



คุณลักษณะของฟุ้งโลหะจากการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวม และฝุ่นขนาดเล็กขณะปฏิบัติงานเชื่อมอาร์กโลหะ ด้วยท่าราบ

พงศกร คัมภีระ¹, กฤษดา เพ็งอารีย์², พรทิพย์ เย็นใจ³ และพงษ์สิทธิ์ บุญรักษา^{3*}

Received: February 3, 2023

Revised: April 20, 2025

Accepted: April 27, 2025

บทคัดย่อ

การเชื่อมโลหะถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและงานซ่อมโลหะทั่วไป การรับสัมผัสฟุ้งจากการเชื่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพรรณนา มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของฟุ้งโลหะและสัณฐานวิทยาของฟุ้งจากการเชื่อมที่ช่างเชื่อมได้รับสัมผัสจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยท่าราบในสถานีนงาน โดยกลุ่มเป้าหมายเป็นช่างเชื่อมเพศชาย จำนวน 4 คน ที่ผ่านการรับรองมาตรฐานฝีมือแรงงานกลุ่มช่างอุตสาหกรรมระดับที่ 1 มีประสบการณ์ทำงานเฉลี่ยเท่ากับ 17.33 ± 11.37 ปี รูปแบบการทดลองเป็นการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 แบบรอยต่อชนบาคหน้างานและเชื่อมพอก ช่างเชื่อมจะถูกติดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นรวม (NIOSH#0500) และฝุ่นขนาดเล็ก (NIOSH#0600) ที่ระดับหายใจ เพื่อวิเคราะห์ฟุ้งโลหะ 8 ธาตุ ได้แก่ Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn และ Zn ด้วยเครื่อง ICP-MS นอกจากนี้ทำการเก็บฟุ้งโลหะด้วยกระดาดกรองชนิดนิวคลีโอพอร์เมมเบรน เพื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ได้แก่ รูปร่าง ขนาดอนุภาค และองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง FESEM-EDX ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นรวมของฟุ้งโลหะทั้ง 8 ธาตุ จากการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็กมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.12 ± 0.37 และ 0.51 ± 0.78 mg/m^3 ตามลำดับ ฟุ้งโลหะที่พบมากที่สุดอยู่ในฝุ่นรวม ได้แก่ Fe (0.98 mg/m^3), Mn (0.10 mg/m^3) และ Zn (0.02 mg/m^3) โดยความเข้มข้นดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฟุ้งโลหะในฝุ่นขนาดเล็ก คิดเป็น 2.27, 1.66 และ 2.41 เท่า ตามลำดับ รูปร่างของฟุ้งโลหะที่พบมีลักษณะเป็นการเกาะกลุ่มรวมตัวเป็นสายของอนุภาคขนาดเล็กมากและอนุภาคระดับนาโนเมตร โดยองค์ประกอบของธาตุส่วนใหญ่ คือ C, O และ Fe รวมทั้งยังพบธาตุโลหะปริมาณน้อย (Trace element) หลายชนิด เช่น Mn และ Si

คำสำคัญ: ฟุ้งโลหะ / การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ / การเชื่อมท่าราบ / สัณฐานวิทยา / องค์ประกอบธาตุ

* ผู้รับผิดชอบบทความ: พงษ์สิทธิ์ บุญรักษา สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

E-mail: pongsitb@sut.ac.th

¹ นักศึกษาหลักสูตร ว.ท.ม (อาชีวอนามัย ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม) สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² อาจารย์ สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





Characteristics of Metal Fumes from Total and Respirable Dust Sampling Methods During Arc Welding in Flat Position

Phongsakorn Kumpeera¹, Kritsada Phengarree², Pornthip Yenjai³ and Pongsit Boonruksa^{3*}

Abstract

Welding is widely used in diverse sectors, including industrial process and general metal repair works. Exposure to welding fumes causes health impacts ranging from acute and chronic effects. This descriptive research aimed to study concentrations of metal fume exposures and morphology during arc welding in flat position. Four male professional welders with the certificate of standard test industrial technician level 1 participated this study. Their work experience was 17.33 ± 11.37 years. Following the experimental procedure, each subject performed a shielded metal arc welding of carbon steel (SS400) with groove butt joint and bead weld method. During welding, personal air samplings of total dust (NOSH#0500) and respirable dust (NOSH#0600) were collected at welders' breathing zone. The filters of air sampling were analyzed using ICP-MS for 8 metal fumes: Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn and Zn. Moreover, metal fumes generated from the welding processes were collected on a nucleopore membrane filter to analyze metal fume morphology including particle size and chemical element composition using FESEM-EDX. The results showed that concentrations of total 8 metal fumes from the total and respirable dust sampling were 1.12 ± 0.37 and 0.51 ± 0.78 mg/m³, respectively. High metal fume concentrations in total dust were Fe (0.98 mg/m³), Mn (0.10 mg/m³) and Zn (0.02 mg/m³) that were higher 2.27, 1.66 and 2.41 times respectively, when compared to those in respirable dust. For morphology analysis, fumes were typically arranged as chain-like agglomerates of ultrafine and nanoparticles. High percentage of element composition were C, O and Fe. In addition, metal trace elements including Mn and Si were observed.

Keywords: Metal fume / Shielded Metal Arc Welding / Welding in Flat Position / Morphology / Element Composition

* **Corresponding Author:** Pongsit Boonruksa, School of Occupational Health and Safety, Institute of Public Health, Suranaree University of Technology. E-mail: pongsitb@sut.ac.th

¹ Student, M.Sc. (Occupational Health, Safety and Environment), Institute of Public Health, Suranaree University of Technology

² Instructor, Occupational Health and Safety Program, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

³ Assistant Professor, School of Occupational Health and Safety, Institute of Public Health, Suranaree University of Technology





1. บทนำ

การเชื่อมอาร์กโลหะหรือการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) เป็นกระบวนการประกอบชิ้นส่วนโลหะ โดยใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวให้ความร้อนที่ลวดเชื่อม ทำให้ลวดเชื่อมหลอมละลายประสานชิ้นงานเข้าด้วยกัน (มนตรี แสงสุริยันต์ และประยูร สุรินทร์, 2562) การเชื่อมโลหะชนิดนี้เป็นที่นิยมในหลายภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโลหะ อุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมก่อสร้าง รวมถึงการเชื่อมอาร์กโลหะยังใช้กันอย่างแพร่หลายในการซ่อมอุปกรณ์ทั่ว ๆ ไป ซึ่งตามมาตรฐาน ISO 9606-1 กำหนดท่าเชื่อมออกเป็น 4 ท่า ได้แก่ ท่าเชื่อมแนวราบ (Flat Position) ท่าเชื่อมขนานแนวนอน (Horizontal Position) ท่าเชื่อมตั้ง (Vertical Position) และท่าเชื่อมเหนือศีรษะ (Overhead Position) (ISO 9606-1, 2012) โดยท่าเชื่อมแนวราบเป็นท่าเชื่อมพื้นฐานที่ปฏิบัติได้ง่าย และถูกกำหนดในหลักสูตรอาชีวศึกษาให้นักเรียนช่างอุตสาหกรรมต้องฝึกปฏิบัติเชื่อมในท่าดังกล่าว (ภาณุวัฒน์ หนูกิจ, 2557) จึงทำให้ท่าเชื่อมท่าราบเป็นท่าที่นิยมใช้มากที่สุดในงานเชื่อมโลหะ

ขณะปฏิบัติงานเชื่อมอาร์กโลหะช่างเชื่อมมีโอกาสสัมผัสอันตราย ได้แก่ แสงจากการอาร์ก เสียงดัง (Dehghan & Mehrifar, 2019) ความร้อน แก๊สพิษ ไฟฟ้าช็อต (Wanjari & Wankhede, 2020) รวมทั้งฟุ้งจากการเชื่อมซึ่งเป็นอันตรายหลัก (Major Hazard) ก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ การศึกษาด้านพิษวิทยาพบว่าผู้ที่รับสัมผัสฟุ้งโลหะมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ (Riccelli et al., 2020) เกิดโรคไข้ฟุ้งโลหะทำให้เกิดอาการอักเสบตามร่างกาย (Suarez et al., 2022) ก่อให้เกิดโรคปอดอักเสบที่ทำให้เนื้อเยื่อของปอดมีลักษณะที่บดคล้ายกระจกฝ้าและมีน้ำบริเวณเยื่อหุ้มปอด (Cha et al., 2022) และกระตุ้นก่อกำเนิดโรคหอบหืด นอกจากนี้ผลการศึกษาในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตและติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมในจังหวัดระยอง พบว่าร้อยละ 40 ของกลุ่มช่างเชื่อมมีอาการเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ ได้แก่ อาการไอ และมีเสมหะ (ภูวดล ผู้เลี้ยง และคณะ, 2561)

ฟุ้งจากการเชื่อมส่วนใหญ่ประกอบด้วยโลหะออกไซด์หลายชนิดที่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์ โดย International Agency for Research on Cancer (IARC) จัดให้ฟุ้งโลหะจากการเชื่อมเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ประเภทที่ 1 (Loomis et al., 2022) และ National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ได้กำหนดแนวทางในการเก็บตัวอย่างฟุ้งโลหะโดยใช้ลักษณะการเก็บตัวอย่างเช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวมและนำไปวิเคราะห์ฟุ้งโลหะแยกเป็น 8 ธาตุ ได้แก่ เงิน (Ag), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni), แมงกานีส (Mn) และ สังกะสี (Zn) (NIOSH, 1993) การรับสัมผัสธาตุโลหะดังกล่าวส่งผลเสียต่อสุขภาพที่แตกต่างกันดังนี้ การรับสัมผัสฟุ้งโลหะ Fe และ Mn ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบประสาทส่งผลให้เกิดโรคพาร์กินสัน (Sriram et al., 2010) ฟุ้งโลหะ Zn และ Cu ส่งผลให้เกิดโรคไข้ฟุ้งโลหะ (Suarez et al., 2022) ฟุ้งโลหะ Ag, Cr และ Ni เป็นสาเหตุก่อกำเนิดโรคปอดอักเสบ (Cha et al., 2022; Kuempel et al., 2021) และฟุ้งโลหะ Cd ก่อให้เกิดการระคายเคืองในระบบทางเดินหายใจซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคถุงลมโป่งพอง (Charkiewicz et al., 2023) ทั้งนี้ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟุ้งจากการเชื่อมยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพที่แตกต่างกัน เนื่องจากขนาดของอนุภาคและองค์ประกอบธาตุมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดปฏิกิริยากับเซลล์ในร่างกาย รวมทั้งขนาดของอนุภาคยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการถูกดักจับหรือสะสมในระบบทางเดินหายใจ (Wycislik-Sosnierz et al., 2024)

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการรับสัมผัสฟุ้งโลหะจากการเชื่อมอาร์กโลหะ พบว่ามีการศึกษาแพร่หลายในต่างประเทศ เช่น การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการเชื่อมอาร์กโลหะในประเทศอิหร่านพบว่าช่างเชื่อมสัมผัสฟุ้งโลหะ Fe, Cr และ Ni เท่ากับ 17.89, 0.44 และ 0.14 mg/m³ ตามลำดับ (Soltanpour et al., 2023) การศึกษาการรับสัมผัสฟุ้งโลหะจากการเชื่อมและฟุ้งโลหะในโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศซาอุดีอาระเบีย



รายงานข่าวช่างเชื่อมสัมผัสฝุ่นจากการเชื่อมอยู่ในช่วง 3.0 - 11.3 mg/m³ และฝุ่นโลหะ Mn และ Cu อยู่ในช่วง 0.01 - 0.48 และ 0.001 - 0.08 mg/m³ ตามลำดับ (Balkhyour & Goknil, 2010) และผลการศึกษาในกลุ่มช่างเชื่อมที่ทำงานในโรงงานผลิตสแตนเลส ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงให้เห็นว่ามีการสัมผัสฝุ่นโลหะ Cr, Ni, และ Mn อยู่ในช่วง 13 - 300, 5.7 - 132 และ 1.5 - 119 µg/m³ ตามลำดับ (Newton et al., 2021)

แต่อย่างไรก็ตามการศึกษารับสัมผัสฝุ่นโลหะจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือในประเทศไทยยังมีค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งยังไม่พบการศึกษารับสัมผัสฝุ่นโลหะในการปฏิบัติงานเชื่อมในระยะเวลาสั้น ๆ เช่น การเชื่อมโลหะเพื่อการซ่อมแซมโลหะทั่ว ๆ ไปตามครัวเรือน การฝึกปฏิบัติงานเชื่อมของนักเรียนอาชีวศึกษา และการเชื่อมเพื่อทดสอบฝีมือแรงงานในระดับต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นสำหรับการศึกษาในเรื่องดังกล่าวเพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการรับสัมผัสฝุ่นโลหะในระยะเวลาสั้น ๆ และผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับกำหนดแนวทางในการพิจารณาหามาตรการลดการรับสัมผัสฝุ่นโลหะ และสร้างความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือในท่าราบ

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของฝุ่นโลหะ 8 ชนิด ที่ช่างเชื่อมอาร์กโลหะได้รับสัมผัสขณะปฏิบัติงานเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในท่าราบจำนวน 1 ชิ้นงาน ระหว่างฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็ก

2.2 เพื่อศึกษาสัดส่วนวิทยาของฝุ่นโลหะที่ช่างเชื่อมได้รับสัมผัสขณะปฏิบัติงานเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในท่าราบจำนวน 1 ชิ้นงาน ระหว่างฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็ก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงพรรณนา (Descriptive research) ปริมาณและสัดส่วนวิทยาของฝุ่น โดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในการรวบรวมข้อมูล ซึ่งมีขั้นตอนดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้ ศึกษาในกลุ่มเป้าหมายที่เป็นช่างเชื่อมโลหะที่มีความชำนาญในการเชื่อม ผ่านการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติ สาขาช่างเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือระดับที่ 1 จำนวน 4 คน และทำการปฏิบัติงานเชื่อมในสถานงานที่จำลองการทดสอบการเชื่อม ณ วิทยาลัยเทคนิคแห่งหนึ่งในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งช่างเชื่อมทั้งหมดเป็นเพศชาย อายุเฉลี่ย 34 ± 8.83 ปี และมีประสบการณ์การเชื่อมเฉลี่ย 17.33 ± 11.37 ปี

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นโลหะ

การเก็บตัวอย่างฝุ่นโลหะ ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวมตาม NIOSH #0500 (NIOSH, 1994) และวิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นขนาดเล็ก ตาม NIOSH #0600 (median cut point = 4 µm) (NIOSH, 1998) โดยการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวมจะทำการเก็บตัวอย่างอากาศผ่านกระดาศกรองชนิดเซลลูโลส (0.8 µm, 37 mm) ที่บรรจุในตลับกรอง 3 ชั้น ส่วนการเก็บตัวอย่างฝุ่นขนาดเล็กจะใช้อลูมิเนียมไฮโคลนช่วยในการเก็บตัวอย่างฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 µm โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศแบบติดตัวบุคคล (Gilian รุ่น GilAir Plus) ที่อัตราการดูดอากาศ 2 และ 2.5 l/min สำหรับการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็กตามลำดับ

การเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะสัดส่วนวิทยาของฝุ่นโลหะ ดำเนินการเก็บตัวอย่างอากาศผ่านกระดาศกรองชนิดนิวคลีโอพอร์เมมเบรน (0.2 µm, 25 mm) ที่อัตราการดูดอากาศ 2 l/min โดยการทดลองครั้งนี้มีการสอบเทียบอัตราการไหลของปั๊มดูดอากาศกับเครื่อง Electronic Soap Bubble Meter





(Gilian รุ่น Gilibrator 2) เพื่อหาค่าความถูกต้องของเครื่องมือ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการดูดอากาศของปั๊มต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 (Wight, 1994) เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลังเก็บตัวอย่างอากาศ

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟุมโลหะ

เครื่องมือโครแมท (Milestone รุ่น Ultrawave 3) ใช้สำหรับย่อยกระดาษากรอง และเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในระดับความเข้มข้นต่ำ (ICP-MS/Agilent รุ่น 7900) ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณฟุมโลหะแยกตามธาตุ

3.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรายละเอียดสูง พร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุแบบอีดีเอส (FESEM-EDS/Carl Zeiss รุ่น AURIGA)

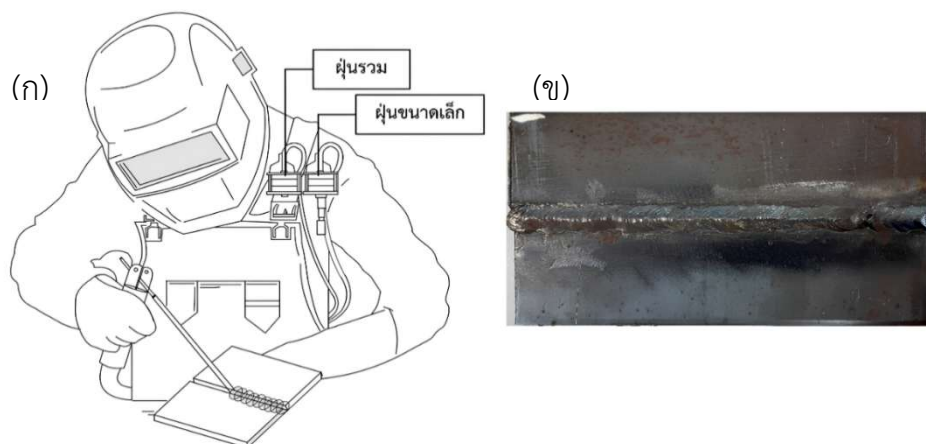
3.2.4 อุปกรณ์การเชื่อมและสถานีการเชื่อม

กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะ (SMAW) เป็นการเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้ลวดเชื่อมชนิด E6013 ขนาด 2.6 x 350 mm บนแผ่นเหล็กเกรด SS400 ขนาด 50 x 180 x 5 mm จำนวน 2 ชิ้นงานประกบกันแบบรอยต่อชน (Butt joint) โดยใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 80 - 100 Ampere และทำการเชื่อมซ้ำจำนวน 2 ครั้ง ได้แก่ แนวเชื่อมแบบปากหน้างานและแนวเชื่อมแบบเชื่อมพอก

สถานีการเชื่อมมีลักษณะเป็นบุทกั้นขนาดกว้าง 1.2 m ยาว 1.2 m และ สูง 2 m และปัจจัยสภาพแวดล้อมขณะเชื่อมมีการเคลื่อนที่อากาศอยู่ในช่วง 0.01 - 0.2 m/s อุณหภูมิอยู่ในช่วง 28 - 30 °C และความชื้นสัมพัทธ์ (%Rh) อยู่ในช่วง 60 - 70 โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวทำการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบขดลวดความร้อน (TSI รุ่น 9555)

3.3 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การเก็บตัวอย่างฟุมโลหะเพื่อวิเคราะห์การสัมผัสฟุมจากการเชื่อม ดำเนินการโดยการติดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างดลักรอง 3 ชั้นสำหรับการเก็บฝุ่นรวม และดลักรอง 3 ร่วมกับลูมิเนียมไซโคลนสำหรับการเก็บฝุ่นขนาดเล็ก บริเวณระดับทางเดินหายใจ (Breathing zone) ของช่างเชื่อม ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างอากาศจะครอบคลุมตลอดช่วงเวลาของการเชื่อมแต่ละบุคคล โดยใช้เวลาเชื่อมเฉลี่ย 5 นาทีต่อชิ้นงาน ซึ่งรายละเอียดของท่าเชื่อม การเก็บตัวอย่างฟุมโลหะ และตัวอย่างชิ้นงานเชื่อม แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเก็บตัวอย่างฟุมโลหะจากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยท่าราบและตัวอย่างชิ้นงานเชื่อม :

(ก) การเก็บตัวอย่างฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็ก บริเวณระดับหายใจ

(ข) ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมแบบรอยต่อชนปากหน้างานและเชื่อมพอก





3.3.2 การวิเคราะห์ฟลูออโร นำกระดาษกรองมาย่อยด้วยเครื่อง Microwave โดยเติม 9 ml HNO₃ เข้มข้น และ 3 ml HCl เข้มข้น ตาม Method USEPA 3051a (US EPA, 2007) ทำการย่อยที่อุณหภูมิ 175 °C ความดัน 120 bar และกำลังไฟฟ้า 1500 watt เป็นเวลา 20 min หลังจากนั้นทำการปรับปริมาตร โดยเติมตัวอย่างสารละลาย 4 ml และเติมน้ำ DI (Deionizer Water) ให้ได้ปริมาตร 20 ml ทำให้สารละลาย มีความเข้มข้นเจือจางลง 5 เท่า เพื่อใช้วิเคราะห์ธาตุ Ag, Cd, Cr, Cu, Ni และ Zn และปรับปริมาตรสารละลาย ให้มีความเข้มข้นเจือจางลง 50 เท่า เพื่อใช้วิเคราะห์ธาตุ Fe และ Mn จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่ปรับ ปริมาตรแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออโรด้วยเครื่อง ICP-MS ซึ่งนำมาเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Mix Standard (Quality Control Standard 27 in 5% HNO₃, Agilent) เพื่อหาความแม่นยำในการวิเคราะห์ ซึ่งแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²) ของ Standard Curve กับความเข้มข้นของฟลูออโรที่ทุกการวิเคราะห์ และคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นฟลูออโรในหน่วย mg/m³ (NIOSH, 2003) ดังสมการที่ 1

$$C = \frac{(C_s V_s - C_b V_b)}{V} \quad (1)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นฟลูออโรในตัวอย่าง (mg/m³ = µg/L)

C_s คือ ความเข้มข้นฟลูออโรจากตัวอย่าง (µg/L)

C_b คือ ความเข้มข้นฟลูออโรจากตัวอย่างเทียบ (Field Blank) (µg/L)

V_s คือ ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่าง (ml)

V_b คือ ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่างเทียบ (Field Blank) (ml)

V คือ ปริมาตรอากาศในการเก็บตัวอย่าง (L)

3.3.3 การเก็บตัวอย่างฟลูออโรเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะสัณฐานวิทยา ดำเนินการเก็บ ตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรองชนิดนิวเคลียโอพอร์เมมเบรน โดยติดตั้งตลับกรองที่ระดับความสูงที่ระดับหายใจ ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างแบบพื้นที่ (Area sampling) ทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 1 นาที เพื่อให้ได้จำนวนอนุภาคบนกระดาษกรองไม่หนาแน่นจนเกินไป หลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว นำกระดาษกรองมาเคลือบทองที่ความหนา 3.2 nm ภายใต้ความดัน 5.0 × 10⁻² mbar ที่กระแสไฟฟ้า 30 mA เป็นเวลา 20 min เพื่อนำไปวิเคราะห์หา รูปร่างและขนาดของอนุภาค รวมทั้งองค์ประกอบธาตุของฟลูออโรด้วยเครื่อง FESEM/EDS

3.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด เพื่ออธิบายคุณลักษณะทั่วไป ปริมาณการรับสัมผัสฟลูออโร และองค์ประกอบของธาตุ

3.5 จริยธรรมการวิจัยในมนุษย์

การศึกษาวิจัยฉบับนี้ผ่านการอนุมัติโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี (COA No.129/2564)





4. ผลการวิจัย

4.1 ปริมาณการรับสัมผัสฝุ่นโลหะจากการเชื่อม

การวิเคราะห์ฝุ่นโลหะจากกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวม พบว่าช่วงเชื่อมสัมผัสฝุ่นโลหะรวมทั้ง 8 ธาตุ อยู่ในช่วง $<0.01 - 1,214.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,115.38 \pm 373.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยในตัวอย่างฝุ่นรวมพบฝุ่นโลหะมากที่สุด ได้แก่ Fe, Mn และ Zn ที่ความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 979.31, 101.34 และ $21.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ โดยพบฝุ่นโลหะ Cd มีความเข้มข้นน้อยที่สุด ($<0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

ส่วนผลการวิเคราะห์ฝุ่นโลหะด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นขนาดเล็ก พบการรับสัมผัสฝุ่นโลหะรวมทั้ง 8 ธาตุ อยู่ในช่วง $<0.01 - 1,402.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $512.11 \pm 776.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ฝุ่นโลหะที่พบมากในฝุ่นขนาดเล็ก 3 อันดับแรก คือธาตุฝุ่นโลหะกลุ่มเดียวกับฝุ่นโลหะที่พบในฝุ่นรวม แต่ระดับความเข้มข้นน้อยกว่า ซึ่งระดับความเข้มข้นของ Fe, Mn และ Zn มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 431.61, 60.96 และ Zn $8.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ และฝุ่นโลหะที่พบน้อยที่สุดก็ยังคงเป็นฝุ่นโลหะ Cd ซึ่งพบที่ความเข้มข้นเฉลี่ย $<0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

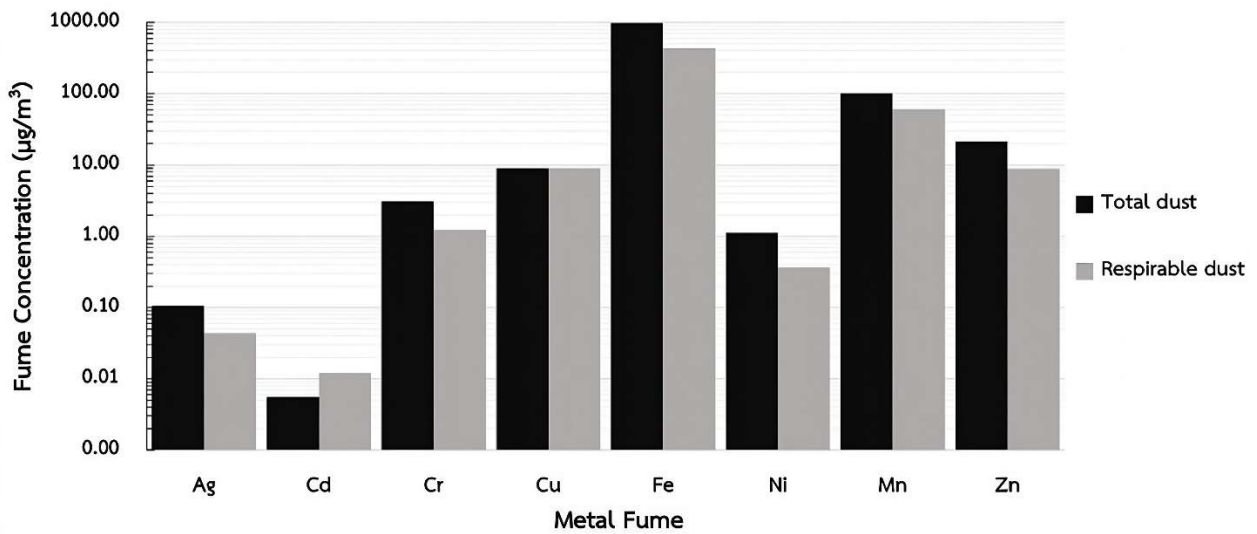
ตารางที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นโลหะจากการเก็บตัวอย่างแบบฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็ก (n=4)

Metal Fume	Total Dust ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Respirable Dust ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	\bar{x}	SD	Min - Max	\bar{x}	SD	Min - Max
Ag	0.11	0.11	<0.01 - 0.26	0.04	0.06	<0.01 - 0.13
Cd	<0.01	<0.01	<0.01 - <0.01	<0.01	0.02	<0.01 - 0.05
Cr	3.12	1.279	2.28 - 5.03	1.22	1.47	0.30 - 3.41
Cu	9.06	3.33	6.13 - 12.79	9.07	11.75	1.88 - 26.57
Fe	979.31	321.26	533.80 - 1214.82	431.61	652.65	36.14 - 1402.82
Ni	1.11	0.25	0.75 - 1.34	0.36	0.52	<0.01 - 1.13
Mn	101.34	34.97	71.92 - 146.51	60.96	100.24	2.84 - 210.42
Zn	21.33	12.07	4.27 - 32.67	8.84	10.22	<0.01 - 18.47
Total	1115.38	373.28	<0.01 - 1214.82	512.11	776.93	<0.01 - 1402.82

หมายเหตุ : ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของ Standard Curve กับความเข้มข้นของฝุ่นโลหะทุกธาตุมีค่า >0.99

ผลการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นโลหะในฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็ก แยกตามธาตุ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของธาตุส่วนใหญ่ในฝุ่นรวม ได้แก่ Ni ($1.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr ($3.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Zn ($21.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ag ($0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($979.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และ Mn ($101.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$) มีค่ามากกว่าฝุ่นขนาดเล็กคิดเป็น 3.09, 2.56, 2.41, 2.40, 2.27 และ 1.66 เท่า ตามลำดับ แต่ผลการวิเคราะห์พบว่าธาตุ Cu ในฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็กมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และพบธาตุ Cd ในฝุ่นขนาดเล็ก ($0.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$) มีค่าสูงกว่าในฝุ่นรวมคิดเป็น 2.16 เท่า รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 2



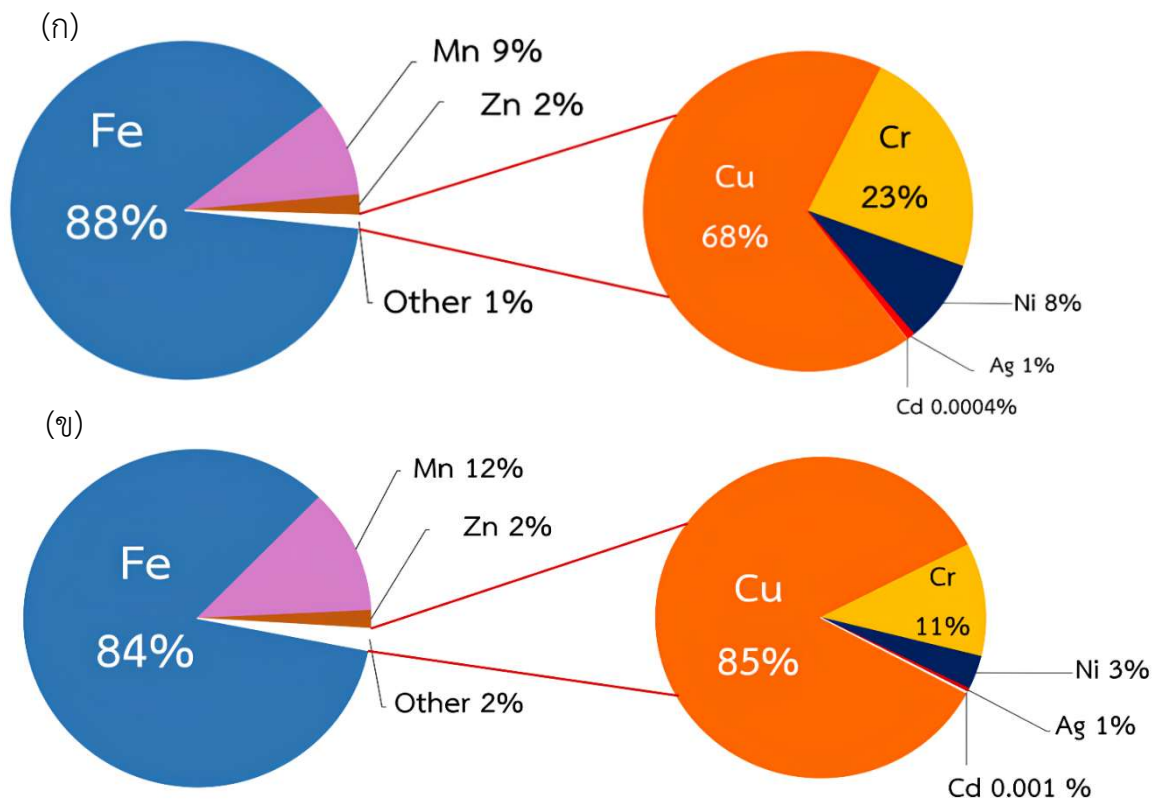


ภาพที่ 2 เปรียบเทียบความเข้มข้นฟุ้งโลหะแยกตามธาตุในฝุ่นรวมกับฝุ่นขนาดเล็ก

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนของปริมาณฟุ้งโลหะในฝุ่นรวม พบธาตุ Fe มีปริมาณมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 88 รองลงมาเป็น Mn คิดเป็นร้อยละ 9 ธาตุ Zn คิดเป็นร้อยละ 2 และธาตุอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 1 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาภายในธาตุอื่น ๆ พบธาตุ Cu, Cr, Ni, Ag และ Cd คิดเป็นร้อยละ 68, 23, 8, 1 และ 0.0004 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 3 (ก)

ส่วนผลการวิเคราะห์สัดส่วนของปริมาณฟุ้งโลหะในฝุ่นขนาดเล็ก พบฟุ้งโลหะที่พบมากในฝุ่นขนาดเล็ก 3 อันดับแรก เป็นธาตุฟุ้งโลหะกลุ่มเดียวกับฟุ้งโลหะที่พบในฝุ่นรวม ซึ่งสัดส่วนของธาตุ Fe ในฝุ่นขนาดเล็กมีค่าน้อยกว่าสัดส่วนฝุ่นรวม คิดเป็นส่วนต่างร้อยละ 4 แต่ธาตุ Mn ในฝุ่นขนาดเล็กมีค่ามากกว่าสัดส่วนฝุ่นรวม คิดเป็นส่วนต่างร้อยละ 3 และสัดส่วนของ Zn ในฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็กมีค่าเท่ากัน (ร้อยละ 2) ส่วนธาตุอื่น ๆ ในฝุ่นขนาดเล็กมีค่ามากกว่าสัดส่วนในฝุ่นรวม คิดเป็นส่วนต่างร้อยละ 1 รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 3 (ข)



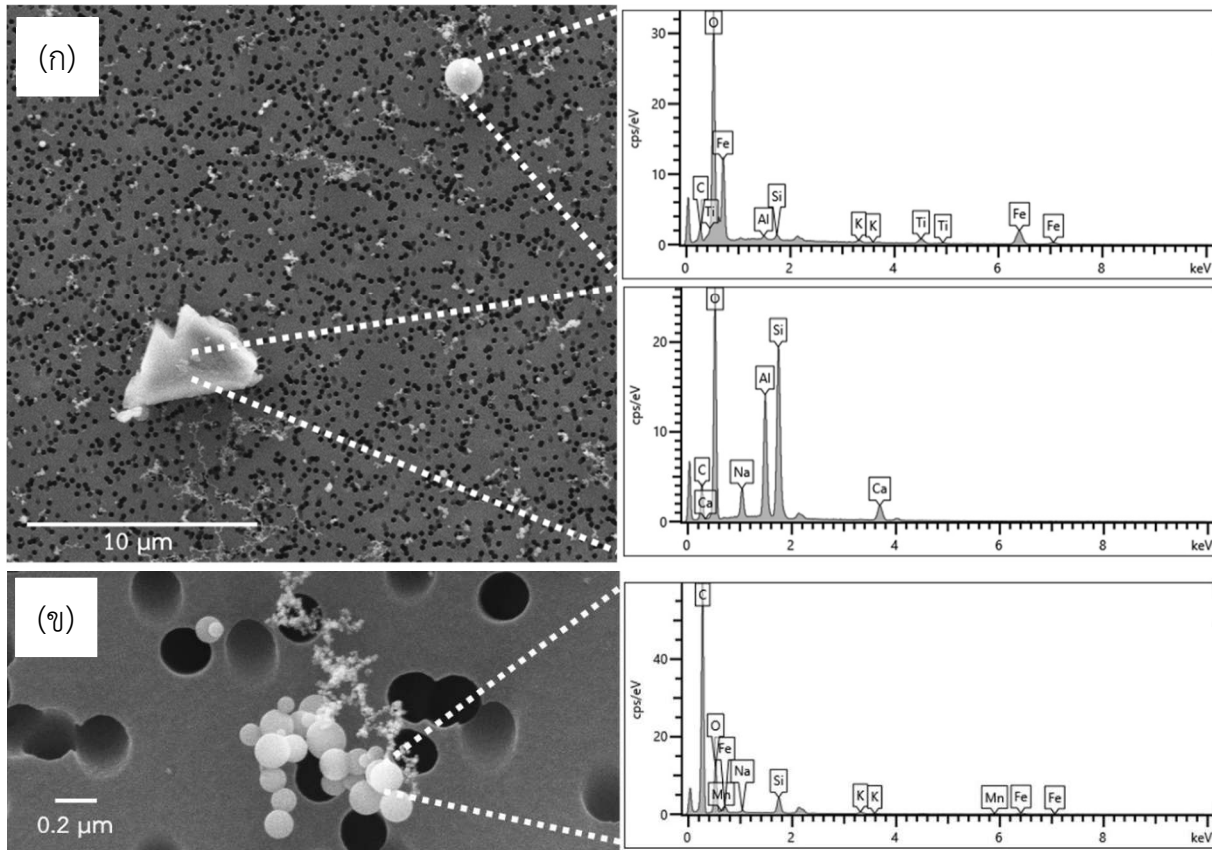


ภาพที่ 3 สัดส่วนของปริมาณฟลูออโรแฮกตามธาตุ (ก) ในฝุ่นรวม และ (ข) ในฝุ่นขนาดเล็ก

4.2 สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุของฟลูออโรแฮก

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟลูออโรแฮกด้วยเครื่อง FESEM-EDS ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า พบลักษณะของอนุภาคที่หลากหลายทั้งขนาดและรูปร่าง เช่น อนุภาครูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform) ขนาดต่ำกว่า 6 μm ซึ่งพบองค์ประกอบของธาตุ O, Si, C, Al, Ca และ Na คิดเป็นร้อยละ 37.76, 23.72, 14.09, 14.01, 7.33 และ 3.08 ตามลำดับ และอนุภาคทรงกลมขนาด 1 μm ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุ Fe, O, Ti, C, K, Si และ Al คิดเป็นร้อยละ 61.07, 29.23, 4.52, 2.87, 1.03, 0.79 และ 0.5 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอนุภาคที่จับตัวกันเป็นสายมีขนาดอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 μm ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) เมื่อขยายอนุภาคดังกล่าวที่กำลังขยาย 30,000 เท่า แสดงให้เห็นการรวมตัวของอนุภาคเล็กมาก (Ultrafine Particles) จนถึงระดับนาโนเมตร เรียงตัวต่อกันมีลักษณะคล้ายสายโซ่ (Chain-like) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS พบองค์ประกอบธาตุ C, O และ Fe คิดเป็นร้อยละ 65.64, 19.07 และ 7.73 ตามลำดับ นอกจากนี้พบธาตุโลหะอื่น ๆ ได้แก่ Si (4.0 %) และ Mn (1.86 %) ดังแสดงในภาพที่ 4 (ข)





ภาพที่ 4 ตัวอย่างสัณฐานวิทยาของฟุ้งจากการเชื่อม : (ก) อนุภาคที่มีขนาดที่ต่ำกว่า 10 ไมครอน (ข) อนุภาคขนาดเล็กมาก (Ultrafine Particles) และอนุภาคช่วงนาโนเมตรจับตัวเรียงกัน มีลักษณะคล้ายสายโซ่

5. อภิปรายผล

จากผลการประเมินการรับสัมผัสฟุ้งโลหะจากกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างแบบฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็ก ในครั้งนี้ พบฟุ้งโลหะทั้ง 8 ธาตุ โดยฟุ้งโลหะที่พบมากที่สุดในการเก็บตัวอย่างฝุ่นทั้ง 2 ชนิด 3 อันดับแรก คือ Fe, Mn และ Zn ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pourhassan et al. (2024) ที่พบฟุ้งโลหะ Fe (1.05 mg/m^3), Mn (0.03 mg/m^3) และ Zn (0.11 mg/m^3) ด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างแบบฝุ่นรวม โดยพบปริมาณของธาตุดังกล่าวใกล้เคียงกับการศึกษาครั้งนี้ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณฟุ้งโลหะของธาตุดังกล่าวพบน้อยกว่าการศึกษาของ Soltanpour et al. (2023) และ Balkhyour & Goknil (2010) ที่พบฟุ้งโลหะ Fe, Mn, Cr, Ni และ Cu เท่ากับ 17.89, 0.48, 0.44, 0.14 และ 0.08 mg/m^3 ตามลำดับ ซึ่งชนิดและปริมาณความเข้มข้นของฟุ้งโลหะที่เกิดจากการเชื่อมมีค่าแตกต่างกัน อาจเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของโลหะชิ้นงาน ชนิดของลวดเชื่อม และกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม (Dehghan & Mehrifar, 2019) และระยะเวลาการรับสัมผัส (Pourhassan et al., 2024) เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการศึกษารับสัมผัสฟุ้งโลหะจากการอาร์กเพียงระยะการสัมผัสสั้น ๆ (1 ชิ้นงาน) แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีค่าสำหรับการรับสัมผัสฟุ้งโลหะในระยะเวลานั้น (Short Term Exposure Limit: STEL) มีแต่ค่าเฉลี่ยการรับสัมผัสฟุ้งโลหะ 8 ชม. การทำงาน (TWA) (ACGIH, 2024) การศึกษาครั้งนี้ พบว่าช่างเชื่อมโลหะมีการรับสัมผัสฟุ้งโลหะที่ไม่เกินค่า TWA แต่ยังคงมีการรับสัมผัสฟุ้งโลหะจากการเชื่อมอาร์กโลหะ ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพแบบเฉียบพลัน เช่น อาการไอ โรคไข้ฟุ้งโลหะ (Suarez et al., 2022) และแบบเรื้อรัง เช่น โรคปอดอักเสบ ถุงลมโป่งพอง โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง



โรคพาร์กินสัน และมะเร็งปอด (Cha et al., 2022; Kuempel et al., 2021; Sriram et al., 2010) เมื่อมีการรับสัมผัสฝุ่นโลหะต่อเนื่องเป็นระยะเวลาสั้น

ผลการเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นโลหะในฝุ่นรวมส่วนใหญ่จะพบมากกว่าในฝุ่นขนาดเล็กเนื่องจากการเก็บตัวอย่างฝุ่นรวมจะเก็บอนุภาคทุกขนาดที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมโลหะ แต่การเก็บตัวอย่างฝุ่นขนาดเล็กจะมีไซโคลนเป็นอุปกรณ์ในการแยกฝุ่นขนาดใหญ่ออกและคัดเลือกเก็บอนุภาคต่ำกว่า $10\ \mu\text{m}$ เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้พบปริมาณฝุ่นโลหะ Cu ที่มีปริมาณใกล้เคียงกันในตัวอย่างฝุ่นทั้ง 2 ชนิด และพบปริมาณฝุ่นโลหะ Cd ในฝุ่นขนาดเล็กมากกว่าฝุ่นรวม เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบสัดส่วนของปริมาณธาตุของฝุ่นโลหะยังพบว่าสัดส่วนของ Mn, Cu และ Cd ในฝุ่นขนาดเล็กมีมากกว่าฝุ่นรวม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวอาจแสดงให้เห็นว่าธาตุเหล่านี้จะพบมากในฝุ่นขนาดเล็ก

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฝุ่นโลหะจากการเชื่อมพบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมและอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Cena et al. (2016) ที่รายงานว่าอนุภาคที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมโลหะมีรูปร่างทรงกลมมีขนาดอยู่ในช่วง $0.5 - 4\ \mu\text{m}$ ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่อาจเกิดจากการกระเด็นของโลหะขณะปฏิบัติงานเชื่อม ผลการศึกษาขนาดและรูปร่างของฝุ่นโลหะในหลายงานวิจัยพบว่า ฝุ่นโลหะมีขนาดอยู่ในช่วง $0.2 - 0.5\ \mu\text{m}$ (Sowards et al., 2010) และ $0.01 - 1\ \mu\text{m}$ หรือเรียกว่าอนุภาคขนาดเล็กมาก (Ultrafine particles) (Zeidler-Erdely et al., 2012) และ Su et al. (2019) พบว่าอนุภาคฝุ่นโลหะมีลักษณะของอนุภาคขนาดเล็กมากจนถึงระดับนาโนเมตรเกาะกันเป็นกลุ่ม (Agglomerate) เรียงตัวกันเป็นสายโซ่ (Chain-like) ซึ่ง Oprya et al. (2012) รายงานว่าองค์ประกอบของธาตุในฝุ่นโลหะที่พบมากที่สุดในการวิเคราะห์ด้วย EDS คือ ธาตุ C, O และ Fe ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฝุ่นโลหะจะอยู่ในรูปโลหะออกไซด์ โดยสัดส่วนของธาตุโลหะดังกล่าวจะแตกต่างกันตามชนิดของลวดเชื่อม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาครั้งนี้ (ภาพที่ 4 (ข))

การศึกษากการรับสัมผัสฝุ่นโลหะของช่างเชื่อมขณะเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในท่าราบจำนวน 1 ชิ้นงาน จากการเก็บฝุ่นรวมและฝุ่นขนาดเล็ก พบฝุ่นโลหะทั้ง 8 ชนิด โดยความเข้มข้นที่มากที่สุด คือ Fe Mn และ Zn นอกจากนี้ยังพบฝุ่นโลหะที่มีปริมาณน้อย (Trace element) ได้แก่ Ag, Cd, Cr, Cu และ Ni และสัณฐานวิทยาของฝุ่นโลหะมีลักษณะอนุภาคทรงกลมที่อยู่ในระดับอนุภาคขนาดเล็กมากจนถึงระดับนาโนเมตรเกาะกันเป็นลักษณะสายโซ่ (Chain-like) ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุส่วนใหญ่ คือ C, O, Fe และพบธาตุโลหะอื่น ๆ ในปริมาณน้อย ได้แก่ Mn และ Si ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าควรจัดหามาตรการที่ช่วยลดการรับสัมผัสฝุ่นโลหะจากการปฏิบัติงานในระยะเวลาสั้น ๆ

6. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การปฏิบัติงานเชื่อมอาร์กโลหะในระยะเวลาสั้น ๆ (5 – 10 นาที) ผู้ปฏิบัติงานเชื่อมได้รับสัมผัสฝุ่นโลหะที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน โดยพบขนาดของฝุ่นโลหะที่มีขนาดเล็กมากจนถึงขนาดนาโนเมตร ซึ่งสามารถก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพได้ ดังนั้นจึงควรมีระบบระบายอากาศเฉพาะที่ในบริเวณที่ปฏิบัติงาน และจัดหาหน้ากากที่สามารถกรองฝุ่นโลหะที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดนาโนเมตรให้ช่างเชื่อมสวมใส่ รวมทั้งอบรมให้ความรู้เรื่องอันตรายและวิธีการป้องกันการรับสัมผัสฝุ่นโลหะขณะปฏิบัติงานเชื่อม ซึ่งมาตรการดังกล่าวสามารถช่วยลดการรับสัมผัสฝุ่นโลหะขณะปฏิบัติงานเชื่อมได้

การศึกษานี้เป็นการศึกษางานเชื่อมโลหะเพียง 1 กรณี เท่านั้น ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการสัมผัสฝุ่นโลหะจากกระบวนการเชื่อม เช่น ประเภทของการเชื่อม ชนิดของโลหะ และประเภทของลวดเชื่อม เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อคุณลักษณะของฝุ่นโลหะ ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพที่แตกต่างกัน





รวมทั้งควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการรับสัมผัสฝุ่นโลหะในระยะเวลาสั้น ๆ กับผลกระทบทางพิษวิทยา เพื่อกำหนดค่ามาตรฐานของค่าขีดจำกัดการสัมผัสระยะสั้น (STEL)

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณช่างเชื่อมอาร์กโลหะที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- ภาณุวัฒน์ หนูกิจ. (2557). งานเชื่อมโลหะเบื้องต้น. เต็มรักการพิมพ์.
- ภูวดล ผู้เลี้ยง, ศรีรัตน์ ล้อมพงศ์, นันทพร ภัทรพุท และจิตรพรรณ ภูษากักตภาพ. (2561). ปัจจัยเสี่ยงที่มีความสัมพันธ์กับอาการผิดปกติของระบบทางเดินหายใจ ของช่างเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมในเขตจังหวัดระยอง. *วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ*, 11(3), 13-25.
- มนตรี แสงสุริยันต์ และประยูร สุรินทร์. (2562). การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและการคืบของกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า ในการเชื่อมเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 13(1), 197-209.
- ACGIH, (2024). *2024 TLVs and BEIs Threshold Limit Values for Chemical Substances and Biological Exposure Indices*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Balkhyour, M. A., & Goknil, M. K. (2010). Total fume and metal concentrations during welding in selected factories in Jeddah, Saudi Arabia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(7), 2978-2987. <https://doi.org/10.3390/ijerph7072978>
- Cena, L. G., Chen, B. T., & Keane, M. J. (2016). Evolution of welding-fume aerosols with time and distance from the source: a study was conducted on the spatiotemporal variability in welding-fume concentrations for the characterization of first-and second-hand exposure to welding fumes. *Welding journal*, 95(Suppl), 280-s – 285-s.
- Cha, E. W., Jeon, D., Kang, D., Kim, Y. K., & Kim, S. Y. (2022). Chemical Pneumonitis Caused by the Inhalation of Zinc Oxide Fumes in an Arc Welder. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7954. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137954>
- Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Nowak, K., Garley, M., & Niklinski, J. (2023). Cadmium toxicity and health effects—a brief summary. *Molecules*, 28(18), 6620. <https://doi.org/10.3390/molecules28186620>
- Dehghan, S. F., & Mehrifar, Y. (2019). Occupational exposure to fumes and gases during different arc welding processes. *International Journal of Occupational Hygiene*, 11(2), 136-145.
- ISO 9606-1. (2012). *9606-1:2012 Qualification Testing of Welders - Fusion Welding Part 1: Steels*. ISO, <https://www.iso.org/standard/54936.html>.





- Kuempel, E., Roberts, J. R., Roth, G., Dunn, K. L., Zumwalde, R., Drew, N., Hubbs, A., Trout, D., & Holdsworth, G. (2021). *Health effects of occupational exposure to silver nanomaterials*. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health.
- Loomis, D., Dzhambov, A. M., Momen, N. C., Chartres, N., Descatha, A., Guha, N., Kang, S. K., Modenese, A, Morgan, R. L., Ahn, S., Martinez-Silveira, M. S., Zhang, S., & Pega, F. (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, 107565. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107565>
- Newton, A., Adams, K., Serdar, B., Dickinson, L. M., & Koehler, K. (2021). Personal and area exposure assessment at a stainless steel fabrication facility: an evaluation of inhalable, time-resolved PM10, and bioavailable airborne metals. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 18(2), 90-100.
- NIOSH. (1993). WELDING AND BRAZING FUME: METHOD 7200. In *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) Fourth Edition*. NIOSH Databases.
- NIOSH. (1994). PARTICULATES NOT OTHERWISE REGULATED, TOTAL 0500. In *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) Fourth Edition*. NIOSH Databases.
- NIOSH. (1998). PARTICULATES NOT OTHERWISE REGULATED, RESPIRABLE 0600. In *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) Fourth Edition*. NIOSH Databases.
- NIOSH. (1998). PARTICULATES NOT OTHERWISE REGULATED, RESPIRABLE 0600. In *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) Fourth Edition*. NIOSH Databases.
- Oprya, M., Kiro, S., Worobiec, A., Horemans, B., Darchuk, L., Novakovic, V., Ennan, A., & Van Grieken, R. (2012). Size distribution and chemical properties of welding fumes of inhalable particles. *Journal of Aerosol Science*, 45, 50-57.
- Pourhassan, B., Beigzadeh, Z., Nasirzadeh, N., & Karimi, A. (2024). Application of multiple occupational health risk assessment models for metal fumes in welding process. *Biological Trace Element Research*, 202(3), 811-823.
- Riccelli, M. G., Goldoni, M., Poli, D., Mozzoni, P., Cavallo, D., & Corradi, M. (2020). Welding fumes, a risk factor for lung diseases. *International journal of environmental research and public health*, 17(7), 2552.
- 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*, 30(35), 83728-83734.
- Sowards, J. W., Ramirez, A. J., Dickinson, D. W., & Lippold, J. C. (2010). Characterization of welding fume from SMAW electrodes-Part II. *Weld. J*, 89(4), 82s-90s.





- Sriram, K., Lin, G. X., Jefferson, A. M., Roberts, J. R., Chapman, R. S., Chen, B. T., Soukup, J. M., Ghio, A. J., & Antonini, J. M. (2010). Dopaminergic neurotoxicity following pulmonary exposure to manganese-containing welding fumes. *Archives of toxicology*, *84*, 521-540.
- Su, W. C., Chen, Y., Bezerra, M., & Wang, J. (2019). Respiratory deposition of ultrafine welding fume particles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, *16*(10), 694-706.
- Suarez, G., Niculita-Hirzel, H., Correia, D., Pralong, J. A., & Vernez, D. (2022). A proposed synergetic mechanism for metal fume fever involving ZnO and Fe₃O₄ nanoparticles. *Scientific Reports*, *12*(1), 15643. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19956-1>
- US EPA. (2007). *EPA Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils*. <https://www.epa.gov/esam/us-epa-method-3051a-microwave-assisted-acid-digestion-sediments-sludges-and-oils>.
- Wanjari, M. B., & Wankhede, P. (2020). Occupational hazards associated with welding work that influence health status of welders. *International Journal of Current Research and Review*, *12*(23), 51-55.
- Wight, G.D. (1994). *Fundamentals of Air Sampling* (1st ed.). CRC Press.
- Wycislik-Sosnierz, J., Matusiak, J., Adamiec, J., Urbanczyk, M., Lemanowicz, M., Kusiorowski, R., & Gerle, A. (2024, August). Morphology of Welding Fume Derived from Stainless Steel Arc Welding. In *Proceedings* (Vol. 108, No. 1, p. 8). MDPI.
- Zeidler-Erdely, P. C., Erdely, A., & Antonini, J. M. (2012). Immunotoxicology of arc welding fume: worker and experimental animal studies. *Journal of immunotoxicology*, *9*(4), 411-425. <https://doi.org/10.3109/1547691X.2011.652783>

