

การควบคุมคุณภาพโดยการใช้วัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์แทนวัสดุมาตรฐานลดทองบริสุทธิ์ และสร้างชิ้นงานอะคริลิกช่วยขึ้นรูปตัวอย่าง

ศิริวรรณ พงศ์พุกษาพัฒนา และ ภาณุพงษ์ ลิ้มอุสนโน*

สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่
จังหวัดสงขลา 90110

*อีเมลของผู้ประพันธ์บรรณกิจ: panupong.li@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพของเครื่องมือตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติ โดยใช้วัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์แทนวัสดุมาตรฐานลดทองค่าบริสุทธิ์เพื่อช่วยลดต้นทุน และสร้างอุปกรณ์ช่วยขึ้นรูปตัวอย่างด้วยชิ้นงานอะคริลิกเพื่อลดเวลาในกระบวนการเตรียมตัวอย่าง การศึกษาได้ทำการทดสอบจุดหลอมเหลวของวัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์ด้วยเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติ จำนวน 49 ครั้ง และสร้างแผนภูมิควบคุมคุณภาพเพื่อหาค่าขีดจำกัดควบคุมบนและค่าขีดจำกัดควบคุมล่าง ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าเฉลี่ยของจุดหลอมเหลวของวัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์เท่ากับ 966.49 ± 7.24 องศาเซลเซียส โดยมีขีดจำกัดบนของการควบคุมเท่ากับ 988.22 องศาเซลเซียส มีขีดจำกัดล่างของการควบคุมเท่ากับ 944.76 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดสอบค่าจุดหลอมเหลวของวัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์ที่ได้ทั้งหมดอยู่ภายในขีดจำกัดการควบคุม แสดงว่าสามารถใช้วัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์ในการควบคุมคุณภาพของเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติได้ รวมทั้งลดต้นทุนใช้วัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์ทดแทนวัสดุมาตรฐานลดทองค่าบริสุทธิ์ได้ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ขึ้นรูปตัวอย่างจากอะคริลิก ด้วยเครื่องแกะสลักขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ จำนวนสองชิ้น พบว่า สามารถช่วยขึ้นรูปตัวอย่างรูปร่างคล้ายพีระมิดก่อนการทดสอบด้วยเครื่องการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงสามารถลดเวลาในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และลดต้นทุน พร้อมทั้งยืนยันความเหมาะสมในการใช้ลดเงินบริสุทธิ์แทนลดทองค่าบริสุทธิ์ในการควบคุมคุณภาพอุณหภูมิเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติได้

คำสำคัญ: ลดทอง; ลดเงิน; เครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติ; จุดหลอมเหลว; อะคริลิก

Quality Control of Ash Fusion Temperature Measurement Using Pure Silver Wire as a Substitute for Gold Wire and an Acrylic Mold for Sample Preparation

Siriwan Pongprueksapattana and Panupong Lim-u-sanno*

Office of Scientific Instrument and Testing, Prince of Songkla University, Hatyai Campus, Hatyai District, Songkhla 90110, Thailand

*Corresponding author's e-mail: panupong.li@psu.ac.th

Abstract

This study aimed to control the quality of an automatic ash fusion analyzer by using pure silver wire as a reference material instead of pure gold wire, thereby reducing costs, and by developing an acrylic sample-shaping device to minimize sample preparation time. The study involved 49 measurements of the melting point of pure silver wire using the automatic ash fusion analyzer. Control charts were constructed to determine the upper and lower control limits. The results showed that the average melting point of pure silver wire was 966.49 ± 7.24 °C, with an upper control limit of 988.22 °C and a lower control limit of 944.76 °C. All test results fell within these control limits, indicating that pure silver wire can be used as a reference material for quality control of the automatic ash fusion analyzer, while also lowering costs by replacing pure gold wire. In addition, an acrylic-based sample-shaping device was designed and fabricated using a 3-axis Mini CNC Engraving Machine (Model Z-DQ) in two versions. The device effectively shaped samples into pyramid-like forms prior to testing in the automatic ash fusion analyzer. This innovation not only reduced the time required for sample preparation but also confirmed the feasibility of using pure silver wire as a cost-effective alternative to pure gold wire for temperature quality control in the automatic ash fusion analyzer.

Keywords: Gold Wire; Silver Wire; Ash Fusion; Melting Point; Acrylic

บทนำ

การผลิตพลังงานโดยใช้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหินและชีวมวล ยังคงเป็นแหล่งพลังงานสำคัญในหลายประเทศ เนื่องจากมีปริมาณเพียงพอและต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อเผาไหม้แล้ว จะเกิดเถ้า (Ash) ซึ่งหากเถ้ามีจุดหลอมละลาย (Ash Fusion Temperature, AFT) ต่ำเกินไป จะเพิ่มโอกาสในการเกิดการเกาะตัวของเถ้า (Slagging) และการสะสมตะกรัน (Fouling) ภายในหม้อไอน้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงและต้องมีการซ่อมบำรุงบ่อย (Onifade et al., 2023) การทดสอบเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของเถ้าแบบอัตโนมัติ; Ash Fusibility Determinator หรือ Ash Fusion มักอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1857 โดยใช้เครื่องมือชนิดอัตโนมัติเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างตัวอย่างเถ้าขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถระบุอุณหภูมิจุดเปลี่ยนแปลงได้หลายค่า ได้แก่ จุดเริ่มหลอม (Deformation), จุดกึ่งลูกกลม (Spherical), จุดกึ่งทรงกลม (Hemispherical) และจุดไหล (Flow) (Li et al., 2020)

ในการสอบเทียบและควบคุมคุณภาพของเครื่องมือทดสอบเหล่านี้ มักต้องใช้วัสดุมาตรฐานอ้างอิงที่มีจุดหลอมเหลวแน่นอน เพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ สำหรับโลหะบริสุทธิ์ เช่น เงิน (Ag) และทอง (Au) มีการนำมาใช้เป็นวัสดุมาตรฐานในงานทดสอบอุณหภูมิหรือจุดหลอมเหลว เช่น สถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติ (National Institute of Standards and Technology; NIST) เป็นองค์กรรับรองของสารมาตรฐาน และรองรับการวัดที่แม่นยำและน่าเชื่อถือ ดำเนินการสอบเทียบเครื่องมือในหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวัด NIST ได้กำหนดให้โลหะเงินบริสุทธิ์ ≥ 99.9999 เปอร์เซ็นต์ เป็นวัสดุมาตรฐานอ้างอิง (Fixed-Point Standard) สำหรับการสอบเทียบอุณหภูมิ และมีการใช้โลหะทองคำขาวในการสอบเทียบระบบ X-ray หรือการวัด Lattice Spacing ให้เป็นมาตรฐานอุณหภูมิ (Direct Melting-Point Calibration) อีกด้วย (Freudenblum et al., 2025) ตามเอกสารทางวิชาการ พบว่า การใช้โลหะมาตรฐาน เช่น เงินหรือทองเป็นวัสดุมาตรฐานอ้างอิง (Standard Reference Material; SRM) เป็นการเพิ่มความแม่นยำในการสอบเทียบอุณหภูมิ และยังมีบทความที่ศึกษาคุณสมบัติจุดหลอมเหลวของโลหะเหล่านี้ (เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และคณะ, 2563) ซึ่งแสดงค่าจุดหลอมเหลวของเงิน โดยพบว่าเงินมีจุดหลอมเหลวประมาณ 960 องศาเซลเซียส ขณะที่ทองมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1064 องศาเซลเซียส (Fahdiran et al., 2021) ในด้านของงานศึกษาพฤติกรรมการหลอมละลายเถ้า ปัจจุบันมีงานวิจัยที่วิเคราะห์อิทธิพลขององค์ประกอบทางเคมีและเงื่อนไขต่าง ๆ ต่อจุดหลอมเหลวอย่างละเอียด เช่น การศึกษาผลของส่วนประกอบ Proximate หรือองค์ประกอบของเถ้าต่อจุดหลอมเหลว (Onifade et al., 2023) หรือการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเถ้าจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่แตกต่างส่งผลต่อจุดหลอมเหลว (Gao et al., 2021) ถึงแม้ว่างานวิจัยทางด้านจุดหลอมละลาย จะมีบทบาทสูงในกลุ่มพลังงานและวิศวกรรมเชื้อเพลิง แต่ในแง่ของ การลดต้นทุนการสอบเทียบเครื่องมือ และการปรับปรุงวิธีการเตรียมตัวอย่าง ยังมีช่องว่างงานวิจัยอย่างมาก การใช้ลวดทองคำเป็นวัสดุมาตรฐานในการสอบเทียบแม้จะให้ความแม่นยำสูง แต่มีข้อจำกัดเรื่องราคาที่สูงและการใช้งานซ้ำได้จำกัด ด้วยงานวิจัยนี้ คาดว่าจะช่วยสนับสนุนในการใช้งานวัสดุมาตรฐานที่ต้นทุนต่ำกว่า และสนับสนุนการวิจัยด้านเชื้อเพลิงในห้วงปฏิบัติการที่งบประมาณจำกัด

สำหรับการปฏิบัติงานการขึ้นรูปตัวอย่างเถ้า ต้องขึ้นรูปตัวอย่างให้เป็นรูปร่างคล้ายพีระมิดตามมาตรฐาน ASTM D1857 (ASTM International, 2024) ใช้อุปกรณ์แม่พิมพ์ทองเหลือง กำหนดความสูงของกรวย 19 มิลลิเมตร ฐานกว้าง 6.4 มิลลิเมตร ซึ่งฐานแต่ละด้านเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ขั้นตอนคือใส่ตัวอย่างเถ้าลงในอุปกรณ์แม่พิมพ์ และกดให้แน่น และดันตัวอย่างเถ้าออกจากอุปกรณ์แม่พิมพ์ ซึ่งพบปัญหาในการขึ้นรูปตัวอย่างคือบริเวณฐานตัวอย่างเกิดการแตกร้าว หลังจากดันตัวอย่างออกมาจากแม่พิมพ์ ยากต่อการขึ้นรูปตัวอย่างให้เป็นรูปร่างคล้ายพีระมิด

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ของลวดเงินบริสุทธิ์ในการใช้เป็นวัสดุมาตรฐานอ้างอิงเพื่อควบคุมคุณภาพเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของเถ้าแบบอัตโนมัติ การลดต้นทุนเมื่อเทียบกับการใช้ลวดทองคำ รวมทั้ง

การพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นงานอะคริลิกสำหรับช่วยในการขึ้นรูปตัวอย่าง เพื่อลดเวลาและความซับซ้อนในการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

วัตถุประสงค์การวิจัย

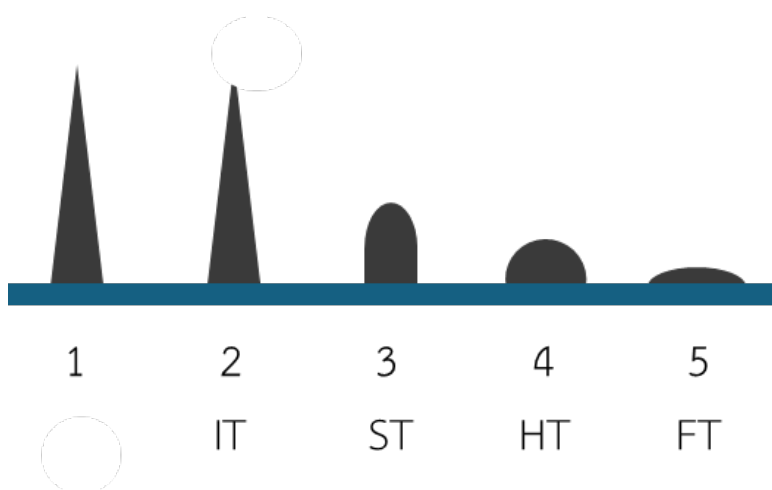
1. เพื่อควบคุมคุณภาพของเครื่องมือตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติด้วยวัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์ได้
2. เพื่อลดต้นทุนโดยใช้วัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์แทนวัสดุมาตรฐานลดทองคำบริสุทธิ์ได้
3. เพื่อลดเวลาในขั้นตอนการขึ้นรูปตัวอย่างด้วยชิ้นงานอะคริลิกที่เตรียมขึ้นเองได้

ระเบียบวิธีวิจัย

ผู้วิจัยมีแนวความคิดการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ ศึกษาวัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์เพื่อใช้ควบคุมคุณภาพอุณหภูมิเครื่องมือ และ สร้างชิ้นงานอะคริลิกช่วยขึ้นรูปตัวอย่างซีเมนต์เป็นรูปพีระมิดเพื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติ

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติ (Ash Fusibility Determinator; Ash Fusion) รุ่น AF700 ยี่ห้อ LECO ประเทศสหรัฐอเมริกา เครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM D1857 โดยมีกล้องดิจิทัลบันทึกภาพอย่างต่อเนื่องขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพเพื่อตรวจหาจุดหลอมละลายโดยอัตโนมัติ โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ถึง 1,500 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะมีปริมาณก๊าซออกซิเจนสูง หรือ Oxidizing Atmosphere เครื่องบันทึกอุณหภูมิ 4 ค่า ได้แก่ 1) อุณหภูมิที่ตัวอย่างเริ่มหลอมตัวจากปลายยอด; Initial Deformation Temperature (IT) 2) อุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนความสูงของตัวอย่างลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสูงของตัวอย่างเริ่มต้น; Spherical Temperature (ST) 3) อุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนความกว้างของฐานมีค่าเท่ากับสองเท่าของความสูง; Hemispherical Temperature (HT) 4) อุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนกระทั่งความสูงของตัวอย่างมีค่าเท่ากับหนึ่งในสามของความกว้างของฐาน; Flow Temperature (FT) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 จุดที่เถ้าหลอมละลาย

โปรแกรม Aspire สำหรับสร้างแบบจำลอง ในการเตรียมชิ้นงานใช้เครื่อง Mini CNC Engraving Machines แบบ 3 แกน รุ่น Z-DQ ยี่ห้อ BODOR จากประเทศจีน ตัดชิ้นงานด้วยดอกกัด 2 มิลลิเมตร ควบคุมระบบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control) โดยเตรียมชิ้นงานผ่านซอฟต์แวร์ Mach3 สำหรับตัดหรือกัดชิ้นงาน

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุมาตรฐานลวดทองบริสุทธิ์ (Gold Wire Calibration Standard) 99.98 เปอร์เซ็นต์ ขนาดยาว 152.4 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 มิลลิเมตร ค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลว 1064 ± 5.5 องศาเซลเซียส จากบริษัท LECO ประเทศสหรัฐอเมริกา ตัดลวดทองให้มีความยาวขนาดประมาณ 12.7 มิลลิเมตร

วัสดุมาตรฐานลวดเงินบริสุทธิ์ (Silver Wire) 99.9985 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 25 เมตร ค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลว 960.8 องศาเซลเซียส จากบริษัท Thermo Scientific Chemicals ประเทศสหรัฐอเมริกา เตรียมลวดเงินโดยทบพันเกลียวให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.08 มิลลิเมตร แล้วตัดลวดเงินให้มีความยาวขนาดประมาณ 12.7 มิลลิเมตร

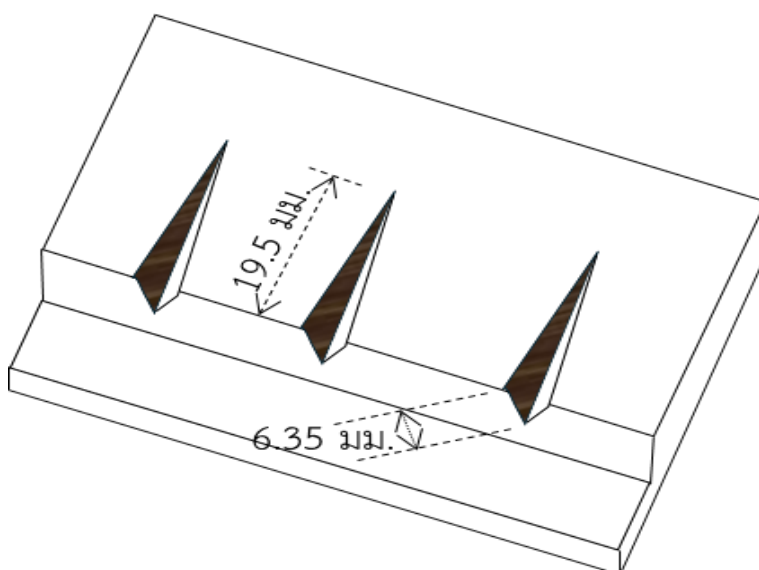
แผ่นอะคริลิกใสที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเป็นชนิดเกรดทางการค้า (Commercial Grade) ยี่ห้อแพนกลาส (PanGlas) ของบริษัท แพนเอเชียอุตสาหกรรม จำกัด หนา 5 มิลลิเมตร

การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลจุดหลอมเหลวของวัสดุมาตรฐานลวดเงินบริสุทธิ์

เก็บข้อมูลจุดหลอมเหลวของลวดเงินจำนวน 49 ครั้ง ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2566 นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ผลเป็นแผนภูมิควบคุม หรือ Control Chart หาค่าเฉลี่ยของจุดหลอมเหลวของวัสดุมาตรฐานลวดเงิน พร้อมทั้งค่าขีดจำกัดควบคุมบน (Upper Control Limit, UCL) และค่าขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower Control Limit, LCL)

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานอะคริลิก

1. สร้างแบบจำลองรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม Aspire โดยออกแบบชิ้นงานให้มีขนาดฐานกว้าง 6.35 มิลลิเมตร สูง 19.5 มิลลิเมตร ตามขนาดมาตรฐานของแม่พิมพ์ (Brass Cone Mold) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขนาดมาตรฐานของแม่พิมพ์

2. นำแผ่นอะคริลิกใสแบบหนา 5 มิลลิเมตร กัดชิ้นงานด้วยเครื่องแกะสลักขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Mini CNC Engraving Machines) แบบ 3 แกน รุ่น Z-DQ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Mach3 กัดรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบ 2 มิติ ตามที่ออกแบบไว้ โดยกัดลึก 5 มิลลิเมตร จนทะลุแผ่นอะคริลิก

3. นำชิ้นงานอะคริลิกรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่วมาติดกับแผ่นอะคริลิก หนา 5 มิลลิเมตร ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 35 มิลลิเมตร และติดตัวด้ามจับสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร ด้วยกาวผสมชิ้นงานอะคริลิกสำหรับใช้เป็นแท่นอัดและตัวด้ามจับ

4. เมื่อชิ้นงานติดแน่นกับฐานดีแล้วให้ทำการฝนมุมของแท่งสามเหลี่ยมทั้งซ้ายและขวาด้วยตะไบขนาดเล็กให้ได้รูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบ 3 มิติ หลังจากนั้นจึงค่อยฝนส่วนด้านบนของรูปทรงสามเหลี่ยมให้ป้านและเฉียงลงเล็กน้อยตามแบบของแม่พิมพ์ โดยค่อย ๆ ตะไบทีละนิดพร้อมกับทาบลึงในร่องของแม่พิมพ์โดยให้เหลือพื้นที่ว่างสำหรับการใส่และกดตัวอย่างลงในอุปกรณ์แม่พิมพ์

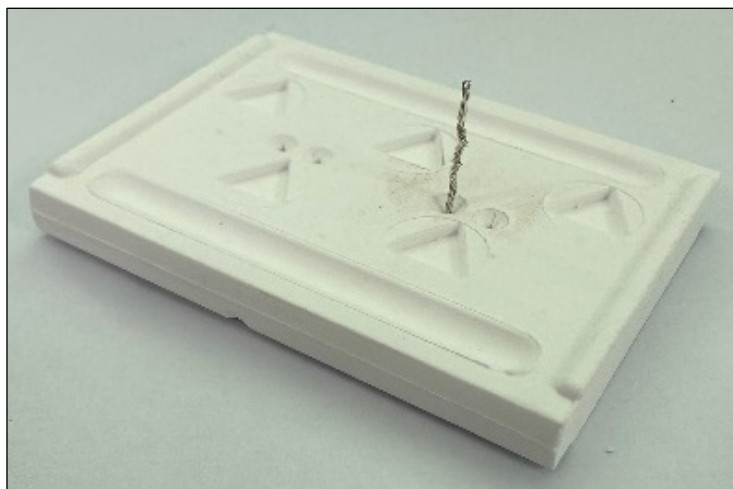
5. สร้างชิ้นงานอะคริลิกฐานสามเหลี่ยมด้านเท่าแบบ 2 มิติ สำหรับใช้ในการดันชิ้นงานออกจากเบ้าอุปกรณ์แม่พิมพ์ โดยสร้างแบบจำลองฐานสามเหลี่ยมด้านเท่า 2 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างระหว่างกัน 25 มิลลิเมตร และกัดชิ้นงานรอบ ๆ แบบจำลองฐานสามเหลี่ยมเป็นพื้นที่กว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 60 ลึก 2 มิลลิเมตร

6. นำแผ่นอะคริลิกใสแบบหนา 5 มิลลิเมตร กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร กัดชิ้นงานรูปฐานสามเหลี่ยมด้านเท่า 2 จุด ตามที่ออกแบบไว้ โดยเริ่มกัดตรงพื้นที่ส่วนบนของแผ่นอะคริลิก

ผลการวิจัย

ผลตรวจสอบการใช้ได้โดยวิธีแผนภูมิควบคุม (Control Chart)

ข้อมูลผลทดสอบแสดงค่าการหลอมเหลวของลวดเงิน (IT ST FT HT) ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3 เก็บข้อมูลทั้งหมด 49 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 1 นำไปสร้างแผนภูมิควบคุม พบว่าค่ามัธยฐานหรือค่าเฉลี่ยของจุดหลอมเหลวของลวดเงิน 966.49 ± 7.24 องศาเซลเซียส มีขีดจำกัดบนของการควบคุม หรือ UCL ที่ 988.22 องศาเซลเซียส มีขีดจำกัดล่างของการควบคุม หรือ LCL ที่ 944.76 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4 ผลการทดสอบค่าที่ได้ทั้งหมดอยู่ภายในขีดจำกัดการควบคุม (UCL-LCL) หมายความว่า กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม (In-Control Process) ไม่มีจุดใดหลุดกรอบเกินขีดจำกัดบนของการควบคุม หรือขีดจำกัดล่างของการควบคุม ไม่มีรูปแบบผิดปกติ ไม่มีแนวโน้มที่ขึ้นหรือลงต่อเนื่องหลายจุด ไม่มีลักษณะซ้ำ ๆ หรือสัญญาณพิเศษ เช่น 7 จุดต่อเนื่องอยู่ด้านเดียวของค่าเฉลี่ย ไม่มีกลุ่มค่าที่ผิดปกติ โดยรวมค่าขึ้นลงสลับกันอย่างสม่ำเสมอ เป็นการกระจายตามปกติของกระบวนการ แสดงว่าเครื่องมือและวิธีการทดสอบมีความเสถียร และความแม่นยำเพียงพอ เนื่องจากค่าที่ได้มีความผันผวนเฉพาะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของกระบวนการ โดยไม่ปรากฏความแปรปรวนที่ผิดปกติ



Name	Batch #	Method	Location	Analysis Date
Silver Wire	Batch #149	ASTM Oxidizing 2	2	9/10/2566 11:31:18

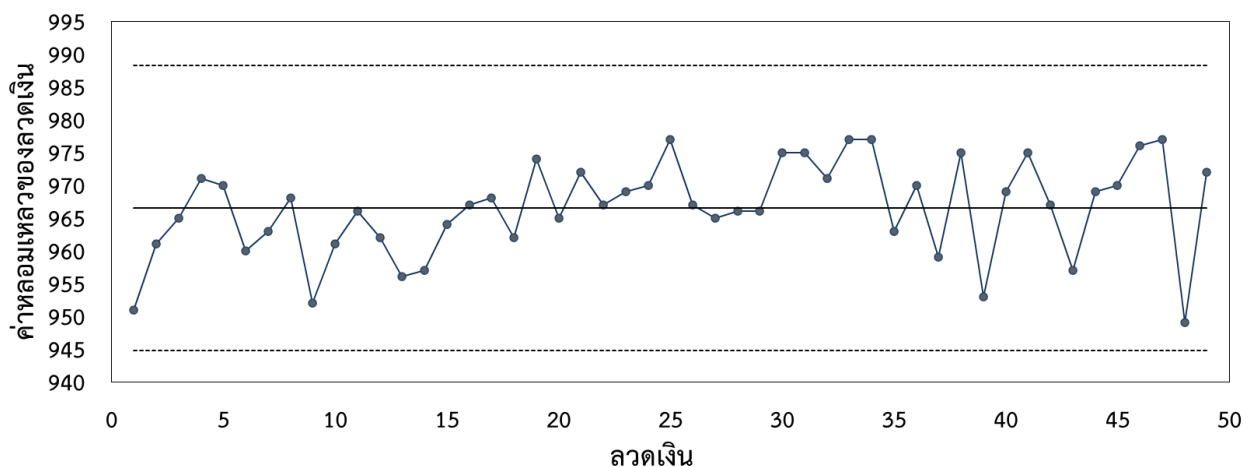
IT 962 °C	
Height	6
Width	13
Ratio	0.462
Rounding	21
Area	76
Temp. °C	962

ST962 °C	
Height	6
Width	13
Ratio	0.462
Rounding	21
Area	76
Temp. °C	962

HT962 °C	
Height	6
Width	13
Ratio	0.462
Rounding	21
Area	76
Temp. °C	962

FT962 °C	
Height	6
Width	13
Ratio	0.462
Rounding	21
Area	76
Temp. °C	962

ภาพที่ 3 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าการหลอมเหลวของลวดเงิน



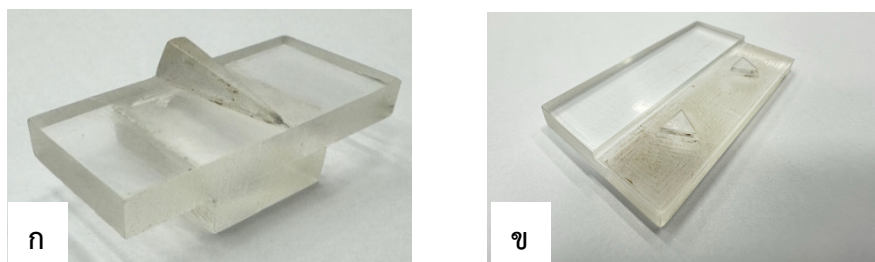
ภาพที่ 4 แผนภูมิควบคุมของอุณหภูมิการหลอมละลายของวัสดุมาตรฐานลวดเงินจำนวน 49 ครั้ง

ตารางที่ 1 ค่าจุดหลอมเหลวของลวดเงินในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2566

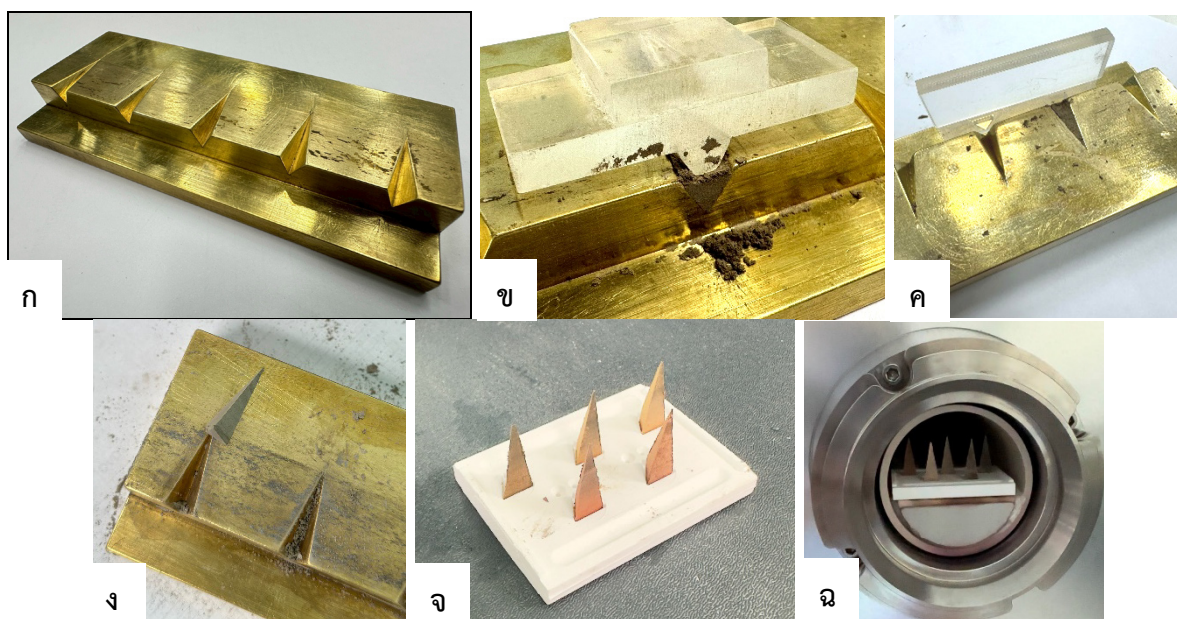
ครั้งที่	ค่าจุดหลอมเหลว ของลวดเงิน (องศาเซลเซียส)	ครั้งที่	ค่าจุดหลอมเหลว ของลวดเงิน (องศาเซลเซียส)	ครั้งที่	ค่าจุดหลอมเหลว ของลวดเงิน (องศา เซลเซียส)
1	951	18	962	35	963
2	961	19	974	36	970
3	965	20	965	37	959
4	971	21	972	38	975
5	970	22	967	39	953
6	960	23	969	40	969
7	963	24	970	41	975
8	968	25	977	42	967
9	952	26	967	43	957
10	961	27	965	44	969
11	966	28	966	45	970
12	962	29	966	46	976
13	956	30	975	47	977
14	957	31	975	48	949
15	964	32	971	49	972
16	967	33	977		
17	968	34	977		

ผลการเตรียมชิ้นงานจากแผ่นอะคริลิกสำหรับขึ้นรูปตัวอย่าง

จากการดำเนินการเตรียมชิ้นงานอะคริลิกตามขั้นตอน พบว่า สามารถสร้างชิ้นงานอะคริลิกต้นแบบรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีขนาดสอดคล้องกับมาตรฐานของแม่พิมพ์ (Brass Cone Mold) ได้สำเร็จ โดยใช้กระบวนการออกแบบด้วยโปรแกรม Aspire และการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องแกะสลักขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Mini CNC Engraving Machines) แบบ 3 แกน ควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ Mach3 เมื่อประกอบชิ้นงานสามเหลี่ยมหน้าจั่วเข้ากับฐานสี่เหลี่ยมและด้ามจับด้วยกาวสำหรับอะคริลิก และปรับแต่งด้วยการฝนด้วยตะไบขนาดเล็ก พบว่า สามารถสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่วแบบ 3 มิติ ที่เข้าร่องแม่พิมพ์ได้อย่างเหมาะสม และยังมีพื้นที่สำหรับใส่และกดตัวอย่างลงในอุปกรณ์แม่พิมพ์ได้ตามวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ ยังได้ชิ้นงานอะคริลิกฐานสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่สามารถใช้เป็นตัวดันชิ้นงานออกจากเบ้าแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบและกัดลงบนแผ่นอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตร ตามแบบจำลองที่กำหนดไว้ ทำให้สามารถใช้งานได้จริงร่วมกับอุปกรณ์แม่พิมพ์ แสดงดังภาพที่ 5 โดยสรุป กระบวนการเตรียมชิ้นงานอะคริลิกสามารถสร้างอุปกรณ์เสริมที่มีความแข็งแรง ใช้งานได้ตรงตามแบบ และสอดคล้องกับมาตรฐานของแม่พิมพ์ทองเหลือง ซึ่งช่วยให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานอัดและอัดขึ้นรูปตัวอย่างรูปทรงพีระมิด ได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วขึ้น แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ชิ้นงานจากแผ่นอะคริลิก (ก) ชิ้นงานอะคริลิกสำหรับใช้เป็นแท่นอัดและตัวด้ามจับ (ข) ชิ้นงานอะคริลิกสำหรับการดันชิ้นงานออกจากเบ้าอุปกรณ์แม่พิมพ์



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวอย่างพีระมิดโดยชิ้นงานอะคริลิกสร้างขึ้นเอง

อภิปรายผล

ผลการศึกษาการใช้ลวดเงินบริสุทธิ์เป็นวัสดุมาตรฐานสำหรับควบคุมคุณภาพการวัดอุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติแสดงให้เห็นว่า ค่าจุดหลอมเหลวที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด 49 ครั้ง มีค่าเฉลี่ย 966.49 ± 7.24 องศาเซลเซียส และค่าที่ได้ทั้งหมดอยู่ภายในขีดจำกัดการควบคุม (UCL-LCL) ซึ่งสะท้อนว่า กระบวนการวัดมีความสม่ำเสมอและอยู่ภายใต้การควบคุม (In-Control Process) ผลดังกล่าวยืนยันว่าลวดเงินบริสุทธิ์สามารถใช้แทนลวดทองบริสุทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่สูญเสียความแม่นยำในการควบคุมคุณภาพเครื่องมือ อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก เนื่องจากลวดเงินมีราคาต่ำกว่าลวดทองหลายเท่า การใช้โลหะบริสุทธิ์เพื่อสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิได้รับการศึกษาต่อยอดในช่วงปีหลัง ๆ เช่น การพัฒนาเครื่องวัดอุณหภูมิโดยใช้โลหะแกเลียมและเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสังกะสีผสมเหล็กเพื่อให้การสอบเทียบอุณหภูมิในระบบอัตโนมัติเป็นไปอย่างแม่นยำและสม่ำเสมอ (Huang et al., 2024) นอกจากนี้ โครงการล่าสุดของห้องปฏิบัติการสอบเทียบในเดนมาร์กก็รายงานการได้มาซึ่งมาตรฐาน Fixed Point ของเงินบริสุทธิ์ ประมาณ 961.78 องศาเซลเซียส สำหรับใช้ในการปรับเทียบเทอร์โมมิเตอร์และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิสูง โดยผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับมาตรฐานที่ใช้อยู่ทั่วโลกตามที่กำหนดใน International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) ซึ่งให้ค่านี้เป็นหนึ่งในจุดอ้างอิงมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ ในช่วงอุณหภูมิสูง (Lopardo et al., 2022)

ในด้านการพัฒนาอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างจากแผ่นอะคริลิก พบว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถขึ้นรูปตัวอย่างเข้าให้อยู่ในรูปทรงมาตรฐานตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์ดังกล่าวช่วยลดความยุ่งยากและเวลาในการเตรียมตัวอย่างลงได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการใช้แม่พิมพ์โลหะโดยที่ไม่มีอุปกรณ์ช่วยขึ้นรูป อีกทั้งยังสามารถผลิตซ้ำได้ง่ายด้วยเครื่องแกะสลักขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเหมาะสมกับห้องปฏิบัติการที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรและงบประมาณ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอะคริลิกเป็นวัสดุที่มีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงและการทนความร้อน อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นจึงเหมาะกับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเป็นหลัก มากกว่าการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูงโดยตรง การพัฒนาอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างจากแผ่นอะคริลิกช่วยให้การขึ้นรูปตัวอย่างเข้าให้อยู่ในรูปทรงมาตรฐานตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างชัดเจน โดยเครื่องแกะสลักขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ หรือการใช้เครื่องแกะสลักแบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อน ความร้อน และคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมที่ใช้แม่พิมพ์โลหะเพียงอย่างเดียว ซึ่งพบว่ากระบวนการแกะสลัก สามารถผลิตตัวอย่างอะคริลิกที่มีผิวเรียบและสม่ำเสมอโดยยังไม่ถึงจุดทำให้เสียรูปเนื่องจากความร้อนสูง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัสดุอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างการขึ้นรูป งานวิจัยเชิงทดลองล่าสุดระบุว่าการประมวลผลผิวและอุณหภูมิของอะคริลิกที่ขึ้นรูปโดยเครื่องแกะสลัก มีผลต่อคุณภาพพื้นผิวและความคงตัวของชิ้นงาน และสามารถเลือกพารามิเตอร์การทำงานให้เหมาะสมได้เพื่อรักษาคุณภาพตัวอย่างให้คงที่ตามมาตรฐานที่ต้องการ (Ghozali & Pangaribawa, 2024) นอกจากนี้ การศึกษาอื่น ๆ ยังแสดงให้เห็นว่า การประมวลผลอะคริลิกด้วยการกัดแบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ และการใช้ลำแสงเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์สามารถผลิตโครงสร้างภายในของวัสดุที่มีขนาดเล็กมากบนวัสดุโปร่งใสเช่น PMMA ที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งสามารถนำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ต้องการความละเอียดและรูปร่างเฉพาะด้าน (Ngo et al., 2025)

โดยรวมแล้ว ผลการวิจัยทั้งสองส่วนสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ การพัฒนาวิธีการควบคุมคุณภาพและพัฒนากการเตรียมตัวอย่างที่มีความคุ้มค่า ลดต้นทุน และยังคงรักษามาตรฐานความถูกต้องทางวิชาการ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนถึงแนวโน้มการนำวัสดุและเทคโนโลยีที่หาได้ง่ายมาปรับใช้ในงานวิจัยเชิงปฏิบัติ ซึ่งสามารถต่อยอดไปสู่การประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการอื่น ๆ และการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบในอนาคตได้

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์สามประการ คือ 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์ที่แทนวัสดุมาตรฐานลดทองบริสุทธิ์สำหรับการควบคุมคุณภาพอุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติ 2) เพื่อสามารถใช้วัสดุมาตรฐานลดเงินบริสุทธิ์ที่แทนวัสดุมาตรฐานลดทองบริสุทธิ์เป็นการลดต้นทุนได้ และ 3) เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ช่วยขึ้นรูปตัวอย่างจากแผ่นอะคริลิกสำหรับใช้ในการทดสอบด้วยเครื่องมือดังกล่าว งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ลดเงินบริสุทธิ์สามารถใช้แทนลดทองบริสุทธิ์เป็นวัสดุมาตรฐานในการควบคุมคุณภาพอุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดการหลอมละลายของซีเมนต์แบบอัตโนมัติได้ โดยค่าจุดหลอมเหลวที่ได้มีความใกล้เคียงค่าทางทฤษฎี และผลการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิควบคุมยืนยันว่ากระบวนการวัดอยู่ในสภาวะปกติ ไม่มีสัญญาณของความผิดปกติ อุปกรณ์อะคริลิกที่พัฒนาขึ้นสามารถขึ้นรูปตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การเตรียมตัวอย่างสะดวกและใช้เวลาน้อยลง ลดการพึ่งพาอุปกรณ์มาตรฐานจากผู้ผลิตเพียงแหล่งเดียว ดังนั้น งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการนำเสนอวิธีการควบคุมคุณภาพและการเตรียมตัวอย่างที่ประหยัด คุ้มค่า และยังคงไว้ซึ่งความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ

ข้อเสนอแนะการวิจัย

การใช้ลวดเงินเป็นวัสดุมาตรฐาน ควรกำหนดขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ชัดเจน เช่น วิธีการพันเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของตัวอย่าง เพื่อให้ผลการวัดมีความสม่ำเสมอและลดความคลาดเคลื่อน ควรเปรียบเทียบ สมรรถนะการใช้ลวดเงินกับวัสดุมาตรฐานชนิดอื่น เช่น ลวดทองแดงหรือลวดนิกเกิล เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการเลือกใช้วัสดุมาตรฐานที่หลากหลายมากขึ้น ทำการทดสอบความคงที่ของค่าจุดหลอมเหลวในระยะยาว เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของลวดเงินในฐานะวัสดุมาตรฐานสำหรับการควบคุมคุณภาพเครื่องมือ

การบำรุงรักษาอุปกรณ์อะคริลิก ควรมีการตรวจสอบสภาพการใช้งานอย่างสม่ำเสมอ และเปลี่ยนชิ้นงานเมื่อพบร่องรอยการสึกหรอหรือการแตกร้าว เพื่อคงความแม่นยำในการขึ้นรูปตัวอย่าง ศึกษาการใช้อุปกรณ์ขึ้นรูปตัวอย่างที่ทำจากวัสดุชนิดอื่น เช่น เรซินวิศวกรรม โลหะเบา หรือวัสดุพอลิเมอร์ชนิดทนความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและยืดอายุการใช้งาน

การประยุกต์ใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยเครื่องแกสสลักขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถขยายผลไปสู่การสร้างอุปกรณ์ช่วยเตรียมตัวอย่างรูปแบบอื่น ๆ ที่เหมาะสมกับงานวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนผู้วิจัยให้มีการปรับปรุงพัฒนางานอย่างต่อเนื่องด้วยหลักการโคเซ็นตามโครงการโคเซ็นปี 2559 ต่อยอดจากงานพัฒนาสู่งานวิจัย เพื่อพัฒนาศักยภาพของการทดสอบและบริการ อีกทั้ง อำนวยความสะดวกในการใช้งานเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Generative AI) ในต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนใช้เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ (Generative AI) คือ ChatGPT เพื่อการเรียบเรียงประโยคในบทความ ช่วยปรับปรุงข้อความ การตรวจแก้ภาษา การสรุปเนื้อหา การแปลภาษา ทั้งนี้ผู้เขียนได้ตรวจสอบความถูกต้อง ความครบถ้วน ความเหมาะสมของเนื้อหาด้วยตนเอง และเป็นผู้รับผิดชอบสูงสุดต่อเนื้อหาทั้งหมดของบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงความถูกต้องของรายการอ้างอิงที่ปรากฏในเอกสารอ้างอิงท้ายบทความ

คำชี้แจงบทบาทผู้นิพนธ์ (CRediT Author Statement)

ศิริวรรณ พงศ์พฤษาพัฒนา: การออกแบบระเบียบวิธี; การตรวจสอบความถูกต้อง; การวิเคราะห์เชิงรูปแบบ; การดำเนินการวิจัย; การจัดการข้อมูล; การเขียนต้นฉบับบทความ; การทบทวนต้นฉบับบทความ; การสร้างภาพประกอบ; การกำกับดูแล; การประสานงานโครงการ. **ภาณุพงษ์ ลิ้มอุสนโน:** การออกแบบระเบียบวิธี; การตรวจสอบความถูกต้อง; การคิดค้นแนวคิด; การพัฒนาโปรแกรม; การดำเนินการวิจัย; การจัดหาทรัพยากรวิจัย; การจัดหาทุนวิจัย; การกำกับดูแล; การประสานงานโครงการ

บรรณานุกรม

- เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, สิริวรรณ สกุดตันเจริญชัย, และ กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ. (2563). ผลการปรับปรุงความต้านทานการไหม้ของเงินผสม 950 ด้วยอินเดียม เยอรมาเนียม และแกเลเลียม: รายงานฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
- ASTM International. (2024). *Standard test method for fusibility of coal and coke ash* (ASTM D1857/D1857M-24). <https://www.astm.org>
- Fahdiran, R., Handoko, E., Sugihartono I., & Budi, S. (2021). Melting dynamics of gold thin film: A molecular dynamics study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098, 062061.
- Freudenblum, D., Gruber, G., Schwiddessen, R., Ruske, F., & Weinberger, N. (2025). *In-situ* temperature calibration for high temperature XRD experiments in vacuum demonstrated on pristine and Nb doped TiO_{2-x} thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 1036, 181844.
- Gao, J., Wang, T., Zhao, J., Hu, X., & Dong, C. (2021). An experimental study on the melting solidification of municipal solid waste incineration fly ash. *Sustainability*, 13(2), 535.
- Ghozali, R. G., & Pangaribawa, M. R. (2024). Analysis of the effect of cutting motion speed in CNC laser cutting on roughness and accuracy. *Engineering Proceedings*, 63(1), 10.
- Huang, H., Cai, W., Mao, Y., Wan, K., Wen, Y., Han, Y., Zhang, Q., Zhang, R., & Zheng, X. (2024). A study on miniaturized in-situ self-calibrated thermometers based on Ga and Ga-Zn fixed points. *Sensors*, 24(17), 5744.
- Li, X., Chen, X., Jiang, C., Ding, J., Guo, J., Kong, L., Bai, J., & Li, W. (2020). Influence of the slag–crucible interaction on coal ash fusion behavior at high temperatures. *Energy & Fuels*, 34(3), 3087-3099.
- Lopardo, G., Dematteis, R., & Steur, P. P. M. (2022). Characterization of a new zinc fixed-point cell for ITS-90 realization. *International Journal of Thermophysics*, 43, 106.
- Ngo, Z., Cancino, C. J., Dy, J. C., Uy, B. S., Tan Ai, R. J., & Concepcion, R. (2025). CNC milling and CO₂ laser engraving of mixing microchannels in microfluidic devices. *Applied Science and Engineering Progress*, 19(2), 7923.
- Onifade, M., Lawal, A.I., Bada, S. O., & Shivute, A.P. (2023). Effects of proximate analysis on coal ash fusion temperatures: An application of artificial neural network. *American Chemical Society Omega*, 8(42), 39080-39095.