

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าและการเกิดฟลูมโลหะจากกระบวนการเชื่อม  
ของช่างกลุ่มสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรม



นายกฤษฎดา เพ็งอารีย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2567

EFFECT OF ARC CURRENT ON THE WELD PROFILE AND METAL  
FUME FORMATION DURING WELDING PROCESSES AMONG  
INDUSTRIAL TECHNICIANS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Doctor of Philosophy in Industrial Systems and  
Environmental Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2024

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าและการเกิดพายุโลหะจากระบบการเชื่อมของช่างกลุ่มสาขา  
อาชีพช่างอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุพรัตน์ หลิมมงคล)  
ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงดล ศรีธรรม)  
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์สิทธิ์ บุญรักษา)  
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงศ์)  
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์)  
กรรมการ

(อาจารย์ ดร. นัทธดนัย จันลาวงศ์)  
กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)  
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กฤษฎา เพ็งอารีย์ : อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าและการเกิดฟุ้งโลหะจากกระบวนการเชื่อมของช่างกลุ่มสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรม (EFFECT OF ARC CURRENT ON THE WELD PROFILE AND METAL FUME FORMATION DURING WELDING PROCESSES AMONG INDUSTRIAL TECHNICIANS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จกมล ศรีธร, 101 หน้า.

คำสำคัญ: ฟุ้งโลหะ/ออกไซด์โลหะเชื่อม/กระแสไฟฟ้า/การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ/การเชื่อมแม่เหล็ก/อนุภาคจากการเชื่อม

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะและการเกิดฟุ้งโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) และกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก (Metal Active Gas: MAG) โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ความหนา 6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS G3101 และ AWS D1.1/D1.1M สำหรับการเชื่อม SMAW ดำเนินการภายใต้กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 60A ถึง 130A ขณะที่การเชื่อมดัดอาร์กโลหะด้วยมือ ใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ RB-26 AWS E6013 (high titania potassium) และการเชื่อมแม่เหล็ก (MAG) ใช้ลวดเชื่อมแบบ CO<sub>2</sub> wire-HTW-50 เคลือบทองแดง ในตำแหน่งเชื่อมแนวนอน (1G) โดยเปรียบเทียบการเชื่อมที่ยอมรับได้และแนวเชื่อมที่มีข้อบกพร่อง ภายใต้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ลักษณะทางโลหะ ฟุ้งโลหะ และองค์ประกอบทางเคมีของฟุ้งโลหะ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS) การวิเคราะห์ออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และวิเคราะห์วิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ (ICP-MS)

ผลการวิจัยพบว่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (SMAW) คือ 70A (3.96 mg/m<sup>3</sup>) และ 90A (5.36 mg/m<sup>3</sup>) ซึ่งให้แนวเชื่อมที่ยอมรับได้ มีโครงสร้างเกรนแบบคอลลัมน์ และ HAZ แบบเฟอร์ไรต์-มาร์เทนไซต์ ในขณะที่ 60A (7.34 mg/m<sup>3</sup>), 110A (18.48 mg/m<sup>3</sup>) และ 130A (12.96 mg/m<sup>3</sup>) ให้แนวเชื่อมที่มีข้อบกพร่อง และการเชื่อมแม่เหล็ก (MAG) กระแสที่เหมาะสมคือ 110A (5.80 mg/m<sup>3</sup>) และ 130A (9.98 mg/m<sup>3</sup>) ให้อยู่เชื่อมที่ยอมรับได้ ส่วน 60A (13.46 mg/m<sup>3</sup>) และ 70A (14.53 mg/m<sup>3</sup>) ให้อยู่เชื่อมที่มีข้อบกพร่อง โดยที่การเชื่อมที่เกิดข้อบกพร่องพบปริมาณฟุ้งโลหะมากกว่าแนวเชื่อมที่ยอมรับได้ โดยที่ลักษณะฟุ้งโลหะที่พบจากการเชื่อมทั้งสองประเภท มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นรูปร่างเป็นกลุ่มก้อน (agglomerated) ทรงกลม (spherical) เรียบ (smooth) ไม่สม่ำเสมอ (irregular) และแบบแผ่น (plate-like) พร้อมมีองค์ประกอบออกไซด์หลัก ได้แก่ เฮมาไทต์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) แมกไนไทต์ (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) และรูไทล์ (TiO<sub>2</sub>) ผลของ

การวิจัยเป็นแนวทางกำหนดพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมจะสามารถลดการสัมผัสพุ่มโลหะที่เป็นอันตราย และสนับสนุนการปรับปรุงมาตรฐานความปลอดภัยตามระบบมาตรฐานฝีมือแรงงานไทย



สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา..... กฤษณา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... A .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... พ .....

KRITSADA PHENGARREE : EFFECT OF ARC CURRENT ON THE WELD PROFILE AND METAL FUME FORMATION DURING WELDING PROCESSES AMONG INDUSTRIAL TECHNICIANS : ASST. PROF. JONGJOL SRITHRON, Ph.D., 101 PP.

WELDING FUMES/ WELDING METAL OXIDES/ ARC CURRENTS/ SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW)/ METAL ACTIVE GAS (MAG) /WELDING NANOPARTICLES

This study investigates the characteristics and formation of metal fumes generated during the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) and Metal Active Gas (MAG) welding processes. Low carbon steel (SS400), with a thickness of 6 mm and conforming to JIS G3101 and AWS D1.1/D1.1M standards, was used as the base metal. The SMAW process was conducted using current levels ranging from 60 A to 130 A, while the MAG process employed copper-coated HTW-50 welding wire in the horizontal welding position (1G). Both acceptable and defective welds at different current levels were compared. Metallographic characterization, fume morphology, and chemical composition were analyzed using Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS), X-ray Diffraction (XRD) for oxide identification, and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) for trace element analysis.

The findings indicate that the optimal welding currents for SMAW were 70 A (3.96 mg/m<sup>3</sup>) and 90 A (5.36 mg/m<sup>3</sup>), which produced acceptable welds with columnar grain structures and a ferrite–martensite microstructure in the Heat-Affected Zone (HAZ). In contrast, welds produced at 60 A (7.34 mg/m<sup>3</sup>), 110 A (18.48 mg/m<sup>3</sup>), and 130 A (12.96 mg/m<sup>3</sup>) exhibited various defects. For the MAG process, the optimal current levels were found to be 110 A (5.80 mg/m<sup>3</sup>) and 130 A (9.98 mg/m<sup>3</sup>), while welding at 60 A (13.46 mg/m<sup>3</sup>) and 70 A (14.53 mg/m<sup>3</sup>) resulted in defective welds. Defective welds in both processes generated higher concentrations of metal fumes compared to acceptable welds. The observed fume morphologies included agglomerated, spherical, smooth, irregular, and plate-like particles. The predominant oxide constituents were hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), and rutile (TiO<sub>2</sub>). The results of this study provide a practical basis for optimizing welding parameters to minimize exposure to hazardous

metal fumes and support the development of improved safety standards aligned with the Thai labor skill certification system.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2024

Student's Signature ..... *Kritsada* .....

Advisor's Signature ..... *Sunat* .....

Co-Advisor's Signature ..... *m* .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จกมล ศรีธรร ที่ให้โอกาสในการศึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์สิทธิ์ บุญรักษา ที่ให้ทั้งคำปรึกษาและความช่วยเหลือด้านวิชาการเป็นอย่างดี จนกระทั่งผลการวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มอบทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) ให้แก่ผู้วิจัยได้พัฒนาตนเองในด้านการศึกษาและด้านการสอนตลอดระยะเวลาทุนการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุพรัตน์ ทลิมมงคล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์ และอาจารย์ ดร.นันทดน้อย จันลาวงค์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนสามารถเสร็จสิ้นเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่เมตตาและมอบความรู้ด้านเทคนิค รวมทั้งประสบการณ์ต่าง ๆ แก่ผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่ให้ข้อมูลการทำวิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่เป็นที่ปรึกษา คอยให้ความช่วยเหลือด้านการใช้ชีวิตและการเรียน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา และครอบครัว โดยเฉพาะมารดาของข้าพเจ้านางธัญชนก เพ็งอารีย์ ผู้ซึ่งสนับสนุนและไม่เคยปิดกั้นเรื่องการศึกษา ผลักดันจนกระทั่งผู้วิจัยสำเร็จการศึกษาตั้งใจหวัง ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นแรงบันดาลใจแก่ผู้สนใจไม่มากนักน้อย

กฤษฎดา เพ็งอารีย์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 กระบวนการเชื่อมตามระบบทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานอาชีพช่างอุตสาหกรรม.....	7
2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อแนวเชื่อมและฟุมโลหะ.....	10
2.3 ฟุมโลหะที่เกิดจากการเชื่อม.....	12
2.4 อันตรายจากฟุมโลหะและโรคที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมโลหะ.....	12
2.5 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างฟุมโลหะ.....	15
2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานเชื่อม และคุณลักษณะสัณฐานวิทยาฟุมโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	15
2.7 การย่อยกระดาษกรองตัวอย่างฟุมโลหะด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟ.....	17
2.8 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุฟุมโลหะโลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ.....	18
2.9 การคำนวณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานและอัตราการเงิ้อาง.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 การวิเคราะห์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	20
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>29</b>
3.1 รูปแบบการศึกษา .....	29
3.2 สถานที่ทำการศึกษา .....	29
3.3 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล .....	30
3.4 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา .....	31
3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองและลักษณะการเชื่อม .....	31
3.4.2 การวิเคราะห์แนวเชื่อม .....	34
3.4.3 การเก็บและวิเคราะห์เชิงปริมาณพุ่มโลหะด้วยกระดาดกรองเซลลูโลส .....	35
3.4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของธาตุ .....	38
3.4.5 การวิเคราะห์ออกไซด์ของโลหะด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	39
3.4.6 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง .....	40
3.4.7 การพิทักษ์สิทธิ์ของกลุ่มตัวอย่างและจริยธรรมในการวิจัย .....	41
3.4.8 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	41
<b>4 ผลการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>42</b>
4.1 การตรวจสอบ และการวิเคราะห์โครงสร้างของแนวเชื่อม .....	42
4.2 ความเร็วในการเชื่อม ปริมาณความร้อน และอัตราการเงื้องาจาง .....	48
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพุ่มโลหะ .....	48
4.4 การกระจายตัวของธาตุของพุ่มโลหะ .....	53
4.5 การกระจายตัวของธาตุขององค์ประกอบการเชื่อมด้วยเทคนิค SEM -EDS .....	56
4.6 ปริมาณความเข้มข้นของพุ่มโลหะ .....	60
4.7 ออกไซด์ของพุ่มโลหะและองค์ประกอบของการเชื่อม .....	67
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>69</b>
5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล .....	69
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย .....	71

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....73



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ และการเชื่อมแม่เหล็ก .....32
3.2	องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์โดยเทคนิค EDS ของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม .....33
4.1	ผลของการคำนวณค่าความเร็วในการเชื่อม ปริมาณความร้อน และอัตราการเงาของงานเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ .....49
4.2	ผลของการคำนวณค่าความเร็วในการเชื่อม ปริมาณความร้อน และร้อยละการเงาของงานเชื่อมแม่เหล็ก .....50
4.3	ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของฟลูออไรด์จากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ .....55
4.4	ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของฟลูออไรด์จากการเชื่อมแม่เหล็ก .....55
4.5	ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมขององค์ประกอบจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ .....59
4.6	ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมขององค์ประกอบจากการเชื่อมแม่เหล็ก .....60
4.7	ปริมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์ประเภทการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ .....62
4.8	ปริมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์ประเภทการเชื่อมแม่เหล็ก .....66

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กรอบแนวคิดในการศึกษา ..... 5
2.1	องค์ประกอบของการเชื่อมทิก ..... 8
2.2	องค์ประกอบของการเชื่อมแม่็ก ..... 9
2.3	องค์ประกอบของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 10
2.4	ลักษณะการเชื่อมและการเกิดฟิวโลหะจากการเชื่อม ..... 12
2.5	เครื่องย่อยตัวอย่างแบบอัตโนมัติแบบไมโครเวฟ (SP-D Microwave Digestion) ..... 17
2.6	เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ ..... 19
2.7	บริเวณที่ใช้ในการคำนวณอัตราการเจือจาง ..... 20
3.1	ขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูล ..... 30
3.2	ลักษณะการเชื่อม Bead on Plate ของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 31
3.3	องค์ประกอบของการเชื่อมที่ถุ๊กนำมาวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS ..... 33
3.4	เครื่องอัดขึ้นเรือนด้วยความร้อน (Hot mounting) ..... 34
3.5	เครื่องขัดด้วยเครื่องขัดผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน ..... 35
3.6	การเก็บตัวอย่างอากาศโดยให้ตลับกรองอยู่บริเวณหายใจ ..... 36
3.7	ตำแหน่งของการติดตลับกรองในการเก็บตัวอย่างอากาศฟิวโลหะ ..... 36
3.8	เครื่องย่อยกระดาษกรองไมโครเวฟ (MARS 6) ..... 37
3.9	เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ (ICP-MS) ..... 38
3.10	สารละลายมาตรฐานผสมของธาตุ (Mixed Standard Solutions) ..... 38
3.11	ลักษณะการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM-EDS ..... 39
3.12	ลักษณะการวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ..... 40
4.1	ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ยอมรับได้ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) ..... 43
4.2	โครงสร้างจุลภาคแบบบริเวณ HAZ ของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 43
4.3	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 43
4.4	ลักษณะของแนวเชื่อมและโครงสร้างมหภาคการเชื่อมแม่็ก ..... 45
4.5	โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับได้ของการเชื่อมแม่็ก ..... 46

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับไม่ได้ของการเชื่อมแม่เหล็ก ..... 47
4.7	ค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความร้อนที่ป้อนเข้าในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 48
4.8	ค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความร้อนที่ป้อนเข้าในกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก ..... 50
4.9	สัณฐานวิทยาของฟุมโลหะของการเชื่อมประเภทอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 52
4.10	ลักษณะฟุมโลหะจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) ..... 52
4.11	สัณฐานวิทยาของฟุมโลหะของการเชื่อมประเภทแม่เหล็ก ..... 53
4.12	การกระจายตัวของธาตุของฟุมโลหะการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 54
4.13	การกระจายตัวของธาตุของฟุมโลหะการเชื่อมแม่เหล็ก ..... 56
4.14	การกระจายตัวของธาตุขององค์ประกอบการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 57
4.15	การกระจายตัวของธาตุของสแล็กด้านหน้า (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) ..... 58
4.16	การกระจายตัวของธาตุของสแล็กด้านหลัง (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) ..... 58
4.17	การกระจายตัวของธาตุของรอยไหม้ของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 58
4.18	การกระจายตัวของธาตุของรอยไหม้ของการเชื่อมแม่เหล็ก (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์) ..... 59
4.19	การกระจายตัวของธาตุของบริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมแม่เหล็ก ..... 60
4.20	ปริมาณความเข้มข้นของฟุมโลหะของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 63
4.21	ปริมาณความเข้มข้นของฟุมโลหะของการเชื่อมแม่เหล็ก ..... 65
4.22	เฟสและออกไซด์ของสแล็กด้านหน้าและสแล็กด้านหลังการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 67
4.23	เฟสและออกไซด์ของรอยไหม้และฟุมโลหะการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ..... 68
4.24	เฟสและออกไซด์ของบริเวณรอยไหม้กับเนื้อเชื่อมและฟุมโลหะการเชื่อมแม่เหล็ก ..... 68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเชื่อมโลหะเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก (Poli, 2001; Altan et al., 2001; Swift & Booker, 2003) กระบวนการเหล่านี้เกี่ยวข้องกับ การเชื่อมชิ้นงานโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยใช้ความร้อนสูงเพื่อหลอมโลหะให้ประสานติดกัน และเมื่อเย็นลงจะเกิดการแข็งตัวเป็นโครงสร้างเดี่ยวที่แข็งแรง (Messler, 2008; Olson et al., 1993; Weman, 2011) ในบรรดาวิธีการเชื่อมทั้งหมด การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือการเชื่อมอาร์ก โลหะด้วยมือ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) ถือว่ามีความโดดเด่นเป็นพิเศษเนื่องจาก สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางในงานก่อสร้าง งานเครื่องกล และงานซ่อมบำรุง ทั้งยังมี ประสิทธิภาพและต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำ (Sidhu & Chatha, 2012; Goel et al., 1993; Thakur et al., 2019) ขณะเดียวกันการเชื่อมแม็ก (Metal Active Gas: MAG) ซึ่งเป็นการใช้แก๊สที่มีปฏิกิริยา เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นตัวปกป้องแนวเชื่อม ก็ถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการเชื่อมที่ ต้องการประสิทธิภาพสูงและคุณภาพแนวเชื่อมที่ดีเยี่ยม (Mvola & Kah, 2017)

ในประเทศไทยความต้องการแรงงานเชื่อมที่มีทักษะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยกรมพัฒนาฝีมือ แรงงานโดยข้อมูลปี พ.ศ. 2563 จะมีแรงงานด้านการเชื่อมเข้าสู่การประเมินมากกว่า 14,325 คน ผล การประเมินทักษะฝีมือแรงงานในปีดังกล่าว พบว่า มีผู้ผ่านเกณฑ์ฝีมือแรงงานระดับ 1 จำนวน 461 คนในกลุ่มการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ จำนวน 123 คนในกลุ่มการเชื่อมแม็ก และ 42 คนในกลุ่มการ เชื่อมทิก ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการยอมรับและการเติบโตของวิชาชีพช่างเชื่อมนี้ในประเทศไทยอย่าง ต่อเนื่อง โดยแนวโน้มนี้แสดงถึงความสำคัญของงานเชื่อมในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของประเทศ นอกจากนี้ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการพัฒนาฝีมือแรงงาน พ.ศ. 2545 กำหนดบทบาทสำคัญใน การกำหนดมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติด้านงานเชื่อมในประเทศไทย โดยครอบคลุมทั้ง กระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ แม็ก และทิก สำหรับการแบบอาร์กโลหะด้วยมือนั้นผู้เข้ารับ การทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานต้องสามารถใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนใน รูปแบบต่าง ๆ เช่น แนวเชื่อมมุมฉาก (Fillet weld) และแนวเชื่อมชน (Butt weld) โดยต้องปฏิบัติตามมาตรฐาน ISO 5817 (Czuchryj & Sikora, 2013; Hobbacher & Kassner, 2012; Vural,

2006) ซึ่งเป็นแนวทางกำหนดคุณภาพและขั้นตอนการเชื่อมเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มั่นคงและปลอดภัย

ในด้านของคุณภาพและความปลอดภัยของกระบวนการเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือและการเชื่อมแม่เหล็ก จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายประการ เช่น กระแสไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม แรงดันไฟฟ้า ประเภทและขนาดของลวดเชื่อม ตำแหน่งในการเชื่อม และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (Czuchryj & Sikora, 2007) การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อมและระดับการสัมผัสกับฟumes โลหะที่เป็นอันตรายอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมา ยังขาดข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมซึ่งช่วยลดการเกิดฟumes โลหะโดยไม่กระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ทั้งนี้มีรายงานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสฟumes โลหะ ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคเล็กมากจนสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนลึก ส่งผลให้เกิดปัญหาสุขภาพเฉียบพลัน เช่น การติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจ มีไข้ เจ็บหน้าอก คลื่นไส้ รวมถึงผลกระทบในการสัมผัสในระยะยาว เช่น ความผิดปกติของปอด ความผิดปกติระบบประสาท และแม้กระทั่งการเกิดโรคมะเร็งปอด (Antonini, 2003; Mistry, 2015; Taj et al., 2021) ความหลากหลายในกลุ่มแรงงาน สภาพแวดล้อมทางอุตสาหกรรม เทคนิคการเชื่อม ระยะเวลาการสัมผัส และอันตรายอื่น ๆ ในสถานที่ทำงาน ทำให้การเปรียบเทียบผลกระทบทางระบาดวิทยาจากฟumes โลหะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น (Antonini, 2003; Taj et al., 2021; Chadha & Singh, 2013; Korczynski, 2000)

สำนักงานวิจัยมะเร็งระหว่างประเทศ (IARC) ได้จัดให้ฟumes โลหะเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ซึ่งสะท้อนถึงอันตรายร้ายแรงจากการสัมผัส (Riccelli et al., 2020; Jenkins et al., 2005; Honaryar et al., 2018; Loomis et al., 2022) ฟumes เหล่านี้ประกอบด้วยอนุภาคระดับนาโนซึ่งสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่หรืออนุภาคหยาบ เกิดเป็นสารประกอบโลหะและสารผสมที่ซับซ้อน (Buonanno et al., 2011; Ennan et al., 2013; Pourtaghi et al., 2009; Mehrifar et al., 2019; Lehnert et al., 2012; Kulkarni, 2020) โดยมีงานวิจัยที่ระบุถึงอันตรายเฉพาะจากโลหะบางชนิด เช่น การรับสัมผัสฟumes โลหะที่เป็นธาตุและออกไซด์ของเงิน (Ag) เป็นเวลานานอาจทำให้เกิดโรคอาร์ไจเรีย (argyria) ซึ่งทำให้ผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีเทาน้ำเงินจากการสะสมของอนุภาคเงิน (Cohen et al., 2004; Kim et al., 2012) ฟumes แคดเมียม (Cd) มีความเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็งสูง โดยเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งปอด (Luntz, 1949; Berlinger et al., 2011) โครเมียม (Cr) โดยเฉพาะในรูปแบบของ Cr<sup>6+</sup> ที่มีฤทธิ์ก่อมะเร็งอย่างรุนแรง และอาจก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ทางพันธุกรรมและความเสียหายระดับเซลล์ (Bohm, 2015; Andrade et al., 2017; Nguyen et al., 2018) ฟumes ทองแดง (Cu) อาจทำให้เกิดอาการไข้จากฟumes (fume fever) ซึ่งมีลักษณะคล้ายไข้หวัด (Lucas et al., 2019) ฟumes เหล็ก (Fe) อาจทำให้เกิด siderosis ซึ่งเป็นภาวะที่มีการสะสมของเหล็กในปอดและนำไปสู่ความผิดปกติของระบบทางเดินหายใจ (Nemery, 2022; Banerjee et al., 2006) ฟumes นิกเกิล (Ni) เป็นสารก่อ

มะเร็งปอดและโพรงจมูก โดยสามารถทำให้เกิดความเสียหายระดับเซลล์ (Genchi, 2020; Duda-Chodak & Blaszczyk, 2008) การสัมผัสกับฟุ่มแมงกานีส (Mn) เป็นเวลานานอาจทำให้เกิด Manganism ซึ่งเป็นโรคทางระบบประสาทคล้ายกับโรคพาร์กินสัน เนื่องจากการสะสมของแมงกานีสในสมอง (Guilarte, 2010; Aschner et al., 2009) รวมทั้งฟุ่มสังกะสี (Zn) ก็สามารถทำให้เกิดอาการไข้จากฟุ่มเช่นกัน แม้ว่ามักจะมีอาการน้อยกว่าทองแดง (Schoofs et al., 2024)

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อเติมเต็มช่องว่างของข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเชื่อม โดยเฉพาะกระแสไฟฟ้า กับการเกิดฟุ่มโลหะที่เป็นอันตรายในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ และการเชื่อมแม็ก โดยมุ่งเน้นทำความเข้าใจว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้ามีผลต่อรูปร่างแนวเชื่อม การกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ และองค์ประกอบของฟุ่มโลหะ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการลดการสัมผัสสารพิษของช่างเชื่อม นอกจากนี้ การระบุพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมซึ่งสามารถรักษาคุณภาพแนวเชื่อมในขณะเดียวกันจะสามารถลดความเสี่ยงด้านสุขภาพเป็นสิ่งจำเป็นต่อการปฏิบัติตามมาตรฐานแรงงานแห่งชาติและข้อกำหนดด้านความปลอดภัย โดยการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันต่อการเกิดฟุ่มและคุณภาพแนวเชื่อมอย่างเป็นระบบงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเติมเต็มองค์ความรู้ในประเด็นดังกล่าว และนำเสนอข้อเสนอแนะในการช่วยลดการสัมผัสฟุ่มโลหะที่เป็นอันตราย เสริมสร้างความปลอดภัยในการเชื่อม และสนับสนุนการพัฒนาทักษะของแรงงานช่างเชื่อมในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยอย่างยั่งยืน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สาขาอาชีพช่างเชื่อมอุตสาหกรรมที่ศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้คือ สาขาอาชีพอาร์กโลหะด้วยมือ และช่างเชื่อมแม็ก โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

- 1.2.1 ศึกษากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อแนวเชื่อมจากการเชื่อมของกลุ่มช่างเชื่อมสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรม
- 1.2.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดฟุ่มโลหะของช่างกลุ่มสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรม
- 1.2.3 เสนอแนะแนวทางการป้องกันการรับสัมผัสอันตรายจากการเชื่อม

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

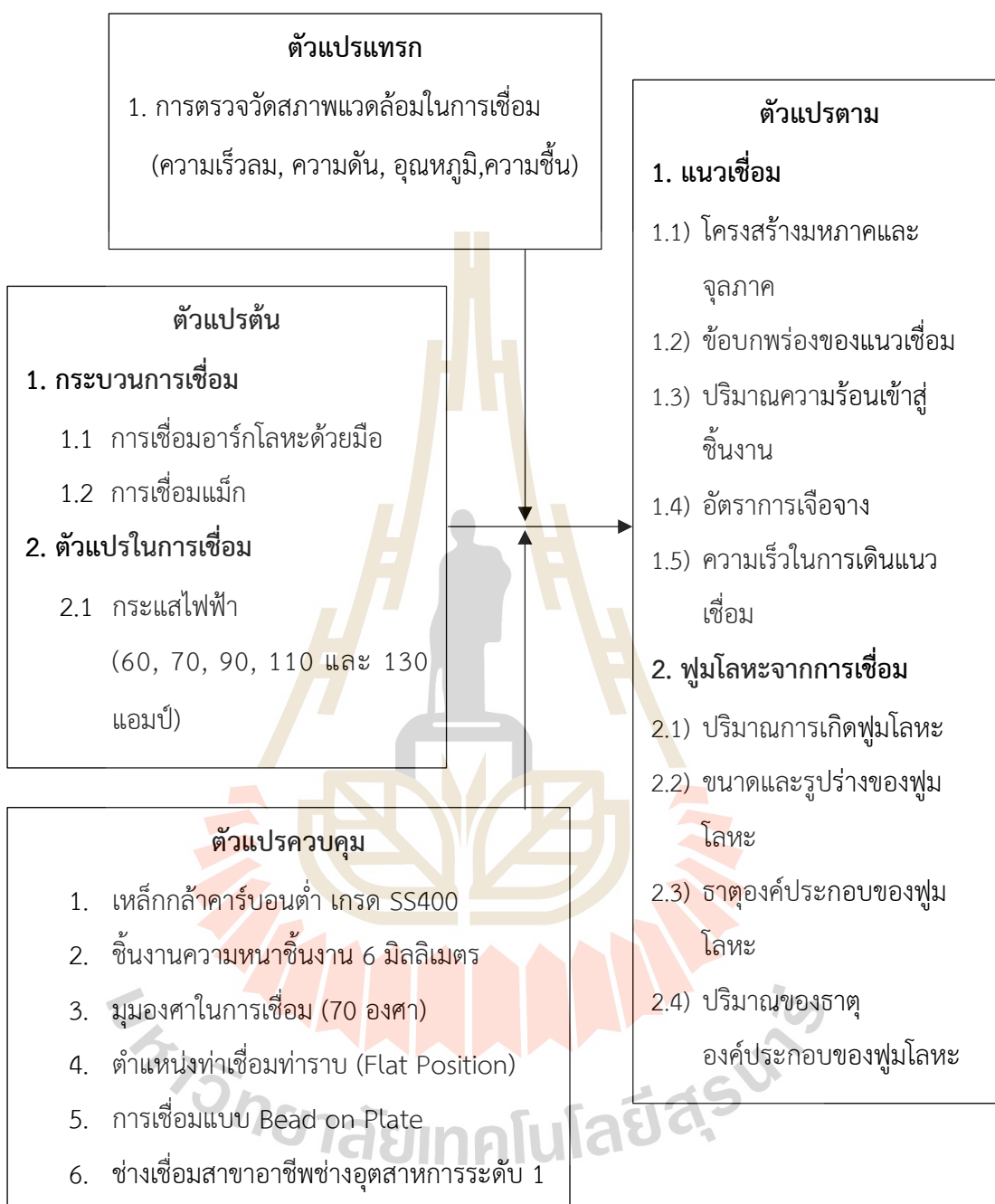
1. กระแสไฟฟ้ามีผลต่อแนวเชื่อมและการเกิดฟุ่มโลหะจากการเชื่อมต่างกันในแต่ละกระบวนการ
2. การเชื่อมประเภทการอาร์กโลหะด้วยมือมีผลต่อปริมาณการเกิดฟุ่มโลหะมากกว่าการเชื่อมในกระบวนการเชื่อมแม็ก

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากับกลุ่มช่างกลุ่มสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรม ที่กำหนดตามคณะกรรมการส่งเสริมและพัฒนาฝีมือแรงงาน ครอบคลุมสาขาอาชีพช่างเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ และแม่เหล็ก โดยตัวแปรในการศึกษาตัวแปรในการเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (Arc Current) ที่ค่ากระแสที่ 60, 70, 90, 110 และ 130 A ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed) ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) และอัตราการเจือจาง (%Dilution Rate)

ระยะเวลาในการศึกษาและวิเคราะห์ผลระหว่างวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2567 – 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567 โดยการจำลองและทดลองการเชื่อมของช่างเชื่อมที่ผ่านมาตรฐานฝีมือแรงงาน โดยใช้ช่างเชื่อมที่ผ่านมาตรฐานฝีมือแรงงานระดับ 1 เก็บตัวอย่างพุ่มโลหะตามวิธี NIOSH method #0500 และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบพุ่มโลหะตาม NIOSH method #7200 ประกอบด้วยธาตุเงิน (Ag) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ณ อาคารเครื่องมือ 6 (F6)

### 1.4.1 กรอบแนวคิดในการศึกษา



รูปที่ 1.1 กรอบแนวคิดในการศึกษา

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 องค์ความรู้ในการเลือกกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อแนวเชื่อมและการรับสัมผัสพุ่มโลหะที่น้อยที่สุด

1.5.2 ทราบปริมาณพุ่มโลหะ องค์ประกอบธาตุที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ขนาด และรูปร่างของพุ่มโลหะของช่างกลุ่มสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรม

1.5.3 เป็นข้อมูลที่ใช้ในการวางแผน ป้องกัน และเฝ้าระวังในการเชื่อมเพื่อลดการสัมผัสพุ่มโลหะที่เกิดขึ้นจากการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงาน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

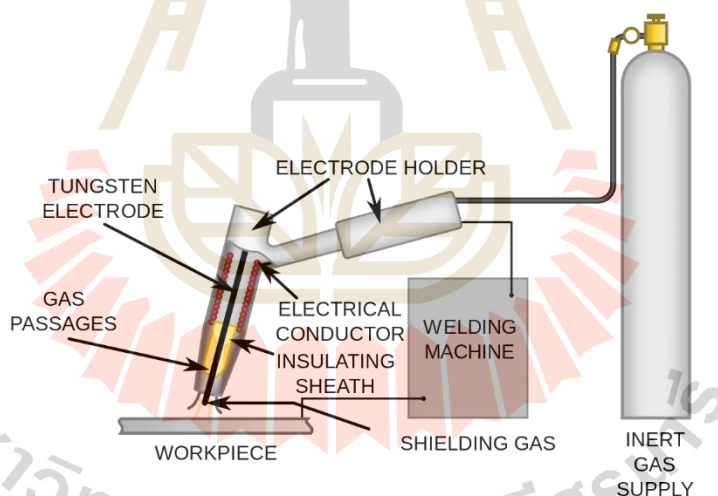
การปรัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าและการเกิดฟลูมโลหะจากกระบวนการเชื่อมของช่างกลุ่มสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรมจะครอบคลุมตามประเด็นที่สำคัญสำหรับการวิจัย โดยที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของพารามิเตอร์ คุณลักษณะการเกิดฟลูมโลหะจากการเชื่อม เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและเป็นแนวทางในการทำการวิจัย โดยมีรายละเอียดหัวข้อที่สำคัญ ดังนี้

- 2.1 กระบวนการเชื่อมตามระบบทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานอาชีพช่างอุตสาหกรรม
- 2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อแนวเชื่อมและฟลูมโลหะ
- 2.3 ฟลูมโลหะที่เกิดจากการเชื่อม
- 2.4 อันตรายจากฟลูมโลหะและโรคที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมโลหะ
- 2.5 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างฟลูมโลหะ
- 2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานเชื่อม และคุณลักษณะสัณฐานวิทยาฟลูมโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 2.7 การย่อยกระดาษกรองตัวอย่างฟลูมโลหะด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟ
- 2.8 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุฟลูมโลหะโลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ
- 2.9 การคำนวณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานและอัตราการเผื่อจาง
- 2.10 การวิเคราะห์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการเชื่อมตามระบบทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานอาชีพช่างอุตสาหกรรม

จากประกาศคณะกรรมการส่งเสริมการพัฒนาฝีมือแรงงาน แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมการพัฒนาฝีมือแรงงาน พ.ศ. 2545 ได้กำหนดมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติ เกี่ยวกับกลุ่มสาขาช่างอุตสาหกรรมปัจจุบัน แบ่งเป็น 3 สาขาอาชีพ ได้แก่ สาขาอาชีพช่างเชื่อมทิก สาขาอาชีพช่างเชื่อมแม็ก และสาขาอาชีพอาร์กโลหะด้วยมือ

สาขาอาชีพช่างเชื่อมทิก (TIG) สาขานี้มีลักษณะการเชื่อมด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าชนิด สแตนเลสด้วยมือหรือกึ่งอัตโนมัติ โดยกระบวนการเชื่อมอาร์คซึ่งใช้แท่งทั้งสแตนเป็น อิเล็กโทรด และใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สปกป้องที่เป็นแนวเชื่อมฟิลเล็ท ทั้งในลักษณะการเชื่อมเหล็กแผ่น กับเหล็กแผ่น และเหล็กแผ่นกับท่อที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ถึง 3 มิลลิเมตร ในตำแหน่งท่าเชื่อม ต่างๆ ได้ทุกตำแหน่ง ตามมาตรฐาน ISO 9606-1 โดยมีคุณภาพของรอยเชื่อม ระดับ B Class ตาม มาตรฐาน ISO 5817 ในการเชื่อมทิก หรือเรียกอีกแบบคือการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) เป็นกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คที่ใช้แท่งอิเล็กโทรดเป็นทั้งสแตน ในการเชื่อม โดยที่ปอหล่ออมจะมีแก๊สปกคลุมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและการทำปฏิกิริยากับอากาศ รอบข้าง โดยทั่วไปใช้อาร์กอนเป็นแก๊สเฉื่อยในการปกคลุม สำหรับการเชื่อมประเภทนี้ ใช้ใน อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมอื่นๆ มักจะใช้ในการเชื่อมชิ้นงานที่มีขนาดบาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่ไม่ใช่กลุ่มเหล็ก นอกจากนี้ยังใช้ในกระบวนการผลิตจักรยาน งานระบบ ท่อ การซ่อมซ่อมบำรุงเครื่องมือเช่น แม่พิมพ์ (Mold หรือ Die) ที่ทำจากอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม องค์ประกอบของการเชื่อมทิกเป็นไปตามรูปที่ 2.1



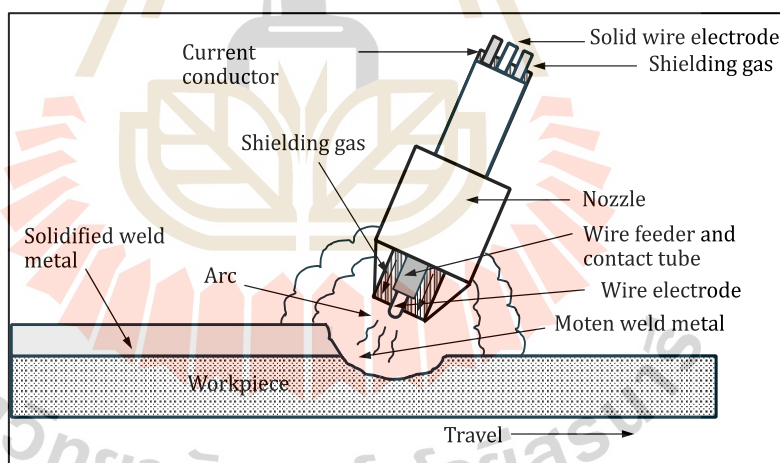
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของการเชื่อมทิก

ที่มา : <https://seamesonline.com/>

สำหรับกระบวนการเชื่อมทิกข้อดีในด้านของการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานเชื่อมที่มีขนาด บาง เช่น แมกนีเซียมอัลลอยหรืออลูมิเนียมอัลลอย เป็นต้น โดยให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อม ในทาง กลับกันข้อด้อย คือ เป็นกระบวนการเชื่อมที่ต้องอาศัยทักษะของช่างเชื่อมที่ค่อนข้างสูง ไม่เหมาะกับ แนวเชื่อมขนาดใหญ่ เพราะกระบวนการเชื่อมทำได้ช้าและทีละน้อย สำหรับการเชื่อมทิกนั้นรอย

เชื่อมจะมีลักษณะเกรนที่ละเอียด สามารถรับแรงได้สูง อีกทั้งสามารถควบคุมความร้อนบริเวณแนวเชื่อมได้ด้วย (Mishra & Ma, 2005) นอกจากนี้การเชื่อมทิกเป็นวิธีการที่สามารถใช้ในการเชื่อมซอมนที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่มีความเหมาะสมซึ่งพบได้จากการเชื่อมได้ในการเชื่อมแนวท่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (Jiang, Wenchun, et al, 2011)

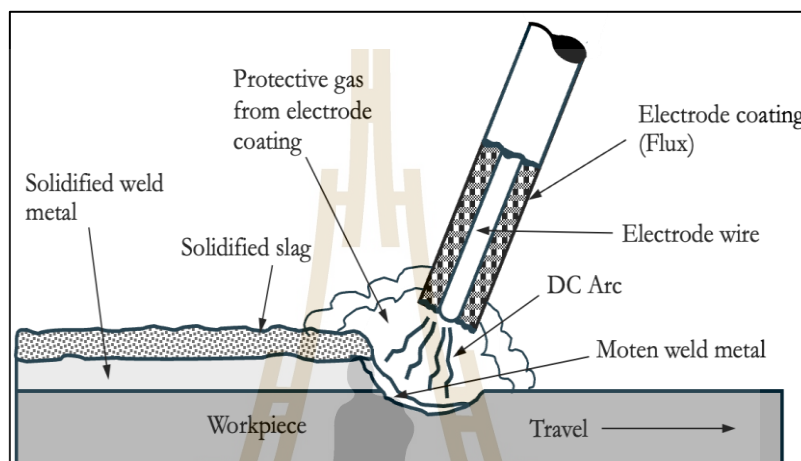
**สาขาอาชีพช่างเชื่อมแม็ก (MAG)** สาขานี้ช่างเชื่อมสามารถเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยที่เหล็กแผ่นและท่อเป็นแนวเชื่อมแบบฟิลเล็ท ในตำแหน่งทำเชื่อมต่าง ๆ ได้ทุกตำแหน่งของการเชื่อมให้มีคุณภาพของรอยเชื่อมอยู่ในระดับ B Class ตรงตามมาตรฐานของ ISO 5817 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คด้วยไฟฟ้าโดยใช้ลวดเชื่อมต่อเนื่อง รวมทั้งใช้แก๊สแอคทีฟปกคลุม คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์กับอาร์กอน หรือแก๊สผสมอื่น ๆ แก๊สปกคลุม ซึ่งเป็นการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสมทำการปกคลุมบริเวณการเชื่อมเพื่อป้องกันการรวมตัวของบรรยากาศภายนอก เช่น ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และไนโตรเจน (N) ไปทำปฏิกิริยารวมตัวกับเนื้อโลหะแนวเชื่อมโดยเกิดความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อม (Consumable Electrode) ที่มีกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่มาทำการอาร์คกับชิ้นงานหลอมละลายเป็นน้ำโลหะเกิดเป็นแนวเชื่อม



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบการเชื่อมแม็ก

**สาขาช่างเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือ (SMAW)** สาขานี้ช่างเชื่อมสามารถเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน โดยกระบวนการเชื่อมนี้เป็นแบบหลอมละลายที่ใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ มีการเชื่อมโดยใช้รอยเชื่อมฟิลเล็ท และรอยเชื่อมต่อชน (Butt Weld) ในลักษณะการเชื่อมเหล็กแผ่นกับเหล็กแผ่น เหล็กแผ่นกับท่อ และการเชื่อมท่อกับท่อ ในตำแหน่งทำเชื่อมต่าง ๆ ได้ทุกตำแหน่งตามมาตรฐาน ISO 9606-1 โดยมีคุณภาพของรอยเชื่อม ระดับ B Class ตามมาตรฐาน ISO 5817 สำหรับการเชื่อม

ประเภทนี้อาจเรียกว่าการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม เป็นกระบวนการที่ได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้แรงกดเป็นพิเศษในการเชื่อมลวดเชื่อม และชิ้นงานบริเวณการอาร์กจะหลอมละลายรวมตัวกันเป็นแนวเชื่อม ส่วนสารพอกหุ้มจะเกิดเป็นแก๊สและสแล็กปกคลุมแนวเชื่อมจากบรรยากาศภายนอก ลักษณะการเชื่อมตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

## 2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อแนวเชื่อมและฟิวโลหะ

ในกระบวนการเชื่อมมีตัวแปรหลายตัวแปร (Welding Parameter) ที่ทำให้ชิ้นงานเชื่อมมีคุณภาพ เช่น กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 3 ตัวแปร ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม แรงดันอาร์ก (Arc Voltage) และความเร็วในการเชื่อม สำหรับตัวแปรในการเชื่อมแม่เหล็ก ที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม แรงดันอาร์ก ความเร็วในการเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม (Flow rate) (ทศพล กุลกุลกุล และวีระ ดาทอง, 2552) ตัวแปรในการเชื่อมเหล่านี้มีผลต่อการคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน โครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติทางกลของแนวเชื่อม รวมถึงรูปร่างของแนวเชื่อมด้วย เช่น ความกว้าง (Weld width) การซึมลึก (Penetration) ความนูน (Reinforcement) เป็นต้น ผลของตัวแปรเหล่านี้อาจส่งผลต่อข้อบกพร่องที่เกิดจากการใช้ตัวแปรการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อารรอยกััดแหวง (Undercut) บนรอยเชื่อมเกิดเม็ดโลหะกระเด็น (Spatter) หรืออารรอยนูนเกินได้

กระแสไฟเชื่อม สำหรับพารามิเตอร์นี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่ากระแสไฟเชื่อมที่เหมาะสม การกำหนดค่ากระแสไฟเชื่อมถ้าเป็นการเชื่อมในท่าราบจะสามารถใช้กระแสไฟเชื่อมได้สูงกว่าทำอื่นๆ ถ้าเป็นท่าตั้งเชื่อมขึ้น หรือท่าเหนือศีรษะจะต้องปรับลดกระแสไฟเชื่อมลง เนื่องจากมีผลต่ออุณหภูมิของอาร์ก ในกรณีที่ใช้กระแสไฟสูง

จะส่งผลต่อความหนืดของบ่อหลอมละลาย (Viscosity) โดยที่หากความหนืดของบ่อหลอมละลายต่ำ จะไม่สามารถทำการเชื่อมในท่าตั้งเชื่อมขึ้น หรือท่าเหนือศีรษะได้

แรงดันอาร์ก เป็นค่าที่สามารถตรวจวัดได้ในระหว่างกระบวนการเชื่อม โดยใช้โวลต์มิเตอร์วัด แรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าและชิ้นงาน แรงดันอาร์กก็มีความสัมพันธ์กับระยะอาร์ก (Arc Length) โดยตรง หากระยะอาร์กสั้นเกินไป จะทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีลักษณะนูนสูงกว่าปกติ หรือเกิดการเสริมเนื้อโลหะเกินจำเป็นในทางกลับกัน หากระยะอาร์กยาวเกินไป จะส่งผลให้การปกคลุมของแก๊สป้องกันไม่สมบูรณ์ ทำให้อากาศภายนอกแทรกซึมเข้าไปยังบ่อหลอม เกิดรูพรุนภายในแนวเชื่อม และอาจมีสะเก็ดโลหะกระเด็นกระจายบนพื้นผิวชิ้นงาน

ความเร็วในการเชื่อม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม กล่าวคือ เมื่อใช้กระแสไฟเชื่อมในระดับสูง จะสามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้ ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการผลิตของงานเชื่อมโดยรวม นอกจากนี้ ความเร็วในการเชื่อมยังมีผลต่อค่าความร้อนที่ส่งผ่านเข้าสู่ชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ หากใช้ความเร็วในการเชื่อมสูง ค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานจะลดลง ในขณะที่การเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ หรือใช้เทคนิคการส่ายลวดเชื่อม จะทำให้ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการเชื่อม โดยศึกษากระแสไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 80, 90 และ 100 แอมป์ โดยที่พบว่า กระแสไฟฟ้าที่ 90 แอมป์ เป็นพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการหลอมละลายแนวเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และระยะระหว่างลวดเชื่อมคือระยะ 2.6 2.8 และ 3.0 มิลลิเมตร โดยพบว่าระยะการอาร์กระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมคือ 3 มิลลิเมตร (Aghakhani et al.,2011)

นอกจากพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมข้างต้น การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard-facing) เป็นทางเลือกหนึ่งที่ยอมรับใช้มากในปัจจุบัน ซึ่งนิยมใช้ในการเชื่อมซ่อมงานสึกหรอ เพื่อให้เกิดความแข็งแรงและทนทาน สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งมี 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเชื่อมรองพื้น (Buttering) เพื่อลดผลกระทบจากธาตุคาร์บอน และอัลลอยที่มาจากชิ้นงาน ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ การเชื่อมเติมเนื้อ (Build-Up) เพื่อเพิ่มเนื้อชิ้นงานที่สึกหรอไปให้ใกล้เคียงกับชิ้นงานเดิมก่อนการสึกหรอ ชั้นเดียวหรือหลายชั้นได้ และเชื่อมพอกผิวเพื่อเพิ่มชั้นพอกผิวแข็งให้ทนต่อการสึกหรอประมาณ 2-4 ชั้น การเชื่อมพอกผิวแข็งถูกใช้อย่างแพร่หลายในการเติมเนื้อวัสดุลงบนพื้นผิวชิ้นงานที่มีการสึกหรอ เช่น โลหะผสมที่มีเหล็กเป็นโลหะพื้นฐาน (Fe-based alloys) โลหะผสมโคบอลต์ (Co-based alloys) และโลหะผสมนิกเกิล (Ni-based alloys) (Chakraborty et al.,2014 & Gualco et al.,2015) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติผิวชิ้นงานเครื่องจักรให้มีต้านทานของการสึกหรอเพิ่มมากยิ่งขึ้นและทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ทดแทน (Rodríguez Ripoll et al, 2016)

นอกจากนี้ จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมแบบไฟฟ้าหรือการเชื่อมแบบอาร์ก โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ พบว่าตัวแปรในการเชื่อมที่มีผลต่อการเกิดปริมาณฟุ้งโลหะ คือ กระแสไฟฟ้า (Welding Current) และความเร็วในการเชื่อม (Welding Speed) โดยหากมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อมมากขึ้นจะส่งผลต่อปริมาณฟุ้งโลหะเพิ่มมากยิ่งขึ้นด้วย (Sajedifar et al.,2018)

### 2.3 ฟุ้งโลหะที่เกิดจากการเชื่อมอาร์กโลหะ

ฟุ้งโลหะ หรือที่เรียกว่าไอโลหะ เป็นอนุภาคของแข็งที่เป็นโลหะที่มีขนาดเล็กมากที่สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้ เกิดจากการควบแน่นของไอที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะหลอมละลายและระเหยกลายเป็นไอ ก่อนจะเย็นตัวและกลายเป็นอนุภาคของแข็งอีกครั้ง ซึ่งกระบวนการนี้พบได้บ่อยในการเชื่อมโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการฟุ้งกระจายของฟุ้งในอากาศที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อม ตัวอย่างของฟุ้งโลหะที่พบได้บ่อย ได้แก่ ฟุ้งเหล็ก หรือออกไซด์ของธาตุเหล็ก และฟุ้งตะกั่วรวมทั้งออกไซด์ของตะกั่ว โดยฟุ้งเหล่านี้มักประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะและสารเคลือบผิวลวดเชื่อม เช่น เหล็ก สังกะสี ทองแดง และแมงกานีส เมื่อฟุ้งเหล่านี้แขวนลอยในอากาศและเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจของผู้เชื่อม ซึ่งอาจส่งผลต่อสุขภาพในรูปแบบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโลหะที่ได้รับสัมผัส



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเชื่อมและการเกิดฟุ้งโลหะจากการเชื่อม

### 2.4 อันตรายจากฟุ้งโลหะและโรคที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมโลหะ

ลักษณะความเป็นอันตรายและโรคที่เกิดจากการรับสัมผัสฟุ้งโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมโลหะ โดยที่ในปัจจุบันมีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ระบุว่าช่างเชื่อมมีโอกาสรับสัมผัสอันตรายสูง

สำหรับงานวิจัยของ Antonini (2003) ทำการศึกษาด้านระบาดวิทยาในกลุ่มของผู้ปฏิบัติงานเชื่อม โดยพบว่าผู้ป่วยเป็นจำนวนมากที่ปฏิบัติงานกับการเชื่อมบางประเภทมีอาการหายใจผิดปกติ ผลกระทบจากระบบทางเดินหายใจที่พบในช่วงเชื่อมที่ปฏิบัติงานแบบเต็มเวลา รวมถึงโรคหลอดเลือด อักเสบ การระคายเคืองทางเดินหายใจ พบความผิดปกติของปอดและการเพิ่มขึ้นของอุบัติการณ์ของ โรคมะเร็งปอด การติดเชื้อในปอดมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาและความถี่ในการเชื่อม นอกจากนี้ การศึกษาศึกษาทางด้านสุขภาพของช่างเชื่อม โดยระบุว่าประเภทและจำนวนพุ่มที่เกิดขึ้น จากการเชื่อมและอาการทางระบบทางเดินหายใจจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเชื่อม วัสดุที่ใช้สำหรับ เชื่อม การระบายอากาศ และการป้องกันทางระบบทางเดินหายใจ

การศึกษาคณงานที่ปฏิบัติงานเชื่อมที่สัมผัสการเชื่อมในที่ทำงานและอาการทางระบบทางเดิน หายใจ โดยอ้างอิงข้อมูลจากการสำรวจสุขภาพทางเดินหายใจในประชากรยุโรปครั้งแรก (ECRHS I) ซึ่งมุ่งเน้นประชากรกลุ่มเสี่ยงที่อาจได้รับผลกระทบจากการสัมผัสก๊าซ พุ่มโลหะ และฝุ่นชีวภาพใน ระดับสูง การศึกษานี้มีระยะเวลาในการติดตาม 9 ปี โดยมีเป้าหมายเพื่อประเมินว่าการปฏิบัติงาน เชื่อมในสภาพแวดล้อมจริงสัมพันธ์กับการเกิดโรคหอบหืดหรืออาการหลอดเลือดอักเสบเรื้อรังหรือไม่ ผลการวิจัยพบว่า แม้จะไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมกับความชุกของโรคหอบหืดโดยตรง แต่มี ความเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญกับการเกิดอาการหลอดเลือดอักเสบเรื้อรัง อัตราส่วนความชุก (PR = 1.33, 95% CI= 1.00–1.76) โดยเฉพาะในกลุ่มที่สัมผัสกับโลหะประเภทเหล็กชุบสังกะสี (PR = 2.14, 95% CI= 1.24–3.68) และสแตนเลสสตีล (PR = 1.92, 95% CI= 1.00–3.66) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ ในงานเชื่อมอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ ยังพบแนวโน้มของการเชื่อมวัสดุที่มีการเคลือบผิวหรือทาสี เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงความเสี่ยงต่อระบบทางเดินหายใจที่มากขึ้นจากการสูดดมพุ่มและก๊าซที่ เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมวัสดุเคลือบเหล่านี้ ข้อค้นพบนี้ชี้ให้เห็นถึงอันตรายทางสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับ วัสดุและสภาพแวดล้อมของการเชื่อมที่อาจถูกมองข้าม (Lillienberg et al., 2008)

นอกจากนี้การสัมผัสพุ่มโลหะเป็นสาเหตุในการเจ็บป่วยในระยะยาว ซึ่งเกิดในลักษณะอาการ แบบเรื้อรัง เช่น เกิดความผิดปกติของปอดจากการสัมผัส ความผิดปกติที่ระบบประสาท ก่อให้เกิด โรคมะเร็ง และโรคพาร์กินสัน (Parkinsonism) ได้ด้วย (Olivera, et al., 2014; Antonini et al., 2007) จากการศึกษาพุ่มโลหะที่เกิดจากสารตะกั่วออกไซด์และเหล็กออกไซด์ พบว่าพุ่มเหล่านี้มี องค์ประกอบหลักเป็นออกไซด์ของโลหะ รวมถึงสารเคลือบบนลวดเชื่อม ซึ่งสามารถฟุ้งกระจายปะปน อยู่ในอากาศที่ผู้ปฏิบัติงานหายใจเข้าไป และมีโอกาสเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจจนถึงปอดได้โดยตรง การติดตั้งพัดลมดูดอากาศหรือระบบระบายอากาศเฉพาะที่ (Local Exhaust Ventilation, LEV) จึง มีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดการสะสมของพุ่มโลหะในบรรยากาศบริเวณจุดปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม ควรออกแบบระบบให้เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้พุ่มเหล่านี้ถูกหมุนเวียนกลับเข้าสู่เขตหายใจของ ผู้ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดการสะสมของพุ่มโลหะในปริมาณมาก อัตราการระบายอากาศ

ควรถูกปรับให้เหมาะสมกับระดับการปนเปื้อนที่เกิดขึ้น เพื่อควบคุมความเข้มข้นให้อยู่ในระดับปลอดภัย ทั้งนี้ แม้ในทางทฤษฎีจะสามารถควบคุมให้อยู่ในค่ามาตรฐานได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ควรพิจารณากำจัดฟุมโลหะออกให้ได้มากที่สุดเพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพ

นอกจากนี้กระบวนการเชื่อมยังอาจปล่อยก๊าซพิษต่าง ๆ ควบคู่กับฟุมโลหะ เช่น ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ซึ่งสามารถระคายเคืองตา จมูก และลำคอ และหากได้รับในปริมาณมาก อาจทำให้หมดสติได้ ส่วนก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับออกซิเจนในอากาศ มักพบในกระบวนการเชื่อมที่ใช้ก๊าซคาร์บอนหรือเชื่อมทั้งสแตน และเชื่อมด้วยก๊าซบางชนิด โอโซนสามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจ และอาจนำไปสู่ภาวะน้ำท่วมปอด (Pulmonary edema) หรือโรคระบบทางเดินหายใจเรื้อรังได้

อีกหนึ่งก๊าซอันตรายที่ควรระวังคือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นก๊าซปกคลุมในการเชื่อม หรือเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของวัสดุต่าง ๆ เช่น สี หรือไขมันที่ติดบนชิ้นงาน หากสูดดมเข้าไปในปริมาณมากอาจทำให้เกิดอาการมึนศีรษะ วิงเวียน หมดสติ และอาจรุนแรงถึงขั้นเสียชีวิตได้

โรคจากการเชื่อมโลหะและการสัมผัสไอโลหะ ซึ่งมีลักษณะอาการและผลกระทบต่อสุขภาพ โดยการสัมผัสไอโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในลักษณะที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1) กลุ่มโรคหรืออาการเฉียบพลัน อาการเฉียบพลันมักปรากฏภายในระยะเวลาไม่นานหลังจากการสัมผัส โดยเฉพาะในวันเดียวกันกับที่ปฏิบัติงานหรือภายใน 1-2 วันถัดมา ตัวอย่างสำคัญคือ ไข้จากไอโลหะ ซึ่งเป็นภาวะที่เกิดจากการสูดดมไอโลหะที่ปล่อยออกมาระหว่างการเชื่อม อาการจะพบบ่อยในผู้ที่เพิ่งเริ่มทำงานเชื่อมใหม่ ๆ โดยอาการจะลดลงเมื่อร่างกายมีการปรับตัวต่อการสัมผัส แต่หากหยุดงานไปช่วงหนึ่งแล้วกลับมาทำอีก อาการอาจกลับมาอีกครั้ง อาการทั่วไปประกอบด้วย ไข้ หนาวสั่น ปวดเมื่อยตามร่างกาย อึดอัดแน่นหน้าอก และหายใจลำบาก และกลุ่มที่ 2) กลุ่มโรคหรืออาการเรื้อรังจากการสะสม การได้รับสารเคมีจากไอโลหะอย่างต่อเนื่องในระยะยาวอาจนำไปสู่โรคเรื้อรัง ซึ่งมีความรุนแรงและอาจแสดงอาการล่าช้า ตัวอย่างได้แก่ โรคปอดฝุ่นเหล็ก เกิดจากการสูดดมอนุภาคเหล็กในไอโลหะ ซึ่งอาจสะสมในปอด และกระตุ้นการเกิดพังผืดในปอด (Siderofibrosis) โดยเฉพาะในกรณีที่มีการสัมผัสในระดับเข้มข้น โรคปอดฝุ่นอลูมิเนียม (Aluminosis) ควรเฝ้าระวังในผู้ที่เชื่อมโลหะผสมที่มีส่วนประกอบของอลูมิเนียม การตรวจหาระดับอลูมิเนียมในปัสสาวะสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการสัมผัส (Biomarker of Exposure) และในกรณีที่ผลตรวจผิดปกติ ควรพิจารณาตรวจภาพปอดด้วยเอกซเรย์ความละเอียดสูง (HRCT) โรคมะเร็งจากสารโลหะ สารบางชนิดที่พบในไอโลหะ เช่น โครเมียมและนิกเกิล จัดเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ โดยเฉพาะเมื่อมีสัดส่วนสูงเกินร้อยละ 5 ควรเฝ้าระวังการเฝ้าระวังความเสี่ยงอย่างเหมาะสม เช่น การตรวจสารชีวเคมีในร่างกายเพื่อประเมินระดับการสัมผัส ทั้งนี้แม้การสัมผัสจะเกิด

ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ก็ยังอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งระบบทางเดินหายใจได้อย่างมีนัยสำคัญ (ธีระศิษฐ์ เฉินบำรุง, 2561) โดยสรุปแล้วการเชื่อมโลหะเป็นกิจกรรมที่มีความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะระบบทางเดินหายใจ ทั้งจากการสัมผัสเฉียบพลันและเรื้อรัง ดังนั้นจึงควรมีมาตรการควบคุมความเสี่ยงและระบบเฝ้าระวังสุขภาพที่เข้มงวด เพื่อป้องกันผลกระทบระยะยาวที่อาจเป็นอันตรายถึงชีวิต

## 2.5 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างฟุมโลหะ

การเก็บวิเคราะห์ปริมาณของฟุมโลหะ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบฟุมโลหะแบบรวมตามวิธีการมาตรฐาน NIOSH Method #0500 เก็บอนุภาครวมติดที่ตัวบุคคลบริเวณหายใจของช่างเชื่อม โดยหากมีการเก็บตัวอย่างตามมาตรฐานนี้ จะเป็นการประเมินความเข้มข้นของฟุมโลหะรวม โดยที่จะมีการวิเคราะห์ปริมาณการรับสัมผัสฟุมโลหะด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric method) โดยใช้ปั๊มดูดอากาศเก็บตัวอย่างอากาศ (Personal air pump) ที่มีอัตราการไหล 2.0 – 3.0 ลิตรต่อ นาที โดยคำนวณหาความเข้มข้นของฟุมโลหะในหน่วย  $\text{mg}/\text{m}^3$  ได้จากสมการที่ (2.1)

$$C = \frac{(W_2 - W_1) - (B_2 - B_1) \times 10^3}{V} \quad (2.1)$$

เมื่อ	C	คือ	ความเข้มข้นฟุมโลหะ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
	$W_2$	คือ	น้ำหนักกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง (mg)
	$W_1$	คือ	น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง (mg)
	$B_2$	คือ	น้ำหนัก Blank หลัง (mg)
	$B_1$	คือ	น้ำหนัก Blank ก่อน (mg)

## 2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานเชื่อม และคุณลักษณะสัณฐานวิทยาฟุมโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของชิ้นงานเชื่อมและฟุมโลหะเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินคุณภาพของแนวเชื่อม รวมถึงการตรวจสอบความเสี่ยงทางสุขภาพจากอนุภาคฟุมโลหะ โดยเฉพาะในระดับจุลภาค ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการศึกษาลักษณะพื้นผิว โครงสร้าง และองค์ประกอบของวัสดุในระดับนาโนเมตร โดยที่หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะทำงานโดยการปล่อยลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูงไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง เมื่อลำ

อิเล็กตรอนชนกับพื้นผิววัสดุ จะเกิดสัญญาณต่างๆ เช่น Secondary Electrons (SE) และ Backscattered Electrons (BSE) ซึ่งสามารถนำมาใช้สร้างภาพ 3 มิติของพื้นผิว รวมถึงการระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) และความแตกต่างขององค์ประกอบธาตุในตัวอย่าง

ในด้านของการเตรียมตัวอย่าง สำหรับแนวเชื่อม ตัวอย่างจะต้องถูกตัดและขัดผิวอย่างตามขั้นตอนมาตรฐาน ASTM E3 จากนั้นอาจทำการกัดผิวด้วยสารละลายเคมีเพื่อเน้นโครงสร้างจุลภาค ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM สำหรับพุ่มโลหะที่เก็บจากกระดากจะถูกล้างด้วยโลหะนำไฟฟ้า เช่น ทองคำ (Au) หรือแพลทินัม (Pt) เพื่อป้องกันการสะสมประจุ ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวิเคราะห์ภาพและโครงสร้าง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ช่วยให้สามารถสังเกตลักษณะรูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของพุ่มโลหะ รวมถึงลักษณะของแนวเชื่อม เช่น รอยแตก ร้าว รูพรุน หรือโครงสร้างผลึก สามารถจำแนกประเภทของพุ่มโลหะได้ เช่น พุ่มโลหะ ลักษณะแบบกลม (Spherical) แบบแผ่น (Plate-like) หรือแบบรวมกลุ่ม (Agglomerated)

การวิเคราะห์องค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยมีการติดตั้งพร้อมกับระบบตรวจวิเคราะห์พลังงานจากรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, SEM-EDS) ซึ่งช่วยในการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพื้นที่ที่สนใจ โดยสามารถระบุธาตุโลหะที่พบในแนวเชื่อมหรือพุ่มโลหะ เช่น Fe, Mn, Si, Al, Cr, Ni ฯลฯ และประเมินการกระจายของธาตุในชิ้นงานหรือพุ่มโดยทำ Mapping หรือ Line Scan โดยที่ข้อดีของการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวิเคราะห์นี้ คือ ความละเอียดสูงมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แสงหลายเท่า สามารถวิเคราะห์โครงสร้างผิวและองค์ประกอบธาตุในระดับจุลภาคถึงนาโนเมตร และเหมาะสำหรับงานวิจัยเชิงลึกในด้านโลหะวิทยา อาชีวอนามัย และการประเมินความปลอดภัยจากพุ่มโลหะ

## 2.7 การย่อยกระดากตัวอย่างพุ่มโลหะด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพุ่มโลหะจำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับตัวอย่างที่เก็บจากกระดาก ซึ่งมักใช้ในวิธีการเก็บตัวอย่างตามมาตรฐาน เช่น NIOSH Method #7300 หรือ NIOSH Method #7200 การย่อยสลายตัวอย่างด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟ (Microwave Digestion) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ เนื่องจากให้ผลการย่อยที่สมบูรณ์ มีความแม่นยำสูง และลดระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่างเมื่อเทียบกับวิธีการย่อยแบบดั้งเดิม

โดยหลักการของเครื่องย่อยไมโครเวฟ จะใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้พลังงานความร้อนโดยตรงกับตัวอย่างในสภาวะแรงดันสูงภายในภาชนะปิด (Closed-vessel system) โดยความร้อนและแรงดันที่เกิดขึ้นช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และปลดปล่อยโลหะออกจากตัวอย่าง

ให้อยู่ในรูปสารละลาย พร้อมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS) โดยมีขั้นตอนการย่อยตัวอย่างคือตัดกระดาษกรองตัวอย่างที่มีการสะสมของฟลูออไรด์ออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และใส่ลงในภาชนะย่อย (Digestion vessel) เติมกรดเข้มข้น เช่น กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) หรือผสมกับกรดฟลูออริก (HF) หรือกรดเปอร์คลอริก ( $\text{HClO}_4$ ) ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ ใส่ภาชนะลงในเครื่องไมโครเวฟแล้วปิดฝาภาชนะย่อยอย่างแน่นหนาและวางในช่องของเครื่องไมโครเวฟตามโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาเฉพาะ ที่อุณหภูมิ  $180\text{--}200^\circ\text{C}$  ใช้เวลา 20–30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นโดยหลังย่อยเสร็จปล่อยให้ภาชนะเย็นตัวลงก่อนเปิดฝาอย่างระมัดระวัง และนำไปกรองและปรับปริมาตรกรองสารละลายที่ได้ และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ให้อยู่ในปริมาตรที่เหมาะสมก่อนนำไปวิเคราะห์

ข้อดีของการย่อยด้วยไมโครเวฟ คือย่อยได้สมบูรณ์ภายในเวลาสั้น ลดการสูญเสียตัวอย่างและปนเปื้อนจากภายนอก ควบคุมเงื่อนไขอุณหภูมิและแรงดันได้แม่นยำ เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณโลหะในระดับต่ำ (Trace elements) โดยมีการประยุกต์ใช้โดยที่เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการเตรียมตัวอย่างฟลูออไรด์จากการเชื่อมที่เก็บบนกระดาษกรอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ เช่น Fe, Mn, Cr, Ni, Zn และอื่น ๆ ด้วยเทคนิคเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ หรือ ICP-OES สำหรับการเก็บตัวอย่างฟลูออไรด์จะเก็บด้วยกระดาษกรองชนิดเซลลูโลส (MCE) จำเป็นต้องมีการย่อยกระดาษกรองให้เป็นสารละลายก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่องการย่อยกระดาษกรองด้วยเครื่องย่อยตัวอย่างแบบอัตโนมัติ (SP-D Microwave Digestion) ลักษณะเครื่องย่อยตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 เครื่องย่อยตัวอย่างแบบอัตโนมัติแบบไมโครเวฟ (SP-D Microwave Digestion)

ที่มา : <http://www.thaiunique.co.th/product-detail.php?id=139991>

## 2.8 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุฟลูออโร โลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ

การวิเคราะห์ฟลูออโร โลหะ จากกระบวนการเชื่อมมีความสำคัญในการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากฟลูออโร โลหะมักมีส่วนประกอบของโลหะหนักหลายชนิดในระดับความเข้มข้นต่ำ เช่น แมงกานีส (Mn) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และเหล็ก (Fe) ซึ่งธาตุเหล่านี้อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาท หรือแม้แต่การก่อมะเร็ง

การตรวจวิเคราะห์ธาตุเหล่านี้ในระดับ Trace element จำเป็นต้องใช้เทคนิคที่มีความไวและความจำเพาะสูง โดยเฉพาะการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ เป็นเทคนิคที่สามารถวัดปริมาณธาตุในระดับต่ำมากได้ ถึงระดับส่วนต่อล้านล้าน (ppb) และเหมาะสำหรับการวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกันจากตัวอย่างในรูปของเหลว โดยมีหลักการการทำงานของ ICP-MS ที่อาศัยหลักการสร้างพลาสมาด้วยแก๊สอาร์กอน (Ar) ที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้อะตอมของธาตุในตัวอย่างที่อยู่ในรูปของเหลวเกิดการแตกตัว (Atomization) และกลายเป็นไอออน (Ionization) จากนั้นจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ระบบแมสสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่แยกไอออนตามอัตราส่วนมวลต่อประจุ แล้ววัดปริมาณของไอออนแต่ละชนิดเพื่อรายงานค่าความเข้มข้นของธาตุในตัวอย่าง

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างตัวอย่างฟลูออโร โลหะที่เก็บไว้บนกระดาษกรอง จะถูกย่อยด้วยกรดเข้มข้นโดยใช้เครื่องย่อยไมโครเวฟ จนได้สารละลายพร้อมวิเคราะห์ แล้วสอบเทียบเครื่องมือใช้มาตรฐานสารละลายธาตุ (Mix standard solution) ที่ทราบความเข้มข้นในการสร้างกราฟสอบเทียบ แล้วเครื่องจะดูดสารละลายเข้าสู่ระบบ Nebulizer และส่งต่อเข้าสู่ห้องสร้างพลาสมาเพื่อทำให้อะตอมกลายเป็นไอออน จากนั้นส่งต่อไปยังตัวตรวจจับมวล (Mass analyzer) ความเข้มข้นของแต่ละธาตุจะแสดงผลในหน่วย  $\mu\text{g/L}$  หรือ เมื่อคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาตรอากาศที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์นี้มีข้อดีคือความไวสูงมาก ตรวจวัดธาตุได้ในระดับระดับส่วนต่อล้านล้านและสามารถวิเคราะห์ธาตุหลายชนิดได้พร้อมกัน ใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย มีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูง เหมาะกับการตรวจวัดโลหะหนักในงานด้านอาชีวอนามัย

ในด้านการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยการใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ ในการศึกษาฟลูออโร โลหะจากการเชื่อม ช่วยให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะในฟลูออโร โลหะได้อย่างละเอียด โดยสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวในการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ และเป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับการกำหนดมาตรการควบคุมทางอาชีวอนามัย เช่น การออกแบบระบบระบายอากาศ การเลือกใช้หน้ากากป้องกันฝุ่นโลหะ และการเฝ้าระวังทางชีวภาพ (Biomonitoring)



รูปที่ 2.6 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ

ที่มา : [https://www.uwo.ca/sci/research/biotron/img/analytical\\_services/icpms.jpg](https://www.uwo.ca/sci/research/biotron/img/analytical_services/icpms.jpg)

หลังจากวิเคราะห์ในหน่วยส่วนต่อล้านล้าน (ppb) แล้วนำมาคำนวณความเข้มข้นในหน่วย มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรอากาศ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) หรือหน่วย  $\mu\text{g}/\text{L}$  ตามสมการที่ (2)

$$C = \frac{C_s V_s - C_b V_b}{L}, \text{mg}/\text{m}^3 = \mu\text{g}/\text{L} \quad (3.2)$$

เมื่อ	C	คือ	ความเข้มข้นของโลหะ
	$C_s$	คือ	ความเข้มข้นฟุมโลหะจากตัวอย่าง ( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )
	$C_b$	คือ	ความเข้มข้นของฟุมโลหะจากตัวอย่างเทียบ ( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )
	$V_s$	คือ	ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่าง (mL)
	$V_b$	คือ	ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่างเทียบ (mL)
	V	คือ	ปริมาตรอากาศในการเก็บตัวอย่าง (L)

## 2.9 การคำนวณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานและอัตราการเผื่อจาง

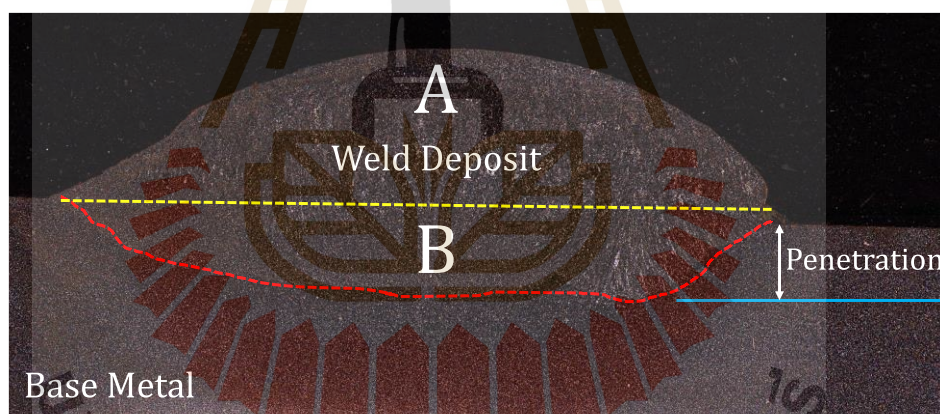
การศึกษาคำนวณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานตามแนวทางของ AWS D1.1 และ ASME Section IX พลังงานความร้อนหน่วยเป็นจูลล์ต่อมิลลิเมตร ( $\text{J}/\text{mm}$ ) แสดงถึงพลังงานที่ส่งไปยังแนวเชื่อมต่อหน่วยความยาว และมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อม การคำนวณแสดงในสมการ (3.3) (Gucwa & Beczkowski, 2014; Winczek et al., 2021) โดยคำนึงถึง

กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (หน่วย A) แรงดันไฟฟ้า (หน่วย V) และความเร็วในการเคลื่อนที่ (หน่วย mm/s) เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน

$$\text{Heat Input} = \frac{\text{Arc voltage} \times \text{Arc current}}{\text{Travel speed}} \quad (3.3)$$

อัตราการเผื่อจางเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการเชื่อม ใช้วัดขอบเขตการผสมระหว่างเนื้อโลหะฐานกับเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อการผสมเจือสูง หมายถึงการผสมระหว่างโลหะฐานและโลหะเชื่อมมากขึ้น ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ในทางกลับกัน การผสมเจือต่ำ หมายถึงการมีอิทธิพลของโลหะเชื่อมมากกว่า โดยใช้การคำนวณตามสมการ 3.4 โดยที่ A คือ พื้นที่โลหะฐานที่หลอมละลาย และ B คือ พื้นที่แนวเชื่อม (Gupta et al., 2019) ดังแสดงตามรูปที่ 2.8

$$\% \text{ Dilution} = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad (3.4)$$



รูปที่ 2.7 บริเวณที่ใช้ในการคำนวณอัตราการเผื่อจาง

## 2.10 การวิเคราะห์ห่ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ห่ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ใช้หลักการที่ว่าเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับผลึกของสารโดยที่วัสดุจะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) และรังสีที่เลี้ยวเบนออกมาจะถูกตรวจวัดในมุมต่าง ๆ ตามกฎของ Bragg's Law ( $n\lambda = 2d \sin\theta$ ) เพื่อระบุระยะระหว่างอะตอม (D-spacing) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของผลึกในแต่ละชนิดของสารประกอบ สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างพุ่มโลหะนำกระดาษกรองที่เก็บตัวอย่างอย่างเข้มข้นมาวิเคราะห์ โดยทำการยิง

รังสีเอกซ์ลงบนตัวอย่าง โดยเครื่องเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะหมุนตัวตรวจจับ (Detector) ไปในมุม  $2\theta$  ต่าง ๆ เพื่อเก็บข้อมูลของรังสีที่เลี้ยวเบน นำกราฟ XRD pattern ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง Intensity กับ  $2\theta$  ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลสารประกอบผลึกมาตรฐาน เช่น JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) หรือ ICDD (International Centre for Diffraction Data) เพื่อระบุชนิดของสารประกอบ โดยเทคนิคนี้สามารถระบุชนิดของสารประกอบออกไซด์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ จากกระบวนการเชื่อม การประเมินความเป็นพิษของพุ่มโลหะจากชนิดของออกไซด์ที่เกิดขึ้น และใช้สนับสนุนผลการวิเคราะห์จาก SEM-EDS หรือ ICP-MS

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Antonini (2003) จากการศึกษาทางระบาดวิทยาที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มผู้ปฏิบัติงานเชื่อม พบว่าแรงงานที่มีประสบการณ์ในการเชื่อมบางประเภท โดยเฉพาะผู้ที่ปฏิบัติงานในลักษณะเต็มเวลา มีแนวโน้มแสดงอาการผิดปกติทางระบบทางเดินหายใจเพิ่มมากขึ้น ผลกระทบด้านสุขภาพที่ตรวจพบได้แก่ การอักเสบของหลอดลม อาการระคายเคืองในทางเดินหายใจ รวมถึงการทำงานของปอดที่ลดลง นอกจากนี้ ยังมีรายงานถึงความชุกที่เพิ่มขึ้นของโรคมะเร็งปอดและการติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจส่วนล่าง ซึ่งมีความรุนแรงมากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานและความถี่ของการสัมผัสพุ่มโลหะจากกระบวนการเชื่อม

Lillienberg et al (2008) มีการดำเนินการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของการเชื่อมโลหะในสถานที่ทำงานที่มีต่อสุขภาพระบบทางเดินหายใจของประชากร โดยอ้างอิงข้อมูลจากโครงการสำรวจสุขภาพทางเดินหายใจของชุมชนในยุโรปครั้งที่ 1 (ECRHS I) ซึ่งมุ่งเน้นกลุ่มประชากรที่มีความเสี่ยงต่อโรคหอบหืด เนื่องจากการสัมผัสกับก๊าซ พุ่มโลหะ และฝุ่นชีวภาพในระดับสูง การติดตามผลต่อเนื่องในระยะเวลา 9 ปีมีจุดประสงค์เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างการประกอบอาชีพที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโลหะกับการเกิดโรคหอบหืดและอาการหลอดลมอักเสบเรื้อรัง ผลการศึกษาระบุว่า แม้จะไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างการเชื่อมกับความชุกของโรคหอบหืด แต่กลับพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างการเชื่อมโลหะกับการเกิดอาการหลอดลมอักเสบเรื้อรัง (PR = 1.33, 95% CI: 1.00–1.76) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มผู้ที่ปฏิบัติงานเชื่อมกับวัสดุประเภทเหล็กชุบสังกะสี (PR = 2.14, 95% CI: 1.24–3.68) และเหล็กกล้าไร้สนิม (PR = 1.92, 95% CI: 1.00–3.66) นอกจากนี้ยังพบว่า การเชื่อมโลหะที่ผ่านการเคลือบหรือทาสีมีแนวโน้มที่จะเพิ่มความชุกของอาการผิดปกติทางเดินหายใจมากยิ่งขึ้น ข้อมูลเหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมความเสี่ยงในสถานประกอบการ โดยเฉพาะในการเชื่อมวัสดุที่มีการเคลือบหรือประกอบด้วยโลหะหนัก เพื่อป้องกันการเกิดผลกระทบระยะยาวต่อสุขภาพระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงาน

Quémérais et al (2015) การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟุ้งโลหะจากกระบวนการเชื่อม โดยเน้นที่การประเมินการรับสัมผัสในระดับบุคคล ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาและนำระบบเก็บรวบรวมอนุภาคที่ออกแบบขึ้นใหม่มาใช้ในการตรวจสอบลักษณะของฟุ้งโลหะอย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาครอบคลุมการเชื่อมสองระบบ ได้แก่ การเชื่อมด้วยระบบหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ และการเชื่อมด้วยมือ กลุ่มตัวอย่างที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของพื้นผิวอนุภาค และ X-ray Diffraction (XRD) เพื่อระบุองค์ประกอบเชิงโครงสร้างผลึกของฟุ้งโลหะ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าทั้งเทคนิค XPS และ XRD สามารถใช้ในการวิเคราะห์ฟุ้งโลหะที่ได้จากการเชื่อมในรูปของผงละอองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถระบุองค์ประกอบพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมีของฟุ้งได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการประเมินความเสี่ยงและการออกแบบมาตรการควบคุมการรับสัมผัสฟุ้งโลหะในสภาพแวดล้อมการทำงาน

Mohan et al (2014) การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการควบคุมฟุ้งโลหะจากการเชื่อมที่แหล่งกำเนิด โดยอาศัยความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟุ้งโลหะ ซึ่งพบว่าน้ำหนักและองค์ประกอบของฟุ้งที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัย เช่น ประเภทของกระบวนการเชื่อม วัสดุที่ใช้ ลักษณะของลวดเชื่อม และสภาวะการเชื่อม ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีบทบาทสำคัญในการกำหนดกลไกการเกิดฟุ้ง และเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการออกแบบมาตรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมหลายประเภท ได้แก่ การเชื่อมโลหะแบบใช้ลวดหุ้ม (Manual Metal Arc Welding, MMAW) การเชื่อมโลหะด้วยแก๊ส การเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมฟลักซ์ (Flux-Cored Arc Welding, FCAW) และการเชื่อมด้วยทั้งสแตนเลสและแก๊สเฉื่อย โดยพิจารณาถึงการเกิดฟุ้งโลหะในแต่ละกระบวนการอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการควบคุมฟุ้งที่แหล่งกำเนิดสามารถลดปริมาณฟุ้งโลหะที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อมีการติดตั้งและใช้งานระบบระบายอากาศเฉพาะที่ ที่ออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะของงานเชื่อม ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการฟุ้งกระจายของฟุ้งเข้าสู่บรรยากาศโดยรอบแล้ว ยังช่วยลดระดับการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานในบริเวณโดยตรงอีกด้วย

Korzhova et al (2017) มีการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคแขวนลอยในบรรยากาศที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมโลหะ โดยมุ่งเน้นที่ส่วนประกอบที่เป็นของแข็งของละอองลอยจากการเชื่อม (Solid Components of Welding Aerosols, SCWA) ซึ่งมีสมบัติทางเคมีที่ซับซ้อนและหลากหลาย การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญในการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสฟุ้งโลหะในงานเชื่อม เทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของ SCWA ซึ่งสามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำโดยไม่ก่อให้เกิดการทำลายตัวอย่าง คือการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) โดยเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดธาตุ

ต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของแข็งภายในละอองลอย โดยสามารถใช้ตรวจสอบปริมาณและชนิดของธาตุโลหะหนักหรือธาตุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับการศึกษาภาคสนามและการเฝ้าระวังทางสุขศาสตร์อุตสาหกรรม

Cosgrove (2015) มีการดำเนินการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสพุ่มโลหะจากกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้า และการเกิดพังผืดในเนื้อปอด (Pulmonary fibrosis) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อระบุลักษณะพยาธิสภาพของปอดที่เกิดขึ้นจากการรับสัมผัสพุ่มดังกล่าว รวมถึงประเมินความเสี่ยงและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับระบบทางเดินหายใจของผู้ประกอบอาชีพเชื่อมโลหะ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิจัยเชิงลึกและการกำหนดมาตรการป้องกันในอนาคต ผลการศึกษาพบว่าพุ่มจากการเชื่อมเหล็กกล้ามีองค์ประกอบของอนุภาคโลหะขนาดเล็กที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ทางเดินหายใจส่วนลึก และกระตุ้นให้เกิดการอักเสบเรื้อรัง โดยเฉพาะภาวะหลอดลมฝอยอักเสบ (Bronchiolitis) ซึ่งอาจนำไปสู่การก่อตัวของพังผืดหรือก้อนเนื้อภายในเนื้อปอดได้ การสัมผัสในระดับสูงต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ยังมีแนวโน้มเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดพังผืดในปอด อาการหลอดลมอักเสบเรื้อรัง รวมถึงการพัฒนาไปสู่โรคปอดบวมในระยะต่อมา

Seleme & Dave Pooke (2016) มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระดับการรับสัมผัสพุ่มจากกระบวนการเชื่อมในกลุ่มอาชีพต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับการรับสัมผัสพุ่มของพนักงานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารเคมีในที่ทำงาน (Occupational Exposure Limit, OEL) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ เพื่อระบุอาชีพที่มีความเสี่ยงต่อการรับสัมผัสพุ่มในระดับสูงสุด จากการศึกษาพบว่า ช่องทางหลักของการรับสัมผัสพุ่มโลหะในงานเชื่อม คือการสูดดมผ่านระบบทางเดินหายใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรับสัมผัสในลักษณะเรื้อรังและต่อเนื่องในระดับความเข้มข้นที่เกินกว่า OEL มีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงต่อการเกิดโรคของระบบทางเดินหายใจ เช่น ไข้พุ่มโลหะ โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง (Chronic bronchitis) โรคหอบหืดจากการทำงาน (Occupational asthma) และภาวะผิดปกติในระบบทางเดินหายใจอื่น ๆ โดยที่ระดับความรุนแรงของการรับสัมผัสพุ่มเชื่อมขึ้นอยู่กับปัจจัย ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมและชิ้นงานที่ใช้ ประเภทของกระบวนการเชื่อม เช่น SMAW, GMAW และ GTAW ตำแหน่งของผู้ปฏิบัติงานขณะเชื่อม และประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมการแพร่กระจายของพุ่มที่นำมาใช้ในสถานที่ทำงาน การศึกษาในครั้งนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการประเมินความเสี่ยงเฉพาะอาชีพ และการพัฒนาแนวทางควบคุมพุ่มเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อปกป้องสุขภาพของแรงงานในระยะยาว

OV Kuznetsova et al (2018) การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินปริมาณพุ่มโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมโดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เนื่องจากข้อมูลจากการประเมินสภาพด้านสุขอนามัยในสถานประกอบการพบว่า กระบวนการเชื่อมมีส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดการเสื่อม

คุณภาพของอากาศในพื้นที่ทำงาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของพนักงาน โดยเฉพาะในระบบทางเดินหายใจ ปัญหาทางสุขภาพที่พบในกลุ่มพนักงานเชื่อม ได้แก่ โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง การระคายเคืองทางเดินหายใจ ความผิดปกติของสมรรถภาพปอด ตลอดจนการเพิ่มขึ้นของความเสียหายต่อโรคมะเร็งปอด ทั้งนี้สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการสัมผัสกับโลหะหนักในรูปแบบของฟุ้งโลหะที่แพร่กระจายอยู่ในอากาศ เพื่อระบุงค์ประกอบของโลหะและวัดระดับความเข้มข้นของฟุ้งโลหะจากระบวนการเชื่อม จึงมีการใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ซึ่งมีข้อได้เปรียบสำคัญคือเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) อีกทั้งยังสามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นฟุ้งที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้มีส่วนสำคัญในการสนับสนุนการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัส และการกำหนดแนวทางการควบคุมการรับสัมผัสฟุ้งโลหะในสถานประกอบการอย่างเหมาะสม

Nathan B. Fethke et al. (2016) การศึกษาค้นคว้ามุ่งเน้นไปที่การลดการสัมผัสควันฟุ้งจากระบวนการเชื่อมแบบประสาน โดยเฉพาะในการเชื่อมตัวต่อแกนตัดกับเหล็กโครงสร้างที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งลักษณะของงานเชื่อมดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาและท่าทางการทำงานที่ต่อเนื่องและยาวนาน ส่งผลให้พนักงานเชื่อมมีโอกาสสัมผัสกับฟุ้งโลหะในระดับที่สูงอย่างต่อเนื่อง ในศึกษานี้ ได้มีการเปรียบเทียบระดับการสัมผัสฟุ้งระหว่างการเชื่อมประสานในรูปแบบดั้งเดิมกับการเชื่อมประสานที่ได้รับการออกแบบใหม่ โดยมุ่งเน้นให้ท่าทางการเชื่อมอยู่ในแนวตั้ง (Vertical position) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการระบายฟุ้งและลดการรับสัมผัสโดยตรง ผลการศึกษพบว่า การเชื่อมในรูปแบบที่ได้รับการออกแบบใหม่ช่วยลดจำนวนและความเข้มข้นของฟุ้งในบริเวณที่หายใจได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม แม้อาจลดความเข้มข้นของฟุ้งที่สามารถหายใจได้จะลดลง แต่ยังคงพบว่าสูงกว่าค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสที่ยอมรับได้ (Threshold Limit Value, TLV)

Quemeraisl et al (2017) การศึกษาค้นคว้านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟุ้งจากระบวนการเชื่อมโดยเน้นการสัมผัสในระดับบุคคล โดยได้พัฒนาระบบเก็บรวบรวมฟุ้งที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบลักษณะของอนุภาคจากการเชื่อมอย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาคครอบคลุมกระบวนการเชื่อมสองประเภท ได้แก่ (1) การเชื่อมโดยใช้ระบบหุ่นยนต์อัตโนมัติ และ (2) การเชื่อมด้วยมือ ตัวอย่างฟุ้งที่เก็บรวบรวมจากทั้งสองกระบวนการได้รับการวิเคราะห์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของโลหะ โดยใช้เทคนิคโฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) สำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบพื้นผิวของอนุภาค และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สำหรับการระบุงค์ประกอบทางเคมีของฟุ้งโลหะ ผลการทดลองพบว่าระบบเชื่อมแบบอัตโนมัติแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของปริมาณฟุ้งในพื้นที่ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะเมื่อระบบเก็บรวบรวมถูกวางไว้ใกล้กับบริเวณรอยเชื่อม ประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวมฟุ้งขึ้นอยู่กับ

ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดและชนิดของตัวกรองที่ใช้ โดยพบว่าความเข้มข้นของโลหะในตัวอย่าง มีความสัมพันธ์กับชนิดของตัวกรอง โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้กระดาษกรองชนิดเซลลูโลส

Sowards et al. (2008) การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อระบุลักษณะของฟุมโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะ โดยครอบคลุมการวัดอัตราการสร้างควัน ขนาดอนุภาคของควันและการกระจายมวล รวมถึงการศึกษาสัณฐานวิทยา เคมี และองค์ประกอบของควันเชื่อม การเก็บตัวอย่างควันเชื่อมดำเนินการโดยใช้ห้องเก็บรวบรวมที่ทันสมัยควบคู่กับเครื่องส่งผลกระทบแรงดันต่ำไฟฟ้า (Electrical Low Pressure Impactor: ELPI) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างควันและสามารถแยกขนาดฟุมโลหะจากการเชื่อมได้เป็น 12 ขนาด ตั้งแต่ 0.03 ถึง 10 ไมครอน การจำแนกลักษณะอนุภาคฟุมโลหะอย่างละเอียดดำเนินการโดยใช้เทคนิคทางวิเคราะห์ต่าง ๆ ร่วมกัน ได้แก่ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสเปกโทรสโกปีการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (X-Ray Energy Dispersive Spectroscopy, XEDS) และโฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีแบบเอ็กซ์เรย์ การใช้เทคนิคเหล่านี้ร่วมกันสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกที่ครอบคลุมเกี่ยวกับโครงสร้างอนุภาค ค่าทางเคมี และสัณฐานวิทยาของฟุมโลหะได้อย่างละเอียด นอกจากนี้ การใช้ ELPI ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบและสัณฐานวิทยายังช่วยให้สามารถศึกษา ลักษณะและการกระจายขนาดของอนุภาคควันเชื่อมได้อย่างแม่นยำ ในงานวิจัยนี้ รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ลวดเชื่อม ER70S-6 ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยแก๊สได้รับการอธิบายอย่างครบถ้วน โดยยืนยันว่าเทคนิคการวิเคราะห์แบบบูรณาการดังกล่าวช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับควันที่เกิดจากวัสดุสิ้นเปลืองในการเชื่อมอาร์ก

Srinivasan & Balasubramanian (2011) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณการป้อนความร้อน ต่อการเกิดควันและองค์ประกอบของฟุมระหว่างกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยแก๊ส บนแผ่นสแตนเลสเกรด AISI 316 อัตราการสร้างควัน (Fume Generation Rate: FGR) และเปอร์เซ็นต์ของควันถูกกำหนดตามมาตรฐาน ANSI/AWS F1.2 โดยใช้วิธีการวัดที่เหมาะสม ในการวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคฟุมโลหะได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ SEM ร่วมกับ X-Ray Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-XEDS) และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของฟุมที่เกิดขึ้น ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM เผยให้เห็นว่า อนุภาคควันมีรูปร่างแตกต่างกันสามประเภท ได้แก่ อนุภาคทรงกลม, อนุภาคที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ และอนุภาคที่รวมตัวกัน โดยอนุภาคทรงกลมเป็นชนิดที่พบมากที่สุด ขนาดอนุภาคทั้งหมดอยู่ในช่วงขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งจัดอยู่ในระดับอนุภาคนาโน นอกจากนี้ มีการประเมินคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง และความเหนียว พร้อมทั้งวิเคราะห์เชิงจุลภาคของโครงสร้างรอยเชื่อม พบว่าการป้อนความร้อนที่

ระดับ 1.15 กิโลจูลต่อมิลลิเมตร (kj/mm) เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการ GMAW เนื่องจากมีการปล่อยควันเชื่อมในระดับต่ำ พร้อมทั้งให้คุณสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยมของรอยเชื่อม

Jenkins & Eagar (2005) การศึกษานี้เน้นไปที่การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟุ่มโลหะในควันเชื่อม เนื่องจากองค์ประกอบในรูปแบบบริสุทธิ์ของโลหะบางชนิดอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานหากสูดดมหรือกลืนเข้าไป ดังนั้น การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของฟุ่มโลหะในควันเชื่อมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในด้านของความเป็นพิษของควันเชื่อม มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีหลากหลายวิธี เพื่อศึกษาองค์ประกอบและความสัมพันธ์กับลักษณะของอนุภาคในอากาศ ความรู้เกี่ยวกับขนาดของอนุภาคมีความสำคัญ เนื่องจากเทคนิคการกระตุ้นการสร้างถ่าน (Activation technique) ที่ใช้วัดจะให้ข้อมูลอัตราการเกิดฟุ่มที่ถูกต้องเฉพาะในช่วงขนาดอนุภาคที่กำหนดเท่านั้น และเพื่อการเปรียบเทียบและการแสดงภาพประกอบการวิเคราะห์องค์ประกอบควันเชื่อมของเหล็กอ่อน ได้มีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายชนิดร่วมกัน โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าควันจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยก๊าซ ของเหล็กอ่อนส่วนใหญ่ประกอบด้วยเหล็กแมกนีไทต์ (Magnetite) ขณะที่ควันฟุ่มโลหะจากการเชื่อมแบบ พบทั้งเฟสแอลคาลไลน์ฟลูออไรด์และเฟสสปีเนลออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn oxide spinel)

พรธณี นันทะแสง และกาญจนา นาละพินธุ (2555) การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพรรณนา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัญหาสุขภาพและสภาพแวดล้อมในการทำงานของช่างเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยช่างเชื่อมจำนวน 159 คน ในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดหนองบัวลำภู โดยใช้แบบสอบถามเชิงสัมภาษณ์ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าช่างเชื่อมทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่างเป็นแรงงานนอกระบบ ผลจากการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นถึงปัญหาสุขภาพและสภาพแวดล้อมในการทำงานของแรงงานนอกระบบในบริบทของชุมชน โดยข้อมูลดังกล่าวถือเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการเฝ้าระวัง ป้องกัน และควบคุมปัญหาสุขภาพในกลุ่มอาชีพดังกล่าว นอกจากนี้ การศึกษายังชี้ให้เห็นถึงปัจจัยด้านความปลอดภัยในการทำงานของช่างเชื่อม รวมถึงความจำเป็นในการจัดการสภาพแวดล้อมในการทำงานให้เหมาะสม เพื่อช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของช่างเชื่อมโลหะและแรงงานนอกระบบในอาชีพอื่น ๆ ภายในชุมชนต่อไป

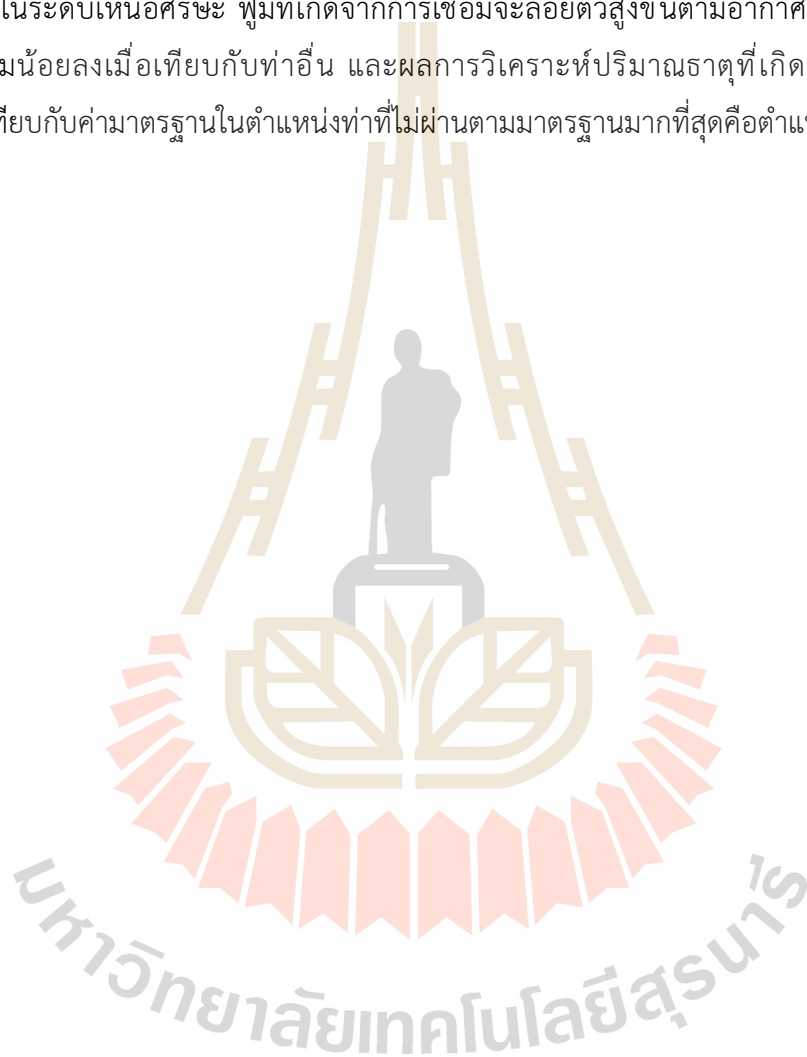
ภัครดา แสนสุขสม และจงกล สังข์อ่วม (2561) ได้ดำเนินการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสโลหะหนักในกลุ่มคนงานจำนวน 7 คน โดยประเมินทั้งจากสภาพแวดล้อมในการทำงานและพฤติกรรมการทำงานของคนงานดังกล่าว การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในฟุ่มโลหะที่เกิดจากงานเชื่อม ได้ใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma (ICP) ตามมาตรฐาน NIOSH Method 7301 ผลการวิเคราะห์พบว่า ฟุ่มโลหะไม่มีส่วนประกอบของโลหะหนักชนิดเบริลเลียม แคดเมียม และตะกั่ว แต่ตรวจพบโครเมียมและนิกเกิลในความเข้มข้นระดับ 3.125 และ 2.75

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับต่ำกว่ามาตรฐานที่ OSHA กำหนดไว้ โดยที่ปริมาณโลหะหนักที่คนงานได้รับยังคงสูงกว่าระดับที่ประชาชนทั่วไปได้รับ จากการประเมินพฤติกรรมการปฏิบัติงานพบว่าคนงานส่วนใหญ่ไม่ได้ปฏิบัติตามมาตรการป้องกันอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการรับสัมผัสโลหะหนักในระยะยาว และอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาวได้หากได้รับปริมาณดังกล่าวเป็นเวลานาน

ยงยุทธ ดุลยกุล (2551) การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้กระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของชนิดกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันต่อคุณภาพของงานเชื่อม การทดลองได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องเชื่อมแม่เหล็กแบบอัตโนมัติกับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ขนาด  $200 \times 200 \times 10$  มิลลิเมตร ต่อชิ้น โดยทำการเชื่อมในท่าราบพร้อมร่องบากรูปตัววีมุม 60 องศา การเชื่อมแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ การเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานและกระแสแบบพัลส์ โดยใช้แก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สคลุมในอัตราส่วนต่างๆ ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหภาคพบว่า การเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานที่ใช้แก๊สผสมในทุกอัตราส่วน ให้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์และมีคุณภาพดีกว่าการเชื่อมด้วยแก๊สคลุม  $100\% \text{ CO}_2$  รวมถึงให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ สำหรับโครงสร้างจุลภาค การเพิ่มสัดส่วนแก๊สอาร์กอนในแก๊สคลุมทำให้เห็นขอบเขตที่ชัดเจนระหว่างเนื้อเชื่อมกับบริเวณ Heat Affected Zone (HAZ) อย่างชัดเจน การหลอมละลายของเนื้อเชื่อมในทุกอัตราส่วนของแก๊สคลุมมีความสมบูรณ์ ในด้านสมบัติทางกล การทดสอบความแข็งแรงและความเค้นที่จุดครากบริเวณเนื้อเชื่อมชี้ให้เห็นว่า การเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานโดยใช้แก๊สผสมทุกอัตราส่วน ให้ค่าความแข็งแรงและความเค้นสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยแก๊สคลุม  $100\% \text{ CO}_2$  ส่วนการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ในทุกอัตราส่วนของแก๊สคลุมให้ค่าความแข็งแรงและความเค้นที่จุดครากใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระแสเชื่อมทั้งสองแบบ

กฤษดา เพ็งอารีย์ (2561) การศึกษานี้ศึกษาปริมาณการรับสัมผัสฝุ่นจากการเชื่อมโครงสร้างเหล็กแบบรอยต่อฉาก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมแบบรอยต่อฉากและศึกษาองค์ประกอบธาตุที่เกิดขึ้น รวมทั้งเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมตามมาตรฐาน ISO6947 (2010) และตามมาตรฐาน AWS A3.0 Standard) โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS G3101 SS400 ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง กำหนดให้ผู้เชื่อมที่ผ่านการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานกลุ่มช่างอุตสาหกรรมระดับ 1 ที่สามารถเชื่อมชิ้นงานที่เป็นมาตรฐานทำการเชื่อมชิ้นงานด้วยท่าเชื่อม 4 ท่า โดยทำการเชื่อมในช่วงเวลา 4.13 – 4.40 นาที ขณะเชื่อมทำการเก็บตัวอย่างอากาศที่ตัวบุคคล โดยติดตัวเครื่องวัดฝุ่นที่บริเวณหน้าอกเชื่อมเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นและองค์ประกอบของธาตุในฝุ่นที่ได้รับสัมผัส ผลการวิจัยพบว่าปริมาณฝุ่นที่ผู้

เชื่อมสัมผัสมากที่สุดเป็นการเชื่อมในตำแหน่งท่าเชื่อมขนานนอน ( $56.41 \text{ mg/m}^3$ ) รองลงมาเป็นตำแหน่งท่าตั้งเชื่อมขึ้น ( $32.51 \text{ mg/m}^3$ ) ตำแหน่งท่าราบ ( $11.63 \text{ mg/m}^3$ ) และน้อยที่สุดในตำแหน่งเชื่อมท่าเหนือศีรษะ ( $4.52 \text{ mg/m}^3$ ) และจากการพิจารณาพบว่าตำแหน่งท่าเชื่อมที่เกิดฝุ่นมากที่สุดพบว่าตำแหน่งท่าขนานนอนดังกล่าว ลักษณะของชิ้นงานเชื่อมเงยขึ้น 45 องศา ทำให้ผู้เชื่อมมีโอกาสรับสัมผัสฝุ่นในปริมาณที่มากกว่าท่าเชื่อมอื่น และตำแหน่งท่าเชื่อมที่น้อยที่สุดพบว่าตำแหน่งชิ้นงานเชื่อมอยู่ในระดับเหนือศีรษะ ฝุ่นที่เกิดจากการเชื่อมจะลอยตัวสูงขึ้นตามอากาศร้อน ทำให้ผู้เชื่อมสัมผัสฝุ่นน้อยลงเมื่อเทียบกับท่าอื่น และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตำแหน่งท่าที่ไม่ผ่านตามมาตรฐานมากที่สุดคือตำแหน่งท่าเชื่อมขนานนอน



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

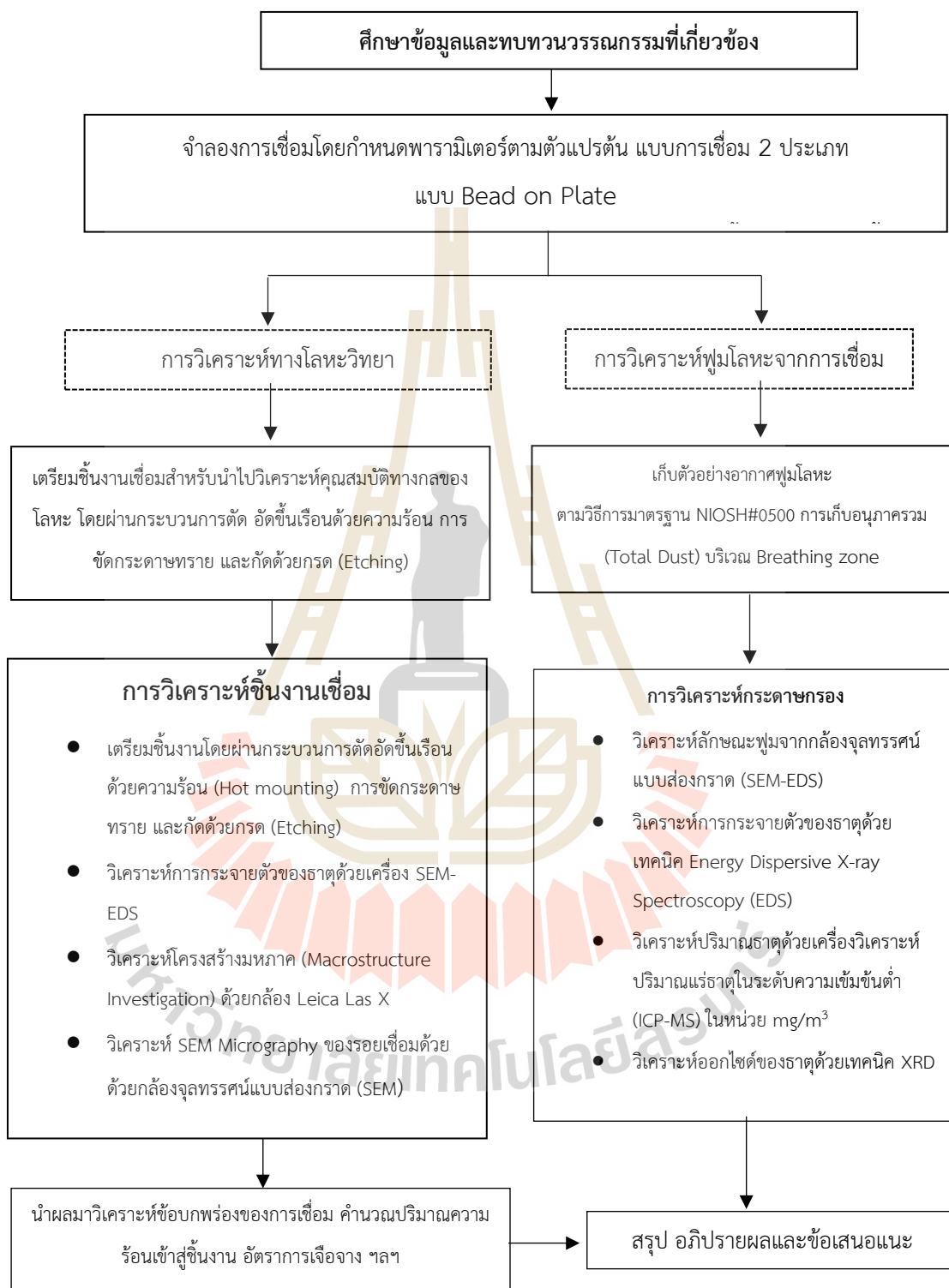
#### 3.1 รูปแบบการศึกษา

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาในรูปแบบการวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-experimental research) โดยเป็นการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อมต่อการเกิดฟิวโลหะ เป็นการศึกษาแบบทดลองโดยมีการกำหนดตัวแปรควบคุม ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 ชิ้นงานความหนาชิ้นงาน 6 มิลลิเมตร มุมองศาในการเชื่อม 70 องศา ตำแหน่งท่าเชื่อมท่าราบ การเชื่อมแบบ Bead on Plate และกำหนดให้ช่างเชื่อมสาขาอาชีพช่างอุตสาหกรรมระดับ 1

#### 3.2 สถานที่ทำการศึกษา

การศึกษานี้ดำเนินการที่อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 6 (F6) ส่วนปฏิบัติการเชื่อมโลหะ และในการวิเคราะห์ตัวอย่าง แนวเชื่อม ปริมาณ ธาตุองค์ประกอบ คุณสมบัติของฟิวโลหะ โครงสร้างจุลภาคและมหภาค รวมทั้งการวิเคราะห์ชิ้นงานเชื่อมแบบทำลาย ณ อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยอาคารเครื่องมือ 6, 9, 10 และ 12 (F6,F9,F10,F12) อาคารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

### 3.3 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล



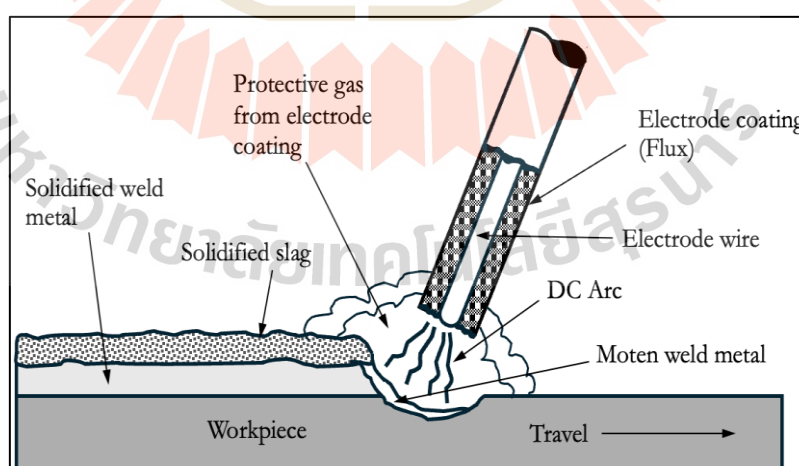
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูล

### 3.4 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

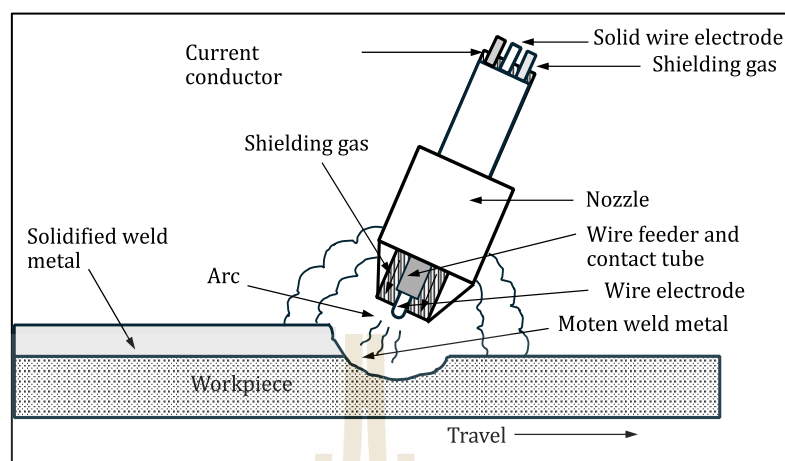
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้นำวิธีการและเครื่องมือที่หลากหลายมาใช้ร่วมกัน โดยแต่ละส่วนถูกพัฒนาขึ้นจากมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ รายละเอียด วิธีการ ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการดำเนินงานวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองและลักษณะการเชื่อม

การศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าและการเกิดฟิวโลหะโดยการจำลองการเชื่อม 2 ประเภท คือการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ และการเชื่อมแม็ก โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 ขนาดความกว้าง 20x15 เซนติเมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร ทำความสะอาดโดยอะซิโตนโดยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ตามตารางที่ 3.2 สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ ใช้ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำที่ทนแรงดึงสูง ทนต่อการแตกร้าว เกรดหุ้มฟลักซ์ RB-26 AWS E6013 (High titania potassium) สำหรับการเชื่อมแม็ก (MAG) ใช้ลวดเชื่อมแบบ CO<sub>2</sub> Wire-HTW-50 electrodes (AWS A5.18 ER70S-6, 1.2 mm diameter) ในการจำลองการเชื่อมจะใช้ตำแหน่งท่าเชื่อมท่าราบ (American Welding Society, 2020) ตามมาตรฐาน ISO 9606-1 การเดินแนวเชื่อมบนชิ้นงานแบบ Bead on Plate ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุม ลักษณะการเชื่อมตามรูปที่ 3.2 เป็นการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ และรูปที่ 3.3 เป็นการเชื่อมแม็ก โดยใช้กระแสไฟฟ้า คือ 60, 70, 90, 110, และ 130 แอมแปร์ ตามลำดับ โดยสรุปตัวแปรที่ที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการจำลองการเชื่อม ตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเชื่อมแบบ Bead on Plate ของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเชื่อมแบบ Bead on Plate ของการเชื่อมแม็ก

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ และการเชื่อมแม็ก

พารามิเตอร์การเชื่อม	ค่า	หน่วย
1. กระแสไฟฟ้า	60, 70, 90, 110, และ 130	แอมแปร์ (A)
2. การเดินแนวเชื่อม	Bead on Plate	-
3. โลหะฐาน (ขนาด 20 X 15 )	เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400	เซนติเมตร (cm)
4. ความหนาของชิ้นงาน	6	มิลลิเมตร (mm)
5. ตำแหน่งท่าเชื่อม	ท่าราบ (Flat Position)	
6. มุมองศาในการเชื่อม	70	องศา
7. การเชื่อมพอกชิ้นงาน	2 ชั้น	

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบการเชื่อมที่จะถูกนำไปวิเคราะห์เชื่อมโยงการเกิดพุ่มโลหะ จะประกอบด้วย จากรูปที่ 3.3 (ก) เป็นแนวเชื่อมประเภทการอาร์กโลหะด้วยมือ องค์ประกอบที่ถูกนำมาวิเคราะห์ ได้แก่ บริเวณรอยที่เกิดการไหม้ (Burn mark) สแล็กที่ปกคลุมแนวเชื่อม (Slag coating) ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เนื้อเชื่อม (Weld metal) และจากรูปที่ 3.3 (ข) เป็นแนวเชื่อมประเภทแม็ก องค์ประกอบที่ถูกนำมาวิเคราะห์ ได้แก่ เนื้อเชื่อม (weld metal) และรอยไหม้ที่เกิดจากการเชื่อม (Burn mark) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์โดยเทคนิค EDS ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของการเชื่อมที่ถูกนำมาวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS  
(ก) การเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ (ข) การเชื่อมแบบแม็ก

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์โดยเทคนิค EDS ของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม

Materials	SS400 Base	E6013 Flux	E6013 wire	HTW-50 wire
Fe	97.66	1.76	54.61	23.01
O	0.05	48.03	10.07	13.53
C	0.18	-	0.28	0.71
Na	-	2.79	4.2	0.86
Si	-	12.66	1.87	1
Ti	-	24.33	0.1	0.05
K	-	3.06	3.6	0.38
Chemical composition (Wt.%)				
Ca	-	2.07	4.4	57.82
Al	-	4.05	11.8	-
Cu	0.84	-	-	-
V	0.06	-	-	-
Mn	0.03	-	-	-
Ni	0.42	-	-	-
Ag	0.76	-	-	-
Zn	-	-	7.05	2.64
Mg	-	0.48	-	-
Br	-	0.77	-	-

### 3.4.2 การวิเคราะห์แนวเชื่อม

การศึกษาเพื่อวิเคราะห์แนวเชื่อมจะเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (NDT) ด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) และการวิเคราะห์แนวเชื่อมแบบทำลาย (DT) ในการศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาค ข้อบกพร่องของการเชื่อมแบบต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบเม็ดโลหะกระเด็น รอยนูนเกิน ความไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น รวมทั้งการพิจารณาความนูนและความลึกจากโครงสร้างมหภาค โดยมีรายละเอียดการเตรียมชิ้นงาน เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ นำเหล็กที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ จากการเชื่อมแต่ละประเภท ไปตัดด้วยเครื่อง CNC Wire cut ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MV1200R แล้วนำไปอัดขึ้นเรือนด้วยความร้อน ตามรูปที่ 3.4 ยี่ห้อ IMT รุ่น G1-10 โดยมีการใช้งานร่วมกับผงเรซิน (Phenolic Resin) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการนำไปขัดด้วยกระดาษทราย 8 เบอร์ โดยขัดจากกระดาษทรายหยาบสุดไปละเอียดสุด เบอร์ 80, 100, 320, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปขัดด้วยเครื่องขัดผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ตามรูปที่ 3.5 เพื่อให้ชิ้นงานโดยจะมีผ้าสักหลาดติดอยู่กับผงอะลูมินา ขนาด 0.3 ไมโครเมตร จนชิ้นงานเงาไม่มีรอยขีดที่หน้าผิวชิ้นงาน แล้วนำไปกัดด้วยกรด (Etching) โดยบริเวณของรอยเชื่อมที่เป็นโลหะ High alloy ซึ่งจะมีการใช้กรด Vilela's reagent (1 g picric acid, 4 mL HCl, 96 mL ethanol) บริเวณเนื้อโลหะฐานเป็นโลหะคาร์บอนต่ำ ใช้กรดไนตรอล (Nital) ที่ความเข้มข้น 5% ในการกัดชิ้นงาน แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy, OM) ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดขึ้นเรือนด้วยความร้อน (Hot mounting)



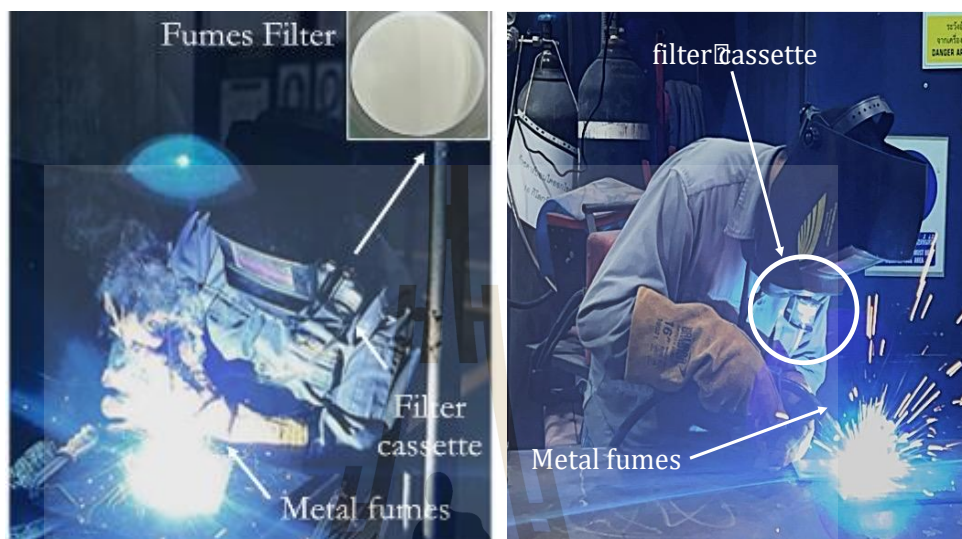
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดด้วยเครื่องวัดผงอลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร

### 3.4.3 การเก็บและวิเคราะห์เชิงปริมาณฝุ่นโลหะด้วยกระดาษกรองชนิดเซลลูโลส

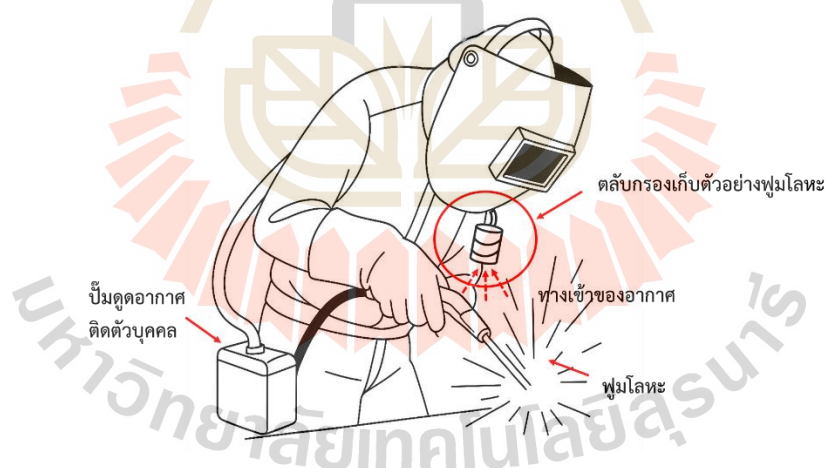
ในการเก็บตัวอย่างอากาศใช้ปั๊มดูดอากาศอัตราการไหลของอากาศในอัตรา 2.0 ลิตรต่อนาที โดยใช้ โดยตัวอย่างถูกเก็บรวบรวมผ่านตัวกรองขนาด 37 มิลลิเมตร ซึ่งติดตั้งตามมาตรฐานการเก็บตัวอย่างของ NIOSH Method #0500 โดยใช้กระดาษกรองชนิดเซลลูโลส (Cellulose Ester Membrane, MCE) ขนาดรูพรุน 0.8 ไมโครเมตร ตามแนวทางของ NIOSH Method #7200 สำหรับการเก็บฝุ่นโลหะจากงานเชื่อมและงานประสานโลหะ โดยตัวกรองถูกติดตั้งไว้ที่ปากเสื้อของผู้เชื่อมเพื่อเก็บตัวอย่างฝุ่นโลหะในบริเวณหายใจ (Breathing zone) ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 โดยที่เก็บตัวอย่างที่กระแสไฟฟ้า 60, 70, 90, 110, และ 130 แอมแปร์ จากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือและการเชื่อมแม่เหล็ก โดยทำการเก็บตัวอย่างซ้ำจำนวน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานให้ความร้อนของชิ้นงานไม่เกิน  $100^{\circ}\text{C}$  และปริมาณฝุ่นโลหะและอนุภาคที่แขวนลอยในอากาศไม่เกินกว่าอนุภาคก่อนการทดลองโดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที จึงเริ่มทำการทดลองใหม่

สำหรับการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการธาตุฝุ่นโลหะจะทำการวิเคราะห์ธาตุ Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn และ Zn ทั้งในรูปของธาตุและในรูปออกไซด์ โดยที่การวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นโลหะที่เก็บได้บนกระดาษกรองและการประเมินระดับการสัมผัสของผู้เชื่อมใช้เทคนิควิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ (ICP-MS) ตามรูปที่ 3.9 โดยผ่านกระบวนการย่อยตัวอย่างเป็นไปตามแนวทางของ US EPA Method 3015a (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2007) โดยนำกระดาษกรองพับใส่ลงในภาชนะสำหรับย่อยตัวอย่างพร้อมกับกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้น 65% ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จากนั้นปล่อยให้ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ด้วยเครื่องย่อยกระดาษกรอง

ไมโครเวฟ ตามรูปที่ 3.7 และทำการย่อยที่อุณหภูมิ 170°C ก่อนนำสารละลายที่ได้มาทำการเจือจาง 5 เท่า



รูปที่ 3.6 การเก็บตัวอย่างอากาศโดยให้ตลับกรองอยู่บริเวณหายใจ



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของการติดตลับกรองในการเก็บตัวอย่างอากาศฟumes โลหะ

ในกระบวนการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ ได้มีการเตรียมสารละลายมาตรฐานธาตุผสม (Mixed Standard Solutions) ที่ระดับความเข้มข้น 100, 50, 20, 10, 5 และ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร (ppb หรือ  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) โดยเจือจางจากสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ (Stock Standard) ที่มี

ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์อาศัยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, R) โดยต้องมีค่ามากกว่า 0.995 เพื่อยืนยันความแม่นยำของการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีมาตรฐาน NIOSH Method 7303 Elements by ICP (Hot Block/HCl/HNO<sub>3</sub> Digestion) (NIOSH, 2003) ในการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโลหะ จากนั้นจึงคำนวณหาความเข้มข้นในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศ (mg/m<sup>3</sup>) หรือไมโครกรัมต่อลิตร (µg/L) ตามสมการ (3.1)

$$C = \frac{C_s V_s - C_b V_b}{L}, \text{ mg/m}^3 = \mu\text{g/L} \quad (3.1)$$

เมื่อ	C	คือ	ความเข้มข้นของฟุ้งโลหะหนักในกระตาศกรอง (mg/m <sup>3</sup> )
	C <sub>s</sub>	คือ	ความเข้มข้นฟุ้งโลหะจากตัวอย่าง (µg/mL)
	C <sub>b</sub>	คือ	ความเข้มข้นของฟุ้งโลหะจากตัวอย่างเทียบ (µg/mL)
	V <sub>s</sub>	คือ	ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่าง (mL)
	V <sub>b</sub>	คือ	ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่างเทียบ (mL)
	V	คือ	ปริมาตรอากาศในการเก็บตัวอย่าง (L)



รูปที่ 3.8 เครื่องย่อยกระตาศกรองไมโครเวฟ (MARS 6)



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ (ICP-MS)



รูปที่ 3.10 สารละลายมาตรฐานผสมของธาตุ (Mixed Standard Solutions)

ในระหว่างการทดลอง ได้มีการบันทึกพารามิเตอร์สิ่งแวดล้อมที่สำคัญไว้อย่างละเอียด ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%RH), อุณหภูมิโดยรอบ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ความดันบรรยากาศ (mmHg) และความเร็วลม ( $\text{m/s}$ ) ซึ่งมีความสำคัญในการอธิบายบริบทของสภาพแวดล้อมขณะเก็บตัวอย่างฟูมโลหะ

#### 3.4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของธาตุ

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะ ด้วยมือและการเชื่อมแม่เหล็ก ดำเนินการอย่างครอบคลุม โดยพิจารณารูปร่างของแนวเชื่อม ลักษณะทางจุลภาค และการกระจายตัวของธาตุทางเคมีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับระบบวิเคราะห์ด้วยพลังงานรังสีเอกซ์ (SEM-EDS; รุ่น JEOL6010

LV) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในบริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อมภายใต้กำลังขยายที่หลากหลาย การวิเคราะห์นี้ครอบคลุมทั้งแนวเชื่อม รอยไหม้ เม็ดโลหะที่กระเด็น และสแล็กที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือโดยมีการสังเกตทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงาน ตัวอย่างถูกติดตั้งบนเทปคาร์บอนซึ่งยึดกับแท่นอะลูมิเนียม และเคลือบด้วยคาร์บอนสำหรับการวิเคราะห์ FE-SEM หรือเคลือบทองสำหรับการวิเคราะห์ EDS ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (LEICA EM ACE600) (Valiei,2021) ลักษณะการเตรียมตัวอย่างตามรูปที่ 3.11 องค์ประกอบของการเชื่อมถูกแยกนำมาจากแนวเชื่อมได้รับการวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อศึกษาเชื่อมโยงต่อการเกิดพุ่มโลหะ ที่อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงจากการสัมผัสในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานเชื่อม

การวิเคราะห์ด้วยกล้องกำลังขยายสูงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ร่วมกับ EDS (Zeiss AURIGA, รุ่น JSM-7800F) เพื่อประเมินลักษณะทางสัณฐานและการกระจายของธาตุในพุ่มโลหะอย่างละเอียด โดยมุ่งเน้นไปที่พุ่มที่เก็บตัวอย่างจากบริเวณหายใจของช่างเชื่อม เพื่อตรวจสอบความเสี่ยงต่อการสัมผัสอันตราย โดยก่อนการวิเคราะห์ SEM-EDS ตัวอย่างจากกระบวนการเชื่อมถูกติดตั้งบนเทปคาร์บอนที่ยึดกับแท่นอะลูมิเนียม ส่วนแผ่นกรองที่ใช้เก็บพุ่มโลหะถูกเคลือบด้วยทองบาง ๆ ด้วยเครื่องเคลือบสปัตเตอร์ริง เพื่อให้ได้ภาพที่คมชัดและตรวจวัดธาตุได้อย่างแม่นยำ

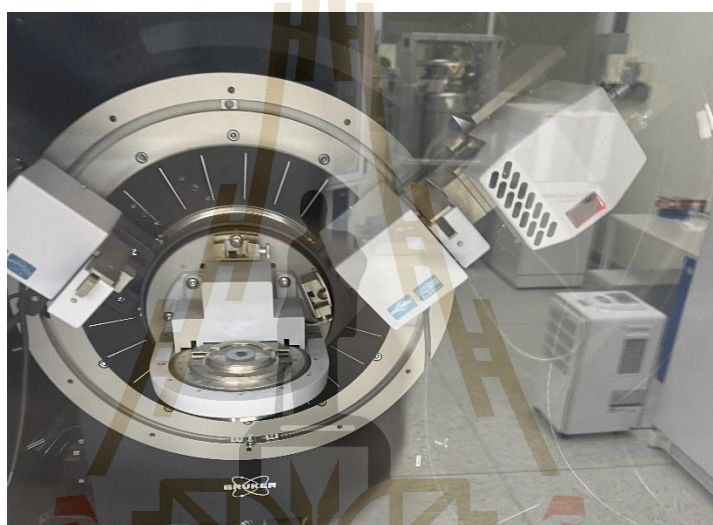


รูปที่ 3.11 ลักษณะการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS

#### 3.4.5 การวิเคราะห์ออกไซด์ของโลหะด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษารูปแบบของออกไซด์โลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม โดยวิธีนี้ใช้ในการตรวจสอบสแล็กที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมทั้งด้านหน้าและด้านหลัง จากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ นอกจากนี้ยังตรวจสอบรอยไหม้ที่เกิดจากการอาร์กกระหว่างลวดเชื่อมกับกระแสไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของ

องค์ประกอบทางเคมีของพุ่มโลหะที่เก็บจากกระดาดากรอง เพื่อวิเคราะห์เฟสของโลหะและออกไซด์ของพุ่มโลหะ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญประกอบด้วย การวิเคราะห์แบบ Bruker-AXS D8 Advance พร้อมแหล่งกำเนิดรังสี Cu K $\alpha$  ที่แรงดัน 40 กิโลโวลต์ (kV) และกระแสไฟฟ้า 40 mA ความเข้มของลำแสงสะท้อนวัดด้วยเครื่องตรวจจับ Lynxeye ในโหมด 1 มิติ (1D mode) ขั้นตอนการสแกนกำหนดเวลาไว้ที่ 0.300 วินาทีต่อหนึ่งจุดการวัด จำนวนทั้งหมด 3,425 จุด โดยช่วงการสแกน  $2\theta$  อยู่ระหว่าง  $10^\circ$  ถึง  $80^\circ$  (J. Epp.,2016; H. Khan. et al,2020) และใช้ step size ที่  $0.02^\circ$  ลักษณะเครื่องวิเคราะห์ตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะการวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

#### 3.4.6 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้เป็นช่างเชื่อมที่ผ่านมาตรฐานฝีมือแรงงานระดับ 1 จำนวน 1 คน โดยมีเกณฑ์การคัดเลือก (Inclusion criteria) ของกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง คือ 1) เป็นช่างเชื่อมที่ผ่านมาตรฐานฝีมือแรงงานระดับ 1 ขึ้นไป ของกรมพัฒนาฝีมือแรงงาน หรือมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่าหรือสูงกว่า 2) มีความยินยอมเข้าร่วมโครงการวิจัย 3) สื่อสารภาษาไทยเข้าใจ 4) มีสุขภาพร่างกายแข็งแรง ทั้งนี้มีเกณฑ์การคัดออกของกลุ่มตัวอย่างคือ 1) ประสบอุบัติเหตุระหว่างดำเนินการวิจัย 2) ไม่ยินยอมหรือเกิดความไม่สบายใจระหว่างเข้าร่วมโครงการ 3) สื่อสารภาษาไทยไม่เข้าใจ และ 4) อาสาสมัครมีเจตนาถอนตัวออกจากโครงการ

### 3.4.7 การพิทักษ์สิทธิของกลุ่มตัวอย่างและจริยธรรมในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีการเก็บตัวอย่างพุ่มโลหะจากผู้เชื่อมที่มีการติดเครื่องมือขนาดเล็ก คือ ตลับกรองและปั๊มดูดอากาศ ในช่างเชื่อมที่ใช้ในการทดลองที่มีโอกาสสัมผัสควันเชื่อม ที่มีพุ่มโลหะที่เป็นอันตราย ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการขอรับการพิจารณาจริยธรรมวิจัยในมนุษย์ ณ สำนักงานจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ (Human Research Ethic Office) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อพิทักษ์สิทธิช่างเชื่อมผู้ปฏิบัติงาน โดยได้รับการรับรองโครงการเลขที่ EC-67-0054 รหัสการรับรอง COA no.50/2567

### 3.4.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุวิเคราะห์ธาตุแบบ Micro mapping การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของธาตุและลักษณะสัญญาณวิทยาของพุ่มโลหะจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS) การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

2) การวิเคราะห์เชิงปริมาณ เป็นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพุ่มโลหะที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis ด้วยเทคนิค SEM-EDS การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในกระดาศกรองตัวอย่างพุ่มโลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ (ICP-MS) การคำนวณอัตราการเจือจาง ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน

3) สถิติเชิงพรรณนา ใช้ค่าร้อยละ (%) ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Min) บรรยายข้อมูลผลการเก็บตัวอย่างพุ่มโลหะ การตรวจวัดสภาพแวดล้อมในการเชื่อม พารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

## บทที่ 4

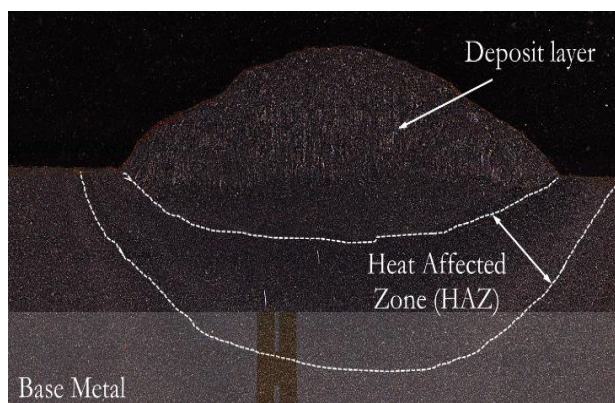
### ผลการดำเนินการวิจัย

#### 4.1 ผลการตรวจสอบ และการวิเคราะห์โครงสร้างของแนวเชื่อม

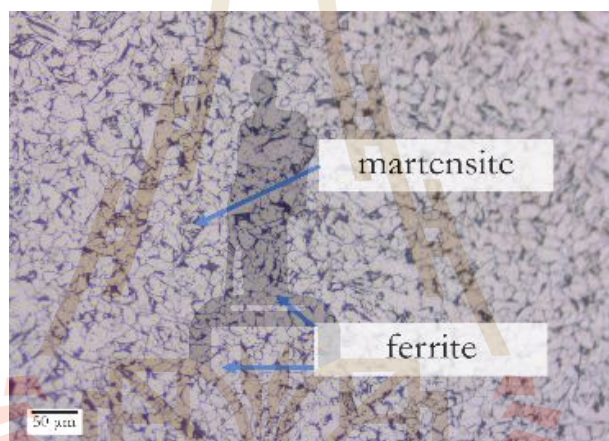
##### 4.1.1 การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

จากการตรวจสอบรอยเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ พบว่า รอยเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้า 60 แอมป์ มีความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ต่ำจนเกินไป ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะฐานและลวดเชื่อมไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องหรือการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบการเกิดฟองอากาศภายในรอยเชื่อม เนื่องจากอุณหภูมิจากการเชื่อมไม่เหมาะสม โดยกระแสไฟฟ้าที่ต่ำทำให้ความร้อนไม่เพียงพอ ส่งผลให้ก๊าซไม่สามารถระบายออกจากบ่อหลอมได้อย่างเหมาะสม จึงเกิดฟองอากาศในรอยเชื่อม (Mandal & Mandal, 2017; Singh et al., 2014)

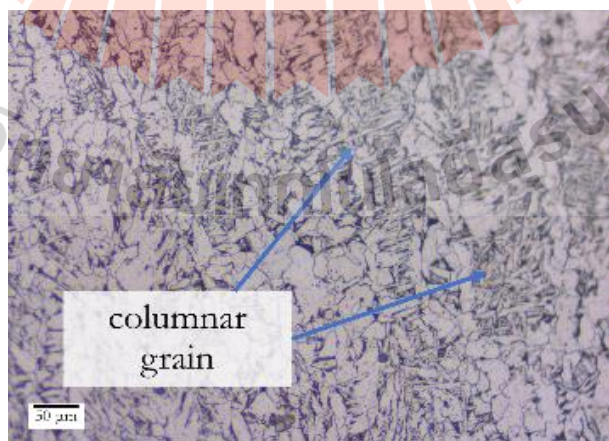
ที่กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ได้แก่ 110 แอมป์ และ 130 แอมป์ พบว่ารอยเชื่อมมีฟองอากาศมากเกินไป รอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ และเกิดเม็ดโลหะกระเด็นจำนวนมาก (Kaplan & Powell, 2011) ขณะที่กระแสไฟ 70 แอมป์ และ 90 แอมป์ พบว่า เป็นช่วงกระแสไฟที่เหมาะสมในการศึกษา โดยให้รอยเชื่อมที่ยอมรับได้ การตรวจสอบด้วยตาเปล่าและการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ไม่พบข้อบกพร่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับได้และยอมรับไม่ได้ พบว่า โลหะฐาน มีโครงสร้างเป็นเฟิร์ลไลต์และเพอร์ไรต์ (Wibowo, 2021) ขณะที่โลหะเชื่อม มีโครงสร้างเป็นเกรนละเอียดแบบคอลลัมน์ในชั้นแรก และเกรนหยาบแบบคอลลัมน์ในชั้นที่สอง ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้ช่วยเพิ่มความเหนียวและความยืดหยุ่นของวัสดุ ทำให้สามารถทนต่อการเสียรูปถาวรหรือแรงกระแทกได้ดีขึ้น อีกทั้งยังมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้นด้วย (Yan et al., 2017; Petersen, 1973)



รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ยอมรับได้ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)

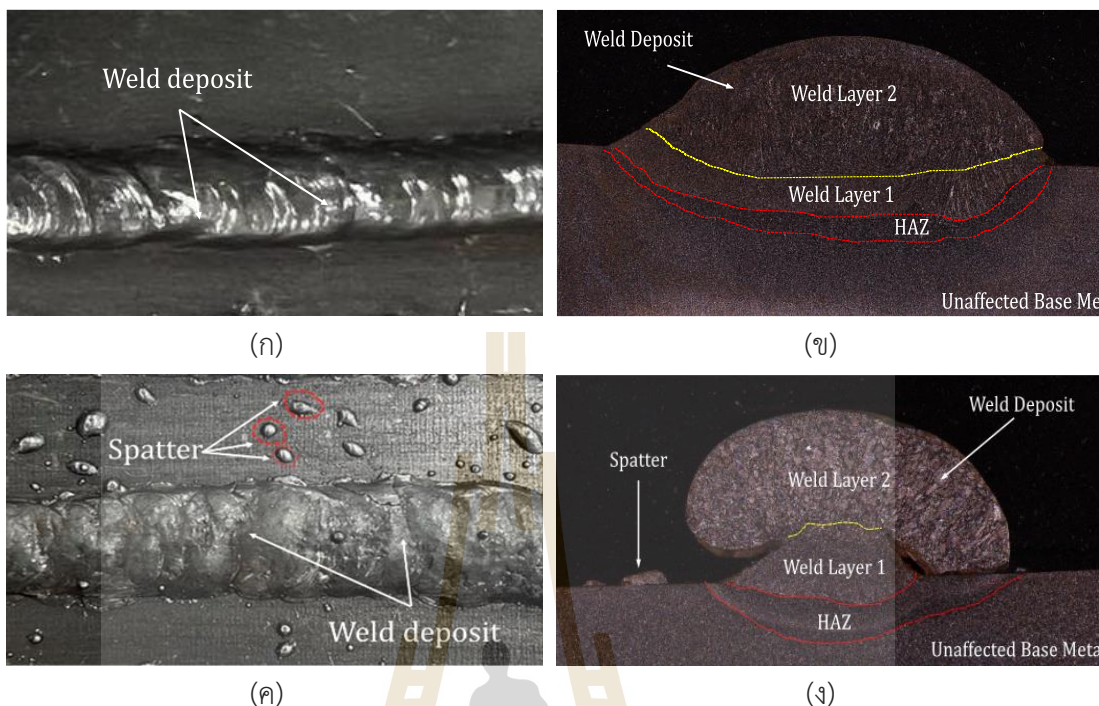


รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)

จากรูปที่ 4.2 บริเวณผลกระทบร้อน (Heat-Affected Zone, HAZ) ซึ่งอยู่ระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน พบว่าโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์-มาร์เทนไซต์ (Ferrite-Martensite) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างการเย็นตัวหลังจากการเชื่อม ทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง (Das & Chattopadhyay, 2009) และโครงสร้างจุลภาคแบบเกรนคอลัมน์ (columnar grain) ที่พบในบริเวณโลหะเชื่อมลักษณะของเกรนตามรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือที่กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 70 แอมป์

#### 4.1.2 การเชื่อมแม่เหล็ก

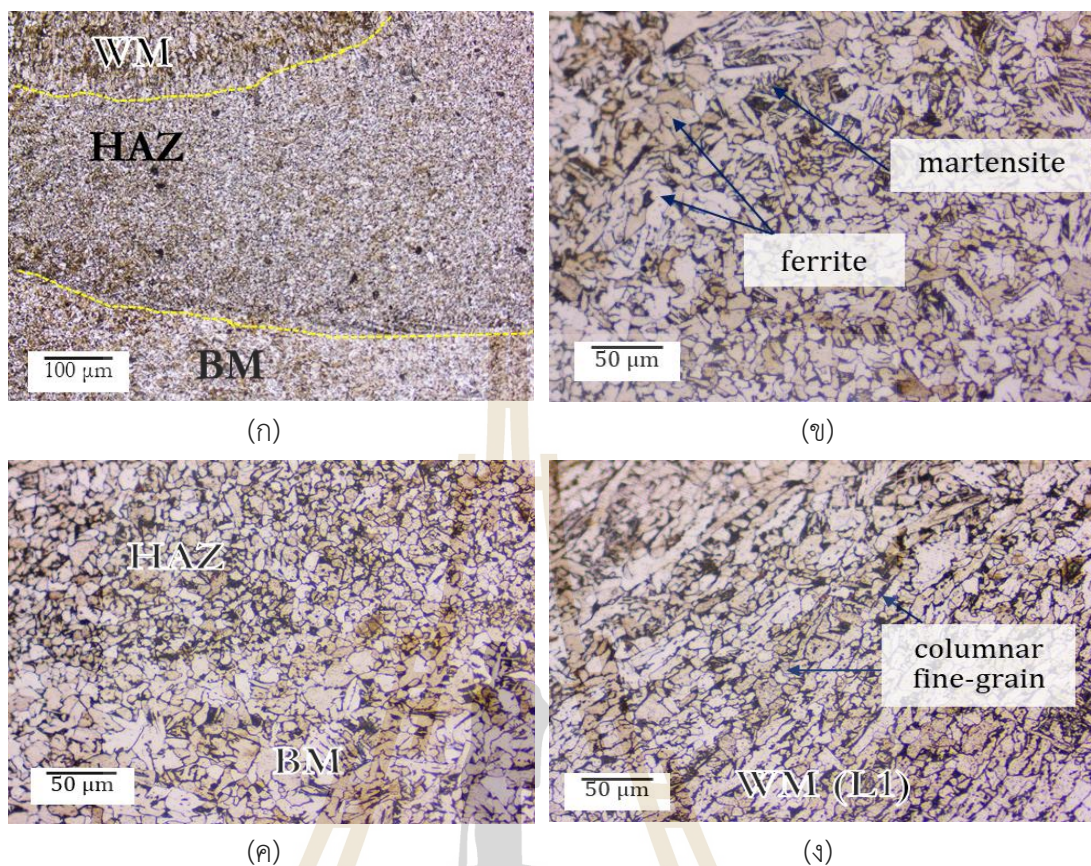
สำหรับการเชื่อมการเชื่อมแม่เหล็กจากการตรวจสอบของแนวเชื่อมที่ยอมรับได้ ลักษณะตามรูปที่ 4.4 (ก) พบว่าไม่มีตำหนิบนผิวหน้า โดยมีความกว้างเฉลี่ยของแนวเชื่อม 10.77 มิลลิเมตร และความสูงเฉลี่ย 4.76 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง พบว่าแนวเชื่อมที่ยอมรับได้คือที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์ และ 130 แอมป์ ลักษณะเป็นตามรูปที่ 4.4(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างมหภาคที่เหมาะสม และการตรวจสอบด้วยสายตาและการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมไม่เหมาะสมเกิดที่กระแสเชื่อม 60 แอมป์ และ 70 แอมป์ ลักษณะตามรูปที่ 4.4(ค) พบตำหนิที่เห็นได้ชัดบนผิวแนวเชื่อม คือ เกิดเม็ดโลหะกระเด็น ซึ่งบ่งชี้ถึงการกระจายความร้อนและการไหลของโลหะหลอมที่ไม่เหมาะสม แนวเชื่อมมีลักษณะนูนและไม่เรียบสม่ำเสมอ อีกทั้งยังพบการซึมลึกไม่เพียงพอและการหลอมไม่ต่อเนื่องระหว่างชั้นแรกและชั้นที่สองส่งผลให้แนวเชื่อมมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้ยากต่อการวัดความกว้างและความสูงของแนวเชื่อมอย่างแม่นยำ ลักษณะแสดงตามโครงสร้างมหภาคตามรูปที่ 4.4 (ง)



รูปที่ 4.4 ลักษณะของแนวเชื่อมและโครงสร้างมหภาคการเชื่อมแม่เหล็ก (ก) แนวเชื่อมที่ยอมรับได้ (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์) (ข) โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับได้ (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์) (ค) แนวเชื่อมที่ยอมรับไม่ได้ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) และ (ง) โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับไม่ได้ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)

โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับได้จากการเชื่อมแม่เหล็ก คือที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์ และ 130 แอมป์ แสดงลักษณะที่แตกต่างกันในบริเวณเนื้อเชื่อม และบริเวณที่ได้รับความร้อน โดยในบริเวณเนื้อเชื่อม โดยที่ชั้นแรกพบโครงสร้างเกรนแบบคอลัมน์ ที่มีลักษณะละเอียด ขณะที่ในชั้นที่สองพบว่าเกรนมีลักษณะหยาบมากขึ้น อันเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของเกรนภายใต้ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น (Yan et al., 2017; Petersen, 1973; Tsuchiya et al., 2011; Ohno et al., 2013)

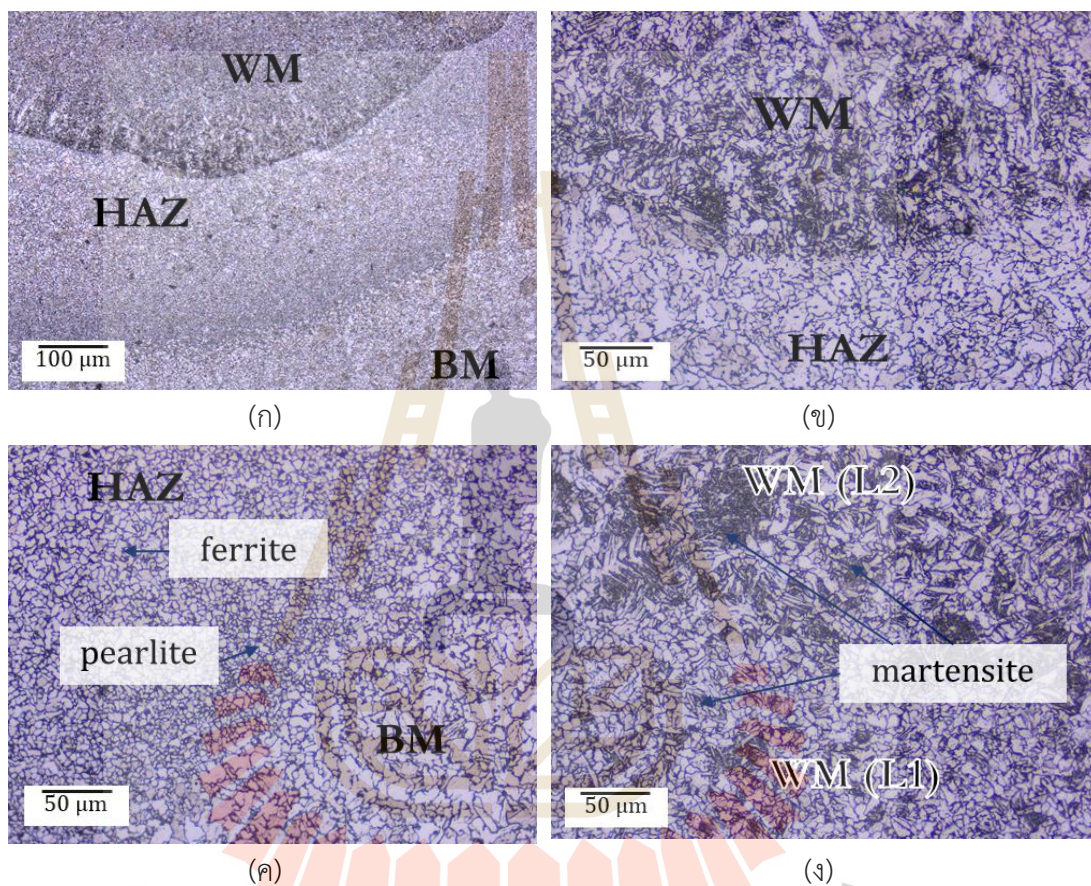
สำหรับบริเวณผลกระทบร้อนซึ่งอยู่ระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน พบโครงสร้างเฟอร์ไรต์-มาร์เทนไซต์ ที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งสูงกว่าโลหะฐาน (Das & Chattopadhyay, 2009; Zhang et al., 2016) ในขณะที่โลหะฐาน (Base Metal, BM) ยังคงรักษาโครงสร้างเพิร์ลไลต์และเฟอร์ไรต์ดั้งเดิม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ที่มีความแข็งและความเหนียวในระดับปานกลาง (Wibowo, 2021; Zhang et al., 2016) จากการวิเคราะห์ดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่าการใช้กระแสเชื่อมที่ 110 A และ 130 A เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการได้แนวเชื่อมที่ยอมรับได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เหมาะสม



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับได้ของการเชื่อมแม่เหล็ก (กระแสไฟฟ้า 110 และ 130 แอมป์) (ก) บริเวณของโลหะเชื่อม (WM), บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ), และโลหะฐาน (BM) (ข) บริเวณ HAZ (ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและโลหะฐาน และ (ง) บริเวณเนื้อเชื่อม

การตรวจสอบด้วยสายตาร่วมกับการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ยอมรับไม่ได้ที่กระแสไฟฟ้า 60 แอมป์ และ 70 แอมป์ พบว่าในบริเวณเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.6(ง) ชั้นแรกมีโครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์-มาร์เทนไซต์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างการเชื่อม ส่งผลให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง ส่วนในชั้นที่สองพบโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีความแข็งแรงสูงแต่เปราะง่าย จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยแตกหรือการเสียรูปเมื่อใช้งานจริง การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ยังพบความไม่สม่ำเสมอระหว่างชั้น ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงโดยรวมของแนวเชื่อม สำหรับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แสดงโครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์-เฟอร์ไรต์ (Das & Chattopadhyay, 2009; Zhang et al., 2016; Wibowo, 2021; Ghorabaei & Banadkouki, 2017; Shibata et al., 2013) โดยเฉพาะบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและเนื้อเชื่อมพบ

เกรนที่มีขนาดละเอียด ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งในบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค ร่วมกับการตรวจสอบด้วยตาเปล่า ยืนยันว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 60 แอม และ 70 แอมแปร์ ไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมที่มีคุณภาพ เนื่องจากตรวจพบข้อบกพร่องในแนวเชื่อมหลายประการ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค) และ 4.4(ง)



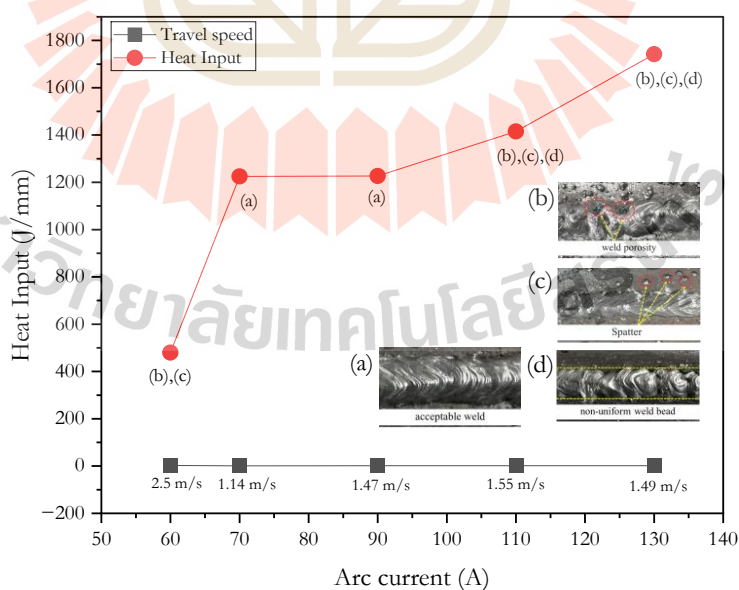
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ยอมรับไม่ได้ของการเชื่อมแม่เหล็ก (กระแสไฟฟ้า 60, 70 และ 90 แอมป์) (ก) บริเวณของโลหะเชื่อม, บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และโลหะฐาน (BM) (ข) บริเวณบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณโลหะฐาน (ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและบริเวณโลหะฐาน และ (ง) บริเวณเนื้อเชื่อม (WM)

## 4.2 ความเร็วในการเชื่อม ปริมาณความร้อน และอัตราการเจือจาง

ผลการคำนวณความเร็วในการเชื่อมในหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ใช้เพื่อระบุอัตราการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมไปตามแนวเชื่อม ในการศึกษาพบว่าช่วงเชื่อมมีการปรับเปลี่ยนความเร็วในการเดินลวดเชื่อมและตามระดับกระแสไฟฟ้า โดยผลการคำนวณดังนี้

### 4.2.1 การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

ในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น ช่วงเชื่อมจะปรับความเร็วในการเดินลวดให้เหมาะสม ส่งผลให้ความเร็วในการเชื่อมแตกต่างกันในแต่ละระดับกระแสไฟ แรงดันไฟฟ้าถูกควบคุมให้คงที่ที่ 20 โวลต์ ดังนั้นค่าความร้อนที่ป้อนเข้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของรอยเชื่อม จึงเปลี่ยนแปลงตามระดับกระแสไฟฟ้า คือ ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้แนวเชื่อมยอมรับได้ คือ ที่ 70 แอมป์ มีค่าความร้อนที่ป้อนเข้าเฉลี่ย 1,225.00 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 1.4 m/s) ที่ 90 แอมป์ เท่ากับ 1,227.00 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 1.47 m/s) และให้รอยเชื่อมยอมรับไม่ได้ คือที่ 60 แอมป์ ค่าความร้อนที่ป้อนเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 480.00 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 2.50 m/s) ที่ 110 แอมป์ เท่ากับ 1,415.33 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 1.55 m/s) ที่ 130 แอมป์ เท่ากับ 1,742.00 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 1.49 m/s) เกิดข้อบกพร่องคือเกิดรูอากาศ เกิดเม็ดโลหะ และรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความร้อนที่ป้อนเข้าในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.1



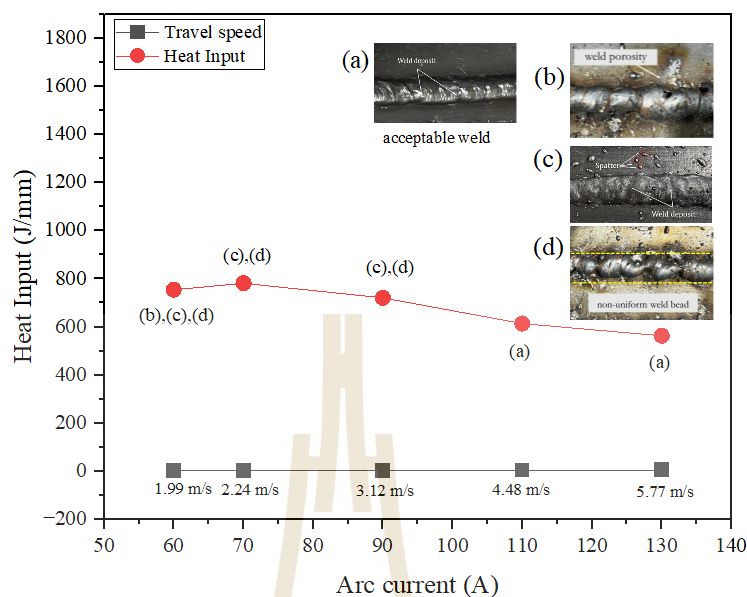
รูปที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้ากับความร้อนที่ป้อนเข้าชิ้นงานเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

ตารางที่ 4.1 ผลของการคำนวณค่าความเร็วในการเชื่อม ปริมาณความร้อน และอัตราการเจือจางของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

Arc current (A)	Arc voltage (V)	Average		
		Travel speed (mm/s)	Heat Input (J/mm)	% Dilution
60	20	2.5	480.00	NA
70	20	1.4	1,225.00	35.71
90	20	1.47	1,227.00	39.06
110	20	1.55	1,415.33	NA
130	20	1.49	1,742.00	NA

#### 4.2.2 การเชื่อมแม่เหล็ก

สำหรับการเชื่อมแม่เหล็กพบว่า ความเร็วในการเชื่อมกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างอาร์กเชื่อมกับชิ้นงาน ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมนี้กำหนดแรงดันอาร์กคงที่ที่ 25 โวลต์ พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานจะลดลง โดยที่แนวเชื่อมที่ไม่เหมาะสมกระแสที่ 60, 70 และ 90 แอมป์ และแนวเชื่อมที่ยอมรับได้คือที่กระแสไฟฟ้าที่ 110 และ 130 แอมป์ มีค่าความร้อนที่ป้อนเข้าเฉลี่ย 614.17 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 4.48 m/s) และ 563.33 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 5.77 m/s) และที่กระแสไฟฟ้าที่ให้แนวเชื่อมยอมรับไม่ได้คือที่ 60 แอมป์ เท่ากับ 755.00 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 1.99 m/s) ที่ 70 แอมป์ เท่ากับ 781.67 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 2.24 m/s) และที่ 90 แอมป์ เท่ากับ 721.15 J/mm (ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม = 3.12 m/s) แสดงในรูปที่ 4.8 ในส่วนของอัตราการเจือจาง ซึ่งบ่งบอกถึงระดับการผสมกันระหว่างโลหะฐานและลวดเชื่อม พบว่าไม่สามารถวัดค่าได้ในกรณีของกระแสต่ำ (60–90A) เนื่องจากแนวเชื่อมมีการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างชั้นแรกและชั้นที่สอง อย่างไรก็ตามที่กระแสสูงขึ้น 110 แอมป์ และ 130 แอมป์ พบค่าร้อยละการเจือจางที่ร้อยละ 78.36 และร้อยละ 77.19 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการผสมกันอย่างดีของโลหะเชื่อมและโลหะฐาน ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าการใช้กระแสเชื่อมที่สูงขึ้นสามารถส่งเสริมการหลอมรวมและการเชื่อมประสานระหว่างชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น ผลสรุปตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.8 ค่ากระแสไฟฟ้ากับความร้อนที่ป้อนเข้าชิ้นงานเชื่อมในกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก

ตารางที่ 4.2 ผลของการคำนวณค่าความเร็วในการเชื่อม ปริมาณความร้อน และอัตราการเจือจางของการเชื่อมแม่เหล็ก

Arc current (A)	Arc voltage (V)	Average		
		Travel speed (mm/s)	Heat Input (J/mm)	% Dilution
60	25	1.99	755.00	NA
70	25	2.24	781.67	NA
90	25	3.12	721.15	NA
110	25	4.48	614.17	78.36
130	25	5.77	563.33	77.19

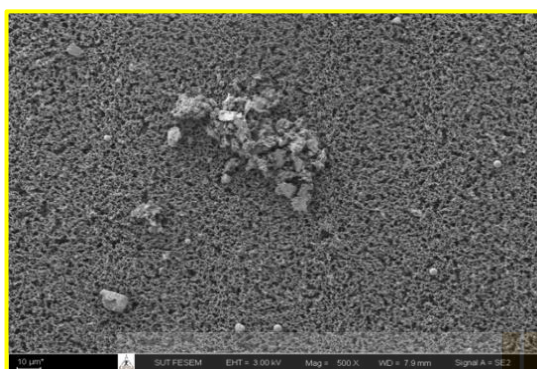
จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงค่ากระแสไฟฟ้ากับความร้อนที่ป้อนเข้าชิ้นงานเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือและการเชื่อมแม่เหล็ก พบว่า เมื่อความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมปริมาณและปริมาณการเกิดฟิวโลหะ เมื่อค่าความร้อนมีแนวโน้มเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นปริมาณการเกิดฟิวโลหะจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย

### 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟุ่มโลหะ

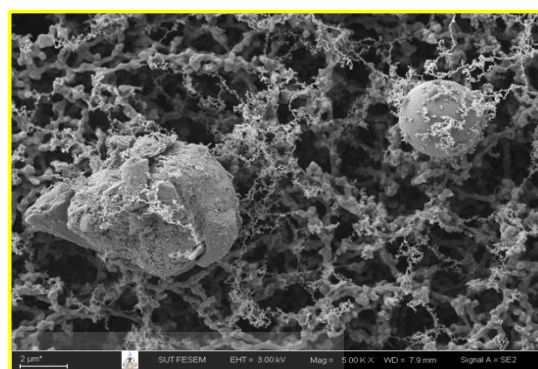
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟุ่มโลหะ ที่เก็บจากตัวอย่างอากาศได้รับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปล่อยอิเล็กตรอนชนิด (FE-SEM) ที่แรงดันไฟฟ้า 10 keV โดยการนำกระดาษกรองที่มีตัวอย่างฟุ่มโลหะมาวิเคราะห์ทำให้เห็นลักษณะต่างๆ ของฟุ่มโลหะหลายรูปแบบ

กระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือพบลักษณะของฟุ่มโลหะหลายรูปแบบ โดยมีลักษณะตามรูปที่ 4.9 ได้แก่ รูป (ก) รูปร่างรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerated shapes) รูป (ข) รูปร่างทรงกลมและรูปร่างที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Spherical and agglomerated shapes) รูปร่างทรงกลมและพื้นผิวเรียบนี้เกิดจากการควบแน่นของไอโลหะที่หลอมละลายใหม่ ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงที่มีอาร์คไฟฟ้าระหว่างการเชื่อม โดยเฉพาะจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างอาร์คและลวดเชื่อม อนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก (Ultrafine) โดยมีลักษณะคล้ายเกรนของน้ำโลหะ รูป (ค) รูปร่างเรียบและกลม (Smooth, Spherical shapes) และรูป (ง) รูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shapes) พบว่าอนุภาคฟุ่มโลหะมีลักษณะรวมตัวกันและมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเมื่อเทียบกับอนุภาคทรงกลม นอกจากนี้ยังพบลักษณะรูปร่างแบบแผ่น (Plate-like) ตามที่เห็นในรูปที่ 4.11(ข) ซึ่งแสดงถึงการเกิดขึ้นของสารประกอบออกไซด์ของโลหะหรือสารประกอบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วย รวมทั้งกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก พบแบบเกาะกลุ่มเป็นก้อน แบบกลมเรียบ (Smooth spherical) และแบบไม่สม่ำเสมอลักษณะตามรูปที่ 4.11

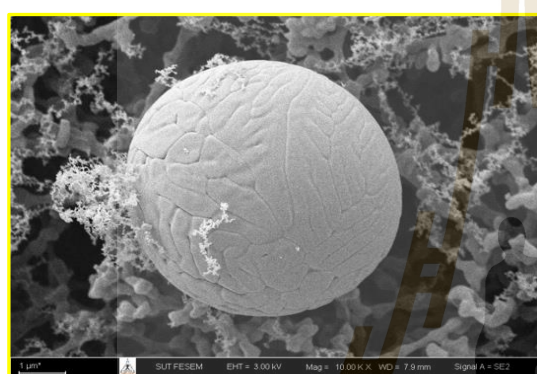
นอกจากนี้ตามรูปที่ 4.10 เป็นลักษณะของฟุ่มโลหะจากการเชื่อมประเภทอาร์กโลหะด้วยมือบนกระดาษกรองชนิด MCE กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงผ่าน (Bright Field Optical Microscope) จะสังเกตเห็นลักษณะการกระจายตัวของฟุ่มโลหะที่ถูกดูดเข้า โดยจะมีการกระจายตัวบนกระดาษกรองที่มีลักษณะขนาดที่แตกต่างกัน และมีองค์ประกอบของการเชื่อมในควันเชื่อม เช่น จากรอยไหม้หรือจากสแล็กที่ปกคลุมแนวเชื่อม



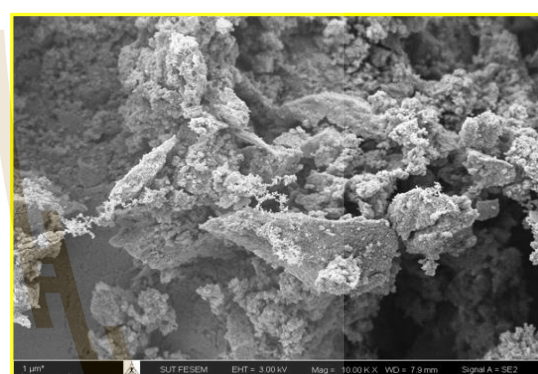
(ก)



(ข)



(ค)

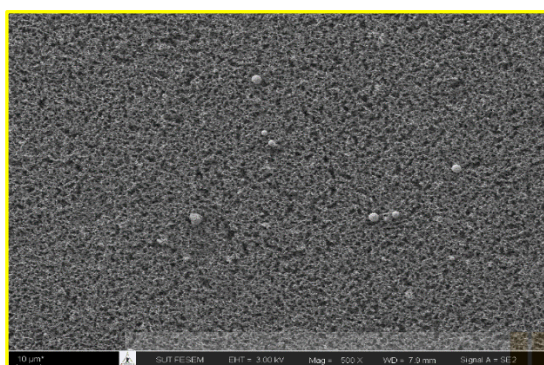


(ง)

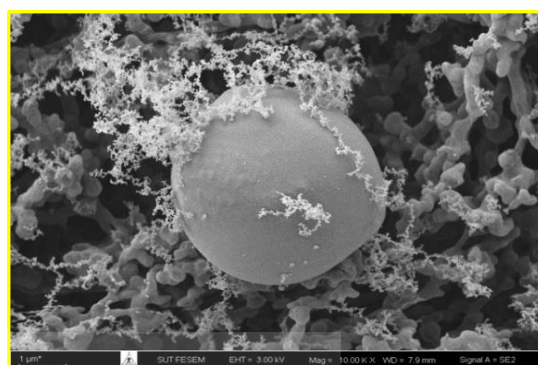
รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของฟุ้งโลหะจากการเชื่อมประเภทอาร์กโลหะด้วยมือ (ก) รูปร่างรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) (ข) รูปร่างทรงกลมและรูปร่างที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์) (ค) รูปร่างเรียบและกลม (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) และ (ง) รูปร่างไม่สม่ำเสมอ (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์)



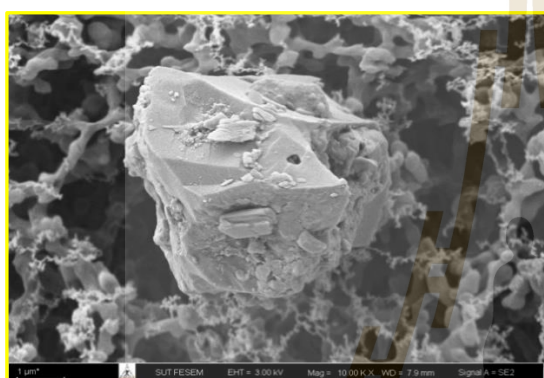
รูปที่ 4.10 ลักษณะฟุ้งโลหะจากการเชื่อมประเภทอาร์กโลหะด้วยมือ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)



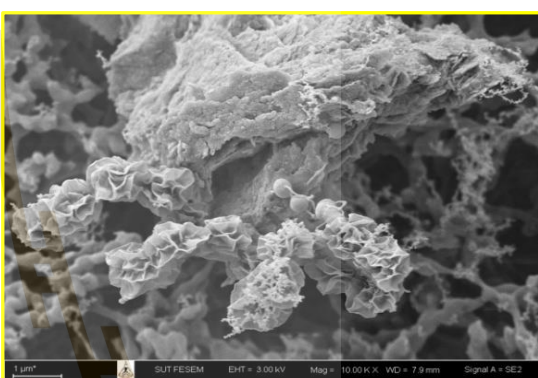
(ก)



(ข)



(ค)

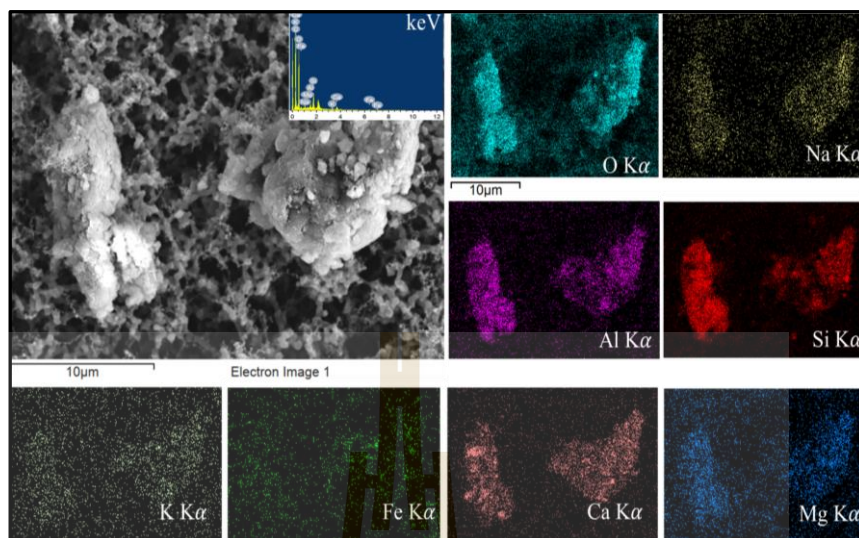


(ง)

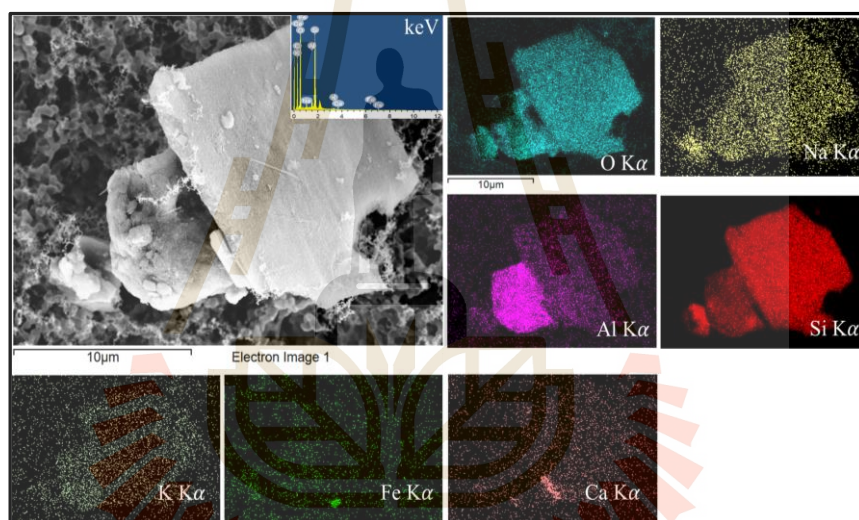
รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของฟุ้งโลหะของการเชื่อมประเภทแม่เหล็ก (ก) รูปร่างทรงกลม (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) (ข) รูปร่างทรงกลม (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) (ค) เกาะกลุ่มเป็นก้อน (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์) และ (ง) รูปร่างไม่สม่ำเสมอ (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์)

#### 4.4 การกระจายตัวของธาตุฟุ้งโลหะ

การกระจายของธาตุต่างๆ ได้รับการวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์พลังงานรังสีเอกซ์ (FESEM-EDS) โดยใช้แรงดันเร่ง 10 keV เพื่อให้สามารถตรวจพบได้ทั้งธาตุเบาและธาตุหนัก การวิเคราะห์นี้ใช้โหมดสแกนแบบพื้นที่ (Area scan) พบว่า มีการกระจายตัวของธาตุตามรูปที่ 4.12 เป็นฟุ้งโลหะที่พบบนกระดาดทรงกรงที่เก็บตัวอย่างจากการเชื่อมประเภทอาร์กโลหะด้วยมือ เป็นฟุ้งโลหะที่มีรูปร่างที่จับกันเป็นก้อน ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้แนวเชื่อมยอมรับได้ คือที่ 70 แอมป์ และฟุ้งโลหะที่เป็นแผ่น (Plate-like shapes) ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้แนวเชื่อมยอมรับไม่ได้คือที่ 110 แอมป์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของธาตุของฟุ่มโลหะการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (ก) ฟุ่มโลหะที่จับกันเป็นก้อน (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) และ (ข) ฟุ่มโลหะที่เป็นแผ่น (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์)

ผลของสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ SEM-EDS แสดงในตารางที่ 4.3 โดยพบว่าฟุ่มโลหะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ โดยฟุ่มโลหะที่มีรูปร่างจับกันเป็นก้อน (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) ซึ่งให้รอยเชื่อมยอมรับได้ ตามรูปที่ 4.11 (ก) พบว่ามีออกไซด์ของธาตุเป็นองค์ประกอบหลัก (36.80 wt.%) และมีธาตุอื่นๆ ได้แก่ Fe (5.19 wt.%), Si (3.52 wt.%), Ca (2.19 wt.%), Al (1.07 wt.%), K (0.28 wt.%) และ Na (0.24 wt.%) ตามรูปที่ 4.11 (ข) ฟุ่มโลหะที่เป็นแผ่น (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์) ซึ่งให้รอยเชื่อมยอมรับไม่ได้ พบว่าออกไซด์ยังเป็นองค์ประกอบหลัก

เช่นกัน (41.91 wt.%) และมีธาตุอื่นๆ ได้แก่ Si (16.85 wt.%), Fe (3.81 wt.%), Al (1.42 wt.%), Na (0.43 wt.%), K (0.52 wt.%) และ Ca (0.33 wt.%) ซึ่งองค์ประกอบธาตุในบริเวณนี้คล้ายคลึงกับบริเวณรอยเผาไหม้ของการเชื่อม ตามรูปที่ 4.15 นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณคาร์บอนมีค่าสูงกว่าองค์ประกอบอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบคาร์บอนในฟุ่มโลหะที่จับกันเป็นก้อนที่ 49.72 wt.% และในฟุ่มโลหะรูปแบบแผ่นที่ 34.72 wt.% ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการเผาไหม้ของวัสดุต่างๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงระหว่างกระบวนการเชื่อม ส่งผลให้เกิดฟุ่มโลหะที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุองค์ประกอบอื่น ๆ

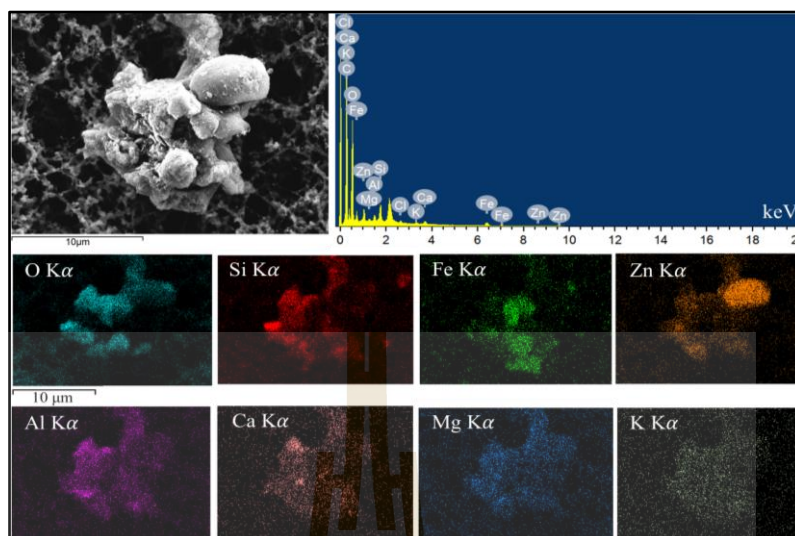
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของฟุ่มโลหะจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

ฟุ่มโลหะ	EDS Sum spectrum (Wt.%)								
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Fumes (Agglomerated shape)	49.72	36.80	0.24	0.28	1.07	3.52	0.28	2.91	5.19
Fumes (Plate-like shape)	34.72	41.91	0.43	--	1.42	16.85	0.52	0.33	3.81

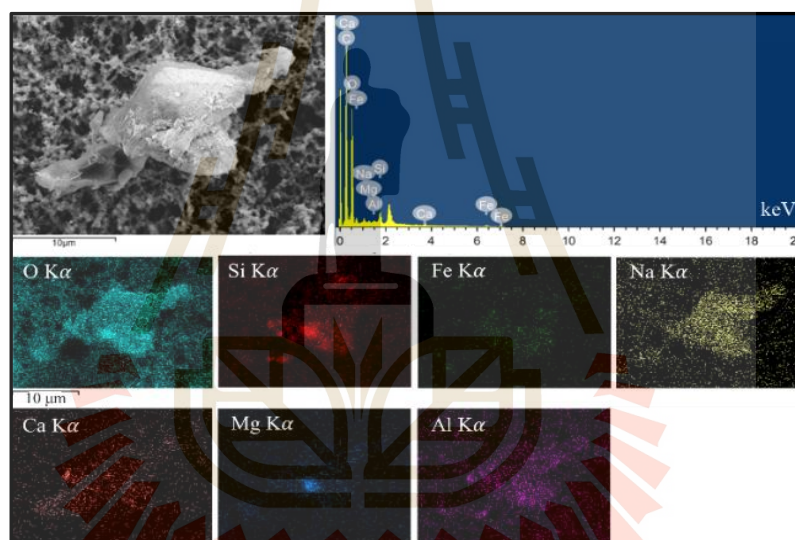
ตามรูปที่ 4.13 เป็นฟุ่มโลหะที่พบบนกระดาดากรองจากการเชื่อมแม่เหล็ก เป็นฟุ่มโลหะรูปร่างที่จับกันเป็นก้อนและฟุ่มโลหะที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ มีองค์ประกอบธาตุและค่าเฉลี่ยสเปกตรัมตามตารางที่ 4.4 พบว่า รูป 4.12 (ก) ฟุ่มโลหะรูปร่างที่จับกันเป็นก้อน (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) ให้รอยเชื่อมยอมรับไม่ได้ พบออกไซด์ยังเป็นองค์ประกอบหลัก (29.31 wt.%) และมีธาตุอื่นๆ ได้แก่ Mg (0.24 wt.%) Al (0.66 wt.%) Si (2.06 wt.%) K (0.46 wt.%) Ca (1.29 wt.%) Fe (5.19 wt.%) และ Zn (2.44 wt.%) และรูป 4.12 (ข) ฟุ่มโลหะรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์) ให้รอยเชื่อมยอมรับได้พบออกไซด์ยังเป็นองค์ประกอบหลัก (37.25 wt.%) และมีธาตุอื่นๆ ได้แก่ Si (1.56 wt.%) Fe (8.98 wt.%) Na (0.64 wt.%) Mg (0.26 wt.%) และ Al (0.26 wt.%)

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของฟุ่มโลหะจากการเชื่อมแม่เหล็ก

ฟุ่มโลหะ	EDS Sum spectrum (Wt.%)									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Zn
Fumes (Agglomerated shape)	51.25	29.31	-	0.24	0.66	2.06	0.46	1.29	5.19	2.44
Fumes (Irregular shapes)	50.29	37.25	0.64	0.26	0.26	1.56	-	0.76	8.98	-



(ก)



(ข)

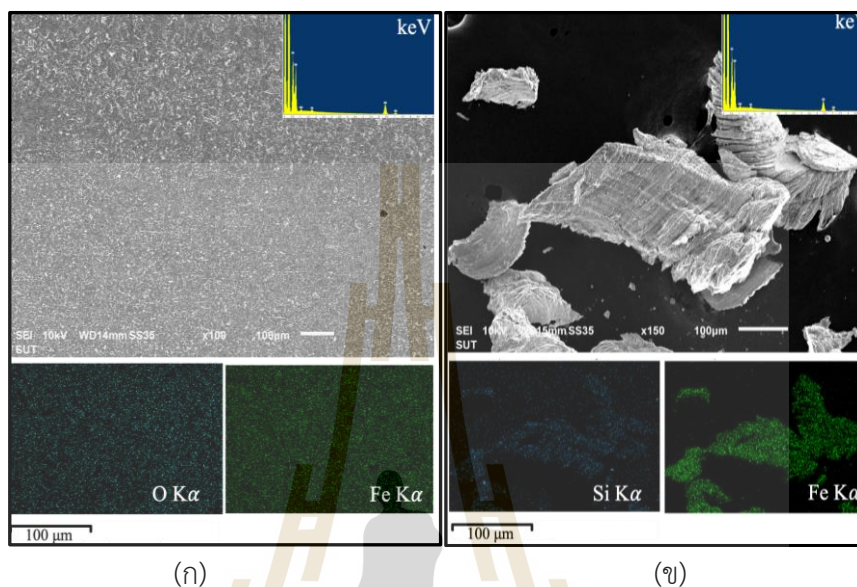
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของธาตุของฟุ่มโลหะการเชื่อมแม็ก (ก) ฟุ่มโลหะที่จับกันเป็นก้อน (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์) และ (ข) ฟุ่มโลหะที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์)

#### 4.5 การกระจายตัวของธาตุขององค์ประกอบการเชื่อม

##### 4.5.1 การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

การกระจายตัวของธาตุจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบที่เกิดจากการเชื่อมประเภทอาร์กโลหะด้วยมือ พบว่า บริเวณเนื้อเชื่อมที่ตัด (Cross-sectional weld area) และบริเวณเนื้อเชื่อม

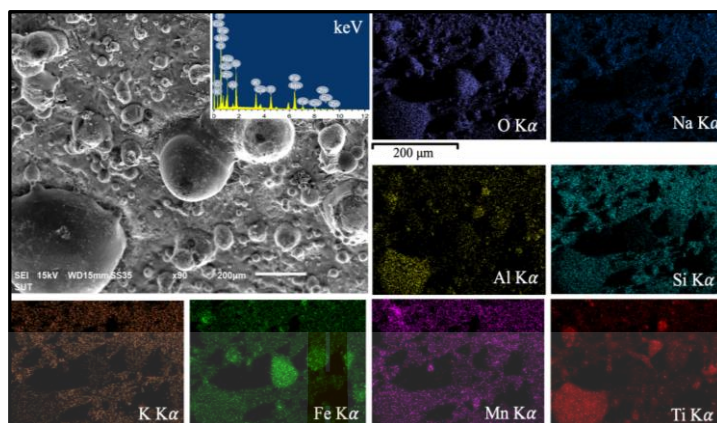
รูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) ผลการวิเคราะห์พบว่าเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสัดส่วน 90.65 wt.% และ 76.80 wt.% ตามลำดับ



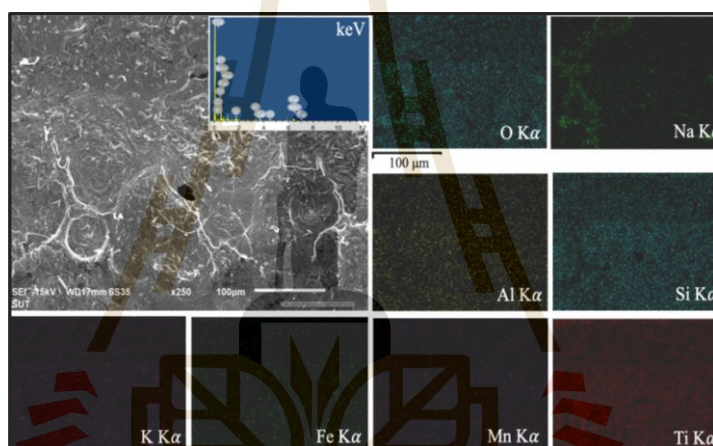
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของธาตุขององค์ประกอบการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือที่กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์ (ก) บริเวณเนื้อเชื่อมที่ตัด และ (ข) บริเวณเนื้อเชื่อม

บริเวณรอยไหม้ที่เกิดจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก (47.27 wt.%) โดยพบธาตุ Ti มากที่สุด (30.84 wt.%) รองลงมาคือ Fe (6.30 wt.%) Si (3.89 wt.%) Mn (3.72 wt.%) Na (1.92 wt.%) และ Al (1.71 wt.%) ตามลำดับ

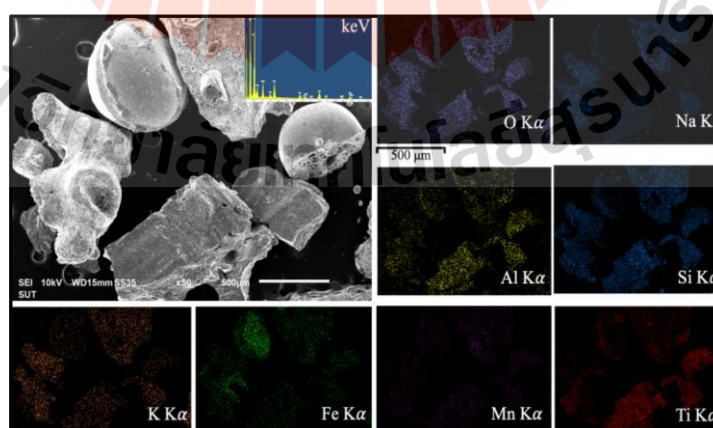
สำหรับสแล็กที่ปกคลุมแนวเชื่อม ถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง พบว่า สแล็กด้านหน้า ลักษณะตามรูปที่ 4.15 มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยออกไซด์ (40.30 wt.%) และมีองค์ประกอบธาตุ Na (5.87 wt.%) Al (0.69 wt.%) Si (6.36 wt.%) K (4.11 wt.%) Ca (1.37 wt.%) Ti (7.90 wt.%) Mn (6.93 wt.%) และ Fe (23.18 wt.%) และสแล็กด้านหลัง ลักษณะตามรูปที่ 4.16 มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยออกไซด์ (45.10 wt.%) และมีองค์ประกอบธาตุ Na (3.22 wt.%) Al (2.49 wt.%) Si (9.39 wt.%) K (2.60 wt.%) Ca (2.16 wt.%) Ti (21.53 wt.%) Mn (5.74 wt.%) และ Fe (5.60 wt.%)



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของธาตุของเมล็ดด้านหน้า (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของธาตุของเมล็ดด้านหลัง (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)



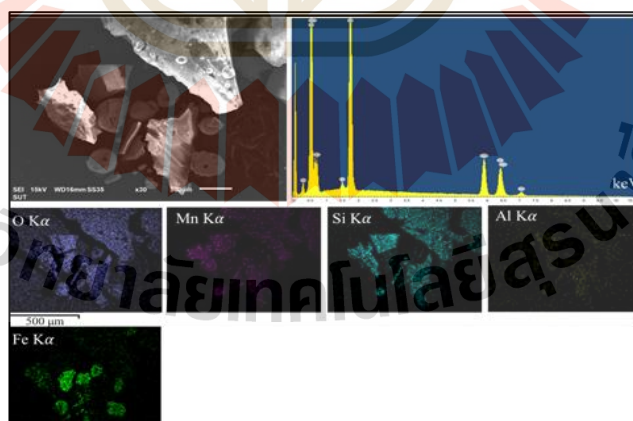
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของธาตุของรอยไหม้ (กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์)

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมขององค์ประกอบจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

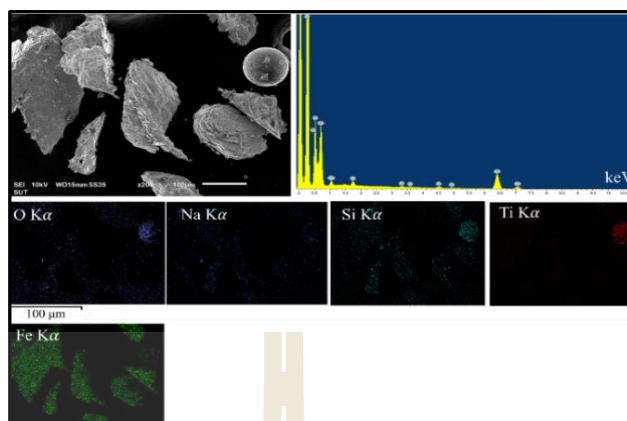
บริเวณ	EDS Sum spectrum (Wt.%)										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe
(1) สลักด้านหน้า	3.29	40.30	5.87	--	0.69	6.36	4.11	1.37	7.90	6.93	23.18
(2) สลักด้านหลัง	2.17	45.10	3.22	--	2.49	9.39	2.60	2.16	21.53	5.74	5.60
(3) รอยไหม้	1.41	47.27	1.92	0.20	1.71	3.89	1.75	1.00	30.84	3.72	6.30
(4) เนื้อเชื่อมตัดขวาง	1.20	8.15	--	--	--	--	--	--	--	--	90.65
(5) เนื้อเชื่อม	--	21.81	0.76	--	--	0.56	--	--	--	--	76.80

#### 4.5.2 การเชื่อมแม่เหล็ก

การกระจายตัวของธาตุจากการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เกิดจากการเชื่อมประเภทแม่เหล็ก แบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ รอยไหม้ และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า รอยไหม้ ตามรูป 4.18 มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยออกไซด์ (57.38 wt.%) และมีองค์ประกอบธาตุ Al (0.76 wt.%) Si (19.04 wt.%) Mn (13.0 wt.%) และ Fe (6.06 wt.%) และบริเวณเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.19 มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยออกไซด์ (14.74 wt.%) และมีองค์ประกอบธาตุ Si (1.24 wt.%) K (0.55 wt.%) Ti (1.65 wt.%) และพบเหล็กมากที่สุด Fe (80.21 wt.%)



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของธาตุของรอยไหม้ของการเชื่อมแม่เหล็ก (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์)



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของธาตุของบริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมแม่เหล็ก (กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์)

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมขององค์ประกอบจากการเชื่อมแม่เหล็ก

บริเวณ	EDS Sum spectrum (Wt.%)										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe
(1) รอยไหม้	3.76	57.38	-	-	0.76	19.04	-	-	-	13.0	6.06
(2) เนื้อเชื่อม	-	14.74	1.61	-	-	1.24	0.55	-	1.65	-	80.21

#### 4.6 ปริมาณความเข้มข้นของฟุ้งโลหะ

ฟุ้งโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ถูกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค(ICP-MS) องค์ประกอบของฟุ้งโลหะถูกวิเคราะห์ตามวิธีของ NIOSH Method#7200 โดยมุ่งวิเคราะห์ปริมาณของธาตุ Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn และ Zn การศึกษาครอบคลุมช่วงกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 60 - 130 แอมป์ โดยพบว่าความเข้มข้นของฟุ้งโลหะของการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือดังแสดงตามตารางที่ 4.8 และค่าพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อมระหว่างการเชื่อมคือ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 45-46 อุณหภูมิในช่วง 33.00-33.17°C ความดันบรรยากาศอยู่ระหว่าง 758.00-759.00 mmHg และความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.07-0.17 m/s

สำหรับการเชื่อมด้วยกระบวนการอาร์กโลหะด้วยมือเกิดฟุ้งโลหะสูงสุดพบในช่วงกระแสไฟฟ้าระหว่าง 110 แอมป์ และ 130 แอมป์ ซึ่งเป็นช่วงที่ให้แนวเชื่อมยอมรับไม่ได้ โดยที่ 110 แอมป์ โดยมีความเข้มข้นฟุ้งรวมที่ 18.48 mg/m<sup>3</sup> ธาตุหลักที่พบ ได้แก่ Fe (8.055±0.453 mg/m<sup>3</sup>), Mn (6.547±0.081 mg/m<sup>3</sup>) และ Ni (1.081±0.458 mg/m<sup>3</sup>) ที่ 130 A ความเข้มข้นรวมของฟุ้งอยู่ที่ 12.96 mg/m<sup>3</sup> โดยที่ Fe (7.215±0.678 mg/m<sup>3</sup>) และ Mn (3.881±0.051 mg/m<sup>3</sup>) เป็น

องค์ประกอบหลักที่พบมากที่สุด ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 60 แอมป์ ซึ่งทำให้เกิดรอยเชื่อมที่ยอมรับไม่ได้ โดยผู้วิจัยเลือกใช้เพื่อแสดงสภาวะการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งมักส่งผลให้รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ พบว่า ความเข้มข้นของฟลูมรวมอยู่ที่  $7.34 \text{ mg/m}^3$  โดยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ Fe ( $3.23 \pm 1.035 \text{ mg/m}^3$ ), Ni ( $1.442 \pm 0.465 \text{ mg/m}^3$ ) และ Cu ( $1.162 \pm 0.102 \text{ mg/m}^3$ ) โดยพบว่า ความเข้มข้นของฟลูมโลหะในระดับกระแสต่ำนี้กลับสูงกว่ากระแสไฟฟ้าที่ให้รอยเชื่อมที่เหมาะสม ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เสถียรของอาร์กและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของลวดเชื่อมและโลหะฐาน ทำให้เกิดสะเก็ดไฟมาก และละอองโลหะแตกตัว ซึ่งเพิ่มปริมาณการเกิดฟลูมโลหะ

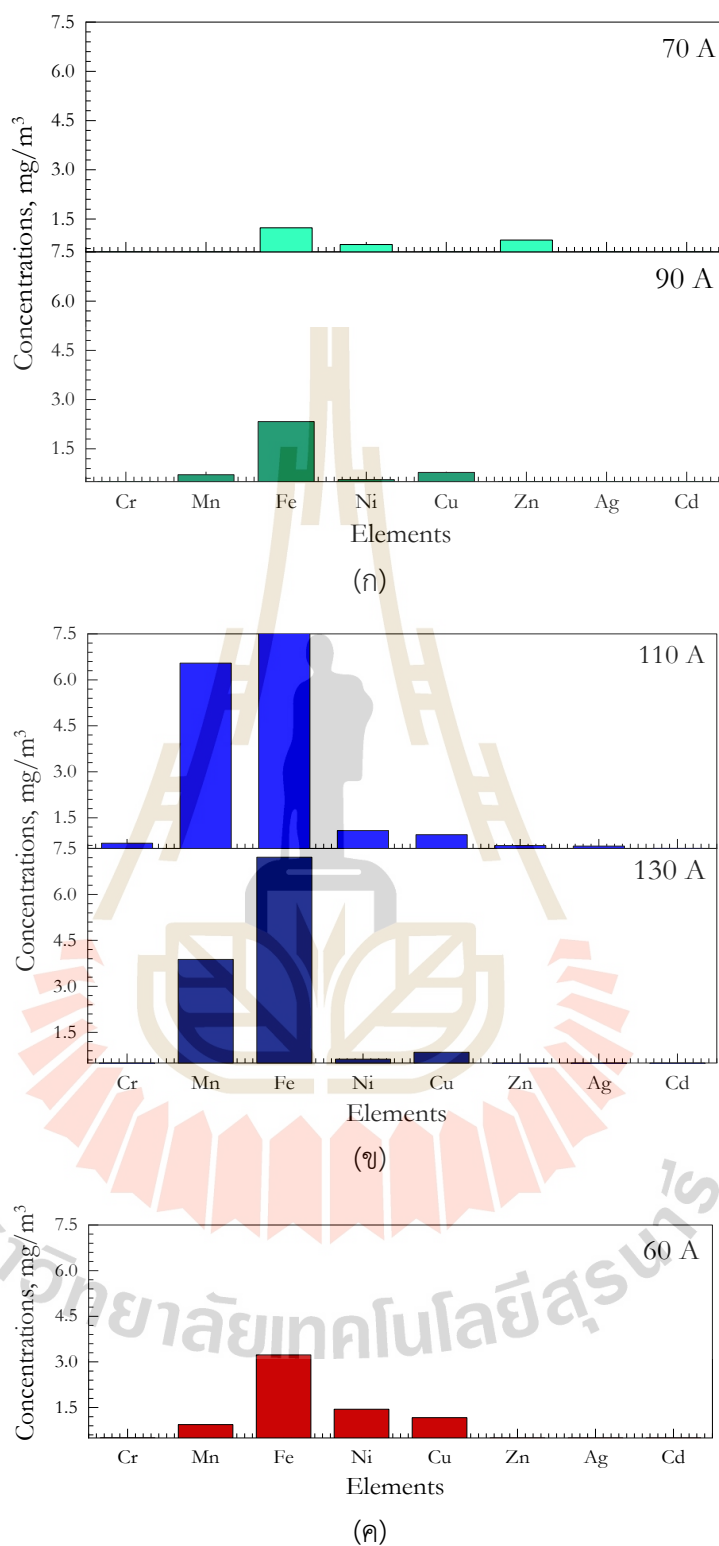
สำหรับช่วงกระแสไฟฟ้าที่ให้แนวเชื่อมยอมรับได้หรือเหมาะสม ที่ใช้กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์ และ 90 แอมป์ ให้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดีและการเกิดฟลูมที่น้อย โดยที่กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์ ความเข้มข้นฟลูมอยู่ที่  $3.96 \text{ mg/m}^3$  โดย Fe ( $1.231 \pm 0.160 \text{ mg/m}^3$ ) เป็นธาตุหลัก รองลงมาคือ Zn ( $0.861 \pm 0.549 \text{ mg/m}^3$ ) และ Ni ( $0.723 \pm 0.158 \text{ mg/m}^3$ ) ส่วนที่กระแสไฟฟ้า 90 แอมป์ ความเข้มข้นฟลูมอยู่ที่ประมาณ  $5.36 \text{ mg/m}^3$  โดย Fe ( $2.33 \pm 0.881 \text{ mg/m}^3$ ) และ Cu ( $0.781 \pm 0.038 \text{ mg/m}^3$ ) เป็นองค์ประกอบหลักตามลำดับ

ผลของการวิเคราะห์ความเข้มข้นขององค์ประกอบธาตุฟลูมโลหะที่พบมากที่สุดเมื่อเฉลี่ยจากทุกระดับกระแสไฟฟ้าของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ได้แก่ Fe ( $4.412 \pm 0.641 \text{ mg/m}^3$ ) ตามด้วย Mn ( $2.481 \pm 0.038 \text{ mg/m}^3$ ) และ Ni ( $0.887 \pm 0.232 \text{ mg/m}^3$ ) การเปรียบเทียบปริมาณฟลูมโลหะตามรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของปริมาณฟลูมที่เกิดขึ้นตามระดับกระแสไฟฟ้าโดยที่ 70 แอมป์ มีปริมาณความเข้มข้นฟลูมโลหะต่ำที่สุด ( $3.96 \text{ mg/m}^3$ ) และให้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพดี ส่วนที่ 90 แอมป์ มีปริมาณความเข้มข้นฟลูมโลหะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น  $5.36 \text{ mg/m}^3$  แต่คุณภาพรอยเชื่อมยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ มีปริมาณความเข้มข้นฟลูมโลหะสูงสุดเกิดที่ 110 แอมป์ ( $18.48 \text{ mg/m}^3$ ) รองลงมาคือ 130 แอมป์ ( $12.96 \text{ mg/m}^3$ ) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดอาร์กกระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานอย่างรุนแรงมากขึ้น ทำให้การเชื่อมรวดเร็วกว่ากระแสไฟฟ้าอื่น ในทางกลับกันที่ 60 แอมป์ ปริมาณฟลูมวัดได้  $7.34 \text{ mg/m}^3$  แต่ได้รอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระดับ 70 และ 90 แอมป์ จะเห็นได้ว่าทั้งกระแสไฟฟ้านี้ให้ปริมาณฟลูมโลหะต่ำกว่าในขณะที่ยังสามารถให้แนวเชื่อมที่ดีและมีคุณภาพของแนวเชื่อมที่ดีกว่า

ตารางที่ 4.7 ปริมาณความเข้มข้นของฟุ้งโลหะการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

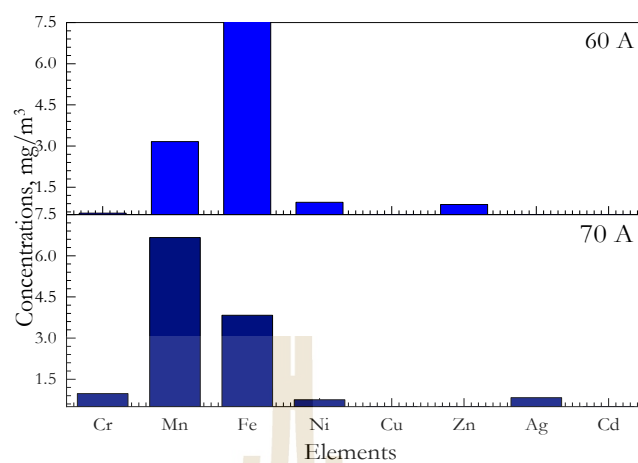
กระแสไฟฟ้า (A)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฟุ้งโลหะ (mg/m <sup>3</sup> )																รวม
	Cr		Mn		Fe		Ni		Cu		Zn		Ag		Cd		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
60	0.487	0.019	0.937	0.009	3.23	1.035	1.442	0.465	1.169	0.102	<0.00	0	0.053	0.011	0.02	0.004	7.34
70	0.337	0.015	0.328	0.033	1.231	0.16	0.723	0.158	0.311	0.018	0.861	0.549	0.144	0.009	0.026	0.007	3.96
90	0.324	0.016	0.711	0.017	2.33	0.881	0.563	0	0.781	0.038	0.481	0.253	0.09	0.059	0.079	0.031	5.36
110	0.669	0.018	6.547	0.081	8.055	0.453	1.081	0.458	0.946	0.14	0.592	0.59	0.576	0.11	0.017	0.006	18.48
130	0.325	0.01	3.881	0.051	7.215	0.678	0.625	0.079	0.848	0.074	<0.00	0	0.021	0.003	0.044	0	12.96
ค่าเฉลี่ย	0.428	0.016	2.481	0.038	4.412	0.641	0.887	0.232	0.811	0.074	0.645	0.278	0.177	0.038	0.037	0.010	--

หมายเหตุ\* ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ 45-46% อุณหภูมิในช่วง 33.00-33.17°C ความดันบรรยากาศอยู่ระหว่าง 758.00-759.00 mmHg และความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.07-0.17 m/s

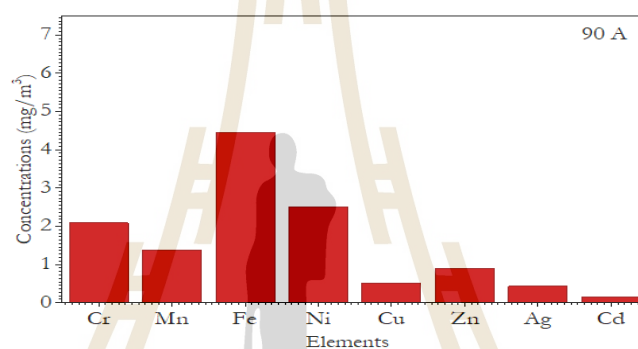


รูปที่ 4.20 ปริมาณความเข้มข้นของพุ่มโลหะของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (ก) กระแสไฟฟ้า 70 และ 90 แอมป์ (ข) กระแสไฟฟ้า 110 และ 130 แอมป์ และ (ค) กระแสไฟฟ้า 60 แอมป์

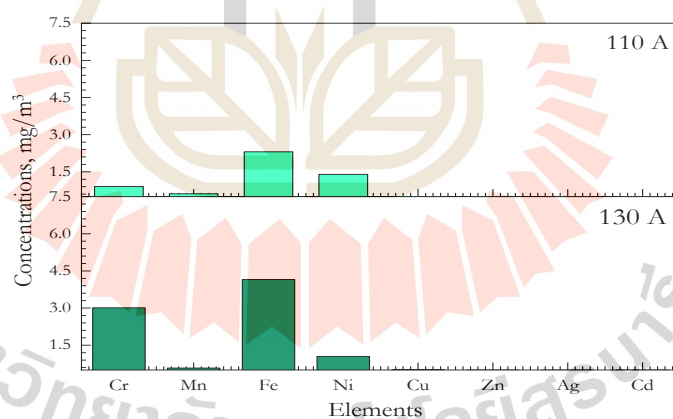
สำหรับฟุ้งโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก พบว่า ฟุ้งโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อม HTW-50 นั้น พบว่าความเข้มข้นของฟุ้งโลหะจากรอยเชื่อมที่ยอมรับไม่ได้คือที่กระแสไฟฟ้า 60 แอมป์ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $14.53 \text{ mg/m}^3$  โดยมีความเข้มข้นขององค์ประกอบธาตุ ได้แก่ Fe ( $8.572 \pm 1.119 \text{ mg/m}^3$ ) Mn ( $3.161 \pm 0.197 \text{ mg/m}^3$ ) Ni ( $0.950 \pm 0.229 \text{ mg/m}^3$ ) เป็นองค์ประกอบหลักตามลำดับ สำหรับกระแส 70 แอมป์ ความเข้มข้นของฟุ้งโลหะรวมเฉลี่ยเท่ากับ  $13.46 \text{ mg/m}^3$  โดยพบความเข้มข้นขององค์ประกอบธาตุของฟุ้งโลหะ ได้แก่ Fe ( $6.666 \pm 1.137 \text{ mg/m}^3$ ), Mn ( $3.833 \pm 0.916 \text{ mg/m}^3$ ) และ Cr ( $0.977 \pm 0.012 \text{ mg/m}^3$ ) และที่กระแสไฟฟ้า 90 แอมป์ ความเข้มข้นของฟุ้งโลหะรวมเฉลี่ยเท่ากับ  $12.29 \text{ mg/m}^3$  โดยพบความเข้มข้นขององค์ประกอบธาตุของฟุ้งโลหะ ได้แก่ Fe ( $4.454 \pm 5.042 \text{ mg/m}^3$ ), Ni ( $2.502 \pm 0.15 \text{ mg/m}^3$ ) และ Cr ( $2.082 \pm 0.098 \text{ mg/m}^3$ ) ในทางตรงกันข้าม รอยเชื่อมที่ยอมรับได้หรือเหมาะสมที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์ พบความเข้มข้นฟุ้งโลหะต่ำสุดคือ  $5.80 \text{ mg/m}^3$  โดยมี Fe ( $2.310 \pm 0.098 \text{ mg/m}^3$ ), Ni ( $1.400 \pm 0.354 \text{ mg/m}^3$ ) และ Cr ( $0.910 \pm 0.038 \text{ mg/m}^3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก สำหรับกระแสไฟฟ้า 130 แอมป์ พบความเข้มข้นฟุ้งโลหะอยู่ที่  $9.98 \text{ mg/m}^3$  โดยความเข้มข้นขององค์ประกอบธาตุของฟุ้งโลหะ ได้แก่ Fe ( $4.151 \pm 1.944 \text{ mg/m}^3$ ) และ Cr ( $3.009 \pm 0.1 \text{ mg/m}^3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.21 ปริมาณความเข้มข้นของฟุมโลหะของการเชื่อมแม่เหล็ก (ก) กระแสไฟฟ้า 60 และ 70 แอมป์ (ข) กระแสไฟฟ้า 90 แอมป์ และ (ค) กระแสไฟฟ้า 110 และ 130 แอมป์

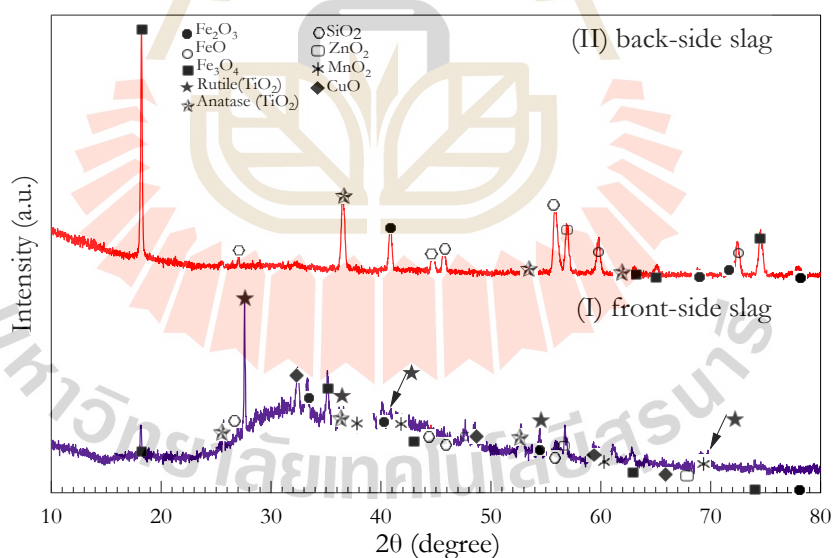
ตารางที่ 4.8 ปริมาณความเข้มข้นของฟุ้งโลหะของการเชื่อมแม่เหล็ก

กระแสไฟฟ้า (A)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฟุ้งโลหะ (mg/m <sup>3</sup> )																รวม
	Cr		Mn		Fe		Ni		Cu		Zn		Ag		Cd		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
60	0.556	0.030	3.161	0.197	8.572	1.119	0.95	0.229	0.366	0.368	0.867	0.011	0.035	0.009	0.026	0.005	14.53
70	0.977	0.012	3.833	0.916	6.666	1.137	0.752	0.120	0.37	0.043	<0.00	<0.00	0.829	0.077	0.019	0.007	13.46
90	2.082	0.098	1.373	0.346	4.454	5.042	2.502	0.15	0.508	0.636	0.9	0.053	0.429	0.053	0.141	0.04	12.39
110	0.910	0.038	0.614	0.240	2.310	0.813	1.400	0.354	0.267	0.24	0.148	0.023	0.057	0.007	0.093	0.044	5.80
130	3.009	0.100	0.577	0.363	4.151	1.944	1.047	0.349	0.511	1.088	0.161	1.157	0.324	0.262	0.201	0.022	9.98
ค่าเฉลี่ย	1.507	0.056	1.912	0.412	5.231	2.011	1.330	0.240	0.404	0.475	0.519	0.311	0.335	0.082	0.096	0.024	--

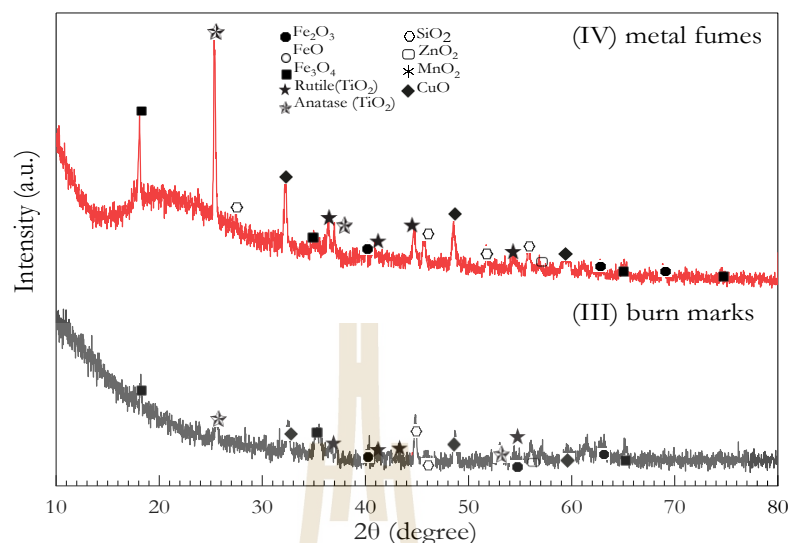
หมายเหตุ\* ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ 44-46% อุณหภูมิในช่วง 32.00-33.00°C ความดันบรรยากาศอยู่ระหว่าง 756.00-757.17 mmHg และความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.07-0.10 m/s

#### 4.7 ออกไซด์ของฟลูมโลหะและองค์ประกอบของการเชื่อม

การวิเคราะห์ออกไซด์ของฟลูมโลหะและองค์ประกอบของการเชื่อมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สำหรับการเชื่อมประเภทอาร์กโลหะด้วยมือถูกนำไปวิเคราะห์โดยมีองค์ประกอบ คือ สลักที่ปกคลุมรอยเชื่อมทั้งด้านหน้าและด้านหลัง รอยไหม้ และฟลูมโลหะ โดยพบว่า มีเฟสของธาตุและออกไซด์ของโลหะที่มีความหลากหลายและซับซ้อนเป็นอย่างมาก โดยที่สลักที่ปกคลุมรอยเชื่อมทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยค่า  $2\theta$  และ Miller indices ของสลักด้านหน้าพบว่า มีฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) โดยแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) รูไทล์ ( $\text{TiO}_2$ ) อะนาเทส ( $\text{TiO}_2$ ) ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) สังกะสีออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) แมงกานีสไดออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) และคอปเปอร์(II) ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) รวมทั้งสลักด้านหลังพบว่ามีฮีมาไทต์เฟอร์ไรต์ออกไซด์ ( $\text{FeO}$ ) แมกนีไทต์ อะนาเทส ซิลิกอนไดออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์ ส่วนบริเวณไหม้ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่ามีฮีมาไทต์ แมกนีไทต์ รูไทล์ อะนาเทส ซิลิกอนไดออกไซด์ และคอปเปอร์(II)ออกไซด์ ซึ่งสารประกอบออกไซด์เหล่านี้ยังตรวจพบในฟลูมโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อม และแสดงลักษณะคล้ายคลึงกับที่พบในร่องรอยการเผาไหม้ที่เกิดจากการอาร์กระหว่างกระแสไฟฟ้ากับลวดเชื่อม RB-26 ตามมาตรฐาน AWS E6013

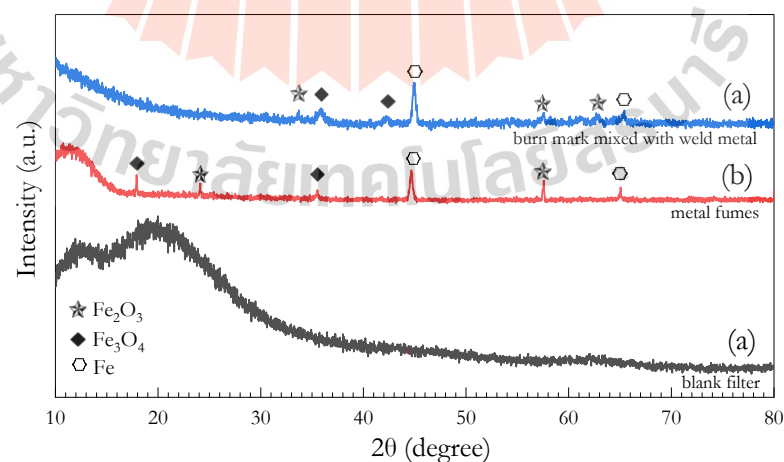


รูปที่ 4.22 เฟสและออกไซด์ของสลักด้านหน้าและสลักด้านหลังการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ



รูปที่ 4.23 เฟสและออกไซด์ของรอยไหม้และฟุ้งโลหะการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

สำหรับการเชื่อมประเภทแม่เหล็กนำไปวิเคราะห์โดยมีองค์ประกอบคือ บริเวณรอยไหม้กับเนื้อเชื่อมและฟุ้งโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก เทียบกับกระตางกรงชนิด MCE โดยที่เฟสของธาตุและออกไซด์ที่พบโดยองค์ประกอบหลักของออกไซด์ฟุ้งโลหะคือ แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ( $2\theta = 18.01^\circ$  (111) และ  $35.66^\circ$  (311) นอกจากนี้ยังตรวจพบฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ( $2\theta = 24.1^\circ$  (012),  $57.59^\circ$  (018), และ  $63.99^\circ$  (300)) สำหรับออกไซด์ที่พบนี้สอดคล้องกับที่รอยไหม้ที่ผสมกับโลหะเชื่อม ซึ่งก็แสดงให้เห็นถึงเฟสของออกไซด์ของโลหะ เช่น แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก (Fe) ตามรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 เฟสและออกไซด์ของบริเวณรอยไหม้กับเนื้อเชื่อมและฟุ้งโลหะการเชื่อมแม่เหล็ก

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

##### 5.1.1 ผลของกระแสไฟฟ้าและการเกิดฟุ้งโลหะของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือในช่วงกระแสไฟฟ้าที่ให้รอยเชื่อมที่ยอมรับได้ที่กระแสไฟฟ้าที่ 70 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุ้งเฉลี่ย =  $3.96 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $1,225 \text{ J/mm}$ ) และ 90 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุ้งเฉลี่ย =  $5.36 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $1,227 \text{ J/mm}$ ) ให้แนวเชื่อมที่ยอมรับได้ มีโครงสร้างแนวเชื่อมโดยมีเกรนแบบคอลัมน์ ขณะที่บริเวณผลกระทบความร้อน แสดงโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์-มาร์เทนไซต์ ซึ่งโครงสร้างนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อน โดยยืนยันจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง มีความเข้มข้นของฟุ้งโลหะที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าที่ทำให้รอยเชื่อมไม่เหมาะสมหรือยอมรับไม่ได้ คือที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุ้งเฉลี่ย =  $18.48 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $1,415.33 \text{ J/mm}$ ) ที่กระแสไฟฟ้า 130 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุ้งเฉลี่ย =  $12.96 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $1,742.00 \text{ J/mm}$ ) โดยข้อบกพร่องในการเชื่อมโดยพบว่ามีฟองอากาศมากเกินไป รอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ และเกิดเม็ดโลหะกระเด็นจำนวนมาก (Kaplan & Powell, 2011) รวมทั้งที่กระแสไฟฟ้า 60 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุ้งเฉลี่ย =  $7.34 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $480 \text{ J/mm}$ ) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำมากเกินไป พบว่าทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะฐานและลวดเชื่อมไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องหรือการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ ยังพบข้อบกพร่องในการเชื่อมคือเกิดฟองอากาศภายในรอยเชื่อมเนื่องจากอุณหภูมิในการเชื่อมไม่เหมาะสม โดยกระแสไฟฟ้าต่ำทำให้ความร้อนไม่เพียงพอ ส่งผลให้ก๊าซไม่สามารถระบายออกจากบ่อหลอมได้อย่างเหมาะสม จึงเกิดฟองอากาศในรอยเชื่อม (Mandal, 2017; Singh et al., 2014)

##### 5.1.2 ผลของกระแสไฟฟ้าและการเกิดฟุ้งโลหะของการเชื่อมแม่เหล็ก

กระบวนการการเชื่อมแม่เหล็กที่กระแสไฟฟ้าที่ให้รอยเชื่อมยอมรับได้ คือ 110 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุ้งเฉลี่ย =  $5.80 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $614.17 \text{ J/mm}$ ) และ 130 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุ้งเฉลี่ย =  $9.98 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $563.33 \text{ J/mm}$ ) ให้แนวเชื่อมที่ยอมรับได้นั้น มีความเข้มข้นของฟุ้งโลหะที่ต่ำกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบกับ การเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าที่ให้รอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสมหรือยอมรับไม่ได้ คือ ที่กระแสไฟฟ้า 70 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุมเฉลี่ย =  $14.53 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $781.67 \text{ J/mm}$ ) ที่กระแสไฟฟ้าที่ 60 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุมเฉลี่ย =  $13.46 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $755.00 \text{ J/mm}$ ) และที่กระแสไฟฟ้าที่ 60 แอมป์ (ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฟุมเฉลี่ย =  $12.39 \text{ mg/m}^3$ , ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเฉลี่ย =  $721.55 \text{ J/mm}$ ) โดยที่เกิดข้อบกพร่องของรอยเชื่อมคือมีฟองอากาศมากเกินไป รอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ และเกิดเม็ดโลหะกระเด็นจำนวนมาก (Kaplan and Powell, 2011) ลักษณะเช่นเดียวกันกับการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ

### 5.1.3 สันฐานวิทยาของฟุมโลหะจากการเชื่อม

สันฐานวิทยาของฟุมโลหะจากการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ และการเชื่อมแม็กนิกมีลักษณะรูปร่างที่คล้ายกัน โดยพบรูปร่างของอนุภาคฟุมโลหะ ได้แก่ รูปร่างรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทรงกลม เรียบ ไม่สม่ำเสมอ ตลอดจนรูปร่างแบบแผ่น นอกจากนี้การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุของฟุมโลหะสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ มีองค์ประกอบการกระจายตัวธาตุฟุมโลหะ ได้แก่ ธาตุเหล็ก แมกนีเซียมและอลูมิเนียม และการเชื่อมแม็กมีองค์ประกอบการกระจายตัวธาตุฟุมโลหะ ได้แก่ ธาตุเหล็ก สังกะสี แมกนีเซียมและอลูมิเนียม

### 5.1.4 ออกไซด์ของฟุมโลหะจากการเชื่อม

ออกไซด์ของฟุมโลหะที่พบสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือมีองค์ประกอบของออกไซด์หลัก ประกอบด้วย เฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) รูไทล์ ( $\text{TiO}_2$ ) และซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และการเชื่อมแม็ก มีองค์ประกอบของออกไซด์หลัก ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็กเป็นหลัก คือ เฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซึ่งการเชื่อมทั้งสองประเภทพบว่าออกไซด์ที่เกิดในฟุมโลหะมีความสัมพันธ์กับบริเวณรอยไหม้ที่เกิดจากแนวเชื่อม

### 5.1.5 อภิปรายผลของการศึกษา

ผลจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ให้ข้อมูลใหม่โดยระบุค่ากระแสไฟเฉพาะที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์กโลหะด้วยมือ คือกระแสไฟฟ้า 70 และ 90 แอมป์ และการเชื่อมแม็ก คือกระแสไฟฟ้า 110 และ 130 แอมป์ เป็นช่วงกระแสไฟฟ้าที่คุณภาพแนวเชื่อมที่เหมาะสมหรือยอมรับได้และยังสามารถลดการเกิดฟุมโลหะที่ผู้เชื่อมรับสัมผัส จึงสามารถเสนอเป็นแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสมในการเชื่อมในภาคอุตสาหกรรมได้ รวมทั้งการระบุพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมถือเป็นสิ่งสำคัญในการปกป้องแรงงานจากการสัมผัสสารอันตราย เนื่องจากการสูดดมฟุมโลหะที่เป็นอันตรายเวลานาน ที่มีความเชื่อมโยงกับปัญหาสุขภาพรุนแรง เช่น การติดเชื้อทางเดินหายใจ ความผิดปกติของปอด โรคทางระบบประสาท การเกิดโรคพาร์กินสัน ตามงานวิจัยของ Antonini, 2003; Mistry,

2015; Taj et al., 2021 รวมทั้งการเกิดมะเร็งซึ่งสะท้อนถึงอันตรายร้ายแรงจากการสัมผัส ตามงานวิจัยของ Riccelli et al., 2020; Jenkins et al., 2005; Honaryar et al., 2018; Loomis et al., 2022 ในด้านเชิงนโยบายงานวิจัยนี้สามารถนำไปสู่ข้อเสนอแนะที่สำคัญ ได้แก่ การให้หน่วยงานกำกับดูแลพิจารณาปรับปรุงมาตรฐานความปลอดภัย โดยรวมพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมที่ระบุไว้ในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะการใช้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับงานเชื่อมที่สามารถลดการเกิดฟุ้งโลหะ รวมถึงให้ความสำคัญกับการตรวจสอบและควบคุมสภาพแวดล้อมในการเชื่อมให้สอดคล้องกับมาตรฐาน เช่น การจัดให้มีระบบระบายอากาศที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้ลดการสัมผัสฟุ้งโลหะที่เป็นอันตรายต่อผู้เชื่อมตามระบบมาตรฐานฝีมือแรงงานของไทย ตลอดจนผู้ปฏิบัติงานตรวจสอบสุขภาพเป็นระยะด้วย

โดยรวมแล้วงานวิจัยนี้นำเสนอข้อเสนอแนะเชิงประจักษ์ในการเพิ่มประสิทธิภาพพารามิเตอร์ของการเชื่อมตามมาตรฐานฝีมือแรงงาน เพื่อยกระดับคุณภาพของแนวเชื่อมและลดการเกิดฟุ้งโลหะอันตราย โดยการระบุกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมช่วยสนับสนุนความปลอดภัยในการทำงาน ส่งเสริมสุขภาพแรงงาน และพัฒนากำลังคนในอุตสาหกรรมของประเทศไทยให้มีทักษะและสุขภาพที่ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลของการวิจัยไปใช้

เพื่อลดโอกาสการรับสัมผัสฟุ้งโลหะที่เป็นอันตรายจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ และการเชื่อมแม้กระทั่งถูกจำลองภายใต้เงื่อนไขในการทดลองของงานวิจัยนี้ที่กำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ทำให้ผลของการวิจัยสนับสนุนการเลือกใช้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ให้แนวเชื่อมสมบูรณ์หรือยอมรับได้จะสามารถช่วยลดการรับสัมผัสฟุ้งโลหะที่เป็นอันตรายจากการเชื่อมของช่างเชื่อมได้

### 5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้พารามิเตอร์ในการเชื่อมในการทดลองคือกระแสไฟฟ้า ดังนั้นในการวิจัยในอนาคตควรมีการทดสอบพารามิเตอร์การเชื่อมอื่น ๆ เช่น ระยะการอาร์ก การเชื่อมพอกชิ้นงาน ตำแหน่งการเชื่อม สภาพแวดล้อม วัสดุที่ใช้แตกต่างกัน เป็นต้น จากการเชื่อมของช่างเชื่อมกลุ่มสาขาอาชีพช่างเชื่อมอุตสาหกรรมตามระบบมาตรฐานฝีมือแรงงานไทย โดยเฉพาะการเชื่อมทิก ที่เป็นอีกสาขาหนึ่งซึ่งอยู่ในกลุ่มสาขาช่างเชื่อมสาขาอาชีพอุตสาหกรรมมาทำการทดลอง การศึกษาออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่และสถานี่งานการเชื่อมตามหลักการด้านการยศาสตร์ เพื่อพัฒนากลยุทธ์แบบองค์รวมในการลดการสัมผัสฟุ้งอันตราย รวมทั้งงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นเฉพาะการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบธาตุของฟุ้งโลหะ ซึ่งยังไม่ได้ประเมินมวลรวมของฟุ้งโลหะ ดังนั้น จึงแนะนำให้มีการศึกษาวิจัยในอนาคตที่มีการวัดปริมาณฟุ้งโลหะโดยรวมตามมาตรฐาน AWS F1.1

เพื่อให้สามารถประเมินระดับการสัมพัทธ์ของช่างเชื่อมได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น และเพิ่มความ  
แม่นยำในการศึกษาความเสี่ยงต่อสุขภาพของช่างเชื่อมที่มีโอกาสรับสัมพัทธ์โลหะที่เป็นอันตราย



## รายการอ้างอิง

- กฤษดา เพ็งอารีย์. (2561). การศึกษาปริมาณการรับสัมผัสฝุ่นจากการเชื่อมโครงสร้างเหล็กแบบ รอยต่อฉากด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ซัชชัย ธนโชคสว่าง. (2564). อันตรายของฝุ่นและอุปกรณ์ป้องกัน. สืบค้นเมื่อ 20 มกราคม 2568, จาก <https://www.ohswa.or.th/17814732/hse-morning-talk-by-occ-mahidol-ep6>
- ทศพล กุลกุล, & วีระ ดาทอง. (2552). ผลของตัวแปรการเชื่อมแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม (วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ทัศน์พงษ์ ตันติปัญจพร, ธีรภานต์ ศรีสกุลเตียว, & เบญจมาศ สุคันโท. (2562). การประเมินความ เสี่ยงต่อสุขภาพจากการสัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็กทางการหายใจของพนักงานในโรงงานสีข้าว แห่งหนึ่งในจังหวัดกำแพงเพชร. *ศรีนครินทร์เวชสาร*, 34(5), 482–489.
- พรรณี นันทะแสง, & กาญจนา นาถะพินธุ. (2555). ปัญหาสุขภาพและสภาพแวดล้อมในการทำงาน ของช่างเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้าอำเภอเมืองจังหวัดหนองบัวลำภู. *วารสารวิจัยสาธารณสุข ศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น | KJU Journal for Public Health Research*, 21–30.
- ภัครดา แสนสุขสม, & จงกล สังข์อ่วม. (2561). การประเมินความเสี่ยงอันตรายของฝุ่นโลหะใน กระบวนการเชื่อมที่ส่งผลต่อการปฏิบัติงานของคนงาน. *วารสารวิชาการสถาบันเทคโนโลยี แห่งสุวรรณภูมิ*, 5(1), 22–30.
- ภัทรภร ณะภากริศ, & อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2552). การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพ ตอนที่ 2 (Health Risk Assessments), 13.1–13.7.
- ยงยุทธ ดุลยกุล. (2551). ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้า คาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สกลุ่มที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมแม่เหล็ก (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, จังหวัดสงขลา.
- รักติพงษ์ สหมิตรมงคล. (2550). การใช้เครื่องวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence แบบพกพาเพื่อทดสอบสภาพของคอนกรีต. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 18(2), 9–18.

- วริยศ แฉ่งประเสริฐ. (2561). อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อตัวที่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 (วิทยานิพนธ์ ดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต).
- Abtahi, M., Fakhri, Y., Oliveri Conti, G., et al. (2018). The concentration of BTEX in the air of Tehran: a systematic review-meta-analysis and risk assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 1837.
- Aghakhani, M., Mehrdad, E., & Hayati, E. (2011). Parametric optimization of gas metal arc welding process by Taguchi method on weld dilution. *International Journal of Modeling and Optimization*, 1(3), 216.
- Altan, B., Lilly, & Yen, Y. C. (2001). Manufacturing of dies and molds. *CIRP Annals*, 50(2), 404–422. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62988-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62988-6)
- American Welding Society. (2020). *Structural welding code – Steel: AWS D1.1/D1.1M*. American Welding Society.
- Andrade, A., et al. (2017). A study of metal fume emission during arc welding. *Journal of Aerosol Science*, 102, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.09.002>
- Antonini, J. M. (2003). Health effects of welding. *Critical Reviews in Toxicology*, 33(1), 61–103. <https://doi.org/10.1080/713611032>
- Antonini, J. M. (2003). Health effects of welding. *Critical Reviews in Toxicology*, 33(1), 61–103. <https://doi.org/10.1080/713611032>
- Aschner, K. M., Erikson, E. H., Hernández, E., & Tjalkens, R. (2009). Manganese and its role in Parkinson's disease: From transport to neuropathology. *Neuromolecular Medicine*, 11, 252–266.
- Banerjee, K. K., Wang, H., & Pisaniello, D. (2006). Iron-ore dust and its health impacts. *Environmental Health*, 6(1), 11–16.
- Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S., Lvov, B., Ebert, M., Koch, W., ... & Thomassen, Y. (2011). Physicochemical characterisation of different welding aerosols. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399(5), 1773–1780.
- Berlinger, B., et al. (2011). Characteristics of individual welding fume particles produced by different welding processes: Microscopy study. *Journal of*

- Nanoparticle Research*, 13(2), 6683–6696. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0547-4>
- Bohm, L. (2015). Elemental characterization of welding fume aerosols using FESEM-EDS and ICP-MS. *The Journal of Aerosol Science*, 88, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.05.002>
- Buonanno, L., Morawska, L., & Stabile, L. (2011). Exposure to welding particles in automotive plants. *Journal of Aerosol Science*, 42(5), 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.02.003>
- Carsey, T. P. (1981). X-ray fluorescence analysis of welding fume particles. *Advances in X-Ray Analysis*, 25, 209–212.
- Chadha, & Singh, Z. (2013). Health concerns in welding industry. *Health*, 2(1).
- Chakraborty, G., et al. (2014). Study on microstructure and wear properties of different nickel base hard facing alloys deposited on austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 244, 180–188.
- Chen, Q., Bergthorson, J., & Schiemann, M. (2024). A review of metal-carbon dioxide combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 203, 114730. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114730>
- Cohen, L. E., Spurlock, R., & Salem, A. (2004). Argyria in the silver state. *Federal Practitioner*, 21(9), 36–38.
- Cosgrove, M. (2015). Pulmonary fibrosis and exposure to steel welding fume. *Occupational Medicine*, 65(9), 706–712.
- Czuchryj, J., & Sikora, S. (2007). Problems with assessing quality of welded joints, made on the basis of visual examinations recommended by EN ISO 5817: 2003 standard. *Welding International*, 21(12), 871–878. <https://doi.org/10.1080/09507110701843951>
- Czuchryj, J., & Sikora, S. (2013). Contradictions in visual assessment of weld quality by various methods. *Welding International*, 27(11), 837–847. <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.606143>
- Das, D., & Chattopadhyay, P. P. (2009). Influence of martensite morphology on the work-hardening behavior of high strength ferrite–martensite dual-phase steel. *Journal of Materials Science*, 44, 2957–2965.

- Duda-Chodak, A., & Blaszczyk, U. (2008). The impact of nickel on human health. *Journal of Elementology*, 13(4), 685–693.
- Ennan, A., Kiro, S. A., Oprya, M. V., & Vishnyakov, V. I. (2013). Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding. *Journal of Aerosol Science*, 64, 103–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.06.006>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2004). *Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual (Part A)*. Washington, DC: EPA.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *Exposure factors handbook: 2011 edition*. Washington, DC: EPA.
- Epp, J. (2016). X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. In *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* (pp. 81–124). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00004-3>
- Fethke, N. B., Peters, T. M., Leonard, S., Metwali, M., & Mudunkotuwa, I. A. (2016). Reduction of biomechanical and welding fume exposures in stud welding. *Annals of Occupational Hygiene*, 60(3), 387–401.
- Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M. S., & Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 679.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
- George, G. F., & Vander, V. (2011). Metallography of welds. *Advanced Materials and Processes*, 19–23.
- Goel, T. W., Liao, & Lee, K. S. (1993). A shielded metal arc welding expert system. *Computers in Industry*, 21(2), 121–129. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(93\)90130-S](https://doi.org/10.1016/0166-3615(93)90130-S)
- Gualco, A., et al. (2015). Wear resistance of Fe-based nanostructured hard facing. *Procedia Materials Science*, 8, 934–943.

- Gucwa, M., & Beczkowski, R. (2014). The effect of heat input on the geometric properties of welded joints. *Archives of Foundry Engineering*, *14*(1 spec), 127–130.
- Guilarte, T. R. (2010). Manganese and Parkinson's disease: A critical review and new findings. *Environmental Health Perspectives*, *118*(8), 1071–1080.  
<https://doi.org/10.1289/ehp.0901748>
- Hasnidawani, J. N., Azlina, H. N., Norita, H., Bonnia, N. N., Ratim, S., & Ali, E. S. (2016). Synthesis of ZnO nanostructures using sol-gel method. *Procedia Chemistry*, *19*, 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.095>
- Hedberg, Y. S., Wei, Z., McCarrick, S., Romanovski, V., Theodore, J., Westin, E. M., ... & Wallinder, I. O. (2021). Welding fume nanoparticles from solid and flux-cored wires: Solubility, toxicity, and role of fluorides. *Journal of Hazardous Materials*, *413*, 125273.
- Hobbacher, A., & Kassner, M. (2012). On relation between fatigue properties of welded joints, quality criteria and groups in ISO 5817. *Welding in the World*, *56*, 153–169.
- Honaryar, M. K., et al. (2019). Welding fumes and lung cancer: A meta-analysis of case-control and cohort studies. *Occupational and Environmental Medicine*, *76*(6), 422–431. <https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105447>
- Hu, S., Kienle, L., Guo, Y. G., & Maier, J. (2006). High lithium electroactivity of nanometer-sized rutile TiO<sub>2</sub>. *Advanced Materials*, *18*(11), 1421–1426.  
<https://doi.org/10.1002/adma.200502723>
- Japanese Industrial Standards Committee. (2011). *JIS G3101: Standard specification for carbon structural steels*. Japanese Industrial Standards Committee.
- Jenkins, N. T., & Eagar, T. W. (2005). Welding fume nanoparticles from solid and flux-cored wires: Solubility, toxicity, and role of fluorides. *Journal of Hazardous Materials*, *413*.
- Jenkins, N. T., Pierce, W. M. G., & Eagar, T. W. (2005). Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes. *Welding Journal*, *84*(10), 156–163.

- Jiang, Y., Luo, B. Y., Wang, S. T., Tu, & Gong, J. M. (2011). Residual stress reduction in the penetration nozzle weld joint by overlay welding. *Materials & Design*, *60*, 443–450.
- Kaplan, F. H., & Powell, J. (2011). Spatter in laser welding. *Journal of Laser Applications*, *23*(3). <https://doi.org/10.2351/1.3597830>
- Khan, A. S., Yerramilli, A., D'Oliveira, T. L., Alford, D. C., Boffito, G. S., & Patience, G. S. (2020). Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy—XRD. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *98*(6), 1255–1266. <https://doi.org/10.1002/cjce.23747>
- Khurshid, H., et al. (2013). Mechanism and controlled growth of shape and size variant core/shell FeO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Nanoscale*, *5*(17), 7942–7952. <https://doi.org/10.1039/C3NR02596A>
- Kim, J. J., Konkell, K., McCulley, L., & Diak, I. L. (2012). Cases of argyria associated with colloidal silver use. *Dermatitis*, *23*(2), 74–77. <https://doi.org/10.1097/DER.0b013e3182457c42>
- Korczynski, E. (2000). Occupational health concerns in the welding industry. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, *15*(12), 936–945. <https://doi.org/10.1080/104732200750051175>
- Korzhova, E. N., Stepanova, T. V., Lodousamba, S., & Smagunova, A. N. (2015). Control of the composition of welding aerosols. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, *81*(7), 6–18.
- Kulkarni, S. (2020). Metals, metal oxides, and their composites — Safety and health awareness. In *Multifunctional Nanostructured Metal Oxides for Energy Harvesting and Storage Devices* (pp. 259–308). CRC Press.
- Lak, A., et al. (2013). Size dependent structural and magnetic properties of FeO–Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Nanoscale*, *5*(24), 12286–12295. <https://doi.org/10.1039/C3NR04562E>.
- Lehnert, M., et al. (2012). Exposure to inhalable, respirable, and ultrafine particles in welding fume. *Annals of Occupational Hygiene*, *56*(5), 557–567. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes025>

- Liang, Q., Jing, H., & Gregoire, D. C. (2000). Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, *51*(3), 507–513.
- Lillienberg, L., Zock, J. P., Kromhout, H., Plana, E., Jarvis, D., Torén, K., & Kogevinas, M. (2008). A population-based study on welding exposures at work and respiratory symptoms. *Annals of Occupational Hygiene*, *52*(2), 107–115.
- Loomis, D., et al. (2022). The effect of occupational exposure to welding fumes on trachea, bronchus and lung cancer: a systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury. *Environment International*, *170*.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107565>
- Lucas, M. F., Koponen, S. N., Johnson, E. K., & Mäkelä, K. M. (2019). Experimental investigation of ultrafine particle formation during shielded metal arc welding. *The International Journal of Occupational and Environmental Medicine*, *10*(2), 86. <https://doi.org/10.15171/ijjoem.2019.1526>
- Luntz, J. T. (1949). Metallurgical smoke and fumes: Hazards and precautions. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, *185*(1), 371–388.
- Luo, M. F., Fang, P., He, M., & Xie, Y. L. (2005). In situ XRD, Raman, and TPR studies of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for CO oxidation. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, *239*(1–2), 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2005.06.029>
- Lynrah, A., Pooja, P., & Chinnamuthu, P. (2020). Scrutinizing and collating the broadband photo-detection properties of isotype n-MnO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanostructure. *IEEE Sensors Journal*, *21*(2), 1485–1492.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3020644>
- Madathil, N. P., Vanaja, K. A., & Jayaraj, M. K. (2007). Synthesis of ZnO nanoparticles by hydrothermal method. In *Nanophotonic Materials IV* (Vol. 6639, pp. 47–55). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.730364>
- Mandal, R., & Mandal, N. R. (2017). Welding defects. In *Ship Construction and Welding* (pp. 283–292).
- Mehrfar, Z., Zamanian, & Pirami, H. (2019). Respiratory exposure to toxic gases and metal fumes produced by welding processes and pulmonary function tests.

- The International Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 10(1), 40. <https://doi.org/10.15171/ijoem.2019.1540>
- Messler Jr, R. W. (2008). *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*. John Wiley & Sons.
- Ministry of Labour, Thailand. (2002). Promotion of skill development: Skill development promotion act, B.E. 2545. Thailand.
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R*, 50, 1–78.
- Mistry, K. J. (2015). Impact of welding processes on environment and health. *International Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering & Technology*, 1, 17–20.
- Mohan, S., Sivapirakasham, S. P., Bineesh, P., & Satpathy, K. K. (2014). Strategies for controlling welding fumes at the source — A review. *Applied Mechanics and Materials*, 592, 2539–2545.
- Montaser, A., & Golightly, D. W. (Eds.). (1992). *Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry*. VCH Publishers, Inc.
- Mvola, M., & Kah, P. (2017). Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 2369–2387.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2003). *Method 7303: Elements by inductively coupled plasma (ICP) (Hot block/HCl/HNO<sub>3</sub> digestion)* (NIOSH Manual of Analytical Methods, 4th ed.). Cincinnati, OH.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2020). *NIOSH method #0500: Particulates not otherwise regulated, total*. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2020). *NIOSH method #7200: Welding and brazing fume*. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention.
- Nemery, B. (2022). Metals and the respiratory tract. In *Handbook on the Toxicology of Metals* (pp. 421–443). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00030-9>

- Nguyen, M. L., et al. (2018). Exposure to metal nanoparticles released during low current welding with flux-cored wire. *Journal of Aerosol Science*, 121, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.04.011>
- NIOSH. (1993, August). Welding and brazing fume. Retrieved from NIOSH Method.
- NIOSH. (2013, March). Elements by ICP (Hot Block/HCl/HNO<sub>3</sub> Digestion). NIOSH Method 7303. Retrieved from <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7303.pdf>
- Odnovolova, M., Sofronov, D. S., Puzan, A. N., Baumer, V. N., Mateychenko, P. V., Desenko, S. M., & Bryleva, E. Y. (2015). Formation characteristics of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic particles precipitated from aqueous solutions and their sorption properties. *Functional Materials*.
- Olson, D. L., Siewert, T. A., Liu, S., & Edwards, G. R. (Eds.). (1993). *Welding, brazing, and soldering*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.9781627081733>
- Ooi, C. P., et al. (2015). A facile solvothermal synthesis of octahedral Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA, EMSL, and ORNL, Oak Ridge, TN*. <https://doi.org/10.1002/s>
- Petersen, A. (1973). Fine grained weld structures. *Welding Journal*, 53, 74s–79s.
- Piro, N. S., Hamad, S. M., Mohammed, A. S., & Barzinjy, A. A. (2022). Green synthesis magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles from Rhus coriaria extract: A characteristic comparison. <https://doi.org/10.1109/TNB.2022.3187344>
- Poli, C. (2001). *Design for manufacturing: a structured approach*. Butterworth-Heinemann.
- Pourtaghi, G., Kakooei, H., Salem, M., Pourtaghi, F., & Lahmi, M. (2009). Pulmonary effects of occupational exposure to welding fumes. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3291–3296.
- Qasrawi, F., & Hamarsheh, A. A. (2021). Band offsets, electron affinities and optical dynamics at the CdBr<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> interfaces. *Optik*, 243, 167467. <https://doi.org/10.1016/j.jpleo.2021.167467>.
- Quémerais, B., Mino, J., Amin, M. R., Golshahi, H., & Izadi, H. (2015). Detailed characterization of welding fumes in personal exposure samples. *Journal of*

- Physics: Conference Series*, 617(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/617/1/012011>
- Quemeraisl, B., Mino, J., Amin, M. R., Golshahi, H., & Izadi, H. (2017). Detailed characterization of welding fumes in personal exposure samples. *IOP Science*.
- Rasheed, R. T., Al-Algawi, S. D., Kareem, H. H., & Mansoor, H. S. (2018). Preparation and characterization of hematite iron oxide ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) by sol-gel method. *Chemistry Science Journal*, 9(4).
- Riccelli, M. G., et al. (2020). Welding fumes, a risk factor for lung diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2552. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072552>
- Rodríguez Ripoll, M., et al. (2016). The role of niobium in improving toughness and corrosion resistance of high-speed steel laser hard facings. *Materials & Design*, 99, 509–520.
- Sahooli, M., Sabbaghi, S., & Saboori, R. (2012). Synthesis and characterization of mono sized CuO nanoparticles. *Materials Letters*, 81, 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.148>
- Sajedifar, J., Kokabi, A. H., Dehghan, S. F., Mehri, A., Azam, K., & Golbabaei, F. (2018). Evaluation of operational parameters role on the emission of fumes. *Industrial Health*, 56(3), 198–206.
- Samuel, M. S., Bose, L., & George, K. C. (2009). Optical properties of ZnO nanoparticles. *Academic Review*, 16, 57–65.
- Schoofs, H., Schmit, J., & Rink, L. (2024). Zinc toxicity: Understanding the limits. *Molecules*, 29(13), 3130. <https://doi.org/10.3390/molecules29133130>
- Seleme, D. P. (2016). Personal occupational exposure to total welding fume.
- Sferlazza, S. J., & Beckett, W. S. (1991). The respiratory health of welders. *American Review of Respiratory Disease*, 143, 1134–1148.
- Sidhu, G. S., & Chatha, S. S. (2012). Role of shielded metal arc welding consumables on pipe weld joint. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(12), 746–750.
- Singh, S., Singh, G., & Singh, A. (2014). A review of porosity formation and recommendations on the avoidance of porosity in TIG welding of steels.

- International Journal of Mechanical Engineering and Information Technology*, 2(8), 700–712.
- Soltanpour, Z., Rasoulzadeh, Y., Ansarin, K., Seyedrezazadeh, E., & Mohammadian, Y. (2023). Carcinogenic and non-carcinogenic risk of exposure to metal fume in different types of welding processes. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(35), 83728–83734.
- Sowards, J. W., Lippold, J. C., Dickinson, D. W., & Ramirez, A. J. (2008). Characterization of welding fume from SMAW electrodes-Part I. *Welding Journal - New York*, 87(4), 106.
- Spear, J. E. (2011). Welding fume and gas exposure. *Occupational Health & Safety*, 80(6), 64–65.
- Srinivasan, K., & Balasubramanian, V. (2011). Effect of heat input on fume generation and joint properties of gas metal arc welded austenitic stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(10), 72–79.
- Stepanova, T. V., Ondar, U. V., Korzhova, E. N., Tolmacheva, V. S., & Smagunova, A. N. (2017). Choice of optimum conditions of emitter preparation for X-ray fluorescence analysis of aerosols. *Journal of Analytical Chemistry*, 72(2), 163–170.
- Swift, G., & Booker, J. D. (2003). *Process selection: from design to manufacture*. Elsevier.
- Taj, T., et al. (2021). Effect of welding fumes on the cardiovascular system: a six-year longitudinal study. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 47(1), 52. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3908>
- Takada, T., Yamamoto, N., Shinjo, T., Kiyama, M., & Bando, Y. (1966). Magnetic properties of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fine particles. *Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University*, 43(4–5), 406–415.
- Talam, S., Karumuri, S. R., & Gunnam, N. (2012). Synthesis, characterization, and spectroscopic properties of ZnO nanoparticles. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 372505. <https://doi.org/10.5402/2012/372505>
- Taylor, H. E. (2001). Instrumentation. In *Inductively coupled plasma-mass spectrometry: Practice and techniques* (1st ed., pp. 29–90). Academic Press.

- Thakur, H., Gebrelibanos, H., & Gabrey, T. (2019). Arc welding process selection through a quality and costs. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 9(3), 383–394.
- Thamaphat, K., Limsuwan, P., & Ngotawornchai, B. (2008). Phase characterization of TiO<sub>2</sub> powder by XRD and TEM. *Agriculture and Natural Resources*, 42(5), 357–361.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2007). *Method 3015A: Acid digestion of sediments, sludges, and soils*. EPA Office of Water.
- Valiei. (2021). *Nanotextured bactericidal surfaces* (Master's thesis, McGill University).
- Vural, M. (2006). The differences between the strengths of quality levels of weld imperfections given in ISO 5817. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 15(1–2).
- Weman, K. (2011). *Welding processes handbook*. Elsevier.
- Wibowo, A. (2021). The effect of current variation on microstructure and hardness in alloy steel SS400 welding process using SMAW method. *Journal of Mechanical Engineering and Vocational Education (JoMEVE)*, 2(1), 8–15.  
<https://doi.org/10.20961/jomeve.v2i1.27332>
- Winczek, J., Gucwa, M., Makles, K., Mičian, M., & Yadav, A. (2021). The amount of heat input to the weld per unit length and per unit volume. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1199(1), 012067.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1199/1/012067>
- Xu, J. F., et al. (1999). Preparation and characterization of CuO nanocrystals. *Journal of Solid-State Chemistry*, 147(2), 516–519.  
<https://doi.org/10.1006/jssc.1999.8409>
- Yan, W., Xiong, W., & Faierson, E. J. (2017). Grain structure control of additively manufactured metallic materials. *Materials*, 10(11), 1260.  
<https://doi.org/10.3390/ma10111260>
- Yao, Y., et al. (2024). Phase-activity relationship of MnO<sub>2</sub> nanomaterials in periodate oxidation for organic pollutant degradation. *Water Research*, 264, 122224.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122224>

- Yin, H., et al. (2001). Hydrothermal synthesis of nanosized anatase and rutile TiO<sub>2</sub> using amorphous phase TiO<sub>2</sub>. *Journal of Materials Chemistry*, 11(6), 1694–1703.
- Yousefi, D., Tavoosi, M., & Ghasemi, A. (2016). Magnetic properties of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 443, 1–7.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.011>
- Zahiri, R., et al. (2014). Hard facing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. *Surface and Coatings Technology*, 260, 220–229.
- Zarandi, S. M., Shahsavani, A., Khodaghali, F., et al. (2019). Concentration, sources and human health risk of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons bound PM<sub>2.5</sub> ambient air, Tehran, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 41, 1473–1487.
- Zhang, G., Ren, L., Hu, D., Gu, H., & Zhang, S. (2018). Sulfuric acid etching for fabrication of porous MnO<sub>2</sub> for high-performance supercapacitor. *Journal of Colloid and Interface Science*, 518, 84–91.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.02.023>
- Zhang, R., Zhao, G., Hu, J., Lu, P., Liu, S., & Li, X. (2024). Enhanced photoelectrochemical performance of ZnO/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction photoelectrode fabricated by facile hydrothermal and spin-coating method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 633–642.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.153>
- Zulkiflee, N. S. (2018). *Effect of calcination temperature on bilayer TiO<sub>2</sub>/ZnO and ZnO/TiO<sub>2</sub> thin films* (Doctoral dissertation, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia).



## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Phengarree, K., Srithorn, J., & Boonruksa, P. (2025). Characterization of Metal Fumes and Oxides Across Current Variations in the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Process. *Engineering Journal*, 29(6),13-27 <https://doi.org/10.4186/ej.2025.29.6.13>



## ประวัติผู้เขียน

นายกฤษดา เพ็งอารีย์ เกิดวันอาทิตย์ที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2535 มีภูมิลำเนาอยู่ในจังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สำนักวิชา สาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระดับปริญญาโท สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้าง และสาธารณสุขภาค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในระหว่างปี 2563 – 2565 เป็นอาจารย์สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ณ สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต่อมาได้เข้าศึกษาระดับปริญญาเอก ในสาขาวิชาวิศวกรรมระบบ อุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปลายปี พ.ศ. 2565 ด้วยทุนสนับสนุนทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัย จากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) โดยในระหว่างการศึกษา ได้รับหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และในปี 2568 เป็นอาจารย์ สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี