สมบัติความคงทนของสีย้อมจากกากกาแฟบนผ้าใยกัญชงที่ผ่านกระบวนการมอร์แดนท์-ย้อมพร้อมกันด้วยอัลตราโซนิค

Colour fastness Properties of Spent Coffee Ground Dye on Hemp Fabric via Ultrasonic-Assisted Simultaneous Mordanting and Dyeing

จิราเมธ สุภารัตน์[1,a*] กิติยาพร ทิมาไชย[2,b] และ ธีรภัทร์ ปัญญาเพียร[3,c]

[1] แผนกเทคโนโลยีสิ่งทอ วิทยาลัยการอาชีพขอนแก่น

[2] ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

[3] แผนกเทคโนโลยีแฟชั่น และสิ่งทอ วิทยาลัยอาชีวศึกษาสุราษฎร์ธานี

jirametsuparat16@gmail.com[a] kitiyapornt@gmail.com[b] Thirapat-pa@rmutp.ac.th[C]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการมอร์แดนท์พร้อมกับการย้อมสีผ้าใยกัญชงด้วยกากกาแฟโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิค โดยศึกษาผลของสารมอร์แดนท์ 4 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต คอปเปอร์ซัลเฟต เฟอร์รัสซัลเฟต และสแตนนัสคลอไรด์ เปรียบเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการมอร์แดนท์ ต่อค่าความเข้มสีและค่าสีตลอดจนสมบัติความคงทนของสีต่อการซักล้าง การขัดถู แสงแดดเทียม เหงื่อ และน้ำตามมาตรฐานสากล ISO ผลการทดลองพบว่าผ้าเส้นใยกัญชงทุกตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการมอร์แดนท์มีค่าความเข้มสี (K/S) สูงกว่าผ้าที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์อย่างชัดเจน โดยคอปเปอร์ซัลเฟตให้ค่า K/S สูงที่สุดและให้เฉดสีเข้มโทนเขียวอมเทา รองลงมาคือเฟอร์รัสซัลเฟตซึ่งให้เฉดสีน้ำตาลเข้ม ในขณะที่โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟตให้เฉดสีน้ำตาลระดับปานกลางใกล้เคียงกับสีธรรมชาติของสีย้อม และสแตนนัสคลอไรด์ให้ค่า K/S เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยโดยยังคงรักษาโทนสีเดิมไว้มากที่สุด ด้านความคงทนของสี ผ้าทุกกลุ่มตัวอย่างมีความคงทนต่อการซักล้างและต่อน้ำอยู่ในระดับดีถึงดีมาก (4-5) แต่ความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกลดลงต่ำกว่าสภาวะแห้งอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกลุ่มที่ผ่านการมอร์แดนท์ ส่วนความคงทนต่อแสงแดดเทียมและเหงื่ออยู่ในระดับปานกลางถึงดีในทุกกลุ่มตัวอย่าง โดยเฟอร์รัสซัลเฟตและสแตนนัสคลอไรด์ให้ความคงทนต่อแสงสูงกว่าสารมอร์แดนท์ชนิดอื่นเล็กน้อย ผลการศึกษานี้จึงยืนยันว่ากระบวนการมอร์แดนท์-ย้อมพร้อมกันด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคสามารถเพิ่มทั้งความเข้มสีและความคงทนของสีจากกากกาแฟบนผ้าใยกัญชงได้อย่าง

คำสำคัญ: การย้อมสีธรรมชาติ กากกาแฟ ผ้าใยกัญชง มอร์แดนท์-ย้อมพร้อมกัน เทคนิคอัลตราโซนิค ความคงทนของสี

Abstract

This research aimed to develop and investigate the efficiency of simultaneous mordanting and dyeing of hemp fabric with spent coffee grounds using an ultrasonic-assisted technique, and it examined the effects of four mordants-potassium aluminium sulfate, copper sulfate, ferrous sulfate, and stannous chloride-compared with unmordanted fabric on colour strength and colour values, as well as on colour fastness to washing, rubbing, artificial light, perspiration, and water according to the ISO standards. The results showed that all mordanted hemp fabrics exhibited markedly higher colour strength (K/S) than the unmordanted fabric, with copper sulfate giving the highest K/S value and a dark greyish-green shade, followed by ferrous sulfate, which produced a dark brown shade, while potassium aluminium sulfate gave a medium brown shade close to the natural colour of the dye, and stannous chloride increased the K/S value only slightly while preserving the original dye tone the most. In terms of colour fastness, all fabric groups showed good-to-excellent fastness to washing and to water (grade 4–5), but wet rubbing fastness was clearly lower than dry rubbing fastness, particularly among the mordanted groups, whereas fastness to artificial light and to perspiration ranged from moderate to good across all groups, with ferrous sulfate and stannous chloride giving slightly higher light fastness than the other mordants. These findings therefore confirm that ultrasonic-assisted simultaneous mordanting and dyeing can effectively enhance both the colour strength and the colour fastness of spent-coffee-ground dye on hemp fabric, offering an environmentally friendly approach for valorising coffee-industry waste in line with circular-economy principles

Key word: Natural dyeing, Spent coffee grounds, Hemp fabric, Simultaneous mordanting and dyeing, Ultrasonic-assisted technique, Colour fastness

1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นหนึ่งในภาคอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการย้อมสี ซึ่งโดยทั่วไปยังคงพึ่งพาสีสังเคราะห์และสารมอร์แดนท์ที่เป็นโลหะหนัก เช่น โครเมียม ทองแดง และดีบุก เพื่อเพิ่มความติดสีและความคงทนของสีบนเส้นใย การใช้สารเคมีดังกล่าวก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีความเป็นพิษสูง ยากต่อการบำบัด และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศตลอดจนสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและผู้บริโภค ด้วยเหตุนี้ แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) และการพัฒนากระบวนการย้อมสีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรและอุตสาหกรรมอาหารจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในวงการวิจัยสิ่งทอ

กากกาแฟ (spent coffee grounds, SCG) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมกาแฟที่มีปริมาณมหาศาลและถูกทิ้งเป็นขยะโดยไม่ผ่านการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเต็มศักยภาพ มีรายงานว่าทั่วโลกมีการผลิตกากกาแฟไม่น้อยกว่า 6 ล้านตันต่อปี ซึ่งส่วนใหญ่ถูกกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผาทำลาย ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสารประกอบฟีนอลิกสู่สิ่งแวดล้อม [1] ในขณะเดียวกัน กากกาแฟยังเป็นแหล่งของสารประกอบให้สี กลุ่มเมลานอยดิน แทนนิน และสารประกอบฟีนอลิกอื่น ๆ ที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติสำหรับสิ่งทอ [2] การศึกษาก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการใช้สารมอร์แดนท์ประเภทแทนนินร่วมกับกากกาแฟสามารถเพิ่มความเข้มของสีและสมบัติเชิงหน้าที่ของผ้าขนสัตว์ได้อย่างมีนัยสำคัญ [3] การพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ดังกล่าวจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแปรรูปของเสียให้เกิดมูลค่าเพิ่ม (waste valorization) ตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน

ใยกัญชง (hemp fiber) เป็นเส้นใยธรรมชาติจากพืชที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมแฟชั่นและสิ่งทอยั่งยืน เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ปลูกได้โดยใช้น้ำและสารเคมีกำจัดศัตรูพืชน้อยกว่าฝ้าย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติดูดซับความชื้นและระบายอากาศได้ดี ทำให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการย้อมด้วยสีธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูงของใยกัญชงส่งผลให้การแทรกซึมของโมเลกุลสีย้อมธรรมชาติเข้าสู่เส้นใยเป็นไปได้ยากกว่าเส้นใยฝ้าย จึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการมอร์แดนท์เพื่อสร้างพันธะเชื่อมระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย งานวิจัยที่ผ่านมาได้ยืนยันความเป็นไปได้ในการย้อมสีผ้าจากใยกัญชงด้วยสีธรรมชาติร่วมกับสารมอร์แดนท์ประเภทแทนนินและสารส้ม โดยให้ผลความคงทนของสีในระดับที่ยอมรับได้ [4]

โดยทั่วไปกระบวนการย้อมสีธรรมชาติแบบดั้งเดิมมักดำเนินการแยกขั้นตอนระหว่างการมอร์แดนท์และการย้อมสี (pre-mordanting หรือ post-mordanting) ซึ่งต้องใช้ระยะเวลา น้ำ และพลังงานความร้อนในปริมาณมาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงและลดทอนความน่าสนใจเชิงพาณิชย์ของสีย้อมธรรมชาติเมื่อเทียบกับสีสังเคราะห์ แนวทางการมอร์แดนท์และการย้อมสีพร้อมกันในขั้นตอนเดียว (simultaneous mordanting and dyeing) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดระยะเวลา ปริมาณน้ำ และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต ควบคู่ไปกับการประยุกต์ใช้เทคนิคอัลตราโซนิค (ultrasonic-assisted technique) ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์แควิเทชัน (cavitation) ในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่แตกตัวอย่างรุนแรง ก่อให้เกิดแรงกลและคลื่นกระแทกที่ช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของโมเลกุลสีย้อมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใย เพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของสี และลดอุณหภูมิหรือระยะเวลาที่ใช้ในการย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] มีรายงานว่าการย้อมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคสามารถเพิ่มอัตราการดูดซึมสีย้อมและค่าความเข้มสี (K/S) ของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสีรีแอกทีฟได้ดีกว่าการย้อมแบบวิธีดั้งเดิมที่อุณหภูมิต่ำกว่า [6] นอกจากนี้ การใช้สารมอร์แดนท์จากธรรมชาติร่วมกับกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมยังช่วยเสริมสร้างความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์สิ่งทอโดยรวม [7]

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่ายังไม่มีการศึกษาที่บูรณาการองค์ประกอบทั้งสามส่วนเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ ได้แก่ การใช้กากกาแฟเหลือทิ้งเป็นแหล่งสีย้อมธรรมชาติ การมอร์แดนท์และการย้อมสีแบบพร้อมกันในขั้นตอนเดียว และการประยุกต์ใช้เทคนิคอัลตราโซนิคเพื่อเร่งประสิทธิภาพกระบวนการบนผ้าที่ทอจากใยกัญชง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

พัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการมอร์แดนท์พร้อมกับการย้อมสีผ้าใยกัญชงด้วยกากกาแฟโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิค โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มสี ความคงทนของสีต่อการซัก การขัดถู และแสง ตลอดจนสมบัติเชิงกายภาพของผ้าที่ผ่านกระบวนการดังกล่าว ผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะเป็นแนวทางในการแปรรูปของเสียจากอุตสาหกรรมกาแฟให้เกิดมูลค่าเพิ่ม ลดการใช้สารเคมีอันตรายในกระบวนการย้อมสี และส่งเสริมการพัฒนาสิ่งทอที่ยั่งยืนอย่างเป็นรูปธรรม สอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนและเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals)

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี

วัสดุหลักที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ผ้าทอจากเส้นใยกัญชง มีความหนา 0.0437 มิลลิเมตร น้ำหนัก 197.03 กรัมต่อตารางเมตร จำนวนเส้นด้ายพุ่ง 21 เส้นต่อนิ้ว และจำนวนเส้นด้ายยืน 19 เส้นต่อนิ้ว ร่วมกับกากกาแฟพันธุ์อราบิก้าซึ่งเก็บรวบรวมจากพื้นที่ปลูกดอยช้าง จังหวัดเชียงราย เพื่อใช้เป็นแหล่งของสีย้อมธรรมชาติในการทดลอง ด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Crest Ultrasonic Cleaner รุ่น 690DAE, Crest Ultrasonics Ltd.) สำหรับกระบวนการมอร์แดนท์และย้อมสีพร้อมกัน และเครื่องวัดค่าสี (ColorQuest XE, บริษัท คัลเลอร์ โกลโบล จำกัด) สำหรับตรวจวัดค่าความเข้มสีและค่าสีของผ้าตัวอย่างหลังการย้อม สำหรับสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการมอร์แดนท์ ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต (ferrous sulfate) สแตนนัสคลอไรด์ (stannous chloride) โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต (potassium aluminium sulfate or alum) และคอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulfate) ซึ่งทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd. ส่วนสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนหลังการย้อม ได้แก่ สบู่เทียม (soaping agent) จากบริษัท บุญทวีเคมีภัณฑ์ จำกัด สำหรับการซักฟอกผ้าหลังการย้อม และสารเพิ่มประจุบวก (cationizing agent, STARCAT PD) จากบริษัท สตาร์เทค จำกัด สำหรับเพิ่มความเข้มของสีบนผ้า

2.2 การเตรียมผ้าเส้นใยกัญชงสำหรับย้อมสี

ก่อนนำผ้าเส้นใยกัญชงเข้าสู่กระบวนการมอร์แดนท์และย้อมสี ผ้าตัวอย่างได้ผ่านการเตรียมพื้นผิวเบื้องต้น 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการลอกแป้ง กระบวนการกำจัดสิ่งสกปรก และกระบวนการฟอกขาว ตามลำดับ เพื่อขจัดสิ่งเจือปนตามธรรมชาติและสิ่งตกค้างจากกระบวนการผลิตเส้นด้าย อันจะส่งผลให้เส้นใยมีความพร้อมในการดูดซึมสารมอร์แดนท์และสีย้อมได้อย่างสม่ำเสมอในขั้นตอนถัดไป

ในขั้นตอนแรก ผ้าเส้นใยกัญชงถูกนำไปผ่านกระบวนการลอกแป้ง (desizing) โดยใช้สารละลายที่ประกอบด้วยเอนไซม์ความเข้มข้น 7 กรัมต่อลิตร ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร และสบู่เทียม 2 กรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนผ้าต่อสารละลายเท่ากับ 1:100 ดำเนินการที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด จึงนำผ้าไปล้างด้วยน้ำสะอาดและผึ่งให้แห้ง

ในขั้นตอนที่สอง ผ้าเส้นใยกัญชงที่ผ่านการลอกแป้งแล้วถูกนำไปผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งสกปรก (scouring) ด้วยสารละลายโซดาไฟ 2 กรัมต่อลิตร โซเดียมคาร์บอเนต 1 กรัมต่อลิตร และสบู่เทียม 1 กรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนผ้าต่อสารละลาย 1:100 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกันกับขั้นตอนแรก คือ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นจึงนำผ้าไปล้างน้ำและผึ่งให้แห้งอีกครั้ง

ในขั้นตอนสุดท้าย ผ้าเส้นใยกัญชงที่ผ่านการลอกแป้งและกำจัดสิ่งสกปรกแล้วถูกนำไปผ่านกระบวนการฟอกขาว (bleaching) ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 กรัมต่อลิตร ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต 4 กรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนผ้าต่อสารละลาย 1:100 ดำเนินการที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาทีเช่นเดียวกัน ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ผ้าเส้นใยกัญชงถูกนำไปล้างน้ำให้สะอาดและผึ่งให้แห้ง เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับกระบวนการมอร์แดนท์และการย้อมสีในขั้นตอนถัดไป

2.3 การสกัดสีย้อมจากกากกาแฟ

การเตรียมสารละลายสีย้อมจากกากกาแฟดำเนินการโดยวิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (hot water extraction) ซึ่งเป็นวิธีการสกัดสีย้อมธรรมชาติที่นิยมใช้เนื่องจากมีขั้นตอนไม่ซับซ้อนและไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างจากตัวทำละลายอินทรีย์ โดยเริ่มจากการชั่งน้ำหนักกากกาแฟและบันทึกค่าที่ได้ จากนั้นนำกากกาแฟไปผสมกับน้ำในอัตราส่วนกากกาแฟต่อน้ำเท่ากับ 1:5 ในหม้อต้ม แล้วนำไปต้มให้เดือดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้สารประกอบให้สีที่มีอยู่ในกากกาแฟละลายออกมาสู่สารละลายอย่างสมบูรณ์ ภายหลังการต้ม สารละลายที่ได้ถูกนำไปกรองผ่านถุงผ้าพอลิเอสเตอร์เพื่อแยกกากกาแฟออกจากสารละลายสีย้อม และนำน้ำสีที่สกัดได้ไปใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับกระบวนการมอร์แดนท์และการย้อมสีผ้าเส้นใยกัญชงในขั้นตอนถัดไป

2.4 การทำมอร์แดนท์ระหว่างการย้อมสี

การศึกษาสภาวะการทำมอร์แดนท์ระหว่างการย้อมสีดำเนินการโดยตัดผ้าเส้นใยกัญชงที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวแล้วให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างละ 5 ชิ้น และกำหนดรหัสชิ้นทดสอบตามแผนการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การย้อมสีแบบไม่ใช้สารมอร์แดนท์ (control) และการย้อมสีแบบใช้สารมอร์แดนท์ร่วมกับสารละลายสีย้อมในขั้นตอนเดียวกัน (simultaneous mordanting and dyeing)

สำหรับกระบวนการทำมอร์แดนท์ระหว่างการย้อม สารมอร์แดนท์ 4 ชนิด ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต สแตนนัสคลอไรด์ โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต และคอปเปอร์ซัลเฟต ถูกเตรียมแยกกันที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรต่อชนิด แล้วเติมลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายสีย้อมซึ่งคำนวณปริมาณโดยใช้อัตราส่วนวัสดุต่อน้ำย้อมเท่ากับ 1:100 จากนั้นนำผ้าเส้นใยกัญชงใส่ลงในบีกเกอร์ของสารมอร์แดนท์แต่ละชนิด และนำบีกเกอร์ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยสารมอร์แดนท์ สารละลายสีย้อม และชิ้นทดสอบ เข้าสู่เครื่องอัลตราโซนิค โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้เกิดการมอร์แดนท์และการย้อมสีพร้อมกันภายใต้อิทธิพลของคลื่นอัลตราโซนิค

ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการย้อม ผ้าตัวอย่างถูกนำไปซักล้างด้วยสารละลายสบู่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดสีย้อมส่วนเกินที่ไม่ยึดติดกับเส้นใย แล้วจึงล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง ก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำผ้าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวไปวัดค่าความเข้มสี (K/S) และค่าสี (L* a* b*) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการมอร์แดนท์ระหว่างการย้อมสีในแต่ละสภาวะการทดลอง

2.5 การทดสอบสมบัติความคงทนของสีจากผ้าเส้นใยกัญชงที่ย้อมด้วยกากกาแฟ

การประเมินสมบัติความคงทนของสีบนผ้าเส้นใยกัญชงที่ผ่านกระบวนการมอร์แดนท์และย้อมสีด้วยกากกาแฟดำเนินการตามวิธีมาตรฐานสากล เพื่อประเมินประสิทธิภาพการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยภายใต้สภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยดำเนินการทดสอบทั้งหมด 5 รายการ ได้แก่ ความคงทนของสีต่อการขัดถู (colour fastness to rubbing) ตามมาตรฐาน ISO 105-X12:2001 ความคงทนของสีต่อการซักล้าง (colour fastness to washing) ตามมาตรฐาน ISO 105-C06:2010 ความคงทนของสีต่อน้ำ (colour fastness to water) ตามมาตรฐาน ISO 105-E01:2013 ความคงทนของสีต่อเหงื่อ (colour fastness to perspiration) ตามมาตรฐาน ISO 105-E04:2013 และความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียม (colour fastness to artificial light) ตามมาตรฐาน ISO 105-B02:1999 ผลการทดสอบที่ได้จากทุกรายการถูกนำมาประเมินระดับความคงทนโดยเปรียบเทียบกับเกรย์สเกล (grey scale) ตามเกณฑ์มาตรฐาน เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของผ้าเส้นใยกัญชงที่ผ่านกระบวนการมอร์แดนท์และย้อมสีพร้อมกันด้วยกากกาแฟภายใต้เทคนิคอัลตราโซนิค

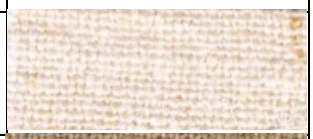
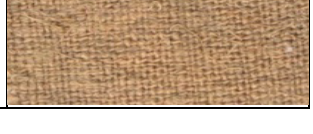
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

กากกาแฟ (spent coffee grounds) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการบริโภคกาแฟที่มีปริมาณมหาศาลในแต่ละปี และมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นแหล่งสีย้อมธรรมชาติ เนื่องจากมีองค์ประกอบของสารเมลานอยดิน แทนนิน และสารประกอบฟีนอลิกที่สามารถให้สีน้ำตาลบนเส้นใยได้ [8-9] ในขณะเดียวกัน ผ้าใยกัญชง (hemp fabric) จัดเป็นเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 70-75 และมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากบนพื้นผิวเส้นใย จึงเหมาะสมต่อการสร้างพันธะกับโมเลกุลของสีย้อมและสารมอร์แดนท์ [10] อย่างไรก็ตาม สีย้อมธรรมชาติมักมีความคงทนต่อการซักล้าง แสงแดด และการขัดถูต่ำกว่าสีย้อมสังเคราะห์ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมธรรมชาติมีตำแหน่งยึดเกาะกับเส้นใยที่ไม่แข็งแรงนัก [8] งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนากระบวนการมอร์แดนท์-ย้อมพร้อมกัน (simultaneous mordanting) ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค เพื่อเร่งการแพร่กระจายของไอออนโลหะจากสารมอร์แดนท์และโมเลกุลสีย้อมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใย และก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชัน (coordination complex) ระหว่างสีย้อม-โลหะ-เส้นใยที่มีความเสถียรสูงขึ้น [11], [12] โดยศึกษาผลของสารมอร์แดนท์ 4 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต คอปเปอร์ซัลเฟต เฟอร์รัสซัลเฟต และสแตนนัสคลอไรด์ เปรียบเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการมอร์แดนท์ ต่อสมบัติความคงทนของสีในด้านต่างๆ ตามมาตรฐานสากล ISO 105 ได้แก่ ความคงทนต่อการซักล้าง การขัดถู แสงแดดเทียม เหงื่อในสภาวะกรดและด่าง และน้ำ ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

3.1 ผลการศึกษาการทำมอร์แดนท์ระหว่างการย้อมสีบนผ้าเส้นใยกัญชงด้วยการกาแฟเทคนิคอัลตราโซนิค

การมอร์แดนท์มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการยึดติดของสีย้อมธรรมชาติกับเส้นใย โดยชนิดของไอออนโลหะที่ใช้เป็นสารมอร์แดนท์ส่งผลโดยตรงต่อค่าความเข้มสี (K/S) ตลอดจนค่าสี L* a* และ b* ของผ้าที่ย้อม เนื่องจากความสามารถในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อน (chelation) ระหว่างไอออนโลหะกับหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลสีย้อมมีความแตกต่างกันตามชนิดของโลหะที่ใช้ [13] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของสีย้อมจากกากกาแฟซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบฟีนอลิกและเมลานอยดิน การเลือกใช้สารมอร์แดนท์ที่เหมาะสมจึงมีผลโดยตรงต่อทั้งความเข้มและโทนสีที่ได้ ดังที่มีรายงานว่าการใช้สารมอร์แดนท์ประเภทแทนนินร่วมกับกากกาแฟสามารถเพิ่มความเข้มสีบนเส้นใยโปรตีนได้อย่างมีนัยสำคัญ [3] งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของสารมอร์แดนท์ 4 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต คอปเปอร์ซัลเฟต เฟอร์รัสซัลเฟต และสแตนนัสคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ต่อค่าความเข้มสี (K/S) และค่าสี (L* a* b*) ของผ้าเส้นใยกัญชงที่ผ่านกระบวนการมอร์แดนท์ระหว่างการย้อมสีด้วยสารละลายสีย้อมจากกากกาแฟ โดยย้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าของสีและความเข้มสีบนผ้าเส้นใยกัญชงที่ย้อมด้วยสารละลายสีย้อมจากกากกาแฟ โดยการทำมอร์แดนท์ระหว่างการย้อมสี โดยย้อมที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ชนิดของสารมอร์แดนท์	ความเข้มข้นของสารมอร์แดนท์ (กรัมต่อลิตร)	อัตราส่วนการสกัดสีย้อม	ค่าความเข้มสี (K/S)	ค่าของสี			ตัวอย่างผ้า
				L*	a*	b*	
ผ้าตัวอย่างก่อนย้อมสี	-	-	0.66	76.84	-0.56	11.62	
ไม่ใช้สารมอร์แดนท์	10	1:5	1.65	72.58	1.84	20.29	
โพแทสเซียมอะลูมิเนียม	10	1:5	3.12	62.91	3.77	21.10	
คอปเปอร์ซัลเฟต	10	1:5	5.23	47.98	-0.31	14.38	
เฟอร์รัสซัลเฟต	10	1:5	4.39	49.68	1.37	11.42	
สแตนนัสคลอไรด์	10	1:5	1.91	70.16	2.39	20.46	

จากตารางที่ 1 พบว่าผ้าเส้นใยกัญชงทุกตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการมอร์แดนท์มีค่าความเข้มสี (K/S) สูงกว่าผ้าที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์ (K/S = 1.65) และผ้าตัวอย่างก่อนย้อมสี (K/S = 0.66) อย่างชัดเจน ซึ่งยืนยันว่าการเติมสารมอร์แดนท์ร่วมกับการย้อมสีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของโมเลกุลสีย้อมจากกากกาแฟกับเส้นใยกัญชงได้ สอดคล้องกับหลักการทั่วไปของกระบวนการมอร์แดนท์ที่สารประกอบโลหะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลสีย้อมกับหมู่ไฮดรอกซิลบนเส้นใย ซึ่งมีรายงานว่าการมอร์แดนท์สามารถเพิ่มค่า K/S ได้มากกว่า 2 เท่าเมื่อเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการมอร์แดนท์ [7]

เมื่อพิจารณาลำดับประสิทธิภาพของสารมอร์แดนท์ทั้งสี่ชนิด พบว่าคอปเปอร์ซัลเฟตให้ค่า K/S สูงที่สุด (5.23) รองลงมาคือเฟอร์รัสซัลเฟต (4.39) โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต (3.12) และสแตนนัสคลอไรด์ (1.91) ตามลำดับ ซึ่งเรียงลำดับเป็น $Cu^{2+} > Fe^{2+} > Al^{3+} > Sn^{2+}$ สอดคล้องกับแนวโน้มที่มีรายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งพบลำดับประสิทธิภาพของสารมอร์แดนท์ในทิศทางเดียวกันเมื่อย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติที่มีสารประกอบฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบหลัก [14] ทั้งนี้เนื่องจากทองแดงและเหล็กเป็นโลหะทรานซิชันที่มีวงโคจร d ว่างสำหรับสร้างพันธะโคออร์ดิเนตกับหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลของสารประกอบฟีนอลิก เมลานอยดิน และกรดคลอโรจีนิกซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสีย้อมจากกากกาแฟได้อย่างมีเสถียรภาพสูงกว่าโลหะกลุ่มอื่น [2] ส่งผลให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ-สีย้อมที่แน่นหนา เพิ่มปริมาณโมเลกุลสีย้อมที่ยึดติดบนเส้นใย และทำให้ค่าความเข้มสีสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านค่าสี พบว่าคอปเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสซัลเฟตให้ค่า L* ต่ำที่สุด (47.98 และ 49.68 ตามลำดับ) แสดงถึงเฉดสีที่เข้มและคล้ำกว่าตัวอย่างอื่น อีกทั้งตัวอย่างที่มอร์แดนท์ด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตยังมีค่า a* ติดลบเล็กน้อย (-0.31) ร่วมกับค่า b* ที่ลดลง (14.38) บ่งชี้ถึงโทนสีที่เอนไปทางเขียวอมเทา ในขณะที่เฟอร์รัสซัลเฟตให้ค่า b* ต่ำที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด (11.42) ซึ่งสะท้อนถึงความหมองคล้ำของเฉดสีในลักษณะเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับปรากฏการณ์การทำให้สีหมองคล้ำ (saddening effect) อันเป็นคุณลักษณะเฉพาะของสารมอร์แดนท์กลุ่มโลหะทรานซิชัน ซึ่งมีรายงานว่าคอปเปอร์ซัลเฟตมักให้เฉดสีที่คล้ำและเอนไปทางโทนเขียวเมื่อใช้ร่วมกับสีย้อมธรรมชาติที่มี แทนนินหรือสารประกอบฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบ [15]

สำหรับโพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต แม้ให้ค่า K/S เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์ แต่ยังคงต่ำกว่าสารมอร์แดนท์กลุ่มโลหะทรานซิชัน เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะกลุ่มหลัก (main group metal) ที่ไม่มีวงโคจร d สำหรับสร้างพันธะโคออร์ดิเนตกับหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมได้มากเท่ากับโลหะทรานซิชัน จึงให้ผลการเพิ่มความเข้มสีในระดับปานกลาง โดยยังคงรักษาค่า a* และ b* ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์ [1] ในทางกลับกัน สแตนนัสคลอไรด์ให้ค่า K/S เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (1.91 เทียบกับ 1.65 ของตัวอย่างที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์) และมีค่า L* a* b* ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการมอร์แดนท์มากที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของดีบุกที่จัดเป็นสารมอร์แดนท์กลุ่มที่ให้เฉดสีสว่างและไม่เปลี่ยนแปลงโทนสีเดิมของสีย้อมมากนัก เนื่องจากไอออนดีบุก (Sn^{2+}) มีความสามารถในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟีนอลิกในสีย้อมธรรมชาติได้อ่อนกว่าโลหะทรานซิชันกลุ่มทองแดงและเหล็กอย่างชัดเจน [14]

จากผลการทดลองโดยรวมแสดงให้เห็นว่าคอปเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารมอร์แดนท์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มความเข้มสีและสร้างเฉดสีเข้มโทนเขียวอมเทาหรือน้ำตาลเข้มบนผ้าเส้นใยกัญชงที่ย้อมด้วยกากกาแฟภายใต้กระบวนการมอร์แดนท์ระหว่างการย้อมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค ในขณะที่โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟตเหมาะสำหรับการให้เฉดสีน้ำตาลระดับปานกลางที่ใกล้เคียงกับสีธรรมชาติของสีย้อม และสแตนนัสคลอไรด์เหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการคงเฉดสีเดิมของสีย้อมจากกากกาแฟไว้โดยไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงโทนสีอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษานี้จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการเลือกใช้สารมอร์แดนท์ให้เหมาะสมกับโทนสีเป้าหมายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอย้อมสีธรรมชาติจากกากกาแฟต่อไป

3.2 ผลการทดสอบความคงทนของสีบนผ้าเส้นใยกัญชงย้อมด้วยกากกาแฟด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างตามมาตรฐาน ISO 105-C06:2010 (ตารางที่ 2) พบว่าทั้งการเปลี่ยนแปลงของสีและการติดเปื้อนสีบนผ้าทดสอบมาตรฐานทุกชนิดมีค่าอยู่ในระดับ 4-5 อย่างสม่ำเสมอในทุกภาวะการมอร์แดนท์ ทั้งกลุ่มที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์และกลุ่มที่ใช้สารมอร์แดนท์ทั้งสี่ชนิด ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากกระบวนการย้อมพร้อม มอร์แดนท์ภายใต้การกระตุ้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์คาวิเทชัน (acoustic cavitation) ในการเร่งอัตราการแพร่ของไอออนโลหะและโมเลกุลสีเข้าสู่โครงสร้างภายในของเส้นใยเซลลูโลสได้ลึกและสม่ำเสมอกว่าการย้อมแบบธรรมดา จึงทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีย้อม-โลหะ-เส้นใยที่ฝังตัวแน่นภายในเส้นใยมากกว่าการเกาะติดบนผิวเส้นใยเพียงอย่างเดียว และเป็นสาเหตุให้สีไม่หลุดลอกออกมาได้ง่ายในระหว่างการซักล้าง [11-12] นอกจากนี้ แม้ในกลุ่มที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์ก็ยังคงมีความคงทนต่อการซักล้างอยู่ในระดับดีเช่นกัน เนื่องจากสารประกอบเมลานอยดินและแทนนินในกากกาแฟมีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีขั้วสูง จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนเซลลูโลสของเส้นใยกัญชงได้ในระดับหนึ่งแม้ปราศจากไอออนโลหะช่วยเชื่อมประสาน [8-9]

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Colour fastness to washing)

มาตรฐาน ISO 105-C06: 2010

ความคงทนของสี	ไม่ใช้สารมอร์แดนท์	โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต	คอปเปอร์ซัลเฟต	เฟอรรัสซัลเฟต	สแตนนัสคลอไรด์
การเปลี่ยนแปลงของสี	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
การติดเปื้อนของสี					
- แอซิเทต	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- ฝ้าย	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- พอลิเอไมด์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- พอลิเอสเทอร์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- อะคริลิก	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- ขนสัตว์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5

หมายเหตุ: ระดับที่ 5 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

ผลการทดสอบความคงทนต่อการขัดถูตามมาตรฐาน ISO 105-X12:2001 (ตารางที่ 3) แสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างสภาวะแห้งและสภาวะเปียก กล่าวคือ การขัดถูในสภาวะแห้งของทั้งด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่าอยู่ในระดับ 4-5 ในทุกกลุ่มตัวอย่าง แต่เมื่อทดสอบในสภาวะเปียกกลับพบว่าค่าลดลงเหลือระดับ 3-4 ถึง 4 โดยเฉพาะกลุ่มที่ผ่านการมอร์แดนท์ด้วยโพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต คอปเปอร์ซัลเฟต และเฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งมีค่าด้ายยืนเปียกอยู่ที่ระดับ 3-4 ต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์ซึ่งอยู่ที่ระดับ 4 ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากกลไกที่แตกต่างกันระหว่างการขัดถูแบบแห้งและแบบเปียก เนื่องจากการขัดถูแบบแห้งเป็นเพียงแรงเสียดทานทางกลบนพื้นผิวเส้นใยที่แห้งสนิท จึงมีผลกระทบต่อสีย้อมที่ยึดติดแน่นภายในโครงสร้างเส้นใยน้อยมาก ในขณะที่การขัดถูแบบเปียกมีน้ำเป็นตัวกลางที่ทำให้เส้นใยเซลลูโลสพองตัวและพันธะไฮโดรเจนรวมถึงพันธะโคออร์ดิเนชันระหว่างสีย้อม-โลหะ-เส้นใยบริเวณผิวนอกเกิดการคลายตัวชั่วคราว จึงทำให้สีย้อมส่วนที่ยึดติดอยู่บริเวณผิวเส้นใยสามารถถ่ายเทไปติดบนผ้าทดสอบมาตรฐานได้ง่ายกว่า [13] ทั้งนี้ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานความคงทนของสีย้อมธรรมชาติบนผ้าใยกัญชงที่ผ่านการมอร์แดนท์ ซึ่งพบแนวโน้มความคงทนต่อการขัดถูแบบเปียกต่ำกว่าแบบแห้งเช่นเดียวกัน [17]

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความความคงทนของสีต่อการขัดถู (Colour fastness to rubbing)

มาตรฐาน ISO 105-X12: 2001

สารมอร์แดนท์	การติดเปื้อนของสี			
	ด้ายยืน		ด้ายพุ่ง	
	แห้ง	เปียก	แห้ง	เปียก

ไม่ใช้สารมอร์แดนท์	4-5	4	4-5	4
โพแทสเซียสอะลูมิเนียมซัลเฟต	4-5	3-4	4-5	3-4
คอปเปอร์ซัลเฟต	4-5	3-4	4-5	4
เฟอร์รัสซัลเฟต	4-5	3-4	4-5	4
สแตนนัสคลอไรด์	4-5	3-4	4-5	4

หมายเหตุ: ระดับที่ 5 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

ผลการทดสอบความคงทนต่อแสงแดดเทียมตามมาตรฐาน ISO 105-B02:1999 (ตารางที่ 4) พบว่ากลุ่มที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์ กลุ่มที่ใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต และกลุ่มที่ใช้คอปเปอร์ซัลเฟตมีค่าความคงทนอยู่ที่ระดับ 4 ในขณะที่กลุ่มที่ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตและสแตนนัสคลอไรด์มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเป็นระดับ 4-5 ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากความสามารถในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชันที่แตกต่างกันของไอออนโลหะแต่ละชนิดกับหมู่ฟีนอลิกไฮดรอกซิลในโครงสร้างของสารเมลานอยดินและกรดคลอโรจีนิกจากกากกาแฟ กล่าวคือไอออนเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และสแตนนัส (Sn^{2+}) สามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกว่าอะลูมิเนียมและทองแดงในระบบนี้ และช่วยพยุงโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกของโครโมฟอร์ไม่ให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (photo-oxidation) ได้ดีกว่าเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตจากแหล่งกำเนิดแสงเทียมเป็นเวลานาน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานว่าการมอร์แดนท์ช่วยเพิ่มความคงทนต่อแสงของผ้าที่ย้อมด้วยสารสกัดจากกากกาแฟได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการมอร์แดนท์ [9] อย่างไรก็ตาม ความคงทนโดยรวมที่อยู่ในระดับปานกลาง (4) ของทุกกลุ่มตัวอย่างยังคงเป็นข้อจำกัดร่วมของสีย้อมธรรมชาติกลุ่มเมลานอยดินและแทนนิน เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่มีระบบพันธะคู่สลับ (conjugated system) ยังคงไวต่อการสลายตัวด้วยแสงมากกว่าสีย้อมสังเคราะห์ [13]

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียม (Colour fastness to artificial light) มาตรฐาน ISO 105-B02:1999

ความคงทนของสี	**สารมอร์แดนท์**				
	ไม่ใช้สารมอร์แดนท์	**โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต**	**คอปเปอร์ซัลเฟต**	**เฟอรรัสซัลเฟต**	**สแตนนัสคลอไรด์**
การเปลี่ยนแปลงของสี	4	4	4	4-5	4-5

หมายเหตุ: ระดับที่ 8 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

ผลการทดสอบความคงทนต่อเหงื่อในสภาวะกรดตามมาตรฐาน ISO 105-E04:2013 (ตารางที่ 5) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีของทุกกลุ่มตัวอย่างอยู่ในระดับ 4 อย่างสม่ำเสมอ แต่การติดเปื้อนสีบนผ้าทดสอบมาตรฐานของกลุ่มที่ใช้คอปเปอร์ซัลเฟตและสแตนนัสคลอไรด์มีค่าลดลงเล็กน้อยเป็นระดับ 3-4 ในขณะที่กลุ่มอื่นยังคงอยู่ที่ระดับ 4 ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายเหงื่อเทียมในสภาวะกรดมีองค์ประกอบของเกลืออิเล็กโทรไลต์และกรดแลกติกที่สามารถแข่งขันกับหมู่ฟีนอลิกของสีย้อมในการจับกับไอออนโลหะได้บางส่วน โดยเฉพาะสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงและดีบุกซึ่งมีความไวต่อการแตกตัวในสภาวะกรดมากกว่าสารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิเนียมและเหล็ก จึงทำให้มีโมเลกุลสีย้อมส่วนน้อยหลุดออกจากพื้นผิวเส้นใยและถ่ายเทไปติดบนผ้าทดสอบมาตรฐานได้มากกว่ากลุ่มอื่นเล็กน้อย [16] อย่างไรก็ตาม ค่าความคงทนโดยรวมของทุกกลุ่ม

ยังคงอยู่ในเกณฑ์ดี ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการย้อมพร้อมมอร์แดนท์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิคสามารถให้ความคงทนต่อเหงื่อที่น่าพอใจสำหรับการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องนุ่งห่มได้ [11]

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความความคงทนของสีต่อเหงื่อสภาวะกรด (Colour fastness to perspiration) มาตรฐาน ISO 105-E04: 2013

ความคงทนของสี	สารมอร์แดนท์				
	ไม่ใช้สารมอร์แดนท์	โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต	คอปเปอร์ซัลเฟต	เฟอรัสซัลเฟต	สแตนนัสคลอไรด์
การเปลี่ยนแปลงของสี	4	4	4	4	4
การติดเปื้อนของสี					
- แอซิเทต	4	4	3-4	4	3-4
- ฝ้าย	4	4	3-4	4	3-4
- พอลิเอไมด์	4	4	3-4	4	3-4
- พอลิเอสเทอร์	4	4	3-4	4	3-4
- อะคริลิก	4	4	3-4	4	3-4
- ขนสัตว์	4	4	3-4	4	3-4

หมายเหตุ: ระดับที่ 5 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความความคงทนของสีต่อเหงื่อในสภาวะด่าง (Colour fastness to perspiration) มาตรฐาน ISO 105-E04: 2013

ความคงทนของสี	สารมอร์แดนท์				
	ไม่ใช้สารมอร์แดนท์	โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต	คอปเปอร์ซัลเฟต	เฟอรัสซัลเฟต	สแตนนัสคลอไรด์
การเปลี่ยนแปลงของสี	4	4	4	4	4
การติดเปื้อนของสี					
- อะซิเทต	4-5	4	3-4	4	4
- ฝ้าย	4-5	4	3-4	4	4
- พอลิเอไมด์	4-5	4	3-4	4	4
- พอลิเอสเทอร์	4-5	4	3-4	4	4
- อะคริลิก	4-5	4	3-4	4	4
- ขนสัตว์	4-5	4	3-4	4	4

หมายเหตุ: ระดับที่ 5 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

ผลการทดสอบความคงทนต่อเหงื่อในสภาวะด่าง (ตารางที่ 6) พบแนวโน้มใกล้เคียงกับสภาวะกรด กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของสีอยู่ในระดับ 4 ในทุกกลุ่ม ในขณะที่การติดเปื้อนสีของกลุ่มที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์มีค่าสูงที่สุดที่ระดับ 4-5 ส่วนกลุ่มที่ใช้คอปเปอร์ซัลเฟตมีค่าต่ำที่สุดที่ระดับ 3-4 ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ว่าในสภาวะด่างซึ่งมีค่าพีเอชสูงกว่าสภาวะกรด หมู่ไฮดรอกซิลฟีนอลิกของสารสีในกากกาแฟจะแตกตัวเป็นไอออนฟีนอเลตได้มากขึ้นและเกิดแรงผลักทางประจุกับพื้นผิวเซลลูโลสที่มีประจุลบเช่นกัน แต่ในกลุ่มที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์ สีย้อมยึดเกาะกับเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลักซึ่งมีความไวต่อพีเอชน้อยกว่าพันธะโคออร์ดิเนชันที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะไอออนในสารละลาย จึงทำให้กลุ่มที่ไม่ใช้สารมอร์แดนท์มีค่าความคงทนต่อการติดเปื้อนสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารมอร์แดนท์ทองแดงเล็กน้อยในสภาวะทดสอบนี้ [13]

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อน้ำ (Colour fastness to water)

มาตรฐาน ISO 105-E01: 2013

ความคงทนของสี	สารมอร์แดนท์				
	ไม่ใช้สารมอร์แดนท์	โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต	คอปเปอร์ซัลเฟต	เฟอรัสซัลเฟต	สแตนนัสคลอไรด์
การเปลี่ยนแปลงของสี	4	4	4	4	4
การติดเปื้อนของสี					
- อะซิเทต	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- ฝ้าย	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- พอลิเอไมด์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- พอลิเอเทอร์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- อะคริลิก	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
- ขนสัตว์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5

หมายเหตุ: ระดับที่ 5 ดีที่สุด ระดับ 1 แย่ที่สุด

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อน้ำตามมาตรฐาน ISO 105-E01:2013 (ตารางที่ 7) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีของทุกกลุ่มตัวอย่างอยู่ในระดับ 4 ในขณะที่การติดเปื้อนสีบนผ้าทดสอบมาตรฐานทุกชนิดมีค่าสูงถึงระดับ 4-5 อย่างสม่ำเสมอในทุกกลุ่ม ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ดีที่สุดในบรรดาการทดสอบความคงทนทั้งหมด เนื่องจากการทดสอบความคงทนต่อน้ำเป็นเพียงการแช่ผ้าตัวอย่างในน้ำกลั่นโดยไม่มีแรงกลหรือสารลดแรงตึงผิวเข้ามาเกี่ยวข้องดังเช่นการทดสอบการซักล้าง จึงไม่มีแรงภายนอกมารบกวนสารประกอบเชิงซ้อนสีย้อม-โลหะ-เส้นใยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย้อมพร้อมมอร์แดนท์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ทำให้สีย้อมยังคงเสถียรและไม่ละลายออกมาปนเปื้อนน้ำได้ง่าย ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับกลไกการเพิ่มความคงทนของสีย้อมธรรมชาติด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค ซึ่งช่วยให้เกิดการยึดเกาะของสีย้อมภายในโครงสร้างเส้นใยอย่างแน่นหนามากกว่าการย้อมแบบทั่วไป [11-12]

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการมอร์แดนท์พร้อมกับการย้อมสีผ้าใยกัญชงด้วยกากกาแฟภายใต้เทคนิคอัลตราโซนิคสามารถเพิ่มค่าความเข้มสี (K/S) ได้สูงกว่าการย้อมโดยไม่ใช้สารมอร์แดนท์อย่างชัดเจนในทุกชนิดของสารมอร์แดนท์ที่ศึกษา โดยคอปเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสซัล- เฟตเป็นสารมอร์แดนท์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มความเข้มสีและให้เฉดสีเข้มโทนเขียวอมเทาหรือน้ำตาลเข้ม เนื่องจากเป็นโลหะทรานซิชันที่สามารถสร้างพันธะโคออร์ดิเนตกับหมู่ฟีนอลิกของสารสีในกากกาแฟได้อย่างมีเสถียรภาพสูง ในขณะที่โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟตให้เฉดสีน้ำตาลระดับปานกลางที่ใกล้เคียงกับสีธรรมชาติของสีย้อม และสแตนนัสคลอไรด์เหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการคงเฉดสีเดิมของสีย้อมไว้โดยไม่เปลี่ยนแปลงโทนสีมากนัก ด้านสมบัติความคงทนของสี ผ้าเส้นใยกัญชงที่ผ่านกระบวนการมอร์แดนท์-ย้อมพร้อมกันด้วยคลื่นอัลตราโซนิคมีความคงทนต่อการซักล้างและต่อน้ำอยู่ในระดับดีถึงดีมาก (4-5) ในทุกกลุ่มตัวอย่าง อันเป็นผลจากการที่คลื่นอัลตราโซนิคช่วยเร่งการแพร่ของไอออนโลหะและโมเลกุลสีย้อมเข้าสู่โครงสร้างเส้นใยได้ลึกและสม่ำเสมอกว่าการย้อมแบบทั่วไป แต่ความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกกลับลดลงต่ำกว่าสภาวะแห้งอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกลุ่มที่ผ่านการมอร์แดนท์ด้วยโพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต คอปเปอร์ซัลเฟต และเฟอร์รัสซัลเฟต เนื่องจากน้ำทำให้เส้นใยพองตัวและพันธะยึดเกาะบริเวณผิวเส้นใยคลายตัวชั่วคราว ส่วนความคงทนต่อแสงแดดเทียมอยู่ในระดับปานกลางถึงดีในทุกกลุ่มตัวอย่าง โดยเฟอร์รัสซัลเฟตและสแตนนัสคลอไรด์ให้ความคงทนต่อแสงสูงกว่าสารมอร์แดนท์ชนิดอื่นเล็กน้อย และความคงทนต่อเหงื่อทั้งในสภาวะกรดและด่างอยู่ในเกณฑ์ดีในทุกกลุ่มตัวอย่างเช่นกัน แม้กลุ่มที่ใช้คอปเปอร์ซัลเฟตจะมีค่าการติดเปื้อนสีลดลงเล็กน้อยก็ตาม ผลการศึกษาโดยรวมจึงยืนยันว่ากระบวนการมอร์แดนท์-ย้อมพร้อมกันด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มมูลค่าของกากกาแฟเหลือทิ้งให้เป็นสีย้อมธรรมชาติสำหรับผ้าใยกัญชง โดยสามารถเลือกใช้ชนิดของสารมอร์แดนท์ให้เหมาะสมกับโทนสีเป้าหมายและระดับความคงทนที่ต้องการ ทั้งนี้ควรมีการศึกษาต่อยอดเพื่อปรับปรุงความคงทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกและความคงทนต่อแสงให้ดียิ่งขึ้น เพื่อขยายศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์และสนับสนุนแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนของอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างยั่งยืนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2022). Potential uses of spent coffee grounds in the food industry. Foods, 11(14), 2064.

[2] Andrade, C., Perestrelo, R., & Câmara, J. S. (2022). Bioactive compounds and antioxidant activity from spent coffee grounds as a powerful approach for its valorization. Molecules, 27(21), 7504.

[3] Hong, K. H. (2018). Effects of tannin mordanting on coloring and functionalities of wool fabrics dyed with spent coffee grounds. Fashion and Textiles, 5(1), 33.

[4] Mijas, G., Josa, M., Cayuela, D., & Riba-Moliner, M. (2022). Study of dyeing process of hemp/cotton fabrics by using natural dyes obtained from Rubia tinctorum L. and Calendula officialis. Polymers, 14(21), 4508.

[5] Vajnhandl, S., & Le Marechal, A. M. (2005). Ultrasound in textile dyeing and the decolouration/ mineralization of textile dyes. Dyes and Pigments, 65(2), 89-101.

[6] Tissera, Nadeeka D., Ruchira N. Wijesena, and KM Nalin de Silva. "Ultrasound energy to accelerate dye uptake and dye–fiber interaction of reactive dye on knitted cotton fabric at low temperatures." Ultrasonics sonochemistry 29 (2016): 270-278.

[7] İşmal, Ö. E., Yıldırım, L., & Özdoğan, E. (2014). Use of almond shell extracts plus biomordants as effective textile dye. Journal of Cleaner Production, 70, 61-67.

[8] Mongkholrattanasit, R., Nakpathom, M., & Vuthiganond, N. (2021). Eco-dyeing with biocolorant from spent coffee ground on low molecular weight chitosan crosslinked cotton. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 20, 100389.

[9] Koh, E., & Hong, K. H. (2019). Preparation and properties of wool fabrics dyed with spent coffee ground extract. Textile Research Journal, 89(1), 13-19.

[10] Manaia, J. P., Manaia, A. T., & Rodriges, L. (2019). Industrial hemp fibers: An overview. Fibers, 7(12), 106.

[11] Shibly, M. A. H., Tahsin, A. A., & Chisty, M. A. H. (2023). Ultrasonication-aided dye extraction from waste onion peel and eco-friendly dyeing on organic cotton fabric with enhanced efficacy in color fixation. Chemical Papers, 77(8), 4345-4353.

[12] Tissera, N. D., Wijesena, R. N., & de Silva, K. N. (2016). Ultrasound energy to accelerate dye uptake and dye–fiber interaction of reactive dye on knitted cotton fabric at low temperatures. Ultrasonics sonochemistry, 29, 270-278.

[13] Jabar, J. M., Adedayo, T. E., & Odusote, Y. A. (2021). Green, eco-friendly and sustainable alternative in dyeing cotton fabric using aqueous extract Mucuna slonaei F dye: effects of metal salts pre-mordanting on color strength and fastness properties. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 4, 100151.

[14] Repon, M. R., Islam, M. T., & Mamun, M. A. A. (2017). Ecological risk assessment and health safety speculation during color fastness properties enhancement of natural dyed cotton through metallic mordants. Fashion and Textiles, 4(1), 24.

[15] Mokhtar, L. M. M., & Ali Mousa, E. I. (2017). Dyeing cotton fabric by using henna and copper sulphate. Int J Polym Text Engneering, 4(1), 1-7.

[16] Xia, W., Li, Z., Tang, Y., & Li, Q. (2023). Sustainable recycling of café waste as natural bio resource and its value adding applications in green and effective dyeing/bio finishing of textile. Separation and Purification Technology, 309, 123091.

[17] Özomay, M., & Akalın, M. (2022). Optimization of fastness properties with gray relational analysis method in dyeing of hemp fabric with natural and classic mordant. J Nat Fibers 19: 2914–2928.