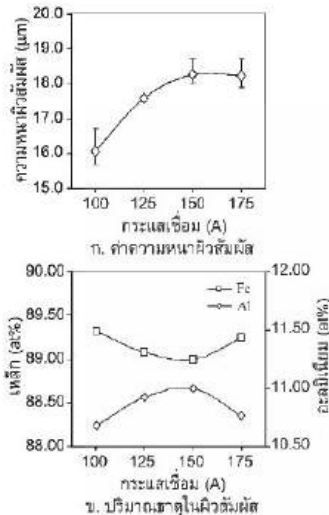
เดนไดรต์ที่ตำแหน่งใกล้ผิวหน้าแนวเชื่อมดังรูปที่ 6 ง. การเกิดเดนไดรต์ ขนาดใหญ่ที่กึ่งกลางแนวเชื่อมนี้เกิดขึ้นเนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวเกิด การเย็นตัวช้ากว่าตำแหน่งเดนไดรต์ที่ผิวหน้าแนวเชื่อม อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเดนไดรต์และค่าความแข็งของโลหะเชื่อมระหว่าง กึ่งกลางแนวเชื่อมและผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 150 แอมป์แล้ว พบว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย

รูปที่ 7 ก. แสดงผลการวัดความหนาชั้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อม และโลหะฐานที่แสดงการก่อตัวของเฟสลำดับสามในแนวเชื่อม ความ หนาชั้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานมีแนวโน้มที่มีความ หนาเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ความหนาสูงสุดประมาณ 18.2 ไมโครเมตร เกิดขึ้นเมื่อใช้กระแสเชื่อม 150 แอมป์ ในการเชื่อม อะลูมิเนียมบนโลหะฐาน ความหนาที่เพิ่มขึ้นนี้ยังชี้ให้เห็นว่ากระแส เชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความสามารถในการรวมตัวกันระหว่าง โลหะเชื่อมและโลหะฐาน หรืออะลูมิเนียมและเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชั้นผิวสัมผัสนี้ด้วยการ วัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ และแสดงผลการเปรียบเทียบ ส่วนผสมทางเคมีดังรูปที่ 6 ข. พบว่าปริมาณเหล็กในพื้นที่กระทบร้อนมี แนวโน้มลดลง และอะลูมิเนียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเกิด การเปลี่ยนแปลงจาก 100-175 แอมป์



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 A



รูปที่ 7 ความหนาแน่นและส่วนผสมทางเคมีของผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อม อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าผสมต่ำ

4. สรุปผลการทดลอง

ชิ้นเคลือบอะลูมิเนียมถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก และศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมทิก ที่มีผลต่อสมบัติของผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

- กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความกว้างและการหลอมลึกของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความหนาของแนวเชื่อมลดลง
- โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมแสดงชั้นผิวสัมผัสที่แสดงการก่อตัวของเฟสอันดับสามที่เป็นการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก และแสดงแนวโน้มการรวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น
- การเพิ่มอะลูมิเนียมในผลารวมที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวสัมผัสของรอยต่อ

เอกสารอ้างอิง

[1] F. Pahlevani, R. Dippenaar, N. Gorjizadeh, S. T. Cholake, R. Hossain, R. Kumar, V. Sahajwalla. 2017. "Surface Modification of Steel Using Automotive Waste as Raw Materials" *Procedia Manufacturing*, vol. 7: 387-394.

[2] K. U. Bhat, D. B. Panemangalore, S. B. Kuruveri, M. John, P. L. Menezes. 2022. "Surface Modification of 6 xxx Series Aluminum Alloys" *Coatings*, vol. 12 (2): 180.

[3] S. Pakhomova. 2020. "Surface modification of low carbon steel to improve corrosion resistance" *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 963: 012001.

[4] G. Chirinda, S. Matope. 2020. "The Lighter the Better: Weight Reduction in the Automotive Industry and its Impact on Fuel Consumption and Climate Change" *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations*, December 7-10, 2020, Harare, Zimbabwe: 520-533.

[5] A. Riveiro, A. Mejias, F. Lusquiños, J. del Val, R. Comesaña, J. Pardo, J. Pou. 2014. "Laser cladding of aluminium on AISI 304 stainless steel with high-power diode lasers" *Surface and Coatings Technology*, vol. 253: 214-220.

[6] A. B. Ibrahim, F. A. Al-Badour, A. Y. Adesina, and N. Merah. 2018. "Effect of process parameters on microstructural and mechanical properties of friction stir diffusion cladded ASTM A516-70 steel using 5052 Al alloy" *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34: 451-462.

[7] G. Zhang, X. Yang, D. Zhu, and L. Zhang. 2020. "Cladding thick Al plate onto strong steel substrate using a novel process of multilayer-friction stir brazing (ML-FSB)" *Materials & Design*, vol. 185: 108232.

[8] F. Otsubo, H. Era. 2018. "Cladding of Al Layer onto Mild Steel Substrate Using Al Powder and Its Structure and Properties" *MATERIALS TRANSACTIONS*, vol. 59 (10): 1585-1590.

[9] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2 ed. USA: John Wiley & Sons, 2003.

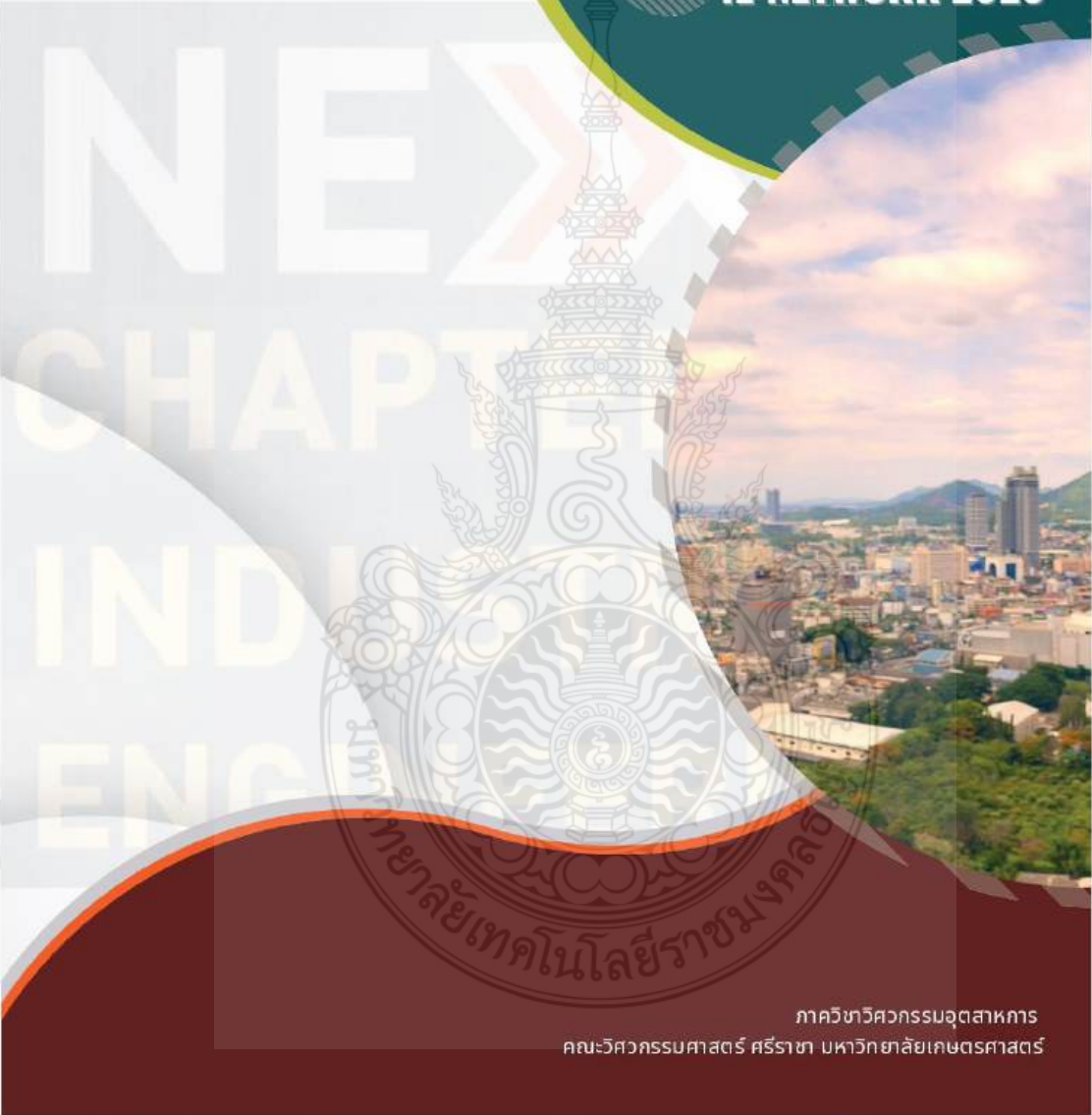
[10] M. Saha, R. Hazra, A. Mondal, and S. Das. 2019. "Effect of Heat Input on Geometry of Austenitic Stainless Steel Weld Bead on Low Carbon Steel" *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, Vol. 100 (4): 607-615.

THE
**NEXXT CHAPTER OF
INDUSTRIAL ENGINEERING**

การประชุมช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566



**PROCEEDING
IE NETWORK 2023**



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



คำนำ

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE Network Conference) เป็นเวทีที่เปิดโอกาสให้คณาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นิสิต นักศึกษา วิศวกร ผู้สนใจด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรมและด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอผลงาน แลกเปลี่ยนองค์ความรู้เชิงวิชาการ สร้างผลงานวิจัยเผยแพร่ในเวทีวิชาการระดับชาติ สร้างเครือข่ายของคณาจารย์ นักวิจัยจากสถาบันต่างๆ และหน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน ในปี พ.ศ. 2566 นี้ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้รับเกียรติให้เป็นประธานจัดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ โดยกำหนดให้มีการจัดการประชุมวิชาการฯ ระหว่างวันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมโบรท์ตัน แกรนด์ พัทยา อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ภายใต้แนวคิด "The Next Chapter of Industrial Engineering"

คณะกรรมการดำเนินงาน การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566 มีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้เป็นส่วนร่วมในการสร้างเวทีที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็น ประสบการณ์และผลงานวิจัยในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และขอขอบพระคุณนักวิจัย นิสิต นักศึกษา คณาจารย์จากมหาวิทยาลัยต่างๆ ผู้ให้การสนับสนุนและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ร่วมกันทำให้การประชุมวิชาการฯ ในครั้งนี้สัมฤทธิ์ผลตามวัตถุประสงค์

คณะกรรมการดำเนินงาน

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566

11-12 พฤษภาคม 2566



สารจากรองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา



ในนามของผู้บริหาร คณาจารย์และบุคลากร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ผมรู้สึกยินดีเป็นอย่างยิ่ง
ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพจัดการประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41
ประจำปี 2566 (IE Network Conference 2023) เพื่อเป็นการเฉลิมฉลอง 80 ปี แห่งการสถาปนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมอุตสาหกรรมเป็นสาขาหนึ่งที่มีส่วนสำคัญในการผลักดันและขับเคลื่อนพัฒนาองค์ความรู้สู่ภาคอุตสาหกรรม
ทั้งในด้านการสร้างนวัตกรรมใหม่ การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ซึ่งล้วนส่งผลให้อุตสาหกรรมทุกภาคส่วน
ในประเทศไทยเกิดการพัฒนาย่างต่อเนื่องและยั่งยืนต่อไป

ผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566 ในครั้งนี้ จะเป็นการเปิดโอกาสให้
ผู้เข้าร่วมประชุมได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์และผลงานวิจัย เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มพูนความรู้ ส่งเสริมและพัฒนา
งานวิจัยที่มีคุณภาพเพื่อตอบสนองและพัฒนาประเทศชาติและสังคมต่อไป

ในโอกาสนี้ผมขออวยพรให้การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566 จงบรรลุวัตถุประสงค์ของ
คณะกรรมการดำเนินงานทุกประการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.เสวี ภูณงนาค)
รองอธิการบดีวิทยาเขตศรีราชา

สารจากนายกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



วิชาชีพด้านวิศวกรรม ประกอบด้วย 3 สาขาหลัก ได้แก่

- 1) มหาวิทยาลัย ทำหน้าที่ผลิตบุคลากรทางด้านวิชาชีพวิศวกรรมให้มีคุณภาพ
- 2) สมาคมวิชาชีพ ทำหน้าที่เติมเต็มและเสริมความรู้ให้กับวิศวกรในการประกอบวิชาชีพ
- 3) องค์กรกำกับดูแลผู้ประกอบการวิชาชีพวิศวกรรม ซึ่งเป็นองค์กรภายใต้กฎหมาย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ เป็นสมาคมวิชาชีพทางด้านวิศวกรรมที่ดำเนินงานเพื่อสังคมและสาธารณประโยชน์โดยมิได้แสวงหาผลกำไร มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาศักยภาพควบคู่กับการส่งเสริมจรรยาบรรณให้แก่บัณฑิต-นักศึกษาวิศวกร และผู้ปฏิบัติงานวิชาชีพวิศวกรรมที่ได้รับการยอมรับจากหน่วยงานภาครัฐและเอกชนในระดับประเทศ

ในนามวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ มีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ได้รับเกียรติเป็นประธานจัดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมครั้งที่ 41 ประจำปี 2566 (The 41st Conference of Industrial Engineering Network 2023) ภายใต้หัวข้อ “The Next Chapter of Industrial Engineering” ด้วยมหาวิทยาลัยคือหนึ่งในเสาหลักที่ทำหน้าที่ผลิตบุคลากรทางด้านวิชาชีพวิศวกรรมให้มีคุณภาพ ในการจัดงานประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ซึ่งในครั้งนี้วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ มีความยินดีที่ได้มีโอกาสร่วมกับทางสถาบันในการสนับสนุนการดำเนินงานเพื่อให้เกิดการสร้างความร่วมมือด้านวิชาการ การแสดงผลงานความก้าวหน้า ตลอดจนการแลกเปลี่ยนความรู้ทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมและสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดงานการประชุมวิชาการฯ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน อีกทั้งยังมีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้การสนับสนุนในการจัดการประชุมวิชาการระดับชาติ IE Network 2023 ครั้งนี้เป็นอย่างดี หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ จะมีส่วนสนับสนุนงานทางด้านวิศวกรรมแก่ทั้งหน่วยงานภาครัฐและประชาชน รวมถึงเป็นศูนย์รวมความรู้ให้กับวิศวกรในโอกาสต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.วิชรินทร์ กาสลัก

นายกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา



ในนามของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กระผมมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพจัดการประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี พ.ศ. 2566 (IE Network Conference 2023) เพื่อเป็นการเฉลิมฉลอง 80 ปี แห่งการสถาปนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บนฐานแนวคิดของการประชุมครั้งนี้ "The Next Chapter of Industrial Engineering" ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปิดโอกาสให้นิสิต นักศึกษา นักวิชาการ นักวิจัย ผู้ประกอบการ ตลอดจนผู้ที่สนใจได้ประชุมแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ และผลงานวิจัย จะทำให้เกิดการประสานความร่วมมือของผู้เข้าร่วมประชุมในการพัฒนาองค์ความรู้ และนวัตกรรมใหม่ๆ ที่จะประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยทางด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรมต่อไป

สุดท้ายนี้ กระผมขอขอบคุณท่านวิทยากร ผู้ทรงคุณวุฒิ คณาจารย์ บุคลากร ตลอดจนผู้สนับสนุนการจัดงานทุกท่านที่มีส่วนร่วมที่สำคัญในการสนับสนุนการจัดกิจกรรม และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการจัดประชุมวิชาการครั้งนี้จะเป็นอีกก้าวหนึ่งที่สำคัญในการนำองค์ความรู้ที่ได้จากการประชุมวิชาการไปแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศไทยต่อไป

(รองศาสตราจารย์ ดร. สถาพร เชื้อเพ็ง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารจากประธานกรรมการดำเนินงาน การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตรีราชามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา มีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้รับเกียรติให้เป็นประธานจัดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566 ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ภายใต้แนวคิด “The Next Chapter of Industrial Engineering”

ขอขอบพระคุณผู้ร่วมเสนอบทความและผลงานวิจัย ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ วิทยากร และผู้ให้การสนับสนุนทุกท่าน รวมทั้งคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการในครั้งนี้ ที่ได้มีส่วนสำคัญยิ่งต่อการเผยแพร่ผลงานวิชาการและงานวิจัย ตลอดจนการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ ที่จะนำไปสู่การสร้างเครือข่ายให้นักวิจัยได้ทำวิจัยร่วมกัน อันก่อให้เกิดการพัฒนาวิจัยให้กว้างขวางยิ่งขึ้น

เชื่อมั่นเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566 จะประสบความสำเร็จและบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดงาน บุคลากรทุกท่าน และหน่วยงานต่างๆ ที่ให้การสนับสนุนการจัดประชุมวิชาการครั้งนี้เป็นอย่างดี

จิรากรณ ปรัดบัวงษ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรากรณ ปรัดบัวงษ์)
ประธานกรรมการดำเนินงาน

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566

เอกสารโครงการการประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566
(The 41st Conference of Industrial Engineering Network 2023)

ระหว่างวันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566

โรงแรมไบรท์ตัน แกรนด์ พัทยา (Brighton Grand Hotel Pattaya) อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี
จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

1. หลักการและเหตุผล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้รับการคัดเลือกให้เป็นมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ในปีการศึกษา 2563 ซึ่งหมายถึงการเป็นมหาวิทยาลัยที่ผลิตผลงานวิจัยเพื่อการตีพิมพ์ เผยแพร่ และมีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ในทางสังคม เศรษฐกิจ และอุตสาหกรรม ทั้งนี้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา ได้ตระหนักถึงความสำคัญด้านการวิจัยและส่งเสริมให้บุคลากรทำวิจัย ทั้งการวิจัยพื้นฐาน การวิจัยด้านสิ่งประดิษฐ์ใหม่และนวัตกรรม เพื่อสนองนโยบายของมหาวิทยาลัยในด้านการศึกษา และเผยแพร่ผลงานที่มีประโยชน์ต่อสาธารณชนทั้งในและต่างประเทศ

ช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Engineering Network) หรือ IE Network เป็นองค์การที่สร้างความร่วมมือและความเข้าใจอันดีระหว่างสถาบันการศึกษา ที่ผลิตบุคลากรด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรมและที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรม อุตสาหกรรม ก่อตั้งขึ้นเมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ. 2526 โดยได้รับการสนับสนุนจากวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) มีสมาชิกที่ร่วมกันก่อตั้งจำนวน 10 สถาบัน และภาคีสมาชิกอีก 1 สถาบัน โดยมีสมาชิกกว่า 40 สถาบันทั่วประเทศไทย มีวัตถุประสงค์หลักในการสนับสนุนให้เกิดการแลกเปลี่ยนข่าวสารข้อมูลด้านงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มีความร่วมมือในการจัดทำโครงการวิจัยในงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มีการแลกเปลี่ยนคณาจารย์และนิสิตนักศึกษาในระดับมหัพภาคระหว่างสถาบันที่เป็นสมาชิกและมีความร่วมมือกับหน่วยงานต่างๆ ในการจัดการพัฒนางานวิศวกรรมอุตสาหกรรมอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิชาการและเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศในด้านธุรกิจอุตสาหกรรม การออกแบบ การผลิต การจัดการระบบงาน โลจิสติกส์ งานบริหารระบบคุณภาพ วิศวกรรมความปลอดภัย ตลอดจนงานปฏิบัติการในธุรกิจให้บริการต่างๆ ของประเทศที่ขยายตัวอย่างต่อเนื่อง

โดยในปีภาคการศึกษาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ได้รับเกียรติให้เป็นประธานจัดงานประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566 (The 41st Conference of Industrial Engineering Network 2023) ระหว่างวันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566 ในแนวคิด "The Next Chapter of Industrial Engineering" เพื่อเปิดโอกาสให้นักวิชาการและนักวิจัยในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และสาขาที่เกี่ยวข้องมาประชุมแลกเปลี่ยนความรู้ประสบการณ์ และผลงานวิจัย อันจะนำไปสู่การยกระดับงานวิจัยของประเทศต่อไป

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อส่งเสริมและสร้างความรู้ให้กับคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นิสิต นักศึกษา รวมทั้งผู้สนใจตระหนักถึงความสำคัญในการสร้างผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และเผยแพร่ในเวทีวิชาการระดับชาติ
- 2.2 เพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ซึ่งวิชาการในการเผยแพร่ผลงานวิจัย ผลงานทางวิชาการ และผลงานสร้างสรรค์ในระดับชาติ
- 2.3 เพื่อเป็นการสร้างเครือข่ายของคณาจารย์ และนักวิจัยจากสถาบันต่างๆ และหน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนได้มีส่วนร่วมและประสบการณ์ในการประชุมทางวิชาการระดับชาติ

3. กลุ่มเป้าหมาย

นิสิต นักศึกษา นักวิจัย นักวิชาการในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทั้งภาครัฐและเอกชน

4. วัน-เวลา และสถานที่

ระหว่างวันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมไบรท์ตัน แกรนด์ พัทยา (Brighton Grand Hotel Pattaya) อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี

5. กำหนดการเปิดรับบทความ

กิจกรรม	กำหนดการ
เปิดรับบทความฉบับสมบูรณ์	15 ธันวาคม 2565 – 20 มีนาคม 2566
ประกาศผลพิจารณาบทความ	3 เมษายน 2566
แจ้งผลการประเมินบทความฉบับแก้ไข	21 เมษายน 2566
ลงทะเบียน	3 - 30 เมษายน 2566
นำเสนอผลงานวิชาการ	11-12 พฤษภาคม 2566

6. การลงทะเบียนเข้าร่วมงาน

การลงทะเบียน	ลงทะเบียนล่วงหน้า (3 - 25 เมษายน 2566)	ลงทะเบียน (26 - 30 เมษายน 2566)
นักศึกษา	2,800 บาท	3,800 บาท
อาจารย์ นักวิจัย บุคคลทั่วไป	3,300 บาท	4,300 บาท

7. หัวข้อหลัก (Theme) และหัวข้อย่อย (Topics)

7.1 หัวข้อหลัก (Theme)

"The Next Chapter of Industrial Engineering"

7.2 หัวข้อย่อย (Topics)

- 1) Operations Research, Optimization and Decision Support Systems
- 2) Automation and Smart Technology
- 3) Supply Chain and Logistics Management
- 4) Work Study, Ergonomics, Safety and Plant Design
- 5) Material and Manufacturing Technology
- 6) Production and Operations Management
- 7) Quality Engineering and Management
- 8) Green Technology, Innovation Management and Technology Transfer
- 9) Engineering Economy and Industrial Cost Analysis
- 10) Other Related Topics in Industrial Engineering

8. การส่งบทความ

สามารถดาวน์โหลดแบบฟอร์มการนำเสนอบทความ (Paper Template) ได้ที่เว็บไซต์ <https://www.eng.sru.ku.ac.th/ienet2023/> หรือ QR code



9. จัดโดย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตรีวิชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

คณะกรรมการจัดประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566

คณะกรรมการที่ปรึกษา

1. รองอธิการบดีวิทยาเขตศรีราชา
2. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
3. รองคณบดีฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม
4. ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและบริการวิศวกรรม
5. ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม
6. หัวหน้าสำนักงานเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายอำนวยการ

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. ผศ.ดร. จิราภรณ์ ประดับวงษ์ | ประธานกรรมการ |
| 2. ผศ.ดร. เขมภูฏา ชำนาญหล่อ | กรรมการ |
| 3. ผศ.ดร. ชัยวัฒน์ นุ่มทอง | กรรมการ |
| 4. ผศ.ดร. ศิริรัตน์ ฑูตชูเดช | กรรมการ |
| 5. ผศ.ดร. เพ็ญสุดา พันธุภิญโญ | กรรมการ |
| 6. ผศ.ดร. สิริวงศ์ กลิ่นคำสอน | กรรมการ |
| 7. ผศ.ดร. จันจิรา คงชื่นใจ | กรรมการ |
| 8. ผศ. นันทวัฒน์ ศรีอริยวัฒน์ | กรรมการ |
| 9. ผศ.ดร. ประภาพรพรณ เกษราพงษ์ | กรรมการ |
| 10. ผศ.ดร. ธนพันธ์ คงทอง | กรรมการ |
| 11. ผศ.ดร. จิรเกียรติ ทรายทอง | กรรมการ |
| 12. ผศ.ดร. อธิกร พัดนพิบูล | กรรมการ |
| 13. ผศ.ดร. อัครินทร์ กลิ่นเงิน | กรรมการ |
| 14. ผศ.ดร. นัฐวิภา จันทร์ศรี | กรรมการและเลขานุการ |
| 15. นางสาว ณิชฎานันท์ แก้วมณี | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 16. นางสาว กนกวรรณ ดันนิตย์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์

- | | |
|--------------------------------|------------------------|
| 1. ผศ.ดร. อธิกร พัดนพิบูล | ประธานอนุกรรมการ |
| 2. ผศ.ดร. ชัยวัฒน์ นุ่มทอง | อนุกรรมการ |
| 3. ผศ.ดร. สิริวงศ์ กลิ่นคำสอน | อนุกรรมการ |
| 4. ผศ.ดร. จันจิรา คงชื่นใจ | อนุกรรมการ |
| 5. ผศ.ดร. ประภาพรพรณ เกษราพงษ์ | อนุกรรมการ |
| 6. นางสาว ศศิธร ฤทธิเพชร | อนุกรรมการ |
| 7. นาย อธิ ใจจนบวร | อนุกรรมการ |
| 8. นางสาว รัดนาภรณ์ ธนิกกุล | อนุกรรมการและเลขานุการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายสถานที่

- | | |
|-------------------------------|------------------|
| 1. ผศ.ดร. นัฐวิภา จันทร์ศรี | ประธานอนุกรรมการ |
| 2. ผศ.ดร. จิราภรณ์ ประดับวงษ์ | อนุกรรมการ |
| 3. ผศ. นันทวัฒน์ ศรีอริยวัฒน์ | อนุกรรมการ |
| 4. ผศ.ดร. สิริวงศ์ กลิ่นคำสอน | อนุกรรมการ |
| 5. ผศ.ดร. จันจิรา คงชื่นใจ | อนุกรรมการ |
| 6. ผศ.ดร. จิรเกียรติ ทรายทอง | อนุกรรมการ |

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| 7. นางสาว สุกัญญา สีเขียว | อนุกรรมการและเลขานุการ |
| 8. นางสาว ณัฏฐภัทร คู่มสุข | อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 9. นาย ไทพิน ปลอทดารา | อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายประสานงานวิชาการ

- | | |
|-------------------------------|------------------------|
| 1. ผศ.ดร. ศิริรัตน์ ชูลิขุเดช | ประธานอนุกรรมการ |
| 2. ผศ.ดร. ธนพันธ์ คงทอง | อนุกรรมการ |
| 3. ผศ.ดร. ภาณุวิภา จันทศรี | อนุกรรมการ |
| 4. ผศ.ดร. อธิกร พัดนพิบูล | อนุกรรมการ |
| 5. ผศ.ดร. ชรินทร์ดิ ทรายทอง | อนุกรรมการ |
| 6. นางสาว ยุพิน รักเกียรติ | อนุกรรมการและเลขานุการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายการเงิน

- | | |
|--------------------------------|------------------------|
| 1. ผศ.ดร. จิราภรณ์ ประดับวงษ์ | ประธานอนุกรรมการ |
| 2. ผศ.ดร. เพ็ญสุลา พันศุทธิง่า | อนุกรรมการ |
| 3. ผศ.ดร. เขษฏรา ชีนาญหล่อ | อนุกรรมการ |
| 4. ผศ.ดร. จักรินทร์ กลั่นเงิน | อนุกรรมการ |
| 5. นางสาว สุกัญญา สว่างวงศ์ | อนุกรรมการ |
| 6. นางสาว ขวัญจิต โลหากาศ | อนุกรรมการและเลขานุการ |



**รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566**

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พ.ต. ดร. บดินทร์ สิงห์โพธิ์

พ.ต. ดร. ศิวพงศ์ ภูคชภูษงศ์

พ.ต. พิสิฐ เจือไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ.ดร. ปารเมศ ชูดีมา

รศ.ดร. โอฬาร กิตติศิริพรชัย

ผศ. ทศชัย โลหะศิริวัฒน์

รศ.ดร. คาริษา สุธีวงศ์

ผศ.ดร. เน้นทชัย กานตานันตะ

อ.ดร. กุศล คุณวีร์วิสิกุล

รศ.ดร. นระเกณท์ พุ่มชูศรี

ผศ.ดร. พิสิษฐ์ จารุณีโรจน์

อ.ดร.มานิดา สว่างเนตร นอยแบร์ท

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร. นราภรณ์ เกาประเสริฐ

ผศ.ดร. พาพิศ วงศ์ชัยสุวัฒน์

อ.ดร. ประพล จิวะพรทิพย์

ผศ.ดร. อธิวัฒน์ บุญมี

ผศ.ดร. จิราภรณ์ ประดับวงษ์

ผศ.ดร. สุทธิกร พัฒนพิบูล

ผศ.ดร. ประภาพรพรรณ เกษมพรพงศ์

ผศ.ดร. ศิริรัตน์ ชุติชูเดช

รศ.ดร. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา

ผศ.ดร. รมีดาอยู่ อยู่สุข

ผศ.ดร. ชัยมงคล ลิ่มเพียรชอบ

ผศ.ดร. จักรินทร์ กลั่นเงิน

ผศ.ดร. ชัยวัฒน์ นุ่มทอง

ผศ.ดร. ธนพันธ์ คงทอง

ผศ.ดร. เพ็ญสุภา พันธุ์ชาติคำ

รศ.ดร. วิสุทธิ สุพิทักษ์

ผศ.ดร. สุวิภรณ์ วิชกุล

ผศ.ดร. อดง ชัยมณี

ผศ.ดร. จิรเกียรติ ทรายทอง

ผศ.ดร. เจริญ ชำนาญหล่อ

ผศ.ดร. นิภูริกา จันทร์ศรี

ผศ.ดร. สิริราชต์ กลั่นคำสอน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร. ชมพูนท เกษมเศรษฐี

ผศ.ดร. วริษา วิสิทธิ์พานิช

อ.ดร. พงษ์สวัสดิ์ ปฐมเพชร

รศ.ดร. นันทิภา เจริญใจ

ผศ.ดร. วลัยวัชร นาคเขียว

ผศ.ดร. ชวิศ บุญมี

ผศ.ดร. อนิรุฒ ไชยจารุพานิช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร. เจริญชัย โขมพัตรภรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร. รามิล เกศรกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ผศ. จิรวัฒน์ ณ พัทลุง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

รศ.ดร. ดมกริช สวรรณวงษ์

ผศ.ดร. ณัฐกานต์ พรพูนศิริ

ผศ.ดร. นวัตกรรม มูเกษม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รศ.ดร. ชาตรี หอมเขียว

รศ. สุทธิรักษ์ ระวีวงศ์

ผศ.ดร. สุชาติ จันทร์มณี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อ.ดร. ฉัตรพล ทิมพา

ว่าที่ร้อยตรี อนุศักดิ์ ศิลารชัย

อ. ดร. บัญชา พุทธากุล

อ. มลรัตน์ แซ่ฮ้อง

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร. ปณิตกมล สุริยธนาภาส

รศ. รักษน้อย อัครรุ่งเรืองกุล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศ.ดร. พงศกัณท์ เหลืองโอบุญย์
รศ.ดร. บุญบา พฤกษาพันธุ์รัตน์
ผศ.ดร. จิรวรรณ คล้อยกบัณฑิต

รศ.ดร. จีรวรัตน์ วีระวราพุกฤษ์
รศ.ดร. เสมอจิตร ทอมรสสุคนธ์
ผศ.ดร. วุฒินันท์ นุ่นแก้ว

รศ.ดร. ตนุพันธ์ วิสุวรรณ
รศ.ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ
ผศ.ดร. อนินทยา คำกันเอยา

มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

รศ.ดร. กรีน สนิธิเพิ่มพูน
ผศ.ดร. ศรีสังจา วิทยศักดิ์

ผศ.ดร. ไพรัชจาม สวมกุล
ผศ.ดร. สุรนิศย์ พุทธพนม

รศ.ดร. กุพงษ์ พงษ์เจริญ
ดร. สายสัมพันธ์ ชุ่มเจริญ

มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ. จันทรีทา นาควชิระตระกูล
ผศ.ดร. สุนิสา คำอุษ
ผศ. กุญวัลย์ จันทรสชา
อ. อติศักดิ์ นาวาหนิยว

ผศ.ดร. กฤษณา ประสพชัยชนะ
ผศ. บรรหาร ลีลา
อ.ดร. ทนงศักดิ์ เทพสนธิ์

ผศ.ดร. วรัดดา อุทยานรัตน์
ผศ. สมเสียง จันทาสี
อ. บัญชา อริยจรรยา

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร. พิเชษฐ มนต์ปิติ
อ. พรรคพงษ์ แก่นณรงค์

ผศ.ดร. เพ็ญจันทร์ โกญจนาน

ผศ. ศิลป์ชัย วัฒนเสย

มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

อ.ดร. รัชฎ์ สุทธิ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผศ.ดร. สถาพร จันทวี

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

ผศ.ดร. ปิยะ รัตตะออง

ผศ.ดร. ปัญญา สำราญพันธ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

ผศ.ร.ท. จิตกรณี เพชรภักดิ์

ผศ.ดร. วีรดาสุตร ณะาศรี

ผศ. สิทธิเดช หมอกสิขัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ผศ.ดร. วีระชัย แลงฉาย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

รศ.ดร. สมเกียรติ กอบัวแก้ว

รศ.ดร. ฤดี นิยมรัตน์

อ.ดร. ใสว ศิริทองถาวร

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร. นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ผศ.ดร. ชวลิต มณีศรี

ผศ.ดร. สุพิชดา ศรีญาณลักษณ์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ศ.ดร. ธนศ รังนวิไล
ผศ.ดร. นกิสพร มีมงคล
ผศ. พิเชฐ ตระการชัยศิริ
อ.ดร. สิริรัตน์ สุวัชรชัยต่างคี

รศ.ดร. เสกสรร สุธรรมานนท์
ผศ.ดร. รัชชณา สิ้นธวาลัย
อ.ดร. กุลภัทร์ ทองแก้ว
อ.ดร. สุรียา จิรสถิตสิน

รศ.ดร. วรวิมลพงษ์ คงแก้ว
ผศ. เจริญ เจตวิจิตร
อ.ดร. ดลยา ปวีคำ

สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

รศ.ดร. กาญจนาภา อมริชกุล



กำหนดการ
การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566

วันพฤหัสบดีที่ 11 พฤษภาคม 2566

08.30 – 09.00 น.	ลงทะเบียน
09.00 – 09.15 น.	เข้าสู่พิธีการ “การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41” กล่าวต้อนรับ โดย รศ.ดร. สกนพร เชื้อเพ็ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา ประธานในพิธีกล่าวเปิดงาน โดย ผศ.น.สพ.ดร. เสรี กุญแจนาค รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
09.15 – 09.30 น.	พิธีมอบประกาศนียบัตรแสดงความขอบคุณผู้สนับสนุน มอบโดย คุณชัชวาลย์ คุณคำชู อุปนายก วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
09.30 – 10.45 น.	เสวนาพิเศษ ในหัวข้อ “Next Chapter of Industrial Engineering” ผู้ทรงคุณวุฒิ: คุณจักรพงษ์ แยมี่ยม ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมเมืองและสังคมคาร์บอนต่ำ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ดร. สดุดี สุพรรณไพ รองกรรมการผู้จัดการ สำนักบริหารความยั่งยืนธรรมาภิบาลและการกำกับการปฏิบัติตามกฎหมาย บริษัท เครือเจริญโภคภัณฑ์ จำกัด รองศาสตราจารย์ ดร. พิรยพัทธ์ ชานูเสริมอุฎฺฒ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รองศาสตราจารย์ ดร. โอฬาร กิตติธีรพรชัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดำเนินการเสวนา: รองศาสตราจารย์ ดร. กุพงษ์ พงษ์นิจเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
10.45 – 11.00 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
11.00 – 12.00 น.	การบรรยายพิเศษ เรื่อง “Think Stats” รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพศรี สหิทธิ ณ อยุธยา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
12.00 – 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00 – 14.30 น.	การนำเสนอบทความวิชาการ
13.00 – 14.30 น.	การประชุมหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
14.30 – 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
14.45 – 16.15 น.	การนำเสนอบทความวิชาการ

งานเลี้ยงรับรอง

- 18.30 – 19.00 น. ลงทะเบียน
- 19.00 – 19.15 น. เข้าสู่พิธีการ กล่าวต้อนรับ โดย
รศ.ดร. สตาพร เชื้อเพ็ง
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
- 19.15 – 21.00 น. การประกาศผลการตัดสินการนำเสนอบทความวิชาการ
พิธีการรับมอบรางวัลเป็นเจ้าภาพการจัดประชุมวิชาการฯ ในปีถัดไป

วันศุกร์ที่ 12 พฤษภาคม 2566

- 09.00 – 10.30 น. การนำเสนอบทความวิชาการ
- 10.30 – 10.45 น. พักรับประทานอาหารว่าง
- 10.45 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิชาการ
- 12.15 – 13.00 น. พักรับประทานอาหารกลางวัน
- 13.00 – 14.30 น. การนำเสนอบทความวิชาการ



การเสวนาพิเศษ เรื่อง “Next Chapter of Industrial Engineering”

การประชุมย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566
โดย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566
โรงแรมใบรัดต้น แกรนด์ พิกาย อังพริตชลบุรี



การเสวนาพิเศษ เรื่อง **NEXT CHAPTER OF INDUSTRIAL ENGINEERING**
11 พฤษภาคม 2566 เวลา 9:30 - 10:45 น.



**รศ.ดร.พิชญ์
ชาญเศรษฐิกุล**
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



**ดร.สุดี
สุพรรณไพโร**
รองกรรมการผู้จัดการ สายอสังหาริมทรัพย์
บริษัท เคซีซีเอช จำกัด (มหาชน)



**คุณจักรพงษ์
ไฉยมิยม**
ผู้อำนวยการ ฝ่ายช่างเชื่อมเมืองและการท่องเที่ยว
องค์การบริหารวิสาหกิจทางทะเล
ระยอง (โดย/ภาควิชาวิศวกรรม)



**รศ.ดร.โอฬาร
กิตติธรรพ์ชัย**
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ดำเนินการเสวนา
โดย
รศ.ดร.อุพงษ์
พงษ์เจริญ**
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การบรรยายพิเศษ เรื่อง “Think Stats”

80 **80KU** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา

THE 41st CONFERENCE OF INDUSTRIAL ENGINEERING NETWORK 2023
NEXT CHAPTER OF INDUSTRIAL ENGINEERING

การบรรยายพิเศษ เรื่อง
**THINK
STATS**

11
พ.ค. 2566
11:00 -12:00 น.

รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพศรี สุกข์ศัน ญ ออูรยา
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ น.เกษตรศาสตร์

การประชุมช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566
โดย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566
โรงแรมใบร่ำดิน แกรนด์ พัทยา จังหวัดชลบุรี

กำหนดการการนำเสนอบทความวิชาการ

Session B1: Operations Research, Optimization and Decision Support Systems		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13:00-13:15	23	เส้นทางรถพยาบาลสำหรับขนส่งผู้ป่วยควรวลหลายคน กานต์ มูลศรี อนุพล ทิพย์พงศ์
13:15-13:30	27	การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ของเครือข่ายสถานีขนส่งในจังหวัดนครพนม ประเทศไทย: การระบุตำแหน่งสถานีปลายทางที่เหมาะสมที่สุด เมธาวุฒิ สี่หามาตย์ กานต์ มูลศรี ธนวิสา บุตรสังขรณ์
13:30-13:45	58	การประยุกต์ใช้การแก้ปัญหาพนักงานขายแบบกำหนดสำหรับการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษาบริษัท ปูฟี่ เซอร์วิส จำกัด ธนวิสา บุญศักดิ์ศรี บุณยทริกา กุพัฒนกุล ธัญญา กิ่งดีจินดา วันทยา อติเศรษฐพงศ์
13:45-14:00	72	การจัดตารางพยาบาลแบบหลายวัตถุประสงค์: วิธีการแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม นลชวิศ สุคนธ์ภัทร พิศัยภู งามณีโรจน์
14:00-14:15	126	คิวแบบไปรษณีย์เชิงเส้นตรงสำหรับการหาจำนวนทรัพยากรที่เหมาะสมของร้านซักผ้าบริการตนเอง วุฒินันท์ มุ้มแก้ว มารีษา กิมาพร
14:15-14:30	159	การจัดการตารางการทำงานของพนักงานเซอร์วิส เพื่อลดการเข้ามาล่วงเวลา กรณีศึกษา: บริษัทตัวแทนจำหน่ายอุปกรณ์สำหรับงานระบบเครื่องกลประกอบอาคาร นิรันดร์ วณิชยการ วรวุฒิ ทวีวีระกุล จุฑา ทิพย์สำเคอ

Session C1: Production and Operations Management		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13:00-13:15	29	พฤติกรรมของค่าความชื้น ความหวาน และสีส้มของกล้วยฝานในต่อระยะเวลาการตากแดดธรรมชาติ วิระพล ทัญฑิตี บรรพจน์ มีตา ประเวศ เรืองวงษ์
13:15-13:30	68	การลดข้อเสียในกระบวนการผลิตพื้นรองเท้า กรณีศึกษา: บริษัท แอดวานเทจ ฟุตแวร์ จำกัด ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์ เจนจิรา ธราพร ทัศนารี สุดดา ธนภรณ์ เรืองศา
13:30-13:45	86	การปรับปรุงมาตรฐานในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนเครื่องยนต์เพื่อเพิ่มผลผลิต ศรินทร์ยา ประทีปนะชัย ยุทธณรงค์ จงจันทร์ สรวุฒ อิศราพันธุ์มณี กิมี พรประเสริฐ เกียรติศักดิ์ พระเบตร กิตติคุณ แก้วภิรมย์
13:45-14:00	87	การหาจำนวนเครื่องจักรที่เหมาะสมกับการทำงานของพนักงานโดยใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมในการกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบแรงดันน้ำ ยุทธณรงค์ จงจันทร์ ศรินทร์ยา ประทีปนะชัย สุทธิลา การเวก ปราบปราม ผ่านสำแดง อภิรักษ์ นาคทอง ตักดา จินตะเวช
14:00-14:15	121	การปรับสมดุลสายการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อารีรัตน์ มีเชด สุวรัตน์ คงคำสับ พุทธิพร เล็กขาว กิฑรา กุปรางค์

Session D1: Quality Engineering and Management / Other Related Topics in Industrial Engineering		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13:00-13:15	90	การลดของเสียในกระบวนการผลิตน้ำดื่มด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง <i>ณัฐวิทย์ กาใจทราย ภาควิวัฒน์ เบ็ญใจ อุทัยภัทร สุกระศรี</i>
13:15-13:30	92	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม EEWMA, IMFIR-EEWMA, DMEWMA และ IMFIR-DMEWMA สำหรับการแจกแจงไวบูล <i>ชัยชัช สีแดง ขวนากร สุจินตวงษ์ ไสรญา บำรุง บียพล ไพจิตร</i>
13:30-13:45	61	การลดของเสียในกระบวนการผลิต การฝึกศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง <i>วิษุขนาน สันธวาลัย อภิญา หนูพรม นภิสพร มีมงคล</i>
13:45-14:00	128	การแก้ปัญหาด้วยการออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อลดเวลาในกระบวนการทำความสะอาดสายการผลิตอาหารสัตว์ <i>ณราวดี สิทธิเดชขำรง</i>
14:00-14:15	107	Formula Development of EVA Compound with Recycled EVA <i>Kittipat Jirvanstit Napassavong Osothsilp</i>
14:15-14:30	31	การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์ <i>ทศพล สุเวงฤทธิ์ นภัสสงศ์ ไอลงกสิณี พิชญ์วัฒน์ อินทร์เอื้อ</i>

Session E1: Material and Manufacturing Technology / Industrial Technology Management		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13:00-13:15	69	ลักษณะของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อร้อนและกระบวนการร่วมการบดเชิงกลและขึ้นรูปขึ้น <i>ชรินทร์รัตน์ ไพธสง สุธงศ์กนก แกลลงภัณฑน์ นรินทร์ ประทุมชัย ภัราวดี ทองวร นุชจิรา อุดมจิตร</i>
13:15-13:30	49	เครื่องอัตโนมัติขึ้นรูปสำหรับการอัดขึ้นรูปวัสดุธรรมชาติสู่การใช้งานในโยธา <i>วรพงศ์ บุญชัยนทน ชาตรี ทอมเขียว จิกรินทร์ ฉัตรทอง สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ กฤษดาภรณ์ หนูเชื้อ ปุฒยวัฒน์ แก้วชิง</i>
13:30-13:45	80	อิทธิพลของกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุสำหรับโลหะแผ่น <i>อัญไศกี ยกเย็นใจ เปรมพร เขมาวฑฒ์</i>
13:45-14:00	124	การศึกษาสมบัติของไฮพอลิเมอร์วัลคาไนซ์ผลิตจากเปลือกถั่วและเคมอะลูมิเนียมฟอสเฟต <i>จรรยา พรหมสะโร รัตมี แสงศิริมงคลยิ่ง อรรถพล แก้ววิไลย ชญาณี ทิพย์เต็ม</i>
14:00-14:15	153	โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมนิกเกิลเมื่อผ่านกระบวนการรีไซเคิลขึ้นรูปเย็น <i>ขวัญกมล มีะนิจดำรงค์ ณัฐชนน สำเริงกิจ วศิน เลิศถาวรกิจ ชิวพร สุขผล พรอมพงษ์ ปานดี</i>
14:15-14:30	158	ความแข็งแรงดึงของวัสดุประกอบเรซินและเส้นใยแก้ว <i>กิตติพิชญ์ อภินันท์กิตติ์ วิภู ศรีสืบสาย</i>

Session A2: Supply Chain and Logistics Management / Warehouse Management / Other Related Topics in Industrial Engineering		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
14.45-15.00	142	การเตรียมความพร้อมสำหรับการเป็นคลังสินค้า 4.0
		กษิภา สุทธิวิริยะกุล จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ
15.00-15.15	41	การปรับปรุงคุณภาพการจัดส่งของผู้ส่งมอบของบริษัทกรณีศึกษา
		ศราวณี จันทน์อิม ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์
15.15-15.30	65	การออกแบบตำแหน่งตะกร้าภายในสถานีงานพหุโหล้สำหรับศูนย์กระจายสินค้าวัสดุตกแต่งบ้าน
		กิตติกากร จิตร์เอื้ออารีย์กุล โอฬาร กิตติศรีพรชัย
15.30-15.45	131	การปรับปรุงกระบวนการทำงานในคลังวัตถุดิบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการจัดเก็บ
		อัษฎาภา สุขมัน สุพัฒตรา ศรีญาณลักษณ์
15.45-16.00	75	การลดต้นทุนบรรจุภัณฑ์โลจิสติกส์ด้วยแนวคิดวิศวกรรมคุณค่าในกระบวนการขนส่งของผลิตภัณฑ์เลนส์
		จิรวา อานุชิตานนท์
16.00-16.15	129	การศึกษารับรู้ความสามารถด้านการจัดกระบวนการจัดการโลจิสติกส์ของลูกค้าประเทศกัมพูชาต่อผู้จำหน่ายสินค้าจากประเทศไทย ผ่านด้านชายแดนอรัญประเทศ
		ศรินทร์ยา ประทีปชนะชัย อมรรัตน์ พงษ์ประเสริฐ ยุทธณรงค์ ชิงจันทร์ ปวีณนุตา บุญรัมย์ กัม พรประเสริฐ

Session B2: Engineering Economy and Industrial Cost Analysis / Other Related Topics in Industrial Engineering / Green Technology, Innovation Management and Technology transfer		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
14.45-15.00	54	การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตฟูกเหล็ก: กรณีศึกษา
		จิรัตน์ ธีระวาทภักดิ์ พงศกร ชินเจริญชัย ศาสตราวุธ สดสุวรรณค์ อรรชร พชรวิฑูฏ
15.00-15.15	110	การพัฒนาแบบต้นแบบมาตรฐานในกระบวนการผลิต กรณีศึกษา: โรงงานผลิตติ่มซำสำเร็จรูปแช่แข็ง
		มนัสวี ตั้งเพียร พิเชฐ พุ่มเกษร
15.15-15.30	120	การศึกษาค่าความเป็นไปได้ทางการตลาดและแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ กรณีศึกษา: ไอศกรีมกะทิสด (ผลิตภัณฑ์รูปจิบขนาดป้อม)
		เกษรินทร์ พูลทรัพย์ อภิรัฐสา จันทน์พรหม ณัฐภานต์ สายหมี่ วันชัย สัตถาภิรักษ์ สุขุม ไฉฉัตรชัยมงคล มนต์วี พิพัฒน์ใหญ่ชัย
15.30-15.45	133	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะเมล็ดกาแฟ
		ขวัญชนก ลือสวน พาณพงษ์อุ้นภาย ศิโรภ ทองคต เขมิตรา พุกอินทร์ ผกามาศ พุกอินทร์ อุดลย์ พุกอินทร์
15.45-16.00	79	ปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อการใช้รถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย: แนวทางการวิเคราะห์องค์ประกอบ
		ธนะรัตน์ บริสุทธิ์ พิเศษภู์ จารุณณ์โรจน์
16.00-16.15	148	การศึกษาค่าความเป็นไปได้ในการลงทุนธุรกิจผู้รับจัดการขนส่งระหว่างประเทศ
		รุจนาภา นันทโพธิ์เดช เขงฐา ชำนาญหล่อ พัชรา ศรีพระบุ

Session C2: Work Study, Ergonomics, Safety and Plant Design / Work Improvement / Maintenance Engineering		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
14.45-15.00	30	การคำนวณเวลามาตรฐานของพนักงานแผนกตัดเย็บเสื้อผ้า การศึกษา: วิชาทฤษฎีชุมชนแอนดริวสัน อดิพนธ์ มหาหะ พรหมเพ็ญ อวาร์ประสิทธิ์ นิตพงศ์ ไซดีพันธ์ ปุรพหะยะเดียว นิตดา อุดมวรัตน์
15.00-15.15	42	การศึกษาการทำงานและปรับปรุงกระบวนการผลิตข้อต่อฟวงรดบราวุก อานนท์ วิภาตะไวทยะ สุมณา ล้อมสุชา พงศกร ภูมิ ปิยะ รัตติระอง ภาสิต ทิแนม ตุภพัชร พวงแก้ว
15.15-15.30	55	การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตขามไม้โดยใช้เทคนิคการศึกษากการเคลื่อนไหวและเวลา ชนชาติ กฤตวรกาญจน์
15.30-15.45	95	การลดของเสียในกระบวนการผลิตซีเมนต์: กรณีศึกษา ภัทรพงศ์ คงธีรภาพ นรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม
15.45-16.00	147	การปรับปรุงกระบวนการคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์อะไหล่ยางรถจักรยานยนต์ด้วย Google Sheet สวนันท์ สุวรรณแสง สุพัฒตรา ศรีญาณลักษณ์ จักรพันธ์ กัณหะ
16.00-16.15	113	การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ สุพัฒตรา ศรีญาณลักษณ์ ศักดิ์ธิดา พยุงสกุล

Session D2: Maintenance / Production and Operations Management / Other Related Topics in Industrial Engineering / Operations Research, Optimization and Decision Support Systems		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
14.45-15.00	18	การบำรุงรักษาเชิงป้องกันเพื่อลดต้นทุนในธุรกิจการขนส่ง กรณีศึกษา หจก.ขวัญชัยการเกษตร (2013) จังหวัด เชียงราย คมกฤต มณฑสกุล ทรงวุฒิ ประกายวิเชียร อธิคม บุญชัย
15.00-15.15	38	การประยุกต์ใช้เทคนิค CPM และ SMED เพื่อลดเวลาในการซ่อมบำรุงเครื่องจักร กรณีศึกษาโรงงานผลิตขนม อบกรอบ จันทร์หา นวศิวศิริตระกูล กฤษดา มระลพรัชชะ คุณิศา คำสูง
15.15-15.30	39	การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของระบบเคลื่อนเม็คดา: กรณีศึกษา โรงงานผลิตยา อดิพงษ์ พุทธิจวร จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ กฤษ วังเกษม
15.30-15.45	76	การวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันโดยใช้การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือสำหรับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ในอุตสาหกรรมเคมี รังสรรค์ กั้นตะดอบ จักรพันธ์ ความพงษ์พันธ์ กฤษ วังเกษม
15.45-16.00	81	การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบเพื่อปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเครื่องไม่ รรชน ตีลกการย์ สาวิตร์ พิบูลศิลป์ เอนก บุญกว้าง
16.00-16.15	135	การคำนวณหาพลังงานการยึดติดของออกไซด์เคลือบเนื้อพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีเรขาคณิต อังคณา เมื่องใจ บัญญา วิมาลย์ ธรรมภรณ์ ทับละออ สมฤกษ์ จันทรอัมพร

Session E2: Other Related Topics in Industrial Engineering / Green Technology, Innovation Management and Technology transfer		
วันที่ 11 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
14.45-15.00	26	การออกแบบไม้เท้าสำหรับผู้สูงอายุ ธนาวัต เพชรยศ ภูวรัตน์ จันทรา
15.00-15.15	32	การผลิตอาหารบรรจุอาหารจากเส้นโปกามะพร้าวผสมพอลิเอทิลีน (HDPE) วรรณคดี บุญช่วยแทน ชัยวุฒิ จิวันศรี รศมนต์ ยะพันธ์ ชาตรี ทอมเชียว ศศิประภา เต็มศิริมงคล ปณภัคน์ หมู เชียว
15.15-15.30	34	การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยพืชสดเพื่อเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์สำหรับโครงการฟาร์มตัวอย่างบ้านรอตันบา ดู จังหวัดนราธิวาส โกศล มุตโกภาค ปุรพีร์ มะยะเฉียว พลกรร พรหมเมตร์ กรสิริณัฐ โรจนวรรณ
15.30-15.45	53	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดใบกระเทียมและสมบัติ การเร่งปฏิกิริยาคายแสง นุชชิตา สุขประสิทธิ์ วรณัฐ ทองพูล
15.45-16.00	77	การพัฒนาเครื่องย่อยเศษกิ่งไม้ใบไม้ด้วยเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ ภูวรัตน์ จันทรา ธนาวัต เพชรยศ ชานูชัย พลดีวิ สมเคียง จันทาสี
16.00-16.15	122	ระบบผลิตน้ำแข็งพลังงานชีวมวล กานต์ นัครวราบุทธร บุญญฤทธิ์ ประสาทแก้ว

Session: A3: Supply Chain and Logistics Management / Work Study, Ergonomics, Safety and Plant Design		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
09.00-09.15	36	การแบ่งกลุ่มลูกค้าด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อน และการจัดเส้นทางการขนส่งด้วยวิธีโปรแกรมไม่โครงสร้างเชิงเส้นด้วย ภาษารูปเอบ ชลรดา ทามศ ภัสสรรัตน์ เมื่อบศรี กเขต พันธุ์สวัสดิ์ กวินทร์ สืบเจริญ
09.15-09.30	37	การจัดการสินค้าคงคลังในร้านอาหารหลายสาขา ชนพล วิภูวณันท์ นภัทรพงศ์ สงวนหมู ปัทมา บานันท์ กวีธร สืบเจริญ
09.30-09.45	45	การพัฒนาเครื่องมือวางแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบเมื่อพิจารณาหลายสินค้าร่วมกัน: กรณีศึกษา ณัฐพล เจริญไธยะ พชรจิตา เชื้อรัง วิลัยลดา กลิ่นเครือวัลย์ อธิวัฒน์ บุญมี วรญา (เนื่องมัจฉา)
09.45-10.00	144	การกำหนดระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมภายใต้ผลกระทบของการแจกแจงของระยะเวลาการหยุดชะงักของ อุปทานที่ไม่ได้กำหนด สรวิญญา พากอง ศิริประภา ไชควรวัย จิรเกียรติ ทวยทอง
10.00-10.15	71	แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในคลังสินค้า กรณีศึกษา บริษัท เวิลด์เปเปอร์ จำกัด ณัฐนารี สุขเสกสรรค์ อนุชิตา สีสาร
10.15-10.30	130	การพัฒนาโปรแกรมการจัดการข้อมูลคลังอุปกรณ์: กรณีศึกษา ณัฐพล เจริญไธยะ อธิวัฒน์ บุญมี

Session: B3: Operations Research, Optimization and Decision Support Systems / Simulation		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
09.00-09.15	50	การประยุกต์ใช้ Solver ใน Microsoft Excel เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรทางเลือกของนิสิตคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จรรยาพรชน เสสูงเนิน สวีญญา ศาสาางาม
09.15-09.30	155	Promotion Optimization model for retails' multiple-period planning Chanikran Thangthong Naragain Phumchusri
09.30-09.45	85	การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อปรับสมดุลสายการผลิตชุดสายถ่ายเลือดสำหรับโรคไต กรณีศึกษา: บริษัท เอ็ม.อี.นิคคิโซ จำกัด กาญจนนา กาญจนสุนทร อินภัทร ไพฑ์ศิริ วงศกร ทองรัมย์ ณัฐพงศ์ ศรีโกเศษฐ
09.45-10.00	99	Agent-based simulation for comparative product promotion strategy Chutima Binsiravanich Naragain Phumchusri
10.00-10.15	143	การจำลองการอพยพหนีไฟในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์ด้วยโปรแกรม Pathfinder มณฑนา สุทธิประภา ประทีป ชัยเสริมเทวัญ สุภัทร พัฒนวิชัยโชติ
10.15-10.30	150	การจำลองสถานการณ์เพื่อลดเวลาออกของตู้มูบิวะ: กรณีศึกษาโรงพยาบาลแหลมฉบัง ชนพันธ์ คงทอง อภิณัฐ คำปาน อัครวิฑูญ ชีวะธรรมนเท

Session C3: Work Study, Ergonomics, Safety and Plant Design / Production and Operations Management		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
09.00-09.15	48	การสร้างรหัสคิวอาร์โค้ดด้วย Excel VBA เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการจัดการสินค้า กฤษณา คงนาค ประจวบ กล่อมจิตร
09.15-09.30	74	การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการสต็อกอะไหล่โดยระบบคอมพิวเตอร์: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ ประจวบ กล่อมจิตร อำนวย อมฤต ชยาพันธ์ วิภาทนต์ สุทธิวิฑูญ ชื่นเศรษฐ
09.30-09.45	84	การพัฒนากระบวนการจัดเก็บสินค้าหน่วยย่อย กรณีศึกษาบริษัทตัวตัดก่อสร้าง นรวุฒิ ขุนแพง ชุทธิ นตสา วณิชชา รัตนเมธี รัตนพงษ์ คงแก้ว
09.45-10.00	101	การลดข้อเสียในกระบวนการเชื่อมแหวนอู่แปะเพื่อตั้งส้นรอบรถยนต์ที่กักรอยบุบ กรณีศึกษา: สถาน ประกอบการซ่อมรถยนต์ กิม พรประเสริฐ ศรีนยา ประทีปชนะชัย ชัยชัย มั่นมงคล จันทศิริ พลอยงาม ณัฐกิติ พลพัฒน์ สุรพงษ์ แก่นเมธี
10.00-10.15	117	การปรับปรุงกระบวนการออกไปเสออากาศ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ณัฐธา รอดคง ไอลดา ตวีรัตน์ตระกูล
10.15-10.30	114	การเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจตรวจสอบของแอมกสกรีน: กรณีศึกษาโรงงานฉีดพลาสติก จิตติลาตร์ สุริยะ โชติตระกูล ภัทรา ภูปรางค์ พุทธิพร เล็กขาว

Session D3: Production and Operations Management / Operations Research, Optimization and Decision Support Systems / Other Related Topics in Industrial Engineering		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
09.00-09.15	105	การวางแผนการผลิตให้เพียงพอต่อการจำหน่าย สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการสูง: กรณีศึกษาโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์นม ประไพพิศ ประสมศรี อานันต์ มุ่งพัฒนา จันทร์ศิริ สิงห์เกื้อน
09.15-09.30	119	การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการประกอบห้องโดยสารรถเกี่ยวนาข้าวด้วยการจัดสมดุลสายการผลิต เดชินท์ เฉลิมเทวี จันทร์ศิริ สิงห์เกื้อน รุ่งรัตน์ กิสิข์เพ็ญ
09.30-09.45	132	การลดเวลาในกระบวนการประกอบเครื่องชั่ง ศุภพัฒน์ บึงสา
09.45-10.00	138	การวางแผนการผลิตแบบเชิงรุกเพื่อการผลิตแบบลีน นุกูล อุบลบาน
10.00-10.15	167	การลดเวลาที่สูญเสียจากเครื่องจักรหยุดทำงานโดยใช้กซิกซ์ชิกมา กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมไก่แปรรูป นัฐพรพล ญาณสิริสกุล สิทธิพร พิมพ์สกุล
10.15-10.30	15	การจัดสมดุลสายการผลิตโดยใช้วิธีอีวีเอสตีกล์ กรณีศึกษา โรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ จันจิรา คงชื่นใจ

Session: E3	
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566	
เวลา	เรื่อง
09.00-10.30	Workshop: Simulation Modelling and Analysis using Tecnomatix Plant Simulation

Session A4: Supply Chain and Logistics Management / Inventory Management / Production and Operations Management		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
10.45-11.00	123	การพัฒนาตัวแบบจำลองสถานการณ์โมเดลคาร์โลสำหรับกำหนดนโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังหลายประเภทร่วมกัน สำหรับระบบที่อุปสงค์ไม่แจ่มแจ้งแบบปกติ พีไลวรรณ สุวรรณฤทธิ์ วิสุทธิ สุพิทักษ์
11.00-11.15	60	การหาระดับอะไหล่คงคลังที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าผ่านพ้นผ่านการจำลองสถานการณ์: กรณีศึกษา ศิริพงศ์ อรุณแสงศิลป์ วิภาวี วังสิทธิ์ ชุตติกาญจน์ ชุตติภทรชูมณี อรรถ ชัยมณี
11.15-11.30	88	การศึกษากลยุทธ์การกำหนดจำนวนพาหนะลำเลียงวัสดุอัตโนมัติในระบบรางในศูนย์กระจายสินค้าวัสดุก่อสร้าง อุษามาต เลขศักดิ์ โอพาร กิตติธีรพรชัย
11.30-11.45	136	การออกแบบเส้นทางการเดินทางขนส่งวัสดุอัตโนมัติในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์: กรณีศึกษา พรชิตา เชื้อช่วง วิมลดา กลิ่นศรีสวัสดิ์ อธิวัฒน์ บุญมี
11.45-12.00	51	การศึกษานโยบายการจัดการสินค้าคงคลังประเภทยางรถยนต์ กรณีศึกษาบริษัทบริการขายและเปลี่ยนยางรถยนต์ อมเรศ สมุทรานุกูล บรรพชาญ ลีลา จิตติมา พันธุ์จิตรศิริ อธิศักดิ์ นามเหนือยศ ภูมิชา อริยะจรรยา
12.00-12.15	98	การปรับปรุงเส้นทางขนส่งโดยหุ่นยนต์ LNS คงเดช ศำขจร อรุโร แสงสว่าง

Session B4: Operations Research, Optimization and Decision Support Systems / Other Related Topics in Industrial Engineering		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
10.45-11.00	40	การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์สำหรับการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานคร ปิ่นนิตี เหนียวบุตร ปรีชาไพตรี สุวดีเน อัยยุธา สุวิภากรดี วิมลกุล
11.00-11.15	149	การประยุกต์ใช้โครงข่าย SqueezeNet ในการจำแนกข้อบกพร่องของอะลูมิเนียมแผ่นรีด วรพล ประชาภิรมย์ นัฐจิรา จันทร์ศรี
11.15-11.30	141	การจัดแนวเส้นทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีกลุ่มอนุภาค สิป์นิตี จานทอง คมกฤต เล็กสกุล
11.30-11.45	169	ชุดคำสั่งคอมพิวเตอร์จำลองโมเดลสำหรับสกุลเงินดิจิทัลด้วยตัวบ่งชี้ทางเทคนิค RSI และ Stoch ภัทรวล ชุตติพงษ์เกษม สตรีชา สุวังค์
11.45-12.00	52	การศึกษานโยบายของการอบชุบด้วยความร้อนที่มีผลต่อความลึกชุบแข็งผิวของแกนข้อโซ่รถจักรยานยนต์โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล พจน์ย์ สุขหนา พลชัย ไร่ดีปรายนกุล
12.00-12.15	156	การจัดการโครงการก่อสร้างของโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้วิธีเส้นทางวิกฤติและวิธีการประเมินผลและทบทวนโครงการ วรพงษ์ เกียรติเมธา สิริวงศ์ กลิ่นคำสอน

Session C4: Work Study, Ergonomics, Safety and Plant Design		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
10.45-11.00	59	การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์งานยกกระสอบปูนซีเมนต์ด้วยบนเครื่องผสมปูน จตุรทัพนธ์ นวลสว่าง เพ็ญสุดา พันธุ์ศรีดี
		การพัฒนาโครงเปลี่ยนส่วนบนเพื่อลดการบาดเจ็บหลังของนักเรือยนต์เรือ
11.00-11.15	83	พิธีชัย พงษ์มณีมัย ถิระเดช ถิระเจริญกุล วุฒิน แสนใจวุฒิ ภูภักดิ์ ไชยรักษ์ พิรพัชร สยามิตร วรภัทร ทองเหลือ กิตติศักดิ์ พิมพ์พันธ์
11.15-11.30	89	ต้นแบบโต๊ะพับสำหรับเตียงสองชั้นเพื่อทำในห้องที่เหมาะสม วิศรุต วงษ์บุญไญยตระกูล นิธิชานา นัตถจินดารัตน์ พงศกร โลหะศิริวัฒน์ กรวิชัย กรทิพย์ เกียรติสุรพันธ์ ศรีพลไกร จินตพันธ์ โตกับเที่ยง ชนิต ตัวงบดี ณัฏฐา ชัยสัมฤทธิ์ผล กศพิพัฒน์ เอี่ยมพงษ์ไพฑูรย์ สรวิต ก่อกิจกุล วาณิด ศิริวัฒน์ประภา พิรพัฒน์ เหล่าวีระธรรม
11.30-11.45	111	การปรับปรุงรถเข็นในงานก่อสร้างโดยใช้หลักการยศาสตร์ อำพล ลานสุข ปิติภัทร ไพโรศรี ชีรวัฒน์ สุวรรณเวียง
11.45-12.00	145	การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของพนักงานในกระบวนการกักชิ้นส่วนเครื่องบิน เนาวดี โตทวีชัย นัญจวิภา จันทร์ศรี
12.00-12.15	151	ทำนงในการใช้งานคอมพิวเตอร์เพื่องานออฟฟิศทั่วไปและการเล่นเกม ชยากร อุกสาธิต ชีรภัทร ศักดิ์ชูวงศ์ พิรวิชัย วิเศษชาติ หฤทัย โลหะศิริวัฒน์

Session D4: Quality Engineering and Management / Operations Research, Optimization and Decision Support Systems		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
10.45-11.00	35	การปรับปรุงคุณภาพการบริหารของโรงพยาบาล: กรณีศึกษาโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่งในจังหวัดนราธิวาส ปรีญา อานาไช้ มุขียมะห์ สามะ พรหมเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์ นิตดา อุดมวัฒน์ นัตพงษ์ ไรต์พันธ์ อติพันธ์ มา ความะ
		การประยุกต์ใช้ FMEA ในกระบวนการผลิตเครื่องยนต์ใหม่ กรณีศึกษาในโรงงานผลิตรถจักรยานยนต์ วิรัชชา สินธุาลัย ศิวภรณ์ สุดจันทร์ เกสพร มิ่งมงคล
11.00-11.15	62	การตรวจสอบความชื้นแฉะด้วยเซ็นเซอร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พลช ชินวัฒน์วงศ์วาน ไอศวาร์ กิตติวีรพงษ์
11.15-11.30	70	การลดต้นทุนของเลื่อยจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น ศศพร คุณาพิสิฐกุล นกมลวงค์ อัสสดีลย์
11.30-11.45	125	การกำหนดนโยบายบริหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเตรียมอะไหล่คลังคงคลัง กรณีศึกษาโรงงานผลิตกระดาษมีโน พรพัชร จิระเดชะ

Session E4: Material and Manufacturing Technology / Operations Research, Optimization and Decision Support Systems		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
10.45-11.00	96	การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมไฮโดรเจนแก๊ส จกมล ศรีวรร เกษมสันต์ นลสงสาร
11.00-11.15	100	อิทธิพลของอุณหภูมิการพิมพ์สามมิติแบบฉีดเส้นพลาสติกต่อคุณสมบัติเชิงกลและความแม่นยำเชิงมิติ วิมลหทัย ประสงค์ วรรณ ตีลกการย์ สวัสดิ์ ธิบูลศิลป์ สมเดช อังคะวระ สุเนตร มุลทา ประยูร สุรินทร์
11.15-11.30	103	การประยุกต์ใช้วิธีการทากูซีในการเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์การตัดสำหรับความหนาผิวและอัตราการผลิต งานชิ้นงานสำหรับเครื่องกำเนิดพลังงานด้วยเส้นลวดไฟฟ้า ปัทมา นาควงษ์ อภิวัฒน์ มุตตามระ
11.30-11.45	106	ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการต่อความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน PLA ที่พิมพ์ 3 มิติโดย FDM พิศพงษ์ ลิ้มหลาย อภิวิชิต มณีงาม ทนศักดิ์ คงสินธุ์ ทศพร อัครวิงษ์ วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์ พัตร์พิมล สุวรรณกาญจน์ กัญญา อุบลทิพย์
11.45-12.00	20	การวิเคราะห์ระบบทางเข้าของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมกรณีศึกษาชิ้นงานรูปถัง ภาวรัช จันทรสร พัตร์พิมล สุวรรณกาญจน์ สมชัชวีร์ หุสขุมณี
12.00-12.15	73	การออกแบบระบบรูปทรงแทนหล่ออะลูมิเนียมสำหรับโครงแบบทนาย ภาวรัช จันทรสร สภาพร ชาลวาคม พัตร์พิมล สุวรรณกาญจน์ เพ็ญญารัตน์ สายศิริรัตน์ พงศกร ขวัญทอง

Session A5: Material and Manufacturing Technology / Supply Chain and Logistics Management / Operations Research, Optimization and Decision Support Systems		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13:00-13:15	22	การทำนายผลคำนวณสปริงกลับจากการตัดต่อโลหะด้วย K-Nearest Neighbors (KNN) สมชาย คงหนู กวิน สนธิเพิ่มพูน สมจักษณ์ วรรณฤมดี กัญญา ไร้วา
13:15-13:30	154	Monthly Sales Forecasting for Beauty Products Sold in a Retail Offering Price Promotion Nichakan Phupaichitkun Naragain Phumchosti
13:30-13:45	166	The Comparing of Expected Performance of Different Shapes in Cross-Docking Sorykhle Paitsansukhekul Siwaphong Kusolpuchong
13:45-14:00	170	การปรับปรุงการพยากรณ์ยอดขายและนโยบายสินค้าคงคลังสำหรับบริษัทที่ศึกษาเจ้าของแบรนด์สินค้า ประเภทน้ำหอม จวันันท์ สิมโฮพาสุสสกุล นระเกษณ์ พุมขุศรี
14:00-14:15	104	การประยุกต์ใช้ Hybrid Delphi – GRA สำหรับการเลือกเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในการทำงานระดับวิชาชีพ ปริวรรต นาสวาสดี นรงค์ วิชาณา อธิพงษ์ สุวรรณกุล วิทยา อินทร์สอน ไทยทัศน์ สุดสวนดี จันทรีศิริ พลอยงาม
14:15-14:30	115	การจัดอันดับพื้นที่ประสบปัญหาด้านการบริหารจัดการน้ำในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาของประเทศไทยภายใต้การ วิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ กนกวรรณ ทศศิริสวัสดิ์ กัญญาภัทร์ สีนวล พรพรรณรินทร์ ปฐมเจริญวัฒน์ ศรส ใจจิตรี

Session B5	
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566	
เวลา	เรื่อง
13.00-14.30	Workshop: Simulation Modeling and Analysis using Tecnomatix Plant Simulation

Session C5: Work Study, Ergonomics, Safety and Plant Design / Operations Research, Optimization and Decision Support Systems / Automation and Smart Technology		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13.00-13.15	56	การจำลองการอพยพหนีไฟด้วยโปรแกรม pathfinder กรณีศึกษาอาคารพาณิชย์
		สุพัตรา ระหงษ์ สุภัทร พัฒนวิชัยโชติ
13.15-13.30	19	การพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับการผลิตยางรถยนต์รุ่นใหม่
		วิชรพงศ์ วชิรวงศ์บุรี สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ
13.30-13.45	118	การจำลองอพยพหนีไฟของโรงงานผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก
		อนงค์ นาคำ สุภัทร พัฒนวิชัยโชติ
13.45-14.00	140	การวิเคราะห์สมรรถนะระบบหัวข้อนำต้นเพลิงอัตโนมัติในอาคารคลังสินค้าโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้วย
		การจำลองพลศาสตร์อวกาศ
14.00-14.15	164	ศราวดี บำรุงพร อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ สุภัทร พัฒนวิชัยโชติ
		ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับธุรกิจซื้อขายยางก้อนถ้วย กรณีศึกษา : ร้านผู้ส่งออกยาง จังหวัดยะลา
		นิตพงศ์ ไชติพันธ์ พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์ อติสินทร์ มาหามะ

Session D5: Automation and Smart Technology / Other Related Topics in Industrial Engineering / Work Study, Ergonomics, Safety and Plant Design / Production and Operations Management		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13:00-13.15	116	การออกแบบชุดทดลองสำหรับปลูกข้าวกับตัวระบบไฮโดรโปนิกส์ควบคุมด้วยระบบพีแอลซี: สุรเจษฎ์ ก้อนจันทร์ อดิศักดิ์ ศรีโชค ระพีพันธ์ ปิตาคะโส บัจจวี ศรีโชค
13.15-13.30	64	การลดต้นทุนของบีม์แรงต้นสูงในกระบวนการผลิตผงซักฟอกด้วยวิศวกรรมคุณค่า กฤษดา ประสพชัยชนะ จันทรีจักษ์ นาควชิระตระกูล ภูววัฒน์ จันทรา สุนิสา คำสุข
13.30-13.45	93	การศึกษากิจการจัดการความปลอดภัยของเด็กในจังหวัดนครราชสีมา จงกล ศรีธรรม กิ่งกาญจน์ กองกาญจนะ ภูมิวิทย์ สัตถ์พร
13.45-14.00	127	การประยุกต์ใช้กระบวนการความคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการ ECRS ในการออกแบบที่เขื่อนตามจับก้อนน้ำ เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต สะควาญ สิทธิวัฒน์ ธนพล สุวรรณโณทัย ยศพล สองสว่าง ธนัช ปัญญาภูวาลิต สวิช ประวิทย์ รุ่งโรจน์ แสนคำรวม ปิยะณัฐ บุญสอน
14.00-14.15	171	การปรับปรุงกระบวนการขออนุมัติชิ้นงานตัวอย่างสำหรับซัพพลายเออร์ รุ่งทิพย์ อินทวงศ์
14.15-14.30	44	การพัฒนาการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษาสินค้าประเภทวัสดุก่อสร้าง ภาณุวัฒน์ แก้วสงขลา วนิตา รัตนมณี กุลภัสร์ ทองแก้ว วรพันธุ์พงษ์ คงแก้ว

Session E5: Material and Manufacturing Technology / Welding Engineering Technology		
วันที่ 12 พฤษภาคม 2566		
เวลา	บทความที่	เรื่อง
13:00-13.15	21	อิทธิพลกระแสเชื่อมที่ต่อสมบัติของผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ปิยธิดา ตันภูกุล ไพศาล ทองสงค์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
13.15-13.30	78	การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความสามารถในการเชื่อมที่แตกต่างระหว่าง เหล็กหล่อ เหนียว A538 และเหล็กกล้าคาร์บอน A36 ด้วยเทคนิคเชื่อมร่องพื้น วรศิลป์ พงษ์วิบูลย์ ชนาธิป เหล็กห้าจบ ชลิตา เจริญใจ ศิพัสสุตา เน้นวิมหนอง ชญานี ทิพย์เสม
13.30-13.45	160	การศึกษสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมที่ต่างกันระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A106 Gr.B และเหล็กกล้าไร้สนิม ASTM A312 TP316/316L ด้วยลวดเชื่อม AWS A5.22 E309LT-1.5 และ AWS A5.9 ER309L โดยกระบวนการ GTAW ทศพล ประทาน กิติภักดิ์ วิจิตรพันธ์ุ ธนาภรณ์ ทนไฉนแดง
13.45-14.00	162	การศึกษสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นงานเชื่อมท่อโลหะต่างชนิดระหว่าง ASTM A312 Gr.TP316/316L และ ASTM A106 Gr.B ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก่สภาพแบบแรงดึงผิว และ กระบวนการเชื่อมอาร์กที่งัดสแตนด์สเปคคูลม ประภาส เพ็งประโคน กิติภักดิ์ วิจิตรพันธ์ุ ธนาภรณ์ ทนไฉนแดง
14.00-14.15	91	การปรับปรุงคุณภาพรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คพลาสมาอัลตราโซนิก วนันธร ภักดิ์จันทร์ พชรพล ศิวาคูบตี อรรถพล แก้ววิสัย
14.15-14.30	161	การเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิดระหว่าง ADC3 และ AA5052 โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สินินาฎ บัวงาม ศุภธิช สังข์ทอง สมลักษณ์ อุบลวัตร พรหมพงษ์ ปานดี

แผนผังสถานที่จัดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566
ชั้น 8 โรงแรมไบรท์ตัน แกรนด์ พัทยา



สารบัญ

	หน้า	
คำนำ	i	
สารจากระองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	ii	
สารจากนายกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์	iii	
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา	iv	
สารจากประธานกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566	v	
เอกสารโครงการการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566	vi	
คณะกรรมการจัดประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566	viii	
รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ	x	
กำหนดการการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566	xiii	
กำหนดการการนำเสนอบทความวิชาการ	xvii	
แผนผังสถานที่จัดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 41 ประจำปี 2566	xxix	
บทความที่	ชื่อบทความ	
	หน้า	
15	การจัดการมลพิษการผลิตโดยใช้วิธีอิมัลชัน กรณีศึกษา โรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ จันทิรา คงขันใจ	1
18	การบำรุงรักษาเชิงป้องกันเพื่อลดต้นทุนในธุรกิจขนส่ง กรณีศึกษา หจก. ขวัญชัยการเกษตร (2013) จังหวัดเชียงราย คมกฤต เมฆสกุล ทรงวุฒิ ประกายวิเชียร อธิคม บุญเชื้อ	7
19	การพัฒนากระบวนการผลิตข้อมูลสำหรับการผลิตยางรถยนต์รุ่นใหม่ วัชรพงศ์ วชิรวงศ์บุรี สมเกียรติ ตั้งจิตสิดเจริญ	14
20	การวิเคราะห์ระบบทางเข้าของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมกรณีศึกษาชิ้นงานรูปถัง ภาววิช จันทารส พัตร์พิมล สุวรรณกาญจน์ สุเมธินี หุขัยภูมิ	21
21	อิทธิพลกระแสเชื่อมทิกต่อสมบัติของผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140 ปิยธิดา ดุรงกุล ไพศาล ทองสงค์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	28
22	การทำนายผลคำนวณสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะด้วย K-Nearest Neighbors (KNN) สมชาย คงหนู กวิน สนธิเพิ่มพูน สมลักษ์ณ์ วรรณเมฆล กียลาโรว่า	34
23	เส้นทางรพยบาลสำหรับขนส่งผู้ป่วยคววละหลายคน กานต์ มุลศรี ดนพล ทิพย์พงศ์	40
25	การกำหนดนโยบายบริหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเตรียมอะไหล่คลัง กรณีศึกษาโรงงานผลิต กรดอะมิโน พรพัชร จิระเดชะ	46
26	การออกแบบไม้เท้าสำหรับผู้สูงอายุ ชนาวดี เพชรยศ ฤกษ์วัลย์ จันทรา	52
27	การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ของเครือข่ายสถานีขนส่งในจังหวัดนครพนม ประเทศไทย: การระบุ ตำแหน่งสถานีปลายทางที่เหมาะสมที่สุด เมธาวุฒิ สีหามาตย์ กานต์ มุลศรี ธนิตรา บุตรสิงขรณ์	58
29	พฤติกรรมของค่าความชื้น ความหวาน และสีส้มของกล้วยแผ่นต่อระยะเวลาการตากแดดธรรมชาติ วิระพล ทับกิมดี บรรพจน์ มีสา ประเวษ เชื้อวงษ์	64
30	การคำนวณเวลามาตรฐานของพนักงานแผนกตัดเย็บเสื้อกีฬา กรณีศึกษา:วิสาหกิจชุมชนแฮนด์อินแฮนด์ อดิษฐ์ มหาหะ พรธนพิญ ภาวประสิทธิ์ นิตพงศ์ โชติพันธ์ ปุรพท์ มะยะเนียว นิตดา อุดมวรัตน์	69

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
31	การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์ ทศพล สุเริงฤทธิ์ นภัสวงศ์ โอสถศิลป์ พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ	75
32	การผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยคาบมะพร้าวผสมพอลิเอทิลีน (HDPE) วรพงษ์ บุญช่วยภาน ธัญวลัย จีวันลว วัฒนดี บุระพันธ์ ชาตรี หอมเขียว ศศิประภา เต็มสิริมงคล ปดุมกิ้น หนูเขียว	80
34	การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยพืชสดเพื่อเป็นส่วผสมอาหารสัตว์สำหรับโครงการฟาร์มตัวอย่างบ้าน รอดต้นเขาตุ้ จังหวัดนครราชสีมา โกศล มุตโกภาค ปุรพท์ มะยะเดี่ยว พลภกร พรหมเมศร์ กรสิริณัฐ ไรจนวรรณิ	86
35	การปรับปรุงคุณภาพการบริการของโรงพยาบาล: กรณีศึกษา โรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่งในจังหวัด นครราชสีมา ปวีณา อาวไช้ ยูอึบะที สาเมาะ พรพนมพิญ์ ดาวรรประสิทธิ์ นีศิลา อุดมาวัฒน์ นิตพงศ์ ไซตีพันธ์ อดิณีมาวี มภวามะ	92
36	การแบ่งกลุ่มลูกค้าด้วยค่าเฉลี่ยเคมัน และการจัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธีโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็ก เซลด้วยภาษาวีบีเอ ชลธรา ทายค กัลยรัตน์ เมียมศรี คณศ พันธุ์สาสดี กรินทร สัยนเจริญ	98
37	การจัดการสินค้าคงคลังในร้านอาหารหลายสาขา ชนพล วิภูอัยนันท์ นัทธพงษ์ สงวนนัญ ปัทมา ภาวนันท์ กรินทร สัยนเจริญ	99
38	การประยุกต์ใช้เทคนิค CPM และ SMED เพื่อลดเวลาในการซ่อมบำรุงเครื่องจักร กรณีศึกษา โรงงานผลิตขนมกรอบ จันทวีชา นพวชิระกุล กฤษดา ประสพชัยชนะ สุณิสา คำสุข	105
39	การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของระบบเคลื่อนเมื่อยา: กรณีศึกษา โรงงานผลิตยา อดิพงษ์ พุทธจร จักรพันธ์ อ่วมพงษ์พันธ์ กฤษ วงษ์เกษม	111
40	การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์สำหรับการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานคร ยีนมนัส เนาวบุตว ประไพศรี สุทัศน์ ณ. อัญญา สุวิษภานัน วิชกุล	117
41	การปรับปรุงคุณภาพการจัดการคลังของผู้ส่งมอบของบริษัทการผลิต ศวาวดี จันท์อิม ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์	123
42	การศึกษาการทำงานและปรับปรุงกระบวนการผลิตข้อต่อฟองบรรจุทุก ฮานนท์ วิภาตะไวทยะ สมณา ส้อมสวาท พงศกร ภูษา นิยะ รัตนละออง ภาสิต ภันพนม ศุภพัชร์ พวงแก้ว	130
44	การพัฒนาการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษาสินค้าประเภทวัสดุก่อสร้าง ภาณุวัฒน์ แก้วสงขลว วณิชดา รัตนมณี กุลภัสร์ ทองแก้ว วรันตพงษ์ คงแก้ว	136
45	การพัฒนาเครื่องมือวางแผนการส่งซื้อวัตถุดิบเมื่อพิจารณาหลายสินค้าร่วมกัน: กรณีศึกษา ณัฐพล เจริญดีศ พรชิตา เขื้อซัง วลัยดิดา กลิ่นเครือวัลย์ อธิวัฒน์ บุญมี วรญา เนื่องมีจันดา	143
48	การสร้างรหัสคิวอาร์ได้ด้วย Excel VBA เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการจัดการสินค้า ภรณา คงนาค ประจวบ กล่อมจิตร	144
49	เครื่องอัตโนมัติรับรถสำหรับการอัดขึ้นรูปวัสดุธรรมชาติสู่การใช้ประโยชน์ วรพงษ์ บุญช่วยภาน ชาตรี หอมเขียว จักรวรินทร์ ถังทอง สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ กฤษดาภรณ์ หนูเชื้อ ปุฒยวีจันท์ แก้วซัง	150
50	การประยุกต์ใช้ Solver ใน Microsoft Excel เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรการเลือกห้องวิจัยของนิสิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จรรยาพรรณ เสสูงเนิน สวิญญา ศาลางาม	156

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
51	การศึกษานโยบายการจัดการสินค้าคงคลังประเภทยางรถยนต์ กรณีศึกษาร้านบริการขายและเปลี่ยนยางรถยนต์ <i>อมเรศ สมุทราภกุล บรรพทยา ธิลา จิตติมา พันธุ์จิตรศิริ อดิศักดิ์ นวาทินัย บัญชา อริยะจรรยา</i>	161
52	การศึกษามัจจุ้ยของการอบชุบด้วยความร้อนที่มีผลต่อความลึกชุบแข็งผิวของแกนข้อ โช้รถจักรยานยนต์ โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล <i>พจน์ย์ สุขหนา พอลชัย โชติปราชญ์กุล</i>	168
53	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดใบกระพ้อมและสมบัติการเร่งปฏิกิริยาดำยแสง <i>นุชชิตา สุขประสิทธิ์ วรรณศย์ ทองทอง</i>	174
54	การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตทุกเหล็ก: กรณีศึกษา <i>จิรวัฒน์ ธีระวาทฤกษ์ พงศกร ชีเมจิวิชัย ศาสตราวุธ ผลสุวรรณ ฐาพร พชรวิฑูฏ</i>	179
55	การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตขามไม้โดยใช้เทคนิคการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา <i>ชนมชาติ กฤตวราภรณ์</i>	185
56	การจำลองการอพยพหนีไฟด้วยโปรแกรม pathfinder กรณีศึกษาอาคารพณิชยกรรม <i>สุพิศวา ระหงส์ สุภักร พันธ์วิชัยโชติ</i>	191
58	การประยุกต์ใช้การแก้ปัญหาเชิงงานขายแบบกำหนดผลลัพธ์สำหรับการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษาบริษัทปฐพี เซอร์วิส จำกัด <i>ธนัชชา บุญศักดิ์ศรี บุญศรีภา ภูพัฒน์กุล ธัญญา กวีดิจินดา วันหยก อดิเตอรุพงษ์</i>	197
59	การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์จำแยกกระสอบปิ่นเมื่เงเว้างานเครื่องผสมปูน <i>จตุรภัทย์ วงศ์สว่าง เมธิลดา พันธุภรณ์ตา</i>	204
60	การหาระดับบะโหลงคองคั้งที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินผ่านการจำลองสถานการณ์: กรณีศึกษา <i>ศิริพงศ์ อรุณแสงศิลป์ วิภาวี อุชิตต์ย์ ชุตติภาณุณี ชุตติภรชุมณี อภณ ชัยมณี</i>	210
61	การลดของเสียในกระบวนการผลิต กรณีศึกษาในโรงงานถลุงมืออย่างตัวอย่าง <i>วิัญชานา สันธวาลัย อภิญา หนูทวีมี นภัสพร มิ่งมงคล</i>	218
62	การประยุกต์ใช้ FMEA ในกระบวนการผลิตเครื่องยัดใหม่ กรณีศึกษาในโรงงานผลิตเครื่องจักรยานยนต์ <i>วิัญชานา สันธวาลัย ศิวาภรณ์ สุดจันทร์ นภัสพร มิ่งมงคล</i>	226
64	การลดต้นทุนของบั้งแรงดันสูงในกระบวนการผลิตผงซักฟอกด้วยวิศวกรรมคุณค่า <i>กฤษดา ประสพชัยชนะ ทัฬหเรียว นวชาวิชิตกุล ณัฐฉรีย์ จันทรส สุริสา คำสุข</i>	232
65	การออกแบบตำแหน่งตะกร้าภายในเสตงงานทุกทุกใส่สำหรับศูนย์กระจายสินค้าวิศดุคคั้งบ้าน <i>กิดาวาร จิตต์เอื้ออารีย์กุล ไอพรว กิตติวีรพชัย</i>	239
68	การลดของเสียในกระบวนการผลิตพื้นรองเท้า กรณีศึกษา: บริษัท แอดแวนเทจ ฟุตแวร์ จำกัด <i>ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์ เจนจิรา ชวพร ณัฐนาวิ สุดตา อนุภรณ์ เรืองลา</i>	245
69	ลักษณะของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อทวนและกระบวนการร่วมการบดเชิงกลและขึ้นรูปรีโซ <i>ชวินภรวิวัฒน์ ไทธิสว่าง สุขอังกณ แกลงกัณห์ นครินทร์ ประทุมชัย ภวาทว ทองว นุชจิรา อุดมจิต</i>	252
70	การตรวจสอบความขึ้นแกรแล ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี <i>พลช ชินวัฒน์วงศ์วาน ไอพรว กิตติวีรพชัย</i>	258
71	แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในคลังสินค้า กรณีศึกษา บริษัท เวลด์เปเปอร์ จำกัด <i>ณัฐนารี สุขเสกสรรค์ อนุชิตา สีสาเร</i>	266

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
72	การจัดตารางพยาบาลแบบหลายวัตถุประสงค์: วิธีการแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม นลราช สุคนธ์ภัทร พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์	272
73	การออกแบบระบบรูปทในฐานหล่ออลูมิเนียมสำหรับโครงแบบทราย ภาววิทย์ จันทนภรต สภาพร ชาตาคม พัตร์พิมล สุวรรณภาณุพงษ์ เพ็ญญารัตน์ สายสิริวัฒน์ พงศกร ขวัญทอง	273
74	การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการสต็อกอะไหล่โดยระบบคอมพิวเตอร์: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ ประจวบ ภัสสมจิตร ชำนาญ ยมฤกษ์ ชยานันท์ วิชานนท์ สุนทรวิภาณี ชินครุฑ	280
75	การลดต้นทุนบรรจุภัณฑ์โพลีเอทิลีนด้วยแนวคิดวิศวกรรมคุณค่าในกระบวนการขนส่งของผลิตภัณฑ์เลนส์ จีราตา อนุชิตนานนท์	287
76	การวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันโดยใช้การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือสำหรับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องในอุตสาหกรรมเคมี รังสรรค์ กันยะดอย จักรพันธ์ อ่วมพงษ์พันธ์ กฤษ วงษ์เกษม	293
77	การพัฒนาเครื่องย่อยเศษทิ้งไม่เปียกด้วยเทคนิคการกระจายหน้าที่ยิงคุณภาพ ณัฐวิทย์ จันทร์สา ธนาวุฒิ เพชวาศ ชานูชัย พงศศิริ สมเสียง จันทมาลี	299
78	การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความสามารกในการเชื่อมที่แตกต่างกันระหว่างเหล็กหล่อเหนียว A536 และเหล็กกล้าคาร์บอน A36 ด้วยเทคนิคเชื่อมรองพื้น วรศิปิ พัฒนวิบูลย์ ชนกริบ เกสก์นำคม ชลลดา เติตจินดา ทิพย์สุดา นนริชมหนอง ชฎานี กิทยเสม	307
79	ปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อการใช้รถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย: แนวทางการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการ ธนะรัตน์ บรสิฐาธิ พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์	314
80	อิทธิพลของกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุสำหรับโลหะแผ่น อัญญาไศย์ ยุกเกนใจ เปรมพร เหมววมณี	321
81	การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบและผลกระทบเพื่อปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเครื่องไม่ วรรณ สิลกการย์ สาริตรี พิชิตศิลป์ เอนก บุญกว้าง	328
83	การพัฒนาเครื่องเป็ดนามส่วนแบบเพื่อลดการบาดเจ็บแก่หญิงน่ายวัย พิศุทธิชัย พงษ์นิยม ภิระเดช ภิระจริฎกุล วศิน แสมใจวุฒิ ภูภักดิ์ ไชยรัตน์ พรพิชิต สยามิตร รวมภัทร ทองเหลือง กิตติศักดิ์ พิมพ์จีน	334
84	การพัฒนากระบวนการจัดเก็บสินค้าหน่วยย่อย กรณีศึกษาบริษัทค้าวัสดุก่อสร้าง นราวดี ชูพงษ์ ชุภวี แดสา วรวิดา รัตนเมธี วนัฐพงษ์ คงแก้ว	341
85	การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อปรับสมดุลสายการผลิตชุดสายถ่ายเลือดสำหรับโรคไต กรณีศึกษา: บริษัท เอ็ม.อี.นิคโคโซ จำกัด กาญจนา กาญจนสุนทร ชินภัทร โพธิ์ศิริ วงศกร ทองรัตน์ ณัฐพงษ์ ศรีโคจรเศรษฐ	348
86	การปรับปรุงเวลามาตรฐานในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนเครื่องยนต์เพื่อเพิ่มผลผลิต ศรินทร์ยา ประทีปชนะชัย ยุภาณวงศ์ จงจันทร์ สวาวุช อิศวานัฐวัฒน์ ภูมิ พรประเสริฐ เกียรติศักดิ์ พระเนตร กิตติคุณ แก้วภิรมย์	355

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
87	การหาจำนวนเครื่องจักรที่เหมาะสมกับการทำงานของพนักงานโดยใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบแรงดันน้ำ <i>ยุทธณรงค์ จงจันทร์ ศรีวัฒนา ประทีปชนะชัย สุทธิชาติ ทวีระเวท ปวิกรม ปวิกรม ผ่านสำแดง อภิรักษ์ นาคทอง สักดา ชินตะเวช</i>	381
88	การศึกษาผลของการกำหนดจำนวนพาหะลำเลียงวัสดุอัตโนมัติในระบบรางในศูนย์กระจายสินค้าวัสดุก่อสร้าง <i>สุชาภา มาศ เลขศักดิ์ โอฬาร กิตติศรีพรชัย</i>	368
89	ต้นแบบโต๊ะพับสำหรับเตียงสองชั้นเพื่อท่านั่งที่เหมาะสม <i>วิศรุต จงกัญญาตะกูล นิชาภา นัตริจินดารัตน์ พงศกร โลหะศิริวัฒน์ กรวิชัย กรทิพย์ เกียรติสุรพันธ์ ศรีพลไกร จินตเนตร์ ไททับเที่ยง ชนิต ศิวังปติ ณัชชา ชัยสัมฤทธิ์ผล ภักพิพัฒน์ เอี่ยมพงษ์ไพฑูรย์ สรวิต ก่อกิจกุล ภาคิน ศิววัฒน์ประภา พิรพัฒน์ เวฬุวระธรรม</i>	374
90	การลดของเสียในกระบวนการผลิตน้ำดื่มด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง <i>ณัฐวิทย์ กาใจทราย ภาณุวัฒน์ เบ็ญใจ ฤทัยภัทร ศุภระศร</i>	381
91	การปรับปรุงคุณภาพรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คพลาสมาอัลตร้าโซนิก <i>วันนิษฐ ภัทร์จันทร์ พชรพล ศิดาอุบล อรรถพล แก้ววิสัย</i>	390
92	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม EEWMA, IMFIR-EEWMA, DMEWMA และ IMFIR-DMEWMA สำหรับการแจกแจงไวบูล <i>ชัยวิช สีแดง ชวนากร สุจินตวงษ์ ไสวญา ป่าวง ปิยพล ใจจิตร</i>	396
93	การศึกษาการจัดการความปลอดภัยของเล่นเด็กในจังหวัดนครราชสีมา <i>พจล ศรีธร กิ่งกาญจน์ กองกาญจนะ ภูมิวิทย์ สภาพร</i>	402
95	การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นแผ่น กรณีศึกษา <i>ภัทรพงศ์ วงษ์วิภาพ ณรงค์ฤทธิ์สนใจธรรม</i>	409
96	การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สอินทรีย์แบบแอ็กเชอร์ <i>จงกล ศรีธร เกษมสันต์ แสงสาร</i>	410
98	การปรับปรุงเส้นทางทางแสงโดยขั้นต่อหน้า LNS <i>คงเดช คำขจร อรุโรวี แสงสว่าง</i>	417
99	Agent-based simulation for comparative product promotion strategy <i>Chulima Binsiravanich Naragain Phunchusi</i>	423
100	อิทธิพลของอุณหภูมิการพิมพ์สามมิติแบบฉีดเส้นพลาสติกต่อคุณสมบัติเชิงกลและความแม่นยำเชิงมิติ <i>วิวัฒน์ชัย ประสงค์ วรธน ตีลภกฤษฎี สาทวีร์ พิบูลศิลป์ สมเดช อังคะวระ สุนทร มูลทา ประยูร สุวิมาลี</i>	430
101	การลดของเสียในกระบวนการเชื่อมแหวนแอมป์เพื่อตั้งสียงขอรถยนต์ที่เก็ดย่อยุม กรณีศึกษา: สถานประกอบการซ่อมสิรยนต์ <i>กิม พรประเสริฐ ควันยา ประทีปชนะชัย ธนรัชต์ วัฒนมงคล จันทวีศรี พศอยงาม ณัฐภัค พลະพันธ์ สุรพงษ์ แก้วเมณี</i>	435
103	การประยุกต์ใช้วิธีการทากูชิในการเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์การตัดสำหรับความหยาบผิวและอัตราการจัดเนื้องานสำหรับเครื่องกัดคาร์บอนด้วยเส้นลวดไฟฟ้า <i>ปัทมา นาควงษ์ อภิวัฒน์ มุตตมาวงษ์</i>	442

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
104	การประยุกต์ใช้ Hybrid Delphi – GRA สำหรับการเลือกเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในการทำงานระดับวิชาชีพ ปวีรวิทย์ นาสวัสดิ์ นรงค์ วิชาภา ณัฐพงษ์ สุวรรณกุล วิทยา อินทร์สอน ไทยกันันต์ สุดสวนสี จันทร์ศิริ พลอยงาม	449
105	การวางแผนการผลิตให้เพียงพอต่อการจำหน่าย สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการสูง: กรณีศึกษา โรงงานผลิตผลิตภัณฑ์นม ประไพพิศ ประสมศรี อนันต์ ม่วงวัฒนา จันทร์ศิริ สิงห์ถิ๋ยม	455
106	ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการต่อความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน PLA ที่พิมพ์ 3 มิติโดย FDM ทัตพงศ์ สัมภเวสย์ อภิชิต มณีงาม ทนงศักดิ์ คงสินธุ์ กศพร อัครวิงส์ วรรณลักษณ์ เกสภารวิทวีชัย พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์ กัญญา อุบลทิพย์	463
107	Formula Development of EVA Compound with Recycled EVA Kittipal Jirvanstil Napassavong Osathsitp	469
110	การพัฒนากระบวนการต้นทุ่นมาตรฐานในกระบวนการผลิต กรณีศึกษา: โรงงานผลิตตีบซ่าสำเร็จรูปแช่แข็ง มนัสวี ตังพิยธร พิเชษฐ พุ่มเกษร	476
111	การปรับปรุงรถเข็นในงานก่อสร้างโดยใช้หลักการยศาสตร์ อัฒพล สานสุข ปิติภัทร์ ไพวศรี ธวัชวัฒน์ สุวรรณวัฒน์	482
113	การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ สุพัฒตรา ศรีญาณลักษณ์ คำลือชา พงษ์สกุล	489
114	การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจสอบของแผนกสกรีน: กรณีศึกษา โรงงานฉีดพลาสติก ฐิติศาสตร์ สุริยะโชติตระกูล ภักทรา ภูประวาศ์ พุทธิพร เลิกขาว	496
115	การจัดอันดับพื้นที่ประสบปัญหาสำหรับการบริหารจัดการน้ำในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาของประเทศไทยภายใต้ การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ กนกวรรณ เกศศิริศรีธรรมศักดิ์ กัญญาภัทร์ สีหาล พรพรรณรินทร์ ปฐมเจริญวัฒน์ ศุภรส ใจจิตรี	503
117	การปรับปรุงกระบวนการออกใบเสนอราคา กรณีศึกษา โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ณัฐฐา รอดคง ไอลดา ตวีรัตน์ ตระกูล	509
118	การจำลองอพยพหนีไฟของโรงงานผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก อนงค์ นาคำ สุภัสรา พัฒน์วิชัยโชติ	515
119	การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตประกอบห้องโถงโดยสารรถเกี่ยวเวดข้าวด้วยการจัดสมดุลสายการผลิต เดชนันท์ เฉลิมแก้ว จันทร์ศิริ สิงห์ถิ๋ยม รุ่งรัตน์ กสิชัยเพ็ญ	521
120	การศึกษาความเป็นไปได้ทางการตลาดและแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ กรณีศึกษา ไอศกรีมกะทิ สด (ผลิตภัณฑ์ธุรกิจขนาดย่อม) เกษรินทร์ พูลทรัพย์ ณัฐริสุดา จันทร์พวงม ณัฐกานต์ สายทิม วันชัย ลีลากรวิงศ์ สุขุม ไผ่ชนิดชัย มงคล มนต์วี พิพัฒน์ไพบูลย์	527
124	การปรับสมดุลสายการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อารัตน์ มีเขต สุดวรัตน์ คงคาลัย พุทธิพร เลิกขาว ภักทรา ภูประวาศ์	533
122	ระบบผลิตน้ำแข็งพลังงานชีวมวล กานต์ นิคกรวายุทธ บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว	540

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
123	การพัฒนาตัวแบบจำลองสถานการณ์มอดิตาร์โลสำหรับกำหนดนโยบายเติมเต็มวัสดุคลังหลายประเภทร่วมกัน สำหรับระบบที่อุปสงค์ไม่แจจแจงแบบปกติ พีไสวรรณ สุวรรณฤทธิ์ วิสาธี สุทธิรักษ์	547
124	การศึกษาสมบัติของซีโพลีเมอร์มวลเบาที่ผลิตจากเถ้าลอยและเศษอลูมิเนียมฟอยล์ ชญู พงษ์สระไว วัฑฒ์ แสงศิริมงคลย์ อรรถพล แก้ววิชัย ชญาน์ ทิพย์เสมอ	556
125	การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น ศตพร คุณาศิสิฎกุล นาส์สงฆ์ โอสถศิลป์	562
126	ตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นตรงสำหรับการหาจำนวนทรัพยากรที่เหมาะสมของร้านซักผ้าบริการตนเอง วุฒินันท์ นุ่นแก้ว มาริษา กิมภาพ	569
127	การประยุกต์ใช้กระบวนการความคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการ ECRS ในการออกแบบที่เขวหน้าัมจับก้อนน้ำเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต ศศวณ สุวัฒนย์ย์ ธนพล สุวรรณโฆษิต ยศพล ส่องสว่าง ธนชัย นัญญาภลวัต สวิช ประวิทย์ รุ่งโรจน์แสนคำวาม มึะเนัฐ บุญสอน	575
128	การแก้ปัญหาด้วยการออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อลดเวลาในกระบวนการทำความสะอาดสายการผลิตอาหารสัตว์ ณรวดี สิทธิเดชาร่าง	581
129	การศึกษาการรับรู้ความสามารถด้านการจัดการธุรกิจและการจัดการโลจิสติกส์ของลูกค้าประเทศกัมพูชาต่อผู้จำหน่ายสินค้าจากประเทศไทย ผ่านด้านชายแดนเอริยประเทศ ศรินภา ประทีปะชนะชัย อมรัตน์ พรประเสริฐ ยุทธณรงค์ จงจันทร ปริกัญญา บุญรัมย์ กิมี พงประเสริฐ	587
130	การพัฒนาโปรแกรมการจัดการข้อมูลคลังอุปกรณ์ กรณีศึกษา ณัฐพล เจริญไค้ะ อธิวัฒน์ บุญมี	594
131	การปรับปรุงกระบวนการทำงานในคลังวัตถุดิบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการจัดเก็บ อัญญาภา สุขมันัน สุพัฒตรา ศิริวิวัฒน์กันณ์	600
132	การลดเวลาในกระบวนการประกอบเครื่องชั่ง ศุภพัฒน์ ینگดา	606
133	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะเมล็ดกาแฟ ชวัญชนก สือสวน พานพงษ์ อุ่นกาย ดิเรก ทองคด เขมิสวา พุกอินทร์ มกวมาศ พุกอินทร์ อุดมย์ พุกอินทร์	612
135	การคำนวณหาพลังงานการยึดติดของออกไซด์สเกลบนเนื้อพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีเรขาคณิต อังกณก เมื่องใจ ปัญญา งามาลัย ธรรมภรณ์ กัยละออ สมฤกษ์ จันทรอัมพร	619
136	การออกแบบเส้นทางทางการเดินรถขนส่งวัสดุอัตโนมัติในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์: กรณีศึกษา พรชิตา เขื่อชิ่ง วัลย์ลดา กสันเคือวัลย์ อธิวัฒน์ บุญมี	625
138	การวางแผนการผลิตแบบเชิงกะเพื่อการผลิตแบบลีน นุศล อุบลบาน	632
140	การวิเคราะห์สมรรถนะระบบหัวจ่ายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติในอาคารคลังสินค้าโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยการจำลองพลศาสตร์อัติกัภัย ศวาวดี บำรุงส อุนวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ สุภัทรว พัฒนวิชัยโชติ	638
141	การจัดแนวเส้นทางเฮลิคอปเตอร์สำหรับตรวจสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีกลุ่มอนุภาค สิปณัดี จานากอง คมกฤต เล็กสกุล	644

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
142	การเตรียมความพร้อมสำหรับการเป็นคลังสินค้า 4.0 <i>กษิภา สุทธิวิริยะกุล จีรพรรณ เลียงไวคาพร</i>	845
143	การจำลองการอพยพหนีไฟในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์ด้วยโปรแกรม Pathfinder <i>มณฑนา สุทธิประภา ประทีป ชัยเสริมเทวัญ สุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ</i>	852
144	การกำหนดระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมภายใต้ผลกระทบของการแจกแจงของระยะเวลาการหยุดชะงักของอุปกรณ์ที่ไม่ได้กำหนด <i>สริชญู พากอง ศิริประภา ไชยวราย จิรเกียรติ ทวยทอง</i>	858
145	การประเมินความเสี่ยงทางการค้าของพลังงานในกระบวนการกักขังส่วนเครื่องบิน <i>เนาวดี โคตวิทย์ นัฐสุวิภา จันทร์ศรี</i>	664
147	การปรับปรุงกระบวนการคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนรถจักรยานยนต์ด้วย Google Sheet <i>สุรินทร์ สุวรรณแสง สุพิศตรา ศรัญญาตฤกษ์ณี จักรพันธ์ กัณหา</i>	670
148	การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนธุรกิจผู้จัดการขนส่งระหว่างประเทศ <i>ฐาภา นันทโพธิ์เดช เขษุลา ชำนาญภรณ์ พัชรา ศวีระบุญ</i>	876
149	การประยุกต์ใช้โครงสร้าง SqueezeNet ในการจำแนกข้อบกพร่องของอะลูมิเนียมแผ่นรีด <i>วพพล ประชานิยม นัฐสุวิภา จันทร์ศรี</i>	882
150	การจำลองสถานการณ์เพื่อลดเวลาการคอยของผู้ป่วย: กรณีศึกษาโรงพยาบาลแหลมงบง <i>ชนพันธ์ คงทอง อภินันท์ คำป่าน ยศวิรัชญ์ ชิวะธรรมนนท์</i>	688
151	ทำนุในการใช้งานคอมพิวเตอร์เพื่องานออฟฟิศทั่วไปและการเล่นเกม <i>ชยากร คุณสาธิต ชีรภัทร ศักดิ์ชูวงษ์ พีรวิษณุ วิเศษชาติ ทฤทัย ไชระศิริวัฒน์</i>	889
153	โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมนิกเกิลเมื่อผ่านกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น <i>ขวัญกมล ปิยะนิจดำรงค์ ณัฐชนน สำเร็จกิจ วศิน เด็ดดาวทอง ชิวพร สุขผล พรหมพงษ์ ปานดี</i>	695
154	Monthly Sales Forecasting for Beauty Products Sold in a Retail Offering Price Promotion <i>Nichakan Phupaichitkun Naragain Phumchusri</i>	701
155	Promotion Optimization model for retail's multiple-period planning <i>Chanikan Thangthong Naragain Phumchusri</i>	706
156	การจัดการโครงการก่อสร้างของโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้วิธีเส้นทางวิกฤตและวิธีการประเมินผลและ บทวนโครงการ <i>วพพงษ์ เกียรติเมฆา สิวาณี กลิ่นคำสอน</i>	712
158	ความแข็งแรงดึงของวัสดุประกอบเรซินและเส้นใยถั่ว <i>กิตติพิชญ์ อนันท์กิตติ วิภู ศรีสืบสาย</i>	719
159	การจัดการตารางการทำงานของพนักงานเซอร์วิส เพื่อลดการทำงานล่วงเวลา กรณีศึกษา: บริษัท ตัวแทนจำหน่ายอุปกรณ์สำหรับงานระบบเครื่องกลประกอบอาคาร <i>นิรันดร์วณิชย์ภัทร วรภูมิ ทรงวัชรกุล จุฬา พิชิตสำเด็ญ</i>	723
160	การศึกษาสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมท่อต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A106 Gr.B และเหล็กกล้าไร้สนิม ASTM A312 TP316/316L ด้วยลวดเชื่อม AWS A5.22 R309LT1-5 และ AWS A5.9 ER309L โดยกระบวนการ GTAW <i>ภศพล ประทาน วิสัฏ์ เฉลิมจิตรพันธ์ ฌนาภรณ์ ทนโนเนนดง</i>	729
161	การเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิดระหว่าง ADC3 และ AA5052 โดยการเชื่อมเสียดทานแบบทวน <i>ศินินาฏ บัวงาม คุณรัช สังข์ทอง สมลักษณ์ อุบลรัตน์ พรหมพงษ์ ปานดี</i>	735

สารบัญ (ต่อ)

บทความที่	ชื่อบทความ	หน้า
162	การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นงานเชื่อมท่อโลหะต่างชนิดระหว่าง ASTM A312 Gr.TP316/316L และ ASTM A106 Gr.B ถ้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมแบบแรงดึงผิว และกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม <i>ประกาศ เเพ็งประโคน วิสัฏ เลิศวิจิตรพันธุ์ ชนาภรณ์ กนโนนแดง</i>	741
164	ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับธุรกิจซื้อ-ขายยางก้อนถ้วย กรณีศึกษา: จำหน่ายการยาง จังหวัดยะลา <i>มัตพงษ์ ไซดีพันธ์ พรหมเพ็ญ ดาวประสิทธิ์ ยตินันท์ มาทมาะ</i>	747
166	The Comparing of Expected Performance of Different Shapes in Cross-Docking <i>Songkhla Paisansukhukul Siwaphong Kusolpuchong</i>	753
167	การลดเวลาที่สูญเสียจากเครื่องจักรหยุดทำงานโดยใช้ซิกซ์ซิกมา กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมไก่แปรรูป <i>นักรุพล ญาณสิริสกุล สิทธิพร ทิมพิสกุล</i>	758
169	ชุดคำสั่งคอมพิวเตอร์ช่วยอัตโนมัติสำหรับสกรูเจ็บบัดค้อนด้วยตัวบ่งชี้ทางเทคนิค RSI และ Stoch <i>ภัทรพล ชูชีพชื่นภมร คาริชา สุธีวงศ์</i>	785
170	การปรับปรุงการพยากรณ์ยอดขายและนโยบายสินค้าคงคลังสำหรับบริษัทกรณีศึกษาเจ้าของแบรนด์สินค้าประเภทน้ำหอม <i>รวินันท์ ลิ้มโอฬารสุขสกุล นระเกษมพ์ พุ่มชูศรี</i>	771
171	การปรับปรุงกระบวนการขออนุมัติชิ้นงานตัวอย่างสำหรับซัพพลายเออร์ <i>รุ่งทิพย์ อินทวงศ์</i>	778

ประวัติผู้เขียน

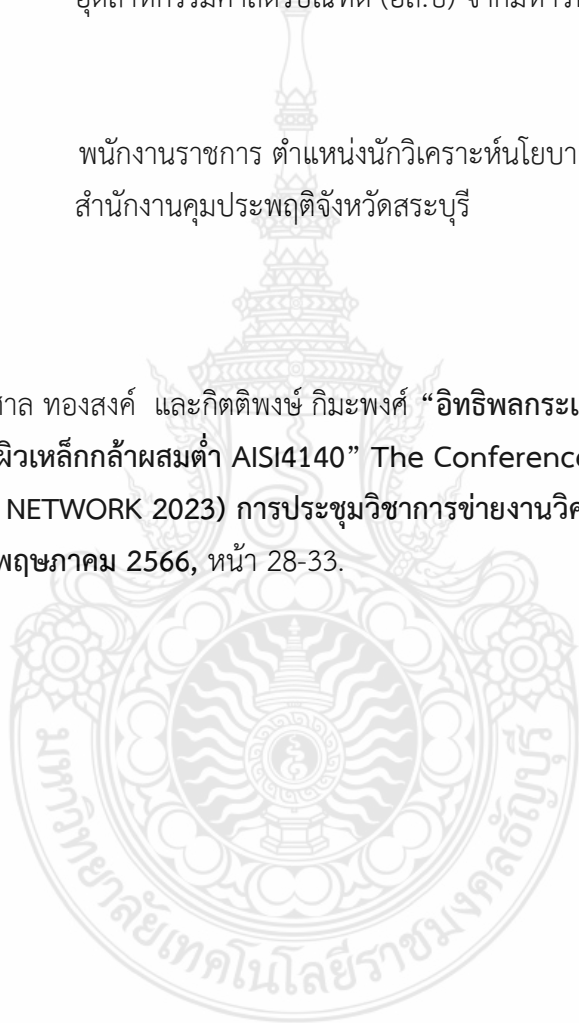
ชื่อ - นามสกุล นางสาวปิยธิดา ตุนั่งกุล
วัน เดือน ปีเกิด 23 ตุลาคม 2540
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 5 หมู่ 8 ตำบลเมืองเก่า อำเภอเสนาไห้ จังหวัดสระบุรี 18160

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (อส.บ) จากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ประวัติการทำงาน ปี 2564 ถึง 2565
พนักงานราชการ ตำแหน่งนักวิเคราะห์นโยบายและแผน
สำนักงานคุมประพฤติจังหวัดสระบุรี

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ปิยธิดา ตุนั่งกุล ไพศาล ทองสงค์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ “อิทธิพลกระแสเชื่อมทิกต่อสมบัติของ
ผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4140” The Conference of Industrial
Engineering Network (IE NETWORK 2023) การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ครั้งที่
41 ประจำปี 2566, 11-12 พฤษภาคม 2566, หน้า 28-33.



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the faculty of Engineering., Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

.....
(นางสาวปิยธิดา ตุ่นังกุล)

