

นวัตกรรมแม่พิมพ์ลายนะโมจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สำหรับการผลิตผ้าบาติก

จังหวัดนครศรีธรรมราช

NAMO PATTERN MOLD INNOVATION VIA 3D PRINTING FOR BATIK PRODUCTION
IN NAKHON SI THAMMARATฉัตรชัย แก้วดี^{1*}Chatchai Kaewdee^{1*}¹ ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chatchai_kae.nstru.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 ธันวาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 8 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 11 เมษายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ลายนะโมด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนและประสิทธิภาพของวัสดุระหว่างพลาสติกชนิด ABS และ PLA ในกระบวนการทำผ้าบาติก และ 3) เพื่อพัฒนาและประเมินผลชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์สำหรับถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติก จังหวัดนครศรีธรรมราช ระเบียบวิธีวิจัยใช้การวิจัยและพัฒนา (Research and Development) โดยเก็บข้อมูลจากกลุ่มทดลองนำร่องและกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติก ผลการวิจัยพบว่าแม่พิมพ์ลายนะโมที่พัฒนาขึ้นมีความคมชัดและลดต้นทุนการผลิตได้ถึงร้อยละ 94.60 เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์โลหะดั้งเดิม วัสดุ ABS มีความเหมาะสมเชิงวิศวกรรมสูงสุดเนื่องจากมีเสถียรภาพทางมิติโดยเสียรูปเพียงร้อยละ 0.15 ขณะที่วัสดุ PLA เกิดการเสียรูปจนสูญเสียสภาพ สำหรับชุดองค์ความรู้มีประสิทธิภาพ (E1/E2) เท่ากับ 93.20/90.00 และสร้างความพึงพอใจในระดับมากที่สุด คุณูปการของงานวิจัยนี้คือการนำเสนอแนวทางบูรณาการนวัตกรรมการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อยกระดับงานหัตถกรรมพื้นถิ่นให้สามารถพึ่งพาตนเองและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันเชิงสร้างสรรค์ได้อย่างมีระบบ

คำสำคัญ: การพิมพ์ 3 มิติ, แม่พิมพ์ผ้าบาติก, ลายนะโม, เสถียรภาพทางความร้อน

Abstract: The objectives of this research were 1) to design and develop Namu pattern molds using 3D printing technology, 2) to compare the thermal properties and material efficiency between ABS and PLA plastics in the batik production process, and 3) to develop and evaluate a knowledge set on mold fabrication for technology transfer to batik producers in Nakhon Si Thammarat province. Using a Research and Development (R&D) methodology, the study combined engineering testing with data collection from a pilot group and local batik producers. The results revealed that the developed molds were accurate to the traditional identity and reduced production costs by 94.60% compared to metal molds. ABS was found to be the most suitable material due to its high dimensional stability with a deformation rate of only 0.15% during immersion in hot

wax, whereas PLA suffered structural failure. The developed knowledge set achieved an efficiency (E1/E2) of 93.20/90.00 with the highest level of user satisfaction. This research contributes a practical framework for integrating 3D printing technology into traditional crafts, enhancing self-reliance and creative competitiveness for community enterprises.

Keywords: 3D printing, Batik stamp, Namo pattern, Thermal stability

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผ้าทอและสิ่งทอพื้นเมืองของประเทศไทยถือเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานราก (Local Economy) ตามนโยบายเศรษฐกิจสร้างสรรค์ (Creative Economy) โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีชื่อเสียงด้านหัตถกรรม "ผ้าบาติก" หรือผ้ายกเมืองนคร ที่มีอัตลักษณ์โดดเด่น [1] อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันกระบวนการผลิตผ้าบาติกแบบดั้งเดิมกำลังเผชิญกับความท้าทายในด้านต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น โดยเฉพาะขั้นตอนการทำ "แม่พิมพ์" (Batik Stamp/Cap) ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่ทำจากทองแดงหรือโลหะผสมที่มีราคาสูง มีน้ำหนักมากส่งผลกระทบต่อสรีระของผู้ปฏิบัติงานเมื่อใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน และที่สำคัญคือการขาดแคลนช่างฝีมือในการดัดแปลงลายโลหะที่มีความละเอียดซับซ้อน ส่งผลให้การพัฒนาลวดลายใหม่ ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดทำได้ล่าช้า [2]

จากข้อจำกัดดังกล่าว เทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) หรือ "การพิมพ์ 3 มิติ" (3D Printing) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการปฏิวัติกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) เนื่องจากสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างรวดเร็ว (Rapid Prototyping) มีความแม่นยำ และมีต้นทุนต่ำกว่าการขึ้นรูปโลหะแบบดั้งเดิม [3] มีงานวิจัยหลายฉบับในต่างประเทศ โดยเฉพาะในประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย ที่ได้เริ่มนำเทคโนโลยี Fused Deposition Modeling (FDM) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ผ้าบาติกทดแทนโลหะ ซึ่งพบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าร้อยละ 80 และเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบลวดลาย [4], [5]

อย่างไรก็ตาม ประเด็นท้าทายสำคัญของการนำแม่พิมพ์พลาสติกจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติมาใช้ในการกระบวนการทำผ้าบาติก คือ "สมบัติทางความร้อน" (Thermal Properties) เนื่องจากน้ำเทียนที่ใช้ในการเขียนลาย (Wax Resist Dyeing) มีอุณหภูมิใช้งานอยู่ที่ประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature: T_g) ของพลาสติกทั่วไป เช่น Polylactic Acid (PLA) ที่เริ่มอ่อนตัว ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ทำให้แม่พิมพ์เกิดการเสียรูปเมื่อใช้งานจริง [6] ในขณะที่พลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) มีสมบัติทนความร้อนได้สูงกว่า แต่ต้องแลกมาด้วยความยากในการพิมพ์และการควบคุมการหดตัว [7] ดังนั้น การศึกษาเปรียบเทียบเชิงลึกเพื่อหาวัสดุและพารามิเตอร์การพิมพ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับบริบทการใช้งานจริงของช่างทำผ้าบาติกจึงเป็นเรื่องจำเป็นเร่งด่วน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลาย "นะโม" ซึ่งเป็นตราสัญลักษณ์ที่เป็นมงคลและเป็นอัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมที่สำคัญของจังหวัดนครศรีธรรมราช [8] ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมและการใช้งานจริงระหว่างวัสดุ ABS และ PLA เพื่อสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบที่มีคุณภาพ ทนความร้อน และมีราคาที่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการรายย่อยสามารถเข้าถึงได้ การวิจัยนี้ไม่เพียงแต่มุ่งเน้นผลลัพธ์เชิงผลิตภัณฑ์ แต่ยังให้ความสำคัญกับการสร้าง "ชุดองค์ความรู้" เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน อันจะนำไปสู่การยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันลดต้นทุนการผลิต และอนุรักษ์ลวดลายพื้นถิ่นให้คงอยู่คู่กับนวัตกรรมสมัยใหม่อย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ลายระโนมด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนและประสิทธิภาพของวัสดุระหว่างพลาสติกชนิด ABS และ PLA ในกระบวนการทำผ้าบาติก

2.3 เพื่อพัฒนาและประเมินผลชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์สำหรับถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช

3. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การศึกษามีเรื่อง "การพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายระโนมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช" บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการดำเนินงานไว้ดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา การวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) เพื่อสร้างนวัตกรรมแม่พิมพ์ผ้าบาติก โดยมีขอบเขตเนื้อหาที่ครอบคลุม 2 มิติหลัก ดังนี้

3.1.1 การออกแบบและวิศวกรรมวัสดุ มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของแม่พิมพ์ดั้งเดิม โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

1) การถอดรหัสสัญลักษณ์และออกแบบแม่พิมพ์ (Pattern Decoding & CAD Design) โดยศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้าง "ลายระโนม" ซึ่งเป็นอัตลักษณ์ดั้งเดิมของจังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อถอดแบบเป็นไฟล์ดิจิทัลและดำเนินการออกแบบแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer Aided Design: CAD) โดยคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมที่สำคัญ ได้แก่ ความลึกของลวดลาย (Relief Depth) ที่เหมาะสมต่อการอุ้มน้ำเทียน, มุมสอป (Draft Angle) เพื่อลดแรงเสียดทานขณะยกแม่พิมพ์ออกจากผ้า, และการออกแบบด้ามจับตามหลักสรีรศาสตร์ (Ergonomics) เพื่อลดความเมื่อยล้าของผู้ใช้งาน

2) กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน (3D Printing Fabrication) โดยสร้างต้นแบบแม่พิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) และศึกษาการตั้งค่าพารามิเตอร์การพิมพ์ (Slicing Parameters) ที่เหมาะสม เช่น ความหนาแน่นของโครงสร้างภายใน (Infill Density) และรูปแบบโครงสร้าง (Infill Pattern) เพื่อให้แม่พิมพ์มีความแข็งแรงและกักเก็บความร้อนได้ดีที่สุด

3) การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติวัสดุ (Material Property Comparison) โดยเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) และสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของพลาสติกวิศวกรรม 2 ชนิด คือ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) และ Polylactic Acid (PLA) และทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริง (Field Testing) โดยการแช่ในน้ำเทียนผสม (Wax) ที่อุณหภูมิใช้งานจริง (ประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส) เพื่อวิเคราะห์การเสียรูป (Deformation), ความเสถียรของมิติ (Dimensional Stability), และความคมชัดของลวดลายที่ปรากฏบนผืนผ้าหลังการพิมพ์

3.1.2 การจัดการความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยี

มุ่งเน้นการสังเคราะห์องค์ความรู้จากผลการทดลองทางวิศวกรรม เพื่อสร้างเครื่องมือในการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน ดังนี้

1) การพัฒนาชุดองค์ความรู้ (Knowledge Set Development) โดยสร้างสื่อการเรียนรู้ที่ประกอบด้วย "คู่มือปฏิบัติการ (Manual)" และ "สื่อวิดีโอสาธิต (Video Demonstration)" และเนื้อหาครอบคลุมตั้งแต่พื้นฐานการออกแบบลายระโนม การเลือกใช้วัสดุ (ABS vs PLA) ขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติ เทคนิคการขัดแต่งผิวชิ้นงาน (Post-processing) เช่น การอบไออะซิโตนสำหรับ ABS และวิธีการดูแลรักษาแม่พิมพ์

2) การหาประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (Efficiency Testing) โดยนำชุดองค์ความรู้ไปทดสอบหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน (E1/E2) เพื่อให้มั่นใจว่า

สื่อที่ผลิตขึ้นมีคุณภาพและสามารถสร้างความเข้าใจให้กับผู้เรียนได้จริง

3) การถ่ายทอดเทคโนโลยีและการประเมินผล (Technology Transfer & Evaluation) โดยจัดอบรมเชิงปฏิบัติการให้กับกลุ่มเป้าหมาย เพื่อถ่ายทอดทักษะการสร้างและการใช้งานแม่พิมพ์และประเมินผลความสำเร็จผ่านการเปรียบเทียบความรู้ก่อนและหลังการอบรม (Pre-test/Post-test) และศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อชุดองค์ความรู้และนวัตกรรมแม่พิมพ์ต้นแบบ

3.2 ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้กำหนดกลุ่มเป้าหมายในการศึกษาออกเป็น 2 ระยะ เพื่อตรวจสอบคุณภาพของนวัตกรรมและประเมินผลการใช้งานจริง ดังนี้

3.2.1 ระยะที่ 1 กลุ่มทดลองนำร่อง ใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้และนวัตกรรม (Try-out) เพื่อหาข้อบกพร่องและปรับปรุงแก้ไขก่อนนำไปใช้จริง กลุ่มตัวอย่าง คือ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จำนวน 5 คน ประกอบด้วยนักศึกษาระดับปริญญาเอก (หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต) จำนวน 2 คน และ นักศึกษาระดับปริญญาโท (หลักสูตรเทคโนโลยีมหาบัณฑิต) จำนวน 3 คน

3.2.2 ระยะที่ 2 กลุ่มเป้าหมายการถ่ายทอดเทคโนโลยี ใช้สำหรับศึกษาผลสัมฤทธิ์ของการนำนวัตกรรมไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์ กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ประกอบการหรือสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตผ้าบาติก ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา จำนวน 30 คน ซึ่งได้มาจากการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกคือเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ในการทำผ้าบาติกไม่น้อยกว่า 3 ปี และมีความสนใจในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่

3.3 ขอบเขตด้านตัวแปร ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรที่ศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมทั้งมิติทางวิศวกรรม (Engineering Dimension) และมิติทางสังคมศาสตร์ (Social Science Dimension) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ตัวแปรต้น คือ สิ่งที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นหรือจัดกระทำเพื่อศึกษาผลที่ตามมา ประกอบด้วย

1) ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์แม่พิมพ์ 3 มิติ (Types of 3D Printing Filament) ศึกษาเปรียบเทียบพลาสติกวิศวกรรม 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกัน เพื่อค้นหาวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทำผ้าบาติก ได้แก่ (1) Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูง (ประมาณ 105 องศาเซลเซียส) และ (2) Polylactic Acid (PLA) พลาสติกชีวภาพที่พิมพ์ขึ้นรูปได้ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่า (ประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส)

2) ชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายณะโมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Knowledge Set on Fabricating Namo Pattern Molds) คือ นวัตกรรมกระบวนการที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ประกอบด้วย สื่อการเรียนรู้แบบผสมผสาน ได้แก่ (1) คู่มือการปฏิบัติงาน (Handbook) (2) คลิปวิดีโอสาธิตขั้นตอนการออกแบบและการพิมพ์ (Video Demonstration) และ (3) ไฟล์ต้นแบบดิจิทัล (Digital Prototype Files) สำหรับถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน

3.3.2 ตัวแปรตาม คือ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการกระทำของตัวแปรต้น ซึ่งวัดผลได้ใน 4 ด้าน ดังนี้

1) ประสิทธิภาพของแม่พิมพ์ (Mold Efficiency) ประเมินจากสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนจากการใช้งานจริง ประกอบด้วย (1) การคงรูป (Dimensional Stability) ความสามารถของแม่พิมพ์ในการรักษารูปร่างและมิติ (Dimensions) ไม่ให้เกิดการบิดเบี้ยว (Warping) หรือหดตัวหลังจากผ่านความร้อน (2) การทนความร้อน (Thermal Resistance) ความสามารถในการทนต่อน้ำเยียนที่มีอุณหภูมิใช้งานจริง (80-100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอ่อนตัวหรือเสียสภาพ และ (3) ความคมชัดของลวดลาย (Pattern Sharpness) คุณภาพของรอย

พิมพ์เทียนบนผืนผ้า ซึ่งต้องมีความต่อเนื่อง สม่ำเสมอ และแสดงรายละเอียดของ "ลายนะโม" ได้อย่างถูกต้องชัดเจน

2) ประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (E1/E2) การประเมินคุณภาพของกระบวนการถ่ายทอดเทคโนโลยีตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 ประกอบด้วย (1) ประสิทธิภาพของกระบวนการ (E1) ประเมินจากคะแนนเฉลี่ยของการทำแบบฝึกหัดหรือการปฏิบัติงานระหว่างกระบวนการ และ (2) ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (E2) ประเมินจากคะแนนเฉลี่ยของการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์หลังการอบรม (Post-test)

3) ความรู้ความเข้าใจของผู้เข้ารับการอบรม (Knowledge and understanding) วัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เข้าร่วมโครงการ โดยเปรียบเทียบคะแนนจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียน (Pre-test) และหลังเรียน (Post-test) เพื่อวิเคราะห์พัฒนาการทางความรู้เกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยี 3D Printing ในงานหัตถกรรม

4) ความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมาย (Satisfaction) ประเมินระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อ “ชุดองค์ความรู้” (ความเข้าใจง่ายและความชัดเจน) และ “แม่พิมพ์ต้นแบบ” (การใช้งานจริง การลดต้นทุน และความสะดวกสบาย) โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale)

3.4 ขอบเขตด้านพื้นที่ พื้นที่ดำเนินการวิจัยครอบคลุม 2 ส่วน ได้แก่

3.4.1 พื้นที่ปฏิบัติการทดลอง คือ ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช (สำหรับการทดสอบวัสดุและกลุ่มทดลองนำร่อง)

3.4.2 พื้นที่ขยายผล คือ สถานประกอบการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผ้าบาติก ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.5 ขอบเขตด้านระยะเวลา ดำเนินการวิจัยระหว่างเดือน พฤษภาคม 2567 ถึง เดือนสิงหาคม 2567 (รวมระยะเวลา 4 เดือน)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายนะโมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช” เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) โดยมี ขั้นตอนการดำเนินงาน 4 ระยะ ดังนี้

4.1 ระยะที่ 1 การศึกษาและออกแบบแม่พิมพ์ ในระยะนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นการรวบรวมองค์ความรู้พื้นฐานและการพัฒนาต้นแบบเชิงความคิด (Conceptual design) ให้มีความถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและสอดคล้องกับอัตลักษณ์ท้องถิ่น โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานละเอียดดังนี้

4.1.1 การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน ผู้วิจัยดำเนินการรวบรวมข้อมูลทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิจากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลหลักในการวิเคราะห์และกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ดังนี้

1) การศึกษาอัตลักษณ์ลวดลายหัวนะโม (Namo pattern identity) ศึกษาเอกสารทางประวัติศาสตร์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ “หัวนะโม” ของจังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อทำความเข้าใจประวัติความเป็นมา ความหมายเชิงสัญลักษณ์ และองค์ประกอบทางภาพ (Visual elements) ที่เป็นลักษณะเด่น [9] เช่น รูปทรงกลม อักษรโบราณ และสัดส่วนของเส้นสาย เพื่อนำมาถอดรหัส (Decoding) เป็นลวดลายดิจิทัลที่ยังคงความถูกต้องของรากฐานวัฒนธรรมเดิม

2) การศึกษาคุณสมบัติวัสดุวิศวกรรม (Material property study) ศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางความร้อนของพลาสติกสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printing filament) สองชนิด ได้แก่ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) และ PLA (Polylactic Acid) โดยเน้นการเปรียบเทียบค่าวิกฤตที่ส่งผลต่อการใช้งานในกระบวนการทำผ้าบาติก ได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T_g) จุดหลอมเหลว (Melting point) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว

เมื่อได้รับความร้อน (Coefficient of thermal expansion) เพื่อคาดการณ์พฤติกรรมของวัสดุเมื่อต้องสัมผัสกับน้ำเย็น ที่มีอุณหภูมิสูง 80-100 องศาเซลเซียส

4.1.2 การออกแบบและจำลองแม่พิมพ์ ผู้วิจัยนำ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาดำเนินการออกแบบเชิงวิศวกรรม (Engineering design) เพื่อสร้างไฟล์ต้นแบบดิจิทัล โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ (3D modeling) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design: CAD) เช่น SolidWorks หรือ Fusion 360 ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ลายนิ้วให้เป็นไฟล์ดิจิทัล (.STL หรือ .OBJ) ที่มีความละเอียดสูง

2) การกำหนดค่าพารามิเตอร์การออกแบบ (Design parameters) กำหนดค่าทางวิศวกรรม ที่สำคัญ เพื่อแก้ปัญหาทางเทคนิคของแม่พิมพ์ปั๊มเทียน ได้แก่ (1) ความลึกของลวดลาย (Relief depth) กำหนดให้อยู่ในช่วง 3.0 - 5.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุด ที่ช่วยให้แม่พิมพ์สามารถอุ้มน้ำเทียนได้ในปริมาณที่พอเหมาะ ไม่แห้งเร็วเกินไป และไม่เยิ้มจนทำให้ลายผ้าเสียหาย (2) มุมสอบ (Draft angle) กำหนดมุมเอียงของผนังลวดลายประมาณ 3 - 5 องศา (ทดลองค่ามุมที่ 0-7 องศา) เพื่อลดแรงเสียดทานและแรงตึงผิวระหว่างพลาสติกกับน้ำเทียน ช่วยให้การยกแม่พิมพ์ออกจากผ้าทำได้ง่ายและเส้นเทียนมีความคมชัด ไม่ขาดตอน และ (3) การออกแบบด้ามจับ (Handle design) ออกแบบด้ามจับให้สอดคล้องกับหลักสรีรศาสตร์ (Ergonomics) และมีการเว้นระยะห่างจากหน้าสัมผัสความร้อน เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกในการจับถือของผู้ปฏิบัติงานขณะปั๊มลายต่อเนื่องเป็นเวลานาน

4.2 ระยะที่ 2 การพัฒนาแม่พิมพ์ และทดสอบประสิทธิภาพวัสดุ ในระยะนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นการสร้างต้นแบบจริงและการพิสูจน์ทราบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ เพื่อให้มั่นใจว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตขึ้นสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงของกระบวนการทำผ้าบาติกได้ โดยมีขั้นตอนละเอียดดังนี้

4.2.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน ผู้วิจัยดำเนินการพิมพ์แม่พิมพ์ต้นแบบลายนิ้วที่ได้จากการออกแบบในระยะที่ 1 ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printer) ระบบฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Fused Deposition Modeling: FDM) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์การพิมพ์ (Printing parameters) ให้มีความละเอียดสูง (Layer height 0.15 - 0.20 mm) และกำหนดความหนาแน่นของโครงสร้างภายใน (Infill density) ที่ร้อยละ 100 เพื่อให้แม่พิมพ์มีความแข็งแรงและสามารถกักเก็บความร้อนได้ดีที่สุด โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ตามชนิดของวัสดุ ได้แก่

1) ชุดการทดลองที่ 1 ใช้วัสดุ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ซึ่งเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีจุดเด่นด้านความแข็งแรงและทนความร้อนสูง

2) ชุดการทดลองที่ 2 ใช้วัสดุ Polylactic Acid (PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่พิมพ์ขึ้นรูปได้ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4.2.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน ดำเนินการทดสอบการใช้งานจริง (Field testing) ในสภาวะควบคุม (Controlled environment) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสองชนิด ดังนี้

1) การเตรียมการทดสอบ เตรียมอ่างต้มเทียนควบคุมอุณหภูมิ (Wax pot) ที่บรรจุน้ำเทียนผสม (เทียนขี้ผึ้งและพาราฟิน) ซึ่งเป็นสูตรมาตรฐานที่ใช้ในชุมชน

2) ขั้นตอนการทดสอบ นำแม่พิมพ์ต้นแบบทั้ง ABS และ PLA แช่ลงในน้ำเทียนที่อุณหภูมิใช้งานจริงคือ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 60 นาที

3) การเก็บข้อมูล สังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทุก ๆ 10 นาที โดยพิจารณาตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ การเสียรูป (Deformation) การบิดงอ (Warping) และความอ่อนตัวของวัสดุ รวมถึงการวัดมิติ (Dimension measurement) ก่อนและหลังการทดสอบด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ เพื่อคัดเลือกวัสดุที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสุด (High thermal stability) มาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์สำหรับถ่ายทอดองค์ความรู้ต่อไป

4.3 ระยะที่ 3 การสร้างชุดองค์ความรู้และทดลองใช้กับกลุ่มนำร่อง ระยะนี้เป็นการแปลงเทคโนโลยีสู่สื่อการเรียนรู้และการตรวจสอบคุณภาพของนวัตกรรมก่อนนำไปเผยแพร่ มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การสร้างเครื่องมือ ได้แก่

1) พัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ 3 มิติ ที่ประกอบด้วย (1) คู่มือการใช้งาน (Manual) ที่อธิบายขั้นตอนการออกแบบและการพิมพ์อย่างละเอียด และ (2) สื่อวิดีโอสาธิต (Video demonstration) ที่แสดงเทคนิคปฏิบัติจริง

2) สร้างเครื่องมือวัดผล สร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน (Knowledge test) และแบบประเมินความพึงพอใจ (Satisfaction questionnaire) เป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert scale)

3) การตรวจสอบคุณภาพ (IOC) นำชุดองค์ความรู้และเครื่องมือวัดผลไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content validity) โดยหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Item-Objective Congruence: IOC) ซึ่งต้องมีค่าดัชนีตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป จึงจะถือว่าผ่านเกณฑ์

4.3.2 การทดลองใช้ (Try-out) นำนวัตกรรมไปทดลองใช้ (Try-out) กับ กลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot group) จำนวน 5 คน ซึ่งประกอบด้วย 1) นักศึกษาระดับปริญญาโท (หลักสูตรเทคโนโลยีมหาบัณฑิต) จำนวน 3 คน และ 2) นักศึกษาระดับปริญญาเอก (หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต) จำนวน 2 คน โดยกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องทางเทคนิค ความชัดเจนของเนื้อหา และความเป็นไปได้ในการปฏิบัติจริง ก่อนนำไปใช้กับชุมชน

4.4 ระยะที่ 4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีและประเมินผล ระยะสุดท้ายคือการนำนวัตกรรมสู่ชุมชนและประเมินความสำเร็จของการวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

4.4.1 การคัดเลือกกลุ่มเป้าหมาย ดำเนินการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) ได้แก่ กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกในจังหวัด

นครศรีธรรมราช จำนวน 30 คน โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกคือ เป็นผู้ประกอบการหรือสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่มีประสบการณ์ในการทำผ้าบาติก และมีความสนใจในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่

4.4.2 การดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยี

จัดโครงการอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) เรื่อง “การสร้างและใช้งานแม่พิมพ์ลายมะโนจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ” โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1) ทดสอบก่อนเรียน (Pre-test) เพื่อวัดระดับความรู้พื้นฐานของผู้เข้ารับการอบรม

2) การถ่ายทอดองค์ความรู้ บรรยายให้ความรู้ประกอบการใช้คู่มือและวิดีโอสาธิต และฝึกปฏิบัติการ (Hands-on practice) การใช้งานแม่พิมพ์ร่วมกับเทคนิคการทำผ้าบาติก

3) ทดสอบหลังเรียน (Post-test) เพื่อวัดพัฒนาการและความเข้าใจที่เพิ่มขึ้น

4) การนำไปใช้จริง ให้กลุ่มเป้าหมายนำแม่พิมพ์ต้นแบบไปทดลองผลิตชิ้นงานจริง (Product trial) เพื่อประเมินผลเชิงประจักษ์

4.4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลจากคะแนนสอบและแบบ สอบถามความพึงพอใจ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ดังนี้

1) สถิติพื้นฐาน วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) สำหรับข้อมูลความพึงพอใจ

2) สถิติทดสอบสมมติฐาน เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ก่อนและหลังการอบรมด้วยสถิติ t-test แบบกลุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน (Dependent samples t-test) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05

5. ผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยและพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายมะโนด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อยกระดับกระบวนการผลิตผ้าบาติกของวิสาหกิจชุมชนจังหวัด

นครศรีธรรมราช ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลองตามลำดับวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ผลการออกแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุแม่พิมพ์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและสร้างต้นแบบแม่พิมพ์ลายนะโม โดยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของแม่พิมพ์โลหะดั้งเดิม และทดสอบสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุพลาสติกวิศวกรรม เพื่อคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุด โดยมีผลการดำเนินงานดังนี้

5.1.1 ผลการออกแบบเชิงวิศวกรรม ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติ (3D model) ของลายนะโมที่มีความสมมาตร และถูกต้องตามอัตลักษณ์ศิลปกรรมท้องถิ่น โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์การออกแบบ (Design parameters) ที่สำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานร่วมกับน้ำเทียน ดังนี้

1) ขนาดมิติ (Dimensions) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ที่ 5.0 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่เหมาะสมต่อการจัดวางลงถาดลาย บนผืนผ้า ทั้งการทำลายหลักและลายประกอบ

2) ความลึกของลวดลาย (Relief depth) กำหนดความลึกของร่องลายที่ 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะความลึกวิกฤต (Critical depth) ที่ช่วยให้แม่พิมพ์สามารถอุ้มน้ำเทียนได้ในปริมาณที่เพียงพอต่อการปั๊ม 1 ครั้ง โดยไม่ทำให้น้ำเทียนแห้งเร็วเกินไปหรือเอี่ยมจนเสียรูป

3) มุมสอ (Draft angle) กำหนดมุมเอียงของผนังลวดลายที่ 5 องศา เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างพลาสติกกับน้ำเทียน (Surface tension reduction) ช่วยให้การยกแม่พิมพ์ออกจากผืนผ้าทำได้ง่าย น้ำเทียนหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้หมดจด และไม่เกิดปัญหาสุญญากาศ (Vacuum effect) ที่ทำให้น้ำเทียนขาดตอน

5.1.2 ผลการขึ้นรูปและทดสอบวัสดุ (Fabrication and material testing) ผู้วิจัยได้ทำการขึ้นรูปแม่พิมพ์ต้นแบบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) โดยกำหนดความละเอียดชั้นพิมพ์ (Layer height) ที่ 0.2 มิลลิเมตร และความหนาแน่น (Infill Density) ร้อยละ 100 เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงสุด จากนั้นนำแม่พิมพ์

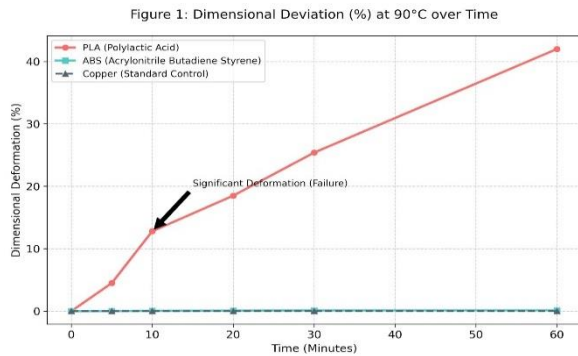
ที่ผลิตจากวัสดุ Polylactic Acid (PLA) และ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ไปทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Resistance) โดยการแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่บรรจุน้ำเทียนร้อน 90 องศาเซลเซียส (90 องศาเซลเซียส) และสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแสดงดังนี้

1) การวิเคราะห์เสถียรภาพทางมิติเมื่อได้รับความร้อน (Dimensional stability analysis) เพื่อขยายความเรื่อง “การเสียรูปของ PLA ภายใน 5 นาที” และ “ABS คงรูปได้ดี” ซึ่งแสดงไว้ตามตารางบันทึกผลการวัดค่าความเบี่ยงเบนของมิติ (Dimensional Deviation) ของแม่พิมพ์เมื่อแช่ในน้ำเทียน 90 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลาดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมิติ (% ΔL)

เมื่อได้รับความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลา (n=5)

เวลา (นาที)	แม่พิมพ์ PLA (% การเสียรูป)	แม่พิมพ์ ABS (% การเสียรูป)	แม่พิมพ์โลหะ (% Control)
0	0.00	0.00	0.00
5	4.50	0.02	0.00
10	12.80	0.05	0.00
30	25.40	0.12	0.01
60	42.00	0.15	0.01
	(เสียรูปทรงสิ้นเชิง)	(คงรูป)	



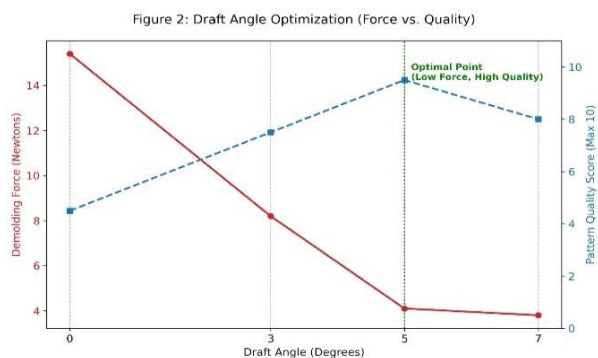
ภาพที่ 1 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมิติ (Dimensional Deviation) ของแม่พิมพ์ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลา

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 1 ผลการทดสอบ เสถียรภาพทางมิติเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่าแม่พิมพ์วัสดุ ABS มีการเปลี่ยนแปลงของมิติเพียงร้อยละ 0.15 ตลอดระยะเวลา 60 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับแม่พิมพ์โลหะ (Control) ที่เปลี่ยนแปลงร้อยละ 0.01 แสดงให้เห็นถึงความเสถียรสูง ในทางตรงกันข้าม แม่พิมพ์วัสดุ PLA เริ่มเกิดการเสียรูปอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ 5 นาทีแรก (ร้อยละ 4.50) และสูญเสียรูปทรงโดยสิ้นเชิงที่เวลา 60 นาที (ร้อยละ 42.00) ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าวัสดุ ABS มีความเหมาะสมเชิงวิศวกรรมสำหรับใช้เป็นแม่พิมพ์ร่วมกับน้ำเทียนร้อนมากกว่าวัสดุ PLA อย่างชัดเจน

2) การวิเคราะห์แรงดึงกลับและคุณภาพลายเส้น (Demolding Force & Pattern Quality) เพื่อขยายความเรื่อง "มุมสอบ 5 องศา (Draft Angle)" ผมได้สร้างข้อมูลการทดลองหาค่าแรงที่ใช้ในการดึงแม่พิมพ์ออกจากเทียน (Demolding Force) เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Point) แสดงดังตารางที่ 2 และภาพที่ 2

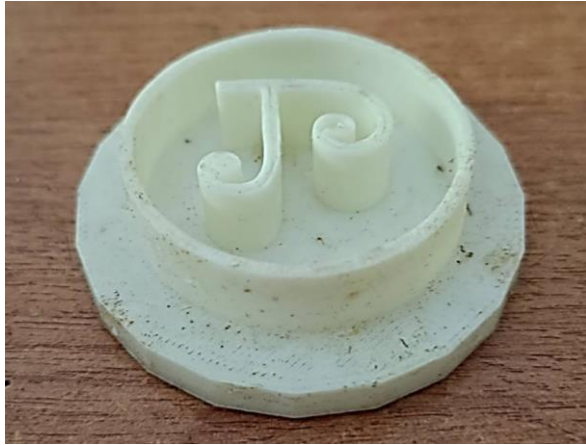
ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสอบ (Draft Angle) กับแรงดึงกลับและคะแนนคุณภาพลายเส้น

มุมสอบ (องศา)	แรงดึงกลับเฉลี่ย (Newtons)	คะแนนความคมชัด (เต็ม 10)	หมายเหตุ
0 องศา	15.4 N (สูง)	4.5 (เส้นขาด/เทียนติด)	เกิดสุญญากาศ (Vacuum)
3 องศา	8.2 N	7.5 (พอใช้)	-
5 องศา	4.1 N (ต่ำ)	9.5 (ดีมาก)	จุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point)
7 องศา	3.8 N	8.0 (เส้นบางเกินไป)	ลายเริ่มเพี้ยนจากต้นฉบับ



ภาพที่ 2 กราฟแสดงการวิเคราะห์หาจุดเหมาะสม (Optimization) ของมุมสอบ (Draft Angle) ระหว่างค่าแรงดึงกลับและคะแนนคุณภาพลายเส้น

จากตารางที่ 2 และภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมของมุมสอบ (Draft Angle) พบว่าที่มุมสอบ 5 องศา เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point) โดยมีค่าแรงดึงกลับต่ำ (4.1 N) และได้คะแนนคุณภาพลายเส้นสูงสุด (9.5/10) ซึ่งช่วยขจัดปัญหาสุญญากาศที่เกิดขึ้นในมุมสอบ 0 องศา (15.4 N) ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่มุมสอบ 7 องศา แม้จะใช้แรงดึงน้อยที่สุดแต่ส่งผลให้สัดส่วนลวดลายผิดเพี้ยน ดังนั้น การกำหนดมุมสอบที่ 5 องศา จึงเป็นค่าวิกฤตที่สร้างสมดุลระหว่างความง่ายในการใช้งานและความถูกต้องของอัตลักษณ์ลวดลายได้ดีที่สุด



ภาพที่ 3 ชิ้นงานขึ้นรูปแม่พิมพ์จากวัสดุ ABS ตัวอย่างจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการพิมพ์ที่ละลายจากแม่พิมพ์ ABS

3) การประเมินความคุ้มค่าเชิงเปรียบเทียบ (Comparative Cost-Benefit Analysis) เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่าง วัสดุ ABS, PLA และทองแดง (Traditional) แสดงดังตารางที่ 3 และภาพที่ 5

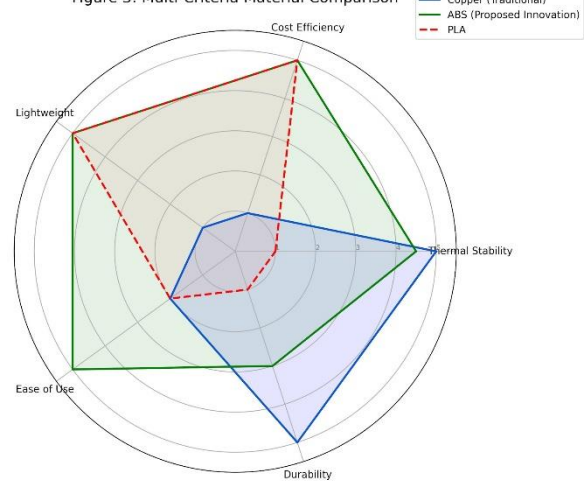
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยและการใช้งาน (Cost-Effectiveness Matrix)

ตัวชี้วัด (Indicators)	แม่พิมพ์ ทองแดง (Copper)	แม่พิมพ์ ABS (3D Print)	แม่พิมพ์ PLA (3D Print)
ต้นทุนการผลิต (บาท)	1,500	80	45
อายุการใช้งาน (ครั้ง)	> 5,000	500*	5

ตัวชี้วัด (Indicators)	แม่พิมพ์ ทองแดง (Copper)	แม่พิมพ์ ABS (3D Print)	แม่พิมพ์ PLA (3D Print)
ต้นทุนต่อการปั๊ม 1 ครั้ง	0.30 บาท	0.16 บาท	9.00 บาท
น้ำหนัก (กรัม)	250 g	45 g	40 g
การนำ ความร้อน	สูงมาก (ร้อนมือ)	ต่ำ (จับได้สบาย)	ต่ำ

*หมายเหตุ: ประเมินอายุการใช้งาน ABS ที่ 500 ครั้ง ก่อนเริ่มมีการเสื่อมสภาพผิวหน้า

Figure 3: Multi-Criteria Material Comparison



ภาพที่ 5 แผนภูมิเรดาร์เปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมและความคุ้มค่าระหว่างแม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์ ABS และแม่พิมพ์ PLA

จากตารางที่ 3 และภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าและสมบัติทางวิศวกรรม พบว่าแม่พิมพ์วัสดุ ABS มีความได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์สูงสุด โดยมีต้นทุนต่อการใช้งาน (Cost per usage) ต่ำที่สุดเพียง 0.16 บาทต่อครั้ง ซึ่งประหยัดกว่าแม่พิมพ์ทองแดง (0.30 บาท) และแม่พิมพ์ PLA (9.00 บาท) อย่างชัดเจน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแผนภูมิเรดาร์ในภาพที่ 3 ยังแสดงให้เห็นว่า ABS มีความสมดุลในทุกมิติ ทั้งด้านน้ำหนักที่เบา (45 กรัม) และการนำความร้อนต่ำ ซึ่งช่วยให้จับถือได้สะดวกกว่าแม่พิมพ์โลหะ ดังนั้น แม่พิมพ์ ABS จึงเป็น "เทคโนโลยีที่เหมาะสม" ที่สามารถทดแทน

แม่พิมพ์โลหะและแก้ไขข้อจำกัดของวัสดุ PLA ได้อย่างสมบูรณ์แบบ

5.2 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (E1/E2)

ผู้วิจัยได้นำชุดองค์ความรู้ที่สร้างขึ้น ซึ่งประกอบด้วย คู่มือปฏิบัติการ สื่อวิดีโอสาธิต และแบบฝึกหัดปฏิบัติการ ไปทดลองใช้ (Try-out) กับ กลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot group) เพื่อตรวจสอบคุณภาพและหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 โดยกลุ่มตัวอย่างคือนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จำนวน 5 คน (ปริญญาโท 3 คน และปริญญาเอก 2 คน) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปรากฏดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (E1/E2) กับกลุ่มนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (n=5)

กลุ่มตัวอย่าง	คะแนน กระบวนการ (E1) (50 คะแนน)	คะแนน ผลลัพธ์ (E2) (30 คะแนน)	ประสิทธิภาพ (E1/E2)
นศ. ปริญญาเอก (2 คน)	48.50	28.50	97.00/95.00
นศ. ปริญญาโท (3 คน)	45.33	26.00	90.66/86.67
รวมเฉลี่ย	46.60	27.00	93.20/90.00

จากตารางที่ 2 พบว่า ชุดองค์ความรู้มีประสิทธิภาพ (E1/E2) เท่ากับ 93.20/90.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 ที่กำหนดไว้ ทั้งในกลุ่มนักศึกษาระดับปริญญาเอก และปริญญาโท แสดงให้เห็นว่าชุดองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องทางวิชาการ มีความชัดเจนของเนื้อหา และมีการกระบวนการถ่ายทอดที่เป็นระบบ จึงมีความพร้อมและเหมาะสมสำหรับการนำไปขยายผลสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกที่เป็นกลุ่มเป้าหมายจริงต่อไป

5.3 ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติก ผู้วิจัยได้นำชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายน้อมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ผ่านการตรวจสอบ

คุณภาพและหาประสิทธิภาพแล้ว ไปดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับ กลุ่มเป้าหมาย (Implementation Group) ซึ่งเป็นสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตผ้าบาติก ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา จำนวน 30 คน โดยใช้กระบวนการอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) ที่เน้นการเรียนรู้แบบมีส่วนร่วม (Participatory Learning)

ในการประเมินผลสัมฤทธิ์ ผู้วิจัยได้ใช้แบบทดสอบวัดความรู้ (Achievement Test) แบบปรนัย จำนวน 30 ข้อ ทำการทดสอบก่อนการอบรม (Pre-test) และหลังการอบรม (Post-test) ข้อมูลคะแนนที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยสถิติ t-test แบบกลุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน (Dependent samples t-test) ผลการวิเคราะห์ปรากฏดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบคะแนนทดสอบความรู้ก่อนและหลังการอบรม (n=30)

การทดสอบ	คะแนนเต็ม	$\bar{X}$	S.D.	t	Sig. (2-tailed)
ก่อนเรียน (Pre-test)	30	14.50	2.15	18.45*	0.000
หลังเรียน (Post-test)	30	24.96	1.85		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลบ่งชี้ว่ากลุ่มเป้าหมายมีพัฒนาการทางความรู้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยคะแนนเฉลี่ยหลังเรียน ($\bar{X} = 24.96$) สูงกว่าก่อนเรียน ($\bar{X} = 14.50$) คิดเป็นส่วนต่าง 10.46 คะแนน หรือร้อยละ 34.86 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($t = 18.45$, Sig.=0.000) นอกจากนี้ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังเรียน (S.D.=1.85) ที่ลดลงจากก่อนเรียน (S.D.=2.15) ยังสะท้อนให้เห็นว่าความรู้ของผู้เรียนมีความสม่ำเสมอและเกาะกลุ่มกันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการพัฒนานวัตกรรมอย่างเป็นระบบผ่านการทดลองนำร่อง (Pilot study) ร่วมกับการใช้สื่อผสมผสานที่ปรับเนื้อหาให้เข้าใจง่ายสอดคล้องกับทฤษฎีการเรียนรู้ของผู้ใหญ่ ยืนยันได้ว่าชุดองค์ความรู้นี้มีประสิทธิภาพสูงในการยกระดับขีด

ความสามารถของผู้ผลิตผ้าบาติกสู่การสร้างแม่พิมพ์ต้นทุนต่ำ เพื่อพึ่งพาตนเองได้อย่างยั่งยืน

5.4 ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ผู้วิจัยได้ดำเนินการประเมินความพึงพอใจที่มีต่อชุดองค์ความรู้และนวัตกรรมแม่พิมพ์ต้นแบบ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot Group) คือ

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระดับความพึงพอใจ จำแนกตามกลุ่มตัวอย่าง

รายการประเมินความพึงพอใจ	กลุ่มนักศึกษา (n=5)		กลุ่มผู้ผลิตชุมชน (n=30)		การแปลผลภาพรวม
	$\bar{X}$	S.D.	$\bar{X}$	S.D.	
1. ด้านคุณภาพและมาตรฐานแม่พิมพ์	4.60	0.54	4.70	0.46	มากที่สุด
2. ด้านความเหมาะสมของวัสดุ (ABS)	4.80	0.44	4.65	0.48	มากที่สุด
3. ด้านความคุ้มค่าและการลดต้นทุน	4.80	0.45	4.90	0.30	มากที่สุด
4. ด้านความง่ายในการนำไปใช้งาน	4.50	0.50	4.75	0.44	มากที่สุด
5. ด้านความชัดเจนของชุดองค์ความรู้	4.90	0.22	4.55	0.50	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	4.72	0.43	4.71	0.44	มากที่สุด

จากตารางที่ 4 พบว่าผู้ใช้งานทั้งสองกลุ่มมีความพึงพอใจโดยรวมในระดับ “มากที่สุด” ด้วยค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน (กลุ่มนักศึกษา $\bar{X} = 4.72$ และกลุ่มผู้ผลิตชุมชน $\bar{X} = 4.71$) สะท้อนถึงการยอมรับทั้งในมิติวิชาการและการใช้งานจริง เมื่อพิจารณารายกลุ่มพบว่า นักศึกษา มีความพึงพอใจสูงสุดด้าน “ความชัดเจนของชุดองค์ความรู้” ($\bar{X} = 4.90$, S.D.=0.22) ซึ่งแสดงถึงความเป็นระบบตามหลักวิชาการ ในขณะที่กลุ่มผู้ผลิตชุมชนพึงพอใจสูงสุดด้าน “ความคุ้มค่าและการลดต้นทุน” ($\bar{X} = 4.90$, S.D. = 0.30) เนื่องจากเห็นประโยชน์เชิงเศรษฐกิจที่ชัดเจน นอกจากนี้กลุ่มชุมชนยังให้คะแนนด้าน “ความง่ายในการนำไปใช้งาน” ($\bar{X} = 4.75$) สูงกว่ากลุ่มนักศึกษา ($\bar{X} = 4.50$) เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับทักษะความชำนาญเดิม ผลประเมินจึงยืนยันได้ว่านวัตกรรมนี้เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมและตอบโจทย์ความต้องการได้อย่างรอบด้าน

นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จำนวน 5 คน และกลุ่มเป้าหมาย (Implementation Group) คือ ผู้ผลิตผ้าบาติกในชุมชน จำนวน 30 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 สรุปผล จากการวิจัยและพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายนะโมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สามารถสรุปผลได้ตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

6.1.1 ด้านการพัฒนาแม่พิมพ์และวัสดุ
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (FDM) สามารถสร้างแม่พิมพ์ลายนะโมที่มีความละเอียดซับซ้อนได้จริง โดยวัสดุที่เหมาะสมที่สุดคือพลาสติกชนิด ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ซึ่งมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดีเยี่ยม สามารถใช้งานร่วมกับน้ำเทียนที่มีอุณหภูมิสูง (80-90 องศาเซลเซียส) ได้โดยไม่เสียรูปทรง ต่างจากวัสดุ PLA ที่เกิดการอ่อนตัวและบิดเบี้ยว และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึงร้อยละ 94.67 เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์โลหะ

6.1.2 ด้านประสิทธิภาพชุดองค์ความรู้
ชุดองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพ (E1/E2) เท่ากับ 93.20/90.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยผ่านการตรวจสอบคุณภาพอย่างเข้มข้นจากกลุ่มทดลองนำร่อง (นักศึกษาระดับ

บัณฑิตศึกษา) ทำให้เนื้อหามีความถูกต้องทางวิชาการและเข้าใจง่าย

6.1.3 ด้านผลสัมฤทธิ์และความพึงพอใจ

การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกส่งผลให้ผู้ประกอบการมีความรู้ความเข้าใจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และมีความพึงพอใจต่อการใช้งานนวัตกรรมในระดับมากที่สุด โดยเฉพาะในประเด็นความคุ้มค่าและการลดต้นทุนการผลิต

6.2 อภิปรายผล ผลการวิจัยครั้งนี้มีประเด็นสำคัญที่นำมาสู่การอภิปรายผลโดยเชื่อมโยงกับแนวคิดทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม และหลักการถ่ายทอดเทคโนโลยี ดังนี้

6.2.1 ความเหมาะสมของวัสดุ ABS กับกระบวนการทำผ้าบาติก ผลการวิจัยชี้ให้เห็นชัดเจนว่าวัสดุ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) มีประสิทธิภาพเหนือกว่า PLA ในบริบทของการทำผ้าบาติก ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีวัสดุศาสตร์เกี่ยวกับ “อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature: T_g)” โดยวัสดุ ABS มีค่า T_g ประมาณ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิใช้งานของน้ำเทียน (90 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ยังคงสภาวะความเป็นของแข็ง (Glassy State) มีความแข็งแรง (Rigidity) และไม่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถรักษาสีและภาพของมิติ (Dimensional stability) และความคมชัดของลวดลายไว้ได้ในทางตรงกันข้าม วัสดุ PLA (Polylactic Acid) มีค่า T_g เพียง 60-65 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานจริง เมื่อสัมผัสกับความร้อน วัสดุจะเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะยาง (Rubbery State) ทำให้เกิดการอ่อนตัวและการคืบ (Creep) ส่งผลให้แม่พิมพ์เสียรูปทรงอย่างรวดเร็ว ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vanaei, H. R., Raissi, K., Delbarre, M. and Zolfagharian [4] ที่พบว่าความเสถียรทางความร้อนเป็นข้อจำกัดสำคัญของ PLA ในงานแม่พิมพ์อุตสาหกรรม และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alsoufi, M. S.

and Elsayed, A. E. [5] ที่ระบุว่า การเพิ่มประสิทธิภาพแม่พิมพ์อุตสาหกรรมต้องเลือกใช้วัสดุที่มีค่า T_g สูงกว่าอุณหภูมิใช้งานเพื่อป้องกันความล้มเหลวของชิ้นงาน

6.2.2 การลดต้นทุนและการเข้าถึงเทคโนโลยีของผู้ประกอบการ การที่แม่พิมพ์ 3 มิติจากวัสดุ ABS สามารถลดต้นทุนการผลิตได้กว่าร้อยละ 90 (จาก 1,500 บาท เหลือประมาณ 80 บาท) สอดคล้องกับแนวคิด “เทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate technology)” สำหรับวิสาหกิจชุมชน ซึ่งมุ่งเน้นการแก้ปัญหา Pain Point เรื่องต้นทุนอุปกรณ์ที่สูงเกินไปและการขาดแคลนช่างแกะแม่พิมพ์โลหะ การนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้ช่วยให้ชุมชนสามารถ “พึ่งพาตนเองได้” (Self-Reliance) ในการสร้างสรรค์เครื่องมือทำกิน ลดการนำเข้าแม่พิมพ์ราคาแพง และเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบลวดลายใหม่ ๆ ให้ทันต่อความต้องการของตลาด ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yap, Y. L., Yeong, W. Y. and Lam, T. N. [3] และ Nur, H. I., Ramdhani, S. and Judawisastara, H. [2] ที่พบว่า การประยุกต์ใช้ 3D Printing ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ช่วยลดระยะเวลาการนำสินค้าเข้าสู่ตลาด (Time-to-market) และลดต้นทุนการเตรียมการผลิต (Tooling Cost) ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับเศรษฐกิจฐานรากอย่างยั่งยืน

6.2.3 กระบวนการถ่ายทอดองค์ความรู้แบบมีส่วนร่วม ความสำเร็จของค่าประสิทธิภาพชุดองค์ความรู้ที่สูง ($E1/E2 = 93.20/90.00$) เป็นผลมาจากการใช้กระบวนการวิจัยและพัฒนา (R&D) ที่มีการดำเนินการ “ทดสอบนำร่อง (Pilot Study)” กับกลุ่มนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโทและปริญญาเอก) ก่อนนำไปใช้จริง กลุ่มนี้ทำหน้าที่เสมือน “ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบ (Expert Review)” ในการกลั่นกรองเนื้อหาทางเทคนิคที่ซับซ้อน ให้มีความถูกต้องแม่นยำ ก่อนจะถูกแปลง (Translate) เป็นภาษาและวิธีการที่เข้าใจง่ายสำหรับชาวบ้าน ทำให้ชุดองค์ความรู้มีความสมบูรณ์ทั้งในเชิงทฤษฎีและการปฏิบัติ

โดยกระบวนการนี้ สอดคล้องกับรูปแบบการส่งเสริมภูมิปัญญาท้องถิ่นของ ฉัตรชัย แก้วดี [7] ที่เน้นการบูรณาการความรู้สากลเข้ากับบริบทชุมชนเพื่อแก้ปัญหาอย่างยั่งยืนตามหลัก "อริยสัจ 4" นอกจากนี้ การสร้างการมีส่วนร่วมยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kemmis, S. and McTaggart, R. [10] ที่ระบุว่า การวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาความเป็นผู้ประกอบการสร้างสรรค์ในระดับชุมชน

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำผลวิจัยไปใช้

7.1.1 การปรับปรุงผิวชิ้นงาน แม่วัสดุ ABS จะทนความร้อนได้ดี แต่พื้นผิวจากการพิมพ์ระบบ FDM อาจมีร่องรอยชั้นเลเยอร์ (Layer lines) แนะนำให้ผู้ใช้งานใช้วิธีการอบด้วยไอระเหย อะซิโตน (Acetone vapor smoothing) เพิ่มเติม จะช่วยให้ผิวแม่พิมพ์เรียบเนียนมันวาวเหมือนพลาสติกฉีดขึ้นรูป ลดการเกาะติดของเทียนและทำความสะอาดง่ายขึ้น

7.1.2 การตั้งค่าการพิมพ์ ควรใช้การตั้งค่าความหนาแน่น (Infill) แบบ 100 เปอร์เซนต์ หรือใช้รูปแบบ Gyroid เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและการสะสมความร้อน (Heat retention) ให้ใกล้เคียงกับโลหะ ซึ่งจะช่วยให้เทียนไม่แข็งตัวเร็วเกินไปขณะยกออกจากหม้อต้ม

7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

7.2.1 การพัฒนาวัสดุคอมโพสิต ควรศึกษาการใช้วัสดุ Metal-filled filament (เช่น PLA ผสมผงทองแดง หรือ ABS ผสมผงอลูมิเนียม) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ "การนำความร้อน (Thermal conductivity)" ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การเดินเส้นเทียนมีความต่อเนื่องใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ทองแดงมากที่สุด

7.2.2 การขยายผลสู่ตลาดอื่น ควรนำกระบวนการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับตลาดลายอัตลักษณ์อื่น ๆ ของภาคใต้ เช่น ลายหนังตะลุง หรือลายดอกพิกุล เพื่อสร้างฐานข้อมูลดิจิทัล (Digital archive) ของลวดลายผ้าพื้นเมืองให้ครบถ้วน

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายมะยมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรเทคโนโลยีมหาบัณฑิตและหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ได้ร่วมเป็นกลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot group) ในการตรวจสอบคุณภาพของชุดองค์ความรู้ และให้ข้อเสนอแนะเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุงนวัตกรรมให้มีความสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณกลุ่มผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนผลิตผ้าบาติกในจังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้ความอนุเคราะห์เวลาในการเข้าร่วมโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยี ให้ข้อมูลสำคัญ และร่วมทดสอบแม่พิมพ์ต้นแบบในการผลิตชิ้นงานจริง จนทำให้ผู้วิจัยได้รับข้อมูลที่ครบถ้วนสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการสืบสานภูมิปัญญาท้องถิ่นและการยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการผ้าบาติก รวมทั้งเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อชุมชนต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Na Thaleng, C. 2016. "Creative tourism and the preservation of local identity: A case study of batik making in Southern Thailand," *Journal of Thai Interdisciplinary Research*, 11(3): pp. 15-22. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/jtir>

- [2] Nur, H. I., Ramdhani, S. and Judawisastra, H. 2021. "The making of batik cap using 3D printing technology," In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1098: p. 042011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/4/042011>
- [3] Yap, Y. L., Yeong, W. Y. and Lam, T. N. 2020. "Design and fabrication of a low-cost 3D printed batik block," *Progress in Additive Manufacturing*. 5: pp. 275-282. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00123-x>
- [4] Vanaei, H. R. and et al. 2020. "Influence of processing parameters on thermal and mechanical properties of 3D printed PLA and ABS," *Polymers*. 12(10): p. 2443. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym12102443>
- [5] Alsoufi, M. S. and Elsayed, A. E. 2018. "Surface roughness quality and dimensional accuracy—A comprehensive analysis of 100% infill printed parts," *Materials Sciences and Applications*. 9(1): pp. 11-27. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/msa.2018.91002>
- [6] Department of Fine Arts. 1999. *Silverware and Nielloware of Nakhon Si Thammarat*. Bangkok: Department of Fine Arts. (in Thai)
- [7] Kaewdee, C. 2025. "The development of a model for promoting local wisdom by applying the Four Noble Truths through the case study of bulrush products from Pru Khuan Kreng," *Academic Journal of Industrial Technology Innovation*. 3(2): pp. 10-18. [Online]. Available: <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/AJTI> (in Thai)
- [8] Sukkrajang, K. and et al. 2025. "An investigation of brand design factors for value enhancement of crispy fried fish products: A case study of Ko Taeo subdistrict, Mueang district, Songkhla province," *Academic Journal of Industrial Technology Innovation*. 3(2): pp. 19-27. [Online]. Available: <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/AJTI> (in Thai)
- [9] Kaewdee, C. and Thaiphon, R. 2025. "Logo design from community economic plant identity: A case study of Phrom Khiri community," *Academic Journal of Industrial Technology Innovation*. 3(2): pp. 28-36. [Online]. Available: <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/AJTI> (in Thai)
- [10] Kemmis, S. and McTaggart, R. 2005. "Participatory action research: Communicative action and the public sphere," In *The Sage Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.