

การศึกษาการพิมพ์ก๊ตสึบนผืนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมสีครามธรรมชาติ
(A Study on Discharge Printing of Natural Indigo-Dyed Knit Fabrics)

กิตติยาพร ทิมาไชย^{1,a*} จิราเมธ สุภารัตน์^{2,b} และ ธีรภัทร ปัญญาเพียร^{3,c}

¹ ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² แผนกเทคโนโลยีสิ่งทอ วิทยาลัยการอาชีพขอนแก่น

³ แผนกเทคโนโลยีแฟชั่น และสิ่งทอ วิทยาลัยอาชีวศึกษาสุราษฎร์ธานี

kitiyapornt@gmail.com^a jirametsuparat16@gmail.com^b Thirapat-pa@rmutp.ac.th^c

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการพิมพ์ก๊ตสึบนผืนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมสีครามธรรมชาติ โดยใช้ต่างทาบทิม (โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต) ร่วมกับแป้งพิมพ์ดินขาวเกาลินเป็นสารลอกสี และศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการก๊ตสีและคุณภาพของลวดลายพิมพ์ ได้แก่ อัตราส่วนของสารลอกสีต่อแป้งพิมพ์ อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้ง ตลอดจนความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่สารละลายล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) แล้วจึงทดสอบความคงทนของสีและความแข็งแรงของผืนผ้าที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนสารลอกสีต่อแป้งพิมพ์ที่ 30:70 ถึง 50:50 ให้ค่าความสว่างสูงและค่าความเข้มของสีต่ำ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนสารลอกสีสูงเกินไปกลับทำให้เกิดคราบแมงกานีสไดออกไซด์ตกค้างและค่าความขาวลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ให้ค่าความขาวสูงสุด เนื่องจากเป็นจุดสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการก๊ตสีกับการเกิดสีเหลืองเชิงความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส และความเข้มข้นของสารละลายล้างสารลอกสีที่ 50 กรัมต่อลิตร ร่วมกับระยะเวลาแช่ 5 ถึง 10 นาที สามารถกำจัดคราบแมงกานีสไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ค่าความขาวที่สูงที่สุด นอกจากนี้ผ้าที่ผ่านการพิมพ์ก๊ตสียังมีความคงทนของสีต่อการซักล้างและน้ำในระดับดีถึงดีมาก แต่มีความคงทนต่อแสงในระดับปานกลางและความคงทนต่อการขัดถูในสถานะเปียกต่ำกว่าสถานะแห้ง ทั้งนี้ กระบวนการก๊ตสียังส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของผืนผ้าบริเวณลวดลายลดลงประมาณร้อยละ 35.6 เมื่อเทียบกับบริเวณพื้นสีคราม อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำลายโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นใยฝ้ายควบคู่ไปกับการทำลายสีย้อม ผลการศึกษานี้จึงเป็นแนวทางสำคัญสำหรับการพัฒนากระบวนการพิมพ์ก๊ตสึบนผ้าฝ้ายย้อมครามธรรมชาติให้ได้ลวดลายที่มีคุณภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำสำคัญ: การย้อมสีคราม การพิมพ์ก๊ตสี ครามธรรมชาติ ต่างทาบทิม ผ้าฝ้าย

Abstract

This research aimed to study the discharge printing process on natural indigo-dyed cotton knitted fabric using potassium permanganate combined with a kaolin printing paste as the discharging agent, and it investigated the key factors affecting discharge efficiency and print quality, including the ratio of discharging agent to printing paste, the drying temperature and time, and the concentration and soaking time of the sodium metabisulfite washing solution, after which the color fastness and physical strength of the printed fabric were evaluated. The results showed that a discharging-agent-to-paste ratio of 30:70 to 50:50 gave high brightness and low color strength, but excessive proportions of the discharging agent caused residual manganese dioxide stains and a marked decrease in whiteness. A drying condition of 100°C for 10 minutes yielded the highest whiteness index, since it balanced discharge efficiency against thermal yellowing of the cellulose fibers, while a washing-solution concentration of 50 g/L combined with a soaking time of 5–10 minutes removed manganese dioxide residues most effectively and produced the highest whiteness. In addition, the printed fabric exhibited good-to-excellent color fastness to washing and water, but only moderate fastness to light and lower wet than dry rubbing fastness, and the discharge-printed area also showed about a 35.6% reduction in bursting strength compared with the indigo-dyed ground fabric, owing to oxidative degradation of the cellulose structure occurring alongside dye destruction. These findings therefore provide essential guidance for developing a discharge printing process suitable for natural indigo-dyed knitted fabrics that yields quality patterns for further commercial application.

Key word: Indigo dyeing, Discharge printing, Natural indigo, Potassium permanganate, Knitted fabric

1. บทนำ

สีครามธรรมชาติ (natural indigo) เป็นสีย้อมกลุ่มแวต (vat dye) ที่มนุษย์รู้จักและใช้ในการย้อมสิ่งทอมาเป็นเวลานานนับพันปี โดยพบหลักฐานการใช้สีครามในการย้อมผ้าตั้งแต่อารยธรรมโบราณในหลายภูมิภาคของโลก ทั้งในอียิปต์ อินเดีย และภูมิภาคเมโสอเมริกา [1] สีครามสกัดได้จากพืชในสกุล Indigofera โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นครามแท้ (Indigofera tinctoria) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสีย้อมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและวัฒนธรรมอย่างยิ่งในหลายภูมิภาค รวมถึงประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดสกลนครซึ่งได้รับการรับรองให้เป็นเมืองหัตถกรรมโลกด้านผ้าครามธรรมชาติ (World Craft City for Natural Indigo) แห่งแรกของประเทศไทยและเป็นหนึ่งในไม่กี่แห่งของภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก [2] ผ้าย้อมครามธรรมชาติของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยจึงมีชื่อเสียงผลิตภัณธ์สิ่งทอ แต่ยังเป็นสิ่งที่สะท้อนภูมิปัญญา อัตลักษณ์ทางวัฒนธรรม และเป็นกลไกสร้างรายได้ที่สำคัญให้แก่ชุมชนผู้ผลิตในพื้นที่ [3]

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา อุตสาหกรรมสิ่งทอทั่วโลกได้หันมาให้ความสนใจกับสีครามธรรมชาติมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเป็นส่วนหนึ่งของกระแสการฟื้นฟูสีย้อมธรรมชาติเพื่อทดแทนสีย้อมสังเคราะห์ อันเนื่องมาจากความกังวลด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตและการใช้สารเคมีในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ก่อมลพิษมากที่สุดในโลก [4] งานวิจัยด้านการย้อมสีครามธรรมชาติอย่างยั่งยืนได้แสดงให้เห็นว่าสีครามธรรมชาติสามารถให้ประสิทธิภาพการย้อมที่เทียบเคียงได้กับสีครามสังเคราะห์ ในขณะที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งที่ดีกว่า และลดการใช้สารเคมีและพลังงานในกระบวนการผลิต [5] อย่างไรก็ตาม กระบวนการย้อมสีครามไม่ว่าจะเป็นครามธรรมชาติหรือครามสังเคราะห์ ล้วนต้องอาศัยหลักการเดียวกันคือการรีดิวซ์สีครามที่ไม่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปลิควิด (leuco form) ที่ละลายน้ำได้และมีความสามารถในการซึมเข้าสู่เส้นใย ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลับคืนสู่รูปสีครามเดิมภายในโครงสร้างเส้นใยภายหลังการสัมผัสอากาศ [6]

การพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอจากผ้าย้อมครามธรรมชาติในปัจจุบันไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการย้อมสีพื้นเรียบเท่านั้น แต่ยังมีความต้องการสร้างลวดลายและมูลค่าเพิ่มให้แก่ผืนผ้าครามผ่านเทคนิคการตกแต่งต่าง ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดแฟชั่นที่หลากหลายมากขึ้น หนึ่งในเทคนิคที่มีศักยภาพสูงสำหรับการสร้างลวดลายบนผ้าที่ย้อมสีพื้นแล้วคือเทคนิคการพิมพ์กั๊ดสี (discharge printing) ซึ่งเป็นกระบวนการพิมพ์สารเคมีที่มีฤทธิ์ทำลายหรือกัดโครงสร้างของสีย้อมลงบนผืนผ้าที่ย้อมสีพื้นไว้แล้วเฉพาะบริเวณที่ต้องการให้เกิดลวดลาย ทำให้ปรากฏลวดลายสีขาวหรือสีอ่อนตัดกับพื้นสีเข้มโดยรอบ [7] หลักการทำงานของเทคนิคการพิมพ์กั๊ดสีต่อสีย้อมกลุ่มแวตอย่างสีครามอาศัยกลไกการรีดิวซ์ซ้ำด้วยสารเคมี เช่น โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (sodium hydrosulfite) หรือฟอร์มัลดีไฮด์ซัลฟอกไซด์ (formaldehyde sulfoxylate) ซึ่งจะทำลายโครงสร้างโครโมฟอร์ของสีครามที่ยึดติดกับเส้นใยให้กลับสู่รูปลิควิดที่ละลายน้ำได้อีกครั้ง แล้วจึงถูกกำจัดออกจากผืนผ้าในกระบวนการล้างและพัฒนาสีในขั้นตอนถัดไป [8]

เทคนิคการพิมพ์กั๊ดสีบนผ้าย้อมครามได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมผ้าเดนิม (denim) ซึ่งใช้สีครามเป็นสีย้อมหลักในการผลิตกางเกงยีนส์และเสื้อผ้าแฟชั่น งานทบทวนวรรณกรรมด้านเทคนิคการพิมพ์กั๊ดสีบนผ้าเดนิมระบุว่าโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เป็นสารรีดิวซ์หลักที่ใช้ในกระบวนการนี้มาอย่างยาวนาน แม้จะมีข้อกังวลด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้สารดังกล่าวในปริมาณมาก จนนำไปสู่การศึกษาวิจัยระบบสารรีดิวซ์ทางเลือกอื่น เช่น สารรีดิวซ์อินทรีย์ การรีดิวซ์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และการรีดิวซ์ด้วยไฟฟ้าเคมี เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากน้ำทิ้งของกระบวนการผลิต [9] สิทธิบัตรด้านการพิมพ์กั๊ดสีบนสิ่งทอย้อมด้วยสีครามยังได้ระบุสูตรและสัดส่วนของเพสต์พิมพ์กั๊ดสีที่ประกอบด้วยสารเพิ่มความหนืด สารรีดิวซ์ และสารช่วยละลายสีคราม ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่ใช้กันในการผลิตอุตสาหกรรมการพิมพ์กั๊ดสีเชิงพาณิชย์บนผ้าทอมาโดยตลอด [10]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยและการประยุกต์ใช้เทคนิคการพิมพ์กัสดีสี่ที่ผ่านมามีแนวโน้มมุ่งเน้นไปที่ผ้าทอ (woven fabric) โดยเฉพาะผ้าเดนิมทอด้วยเส้นด้ายยืนย้อมคราม ในขณะที่การศึกษาการพิมพ์กัสดีสืบผ้าถัก (knitted fabric) ยังมีอยู่อย่างจำกัดในวรรณกรรมทางวิชาการ ทั้งที่ผ้าถักมีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากผ้าทออย่างชัดเจน ทั้งในแง่ของโครงสร้างการขึ้นรูปด้วยการถักทอเกี่ยวกัน (interlocking loops) ซึ่งให้คุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นและการยืดตัวสูงกว่าผ้าทอ ตลอดจนพื้นผิวที่ไม่เรียบเสมอกันเนื่องจากลักษณะสามมิติของโครงสร้างห่วงถัก [11] คุณลักษณะเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อความยากในการพิมพ์ลวดลายบนผ้าถักให้ได้คุณภาพเทียบเท่าผ้าทอ เนื่องจากปัญหาด้านการยึดผ้าให้อยู่นิ่งขณะพิมพ์ ความแม่นยำในการวางตำแหน่งลวดลาย และการซึมของหมึกพิมพ์หรือเพสต์เคมีเข้าไปในเส้นด้ายที่อยู่ลึกกว่าผิวหน้าของโครงสร้างห่วงถัก ซึ่งอาจทำให้ลวดลายพิมพ์เปลี่ยนแปลงลักษณะไปเมื่อผ้าถูกยืดหรือดึงในระหว่างการใช้งานจริง [12]

ในบริบทของผ้าถักที่ย้อมด้วยสีครามธรรมชาติโดยเฉพาะ ความท้าทายดังกล่าวยังมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากสีครามธรรมชาติมีความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีและความเข้มข้นของสารให้สีมากกว่าสีครามสังเคราะห์ ซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา วิธีการสกัด และกระบวนการหมักที่ใช้ในการเตรียมน้ำครามของแต่ละแหล่งผลิต [13] งานวิจัยด้านคุณภาพผ้าย้อมครามธรรมชาติของจังหวัดสกลนครยังชี้ให้เห็นว่าคุณภาพของผ้าย้อมครามที่ดี ซึ่งพิจารณาจากความคงทนของสีต่อการซักและการไม่มีฝุ่นครามตกค้างบนผืนผ้า ขึ้นอยู่กับทั้งคุณภาพวัตถุดิบและความชำนาญของผู้ผลิตในแต่ละขั้นตอน [14] ความแปรปรวนของวัตถุดิบเช่นนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบกระบวนการพิมพ์กัสดีสี่สำหรับผ้าถักย้อมครามธรรมชาติ เมื่อเทียบกับการพิมพ์กัสดีสืบผ้าที่ย้อมด้วยสีครามสังเคราะห์ซึ่งมีความสม่ำเสมอของสีมากกว่า

นอกจากมิติด้านเทคนิคการผลิตแล้ว การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากผ้าย้อมครามธรรมชาติที่ผ่านการตกแต่งด้วยลวดลายพิมพ์กัสดีสี่ยังมีความสำคัญในเชิงการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อตอบสนองตลาดที่หลากหลายมากขึ้น งานวิจัยด้านการพัฒนาโครงสร้างผ้าทอย้อมครามธรรมชาติและการตกแต่งสำเร็จเพื่อประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สิ่งทอตกแต่งบ้านแสดงให้เห็นว่าการผสมผสานระหว่างภูมิปัญญาการย้อมครามแบบดั้งเดิมกับเทคนิคการตกแต่งสำเร็จสมัยใหม่สามารถขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ผ้าครามธรรมชาติไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายมากขึ้น นอกเหนือจากเสื้อผ้าและผ้าพันคอซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักในปัจจุบัน [15] แนวทางเดียวกันนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับผ้าถักย้อมครามธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นและความสบายในการสวมใส่ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แฟชั่นร่วมสมัย เช่น เสื้อยืด เสื้อกันหนาว และเครื่องแต่งกายลำลองประเภทอื่น ซึ่งเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการของตลาดสูงแต่ยังไม่ได้ได้รับการพัฒนาด้วยเทคนิคการพิมพ์กัสดีสืบพื้นครามธรรมชาติมากนักในปัจจุบัน

จากช่องว่างองค์ความรู้ดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการพิมพ์กัสดีสืบพื้นผ้าถักที่ผ่านการย้อมด้วยสีครามธรรมชาติ โดยมุ่งศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกัสดีสี่และคุณภาพของลวดลายพิมพ์ที่ได้ ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาเทคนิคการพิมพ์กัสดีสี่ที่เหมาะสมกับผ้าถักย้อมครามธรรมชาติ โดยเฉพาะ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอมูลค่าเพิ่มจากภูมิปัญญาการย้อมครามธรรมชาติของไทย ควบคู่ไปกับการขยายโอกาสทางการตลาดให้แก่วิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตผ้าครามธรรมชาติในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี

ผืนผ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นผ้าฝ้ายถักโครงสร้างอินเตอร์ล็อก (interlock) มีน้ำหนักผ้าเท่ากับ 147.7 กรัมต่อตารางเมตร ความหนาแน่นของห่วงถักในแนวขวาง (course) เท่ากับ 110 ห่วงต่อนิ้ว และในแนวยืน (wale) เท่ากับ 102 ห่วงต่อนิ้ว โดยผ้ามีความหนา 0.19 มิลลิเมตร

เนื้อครามเปียกที่ใช้ในกระบวนการย้อมจัดหามาจากจังหวัดนครพนม ส่วนสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการย้อมสีครามและการพิมพ์ลอกสี ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) ไธโอยูเรียไดออกไซด์ (Thiourea Dioxide) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังใช้แป้งดินขาวเกาลิน (kaolin) เป็นส่วนผสมในสารพิมพ์ลอกสี (print paste) ร่วมกับต่างทับทิม (Potassium Permanganate, KMnO_4) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารลอกสี และโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium Metabisulfite) ซึ่งใช้เป็นสารละลายสำหรับล้างสารลอกสีที่ตกค้างบนผืนผ้า สารเคมีทั้งหมดจัดซื้อจากบริษัท สตาร์ท เคมีคอล อินดัสเทรียล จำกัด

สำหรับการวัดค่าสีและค่าความเข้มของสี ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์สำหรับจับคู่สี (Spectrophotometer Color Matching) รุ่น ColorQuest XE ยี่ห้อ HunterLab จากบริษัท คัลเลอร์โกลบอล จำกัด

2.2 การเตรียมสารละลายและการย้อมสีครามธรรมชาติ

สูตรและอัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำย้อมและกระบวนการย้อมสีครามธรรมชาติสำหรับผ้าฝ้ายแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

เริ่มต้นด้วยการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) ในอัตราส่วน 2 กรัมต่อลิตร ชั่งไธโอยูเรียไดออกไซด์ 60 กรัมต่อลิตร และชั่งเนื้อครามเปียก 200 กรัมต่อลิตร จากนั้นตวงน้ำตามปริมาณที่กำหนด แล้วนำสารเคมีทั้งหมดใส่ลงในภาชนะสเตนเลส กวนผสมจนสารละลายเข้ากันดี ก่อนพักน้ำย้อมที่ผสมแล้วไว้เป็นเวลาประมาณ 20-30 นาที ในระหว่างนี้จะสังเกตเห็นว่าน้ำย้อมเปลี่ยนเป็นสีเหลือง พร้อมทั้งปรากฏฟองสีน้ำตาลเงินขึ้นบนผิวน้ำของสารละลาย ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งชี้ว่าสีครามอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ที่พร้อมสำหรับการย้อม [16-18]

หลังจากนั้นจึงนำผ้าฝ้ายผ่านการทำความสะอาดแล้วลงย้อมในน้ำย้อมสีเหลืองดังกล่าว โดยต้องบีบผ้าลงในน้ำย้อมอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 15 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว จึงนำผ้าไปแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมเปลี่ยนสีจากเหลืองเป็นสีน้ำตาลเงิน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีครามบนเส้นใย ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำผ้าฝ้ายไปล้างทำความสะอาดและผึ่งให้แห้ง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมในการย้อมสีครามธรรมชาติสำหรับย้อมผ้าฝ้าย [19]

สารเคมี	ปริมาณ (กรัม/ลิตร)
โซดาไฟ	2
ไธโอยูเรียไดออกไซด์	60
ครามเปียก	200
น้ำ	1 ลิตร

2.3 การศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารลอกสีสำหรับการพิมพ์ผ้าฝ้ายย้อมสีครามธรรมชาติ

สูตรและส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารลอกสีสำหรับการพิมพ์บนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมสีครามธรรมชาติแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

เริ่มต้นด้วยการชั่งสารเคมีแต่ละชนิดตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 แล้วนำมาผสมให้เข้ากันจนได้สารลอกสีที่พร้อมใช้งาน จากนั้นเทส่วนผสมทั้งหมดลงบนบล็อกสกรีนที่มีลวดลายปรากฏอยู่ ใช้อย่างปาด (squeegee) ปาดสารลอกสีที่อยู่บนบล็อกสกรีนให้ซึมผ่านลงสู่ผืนผ้าตามลวดลายที่กำหนด หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการพิมพ์ไปอบให้แห้งด้วยความร้อนที่

อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เมื่อผ้าแห้งสนิทแล้ว จึงนำไปกำจัดสีต่างทับทิมที่ตกค้างออก โดยแช่ในสารละลายสำหรับล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการฟอกสีไปล้างด้วยน้ำสะอาดจนหมดสารตกค้าง แล้วผึ่งให้แห้ง ก่อนนำไปวัดค่าสีตามลำดับขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 2 การศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารลอกสีสำหรับการฟอกสีผ้าฝ้ายอมสีครามธรรมชาติ

สารเคมี	ปริมาณ (กรัม)				
สารลอกสี (ต่างทับทิม)	10	30	50	70	90
แป้งสำหรับผสมลงในสารลอกสี	90	70	50	30	10
รวม	100	100	100	100	100

2.4 การศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผ้าแห้งสำหรับการฟอกสีผ้าฝ้ายอมสีครามธรรมชาติ

สูตรและส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้แห้งในการฟอกสีผ้าฝ้ายอมสีครามธรรมชาติแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

เริ่มต้นด้วยการชั่งสารเคมีแต่ละชนิดตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3 จากนั้นนำไปพิมพ์ลงบนผืนผ้าฝ้ายอมสีคราม บล็อกสกรีน แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการพิมพ์ไปอบให้แห้งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 4 ระดับ ได้แก่ 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาทีเท่ากันในแต่ละอุณหภูมิ เมื่อผ้าแห้งสนิทแล้ว จึงนำไปกำจัดสีต่างทับทิมที่ตกค้างออก โดยแช่ในสารละลายสำหรับล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำผ้าฝ้ายอมสีครามที่ผ่านการฟอกสีไปล้างด้วยน้ำสะอาดจนหมดสารตกค้าง แล้วผึ่งให้แห้ง ก่อนนำไปวัดค่าสีตามลำดับขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมสูตรแป้งพิมพ์สำหรับฟอกสี [20-21]

สารเคมี	ปริมาณ (กรัม)
สารลอกสี (ต่างทับทิม)	30
แป้งสำหรับผสมลงในสารลอกสี	70
รวม	100

2.5 การศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการทำผ้าแห้งสำหรับการฟอกสีผ้าฝ้ายอมสีครามธรรมชาติ

สูตรและส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้แห้งในการฟอกสีผ้าฝ้ายอมสีครามธรรมชาติแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

เริ่มต้นด้วยการชั่งสารเคมีแต่ละชนิดตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3 จากนั้นนำไปพิมพ์ลงบนผืนผ้าฝ้ายอมสีคราม บล็อกสกรีน แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการพิมพ์ไปอบให้แห้งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระยะเวลาการอบไว้ 3 ระดับ ได้แก่ 5, 10 และ 15 นาที เมื่อผ้าแห้งสนิทแล้ว จึงนำไปกำจัดสีต่างทับทิมที่ตกค้างออก โดยแช่ในสารละลายสำหรับล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการฟอกสีไปล้างด้วยน้ำสะอาดจนหมดสารตกค้าง แล้วผึ่งให้แห้ง ก่อนนำไปวัดค่าสีตามลำดับขั้นตอนต่อไป

2.6 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสำหรับล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) และระยะเวลาในการแช่สารละลายสำหรับล้างสารลอกสีในการพิมพ์ผ้าฝ้ายย้อมสีครามธรรมชาติ

ดำเนินการเตรียมสารสำหรับพิมพ์ลอกสีตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3 นำสารทั้งหมดไปพิมพ์ลงบนผืนผ้าฝ้าย แล้วนำไปอบให้แห้งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที. จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการพิมพ์ไปแช่ในสารละลายสำหรับล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) ที่ความเข้มข้น 4 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30 และ 50 กรัมต่อลิตร โดยแต่ละความเข้มข้นทดสอบระยะเวลาในการแช่ 3 ระดับ คือ 3, 5 และ 10 นาที (รายละเอียดของการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4) เมื่อครบตามกำหนดแล้ว จึงนำผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลอกสีไปล้างด้วยน้ำสะอาดจนหมดสารตกค้าง แล้วผึ่งให้แห้ง ก่อนนำไปวัดค่าสีตามลำดับขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4 การศึกษาหาความเข้มข้นและเวลาในการแช่สารละลายสำหรับล้างสารลอกสี

ความเข้มข้นสารละลายสำหรับล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) (กรัมต่อลิตร)	เวลาในการทดลอง (นาที)		
10	3	5	10
20	3	5	10
30	3	5	10
50	3	5	10

2.7 การทดสอบความคงทนของสีและความแข็งแรงของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลอกสี

การศึกษาความคงทนของสีของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลอกสีได้นำผ้าที่ผ่านการพิมพ์ลอกสีโดย สารลอกสีปริมาณ 30 กรัม แป้งพิมพ์สำหรับผสมลงในสารลอกสี 70 กรัม ใช้อุณหภูมิในการทำให้แห้ง 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที สารละลายสำหรับล้างสารลอกสี 10 กรัม/ลิตร เวลา 10 นาทีสำหรับการแช่เพื่อกำจัดสารลอกสี และนำมาทดสอบความคงทนของสีและการซักล้าง (color fastness to washing) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-C06:2010 การทดสอบความคงทนของสีต่อน้ำ (color fastness to water) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-E01:2010 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (color fastness to perspiration) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-E04: 2013 ความคงทนของสีต่อการขัดถู (color fastness to rubbing) มาตรฐานการทดสอบ AATCC TEST METHOD 8-2007 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียม (color fastness to artificial light : xenon are fading lamp test) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-B02:1994 การทดสอบความแข็งแรงของผ้าฝ้ายต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength) ปฏิบัติตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 13938 Part 1-1999

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

การพิมพ์ลอกสีบนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมสีครามธรรมชาติในการศึกษานี้ ใช้สารลอกสีจากต่างหับที่มาร่วมกับแป้งพิมพ์ดินขาวเกาหลี โดยได้ทำการศึกษาดูแปรที่เกี่ยวข้องหลายด้าน ทั้งสูตรและอัตราส่วนของสารพิมพ์ ความเข้มข้นของสารลอกสี อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้ง ตลอดจนปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของผืนผ้าภายหลังจากกระบวนการพิมพ์ ซึ่งผลการทดลองและการอภิปรายผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ผลการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารลอกสี (ต่างหับที่) ต่อประสิทธิภาพการพิมพ์ลอกสีบนผ้าฝ้ายย้อมสีครามธรรมชาติ

สารลอกสีชนิดออกซิไดซ์อย่างต่างทับทิม (potassium permanganate, KMnO_4) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการทำลายโครโมฟอร์ของสีครามบนผืนผ้าเพื่อสร้างลวดลายสีขาวหรือสีอ่อนตัดกับพื้นสีเข้ม เนื่องจาก KMnO_4 มีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูงและสามารถทำปฏิกิริยาทำลายโครงสร้างของสีย้อมกลุ่มแวตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [22] แต่ปริมาณของสารลอกสีที่ใช้ในสูตรแบ่งพิมพ์จำเป็นต้องมีความสมดุลกับปริมาณแบ่งดินขาวเกลินซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพาและควบคุมความหนืดของเพสต์พิมพ์ เพราะหากมีสารลอกสีน้อยเกินไปจะไม่สามารถทำลายโครงสร้างสีครามได้อย่างสมบูรณ์ แต่หากมีสารลอกสีมากเกินไปก็อาจก่อให้เกิดผลข้างเคียง เช่น การตกค้างของแมงกานีสไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยารีดักชันของต่างทับทิม อันจะส่งผลกระทบต่อความขาวสะอาดของลวดลายพิมพ์ [23] ดังนั้น การศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารลอกสีและแบ่งพิมพ์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนากระบวนการพิมพ์ลวดลายบนผ้าถักย้อมสีครามธรรมชาติให้ได้ลวดลายที่มีคุณภาพสูงสุด ทั้งในแง่ของความคมชัดของลวดลายและความสม่ำเสมอของสีขาวที่ปรากฏ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบอัตราส่วนของสารลอกสีต่อแบ่งพิมพ์ในหาระดับ ตั้งแต่ 10:90 จนถึง 90:10 โดยน้ำหนัก เพื่อประเมินผลที่มีต่อค่าสี ค่าความเข้มของสี และค่าดัชนีความขาวของลวดลายพิมพ์ที่ได้ ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 5

จากผลการทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 5 พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของสารลอกสีจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 และ 50 ของน้ำหนักรวมของสูตรแบ่งพิมพ์ ค่าความสว่าง (L^*) ของผืนผ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 73.54 เป็น 83.87 และ 86.56 ตามลำดับ พร้อมกับค่าความเข้มของสี (K/S) ที่ลดลงจาก 0.62 เหลือ 0.37 และ 0.32 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าปริมาณสารลอกสีที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถทำลายระบบพันธะคู่สลับ (conjugated chromophore) ในโมเลกุลสีครามได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น และทำให้บริเวณลวดลายปรากฏเป็นสีขาวที่ชัดเจนขึ้นตามกลไกการกัดสีด้วยสารออกซิไดซ์ที่มีรายงานไว้ในกรณีพิมพ์กีดสีบนผ้าเดนิมย้อมคราม [24-25]

แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนสารลอกสีต่อไปเป็นร้อยละ 70 และ 90 กลับพบว่าค่า L^* ลดลงเหลือ 82.53 และ 75.91 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า b^* ซึ่งบ่งชี้ความเหลืองของผืนผ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 4.07 ที่สัดส่วน 30:70 จนถึง 7.53 ที่สัดส่วน 90:10 และค่าดัชนีความขาวลดลงจาก 43.14 เหลือเพียง 8.67 ซึ่งต่ำกว่าค่าความขาวของผ้าที่ยังไม่ผ่านการย้อมสี คือ 60.72 อยู่มาก ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกทางเคมีของปฏิกิริยารีดักชันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งเมื่อใช้ในปริมาณสูงเกินสัดส่วนที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) สีน้ำตาลสนิมตกค้างอยู่บนเนื้อผ้าในปริมาณมากกว่าที่ขั้นตอนการล้างด้วยสารรีดิวซ์ เช่น โซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ จะสามารถกำจัดออกได้หมด [26] จึงส่งผลให้ผืนผ้าที่ผ่านการกัดสีในสัดส่วนสูงมีคราบสีน้ำตาลอมเหลืองหลงเหลืออยู่ และทำให้ค่าความขาวลดต่ำลงอย่างชัดเจน แม้ค่าความเข้มของสี (K/S) ซึ่งวัดเฉพาะบริเวณลวดลายสีขาวจะไม่ได้สูงขึ้นมากนักเมื่อเทียบกับสัดส่วน 10:90 ก็ตาม

นอกจากนี้ ค่า a^* ที่เปลี่ยนจากค่าลบในสัดส่วนที่มีแบ่งพิมพ์เจือจางมาก คือ -2.34 ถึง -1.77 ไปเป็นค่าบวกในสัดส่วนที่มีสารลอกสีมาก คือ 0.35 และ 1.68 ยังสอดคล้องกับการเกิดเฉดสีน้ำตาลแดงของสารประกอบแมงกานีสที่ตกค้างบนพื้นผ้าอีกด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญที่ได้รับการรายงานไว้ในกระบวนการกัดสีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนผ้าเดนิมย้อมคราม โดยพบว่าความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่สูงเกินไป แม้จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายสีย้อมได้ในระดับหนึ่ง แต่กลับทำให้ความขาวและคุณภาพพื้นผิวของผ้าลดลง เนื่องจากคราบออกไซด์ของแมงกานีสที่ล้างออกไม่หมดตกค้างอยู่บนเนื้อผ้า [21, 26] ทั้งนี้ วิธีการกัดสีด้วยเอนไซม์ เช่น แลคเคส (laccase) ซึ่งเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าและไม่ก่อให้เกิดคราบโลหะตกค้าง อาจเป็นทางเลือกที่ควรพิจารณาศึกษาเพิ่มเติมเพื่อลดปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยต่อไป [24]

จากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าสัดส่วนสารลอกสีต่อแบ่งพิมพ์ที่ 30:70 ถึง 50:50 เป็นช่วงที่ให้ผลลัพธ์เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ เนื่องจากให้ค่าความสว่างสูงและค่าความเข้มของสีต่ำ ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการกัดสีที่ดี ในขณะที่ยังคงรักษาค่าดัชนีความขาวของผืนผ้าไว้ในระดับที่ยอมรับได้ ก่อนที่ปริมาณสารลอกสีที่มากเกินไปจะเริ่มส่งผลเสียต่อความขาวและความสม่ำเสมอของสีพื้นผ้า ดังที่ปรากฏชัดเจนในสัดส่วน 70:30 และ 90:10 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานของการเลือกใช้

สารเคมีในกระบวนการพิมพ์และตกแต่งสิ่งทอที่ต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของกระบวนการและคุณภาพปลายทางของผืนผ้าเป็นสำคัญ [23]

3.2 ผลการศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งผ้าถักย้อมสีครามธรรมชาติภายหลังกระบวนการพิมพ์ลวดสี

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งภายหลังการพิมพ์กีดสีนับเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารลวดสีกับโครโมฟอร์ของสีย้อมครามที่ติดอยู่บนเส้นใย เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและช่วยให้สารลวดสีแพร่ซึมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใยได้ดีขึ้นภายในระยะเวลาอันสั้น [22-23] แต่ในขณะเดียวกันอุณหภูมิที่สูงเกินไปก็อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงความร้อน (thermo-oxidative degradation) ขึ้นกับโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นใยผ้าย้อมได้ ซึ่งเป็นกลไกที่แยกออกจากปฏิกิริยาการกีดสีโดยตรง และมักปรากฏผลเป็นการเกิดสีเหลืองหรือสีน้ำตาลอ่อนบนพื้นผ้าโดยไม่เกี่ยวข้องกับสีย้อมที่เหลืออยู่ [27-28] ด้วยเหตุนี้ การทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 6 จึงมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกัน คือ 80 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ที่มีต่อค่าสี (L^* , a^* , b^*) ค่าความเข้มของสี (K/S) และค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ของผ้าถักที่ผ่านการพิมพ์กีดสี โดยควบคุมอัตราส่วนสารลวดสีต่อแป้งพิมพ์ไว้คงที่ที่ 30:70 และระยะเวลาการอบแห้งคงที่ที่ 10 นาทีตลอดการทดลอง เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดซึ่งให้ทั้งประสิทธิภาพการกีดสีที่ดีและค่าความขาวของผืนผ้าที่สูงที่สุด

จากผลการทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจาก 80 องศาเซลเซียส เป็น 100 และ 120 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มของสี (K/S) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 0.44 เหลือ 0.40 และ 0.37 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 82.17 เป็น 82.88 และ 83.87 ซึ่งบ่งชี้ว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารลวดสีกับโครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมครามให้สมบูรณ์มากขึ้นภายในระยะเวลาการอบแห้งที่กำหนดไว้คงที่ 10 นาที และเอื้อให้สารลวดสีแพร่ซึมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใยได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของการกีดสีดีขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นในช่วงนี้ สอดคล้องกับหลักการที่ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารลวดสีบนผ้าที่ย้อมด้วยสีย้อมคราม [22-23]

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า b^* ซึ่งบ่งชี้ความเหลืองของผืนผ้ากลับพบว่ามีความโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ คือ เพิ่มขึ้นจาก 0.43 ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็น 0.65 1.07 และ 1.25 ที่อุณหภูมิ 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเกิดสีเหลืองเชิงความร้อน (thermal yellowing) ของเส้นใยเซลลูโลสเอง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ดำเนินไปควบคู่กับปฏิกิริยาการกีดสี โดยความร้อนที่สูงขึ้นจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลเซลลูโลสจนกลายเป็นหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลิกซึ่งเป็นโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีเหลืองบนพื้นผ้า และมีรายงานว่าอุณหภูมิมีผลต่อความรุนแรงของการเกิดสีเหลืองมากกว่าระยะเวลาในการอบหรืออบผ้า [29-30] ด้วยเหตุนี้ แม้ว่าประสิทธิภาพการทำลายสีย้อมครามจะดีขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่ความเหลืองที่เพิ่มขึ้นพร้อมกันก็เป็นปัจจัยที่ลดค่าดัชนีความขาวโดยรวมของผืนผ้าให้ลดต่ำลงไปด้วย

ด้วยเหตุนี้ ค่าดัชนีความขาวจึงมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส คือ 53.38 ซึ่งเป็นจุดที่ประสิทธิภาพการกีดสียังอยู่ในระดับที่ดีและความเหลืองเชิงความร้อนยังไม่รุนแรงมากนัก ก่อนที่ค่าความขาวจะลดลงอย่างชัดเจนเหลือ 43.14 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และลดลงอย่างมากเหลือเพียง 28.00 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดในชุดการทดลองทั้งหมด ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มของสี (K/S) กลับเพิ่มขึ้นเป็น 0.58 สวนทางกับแนวโน้มที่ลดลงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่านั้น ซึ่งอาจอธิบายได้จากการที่ความร้อนสูงเกินไปเร่งให้เกิดการย่อยสลายเชิงออกซิเดชันของโครงสร้างเซลลูโลสอย่างรุนแรงจนเกิดสารประกอบโครโมฟอร์สีน้ำตาลเหลืองจำนวนมากบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งค่า K/S ที่วัดได้จึงสะท้อนทั้งสีย้อมครามที่หลงเหลืออยู่และผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายเชิงความร้อนของเส้นใยรวมกัน มิใช่สีย้อมครามเพียง

อย่างเดียวยังต่อไป [27-28] นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงเกินไปยังอาจส่งผลให้คราบตกค้างของสารประกอบแมงกานีสจากสารลอกสีถูกกำจัดออกได้ไม่สมบูรณ์ในขั้นตอนการล้างภายหลัง เนื่องจากความร้อนอาจเร่งให้เกิดการยึดเกาะของสารประกอบดังกล่าวกับพื้นผิวเส้นใยแน่นยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นกลไกที่สอดคล้องกับข้อจำกัดของกระบวนการฟอกสีด้วยเปอร์แมงกาเนตที่มีการรายงานไว้ [26]

เมื่อเปรียบเทียบค่าความขาวของทุกตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์กั๊ดสีกับค่าความขาวของผ้าที่ยังไม่ผ่านการย้อมสี ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 60.72 พบว่าไม่มีตัวอย่างใดในชุดการทดลองนี้ที่มีค่าความขาวสูงเทียบเท่าผ้าดิบต้นแบบ ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่ายังคงมีสีย้อมครามหรือคราบออกไซด์ตกค้างอยู่บนพื้นผ้าในทุกภาวะการอบแห้งที่ทดสอบ โดยค่าดังกล่าววัดจากพิกัดสีระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ตามแนวทางมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณดัชนีความขาว [29] โดยสรุปแล้ว อาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่ 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการนี้ เนื่องจากให้ความสมดุลที่ดีระหว่างประสิทธิภาพการกั๊ดสีและการควบคุมความเหลืองเชิงความร้อนของเส้นใย ในขณะที่การใช้อุณหภูมิสูงเกิน 120 องศาเซลเซียสขึ้นไปนั้น แม้จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการกั๊ดสีได้ในระดับหนึ่ง แต่กลับส่งผลเสียต่อความขาวและคุณภาพโดยรวมของผืนผ้า ซึ่งควรหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ [23, 27]

ตารางที่ 5 ค่าสี ค่าความเข้มของสี และค่าดัชนีความขาวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย โดยใช้อัตราส่วนของสารลวดลายต่อแป้งพิมพ์ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

สูตรแป้งพิมพ์						ค่าของสี/ค่าความเข้มของสี ¹					ตัวอย่างผ้าที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย
สารลวดลาย (กรัม)	แป้งสำหรับผสมลงในสารลวดลาย (กรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำแห้ง (นาที)	สารละลายสำหรับล้างสารลวดลาย (กรัมต่อลิตร)	เวลาสำหรับการแช่เพื่อกำจัดสารลวดลาย (นาที)	L*	a*	b*	K/S	ค่าความขาว (whiteness)	
-	-	-	-	-	-	93.79	-0	5.24	0.08	60.72	ผ้าที่ไม่ผ่านการย้อมสี
10	90	100	10	10	10	73.54	-2	-5	0.62	39.03	
30	70	100	10	10	10	83.87	-2	4.07	0.37	43.14	
50	50	100	10	10	10	86.56	-1	6.61	0.32	36.45	
70	30	100	10	10	10	82.53	0.35	6.01	0.34	30.58	
90	10	100	10	10	10	75.91	1.68	7.53	0.58	8.67	

หมายเหตุ¹ : ค่าของสี และค่าความเข้มสี (K/S) วัดเฉพาะส่วนลวดลายสีขาวเท่านั้น

ตารางที่ 6 ค่าสี ค่าความเข้มของสี และค่าดัชนีความขาวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันในการอบแห้งผ้าที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย

ความเข้มข้น				ค่าของสี/ค่าความเข้มของสี ¹					ตัวอย่าง ผ้าที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย
สารลวดลาย (กรัม)	แป้งสำหรับผสมลงในสารลวดลาย (กรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำให้แห้ง (นาฬิกา)	L*	a*	b*	K/S	ค่าความขาว (whiteness)	
-	-	-	-	93.79	-0.67	5.24	0.08	60.72	ผ้าที่ไม่ผ่านการย้อมสี
30	70	80	10	82.17	-1.66	0.43	0.44	52.78	
30	70	100	10	82.88	-3.51	0.65	0.40	53.38	
30	70	120	10	83.87	-2.19	1.07	0.37	43.14	
30	70	150	10	81.49	-1.02	1.25	0.58	28.00	

หมายเหตุ¹ : ค่าของสี และค่าความเข้มสี (K/S) วัดเฉพาะส่วนลวดลายสีขาวเท่านั้น

3.3 ผลการศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งผ้าฝ้ายย้อมสีครามธรรมชาติภายหลังกระบวนการพิมพ์ลวดลาย

ระยะเวลาในการอบแห้งภายหลังการพิมพ์ลวดลายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยเชิงกระบวนการที่มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับอุณหภูมิในการควบคุมประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารลวดลายกับโครโมฟอร์ของสีครามบนเส้นใย เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีต้องอาศัยระยะเวลาที่เพียงพอให้สารลวดลายแพร่ซึมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใยและทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสีครามได้อย่างสมบูรณ์ [22-23] แต่ในขณะเดียวกัน การอบแห้งเป็นเวลานานเกินความจำเป็นที่อุณหภูมิคงที่ก็อาจก่อให้เกิดการสะสมความร้อนสะสม (cumulative thermal exposure) ในเนื้อผ้าจนนำไปสู่ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงความร้อนของโครงสร้างเซลลูโลสเอง ซึ่งเป็นกลไกที่ก่อให้เกิดสีเหลืองบนพื้นผ้าโดยไม่เกี่ยวข้องกับสีครามที่หลงเหลืออยู่ [27-28] ด้วยเหตุนี้

การทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 7 จึงมุ่งศึกษาผลของระยะเวลาการอบแห้งที่แตกต่างกัน คือ 5 10 และ 15 นาที ที่มีต่อค่าสี (L^* , a^* , b^*) ค่าความเข้มของสี (K/S) และค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์กัสดี้ โดยควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งไว้คงที่ที่ 100 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดซึ่งให้ทั้งประสิทธิภาพการกัสดี้ที่ดีและค่าความขาวของผืนผ้าที่สูงที่สุด

จากผลการทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 7 พบว่าเมื่อระยะเวลาการอบแห้งสั้นเพียง 5 นาที ค่าความเข้มของสี (K/S) มีค่าค่อนข้างสูงคือ 0.50 และค่าดัชนีความขาวมีค่าต่ำเพียง 31.98 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าระยะเวลาที่สั้นเกินไปยังไม่เพียงพอให้สารลอกสีแพร่ซึมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใยและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโครโมฟอร์ของสีครามได้อย่างสมบูรณ์ จึงยังคงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในบริเวณลวดลายพิมพ์ค่อนข้างมาก สอดคล้องกับหลักการที่ว่าปฏิกิริยาการกัสดี้ด้วยสารออกซิไดซ์ต้องอาศัยระยะเวลาที่เพียงพอในการทำลายโครงสร้างพันธะคู่สลับของโมเลกุลสีย้อมจึงจะเกิดผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ [22-23] แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งเป็น 10 นาที ค่าความเข้มของสีกลับลดลงเหลือ 0.37 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดในชุดการทดลองนี้ พร้อมกับค่าความขาวที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 43.14 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลา 10 นาทีเป็นช่วงเวลาที่เพียงพอให้ปฏิกิริยาการกัสดี้ดำเนินไปจนใกล้สมบูรณ์ โดยที่ยังไม่เกิดผลเสียจากการอบแห้งเป็นเวลานานเกินไป

แต่เมื่อขยายระยะเวลาการอบแห้งต่อไปเป็น 15 นาที กลับพบว่าค่าความเข้มของสี (K/S) เพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็น 0.48 และค่าความขาวลดลงอย่างชัดเจนเหลือเพียง 24.92 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดในชุดการทดลองทั้งหมด ในขณะที่ค่า b^* ซึ่งบ่งชี้ความเหลืองของผืนผ้าก็เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดจาก 4.07 ที่ 10 นาที เป็น 7.97 ที่ 15 นาที ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการสะสมความร้อนในเนื้อผ้าตลอดระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งแม้จะไม่ใช่การเพิ่มอุณหภูมิโดยตรง แต่การยี้ระยะเวลาสัมผัสความร้อนออกไปก็ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงความร้อนสะสมกับโครงสร้างเซลลูโลสมากขึ้นในลักษณะเดียวกับผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น และมีรายงานว่าระยะเวลาในการอบหรืออบผ้าก็มีผลต่อความรุนแรงของการเกิดสีเหลืองเชิงความร้อนได้เช่นเดียวกับอุณหภูมิ แม้จะมีอิทธิพลน้อยกว่าก็ตาม [27-28] จึงทำให้ค่า K/S ที่วัดได้ที่ 15 นาทีสะท้อนทั้งสีย้อมครามที่หลงเหลืออยู่และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงความร้อนของเส้นใยรวมกัน มีใช้ผลจากสีย้อมครามเพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้ การอบแห้งเป็นระยะเวลานานเกินไปอาจส่งผลให้คราบตกค้างของสารประกอบแมงกานีสไดออกไซด์จากสารลอกสีถูกกำจัดออกได้ไม่สมบูรณ์ในขั้นตอนการล้างภายหลัง เนื่องจากความร้อนที่สัมผัสเป็นเวลานานอาจเร่งให้เกิดการยิดเกาะของสารประกอบดังกล่าวกับพื้นผิวเส้นใยแน่นยิ่งขึ้นและกลายเป็นคราบที่ล้างออกยากกว่าเดิม ซึ่งเป็นกลไกที่สอดคล้องกับข้อจำกัดของกระบวนการฟอกสีด้วยเปอร์แมงกาเนตที่มีการรายงานไว้ [26] ด้วยเหตุนี้ จึงอาจกล่าวได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับคุณภาพของผืนผ้าที่ผ่านการพิมพ์กัสดี้มีลักษณะเป็นรูปตัวยู (U-shaped relationship) กล่าวคือ ระยะเวลาที่สั้นเกินไปทำให้ปฏิกิริยาการกัสดี้ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่ระยะเวลานานเกินไปกลับก่อให้เกิดผลเสียจากความร้อนสะสมต่อทั้งความขาวและคุณภาพพื้นผิวของผืนผ้า

เมื่อเปรียบเทียบค่าความขาวของทุกตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์กัสดี้กับค่าความขาวของผ้าที่ยังไม่ผ่านการย้อมสี ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 60.72 พบว่าไม่มีตัวอย่างใดในชุดการทดลองนี้มีค่าความขาวสูงเทียบเท่าผ้าดิบต้นแบบ ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่ายังคงมีสีย้อมครามหรือคราบออกไซด์ตกค้างอยู่บนพื้นผ้าในทุกภาวะระยะเวลาที่ทดสอบ โดยค่าดังกล่าววัดจากพิกัดสีระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ตามแนวทางมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณดัชนีความขาว [29] จากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาการอบแห้งที่ 10 นาที ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในชุดการทดลองนี้ เนื่องจากให้ค่าความเข้มของสีต่ำที่สุดและค่าความขาวสูงสุด ซึ่งบ่งบอกถึงความสมดุลที่ดีระหว่างความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาการกัสดี้และการควบคุมผลเสียจากความร้อนสะสม ในขณะที่ระยะเวลาที่สั้นกว่าหรือยาวนานกว่านี้ต่างส่งผลเสียต่อคุณภาพโดยรวมของผืนผ้าทั้งสิ้น ซึ่งควรนำไปพิจารณาประกอบการกำหนดเงื่อนไขมาตรฐานในกระบวนการผลิตจริงต่อไป [22-23]

3.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสำหรับล้างสารลอกสี (โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) และระยะเวลาในการล้างสารละลายสำหรับล้างสารลอกสีในการพิมพ์ผ้าถักย้อมสีครามธรรมชาติ

ภายหลังจากกระบวนการพิมพ์กีดสีด้วยสารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จำเป็นต้องมีขั้นตอนการล้างด้วยสารละลายรีดิวซ์ เช่น โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ เพื่อเปลี่ยนสภาพตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ที่ไม่ละลายน้ำและตกค้างอยู่บนพื้นผ้าให้กลายเป็นเกลือแมงกานีสที่มีสถานะออกซิเดชันต่ำกว่าและสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่ขาดไม่ได้ในการเปิดเผยผลลัพธ์ของการกีดสีให้ปรากฏเป็นสีขาวที่แท้จริง [22-23] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการกำจัดตะกอนแมงกานีสดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายรีดิวซ์ที่ใช้เป็นสำคัญ เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันระหว่างสารรีดิวซ์กับแมงกานีสไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้สารรีดิวซ์ในปริมาณที่เพียงพอตามสัดส่วนสโตอิชิโอเมตริกจึงจะเปลี่ยนสภาพตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ หากความเข้มข้นไม่เพียงพอ ตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ส่วนหนึ่งจะยังคงตกค้างอยู่บนพื้นผ้าและบดบังความขาวที่แท้จริงของลวดลาย [3-4] ด้วยเหตุนี้ การทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 8 จึงมุ่งศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายสำหรับล้างสารลอกสีที่แตกต่างกัน คือ 10 20 30 และ 50 กรัมต่อลิตร ที่มีต่อค่าสี (L^* , a^* , b^*) ค่าความเข้มของสี (K/S) และค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ของผ้าถักที่ผ่านการพิมพ์กีดสี โดยควบคุมระยะเวลาในการแช่ล้างไว้คงที่ที่ 10 นาทีตลอดการทดลอง เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดคราบตกค้างและเปิดเผยความขาวของลวดลายให้ได้มากที่สุด

จากผลการทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 8 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายล้างจาก 10 กรัมต่อลิตร เป็น 20 30 และ 50 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าความเข้มของสี (K/S) มีแนวโน้มลดลงอย่างสม่ำเสมอแม้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย คือ จาก 0.40 ที่ความเข้มข้น 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 0.39 และ 0.38 ที่ความเข้มข้น 30 และ 50 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณสารรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ปฏิกิริยารีดักชันระหว่างสารละลายล้างกับตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ที่ตกค้างอยู่บนบริเวณลวดลายดำเนินไปได้สมบูรณ์มากขึ้นตามสัดส่วนสโตอิชิโอเมตริกของปฏิกิริยา สอดคล้องกับหลักการที่ว่า การเปลี่ยนสภาพตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ให้เป็นเกลือแมงกานีสที่ละลายน้ำได้ต้องอาศัยปริมาณสารรีดิวซ์ที่เพียงพอจึงจะเกิดผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ [27-28]

แต่เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความขาวกลับพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดกว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า K/S มาก กล่าวคือ เพิ่มขึ้นจาก 40.45 ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เป็น 41.20 47.73 และ 55.79 ที่ความเข้มข้น 20 30 และ 50 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความเปลี่ยนแปลงของค่า K/S ที่ค่อนข้างน้อย ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าค่าดัชนีความขาวเป็นค่าที่คำนวณจากพิกัดสีทั้งสามมิติรวมกัน คือ L^* , a^* และ b^* มิใช่แปรผันตรงกับค่าใดค่าหนึ่งเพียงลำพัง [29] ดังนั้น แม้ว่าความเข้มข้นของสารรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดปริมาณสีย้อมหรือสารตกค้างในบริเวณลวดลายเพียงเล็กน้อยตามที่ค่า K/S แสดงให้เห็น แต่การกำจัดตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์สีน้ำตาลที่บดบังความขาวของพื้นผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นนั้น ส่งผลให้ค่าดัชนีความขาวโดยรวมเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดกว่าที่ค่า K/S เพียงอย่างเดียวจะบ่งบอกได้ ซึ่งมีรายงานยืนยันไว้ว่าการใช้สารรีดิวซ์ในความเข้มข้นที่ไม่เพียงพอจะทำให้ปริมาณแมงกานีสตกค้างสูงและได้เฉดสีที่ไม่ชัดเจน ในขณะที่การใช้ในความเข้มข้นที่เพียงพอจะกำจัดตะกอนดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้เฉดสีที่ชัดเจนกว่ามาก [30]

ตารางที่ 7 ค่าสี ค่าความเข้มของสี และค่าดัชนีความขาวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลอกสี โดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันในการอบแห้งผ้าที่ผ่านการพิมพ์ลอกสี

ความเข้มข้น		ค่าของสี/ค่าความเข้มของสี ¹					ตัวอย่างผ้า ที่ผ่านการพิมพ์ลอกสี
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำให้แห้ง (นาที)	L*	a*	b*	K/S	ค่าความขาว(whiteness)	
-	-	93.79	-0.67	5.24	0.08	60.72	ผ้าที่ไม่ผ่านการย้อมสี
100	5	83.20	-1.25	5.99	0.50	31.98	
100	10	83.87	-2.19	4.07	0.37	43.14	
100	15	84.49	-1.05	7.97	0.48	24.92	

หมายเหตุ¹ : ค่าของสี และค่าความเข้มสี (K/S) วัดเฉพาะส่วนลวดลายสีขาวเท่านั้น

ตารางที่ 8 ค่าสี ค่าความเข้มของสี และค่าดัชนีความขาวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายสำหรับล้างสารลวดลายที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้นน้ำยาล้างสารลวดลาย		ค่าของสี/ค่าความเข้มของสี ¹					ตัวอย่างผ้า ที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย
สารละลายสำหรับล้างสารลวดลาย (กรัมต่อลิตร)	เวลาในการแช่ (นาที)	L*	a*	b*	K/S	ค่าความขาว (whiteness)	
-	-	93.79	-0.67	5.24	0.08	60.72	ผ้าที่ไม่ผ่านการย้อมสี
10	10	83.08	-2.07	-5.61	0.40	40.45	
20	10	86.52	-2.92	-1.92	0.40	41.20	
30	10	85.73	-2.44	-3.95	0.39	47.73	
50	10	81.35	-2.02	-1.49	0.38	55.79	

หมายเหตุ¹ : ค่าของสี และค่าความเข้มสี (K/S) วัดเฉพาะส่วนลวดลายสีขาวเท่านั้น

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า a^* และ b^* ของตัวอย่างทั้งหมดพบว่ามีความเป็นลบตลอดช่วงความเข้มข้นที่ทดสอบ ซึ่งบ่งชี้ว่าโทนสีที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผ้าเอนไปทางโทนเขียวอมน้ำเงินอันเป็นลักษณะเฉพาะของสีย้อมครามที่หลงเหลืออยู่ในบริเวณลวดลาย มีสีโทนสีน้ำตาลเหลืองที่เป็นลักษณะเฉพาะของคราบแมงกานีสไดออกไซด์ที่ไม่ได้รับการกำจัดออกอย่างเต็มที่พบในการทดลองก่อนหน้านี้ [25] ซึ่งอาจตีความได้ว่าที่ระยะเวลาแช่ล้างคงที่ 10 นาทีในการทดลองชุดนี้ ความเข้มข้นของสารละลายล้างที่ใช้ทั้งหมดเพียงพอต่อการกำจัดตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ส่วนใหญ่ออกไปได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงมีสีย้อมครามบางส่วนหลงเหลืออยู่ในบริเวณลวดลาย โดยความเข้มข้นที่สูงขึ้นช่วยให้การกำจัดคราบแมงกานีสมีความสมบูรณ์มากขึ้นตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าความขาวของทุกตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์กั๊ดสีกับค่าความขาวของผ้าที่ยังไม่ผ่านการย้อมสี ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 60.72 พบว่าแม้แต่ที่ความเข้มข้นสูงสุดที่ทดสอบ คือ 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าความขาวสูงที่สุดในชุดการทดลองนี้ที่ 55.79 ก็ยังคงมีค่าต่ำกว่าผ้าดิบต้นแบบอยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่ายังคงมีสีย้อมครามหรือคราบตกค้างหลงเหลืออยู่บนพื้นผ้าไม่มากนัก ในทุกความเข้มข้นที่ทดสอบ โดยค่าดังกล่าววัดจากพิกัดสีระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ตามแนวทางมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณดัชนีความขาว [29] จากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายล้างสารลอกสีที่ 50 กรัมต่อลิตร เป็นเงื่อนไขที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในชุดการทดลองนี้ เนื่องจากให้ทั้งค่าความเข้มของสีต่ำสุดและค่าความขาวสูงสุด ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ที่ดีที่สุดที่ติดในบรรดาความเข้มข้นที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติควรพิจารณาควบคู่กับต้นทุนของสารเคมีและปริมาณของเสียที่เกิดจากสารรีดิวซ์ส่วนเกินในน้ำทิ้งด้วย เนื่องจากการใช้สารรีดิวซ์ในปริมาณสูงเกินความจำเป็นอาจก่อให้เกิดภาระต่อระบบบำบัดน้ำเสียได้ [26]

3.5 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการล้างสารลอกสีสำหรับการพิมพ์ลอกสีบนผ้าถักย้อมสีครามธรรมชาติ

นอกจากความเข้มข้นของสารละลายสำหรับล้างสารลอกสีแล้ว ระยะเวลาในการแช่ผ้าในสารละลายดังกล่าวยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยเชิงกระบวนการที่มีผลโดยตรงต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยารีดักชันระหว่างสารรีดิวซ์กับตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ที่ตกค้างอยู่บนพื้นผ้าภายหลังการพิมพ์กั๊ดสี เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมด้วยอัตราการแพร่ของสารรีดิวซ์เข้าสู่โครงสร้างเส้นใยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้ต้องอาศัยระยะเวลาที่เพียงพอจึงจะดำเนินไปจนใกล้สมบูรณ์ [22-23, 30] หากระยะเวลาในการแช่สั้นเกินไป ตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ส่วนหนึ่งอาจยังไม่ทันถูกเปลี่ยนสภาพเป็นเกลือแมงกานีสที่ละลายน้ำได้ จึงยังคงหลงเหลืออยู่บนพื้นผ้าและบดบังความขาวที่แท้จริงของลวดลาย ในขณะที่การแช่เป็นระยะเวลานานเกินจุดที่ปฏิกิริยาดำเนินไปจนสมบูรณ์แล้วมักไม่ก่อให้เกิดประโยชน์เพิ่มเติมมากนัก [30, 26] ด้วยเหตุนี้ การทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 9 จึงมุ่งศึกษาผลของระยะเวลาที่แตกต่างกันในการแช่สารละลายสำหรับล้างสารลอกสี คือ 3 5 และ 10 นาที ที่มีต่อค่าสี (L^*, a^*, b^*) ค่าความเข้มของสี (K/S) และค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ของผ้าถักที่ผ่านการพิมพ์กั๊ดสี โดยควบคุมความเข้มข้นของสารละลายล้างไว้คงที่ที่ 10 กรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดคราบตกค้างและเปิดเผยความขาวของลวดลายให้ได้มากที่สุด

จากผลการทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 9 พบว่าเมื่อระยะเวลาการแช่สั้นเพียง 3 นาที ค่าความเข้มของสี (K/S) มีค่าค่อนข้างสูงคือ 0.46 และค่าดัชนีความขาวมีค่าต่ำที่สุดในชุดการทดลองนี้ คือ 40.92 พร้อมกับค่า a^* ที่เป็นบวก คือ 0.44 ซึ่งบ่งชี้ถึงโทนสีที่ยังคงเอนไปทางสีแดงอมน้ำตาลอันเป็นลักษณะเฉพาะของคราบแมงกานีสไดออกไซด์ที่ยังไม่ได้รับการกำจัดออกอย่างสมบูรณ์ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าระยะเวลา 3 นาทีนั้นสั้นเกินไปสำหรับให้สารรีดิวซ์แพร่ซึมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใยและทำปฏิกิริยารีดักชันกับตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ได้อย่างทั่วถึง จึงยังคงมีตะกอนดังกล่าวหลงเหลืออยู่บนพื้นผ้าในปริมาณมาก สอดคล้องกับหลักการที่ว่าปฏิกิริยาการกำจัดตะกอนโลหะออกไซด์ด้วยสารรีดิวซ์เป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมด้วยอัตราการแพร่และต้องอาศัยระยะเวลาที่เพียงพอจึงจะเกิดผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ [22-23, 30]

แต่เมื่อขยายระยะเวลาการแช่เป็น 5 นาที กลับพบว่าค่าความเข้มของสี (K/S) ลดลงอย่างชัดเจนเหลือ 0.40 พร้อมกับค่าดัชนีความขาวที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 52.45 และค่า a^* ที่เปลี่ยนจากค่าบวกเป็นค่าลบอย่างชัดเจน คือ -2.07 ซึ่งบ่งชี้ว่าโทนสีของผืนผ้าเปลี่ยนจากสีแดงอมน้ำตาลไปเป็นสีเขียวอมน้ำเงินอันเป็นลักษณะเฉพาะของสีย้อมครามที่หลงเหลืออยู่ในบริเวณลวดลาย มิใช่คราบแมงกานีสไดออกไซด์อีกต่อไป การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ นี้แสดงให้เห็นว่าระยะเวลา 5 นาทีเพียงพอให้ปฏิกิริยารีดักชันของตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ส่วนใหญ่ดำเนินไปจนใกล้สมบูรณ์ ซึ่งเป็นช่วงเวลาวิกฤต (critical time) ที่

ปฏิกิริยาการแพร่และปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวเส้นใยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุด ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงที่ปฏิกิริยาชะลอตัวลงเมื่อปริมาณตะกอนที่เข้าถึงได้ง่ายลดน้อยลง [26,30]

ในขณะที่เมื่อขยายระยะเวลาการแช่ต่อไปเป็น 10 นาที พบว่าค่าความเข้มของสี (K/S) ยังคงเท่าเดิมที่ 0.40 และค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็น 53.38 ในขณะที่ค่า a^* ยังคงมีแนวโน้มติดลบมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น -3.51 ซึ่งบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาการกำจัดตะกอนแมงกานีสไดออกไซด์ในช่วงเวลาระหว่าง 5 ถึง 10 นาทีดำเนินไปในอัตราที่ช้าลงอย่างมากเมื่อเทียบกับช่วง 3 ถึง 5 นาที ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยาที่ควบคุมด้วยอัตราการแพร่ ซึ่งในระยะแรกตะกอนที่อยู่บริเวณผิวเส้นใยที่เข้าถึงได้ง่ายจะถูกกำจัดออกอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไป ตะกอนที่เหลืออยู่ก็ฝังตัวลึกเข้าไปในโครงสร้างเส้นใยมากขึ้น ทำให้อัตราการแพร่ของสารรีดิวซ์เข้าถึงตะกอนส่วนที่เหลือทำได้ช้าลง จนกระทั่งเข้าสู่ใกล้จุดอิ่มตัวของปฏิกิริยาซึ่งการเพิ่มระยะเวลาต่อไปให้ผลตอบแทนที่ลดน้อยถอยลง (diminishing returns) [22-23, 30]

3.6 ผลการทดสอบความคงทนของสีและความแข็งแรงของผ้าฝ้ายผ่านการพิมพ์ลวดลาย

การศึกษาความคงทนของสีของผ้าฝ้ายสัก การทดลองนี้ได้นำผ้าที่ผ่านการพิมพ์ลวดลายโดย สารลวดลายปริมาณ 30 กรัม แบ่งพิมพ์สำหรับผสมลงในสารลวดลาย 70 กรัม ใช้อุณหภูมิในการทำให้แห้ง 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที สารละลายสำหรับล้างสารลวดลาย 10 กรัม/ลิตร เวลา 10 นาทีสำหรับการแช่เพื่อกำจัดสารลวดลาย และนำมาทดสอบความคงทนของสีและการซักล้าง (color fastness to washing) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-C06:2010 การทดสอบความคงทนของสีต่อน้ำ (color fastness to water) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-E01:2010 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (color fastness to perspiration) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-E04: 2013 ความคงทนของสีต่อการขัดถู (color fastness to rubbing) มาตรฐานการทดสอบ AATCC TEST METHOD 8-2007 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียม (color fastness to artificial light : xenon arc fading lamp test) มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-B02:1994 และผลการทดลองที่ได้ปรากฏดังตารางที่ 10 การทดสอบความแข็งแรงของผ้าฝ้ายต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength) ปฏิบัติตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 13938 Part 1-1999 ผลการทดลองที่ได้ปรากฏดังตารางที่ 11

ตารางที่ 9 ค่าสี ค่าความเข้มของสี และค่าดัชนีความขาวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย โดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันในการแช่สารละลายสำหรับล้างสารลวดลาย

ความเข้มข้น		ค่าของสี/ค่าความเข้มของสี ¹					ตัวอย่างผ้า ที่ผ่านการพิมพ์ลวดลาย
สารละลายสำหรับล้างสารลวดลาย (กรัมต่อลิตร)	เวลาสำหรับการแช่เพื่อกำจัดสารลวดลาย (นาที)	L*	a*	b*	K/S	ค่าความขาว (whiteness)	
-	-	93.79	-0.67	5.24	0.08	60.72	ผ้าที่ไม่ผ่านการย้อมสี
10	3	80.31	0.44	-0.13	0.46	40.92	
10	5	83.08	-2.07	0.92	0.40	52.45	
10	10	82.88	-3.51	1.08	0.40	53.38	

หมายเหตุ¹ : ค่าของสี และค่าความเข้มสี (K/S) วัดเฉพาะส่วนลวดลายสีขาวเท่านั้น

ความคงทนของสีเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าความสวยงามของลวดลายที่ได้จากกระบวนการย้อมสีครามธรรมชาติและการพิมพ์ลวดลาย เนื่องจากเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สิ่งทอในการใช้งานจริงที่ต้องเผชิญกับสภาวะต่าง ๆ เช่น การซักล้าง การสัมผัสกับน้ำ เหงื่อ แสงแดด และแรงเสียดสีจากการสวมใส่ [25,31] โดยเฉพาะอย่างยิ่งสีครามซึ่งเป็นสีย้อมชนิดวัต (vat dye) ที่มีกลไกการติดสีบนเส้นใยแตกต่างจากสีย้อมชนิดอื่น กล่าวคือ โมเลกุลสีครามในรูปรีดิวซ์ที่ละลายน้ำได้จะถูกออกซิไดซ์กลับเป็นเม็ดสีที่ไม่ละลายน้ำและตกตะกอนฝังตัวอยู่ภายในโครงสร้างเส้นใยโดยปราศจากพันธะเคมีโควาเลนต์กับโมเลกุลเซลลูโลส ซึ่งกลไกดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบความคงทนของสีที่ปรากฏในแต่ละสภาวะการทดสอบ [25, 33] ด้วยเหตุนี้ การทดสอบที่ปรากฏในตารางที่ 10 จึงมุ่งประเมินความคงทนของสีของผ้าฝ้ายย้อมสีครามธรรมชาติและ

พิมพ์ลอกสีตามมาตรฐานสากล ครอบคลุมความคงทนต่อการซักล้าง น้ำ เหงื่อกรดและด่าง แสง และการขัดถูทั้งในสภาวะแห้งและเปียก เพื่อประเมินศักยภาพในการนำผ้าที่ผ่านกระบวนการนี้ไปใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์

จากผลการทดสอบที่ปรากฏในตารางที่ 10 พบว่าความคงทนของสีต่อการซักล้างและต่อน้ำอยู่ในระดับดีถึงดีมาก คือระดับ 4/5 ทั้งในแง่ของการเปลี่ยนแปลงสีและการติดเปื้อนสีบนผ้าทดสอบทุกชนิด ยกเว้นการติดเปื้อนบนขนสัตว์ในการทดสอบความคงทนต่อน้ำที่ลดลงเล็กน้อยเป็นระดับ 4 ผลลัพธ์ในระดับดีถึงดีมากดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการติดสีของสีย้อมครามที่เป็นสีย้อมชนิดวัต ซึ่งภายหลังกระบวนการออกซิเดชันแล้ว เม็ดสีครามจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและฝังตัวแน่นอยู่ภายในโครงสร้างเส้นใย จึงมีความเสถียรสูงต่อการละลายหรือหลุดออกในระหว่างการซักล้างด้วยน้ำหรือสารซักฟอก สอดคล้องกับรายงานที่ยืนยันว่าสีย้อมครามให้ค่าความคงทนต่อการซักล้างในระดับดีมากโดยไม่ขึ้นกับชนิดของเส้นใยผ้าทดสอบ เนื่องจากเม็ดสีที่ไม่ละลายน้ำไม่สามารถแพร่กระจายไปติดเปื้อนผ้าขาวข้างเคียงได้ง่ายไม่ว่าจะเป็นเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์ [25,31] ส่วนค่าที่ลดลงเล็กน้อยของขนสัตว์ในการทดสอบความคงทนต่อน้ำอาจเกี่ยวข้องกับโครงสร้างโปรตีนของเส้นใยขนสัตว์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วมากกว่าเส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้มีแนวโน้มดูดซับอนุภาคเม็ดสีขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำได้มากกว่าเส้นใยชนิดอื่นเล็กน้อย

ในขณะที่ความคงทนของสีต่อเหงื่อทั้งในสภาวะกรดและด่างมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีอยู่ในระดับ 4 ซึ่งต่ำกว่าความคงทนต่อการซักล้างและน้ำเล็กน้อย ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้น้ำยาเหงื่อเทียมที่ใช้ในการทดสอบมีองค์ประกอบของเกลือกรดอะมิโน และสภาวะกรดหรือด่างที่มีฤทธิ์รุนแรงกว่าน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีบางส่วนกับเม็ดสีครามที่ฝังตัวอยู่บนพื้นผิวเส้นใย หรือส่งผลให้เม็ดสีบางส่วนที่ยึดเกาะไม่แน่นหลุดออกมาได้ง่ายกว่าการซักล้างด้วยน้ำเปล่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ทั่วไปในสีย้อมชนิดวัตหลายชนิดเมื่อทดสอบภายใต้สภาวะเหงื่อเทียมตามมาตรฐาน ISO 105-E04 [4] ทั้งนี้ ค่าการติดเปื้อนบนขนสัตว์ในการทดสอบเหงื่อกรดที่ลดลงเป็นระดับ 4 ในขณะที่เหงื่อด่างยังคงอยู่ที่ระดับ 4/5 อาจสะท้อนถึงความไวของโครงสร้างโปรตีนเคราตินในเส้นใยขนสัตว์ต่อสภาวะกรดที่มากกว่าสภาวะด่างในบริบทของการดูดซับอนุภาคสีที่หลุดออกมา

สำหรับความคงทนของสีต่อแสงซึ่งประเมินในระดับ 4 จากระดับเต็ม 8 นั้น จัดอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการขจัดจางของสีครามภายใต้แสงยูวี กล่าวคือ โครงสร้างโครโมฟอร์ของโมเลกุลสีครามที่ประกอบด้วยระบบพันธะคู่สลับ (conjugated double bond) มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเมื่อได้รับพลังงานแสงอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งค่อย ๆ ทำลายโครงสร้างโครโมฟอร์และทำให้สีซีดจางลง แม้ว่าในภาพรวมสีย้อมครามธรรมชาติจะได้รับการรายงานว่ามีความคงทนต่อแสงที่ค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับสีย้อมธรรมชาติชนิดอื่น แต่ระดับความคงทนที่แท้จริงยังคงขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของพืชให้สีคราม กรรมวิธีการย้อม และชนิดของสารช่วยติดสีที่ใช้ ซึ่งอาจให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันได้ในแต่ละกรณีศึกษา [31,33]

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบความคงทนของสีของผ้าถักย้อมสีครามจากธรรมชาติและพิมพ์ลอกสี

ความคงทนของสีต่อ	ระดับความคงทนของสี						
	การเปลี่ยนแปลงของสี (color change)	ความคงทนต่อการติดเปื้อนสีบนผ้าขาว (color staining)					
		อะซิเตท (acetate)	ฝ้าย (cotton)	ไนลอน (nylon)	พอลิเอสเตอร์ (polyester)	อะคริลิก (acrylic)	ขนสัตว์ (wool)
การซักล้าง*	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
น้ำ*	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4
เหงื่อ (กรด) *	4	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4
เหงื่อ (ด่าง) *	4	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
แสง**	4	-	-	-	-	-	-
การขัดถู*	-	สภาวะแห้ง			สภาวะเปียก		
		5			4		

หมายเหตุ : * ระดับ 5 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

** ระดับ 8 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

ผลการทดสอบที่มีความน่าสนใจและสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของสีย้อมครามที่มีการรายงานไว้อย่างกว้างขวางในวรรณกรรม คือ ความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะแห้งอยู่ในระดับดีเยี่ยม คือ ระดับ 5 ในขณะที่ความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกทดลองอย่างชัดเจนเหลือระดับ 4 ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นข้อจำกัดที่เป็นที่ทราบกันดีของสีย้อมครามในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์ denim ย้อมคราม ซึ่งมีสาเหตุมาจากกลไกการติดสีของสีย้อมชนิดวัตที่อาศัยเพียงแรงยึดเกาะทางกายภาพระหว่างเม็ดสีกับโครงสร้างเส้นใยโดยไม่มีพันธะเคมีโควาเลนต์ยึดเหนี่ยว เมื่อเส้นใยสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำในระหว่างการขัดถูสภาวะเปียก โครงสร้างเส้นใยเซลลูโลสจะพองตัวเล็กน้อยและคลายการยึดเกาะของอนุภาคเม็ดสีที่อยู่บริเวณผิวเส้นใย ทำให้เม็ดสีบางส่วนหลุดออกและถ่ายเทไปติดผ้าทดสอบสีขาวได้ง่ายกว่าในสภาวะแห้งซึ่งไม่มีน้ำเป็นตัวกลางช่วยคลายพันธะทางกายภาพดังกล่าว สอดคล้องกับรายงานที่ยืนยันว่าความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกของผ้าฝ้ายย้อมครามมักด้อยกว่าสภาวะแห้งเนื่องจากไม่มีพันธะเคมีระหว่างเม็ดสีกับเส้นใยเซลลูโลส [31, 33] และยังมีงานเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้สารช่วยติดสี (fixing agent) ประเภทพอลิยูรีเทนซึ่งสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มเติม

ผ่านพันธะไฮโดรเจนและพันธะไอออนิกกับเม็ดสีคราม อันจะช่วยเพิ่มความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกได้ในการศึกษาต่อไป [31]

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบความแข็งแรงของผ้าฝ้ายถักย้อมสีครามจากธรรมชาติและพิมพ์ลอกสี ต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength) มาตรฐานการทดสอบ ISO 13938 Part 1-1999

ชิ้นงานทดสอบ	ทดสอบ(พื้นสีน้ำเงิน) (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ทดสอบ(ลวดลายสีขาว) (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
ผ้าฝ้ายถัก	74.06	47.70

นอกเหนือไปจากคุณสมบัติด้านสีและความคงทนของสีแล้ว ความแข็งแรงเชิงกลของผืนผ้าภายหลังผ่านกระบวนการพิมพ์ก็ดสียังเป็นดัชนีสำคัญที่บ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เนื่องจากสารออกซิไดซ์ที่ใช้ในการทำลายโครโมฟอร์ของสีย้อม เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มิได้ออกฤทธิ์จำเพาะเจาะจงต่อโมเลกุลสีย้อมเพียงอย่างเดียว แต่ยังสามารถทำปฏิกิริยากับโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นใยฝ้ายได้ในระดับหนึ่งด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายเชิงโครงสร้างและความแข็งแรงของผืนผ้าลดลงเฉพาะบริเวณที่ผ่านการพิมพ์ก็ดสี [33-34] ด้วยเหตุนี้ การทดสอบที่ปรากฏในตารางที่ 11 จึงมุ่งเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (bursting strength) ตามมาตรฐาน ISO 13938 Part 1-1999 ระหว่างบริเวณพื้นผ้าสีน้ำเงินที่ยังคงมีสีครามติดอยู่ตามปกติกับบริเวณลวดลายสีขาวที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ก็ดสี เพื่อประเมินผลกระทบเชิงกลของกระบวนการก็ดสีที่มีต่อความแข็งแรงของผืนผ้าฝ้ายถัก และพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์

จากผลการทดสอบที่ปรากฏในตารางที่ 11 พบว่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของบริเวณพื้นผ้าสีน้ำเงินมีค่าเท่ากับ 74.06 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในขณะที่บริเวณลวดลายสีขาวที่ผ่านการพิมพ์ก็ดสีมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเหลือเพียง 47.70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คิดเป็นการลดลงประมาณร้อยละ 35.6 ของความแข็งแรงเดิม ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกทางเคมีของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นใยฝ้าย ซึ่งนอกเหนือไปจากการทำลายโครโมฟอร์ของสีย้อมครามแล้ว สารออกซิไดซ์ชนิดนี้ยังสามารถโจมตีพันธะไกลโคซิดิกในสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลสได้พร้อมกัน ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการแตกสายโซ่ (chain scission) และเปลี่ยนสภาพเซลลูโลสบางส่วนให้กลายเป็นออกซิเซลลูโลส (oxycellulose) ซึ่งมีระดับการเกิดพอลิเมอร์เซชัน (degree of polymerization) ต่ำกว่าเซลลูโลสดั้งเดิม อันเป็นสาเหตุโดยตรงของการลดลงของความแข็งแรงเชิงกลเฉพาะในบริเวณที่ผ่านการพิมพ์ก็ดสี ในขณะที่บริเวณพื้นผ้าสีน้ำเงินซึ่งไม่ได้สัมผัสกับสารลอกสีโดยตรงยังคงรักษาโครงสร้างเซลลูโลสดั้งเดิมไว้ได้เกือบสมบูรณ์ [22, 34]

ผลการทดสอบนี้ยังสอดคล้องกับรายงานที่ยืนยันว่าความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ประเภทโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นใหม่บนโครงสร้างเซลลูโลส ซึ่งยังมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวมากเท่าใด ความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใยก็จะยิ่งลดลงมากเท่านั้น โดยมีรายงานว่าเส้นใยที่ผ่านการออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแสดงค่าความแข็งแรงตึงที่ต่ำกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการออกซิไดซ์อย่างชัดเจน ควบคู่ไปกับค่าการดูดซับความชื้นและความขรุขระของผิวเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งล้วนเป็นดัชนีบ่งชี้ความเสียหายเชิงโครงสร้างของเซลลูโลสจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน [34] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาที่รายงานผลลัพธ์ในทำนองเดียวกันบนผ้าฝ้ายที่ผ่านการพิมพ์ก็ดสีด้วยสารออกซิไดซ์หลายชนิด ซึ่งพบว่าความแข็งแรงตึงของบริเวณที่ผ่านการพิมพ์มีค่าต่ำกว่าบริเวณที่ยังคงย้อมสีอยู่เดิมในทุกกรณี โดยระดับของการสูญเสียความแข็งแรงดังกล่าวมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับระดับของการฟอกสี

หรือค่าความแตกต่างของสี (color difference) ที่เกิดขึ้น กล่าวคือ ยิ่งฟอกสีได้ขาวมากเท่าใด ความเสียหายต่อความแข็งแรงของเส้นใยก็มีแนวโน้มมากขึ้นตามไปด้วย [33]

อย่างไรก็ตาม มีรายงานเช่นกันว่าการควบคุมตัวแปรของกระบวนการพิมพ์ก๊อส์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารฟอกสี ค่าความเป็นกรดด่างของแบ้งพิมพ์ และระยะเวลาของปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม สามารถสร้างลวดลายก๊อส์ที่มีความคมชัดโดยไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียความแข็งแรงของผืนผ้าได้เช่นกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการสูญเสียความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่ปรากฏในการทดลองนี้มีโซ่ผลลัพธ์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้โดยสิ้นเชิงจากการใช้สารฟอกสีไดออกซิไดซ์ชนิดนี้ หากแต่ขึ้นอยู่กับสภาวะเฉพาะของกระบวนการที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นสำคัญ [22] ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการพิจารณาสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของการก๊อส์ให้ได้ลวดลายที่มีความคมชัดและความขาวสูงกับผลกระทบเชิงกลที่มีต่อความแข็งแรงของผืนผ้า ซึ่งควรนำไปประกอบการพิจารณาปรับสภาวะของกระบวนการในการศึกษาต่อไปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงสุดทั้งในเชิงความสวยงามและความคงทนในการใช้งาน

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการพิมพ์ก๊อส์บนผืนผ้าฝ้ายถักที่ผ่านการย้อมสีครามธรรมชาติด้วยด่างทับทิมร่วมกับแบ้งพิมพ์ดินขาวเกาลินให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อใช้สัดส่วนสารฟอกสีต่อแบ้งพิมพ์ระหว่าง 30:70 ถึง 50:50 เนื่องจากให้ค่าความสว่างสูงและค่าความเข้มของสีต่ำ แต่หากเพิ่มสัดส่วนสารฟอกสีมากกว่านี้จะเกิดคราบแมงกานีสไดออกไซด์ตกค้างและทำให้ค่าความขาวลดต่ำลงอย่างชัดเจน ในด้านสภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีให้ค่าดัชนีความขาวสูงสุดที่ 53.38 เนื่องจากเป็นจุดสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการก๊อส์กับการเกิดสีเหลืองเชิงความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส ในขณะที่อุณหภูมิหรือระยะเวลาที่สูงหรือยาวนานเกินไปกลับส่งผลเสียต่อความขาวของผืนผ้า สำหรับขั้นตอนการล้างสารฟอกสี ความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ 50 กรัมต่อลิตรให้ประสิทธิภาพการกำจัดคราบแมงกานีสไดออกไซด์ได้ดีที่สุด และระยะเวลาแช่ 5 นาทีก็เพียงพอต่อการให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับระยะเวลา 10 นาทีโดยใช้เวลาในกระบวนการน้อยกว่า ด้านความคงทนของสี ผ้าที่ผ่านการพิมพ์ก๊อส์มีความคงทนต่อการซักล้างและน้ำอยู่ในระดับดีถึงดีมาก และมีความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะแห้งอยู่ในระดับดีเยี่ยม แต่มีความคงทนต่อแสงเพียงระดับปานกลางและความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกต่ำกว่าสภาวะแห้ง อันเป็นข้อจำกัดโดยธรรมชาติของสีย้อมกลุ่มแวตที่ไม่มีพันธะเคมีโควาเลนต์ยึดเหนี่ยวกับเส้นใย นอกจากนี้ กระบวนการก๊อส์ด้วยด่างทับทิมยังส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของผืนผ้าบริเวณลวดลายลดลงจาก 74.06 เหลือ 47.70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือลดลงประมาณร้อยละ 35.6 เมื่อเทียบกับบริเวณพื้นสีคราม เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารฟอกสีสามารถทำลายโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นใยฝ้ายควบคู่ไปกับการทำลายโครโมฟอร์ของสีย้อมได้ ผลการศึกษาทั้งหมดนี้จึงชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาสภาวะกระบวนการพิมพ์ก๊อส์ที่เหมาะสมสามารถให้ลวดลายที่มีความคมชัดและความขาวสูงได้ แต่ยังคงต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของการก๊อส์กับผลกระทบต่อความแข็งแรงและความคงทนของผืนผ้า เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Textile School. (2025). The revival of natural indigo dyeing: Techniques and global impact.

<https://www.textileschool.com/28019/indigo-rising-the-global-revival-of-natural-indigo-dyeing-in-sustainable-textiles/>

- [2] Jantarungsee, K., Plengdeesakul, B., & Pengchai, T. (2024). The results of evolution, wisdom, and identity of indigo-dyed fabric in Northeastern (Isan) Thailand. *International Journal of Religion*, 5(10), 345-360. <https://doi.org/10.61707/3z0zf856>
- [3] Duangbubpa, C., Chantachon, S., & Pratumnet, N. (2015). Application of traditional knowledge to create indigo-dyed fabric products in Sakon Nakhon Province, Thailand. *Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research*, 3 (3), 6-10.
- [4] Pizzicato, B., Pacifico, S., Cayuela, D., Mijas, G., & Riba-Moliner, M. (2023). Advancements in sustainable natural dyes for textile applications: a review. *Molecules*, 28(16), 5954. <https://doi.org/10.3390/molecules28165954>
- [5] Wang, K., Luo, Q., Ding, W., Zhang, Q., Ji, D., Wang, R., & Qin, X. (2025). Nitrogen-mediated dyeing of denim with natural indigo: Towards sustainable and efficient coloration. *Dyes and Pigments*, 239, 112778. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2025.112778>
- [6] Silva, L. M., Silva, P. M. D. S., Pagnan, C. S., & Ayres, E. (2024). Insights into the dyeing using natural indigo (*Indigofera tinctoria*): Toward an environmentally friendly garment. *Coloration Technology*, 140(1), 114-124. <https://doi.org/10.1111/cote.12704>
- [7] Wikipedia contributors. (2026). *Discharge printing*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Discharge_printing
- [8] Technical Bulletin, Cotton Incorporated, Print chemistry of vat dyes and vat discharge. <https://www.cottoninc.com/wp-content/uploads/2017/12/ISP-1016-Print-Chemistry-of-Vat-Dyes-and-Vat-Discharge.pdf>
- [9] Moawaed, S., Hashad, A., Mohamed, M., Abd El-AAty, M., Hassabo, A. G., Abdel-Aziz, E., & Othman, H. (2022). Overview of discharge printing techniques on denim fabric. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, 19(2), 211-221. <https://doi.org/10.21608/jtcps.2022.143637.1127>
- [10] Discharge printing of textiles dyed with indigo blue. *US Patent 4,247,295*. <https://patents.google.com/patent/US4247295A/en>
- [11] Apparel printing system and methods for printing on articles with repeating patterns. *US Patent 11,279,151*. <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/11279151>
- [12] Knit article of apparel and apparel printing system and method. *US Patent 9,676,208*. <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/9676208>
- [13] Kabish, A. K., Abate, M. T., Alemar, Z. A., & Girmay, S. (2023). The importance of natural indigo dye and its revitalization and Ethiopian potential for indigo growing. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023(1), 2135014. <https://doi.org/10.1155/2023/2135014>
- [14] Sakong, P., & Thosaikham, W. (2024). Revolutionizing indigo-dyed fabric identification: A novel sulfonation approach for authenticity and quality assurance. *Trends in Sciences*, 21(9), 8043-8043. <https://doi.org/10.48048/tis.2024.8043>

- [15] Chollakup, R., Rungruangkitkrai, N., Apipatpapha, T., Witayakran, S., Nithithongsakol, N., & Mongkholarattanasit, R. (2023). A study on the woven construction of fabric dyed with natural indigo dye and finishing for applying to product design for home textile products. *Autex Research Journal*, 23(1), 116-125. <https://doi.org/10.2478/aut-2021-0050>
- [16] Mongkholarattanasit, R., Klaichoi, C., Mudchiew, O., Punrattanasin, N., Sasivatchutikool, N., & Rungruangkitkrai, N. (2014). Effect of ferrous sulfate to improve UV-protection property of cotton fabric dyed with natural indigo. *Advanced Materials Research*, 1030-1032, 418-421. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.418>
- [17] Mongkholarattanasit, R., Saiwan, C., Klaichoi, C., Rungruangkitkrai, N., & Sasivatchutikool, P. (2015). UV-protection property of silk fabric dyed with natural indigo by using padding technique: A focus on effect of ferrous sulfate mordant, *Applied Mechanics and Materials*. 804, 217-220. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.804.217>
- [18] Mongkholarattanasit, R., Sasithorn, N., Klaichoi, C., Changmuong, W., Vaisalong, J., Rungruangkitkrai, N., Udon, S., & Sasivatchutikool, P. (2017). Studies of dyeing of silk fabric with natural indigo using pad-dry and pad-batch techniques. *Applied Mechanics and Materials*; 865, 100-104. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.865.100>
- [19] Mongkholarattanasit, R., Klaichoi, C., Rungruangkitkrai, N., Vuthiganond, N., & Nakpathom, M. (2022). Eco-printing on cotton fabric with natural indigo dye using wild taro corms as a new thickening agent, *Journal of Natural Fibers*, 19 (13), 5435-5450. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1875381>
- [20] รัตนพล มงคลรัตนาสี, จรุง ค่ายจ้อย, วาสนา ช่างม่วง, ก้องเกียรติ มหาอินทร์, สาคร ชลสาครเกษม มานะรุ่งวิทย์, นงนุช ศศิธร, ณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร, นฤพน ไผ่ศาลตันติวงศ์, ทองใส จ่านางการวิรัช วงศ์ภักดี และสมพร ตียะศรี. (2560). คู่มือองค์ความรู้การย้อมสีครามจากธรรมชาติแบบใหม่บนเส้นด้ายไหม และฝ้ายในเชิงพาณิชย์. ขอนแก่น: บริษัท ก-ฮ จำกัด.
- [21] จรุง ค่ายจ้อย, รัตนพล มงคลรัตนาสี, วาสนา ช่างม่วง, ก้องเกียรติ มหาอินทร์, สาคร ชลสาครเกษม มานะรุ่งวิทย์, นงนุช ศศิธร, พิชิตพล เจริญทรัพย์นันท์, จำลอง สาลิกานนท์, ณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร, สายชล มงคล และเบญจภา ช่วงทิพย์. (2560). คู่มือองค์ความรู้การพิมพ์ และเพนท์สีครามจากธรรมชาติบนผ้าไหม และผ้าฝ้ายโดยใช้แป้งหัวบอนดัดแปรในเชิงพาณิชย์. ขอนแก่น: บริษัท ก-ฮ จำกัด.
- [22] Siddique, A., Hussain, T., Ibrahim, W., Raza, Z. A., & Abid, S. (2018). Optimization of discharge printing of indigo denim using potassium permanganate via response surface regression. *Pigment & Resin Technology*, 47(3), 228-235. <https://doi.org/10.1108/PRT-11-2016-0100>
- [23] Ragab, M. M., Othman, H., & Hassabo, A. G. (2021). Resist and discharge printing techniques on different textile based materials. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, 18(2), 229-237. <https://doi.org/10.21608/jtcps.2021.68420.1070>
- [24] Abd El-Thalouth, I., Kantouch, F., Nassar, S. H., Youssef, M. A., & El-Hennawi, H. M. (2008). Ecofriendly discharge printing on cotton fabrics using laccase enzyme. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 33(1), 52-57.

- [25] Saikhao, L., Setthayanond, J., Karpkird, T., Bechtold, T., & Suwanruji, P. (2018). Green reducing agents for indigo dyeing on cotton fabrics. *Journal of Cleaner Production*, 197, 106-113.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.199>
- [26] Bean, S. L., Dulik, M. D., & Monopoli, P. A. (1988). Method for permanganate bleaching of fabric and garments (U.S. Patent No. 4,795,476). United States Patent and Trademark Office.
<https://patents.google.com/patent/US4795476A>
- [27] Manasoglu, G., Kanik, M., & Yildirim, K. (2019). Effect of fixation conditions on yellowing behavior of cellulose powder-coated fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 1558925019829049.
<https://doi.org/10.1177/1558925019829049>
- [28] Yang, C. Q., & Freeman, J. M. (1993). Thermal degradation of cotton cellulose studied by Fourier transform infrared-photoacoustic spectroscopy. In M. W. Urban & C. D. Craver (Eds.), *Structure-property relations in polymers: Spectroscopy and performance* (pp. 693–708). American Chemical Society.
<https://doi.org/10.1021/ba-1993-0236.ch029>
- [29] ASTM International. (2020). ASTM E313-20: Standard practice for calculating yellowness and whiteness indices from instrumentally measured color coordinates. ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/E0313-20>
- [30] Gruber, M., & Aplas, T. (2019). Method for removing manganox deposits of textile surfaces (WIPO Patent No. WO2019081290A1). CHT Germany GmbH. <https://patents.google.com/patent/WO2019081290A1/en>
- [31] Behary, N., & Volle, N. (2025). Durable textile dyeing/printing using natural indigo dyes and leaves, and Mayan-inspired blue indigo pigments. *Colorants*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.3390/colorants4010002>
- [32] Luo, Y., Pei, L., & Wang, J. (2020). Sustainable indigo dyeing and improvement of rubbing fastness of dyed cotton fiber using different fixing agents for obtaining eco-friendly cowboy products. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119728>
- [33] Alam, M. M., Uddin, K., & Khan, E. (2018). Controlled fading of soluble sulphur dyed cotton fabric by oxidation discharge printing. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 4(3), 182-186.
- [34] Knežević, M., Kramar, A., Hajnrih, T., Korica, M., Nikolić, T., Žekić, A., & Kostić, M. (2022). Influence of potassium permanganate oxidation on structure and properties of cotton. *Journal of Natural Fibers*, 19(2), 403-415. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1745120>