

รายงานฉบับสมบูรณ์
ทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

โครงการวิจัย รหัส ว-ท(ด) 163.58

การสังเคราะห์สีย้อมแอคทีฟ-ดิสเพิร์สสำหรับการย้อมผ้าถักผสม PLA/ฝ้าย ขั้นตอนเดียว
Synthetic of Reactive-Disperse Dyes for One-Step Dyeing Process
of PLA/Cotton blends Knitted Fabric

พรทิพย์ แซ่เป้¹, จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์¹, ณัฐยา พรณรัตน์ศิลป์²
Porntip Sae-bae¹, Jantip Setthayanond¹, Nattaya Punrattanasin²

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความพร้อมด้านการเกษตร ชีวมวลและต้องการก้าวเป็นผู้นำด้านอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในภูมิภาคอาเซียน พอลิแลคติกแอซิด หรือ PLA เป็นหนึ่งในประเภทของพลาสติกชีวภาพที่อยู่ในแผนการพัฒนาพลาสติกชีวภาพของประเทศ ข้อจำกัดของการนำเอาเส้นใย PLA มาใช้งานทางสิ่งทอทดแทนการใช้เส้นใย PET คือ สมบัติด้านความร้อนที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ PET ดังนั้นสารเคมีและความร้อนในกระบวนการทางเคมีสิ่งทอ โดยเฉพาะการย้อมทำให้เส้นใย PLA มีความอ่อนแอมากขึ้น การถักผ้าผสม PLA/ฝ้าย ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้เนื่องจากเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นที่มีราคาถูก ทนความร้อนสูง และแข็งแรง นอกจากนี้ผ้าถักผสมดังกล่าวยังสามารถดูแลรักษาได้ง่ายและคงความเป็นวัสดุชีวภาพ

ในการนำผ้าถักผสม PLA/ฝ้าย มาใช้งานเป็นเสื้อผ้านั้นจำเป็นต้องเพิ่มความน่าสนใจให้กับเสื้อผ้านี้ด้วยการแต่งเติมสีสันทันต่างๆ ลงบนผืนผ้าเพื่อเพิ่มมูลค่าและเพิ่มการนำไปใช้งานที่หลากหลาย กระบวนการย้อมเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้มากที่สุดในการให้สีกับผลิตภัณฑ์สิ่งทอ แต่เนื่องจากเส้นใย PLA และเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยที่มีพฤติกรรมการติดสีย้อมแตกต่างกัน กระบวนการย้อมผ้าผสมจึงทำการย้อม 2 ขั้นตอน โดยจะทำการย้อมผ้า PLA ก่อนหลังจากนั้นจึงทำการย้อมฝ้าย เนื่องจากเส้นใย PLA และเส้นใยฝ้ายบนผ้าผสมมีการใช้ทั้งชนิดของสีย้อม สารช่วยย้อม รวมถึงภาวะของการย้อมที่แตกต่างกัน จึงสิ้นเปลืองพลังงาน สารเคมี เวลาในการย้อม และปริมาณน้ำทิ้งที่ต้องบำบัด นอกจากนี้ยังส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของเส้นใย PLA

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางในการแก้ปัญหาด้านการย้อมของผ้าถักผสม PLA/ฝ้าย โดยทำสังเคราะห์สีย้อมแอคทีฟ-ดิสเพิร์ส ขึ้นจากปฏิกิริยา Diazotization ระหว่าง Aminophenyl-4-(β -sulphatoethyl-

¹ ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

sulphone) กับ coupling agent ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน เพื่อใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้าย ในการย้อมหนึ่งครั้ง ซึ่งสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์ส ที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นนอกจากจะช่วยลดปริมาณสารเคมีและพลังงานต่างๆ ที่ใช้ในการย้อม และยังช่วยป้องกันการสลายตัวของเส้นใย PLA บนผ้าผสมที่เกิดเนื่องจากระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการย้อมผ้าผสม รวมถึงสามารถลดต้นทุนในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งได้อีกทางหนึ่งด้วย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- สังเคราะห์สีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์ส 3 ชนิด ด้วยปฏิกิริยา Diazotization ระหว่าง Aminophenyl-4-(β -sulphatoethyl-sulphone) กับ coupling agent 3 โครงสร้าง
- วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์สที่สังเคราะห์ขึ้นแต่ละชนิด
- ศึกษาภาวะของการย้อมที่เหมาะสม (pH อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้น) ของสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์สแต่ละชนิดบนผ้าฝ้าย PLA จากพฤติกรรมกรดติดบนผ้าฝ้าย PLA
- ศึกษาภาวะของการย้อมที่เหมาะสม (ปริมาณเกลือและต่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้น) ของสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์สแต่ละชนิดบนผ้าฝ้ายจากพฤติกรรมกรดติดบนผ้าฝ้าย
- ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อมผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้าย ขึ้นตอนเดียวด้วยสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์สแต่ละชนิด
- ทดสอบสมบัติด้านความคงทนของสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าในด้านต่างๆ ได้แก่ ความคงทนของสีต่อการซัก และความคงทนของสีต่อการขัดถู

ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์สีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์ส เพื่อใช้ในการย้อมผ้าผสม PLA/cotton ในขั้นตอนเดียว โดยจะทำการสังเคราะห์สีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์ส 3 ชนิด ด้วยปฏิกิริยา Diazotization ระหว่าง Aminophenyl-4-(β -sulphatoethyl-sulphone) กับ coupling agent ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน 3 ตัว ทำการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์, %yield, melting point และโครงสร้างของสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์สที่สังเคราะห์ได้ หลังจากนั้นจะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมบนผ้าฝ้าย PLA และผ้าฝ้ายผสม ดังนี้ อุณหภูมิ pH ปริมาณสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์ส และปริมาณสารช่วยย้อม เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการย้อมผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้าย ขึ้นตอนเดียวด้วยสีย้อมแอซิกฟ-ดิสเพิร์ส ทำการทดสอบสมบัติด้านความคงทนของสีต่อการซักและการขัดถู

กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

พลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพ (bio-based biodegradable plastic) เป็นนวัตกรรมของวัสดุที่เกิดจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีร่วมกันระหว่างเทคโนโลยีทางชีวภาพและเทคโนโลยีทางวัสดุศาสตร์ ภายใต้แรงขับเคลื่อนจากกระแสอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม พลาสติกชีวภาพจัดเป็นวัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตลอดห่วงโซ่มูลค่า (value chain) ของอุตสาหกรรมการผลิต กล่าวคือมีวัฏจักรของการแตกสลายยังคงคล้ายคลึงกับวัฏจักรของการแตกสลายวัสดุธรรมชาติ คือสามารถสลายตัวให้น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการผลิตก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมีไม่ต่ำกว่า 20% จึงช่วยลดมลภาวะทางอากาศ [1] นอกจากนี้เหตุผลดังกล่าวแล้ว พลาสติกชีวภาพยังเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาขยะที่เป็นปัญหาใหญ่ในประเทศไทย

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณขยะเฉลี่ยวันละ 43,800 ตัน หรือประมาณ 16 ล้านตันต่อปี ซึ่งปริมาณขยะได้เพิ่มขึ้นทุกปีตามการขยายตัวของชุมชนและประชากรที่เพิ่มขึ้น โดยปีที่ผ่านมาเพิ่มขึ้น 0.84 ล้านตัน หรือร้อยละ 5.5 และจากเหตุการณ์น้ำท่วมที่เกิดขึ้นในปี 2554 ที่ผ่านมาได้สร้างขยะทั้งสิ้นกว่า 2 ล้านตัน โดยสามารถนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพียง 26% ของปริมาณขยะทั้งประเทศ [2] ทำให้ประเทศไทยต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการกำจัดขยะถึงปีละกว่าพันล้านบาท

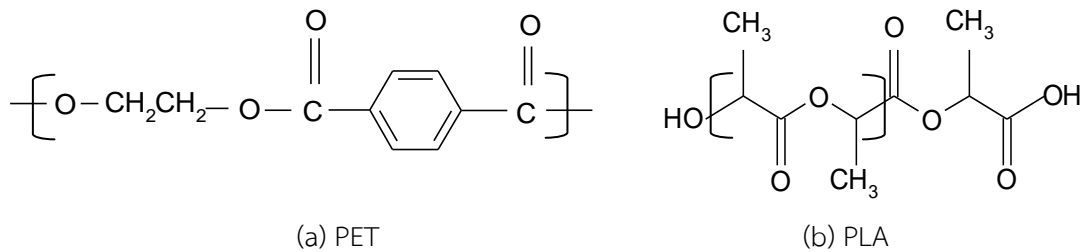
ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความพร้อมด้านการเกษตรและชีวมวล (biomass) สามารถผลิตหิวมันสดเป็นอันดับ 3 ของโลก และส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก เราสามารถเพิ่มมูลค่าหิวมันสดได้ถึง 10 เท่า ซึ่งจะนำไปสู่การกินดีอยู่ดีของเกษตรกร โดยการนำหิวมันสดมาผลิตเป็นพลาสติกที่แตกสลายได้ทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังช่วยลดการนำเข้าวัตถุดิบปิโตรเลียมสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกทั่วไป และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศไทยในด้านการค้าผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อันจะส่งผลให้ประเทศไทยสามารถก้าวขึ้นสู่ความเป็นผู้นำของอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในภูมิภาคอาเซียนต่อไป ดังนั้นในปี พ.ศ. 2547 สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจึงให้ความสำคัญอย่างยิ่งในการผลักดันให้โครงการนวัตกรรมพลาสติกชีวภาพเกิดการพัฒนาเป็นโครงการระดับชาติซึ่งมีเป้าหมายในการนำเทคโนโลยีชีวภาพระดับสูงและเทคโนโลยีด้านวัสดุศาสตร์ มาใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังหรือน้ำตาล และในปี 2549 คณะอนุกรรมการปรับโครงสร้างเศรษฐกิจของประเทศไทยเห็นชอบที่จะให้การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพบรรจุอยู่ในแผนปฏิบัติการปรับโครงสร้างเศรษฐกิจอุตสาหกรรมเพื่ออนาคต (New Wave Industries) เพื่อทำการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและเพื่อสร้างศักยภาพให้เกิดความสามารถในการแข่งขัน อันจะนำไปสู่การผลักดันให้ประเทศไทยเป็นผู้นำด้านอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในภูมิภาคนี้ในอีก 15 ปีข้างหน้า [1]

อุตสาหกรรมสิ่งทอได้ตระหนักถึงปัญหาและกระแสการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ทำให้เริ่มที่จะมีการคิดค้นเส้นใยใหม่ๆ ที่มีสารตั้งต้นจากธรรมชาติ จนกระทั่งปี 2005 บริษัท Nature Works LLC ประเทศสหรัฐอเมริกา เริ่มผลิตเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด หรือเส้นใย PLA เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ภายใต้ชื่อทางการค้า Ingeo™ fiber [3] ซึ่งถือว่า เส้นใย PLA เป็นเส้นใยสังเคราะห์ตัวแรกที่ใช่วัตถุดิบจากธรรมชาติและสามารถฉีดเป็นเส้นใยได้ด้วยกระบวนการหลอมเหลว (melt spinning) เส้นใย PLA เป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นด้วยวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้งานทดแทนเส้นใย PET (Polyester) ซึ่งเส้นใยสังเคราะห์ที่เป็นผลผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและมีการนำมาใช้งานทางสิ่งทอมากเป็นอันดับที่ 1 ของเส้นใยสังเคราะห์และเป็นอันดับที่ 2 ของเส้นใยทางสิ่งทอลงจากเส้นใยฝ้าย [4]

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

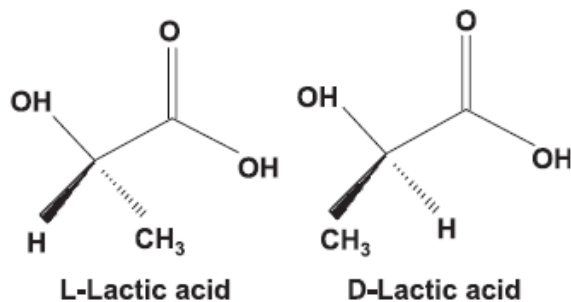
1. เส้นใยพอลิแลคติกแอซิด หรือเส้นใย PLA

พอลิแลคติกแอซิด หรือเส้นใย PLA เป็นเส้นใยสังเคราะห์ตัวแรกที่ใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติและสามารถฉีดเป็นเส้นใยได้ด้วยกระบวนการหลอมเหลว (melt spinning) [5] PLA เป็นพอลิเอสเตอร์โซ่ตรง (aliphatic polyester) ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการหมักแป้งข้าวโพดหรือแป้งมันสำปะหลัง วัตถุดิบที่นิยมในการผลิต PLA คือ ข้าวโพดและมันสำปะหลังนั้นเป็นทรัพยากรที่สามารถปลูกใหม่ทดแทนและ PLA เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการแตกสลาย (biodegradable polymer) และสามารถเข้ากับวัสดุอื่นได้ดี (biocompatibility) ทำให้ปัจจุบันนิยมนำ PLA มาใช้งานทางการแพทย์และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ [6] เส้นใย PLA มีโครงสร้างทางเคมีและสมบัติที่ใกล้เคียงเส้นใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ดังรูปที่ 1 ทำให้เริ่มมีการคิดที่จะนำเส้นใย PLA มาใช้งานแทนเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (PET) ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่มีการใช้งานมากประมาณ 40% ของการใช้งานทางสิ่งทอ (มีการใช้งานรองจากเส้นใยฝ้าย) [7] เพื่อช่วยลดระดับการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศอันเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์และเพื่อเพิ่มสมบัติในการแตกสลายตามธรรมชาติภายหลังผ่านการใช้งานเป็นเสื้อผ้าแล้ว



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยพอลิเอสเตอร์

PLA สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติก (lactic acid) ซึ่งกรดแลคติกที่ใช้เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์ PLA นั้นนิยมสังเคราะห์จากกระบวนการหมักแป้งด้วยแบคทีเรีย *Lactobacillus* [8] กรดแลคติกมีโครงสร้าง 2 แบบคือ L-lactic acid และ D-lactic acid [6] ดังรูปที่ 2 ซึ่ง PLA ที่จะนำมาใช้ทางสิ่งทอได้ควรสังเคราะห์จากโครงสร้างที่เป็น L-lactic acid เนื่องจากจะได้พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง ทำให้ได้เส้นใย PLA ที่มีความแข็งแรง



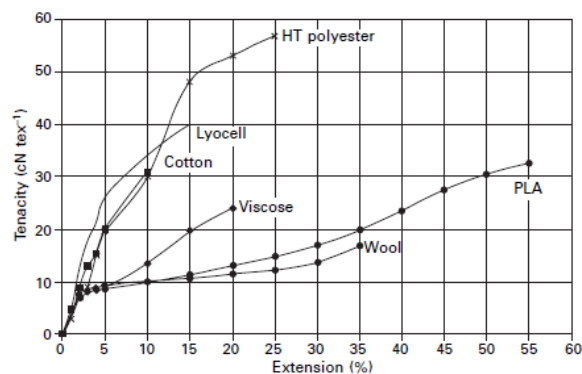
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของ L-lactic acid และ D-lactic acid [6]

PLA สามารถฉีดเป็นเส้นใยได้หลายวิธี คือ การปั่นเปียก (wet spinning) การปั่นแห้ง (dry spinning) การปั่นแบบหลอมเหลว (melt spinning) และการปั่นแบบผสมคือ dry-jet-wet spinning แต่กระบวนการฉีดเส้นใยที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือ การปั่นแบบหลอมเหลว เนื่องจาก มีอัตราเร็วในการผลิตเส้นใยสูง ไม่มีการใช้ตัวทำละลายและเป็นกระบวนการที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [6] สมบัติโดยทั่วไปของเส้นใย PLA เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใย PET แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติระหว่างเส้นใย PET กับ PLA [7]

สมบัติ	PLA	PET
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.25	1.39
ดัชนีหักเห	1.35 - 1.45	1.58 - 1.64
T_g ($^{\circ}\text{C}$)	55 - 65	70 - 75
T_m ($^{\circ}\text{C}$)	160 - 170	250 - 265
การดูดความชื้น (Moisture regain; %)	0.4 - 0.6	0.4 - 0.8
Tenacity (cN/tex)	32 - 36	55 - 75 MPa
ความสามารถในการติดไฟ (LOI)	26	22

โดยทั่วไปแล้วเส้นใย PLA จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใย PET แต่จะมีความสามารถในการยืดตัวที่สูงกว่าเส้นใย PET ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของเส้นใย PLA และ PET ที่อุณหภูมิ 20°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% [4]

เส้นใย PLA สามารถแตกสลายในอุณหภูมิ 60°C ขึ้นไป แต่จะไม่แตกสลายที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C แสดงว่าเส้นใย PLA สามารถแตกสลายได้ในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิดังกล่าวแต่จะไม่เกิดการแตกสลายในภาวะของการใช้งานโดยปกติ การแตกสลายเส้นใย PLA เริ่มจากเส้นใย PLA ถูกแตกสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และกรดแลคติกด้วยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นสารประกอบที่ละลายน้ำและกรดแลคติกจะถูกย่อยต่อไปด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ อย่างรวดเร็วเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ

Farrington et al. [7] ศึกษาการผลิตเส้นใย PLA จาก 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยา Direct Condensation และปฏิกิริยา Cyclic polymerization จากกระบวนการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ PLA ที่มีโครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกัน โดยปฏิกิริยา Direct Condensation จะให้ PLA ชนิด D-poly(lactic acid) ที่มีโครงสร้างเป็น Amorphous มีความแข็งแรงน้อย ในขณะที่ ปฏิกิริยา Cyclic polymerization จะให้ PLA ชนิด L-poly(lactic acid) ประมาณ 99.5 % ที่ความเป็นผลึกสูงจึงเป็น PLA ที่มีความแข็งแรงมากกว่า D-poly(lactic acid)

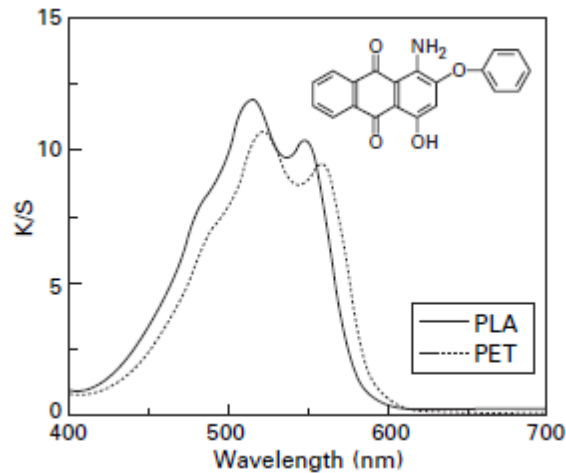
2. กระบวนการย้อม

กระบวนการย้อมจัดเป็นกระบวนการทางเคมีที่สำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากการเพิ่มมูลค่าและความน่าสนใจให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ก่อนที่จะนำผ้าเข้าสู่การย้อมจำเป็นต้องเตรียมผ้าให้เหมาะสมเพื่อลดปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพการติดสีย้อมบนผ้า ดังนั้นผ้าถัก PLA/cotton ที่ผ่านการย้อมจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมผ้าและการย้อม ซึ่งในขั้นตอนต่างๆ จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่อาจมีฤทธิ์เป็นด่างและความร้อนร่วมด้วย ชนิดของสารเคมี เวลาที่ใช้และอุณหภูมิในกระบวนการล้วนส่งผลอย่างมากต่อการสลายตัวของโมเลกุล PLA ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใย PLA บนผ้าถักลดลง

Phatthalung et al. (2012) [9] ได้ศึกษากระบวนการเตรียมผ้าก่อนการย้อมของผ้าถัก PLA/ฝ้าย พบว่าในการเลือกสารเคมีในการทำความสะอาดผ้า (NaOH, Na_2CO_3 and pectinase enzyme) เพื่อให้ผ้าถัก PLA/ฝ้ายสามารถดูดซึมน้ำได้นั้นจะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของผ้าถัก PLA/ฝ้าย หากสารเคมีที่เลือกใช้มีความแรงของด่างมาก จะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของโมเลกุล PLA ทำให้ผ้าถัก PLA/ฝ้ายมีความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าหากทำขั้นตอนการทำความสะอาดและฟอกขาวผ้าถัก PLA/ฝ้ายไปพร้อมกันสามารถช่วยรักษาความแข็งแรงของผ้าถัก PLA/ฝ้ายได้ดีกว่าการแยกขั้นตอนการทำความสะอาดและฟอกขาวผ้าถักออกจากกัน (สองขั้นตอน)

การย้อมเส้นใย PLA

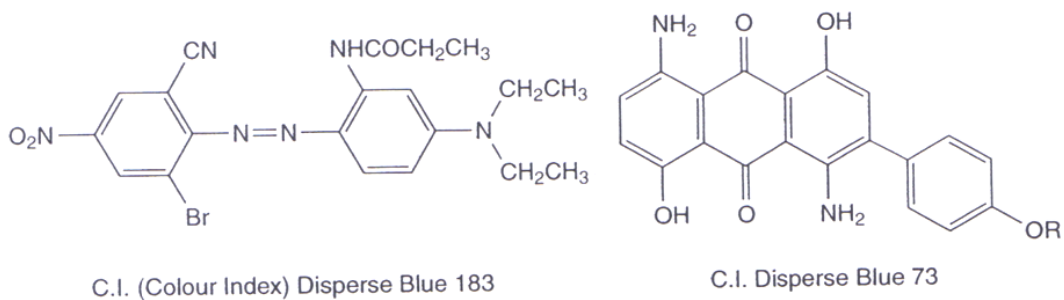
เส้นใย PLA สามารถทำการย้อมสีด้วยสีย้อมชนิดเดียวกับที่ใช้ย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์หรือเส้นใย PET คือ สีดิสเพิร์ส (disperse dye) แต่ต้องทำการดัดแปรภาวะในการย้อมเนื่องจากเส้นใย PLA มีพฤติกรรมการย้อมและการติดสีที่แตกต่างจากเส้นใย PET ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใย PLA ที่ย้อมสีดิสเพิร์สจะดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าเส้นใย PET ทำให้สีย้อมบนเส้นใย PLA ติดเฉดสีที่สว่างมากกว่าเส้นใย PET [10] ดังรูปที่ 4 นอกจากนี้เส้นใย PLA ยังทำการย้อมที่อุณหภูมิการย้อมที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการย้อมของเส้นใย PET เนื่องจากอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PLA ต่ำกว่า PET



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่า K/S ของการติดสีดีสเพิร์ส (Disperse Red 60) บนเส้นใย PLA และ PET

สีดีสเพิร์ส (disperse dye)

สีดีสเพิร์สเป็นสีที่ไม่มีประจุ จึงทำให้สีดีสเพิร์สละลายน้ำได้น้อยมาก และโดยทั่วไปสีดีสเพิร์สเป็นสีที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงมีสมบัติแตกต่างจากสีประเภทอื่น คือ สามารถเกิดการระเหิดได้ ส่วนที่ให้สี (chromophore) ของสีดีสเพิร์สนั้นส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบในกลุ่มของอะโซ (azo benzene derivative) หรือสารประกอบในกลุ่มของแอนทราควิโนน (anthraquinone) ดังรูปที่ 5



กลุ่มของอะโซ (azo benzene derivative)

กลุ่มของแอนทราควิโนน (anthraquinone)

รูปที่ 5 โครงสร้างสีดีสเพิร์ส [11]

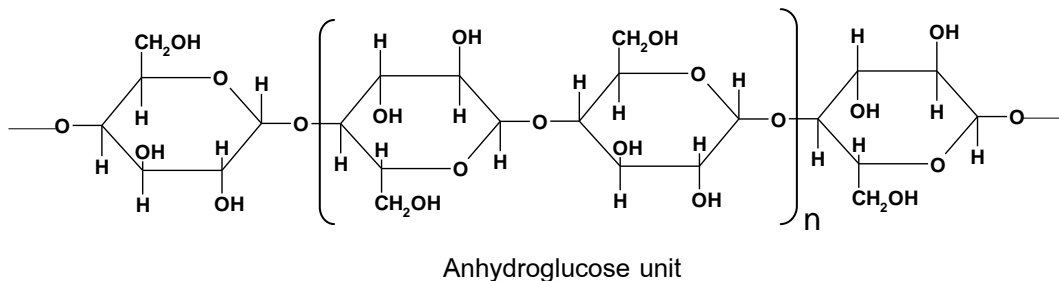
โดยทั่วไปการย้อมเส้นใย PLA ด้วยสีดีสเพิร์สจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ดังนั้นเพื่อให้สีดีสเพิร์สสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้จึงจำเป็นต้องเติมสารช่วยในการกระจายตัว (dispersing agent) ซึ่งเป็นหนึ่งในชนิดของสารลดแรงตึงผิว เพื่อทำให้โมเลกุลสีขนาดเล็กไม่เกิดการรวมตัวหรือจับตัวกันแน่นและทำให้สีดีสเพิร์สสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ กระบวนการย้อมเส้นใย PLA ด้วยสีดีสเพิร์สนิยมย้อมที่อุณหภูมิที่สูงกว่าค่า T_g ของเส้นใย PLA เพื่อให้โมเลกุลของเส้นใย PLA สามารถเคลื่อนไหวได้บางส่วน ทำให้โครงสร้างของเส้นใยเปิดออก โมเลกุลสีจึงแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ โดยอุณหภูมิที่นิยมใช้ย้อมเส้นใย PLA คือ อุณหภูมิประมาณ 100 - 110°C ภายหลังการย้อมเส้นใย PLA ด้วยสีดีสเพิร์สแล้วจำเป็นต้องทำกระบวนการ reduction clearing เพื่อสกัดเอาสีที่เกาะอยู่ตามผิวของเส้นใยออกทำให้ความคงทนต่อการซักดีขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลต่อเฉดสีทำให้เฉดสี

ภายหลังการทำ reduction clearing มีเม็ดสีที่สดใสนั้น สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ reduction clearing คือ sodium hydrosulphite ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) และต่าง

Yang และ Huda [12] ศึกษาการย้อมแบบจุ่ม (exhaustion) ของสีสีย้อมเพอร์ส 10 ชนิดบนผ้า PLA และผ้า PET พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการดูดซึมสีสีย้อมเพอร์สบนผ้า PLA ต่ำกว่าผ้า PET แต่ค่าความเข้มของสีบนผ้า PLA สูงกว่า PET เนื่องจาก PLA มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่า PET

การย้อมผ้าฝ้าย

ผ้าฝ้ายเป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose) ที่มีการใช้งานมากที่สุด โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลสจะประกอบของน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุลมาต่อเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glucosidic ที่เรียกว่า anhydroglucose unit ดังรูปที่ 6 จนได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ฝ้ายโดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ประมาณ 500,000 – 1,500,000 ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของฝ้าย



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

สีย้อมโดยทั่วไปจะสามารถยึดติดอยู่กับเส้นใยฝ้ายได้ด้วยปัจจัย 3 ประการ คือ

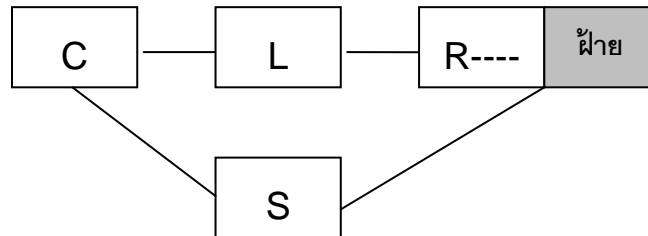
- การยึดติดบนเส้นใยเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (physical attraction) เช่นการยึดติดของสีไดเรกต์ (direct dye) บนเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง ทำให้โมเลกุลสีสามารถหลุดออกจากเส้นใยเมื่อมีแรงกระทำได้ง่าย ส่งผลทำให้ค่าความคงทนของสีต่อการซักจึงต่ำ
- การยึดติดบนเส้นใยเนื่องจากโมเลกุลสีถูกขังอยู่ภายในเส้นใย (mechanical retention) เช่นการยึดติดของสีแวต (vat dye) หรือสีซัลเฟอร์ (sulphur dye) ซึ่งสีประเภทนี้เมื่อเข้าไปอยู่ในเส้นใยแล้วจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและถูกขังอยู่ภายในเส้นใย ส่งผลทำให้ค่าความคงทนของสีต่อการซักสูงแต่ค่าความคงทนของสีต่อการขัดถูต่ำ
- การยึดติดบนเส้นใยเนื่องจากการสีทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใย เช่น การเกิดพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ของสีรีแอคทีฟ (reactive dye) บนเส้นใย ซึ่งพันธะโควาเลนต์นี้เป็นพันธะที่แข็งแรงจึงมีค่าความคงทนของสีต่อการซักสูง

การย้อมเส้นใยฝ้ายด้วยสีรีแอคทีฟ

โครงสร้างโดยทั่วไปของสีรีแอคทีฟจะประกอบด้วย 4 องค์ประกอบใหญ่ คือ

- Chromophore คือส่วนที่ให้สี
- Solubilising group คือส่วนที่สามารถละลายน้ำได้

- Linking group คือส่วนเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลสีและ reactive group
- Reactive group คือส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยฝ้าย โดยมีตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยา (leaving group)

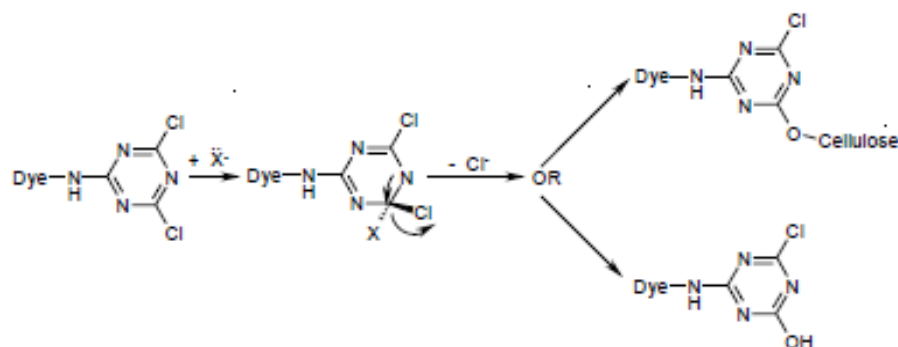


รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของสีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่แล้วจะนิยมย้อมในภาวะที่เป็นด่างโดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นสารช่วยย้อม โดยการย้อมลักษณะนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดของปฏิกิริยา คือ สีรีแอคทีฟที่เกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่ (nucleophilic substitution) และสีรีแอคทีฟที่เกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัว (nucleophilic addition)

- สีรีแอคทีฟที่เกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่

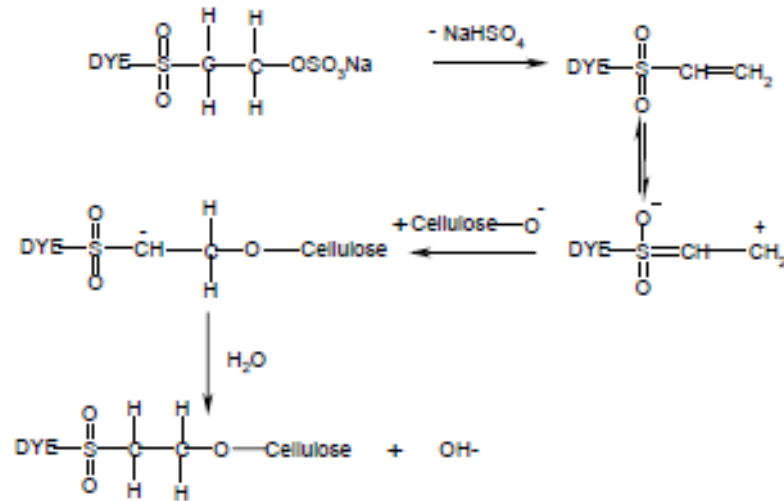
สีรีแอคทีฟประเภทนี้จะเกิดพันธะโควาเลนต์ยึดติดกับเส้นใยฝ้ายด้วยปฏิกิริยาการแทนที่อะตอมในโมเลกุลสี โมเลกุลของสีรีแอคทีฟประเภทนี้จะมีส่วน reactive group เป็นโมเลกุลประเภท halogenated heterocyclic group เป็นส่วนใหญ่ เช่น triazinyl group ดังรูปที่ 8 เนื่องจากอะตอมของธาตุหมู่ 7 มีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนเข้าหาตัวเองได้ดี ทำให้โมเลกุลสีมีสภาพเป็นบวก เมื่อทำการย้อมเส้นใยฝ้ายในภาวะเป็นด่าง โมเลกุลเซลล์ูโลสของเส้นใยฝ้ายจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป cellulose anion ที่มีประจุเป็นลบ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่อะตอมของธาตุหมู่ 7 ในโมเลกุลสีแล้วเกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้นระหว่างโมเลกุลสีและเส้นใยฝ้าย



รูปที่ 8 แสดงการเกิดปฏิกิริยาแทนที่ของโมเลกุลสีรีแอคทีฟกับเส้นใยฝ้าย

- สีรีแอคทีฟที่เกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัว

สีรีแอคทีฟประเภทนี้จะเกิดพันธะโควาเลนต์ยึดติดกับเส้นใยผ้าด้วยปฏิกิริยาการรวมตัว โดยส่วน reactive group ของโมเลกุลสีเมื่ออยู่ในภาวะที่เป็นต่างจะอยู่ในรูปของ vinylsulphone ดังรูปที่ 9 ทำให้อะตอมของคาร์บอนตัวนอกสุดมีประจุเป็นบวกจึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลเซลลูโลสแล้วเกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้นจากปฏิกิริยาการรวมตัวของโมเลกุลสีและโมเลกุลเซลลูโลสบนเส้นใยผ้า



รูปที่ 9 แสดงการเกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัวของโมเลกุลสีรีแอคทีฟกับเส้นใยผ้า

เพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพของสีรีแอคทีฟให้มีความสามารถยึดติดบนเส้นใยได้ดีขึ้นและลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดสีรีแอคทีฟชนิด bifunctional group ซึ่งเป็นสีรีแอคทีฟที่โมเลกุลสีมีส่วนของ reactive group 2 หมู่อยู่ในโมเลกุลสีซึ่งอาจมีหมู่ triazinyl group 2 หมู่ในโมเลกุลสี หรือหมู่ vinylsulphone หมู่ในโมเลกุลสี แต่ลักษณะโมเลกุลสีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ ส่วนของ reactive group 2 หมู่ประกอบด้วย หมู่ triazinyl group และ หมู่ vinylsulphone

การย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้าย

เนื่องจากกลไกในการติดสีย้อมที่แตกต่างกัน คือ เส้นใยฝ้ายใช้ความสามารถในการดูดซึมน้ำสีเข้าสู่เส้นใย ทำให้สามารถทำการย้อมเส้นใยฝ้ายที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ส่วนเส้นใย PLA ใช้ความสามารถในการเคลื่อนไหวโมเลกุลเพื่อให้เกิดช่องว่างให้โมเลกุลสีสามารถแทรกซึมและถูกขังอยู่ในเส้นใย ทำให้การย้อมเส้นใย PLA ทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C นอกจากนี้กระบวนการย้อมเส้นใย PLA และเส้นใยฝ้ายยังมีการใช้ชนิดของสีย้อม สารช่วยย้อมและภาวะที่ทำการย้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปการย้อมผ้าถักผสม PLA /ฝ้าย จึงจำเป็นต้องทำการย้อม 2 ครั้ง โดยครั้งแรกทำการย้อมเส้นใย PLA ด้วยสีย้อมที่อุณหภูมิประมาณ 110°C และทำกระบวนการ reduction clearing ก่อนจึงค่อยทำการย้อมเส้นใยฝ้ายด้วยสีย้อมที่อุณหภูมิประมาณ $60 - 80^{\circ}\text{C}$ ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมที่ฟ

Suesat et al. (2012) [13] ได้ศึกษาผลการย้อมสีย้อมสีย้อมที่ฟ และสีย้อมที่ฟ 2 ขั้นตอนบนผ้าถัก PLA/ฝ้าย พบว่า ผ้าถัก PLA/ฝ้าย จะมีค่าการติดสีได้ดีที่สุดเมื่อทำการย้อมสีย้อมที่ฟที่อุณหภูมิ 110°C 30 นาที ก่อนทำการย้อมสีย้อมที่ฟที่อุณหภูมิ 60°C 90 นาที สำหรับสีย้อมที่ฟชนิดย้อมอ่อน และอุณหภูมิ 80°C 90 นาที สำหรับสีย้อมที่ฟชนิดย้อมร้อน โดยกระบวนการย้อมดังกล่าวทำให้เส้นใย PLA ในผ้าถัก PLA/ฝ้าย มีความแข็งแรงลดลงประมาณ 10% เมื่อเทียบกับความแข็งแรงของผ้าถัก PLA/ฝ้าย เริ่มต้น

ดังนั้นเพื่อเป็นการลดขั้นตอนการย้อมและประหยัดพลังงานและสารเคมีต่างๆ ซึ่งถือเป็นหนึ่งในหลักการของการทำเทคโนโลยีสะอาด (clean technology) ในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจึงมีหลายงานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์สีย้อมที่ฟ-ดิสเพิร์ส (reactive-disperse dye) เพื่อนำมาใช้ในการย้อมเส้นใยผสมที่มีกลไกการติดสีย้อมต่างกัน แต่ยังไม่มียานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์สีย้อมที่ฟ-ดิสเพิร์สสำหรับการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้าย ซึ่งนอกจากช่วยลดปริมาณน้ำทิ้งจากการย้อมแล้ว ยังช่วยรักษาความแข็งแรงของผ้าถัก PLA/ฝ้าย ให้เกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุด

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

Nakumara. 2003 [14] พบว่า เส้นใย PLA สามารถทำการย้อมสีด้วยสีย้อมชนิดเดียวกับที่ใช้ย้อมเส้นใย PET คือ สีย้อมที่ฟ (disperse dye) แต่ต้องทำการดัดแปรภาวะในการย้อมเนื่องจากเส้นใย PLA มีพฤติกรรมการย้อมและการติดสีที่แตกต่างจากเส้นใย PET กล่าวคือ สีย้อมที่ฟที่ติดบนเส้นใย PLA จะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าเมื่อย้อมบนเส้นใย PET และพฤติกรรมการติดสีสีย้อมที่ฟชนิดเดียวกันบนเส้นใย PLA ติดเฉดสีที่สว่างมากกว่าเส้นใย PET นอกจากนี้เส้นใย PLA ยังทำการย้อมที่อุณหภูมิการย้อม ($110-115^{\circ}\text{C}$) ต่ำกว่าอุณหภูมิการย้อมของเส้นใย PET ($125-130^{\circ}\text{C}$) เนื่องจากอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PLA ($T_m \sim 170^{\circ}\text{C}$) ต่ำกว่า PET ($T_m \sim 250^{\circ}\text{C}$)

Yang และ Huda. 2003 [15] ศึกษาการย้อมแบบจุ่ม (exhaustion) ของสีย้อมที่ฟ 10 สีบนผ้า PLA และผ้า PET พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการดูดซึมน้ำสีย้อมที่ฟบนผ้า PLA ต่ำกว่าผ้า PET แต่ค่าความเข้มของสีบนผ้า PLA สูงกว่า PET เนื่องจาก PLA มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่า PET

Karst et al. 2007 [16] ศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสีย้อมที่ฟ 17 ตัวที่ส่งผลต่อ % sorption บน PLA ต่อพลังงานการยึดติดของพันธะระหว่างสีย้อมที่ฟ และบน PLA ด้วย MS Modeling 3.0

พบว่า โครงสร้างสี disperse ที่สามารถยึดติดกับ PLA ได้ดีที่สุด คือ โครงสร้างสี disperse ที่มีหมู่แทนที่เป็น กระจุกได้แก่ $N(C_2H_4OCOCH_3)_2$, $-(CO_2)NC_3H_6OCH_3$, $-SO_2NHC_6H_5$, $-NO_2$, $-CN(NH)C_6H_4$, และ $-CH(CO_2)C_6H_4$ ตามลำดับ และโครงสร้างสี disperse ที่มีแรงยึดติดกับ PLA น้อยที่สุด คือ โครงสร้างสี disperse ที่มีหมู่แทนที่ $-Br$, $-Cl$.

Bae et al. 2006 [17] ทำการสังเคราะห์สีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สที่มีหมู่ acetoxylethylsulphone 2 ชนิด เพื่อใช้ย้อมบนผ้า 4 ชนิดคือ PET ไนลอน ไหม และ PET/nylon พบว่าสีย้อมดังกล่าวสามารถย้อมได้ดีบนผ้า PET ที่อุณหภูมิ $120^{\circ}C$ โดยมีค่า built-up ของสีเทียบเท่ากับสี disperse ทางการค้า ผ้าไนลอนสามารถย้อมได้ดีที่ pH 7 ที่อุณหภูมิ $100^{\circ}C$ ผ้าไหมสามารถย้อมได้ดีที่ pH 9 ที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$ ส่วนในการย้อมผ้าผสม PET/nylon ขั้นตอนเดียวทำการย้อมที่ pH 4 อุณหภูมิ $120^{\circ}C$ พบว่าสีย้อมนี้สามารถยึดติดบนเส้นใยไนลอนได้ดีกว่าเส้นใย PET และการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าทั้ง 4 ชนิดนี้มีค่าความคงทนของสีอยู่ในเกณฑ์ดี

Kim et al. 2011 [18] ทำการสังเคราะห์สีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สที่มีหมู่ sulphatoethylsulphone 3 ชนิดเพื่อใช้ย้อมบนผ้าฝ้าย ผ้าไนลอน และผ้าฝ้าย/ไนลอน พบว่าสีย้อมดังกล่าวสามารถย้อมได้ดีบนเส้นใยไนลอน ที่ pH 5-8 ที่อุณหภูมิ $100^{\circ}C$ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสีที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความเข้มข้นผ้าไนลอน ส่วนการติดสีบนผ้าฝ้ายจะติดสีได้ดีที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ ด้วยการเติม Na_2CO_3 20 กรัม/ลิตร และ Na_2SO_4 40 กรัม/ลิตร เป็นสารช่วยย้อมแต่มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่าผ้าไนลอน ส่วนในการย้อมผ้าผสมฝ้าย/ไนลอนในขั้นตอนเดียว ภาวะที่เหมาะสมคือการย้อมที่ pH 7 อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ โดยสีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สที่สังเคราะห์ได้นั้นจะติดเส้นใยไนลอนมากกว่าเส้นใยฝ้ายบนผ้าผสม และมีสมบัติด้านความคงทนของสีต่อการขัดถูที่ดีแต่ความคงทนของสีต่อแสงปานกลาง

Kim et al. 2012 [19] ทำการสังเคราะห์สีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สที่มีหมู่ sulphatoethylsulphone 2 ชนิด เพื่อใช้ย้อมบนผ้า PET ผ้าไนลอน และผ้า PET/ไนลอน พบว่าที่อุณหภูมิการย้อมไนลอน $100^{\circ}C$ พฤติกรรมการติดสีย้อมบนผ้าไนลอนขึ้นอยู่กับค่า pH แต่ที่ pH 4 -8 เมื่อสิ้นสุดการย้อมผ้าไนลอนจะสามารถดูดติดสีย้อมได้ 97% และมีความคงทนของสีต่อการซักและการขัดถูดีมาก ซึ่งค่า pH ไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของเส้นใย PET ที่ย้อมที่อุณหภูมิ $120^{\circ}C$ มากนัก โดยที่ pH 5 -8 จะให้ค่าความเข้มข้นย้อมบนผ้า PET ใกล้เคียงกัน ส่วนในการย้อมผ้า PET/ไนลอน ที่อุณหภูมิ $120^{\circ}C$ สีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สจะติดบนเส้นใยไนลอนดีกว่าเส้นใย PET และมี pH ที่เหมาะสมที่สุดในการย้อมคือ pH 5

ขั้นตอนการวิจัย

1. วัสดุ

- ผ้าฝ้ายลายปีเก้	น้ำหนัก 239 g/m ²
- ผ้า PLA ถักลายปีเก้	น้ำหนัก 213g/m ²
- ผ้าถัก PLA/ฝ้ายลายปีเก้	น้ำหนัก 227 g/m ²

2. สารเคมีและสารช่วยย้อม

- 4 ไนโตรอะนิลีน (4-nitroaniline)
- กรดอะซิติก (CH₃COOH)
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄)
- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃)
- โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃)
- โซเดียมไดไทโอไนต์ (Na₂S₂O₄)
- โซเดียมไนไตรต์ (NaNO₂)
- โซเดียมอะซิเตต (CH₃COONa)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- ไดคลอโรมีเทน (CH₂Cl₂)
- ไดเมทิลฟอร์มาไรม์ด์ ((CH₃)₂NOCH)
- ผงซักฟอกมาตรฐาน (EN ISO 105 C06:1997)
- ผ้าหลายเส้นใย (Multifiber fabric) (BS EN ISO 105 F10)
- แผ่น TLC
- ฟีนอล (Phenol)
- เมทานอล (CH₃OH)
- สารคล้ำปปลิ่ง (aniline)
- สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent)
- สารช่วยเปียก
- อะซิโตน (CH₃COCH₃)
- อะมิโนฟีนิล 4 เบตา ซัลฟาโทเอทิลซัลโฟน (Aminophenyl-4-(β-sulphatoethyl-sulphone))
- เอทานอล (CH₃CH₂OH)
- เอทิลอะซิเตต (ethyl acetate)
- เอทิลอะซิเตท (CH₃COOCH₂CH₃)

- เอ็น เอ็น ไดเอทิลเมตาโทลูอิดีน (N,N-diethyl-m-toluidine)
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂)

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องชั่งระบบอินฟราเรด (Infared moisture balance) ยี่ห้อ A&D รุ่น MX-50
- เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance spectrometer; FT-NMR) ยี่ห้อ Varian รุ่น Unity Inova
- เครื่องย้อมระบบอินฟราเรด (Infared dyeing Machine) ยี่ห้อ Starlet รุ่น DL 6
- เครื่องระเหยแบบลดความดัน (Rotary evaporator) ยี่ห้อ Heidolph รุ่น Adventage
- เครื่องวัดจุดหลอมเหลว (Melting point) ยี่ห้อ KRUSS รุ่น KSP 1N
- เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Macbeth spectrophotometer รุ่น ColorEye 7000
- เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Elemental Analyzer) ยี่ห้อ LEGO รุ่น CHN-932 และ VTF-900 (คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

4. วิธีการวิจัย

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส 3 ชนิดจากปฏิกิริยาไดอะโซไทเซชันและปฏิกิริยาคัปปลิง (Diazotization-coupling reaction) ระหว่างอะมิโนฟีนิล 4 เบตา ซัลฟาโทเอทิลซัลโฟน (Aminophenyl-4-(β -sulphatoethylsulphone)) กับสาร 3 ชนิด ได้แก่

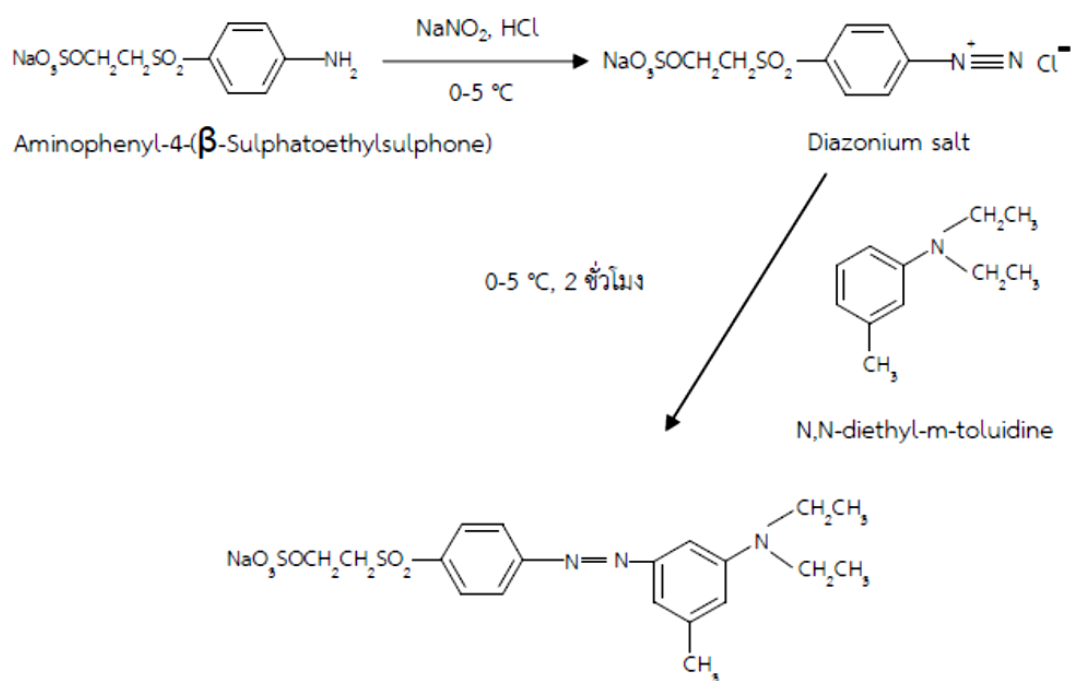
- เอ็น เอ็น ไดเอทิล เมตา โทลูอิดีน (N,N-diethyl-m-toluidine)
- ฟีนอล (Phenol)
- 4 ไนโตรอะนิลีน (4-nitroaniline)

การสังเคราะห์สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สตัวที่ 1 (สี RD-1)

เติม Aminophenyl-4-(β -sulphatoethylsulphone) 5.6 กรัม (0.02 โมล) ลงไปในสารละลายที่ประกอบด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 6 มิลลิลิตรและน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของสารละลายทั้งหมดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 0-5 องศาเซลเซียส

ละลายโซเดียมไนไตรต์ (NaNO₂) 1.5 กรัม ในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงในสารละลายข้างต้นอย่างช้าๆ เติมสารคัปปลิง คือ N,N-diethyl-m-toluidine 3.3 กรัม (0.02 โมล) ลงไป กวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 0-5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้สารละลายสีแดงอิฐ จากนั้นปรับอุณหภูมิสารละลายให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียสและปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ประมาณ 5.5 ด้วยสารละลายโซเดียมอะซิเตต 1.5 โมล ทำการตกตะกอนสีด้วยการเติมโซเดียมคลอไรด์ 40 กรัมลงไปในสารละลาย ตั้งสารละลายทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการตกตะกอน 1 คืน กรองตะกอนสีออกจากสารละลาย นำตะกอนสีมาล้างด้วยน้ำ

กลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง อบให้แห้งและบดให้ละเอียด ผงสี RD-1 ที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะเป็นผงสีแดงอิฐ ผงสีที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์เพื่อคำนวณหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%Yield) วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของสีตามวิธีวิเคราะห์และทดสอบในตอนี่ 4 ปฏิบัติการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 10

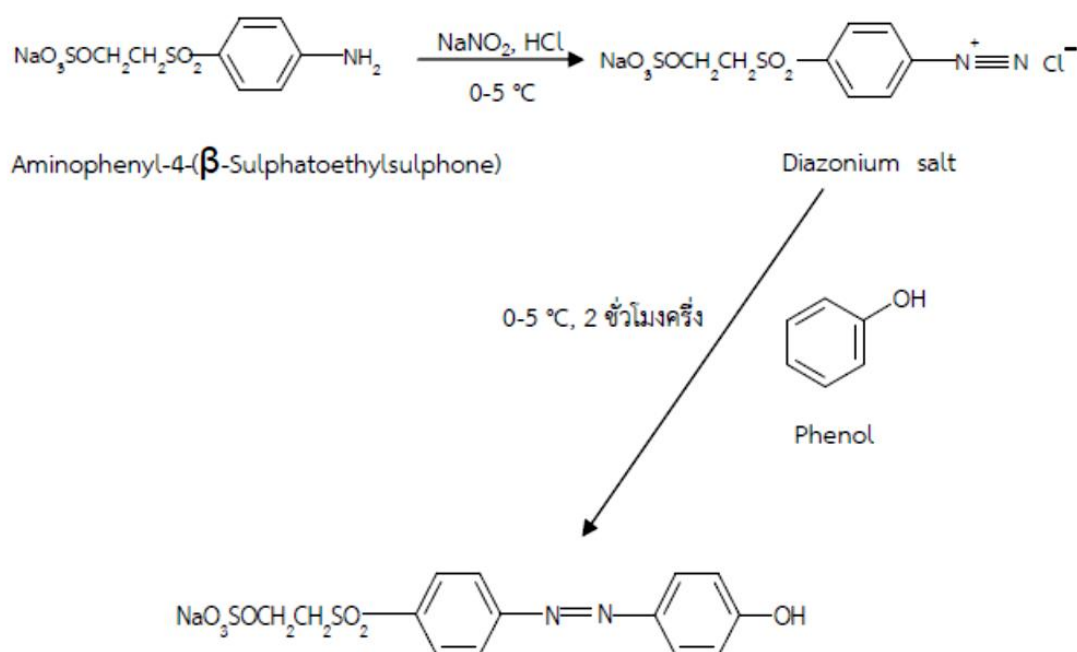


รูปที่ 10 ปฏิบัติการสังเคราะห์สี RD-1

การสังเคราะห์สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สตัวที่ 2 (สี RD-2)

เติม Aminophenyl-4-(β-sulphatoethylsulphone) 5.6 กรัม (0.02 โมล) ลงไปในสารละลายที่ประกอบด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 6 มิลลิลิตรและน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของสารละลายทั้งหมดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 0-5 องศาเซลเซียส

ละลายโซเดียมไนไตรต์ (NaNO₂) 1.5 กรัม ในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงในสารละลายข้างต้นอย่างช้าๆ เติมสารคัปปลิง คือ ฟีนอล (Phenol) 1.88 กรัม (0.02 โมล) ลงไป กวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมงครึ่ง โดยควบคุมอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 0-5 องศาเซลเซียส จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม จากนั้นปรับอุณหภูมิสารละลายให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียสและปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ประมาณ 5.5 ด้วยสารละลายโซเดียมอะซิเตต 1.5 โมล ทำการตกตะกอนสีด้วยการเติมโซเดียมคลอไรด์ 40 กรัมลงไปในสารละลาย ตั้งสารละลายทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการตกตะกอน 1 คืน กรองตะกอนสีออกจากสารละลาย นำตะกอนสีที่กรองได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง อบให้แห้งและบดให้ละเอียด ผงสี RD-2 ที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ผงสีที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์เพื่อคำนวณหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%Yield) วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของสีตามวิธีวิเคราะห์และทดสอบในตอนี่ 4 ปฏิบัติการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 11

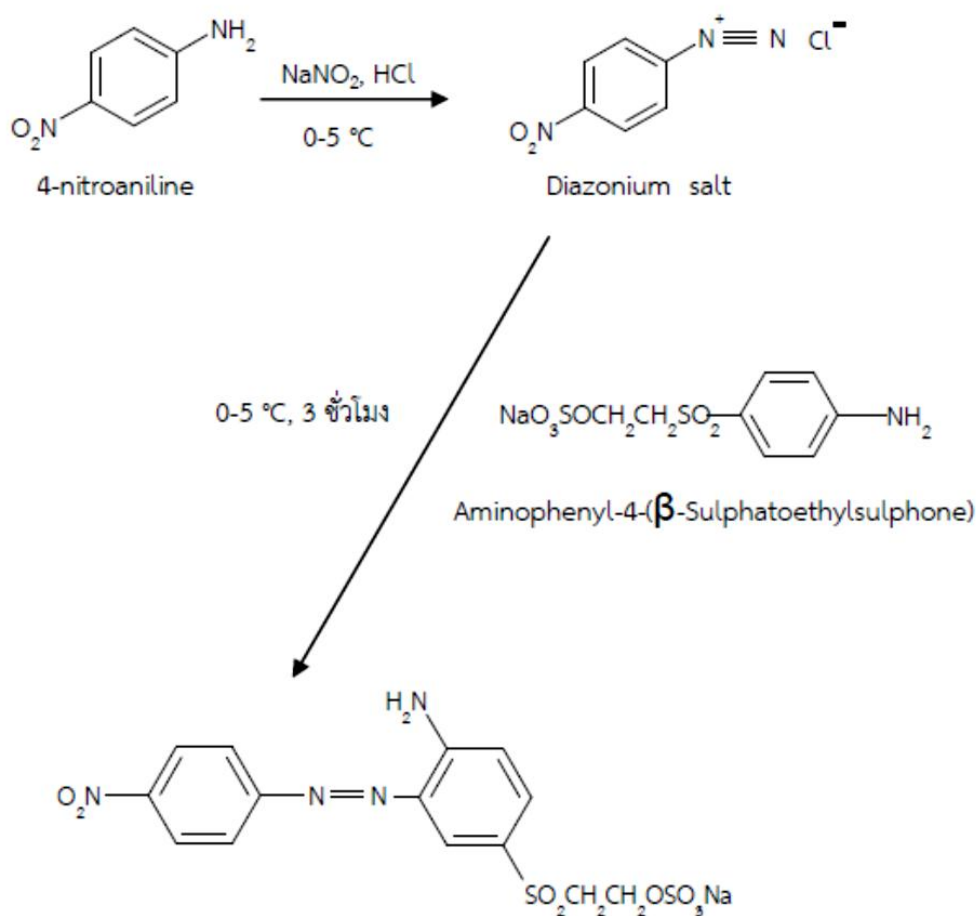


รูปที่ 11 ปฏิกริยาการสังเคราะห์สี RD-2

การสังเคราะห์สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สตัวที่ 3 (สี RD-3)

เติม 4-nitroaniline 2.76 กรัม (0.02 โมล) ลงไปในสารละลายที่ประกอบด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 6 มิลลิลิตรและน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของสารละลายทั้งหมดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 0-5 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเอทานอลลงไปจนกระทั่ง 4-nitroaniline ละลายอย่างสมบูรณ์

ละลายโซเดียมไนไตรต์ (NaNO_2) 1.5 กรัม ในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆ เทลงในสารละลายข้างต้นอย่างช้าๆ เติมสารคัปปลิง คือ Aminophenyl-4-(β-sulphatoethyl sulphone) 5.6 กรัม (0.02 โมล) ลงไป กวนสารละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 0-5 องศาเซลเซียส จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลือง จากนั้นปรับอุณหภูมิสารละลายให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียสและปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ประมาณ 5.5 ด้วยสารละลายโซเดียมอะซิเตต 1.5 โมล ทำการตกตะกอนสีด้วยการเติมโซเดียมคลอไรด์ 40 กรัมลงไปในสารละลาย ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 1 คืน แล้วจึงนำสารละลายสีไปกลั่นด้วยเครื่องกลั่นลดความดันเพื่อกำจัดน้ำและเอทานอลออกจนกระทั่งได้ของเหลวเข้มข้นสีเหลือง เติมไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) ลงไปเพื่อกำจัดเกลือ จากนั้นจึงทำการกำจัดไดเมทิลฟอร์มาไมด์ด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นำของแข็งที่ได้มาบดให้ละเอียด ผงสี RD-3 ที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ผงสีที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์เพื่อคำนวณหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%Yield) วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของสีตามวิธีวิเคราะห์และทดสอบในตอนที่ 4 ปฏิกริยาการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ปฏิกริยาการสังเคราะห์สี RD-3

การวิเคราะห์และทดสอบ— การวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

ผงสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นตามขั้นตอนการสังเคราะห์ในตอนต้นที่ 1 จะถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยการกำจัดเกลือและสิ่งเจือปนต่างๆ ออกทำการวิเคราะห์หาค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%Yield) หาค่าความบริสุทธิ์ของสีด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีแบบแผ่นบาง (TLC) หาจุดหลอมเหลว และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนในโครงสร้างสีด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Elemental Analyzer) วิธีการทำผงสีให้บริสุทธิ์ทำได้ดังนี้

ผงสี RD-1 เติมไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) ลงไปในผงสีและทำการกรองผงสีผ่านชุดกรองระบบสุญญากาศจำนวน 2 ครั้ง ก่อนนำผงสีไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นำผงสีที่บริสุทธิ์แล้วไปวิเคราะห์และทดสอบในขั้นตอนต่อไป

ผงสี RD-2 และ RD-3 นำผงสีมาละลายในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) และทำการกรองแยกสารละลายออกจากเกลือด้วยชุดกรองระบบสุญญากาศจำนวน 2 ครั้ง นำผงสีไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) ลงไปในผงสีและทำการกรองผงสีผ่านชุดกรอง

ระบบสุญญากาศ นำผงสีไปอบให้แห้งอีกครั้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นำผงสีที่บริสุทธิ์แล้วไปวิเคราะห์และทดสอบในขั้นตอนต่อไป

— ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%Yield)

การวิเคราะห์ร้อยละของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์สรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดในตอนที่ 1 ทำได้ดังนี้ ซึ่งน้ำหนักสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์สรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส เพื่อคำนวณหาจำนวนโมลและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ควรเกิดขึ้นตามทฤษฎี (น้ำหนักของผลิตภัณฑ์_{Th}) ตามสมการที่ 1 เมื่อทำการสังเคราะห์สีตามวิธีการในตอนที่ 1 เสร็จเรียบร้อยแล้วนำผงสีที่สังเคราะห์ไปทำให้บริสุทธิ์ จากนั้นจึงทำการชั่งน้ำหนักแห้งของผงสีที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ (W_1) ร้อยละของผลิตภัณฑ์คำนวณตามสมการที่ 2

น้ำหนักของผลิตภัณฑ์_{Th} (กรัม) = น้ำหนักโมเลกุลของสี × จำนวนโมลของสารตั้งต้นที่น้อยที่สุด สมการที่ 1

$$\text{ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (\%Yield)} = \frac{W_1 \text{ (กรัม)}}{W_{Th} \text{ (กรัม)}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ W_{Th} คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (กรัม) ตามทฤษฎี

W_1 คือ น้ำหนักแห้งของผงสี (กรัม) ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์

— เทคนิคโครมาโตกราฟีแบบแผ่นบาง (TLC)

นำผงสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่ทำให้บริสุทธิ์ทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) มาทำการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของสีด้วยเทคนิคการแยกสาร (TLC) โดยใช้เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) เป็นเฟสเคลื่อนที่เพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ของสีและคำนวณหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของสาร (R_f) ตามสมการที่ 3

$$R_f = \frac{\text{ระยะการเคลื่อนที่ของสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส}}{\text{ระยะการเคลื่อนที่ของเฟสเคลื่อนที่}} \quad \text{สมการที่ 3}$$

— การหาจุดหลอมเหลว (Melting Temperature)

นำผงสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่บริสุทธิ์ทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) มาทำการวัดจุดหลอมเหลวของผงสีด้วยเครื่องวัดจุดหลอมเหลว (Melting point) ยี่ห้อ KRUSS รุ่น KSP 1N ทำการวัดจุดหลอมเหลวของสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส จำนวน 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

— การวิเคราะห์ปริมาณด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Elemental Analyzer)

นำผงสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่บริสุทธิ์ ทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) มาทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนที่ประกอบในโครงสร้างสีด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Elemental Analyzer) ยี่ห้อ LEGO รุ่น CHN-932 และ VTF-900

— การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

นำผงสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้วมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลโดยการนำผงสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สมาละลายในตัวทำละลาย DMSO-d₆ ใส่ผงสีลงในหลอด NMR ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance spectrometer; FT-NMR) ยี่ห้อ Varian รุ่น Unity Inova 500MHz

ตอนที่ 2 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าฝ้ายและผ้าฝ้าย PLA

สรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) ถูกนำมาทำการย้อมผ้าฝ้าย 2 ชนิด คือ ผ้าฝ้ายและผ้า PLA เพื่อศึกษาปัจจัยและพฤติกรรมการติดสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าแต่ละชนิด ดังนี้

2.1 การศึกษาปัจจัยและพฤติกรรมการติดสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าฝ้าย

การย้อมสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สชนิด RD-1 RD-2 และ RD-3 บนผ้าฝ้ายในงานวิจัยนี้ทำการย้อมด้วยเครื่องย้อมอินฟราเรด ยี่ห้อ Starlet รุ่น DL 6000 โดยเติมสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตรเป็นสารช่วยย้อม อัตราส่วนระหว่างน้ำย้อมต่อผ้า (LR) เท่ากับ 20:1 ปัจจัยที่ทำการศึกษามีดังนี้

- ปริมาณโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ย้อม
- อุณหภูมิการย้อม
- เวลาที่ใช้ย้อม
- ปริมาณสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สในการย้อม

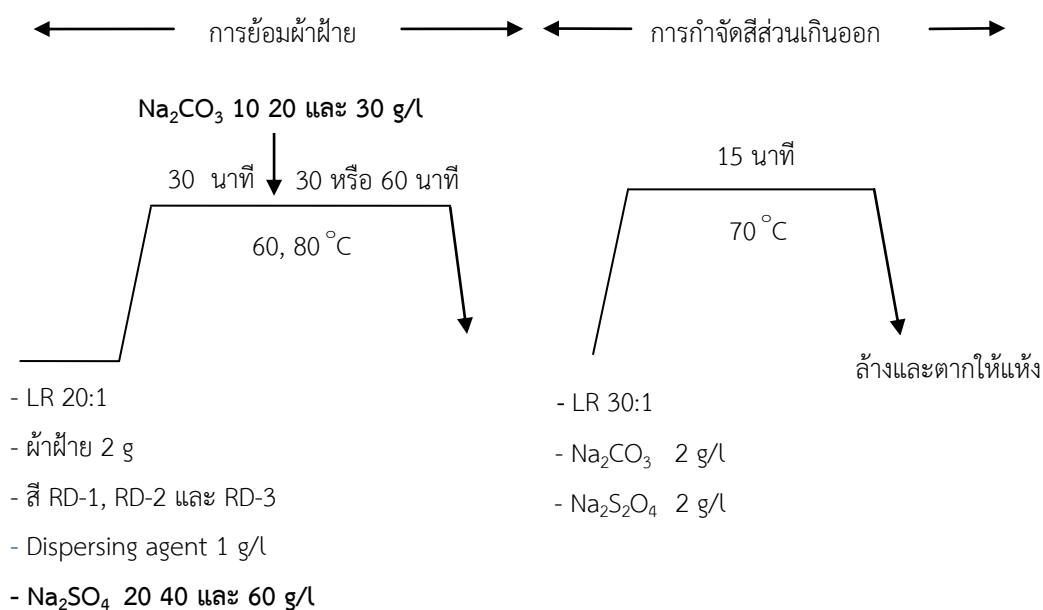
ผ้าฝ้ายภายหลังผ่านการย้อมแล้วจะถูกนำมาทำการกำจัดสีส่วนเกินออกด้วยเครื่องย้อมอินฟราเรดในสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมไดไฮโอไนต์ (Na₂S₂O₄) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) อย่างละ 2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที LR เท่ากับ 30:1 นำผ้าไปล้างน้ำให้สะอาดและตากให้แห้ง จากนั้นจึงนำผ้าไปวัดค่าความเข้มสีและเฉดสีบนผ้าด้วยเครื่องวัดสี Macbeth spectrophotometer รุ่น ColorEye 7000 หนึ่งภาวะที่ทำการศึกษาจะทำการย้อมผ้าตัวอย่าง 3 ซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ย

2.1.1 ปริมาณโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ย้อม

การศึกษาปริมาณโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตที่ส่งผลต่อการติดสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าฝ้ายทำการวิจัยดังนี้ ย้อมผ้าฝ้ายด้วยสรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่อุณหภูมิ 60 หรือ 80 องศาเซลเซียส ตามชนิดของสีในตารางที่ 2 โดยใช้ปริมาณโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) ที่แตกต่างกัน คือ 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตรและใช้ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ที่แตกต่างกัน คือ 10 20 และ 30 กรัมต่อลิตร (LR = 20:1) ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ที่ใช้ย้อมจะถูกเติมลงไปครั้งเดียวเมื่อถึงอุณหภูมิการย้อมเป็นเวลา 30 นาที รูปแบบการย้อมแสดงในรูปที่ 13

ตารางที่ 2 ภาวะในการย้อมผ้าฝ้ายด้วยปริมาณโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตที่ต่างกัน

สี	ปริมาณสี (%owf)	Na ₂ SO ₄ (g/l)	Na ₂ CO ₃ (g/l)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาทั้งหมดที่ใช้ย้อม (นาที)
RD-1	0.5	20, 40 และ 60	10, 20 และ 30	80	90
RD-2	1	20, 40 และ 60	10, 20 และ 30	60	90
RD-3	1	20, 40 และ 60	10, 20 และ 30	60	60



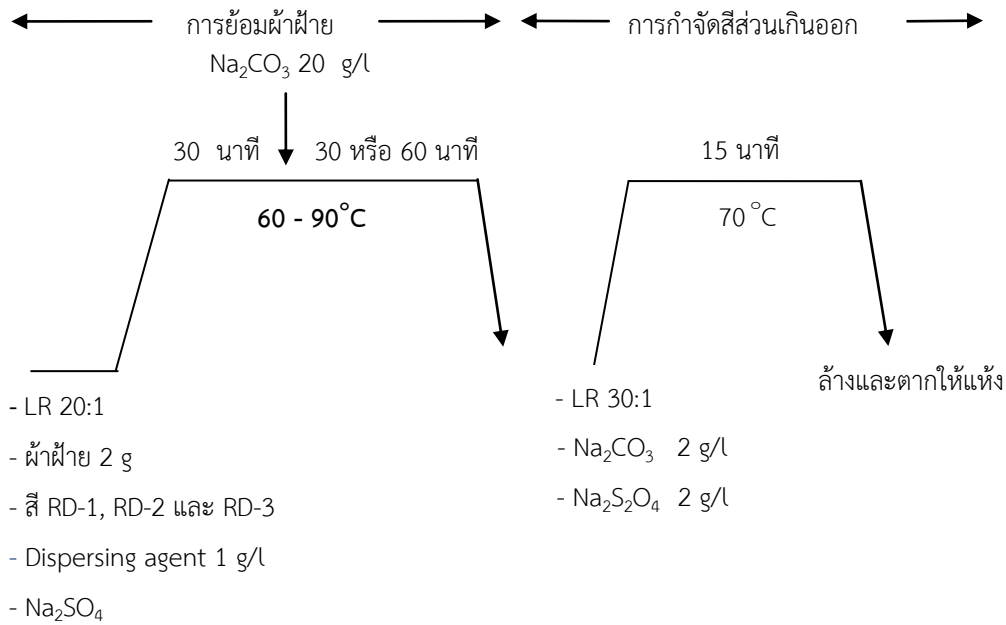
รูปที่ 13 รูปแบบการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สเพื่อศึกษาปริมาณโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ย้อม

2.1.2 อุณหภูมิการย้อม

การศึกษาอุณหภูมิการย้อมผ้าฝ้ายที่ส่งผลต่อการติดสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าฝ้ายทำได้ดังนี้ ย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สตามภาวะของสีแต่ละชนิดในตารางที่ 3 อุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 60 80 และ 90 องศาเซลเซียส รูปแบบการย้อมแสดงดังรูปที่ 14

ตารางที่ 3 ภาวะในการย้อมผ้าฝ้ายด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

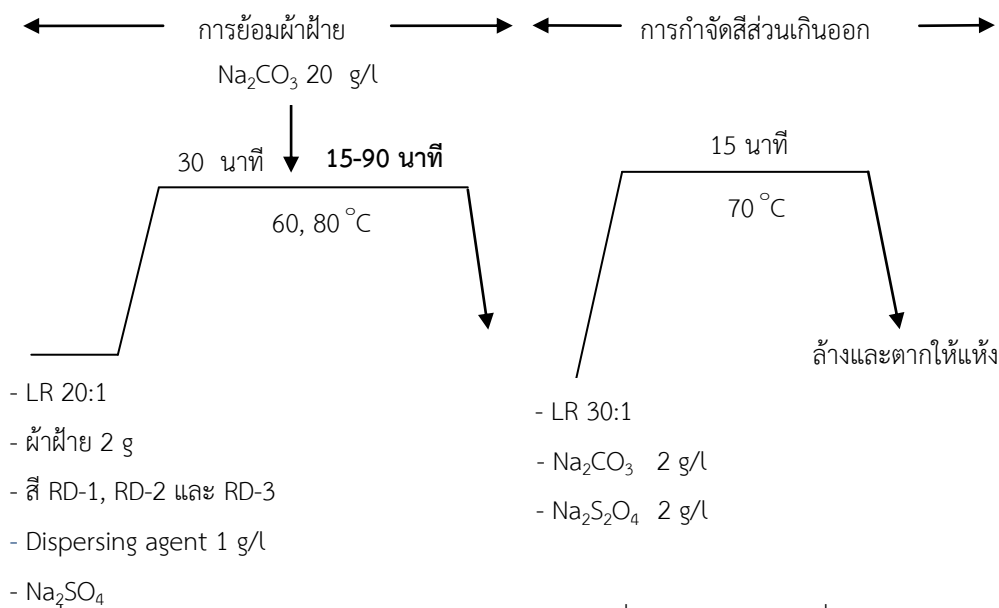
สี	ปริมาณสี (%owf)	Na ₂ SO ₄ (g/l)	Na ₂ CO ₃ (g/l)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาทั้งหมดที่ใช้ย้อม (นาที)
RD-1	0.5	40	20	60, 80 และ 90	90
RD-2	1	60	20	60, 80 และ 90	90
RD-3	1	40	20	60, 80 และ 90	60



รูปที่ 14 รูปแบบการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการย้อม

2.1.3 เวลาที่ใช้ย้อม

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทำได้ดังนี้ทำการย้อมผ้าฝ้ายตามภาวะของสีแต่ละชนิดในตารางที่ 4 เมื่อถึงอุณหภูมิการย้อม คือ 60 หรือ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จึงค่อยทำการเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ตามปริมาณที่กำหนดลงไปใ้กระบอกย้อม ทำการย้อมผ้าฝ้ายต่อไปอีกเป็นระยะเวลา 15 30 60 และ 90 นาที รูปแบบการย้อมแสดงในรูปที่ 15



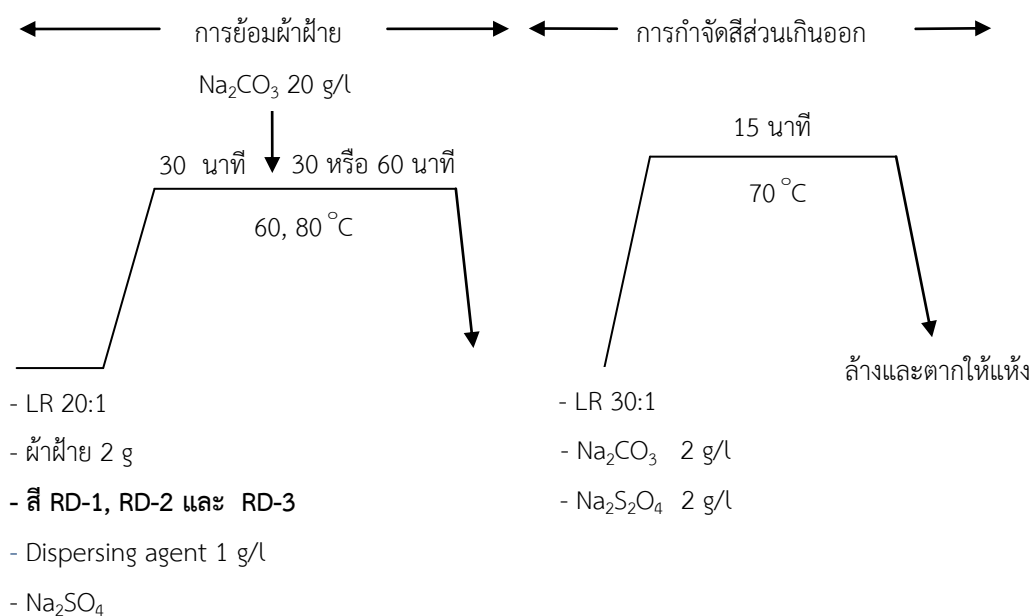
รูปที่ 15 รูปแบบการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สเพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการย้อม

ตารางที่ 4 ภาวะในการย้อมผ้าฝ้ายด้วยเวลาที่ต่างกัน

สี	ปริมาณสี (%owf)	Na ₂ SO ₄ (g/L)	Na ₂ CO ₃ (g/L)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาทั้งหมดที่ใช้ย้อม (นาที)
RD-1	0.5	40	20	80	45 60 90 และ 120
RD-2	1	60	20	60	45 60 90 และ 120
RD-3	1	40	20	60	45 60 90 และ 120

2.1.4 ปริมาณการใช้สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สในการย้อม

ตารางที่ 5 แสดงภาวะที่ใช้ย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด สำหรับศึกษาปริมาณสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่ใช้ย้อมต่อค่าความเข้มข้นและเจดสีบนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อม ทำการย้อมผ้าฝ้ายด้วยความเข้มข้นของสีตั้งแต่ 0.25%owf ถึง 7%owf รูปแบบการย้อมแสดงในรูปที่ 16



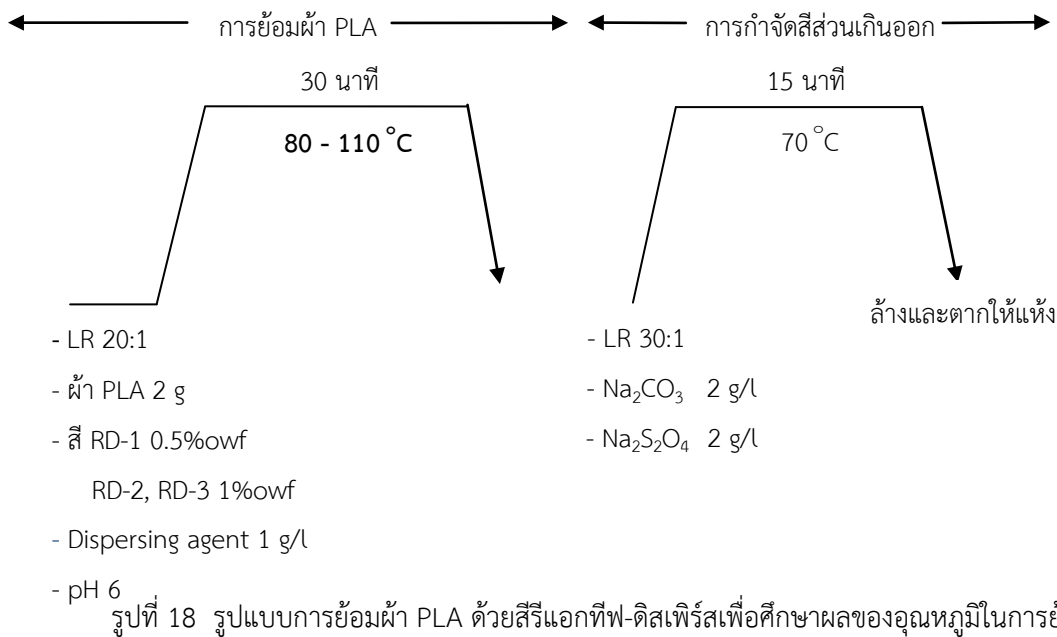
รูปที่ 16 รูปแบบการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สเพื่อศึกษาปริมาณการใช้สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สในการย้อม

ตารางที่ 5 ภาวะในการย้อมผ้าฝ้ายด้วยปริมาณการใช้สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่ต่างกัน

สี	ปริมาณสี (%owf)	Na ₂ SO ₄ (g/L)	Na ₂ CO ₃ (g/L)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาทั้งหมดที่ใช้ย้อม (นาที)
RD-1	0.25 0.5 1 3 5 และ 7	40	20	80	90
RD-2	0.25 0.5 1 3 5 และ 7	60	20	60	90
RD-3	0.25 0.5 1 3 5 และ 7	40	20	60	60

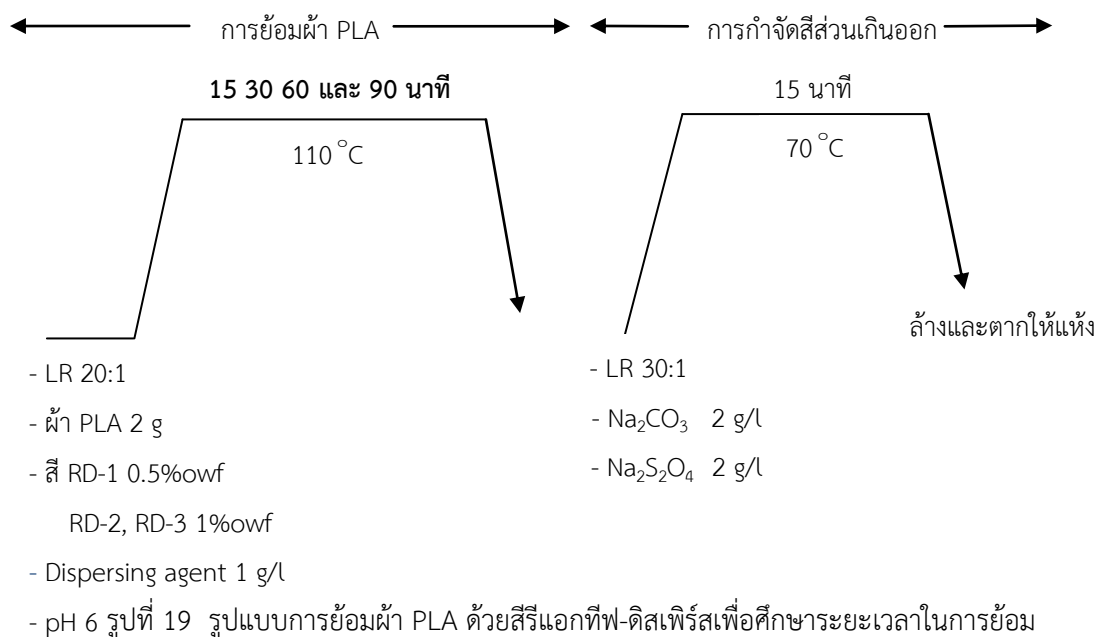
2.2.2 อุณหภูมิที่ใช้ย้อม

การศึกษาอุณหภูมิการย้อมผ้า PLA ที่ส่งผลต่อการติดสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้า PLA ทำได้ดังนี้ ย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตร โดยปรับ pH ของสารละลายก่อนการย้อมเท่ากับ 6 และใช้เวลาในการย้อม 30 นาที อุณหภูมิที่ทำการศึกษา คือ 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส รูปแบบการย้อมแสดงในรูปที่ 18



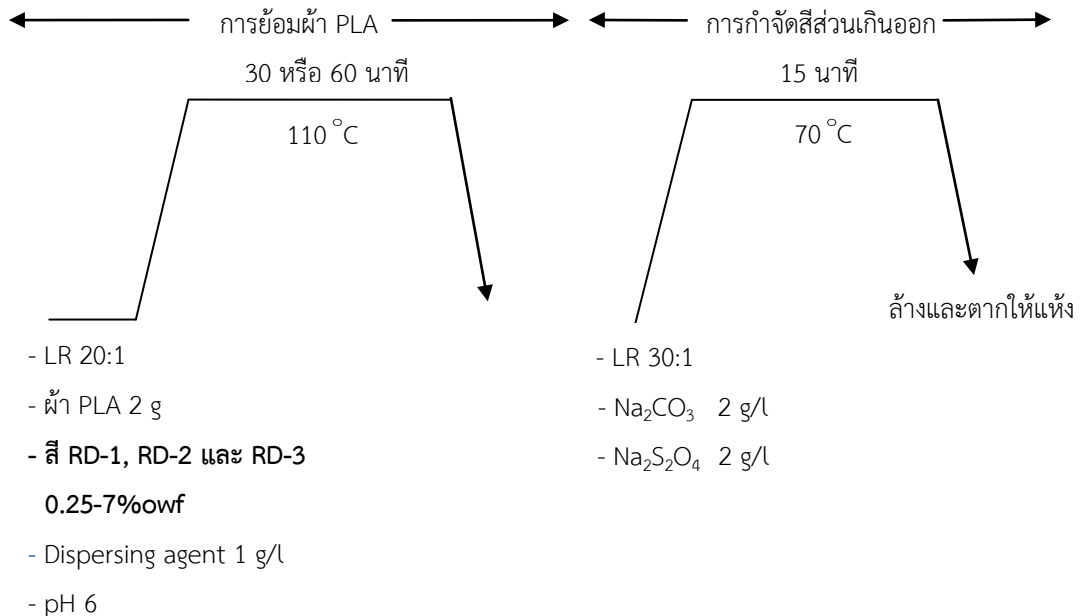
2.2.3 เวลาที่ใช้ย้อม

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทำได้ดังนี้ ย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ปรับ pH ของสารละลายก่อนการย้อมเท่ากับ 6 ระยะเวลาในการย้อมที่ศึกษา คือ 15 30 60 และ 90 นาที รูปแบบการย้อมแสดงในรูปที่ 19



2.2.4 ปริมาณสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สในการย้อม

การศึกษาปริมาณสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่ใช้ย้อมบนผ้า PLA ทำได้ดังนี้ ย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 หรือ 60 นาที ปรับ pH ของสารละลายก่อนการย้อมเท่ากับ 6 ทำการย้อมผ้า PLA ด้วยความเข้มข้นของสีดังนี้ 0.25 0.5 1 3 5 และ 7 %owf รูปแบบการย้อมแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 รูปแบบการย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สเพื่อศึกษาปริมาณการใช้สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สในการย้อม

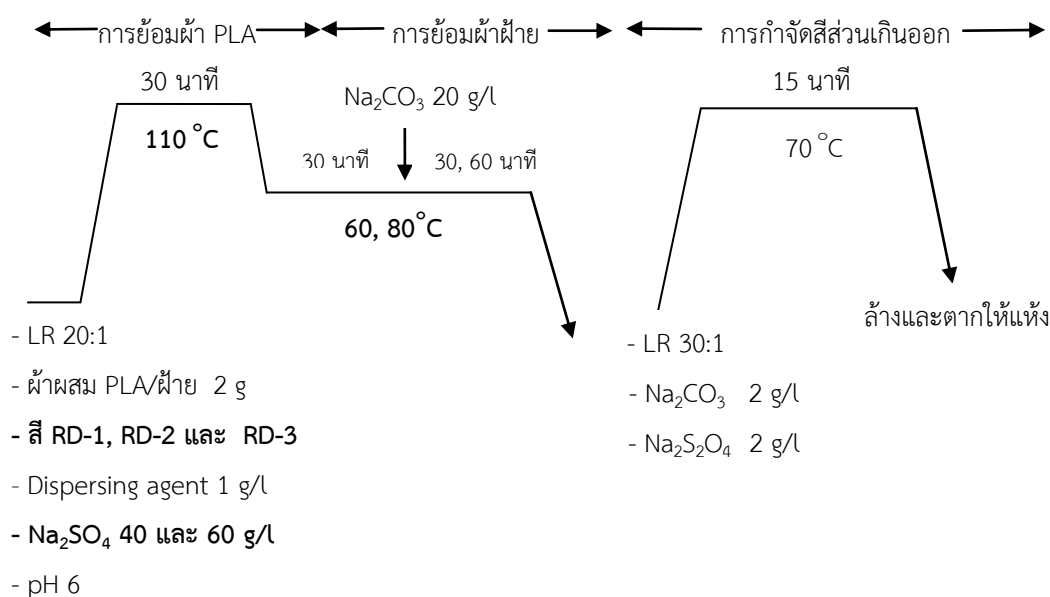
ตอนที่ 3 การย้อมผ้าถักผสม PLA/ฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับย้อมผ้าฝ้ายและผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่สังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) จะถูกนำมาใช้ย้อมผ้าถักผสม PLA/ฝ้ายขั้นตอนเดียว ในงานวิจัยนี้จะทำการย้อมเส้นใย PLA บนผ้าถักผสม PLA/ฝ้ายที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงทำการย้อมเส้นใยฝ้ายบนผ้าผสม PLA/ฝ้ายที่อุณหภูมิ 60 หรือ 80 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการทดสอบการละลายสีในการย้อมออก ภาวะการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สที่ทำการศึกษาแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ภาวะในการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้าย

สี	ปริมาณสี (%owf)	Na ₂ SO ₄ (g/l)	Na ₂ CO ₃ (g/l)	pH สารละลายสี	การย้อม PLA		การย้อมฝ้าย	
					อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)
RD-1	3 และ 5	40	20	6	110	30	80	90
RD-2	3 และ 5	60	20	6	110	30	60	90
RD-3	3 และ 5	40	20	6	110	30	60	60

เตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สความเข้มข้นสี 3 และ 5%owf ร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัม ต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต (40 หรือ 60 กรัมต่อลิตร) LR = 20:1 ปรับ pH ของสารละลายก่อนการย้อมเท่ากับ 6 ใส่ผ้าผสม PLA/ฝ้าย 2 กรัมลงไป ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิเครื่องย้อมลงให้เหลืออุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสสำหรับสี RD-2 และ RD-3 และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสสำหรับสี RD-1 คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที จึงเติมโซเดียมคาร์บอเนตปริมาณ 20 กรัมต่อลิตรลงไป ในกระบอกย้อม ทำการย้อมที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 30 นาทีสำหรับสี RD-3 และเป็นเวลา 60 นาทีสำหรับสี RD-1 และ RD-2 กระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการย้อม รูปแบบการย้อมแสดงดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 รูปแบบการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

ผ้าผสม PLA/ฝ้ายภายหลังผ่านการย้อมแล้วจะถูกนำมาทำการกำจัดสีส่วนเกินออก (กระบวนการ RC) ด้วยเครื่องย้อมอินฟราเรดในสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมไดไฮโอไนต์ (Na₂S₂O₄) ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรและโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างน้ำย้อมต่อผ้า LR = 30:1 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำผ้าไปล้างน้ำให้สะอาดและตากให้แห้ง

ทำการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้ายภาวะละ 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสีบนผ้า (K/S) และเฉดสีบนผ้า ด้วยเครื่องวัดสี (Macbeth spectrophotometer) รุ่น ColorEye 7000 ทดสอบความคงทนของสีต่อการซักและความคงทนของสีต่อการขัดถู

การทดสอบสมบัติของผ้าย้อม

ผ้าฝ้าย ผ้าฝ้าย PLA และผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้ายที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) จะถูกนำมาวัดค่าความเข้มสี (K/S) และเฉดสีบนผ้า ทดสอบสมบัติด้านความคงทนของสีต่อการซักและความคงทนของสีต่อการขัดถู

— ความเข้มสีและเฉดสี

ทำการวัดค่าความเข้มสี (K/S) และเฉดสี (L^* a^* และ b^*) บนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมด้วยเครื่องวัดสี Macbeth spectrophotometer รุ่น ColorEye 7000 ดังนี้

สี RD-1 วัดค่าความเข้มสี (K/S) และเฉดสี (L^* a^* และ b^*) บนผ้าฝ้ายและผ้า PLA ที่ความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร

สี RD-2 วัดค่าความเข้มสี (K/S) และเฉดสี (L^* a^* และ b^*) บนผ้าฝ้ายที่ความยาวคลื่น 480 นาโนเมตรและบนผ้า PLA ที่ความยาวคลื่น 360-400 นาโนเมตร

สี RD-3 วัดค่าความเข้มสี (K/S) และเฉดสี (L^* a^* และ b^*) บนผ้าฝ้ายและผ้า PLA ที่ความยาวคลื่น 360-400 นาโนเมตร

— การทดสอบความคงทนของสี

- การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (color fastness to washing) มาตรฐาน (ISO 105-C06 1994 "color fastness to washing")

ทำการย้อมสีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) บนผ้าฝ้ายและผ้า PLA ให้มีค่าความเข้มสี (K/S) ประมาณ 5 ในขณะที่ผ้าผสม PLA/ฝ้ายจะทำการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักบนผ้าผสม PLA/ฝ้ายที่ผ่านการย้อมด้วยผงสีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 3%owf และ 5%owf ด้วยวิธีการย้อมผ้าฝ้ายและผ้า PLA ในตอนที่ 2 และวิธีการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้าย ในตอนที่ 3 จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการย้อมมาทำการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักตามมาตรฐาน ISO 105-C06 1994 ดังนี้

ตัดผ้าย้อมให้มีขนาด 4×10 ตารางเซนติเมตร นำไปเย็บติดกับผ้ามัลติไฟเบอร์ ทำการซักในสารละลายที่ประกอบด้วย ผงซักฟอกมาตรฐาน (ECE detergent) ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร และโซเดียมเปอร์บอเรต 1 กรัมต่อลิตร ด้วยการเทสารละลายผงซักฟอกลงในกระบอกสแตนเลสปริมาณ 150 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ผ้าตัวอย่างและลูกเหล็ก จำนวน 25 ลูก ต่อ 1 กระบอก ทำการซักที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำผ้าไปล้างและตากให้แห้ง ประเมินผลการติดเปื้อนสีรีแอคทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้ามัลติไฟเบอร์ด้วยเกรย์สเกล (Gray scale for color staining) และประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีบนผ้าฝ้าย ผ้า PLA และผ้าผสม PLA/ฝ้ายด้วยเกรย์สเกล (Gray scale for color change) ภายใต้แสงไฟ D65 ทำการทดสอบจำนวน 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

- การทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู (color fastness to rubbing) มาตรฐาน (BS 1006X12)

ทำการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) บนผ้าฝ้าย ผ้า PLA และผ้าผสม PLA/ฝ้าย จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการย้อมมาทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถูตามมาตรฐาน BS 1006X12 ตัดผ้าตัวอย่างให้มีขนาด 50×140 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น สำหรับการขัดถูในภาวะแห้ง 2 ชิ้นและการขัดถูในภาวะเปียก 2 ชิ้นและตัดผ้าฝ้ายมาตรฐานสำหรับขัดถูขนาด 50×50 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ทำการทดสอบดังนี้

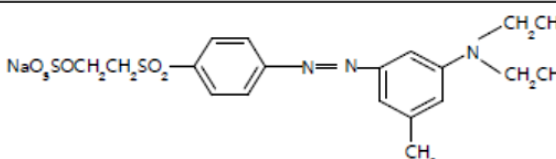
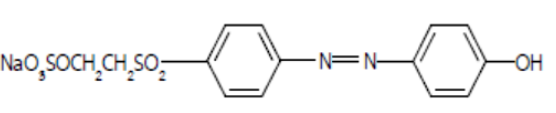
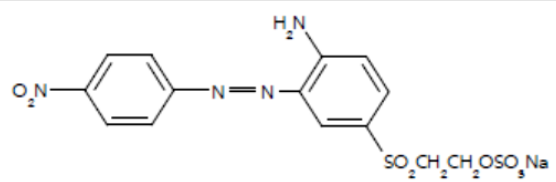
การทดสอบการขัดถูในภาวะแห้ง นำผ้าตัวอย่างมายึดกับเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู (Electronic Crockmeter) แสดงดังภาพ 42 ขัดถูผ้าฝ้ายมาตรฐานบนผ้าตัวอย่างไปมาตามแนวยาว 100 มิลลิเมตรเป็นจำนวน 10 ครั้ง ภายใน 10 วินาทีด้วยแรงกดขนาด 9 นิวตัน การทดสอบการขัดถูในภาวะเปียกให้ทำการฉีบน้ำบนผ้าฝ้ายมาตรฐานก่อนทำการทดสอบด้วยวิธีการเดียวกับการขัดถูในภาวะแห้ง ประเมินค่าการติดเปื้อนสีบนผ้าฝ้ายมาตรฐานด้วยเกรย์สเกล (Gray scale for color staining) ภายใต้แสงไฟ D65

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

1. ผลการสังเคราะห์สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส




สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส RD-1 และ RD-2 ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาไดอะโซไทโตะโซโทเซชัน-คัปปลิง โดยใช้ Aminophenyl-4-(β -sulphatoethylsulphone) ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไนไตรต์ที่อุณหภูมิ 0-5 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดเกลือไดอะโซเนียม (Diazonium salt) สำหรับทำปฏิกิริยากับสารคัปปลิงคือ N,N-diethyl-m-toluidine และฟีนอล ในขณะที่สี RD-3 ใช้ 4-nitroaniline เป็นสารตั้งต้นในการเกิดเกลือไดอะโซเนียมและใช้ Aminophenyl-4-(β -sulphatoethylsulphone) เป็นสารคัปปลิง สี RD-1 ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นผงสีสีแดง ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%Yields) เท่ากับ 72 ในขณะที่สี RD-2 และ RD-3 เป็นผงสีสีเหลือง ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%Yields) เท่ากับ 20 และ 38 ตามลำดับ โครงสร้างเคมีของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 โครงสร้างเคมีของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

สี	%Yield	การละลาย	โครงสร้างเคมี
RD-1	72	ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีใน acetone และ DMF	 $C_{19}N_3S_2H_{24}O_6Na$ (น้ำหนักโมเลกุล = 477.57)
RD-2	20	ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีใน acetone และ DMF	 $C_{14}N_2S_2H_{13}O_7Na$ (น้ำหนักโมเลกุล = 408.40)
RD-3	38	ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีใน acetone และ DMF	 $C_{14}N_4S_2H_{13}O_8Na$ (น้ำหนักโมเลกุล = 452.40)

เมื่อนำสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยการกำจัดเกลือและสารตั้งต้นที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออก จากนั้นนำมาทดสอบความบริสุทธิ์ของสีที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบแผ่นบาง (TLC) เมื่อใช้เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) เป็นเฟสเคลื่อนที่ ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 8 พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ (R_f) สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด คือ สี RD-1 มีค่า $R_{f_RD-1} = 0.87$ สี RD-2 มีค่า $R_{f_RD-2} = 0.86$ และสี RD-3 มีค่า $R_{f_RD-3} = 0.88$ สี RD-1 มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสุดจึงมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุด คือ 210 องศาเซลเซียส ในขณะที่สี RD-2 มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสุดจึงมีจุดหลอมเหลวต่ำสุด คือ 189-191 องศาเซลเซียส [20]

ตารางที่ 8 สมบัติของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

สี	MW	TLC	จุดหลอมเหลว (°C)	ความยาวคลื่น (nm)	ผงสี
RD-1	477.57	0.87	210.1-210.9	472	
RD-2	408.40	0.86	189.0-191.0	369	
RD-3	452.40	0.88	195.8-199.5	383	

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในโครงสร้างสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

สี	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ			¹ H-NMR* (δ , ppm)
	ธาตุ	การคำนวณ	เครื่อง EA	
RD-1	C	47.78	47.43	1.13 (6H, t, two CH ₃), 3.39 (4H, q, two NCH ₂)
	H	5.08	5.04	3.60 (2H, t, CH ₂ SO ₂), 4.09 (2H, t, NaO ₃ SOCH ₂)
	N	8.80	9.23	8.13-8.21 (4H, m, aromatic protons) 6.60-7.07 (3H, m, aromatic proton), 2.35 (3H, s, CH ₃)
RD-2	C	41.17	42.12	8.13-8.21 (4H, m, aromatic protons), 5.0 (H, s, OH)
	H	3.22	2.795	6.93-7.76 (4H, m, aromatic protons)
	N	6.86	7.8	3.60 (2H, t, CH ₂ SO ₂), 4.09 (2H, t, NaO ₃ SOCH ₂)
RD-3	C	37.17	38.90	6.94-8.39 (7H, m, aromatic protons)
	H	2.90	3.48	4.0 (2H, t, NH ₂), 4.09 (2H, t, NaO ₃ SOCH ₂)
	N	12.39	11.06	3.60 (2H, t, CH ₂ SO ₂)

* ตัวทำละลาย DMSO-d₆

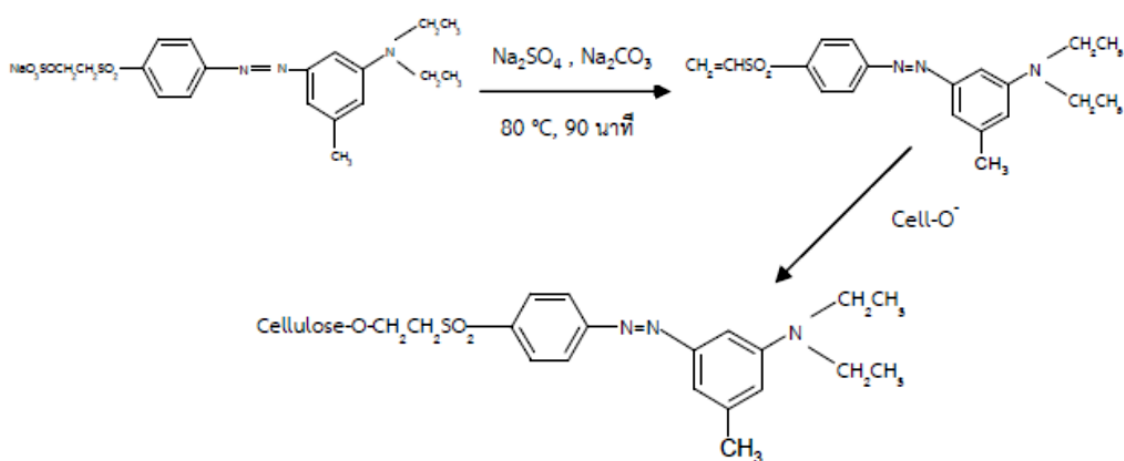
ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สไปละลายในตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) พบว่า สี RD-1 จะดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 472 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงของแสงสีส้มที่ตาคนมองเห็น ในขณะที่สี RD-2 และสี RD-3 จะดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 369 และ 383 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงของแสงสีเหลืองที่ตาคนมองเห็น (Pesce, Frings and Gauldie, 1996) และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของสีด้วยเครื่อง FT-NMR และวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนด้วยเครื่อง Elemental Analyzer ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 9 พบว่าโครงสร้างของสีและปริมาณธาตุทั้ง 3 ในองค์ประกอบของสีมีความสอดคล้องกับโครงสร้างที่แสดงในตารางที่ 7

2. ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าฝ้ายและผ้าฝ้าย PLA

2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าฝ้าย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมสีรีแอกทีฟบนผ้าฝ้ายโดยทั่วไป ได้แก่ ปริมาณเกลือและค่า pH ที่เติมเป็นสารช่วยย้อม เวลาในการต้มและอุณหภูมิในการย้อม [21] ซึ่งโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ทำหน้าที่เป็นเกลือ ในขณะที่โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ทำหน้าที่เป็นด่างสำหรับการย้อมผ้าฝ้ายในงานวิจัยนี้ ค่าความเข้มข้นและชนิดสีบนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด เมื่อใช้โซเดียมซัลเฟต 20-60 กรัมต่อลิตรและโซเดียมคาร์บอเนต 10-30 กรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 10

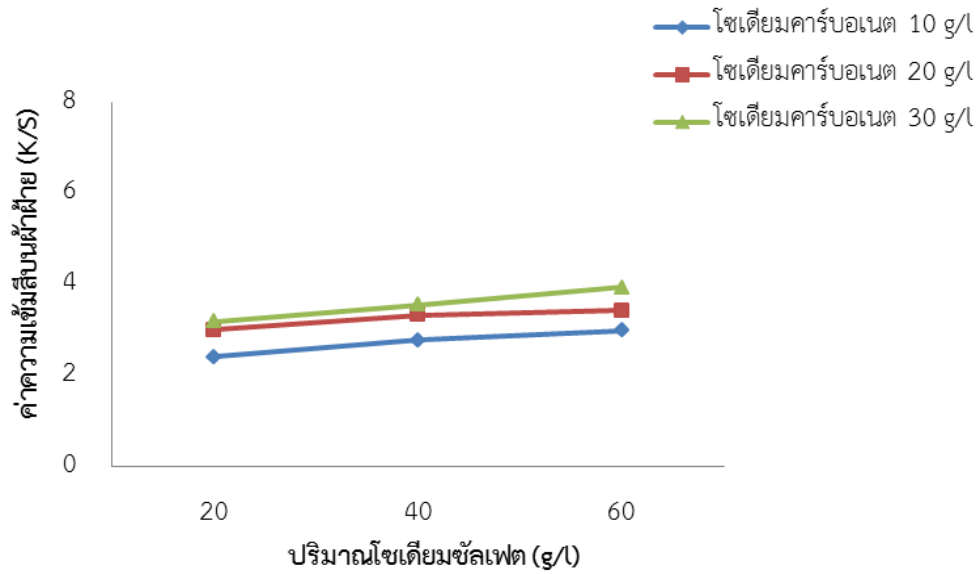
ผลการย้อมสี RD-1 ความเข้มข้น 0.5%owf บนผ้าฝ้ายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาทีแสดงดังรูปที่ 23 โซเดียมซัลเฟตที่เติมลงไปในการย้อมจะทำหน้าที่ในการช่วยลดแรงผลักระหว่างประจุลบของโมเลกุลสีและเส้นใยฝ้าย ดังนั้นเมื่อปริมาณโซเดียมซัลเฟตในน้ำย้อมเพิ่มสูงขึ้น โอกาสที่โมเลกุลสี RD-1 จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้เส้นใยฝ้ายจึงมีมากขึ้นทำให้ผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น ในขณะที่โซเดียมคาร์บอเนตจะทำให้หมู่ซัลฟาโทเอทิลซัลโฟเนตในโมเลกุลสี RD-1 เปลี่ยนเป็นหมู่ไวโนลซัลโฟเนตและเกิดปฏิกิริยาติดกับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลเซลลูโลสบนเส้นใยฝ้ายด้วยพันธะโควาเลนต์ [21] ดังรูปที่ที่ 22 เมื่อวิเคราะห์ผลการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสี RD-1 จากความเข้มข้น (K/S) บนผ้าในรูปที่ 23 พบว่าการใช้โซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตรและโซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตร คือปริมาณเกลือและค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับภาวะการย้อมสี RD-1



รูปที่ 22 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสี RD-1 และเส้นใยฝ้าย

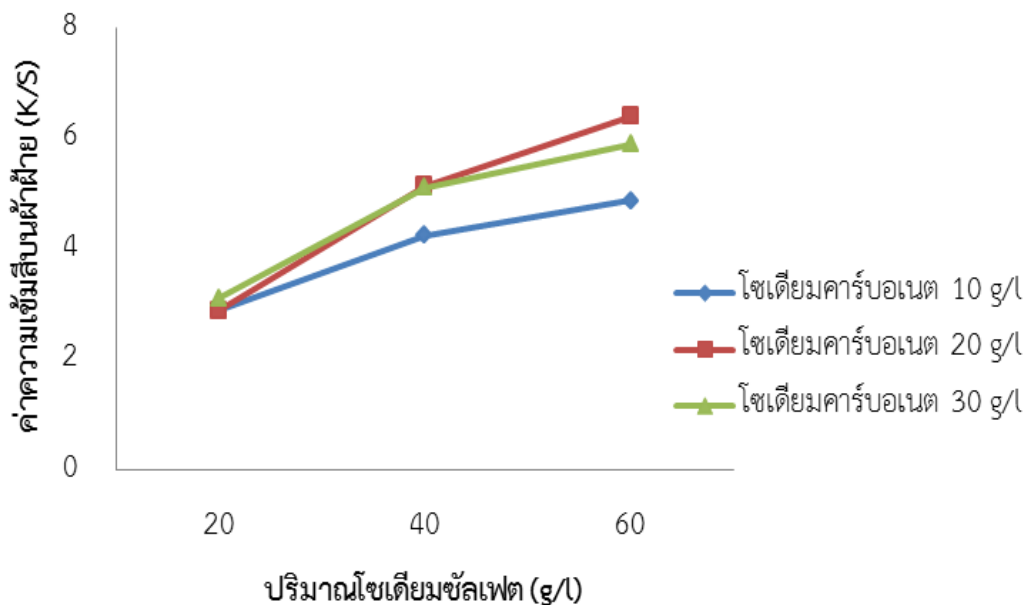
ตารางที่ 10 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้าฝ้ายเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน

สี	Na ₂ SO ₄ (g/l)	Na ₂ CO ₃ (g/l)	L*	a*	b*	K/S
RD-1	20	10	67.77	34.98	35.25	2.42
		20	65.67	37.10	37.40	3.01
		30	65.18	37.87	38.28	3.20
	40	10	66.34	36.80	36.61	2.79
		20	64.32	38.64	37.77	3.33
		30	63.58	38.87	38.33	3.56
	60	10	65.15	37.31	36.29	3.00
		20	64.62	38.95	39.36	3.44
		30	63.13	39.58	40.39	3.95
RD-2	20	10	71.13	26.86	46.99	2.90
		20	71.89	27.26	47.94	2.89
		30	71.60	27.84	49.38	3.12
	40	10	70.72	30.94	55.98	4.25
		20	68.66	31.47	56.92	5.15
		30	69.11	32.19	57.81	5.12
	60	10	67.80	31.94	54.25	4.88
		20	67.60	36.36	60.28	6.41
		30	67.95	34.21	59.12	5.90
RD-3	20	10	89.97	-5.53	30.26	1.72
		20	90.03	-5.67	29.48	1.60
		30	90.16	-5.73	29.9	1.64
	40	10	90.23	-6.09	32.07	2.03
		20	89.57	4.72	32.74	2.16
		30	89.27	-3.96	31.3	1.96
	60	10	89.92	-5.61	30.98	1.83
		20	89.53	-3.92	32.59	1.99
		30	90.04	-6.05	30.87	1.86

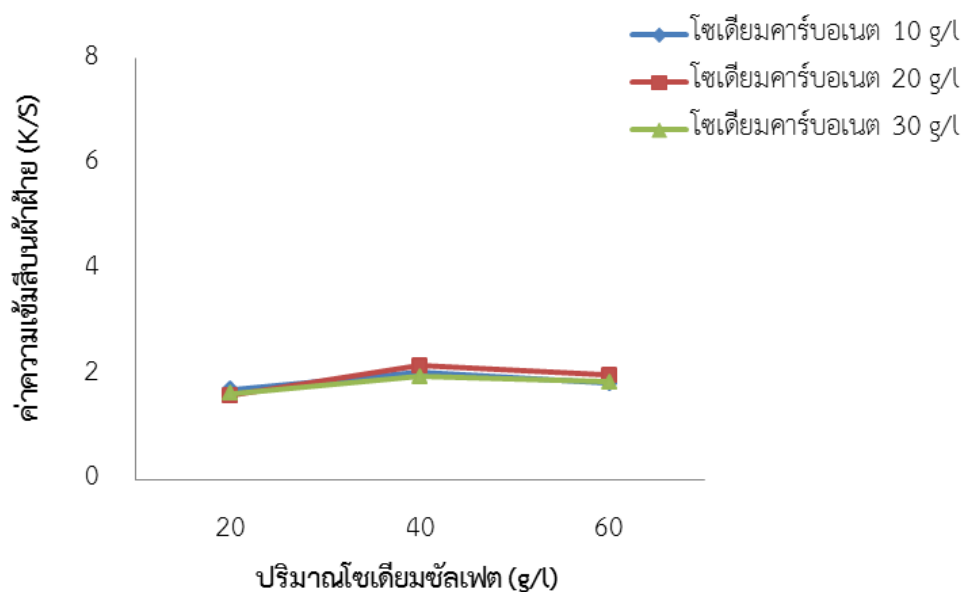


รูปที่ 23 ผลการศึกษาปริมาณโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตบนผ้าฝ้ายเมื่อย้อมด้วยสี RD-1

รูปที่ 24 แสดงผลการย้อมสี RD-2 ความเข้มข้น 1%owf บนผ้าฝ้ายถักที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที และรูปที่ 25 แสดงผลการย้อมสี RD-3 ความเข้มข้น 1%owf บนผ้าฝ้ายถักที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที พบว่าปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตร คือ ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 2 ชนิด แต่สี RD-2 ควรเติมโซเดียมคลอไรด์ 60 กรัมต่อลิตร ในขณะที่สี RD-3 ควรเติมโซเดียมคลอไรด์ 40 กรัมต่อลิตร ในการย้อมผ้าฝ้ายภายใต้ภาวะที่ทำการศึกษา



รูปที่ 24 ผลการศึกษาปริมาณโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตบนผ้าฝ้ายเมื่อย้อมด้วยสี RD-2



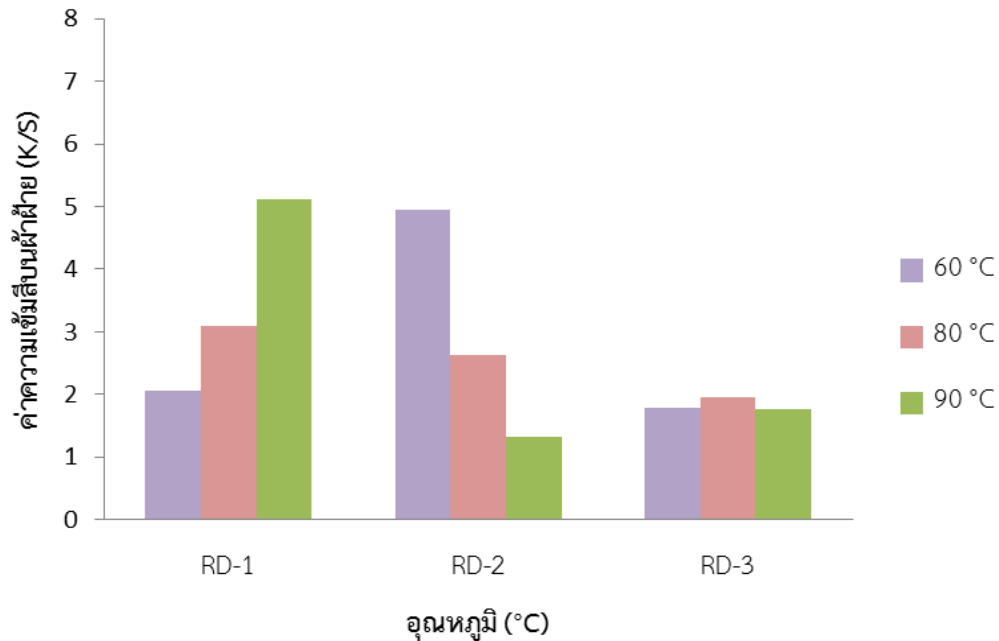
รูปที่ 25 ผลการศึกษาปริมาณโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตบนผ้าฝ้ายเมื่อย้อมด้วยสี RD-3

ตารางที่ 11 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้าฝ้ายที่อุณหภูมิการย้อมแตกต่างกัน

สี	อุณหภูมิ (°C)	L*	a*	b*	K/S	เฉดสี
RD-1	60	68.27	33.66	31.93	2.06	[Color scale bar from dark orange to light yellow]
	80	65.60	37.71	38.22	3.10	
	90	61.71	43.21	45.37	5.12	
RD-2	60	67.65	32.14	54.40	4.95	
	80	72.28	26.49	45.89	2.63	
	90	76.47	19.89	35.66	1.32	
RD-3	60	89.42	-5.24	31.39	1.78	
	80	89.34	-5.10	29.61	1.95	
	90	90.22	-5.73	29.10	1.77	

ตารางที่ 11 และรูปที่ 26 แสดงผลการศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิต่อค่าความเข้มสี (K/S) บนผ้าฝ้ายที่ถูกย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณเกลือและด่างที่เหมาะสมสำหรับภาวะการย้อมสีแต่ละชนิด ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย้อมจาก 60 เป็น 90 องศาเซลเซียส สี RD-1 จะมีความเข้มสีบนผ้า (K/S) เพิ่มสูงขึ้นจาก 2.06 เป็น 5.12 เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการย้อมทำให้โมเลกุลสีเคลื่อนไหวได้เพิ่มขึ้น พลังงานจลน์และอัตราการแพร่ของสีจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้สี RD-1 ซึมเข้าสู่เส้นใยผ้าได้มากขึ้น [22] แต่ในการย้อมสี RD-2 และ RD-3 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียสไม่ทำให้ความเข้มสีบนผ้าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสี RD-2 และ RD-3 มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าสี RD-1 อุณหภูมิการย้อมที่สูงเกินไปทำให้สีมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะเกิดการเคลื่อนที่เข้าและออกจากเส้นใยผ้า จึงไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซึมสีย้อมบนเส้นใย

ฝ้าย และสี RD-2 มีหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลสีซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลสี RD-2 อาจเกิดพันธะกับน้ำได้มากขึ้นทำให้ค่าความเข้มข้นสี RD-2 บนผ้าที่ย้อมด้วยอุณหภูมิสูงลดต่ำลง [18] ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสี RD-1 คือ 90 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสี RD-2 และ RD-3 คือ 60 องศาเซลเซียส

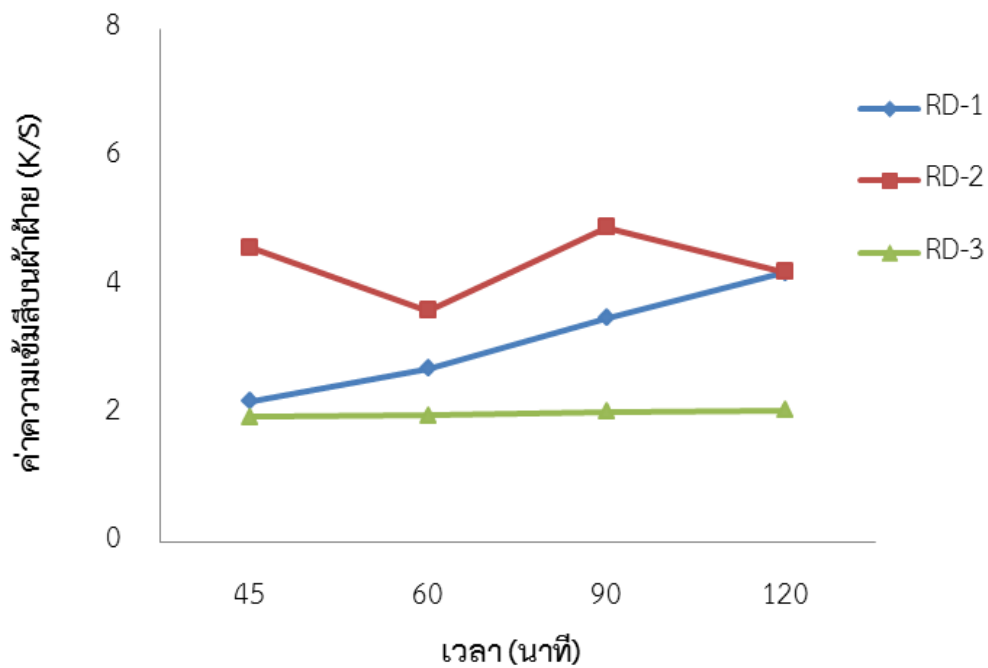


รูปที่ 26 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการย้อมบนผ้าฝ้ายเมื่อย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 12 และรูปที่ 27 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการย้อมภายหลังเติมโซเดียมคาร์บอเนตเมื่อถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสสำหรับสี RD-1 และ 60 องศาเซลเซียสสำหรับสี RD-2 และ RD-3 เป็นเวลา 30 นาที พบว่า การเพิ่มระยะเวลาเพื่อให้สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สเกิดปฏิกิริายึดติดกับโมเลกุลเซลลูโลสบนเส้นใยฝ้ายจะทำให้ความเข้มข้นของผ้าที่ผ่านการย้อมเพิ่มสูงขึ้น โดยระยะเวลาทั้งหมดในการย้อมที่เหมาะสมสำหรับสี RD-1 และ RD-2 คือ 90 นาที และสี RD-3 คือ 60 นาที เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการย้อมให้นานขึ้น ไม่พบความแตกต่างของค่าความเข้มข้นบนผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อม

ตารางที่ 12 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) บนผ้าฝ้ายที่เวลาการย้อมแตกต่างกัน

สี	เวลา (นาที)	L*	a*	b*	K/S
RD-1	45	67.65	33.90	32.14	2.19
	60	66.13	35.86	35.16	2.70
	90	64.34	38.62	39.15	3.49
	120	62.58	40.63	41.12	4.20
RD-2	45	68.40	31.71	53.76	4.59
	60	70.83	28.69	52.11	3.61
	90	67.95	31.97	54.76	4.90
	120	69.32	29.74	53.36	4.21
RD-3	45	89.43	-5.03	30.13	1.95
	60	89.28	-4.96	30.14	1.97
	90	89.47	-5.35	30.43	2.03
	120	89.53	-5.31	30.77	2.06



รูปที่ 27 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการย้อมบนผ้าฝ้ายเมื่อย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

ผลการศึกษาระดับปริมาณการใช้ผงสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด ความเข้มข้น 0.25–7 %owf แสดงในตารางที่ 13 พบว่าสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการยึดติดบนเส้นใยฝ้ายต่ำ เนื่องจากสีทั้ง 3 ชนิดไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อปริมาณผงสีที่ใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความเข้มสีของผ้าฝ้ายเพิ่มสูงขึ้น ผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสี RD-1 และ RD-2 เมื่อเพิ่มปริมาณสีที่สูงขึ้นจะมีความแดง (a^*) และเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นแต่มีความสว่างของผ้า (L^*) ลดลงทำให้ผ้าที่ย้อมด้วยสี RD-1 มีสีส้ม-แดง (Yellowish red) และผ้าที่ย้อมด้วยสี RD-2 มีสีส้ม (Orange) ในขณะที่สี RD-3 เมื่อเพิ่มปริมาณสีที่สูงขึ้นจะมีความเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นแต่มีความสว่างของผ้า (L^*) ลดลงทำให้ผ้าที่ย้อมมีเฉดสีเหลือง (Greenish yellow) [23]

ตารางที่ 13 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้าฝ้ายที่ปริมาณสี (%owf) แตกต่างกัน

สี	ปริมาณสี (%owf)	L^*	a^*	b^*	K/S	เฉดสี
RD-1	0.25	68.86	34.30	35.24	2.24	
	0.5	66.38	35.04	34.38	2.53	
	1	61.41	40.09	40.53	4.39	
	3	57.32	41.94	41.17	5.94	
	5	54.74	42.53	41.75	7.25	
	7	52.77	43.54	42.71	8.68	
RD-2	0.25	77.91	21.79	41.48	1.50	
	0.5	73.94	26.89	48.02	2.55	
	1	67.59	32.24	55.52	5.24	
	3	62.65	34.96	60.95	9.48	
	5	58.42	36.21	62.27	14.03	
	7	55.81	35.76	61.85	17.13	
RD-3	0.25	91.99	-1.15	7.66	0.14	
	0.5	92.05	-1.55	9.44	0.19	
	1	89.28	-4.96	30.14	1.97	
	3	86.63	-3.42	38.86	3.50	
	5	84.75	-1.61	46.20	5.37	
	7	84.28	-1.19	47.22	6.18	

จากผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส พบว่าสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมการติดสีที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องใช้ภาวะในการย้อมที่แตกต่างกัน ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้าฝ้ายแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ภาวะในการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

สี	สารช่วยย้อม (g/l)		อุณหภูมิการย้อม (°C)	เวลาการย้อมทั้งหมด (นาที)
	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃		
RD-1	40	20	90	90
RD-2	60	20	60	90
RD-3	40	20	60	60

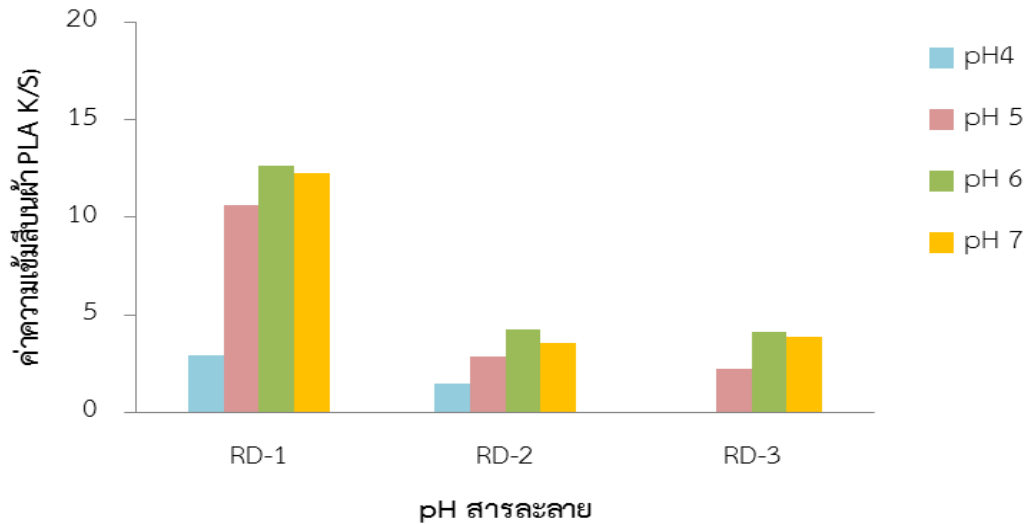
2.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าฝ้าย PLA

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมสีดิสเพิร์สบนเส้นใยสังเคราะห์โดยทั่วไป ได้แก่ pH ของสารละลายสีย้อม อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการย้อม [24] ผลการศึกษาย้อมผ้า PLA ในสารละลายสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดที่ pH 4-7 ภายใต้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยสี RD-1 ความเข้มข้นที่ใช้ คือ 0.5 %owf ในขณะที่สี RD-2 และ RD-3 ความเข้มข้นที่ใช้ คือ 1 %owf ร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตร แสดงในตารางที่ 15 และรูปที่ 28

ตารางที่ 15 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้า PLA ที่ pH ของสารละลายสีต่างๆ

สี	pH สารละลาย	L*	a*	b*	K/S	เฉดสี
RD-1	4	68.64	31.89	40.13	2.92	
	5	58.50	44.41	55.65	10.62	
	6	57.91	46.76	55.22	12.64	
	7	57.79	46.20	54.32	12.25	
RD-2	4	85.05	1.38	25.97	1.49	
	5	82.51	4.80	35.97	2.88	
	6	80.72	7.62	41.19	4.23	
	7	81.24	6.16	38.61	3.57	
RD-3	5	87.91	-7.06	31.43	2.24	
	6	87.74	-8.66	34.14	4.14	
	7	88.04	-9.35	32.47	3.89	

ผลการศึกษา pH ของสารละลายสีย้อมต่อความเข้มสีบนผ้า PLA พบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับย้อมผ้าฝ้าย PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด คือ pH 6 เนื่องจากให้ค่าความเข้มสี (K/S) สูงสุดบนผ้า PLA ที่ผ่านการย้อม ผ้า PLA ที่ถูกย้อมด้วยสี RD-1 จะมีเฉดสีส้มแดง ในขณะที่ผ้า PLA ที่ถูกย้อมด้วยสี RD-2 และ RD-3 จะมีเฉดเหลือง โดยผ้า PLA ที่ถูกย้อมด้วยสี RD-3 จะให้ความเขียว (a*) และมีความสว่าง (L*) มากกว่าผ้า PLA ที่ถูกย้อมด้วยสี RD-2

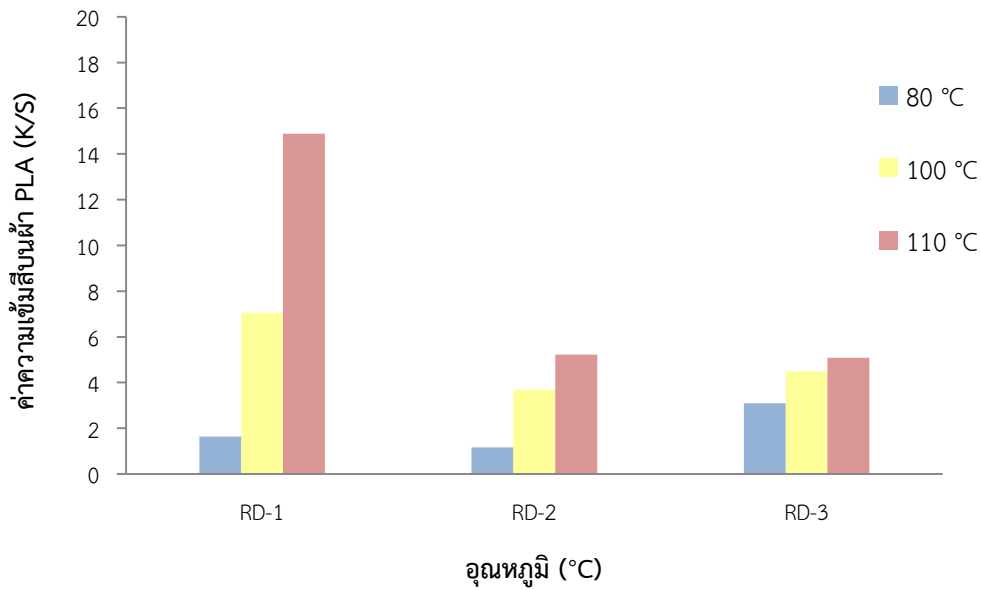


รูปที่ 28 ผลการศึกษา pH ของสารละลายสีในการย้อมบนผ้า PLA เมื่อย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

การย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดในสารละลายสีย้อม pH 6 โดยสี RD-1 ความเข้มข้นที่ใช้ คือ 0.5 %owf ในขณะที่ RD-2 และ RD-3 ความเข้มข้นที่ใช้ คือ 1 %owf ร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตร ผลการย้อมผ้า PLA ที่อุณหภูมิ 80-110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แสดงในตารางที่ 16 และรูปที่ 29 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการย้อมผ้า PLA สูงขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นสีของผ้าภายหลังการย้อมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ PLA เกิดการเคลื่อนไหว โมเลกุลสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สจึงสามารถแพร่เข้าสู่ภายในเส้นใย PLA ได้ [25-26] ซึ่งอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับย้อมผ้าสัก PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด และจากการศึกษาพบว่า เส้นใย PLA ไม่ควรทำการย้อมที่อุณหภูมิสูงเกิน 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากทำให้โมเลกุล PLA เกิดการสลายตัว ผ้า PLA จะเริ่มเปื่อยและมีความแข็งแรงลดลง [27]

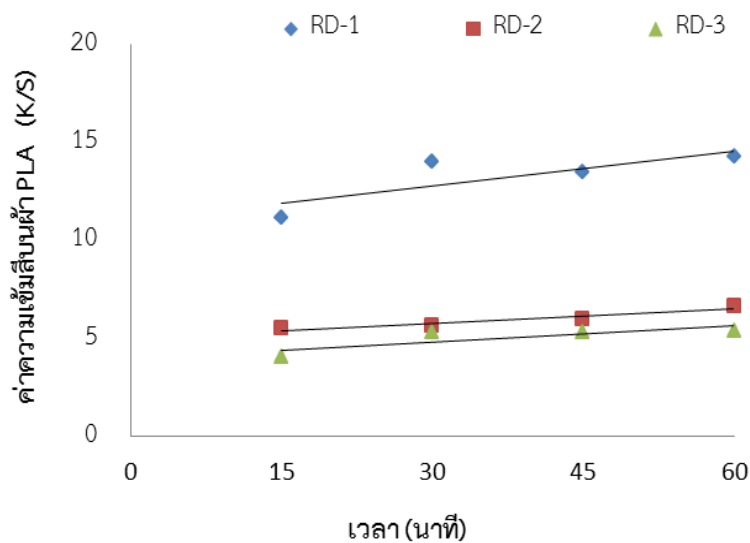
ตารางที่ 16 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้า PLA ที่อุณหภูมิต่างๆ

สี	อุณหภูมิ (°C)	L*	a*	b*	K/S	เฉดสี
RD-1	80	72.57	26.70	32.92	1.64	[Color swatches for RD-1]
	100	61.36	42.96	49.19	7.06	
	110	54.92	46.70	54.13	14.89	
RD-2	80	84.95	0.35	21.88	1.17	[Color swatches for RD-2]
	100	80.30	6.08	37.95	3.68	
	110	97.31	7.59	42.40	5.23	
RD-3	80	88.75	-5.38	37.19	3.10	[Color swatches for RD-3]
	100	87.92	-9.15	38.08	4.49	
	110	88.42	-9.18	39.76	5.09	



รูปที่ 29 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการย้อมบนผ้า PLA เมื่อย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 17 และรูปที่ 30 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการย้อมผ้าสัก PLA ในสารละลายสีย้อม pH 6 โดยสี RD-1 ความเข้มข้นที่ใช้ คือ 0.5 %owf ในขณะที่ RD-2 และ RD-3 ความเข้มข้นที่ใช้ คือ 1 %owf ร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการย้อม 15-60 นาที พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการย้อมจะช่วยให้สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สแพร่เข้าสู่ภายในเส้นใย PLA ได้มากขึ้นทำให้ความเข้มสีของผ้า PLA ภายหลังการย้อมเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสี RD-1 และ RD-3 คือ 30 นาที ในขณะที่สี RD-2 ใช้เวลาในการย้อม 60 นาที เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการย้อมให้นานขึ้น ไม่มีผลต่อความเข้มสีบนผ้า PLA ที่ผ่านการย้อม



รูปที่ 30 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการย้อมเมื่อย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 17 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด บนผ้า PLA ที่เวลาแตกต่างกัน

สี	เวลา (นาที)	L*	a*	b*	K/S
RD-1	15	58.70	45.99	54.40	11.19
	30	56.97	48.09	56.02	14.03
	45	57.21	47.76	55.61	13.51
	60	56.81	48.04	56.09	14.31
RD-2	15	78.54	8.34	42.82	5.52
	30	78.86	8.32	43.27	5.67
	45	77.99	8.49	43.26	6.03
	60	76.93	9.26	44.49	6.70
RD-3	15	88.52	-9.38	34.49	4.08
	30	88.27	-9.88	39.73	5.33
	45	88.39	-9.36	39.78	5.34
	60	82.55	-3.30	41.30	5.44

จากผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส พบว่าสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดมีภาวะในการย้อมที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 18 ซึ่งเมื่อทำการย้อมผ้าสัก PLA ภายใต้ภาวะดังกล่าวด้วยปริมาณผงสีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ความเข้มข้น 0.25–7 %owf พบว่าเมื่อปริมาณผงสีที่ใช้ในการย้อมผ้า PLA สูงขึ้นจะทำให้ความเข้มสีของผ้า PLA เพิ่มขึ้นดังตารางที่ 19 ผ้า PLA ที่ถูกย้อมด้วยสี RD-1 เมื่อใช้ปริมาณผงสีที่สูงขึ้น ผ้า PLA จะมีความแดง (a*) ความเหลือง (b*) และความสว่าง (L*) ลดลงทำให้ผ้าที่ย้อมมีเฉดสีส้ม-แดง (Yellowish red) ในขณะที่ผ้า PLA ที่ถูกย้อมด้วยสี RD-2 และ RD-3 ผ้า PLA จะมีความแดง (a*) และความเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นแต่มีความสว่าง (L*) ลดลง ผ้าที่ย้อมด้วยสี RD-2 มีสีเหลืองตุ่น (Yellowish orange) และผ้าที่ย้อมด้วยสี RD-3 มีสีเหลือง (Greenish yellow) [23]

ตารางที่ 18 ภาวะในการย้อมผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

สี	pH ของสารละลาย สีย้อม	อุณหภูมิการย้อม (°C)	เวลาการย้อม (นาที)
RD-1	6	110	30
RD-2	6	110	60
RD-3	6	110	30

ตารางที่ 19 ผลการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้า PLA ที่ปริมาณสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สแตกต่างกัน

สี	ปริมาณสี (%owf)	L*	a*	b*	K/S	เฉดสี
RD-1	0.25	59.27	46.81	54.66	10.95	
	0.5	56.14	49.51	57.20	15.57	
	1	50.20	49.92	51.72	18.78	
	3	47.42	48.33	46.62	18.32	
	5	45.86	46.43	42.86	17.26	
	7	40.80	42.51	34.87	17.13	
RD-2	0.25	85.44	1.43	26.34	1.49	
	0.5	83.14	3.24	32.27	2.36	
	1	76.87	9.04	44.27	6.72	
	3	70.21	11.73	44.36	9.57	
	5	65.95	12.73	46.44	13.18	
	7	63.07	13.70	47.55	16.08	
RD-3	0.25	87.68	-6.15	29.45	2.04	
	0.5	85.59	-5.66	35.53	3.28	
	1	88.52	-9.38	34.49	4.08	
	3	83.03	-5.25	56.42	12.53	
	5	79.11	-1.22	59.38	13.99	
	7	74.06	3.26	63.03	15.63	

3. ผลการย้อมผ้าถักผสม PLA/ฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส

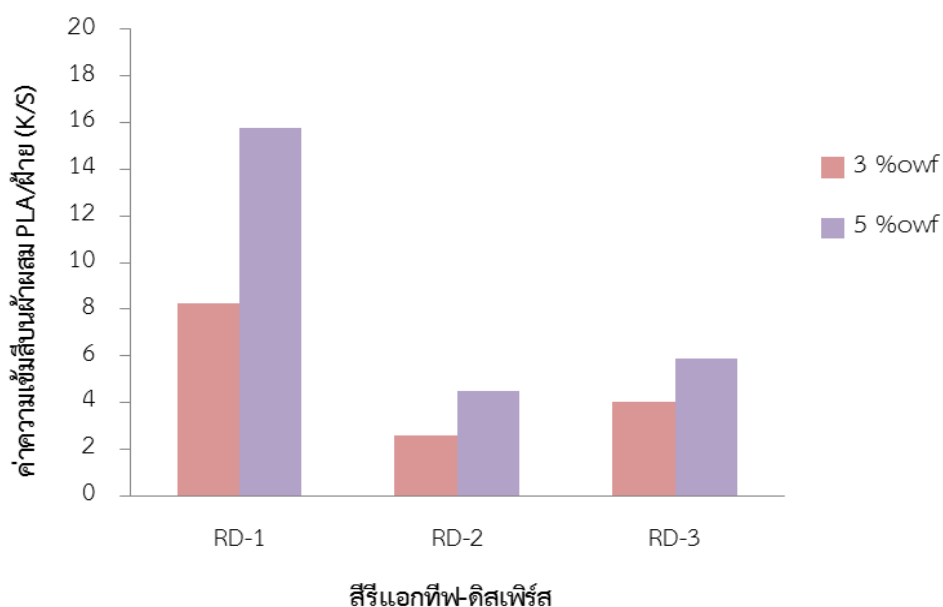
จากผลการศึกษาภาวะในการย้อมผ้าฝ้ายและผ้า PLA ด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด คือ สี RD-1 สี RD-2 และสี RD-3 ผู้วิจัยจึงได้กำหนดภาวะที่ใช้ในการย้อมผ้าถักผสม PLA/ฝ้ายดังแสดงในตารางที่ 20 ซึ่งการย้อมผ้าถักผสม PLA/ฝ้ายจะทำการย้อมที่ความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์ส 3 %owf และ 5 %owf ร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ตามปริมาณในตารางที่ 25 ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 6 โดยจะทำการย้อมเส้นใย PLA บนผ้าผสม PLA/ฝ้ายก่อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิลงเพื่อทำการย้อมเส้นใยฝ้ายที่อุณหภูมิ 60 หรือ 80 องศาเซลเซียส เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ลงไปในกระบอกย้อมเมื่อถึงอุณหภูมิการย้อมเป็นเวลา 30 นาที และทำการย้อมผ้าผสมต่อจนครบกำหนดเวลา ผ้าผสม PLA/ฝ้ายภายหลังผ่านการย้อมแล้วจะถูกนำมากำจัดสีส่วนเกินออก (กระบวนการ RC) ผลการย้อมผ้าถักผสม PLA/ฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 21 และรูปที่ 31

ตารางที่ 20 ภาวะที่เหมาะสมในการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้าย

สี	LR	Na ₂ SO ₄ (g/l)	ภาวะการย้อมเส้นใย PLA			ภาวะการย้อมเส้นใยฝ้าย		
			pH	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	Na ₂ CO ₃ (g/l)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)
RD-1	20:1	40	6	110	30	20	80	90
RD-2	20:1	60			30	20	60	90
RD-3	20:1	40			30	20	60	60

ตารางที่ 21 ผลการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้ายด้วยสีย้อมฟลิว-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด

สี	ปริมาณสี (%owf)	L*	a*	b*	K/S	เฉดสี
RD-1	3	56.50	47.13	47.22	8.24	
	5	50.41	50.08	50.85	15.79	
RD-2	3	78.21	19.15	43.90	2.59	
	5	74.68	22.17	49.93	4.49	
RD-3	3	86.65	-2.11	38.06	4.04	
	5	84.79	-1.17	42.51	5.87	



รูปที่ 31 ความเข้มสีของสีย้อมฟลิว-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้าผสม PLA/ฝ้าย

ผลการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด พบว่าผ้าผสม PLA/ฝ้ายที่ย้อมด้วยสี RD-1 จะให้สีส้มแดง โดยที่ความเข้มข้นของสี RD-1 3 %owf เส้นใย PLA จะให้ความเข้มสีสูงกว่าเส้นใยฝ้ายบน ผ้าผสมทำให้ผ้าผสม PLA/ฝ้ายมีการติดสีไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสี RD-1 เป็น 5%owf การสังเกตด้วยตาจะพบความสม่ำเสมอของผ้าผสม โดยเส้นใย PLA และเส้นใยฝ้ายมีความเข้มสีที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่สี RD-2 และ RD-3 จะให้เฉดสีเหลืองบนผ้าผสม PLA/ฝ้าย และมีการติดสีอย่างสม่ำเสมอทั้งบนเส้นใย ฝ้ายและเส้นใย PLA บนผ้าผสมเมื่อทำการย้อมที่ความเข้มข้นของสี 3 %owf และ 5 %owf

4. ผลการทดสอบความคงทนต่อสีบนผ้า

เมื่อนำผ้าฝ้ายและผ้า PLA ที่ผ่านการย้อมให้มีค่าความเข้มสีใกล้เคียงกัน (K/S ประมาณ 5) มาทดสอบ ความคงทนของสีต่อการซัก ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 22 พบว่า สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดยึดติดบนผ้า PLA ได้ดีกว่าผ้าฝ้าย โดยสี RD-2 จะมีค่าความคงทนของสีต่อการซักบนผ้า PLA และผ้าฝ้ายอยู่ในเกณฑ์ดีมาก สี RD-3 จะมีค่าความคงทนของสีต่อการซักบนผ้า PLA และผ้าฝ้ายอยู่ในเกณฑ์ดี โดยสี RD-3 ที่ย้อมติดบนผ้าฝ้าย เป็นย้อมติดบนเส้นใยอะซิเตต (acetate) และเส้นใยไนลอน (Nylon) ปานกลาง ในขณะที่สี RD-1 มีค่าความคงทน ของสีต่อการซักบนผ้า PLA อยู่ในเกณฑ์ดี แต่มีความคงทนของสีต่อการซักบนผ้าฝ้ายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง สี RD-1 ที่ย้อมติดบนผ้าฝ้ายเป็นย้อมติดสีบนเส้นใยอะซิเตต ไนลอน พอลิเอสเตอร์ (PET) และขนสัตว์ (wool)

ตารางที่ 22 ความคงทนต่อการซักของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (K/S ~ 5) บนผ้า PLA และผ้าฝ้าย

สี	ผ้า	Change	Staining					
			Acetate	Cotton	Nylon	Polyester	Acrylic	Wool
RD-1	PLA	5	5	5	5	5	5	5
	ฝ้าย	3/4	1	4	2/3	4	4/5	2/3
RD-2	PLA	5	5	5	5	5	5	5
	ฝ้าย	5	5	5	5	5	5	4/5
RD-3	PLA	4/5	5	5	4/5	5	5	5
	ฝ้าย	4	3	5	3	4/5	5	4/5

สมบัติด้านความคงทนของสีต่อการซักของผ้าผสม PLA/ฝ้ายที่ย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 23 เห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณสีในการย้อมผ้าผสมต่ำ (3 %owf) ผ้าผสมที่ผ่านการย้อมจะมีความ คงทนของสีต่อการซักสูงกว่าการใช้ปริมาณสีในการย้อมสูง (5 %owf) เนื่องจากผ้าผสม PLA/ฝ้ายที่ย้อมด้วย สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สความเข้มข้น 3%owf จะมีค่าความเข้มสี (K/S) ต่ำกว่าผ้าผสมที่ย้อมด้วยสีย้อมความเข้มข้น 5%owf และสี RD-1 มีความเข้มสีบนผ้าผสมสูงกว่าสี RD-2 และ RD-3 จึงมีผลทำให้ความคงทนของสีบนผ้าผสม ที่ย้อมด้วยสี RD-1 ต่ำกว่าสี RD-2 และ RD-3

พฤติกรรมการณ์ติดสีบนผ้าผสม PLA/ฝ้าย ของสี RD-2 ต่อสมบัติการซักพบว่า สี RD-2 เมื่อผ่านการซักครั้งที่ 1 ผ้าผสมจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีส้ม ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงระดับเฉดสีบนผ้าผสมต่ำ (color change = 1) แต่เมื่อนำผ้าผสม PLA/ฝ้ายมาทำการซักครั้งที่ 2 ผ้าผสมจะยังคงมีสีส้มอยู่จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับเฉดสีบนผ้าผสม (color change = 4/5) และความสามารถในการเปื้อนติดบนเส้นใยชนิดอื่นของสี RD-2 บนผ้าผสมอยู่ในเกณฑ์ดีมาก

ตารางที่ 23 ความคงทนต่อการซักของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้าผสม PLA/ฝ้าย

สี	owf	K/S	Color Change	Staining						
				Acetate	Cotton	Nylon	PET	Acrylic	Wool	
RD-1	3	8.24	3/4	1/2	3/4	3	3/4	4/5	3	
	5	15.79	3/4	1	3/4	2/3	3/4	4/5	2/3	
RD-2	3	2.59	1	5	5	5	5	5	4/5	
	5	4.49	1	5	5	5	5	5	4/5	
RD-2*	3	2.43	4/5	5	5	5	5	5	5	
	5	4.25	4/5	5	5	5	5	5	4/5	
RD-3	3	4.04	5	3/4	5	3/4	5	5	5	
	5	5.87	4/5	3	5	3	5	5	5	
หมายเหตุ		RD-2*	คือ ผ้าผสม PLA/ฝ้ายที่ผ่านการซักครั้งที่ 2				เปรียบเทียบกับเฉดสีกับผ้าผสม PLA/ฝ้ายที่ผ่านการซักครั้งที่ 1 ผ้าผสม PLA/ฝ้ายก่อนการซัก			

ผลการทดสอบความคงทนของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดต่อการขัดถูบนผ้า PLA ฝ้ายและผ้าผสม PLA/ฝ้ายทั้งในภาวะเปียกและภาวะแห้งแสดงในตารางที่ 24 พบว่าสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดมีความคงทนต่อการขัดถูทั้งภาวะเปียกและภาวะแห้งบนผ้า PLA และฝ้ายอยู่ในเกณฑ์ดี-ดีมาก แต่เมื่อทำการย้อมสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สบนผ้าผสม PLA/ฝ้ายจะทำให้สมบัติด้านความคงทนต่อการขัดถูของผ้าผสม PLA/ฝ้ายลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับย้อมบนผ้า PLA หรือฝ้าย

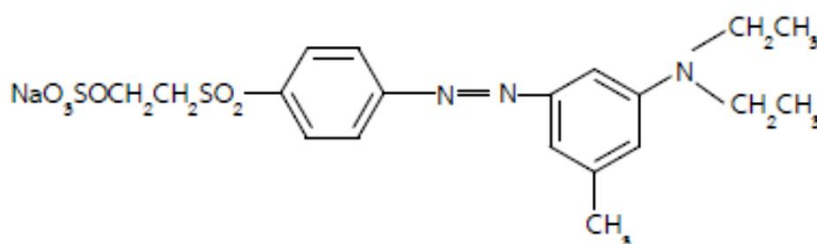
ตารางที่ 24 ความคงทนต่อการขัดถูของสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้า PLA ผ้าฝ้ายและผ้าผสม PLA/ฝ้าย

สี	ปริมาณสี (%owf)	ผ้า	K/S	Rubbing	
				Dry	Wet
RD-1	1	PLA	18.78	4/5	4
	1	ฝ้าย	4.39	5	4
	3	PLA/ฝ้าย	8.24	4	3/4
	5	PLA/ฝ้าย	15.79	3/4	3
RD-2	1	PLA	6.72	5	5
	1	ฝ้าย	5.24	5	5
	3	PLA/ฝ้าย	2.59	5	4/5
	5	PLA/ฝ้าย	4.49	5	4/5
RD-3	1	PLA	4.08	4/5	5
	1	ฝ้าย	1.97	5	4
	3	PLA/ฝ้าย	4.04	4/5	4/5
	5	PLA/ฝ้าย	5.87	4	3/4

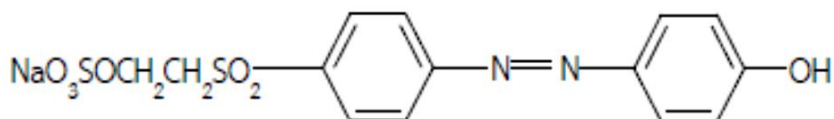
สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

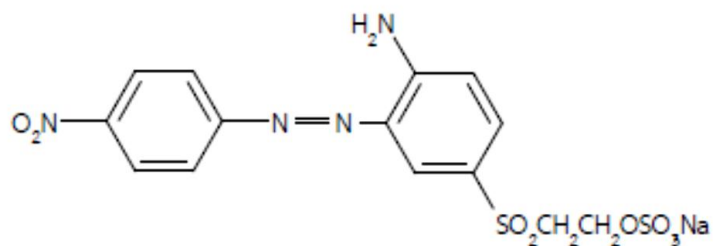
1. สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สชนิด RD-1 สังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Amino phenyl-4-(β -sulphatoethylsulphone) และ N,N-diethyl-m-toluidine มีค่าร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 72 โครงสร้างสีแสดงดังนี้



2. สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สชนิด RD-2 สังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Amino phenyl-4-(β -sulphatoethylsulphone) และฟีนอล (phenol) มีค่าร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 20 โครงสร้างสีแสดงดังนี้



3. สีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สชนิด RD-3 สังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง 4-nitro aniline และ Aminophenyl-4-(β -sulphatoethylsulphone) มีค่าร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 38 โครงสร้างสีแสดงดังนี้



4. สิริแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด สามารถย่อยติดสึบนผ้าฝ้าย โดยสี RD-1 ให้เฉดสีส้ม-แดง สีRD-2 ให้เฉดสีส้มและสี RD-3 ให้สีเหลือง ซึ่งภาวะที่ใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายของสีทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกัน ดังนี้

- สี RD-1 เตรียมสารละลายสีร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตรเป็นต่างในการเกิดปฏิกิริยายึดติดของสึบนเส้นใยฝ้าย
- สี RD-2 เตรียมสารละลายสีร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต 60 กรัมต่อลิตร ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตรเป็นต่างในการเกิดปฏิกิริยายึดติดของสึบนเส้นใยฝ้าย
- สี RD-3 เตรียมสารละลายสีร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตรเป็นต่างในการเกิดปฏิกิริยายึดติดของสึบนเส้นใยฝ้าย

5. สิริแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด สามารถย่อยติดสึบนผ้าฝ้าย PLA ได้ดี โดยสี RD-1 ให้เฉดสีส้ม-แดง สี RD-2 และสี RD-3 ให้เฉดสีเหลือง ซึ่งสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด ทำการย้อมภายใต้ภาวะเดียวกัน คือ เตรียมสารละลายสีร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตร ปรับ pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส สี RD-1 และสี RD-3 ใช้เวลาในการย้อม 30 นาที แต่สี RD-2 ให้ใช้เวลาในการย้อม 60 นาที

6. การย้อมผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้าย ด้วยผงสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด พบว่าผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้ายที่ย้อมด้วยสี RD-1 จะมีสีส้ม-แดง ในขณะที่ย้อมด้วยสีRD-2 และสี RD-3 จะให้สีเหลือง วิธีการย้อมผ้าผสม PLA/ฝ้ายทำได้โดยการย้อมเส้นใย PLA บนผ้าผสมเป็นขั้นตอนแรกหลังจากนั้นจึงค่อยทำการย้อมเส้นใยฝ้ายบนผ้าผสม ดังนี้

- สี RD-1 เตรียมสารละลายสีร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 6 ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิเพื่อย้อมเส้นใยฝ้ายที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จึงเติมโซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตรและทำการย้อมต่ออีก 60 นาทีเพื่อให้เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสีและเส้นใยฝ้าย
- สี RD-2 เตรียมสารละลายสีร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต 60 กรัมต่อลิตร ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 6 ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิเพื่อย้อมเส้นใยฝ้ายที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จึงเติมโซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตรและทำการย้อมต่ออีก 60 นาทีเพื่อให้เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสีและเส้นใยฝ้าย
- สี RD-3 เตรียมสารละลายสีร่วมกับสารช่วยกระจายตัว 1 กรัมต่อลิตรและโซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 6 ทำการย้อมที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เวลา 30

นาที่ จากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิเพื่อย้อมเส้นใยฝ้ายที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จึงเติมโซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตรและทำการย้อมต่ออีก 30 นาทีเพื่อให้เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสีและเส้นใยฝ้าย

7. ผ้าฝ้าย PLA ที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) มีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในเกณฑ์ดี-ดีมาก ในขณะที่ความคงทนของสีต่อการซักบนผ้าฝ้ายและผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้ายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง-ดี

8. ผ้าฝ้าย ฝ้าย PLA และผ้าฝ้ายผสม PLA/ฝ้ายที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิด (RD-1 RD-2 และ RD-3) มีความคงทนต่อการซักดูในภาวะแห้งอยู่ในเกณฑ์ดี-ดีมากและภาวะเปียกอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง-ดี

ข้อเสนอแนะ

- ทำการสังเคราะห์สรีรเอกทีพี-ดิสเพิร์สชนิดใหม่ให้สามารถย่อยติดสีบนเส้นใยฝ้ายได้ดีขึ้นจากสารตั้งต้นชนิดอื่น
- ศึกษาการติดสีรีเอกทีพี-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนเส้นใยชนิดอื่นเพื่อหาชนิดของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้สรีเอกทีพี-ดิสเพิร์สในการย้อม พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยและกระบวนการย้อมผ้าผสมชนิดอื่นให้สามารถย่อยติดสีที่สม่ำเสมอในขั้นตอนเดียว
- ทำการศึกษาการติดสีรีเอกทีพี-ดิสเพิร์สทั้ง 3 ชนิดบนผ้า PET เพื่อเปรียบเทียบผลการติดสีรีเอกทีพี-ดิสเพิร์สบนผ้า PET และผ้า PLA

เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

- [1]. National Innovation Agency. 2008. National Roadmap for the Development of Bioplastics Industry : proposal (ฉบับร่าง). 1 March 2008
- [2]. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2554
- [3]. <http://www.natureworksllc.com>.
- [4]. Farrington, W.W., Davies, J. L. S., and Blanckburn, R.S. 2005. Poly(lactic acid) fiber. Biodegradable and sustainable fibres. 191-220.
- [5]. Avinc, O., and Khoddami, A. 2010. Overview of Poly(lactic acid) (PLA) fiber: Part II: Wet processing; Pretreatment , Dyeing, Clearing, Finishing, and Washing Properties of Poly(lactic acid) Fibers. Fiber Chemistry, Vol. 42(1): 68-78.
- [6]. Gupta, B., Revagade, N., and Hiborn, J. 2007. Poly(lactic acid) fiber: An Overview. Progress in Polymer Science. Vol. 32: 455-482.
- [7]. Farrington, W.W., Davies, J. L. S., and Blanckburn, R.S. 2005. Poly(lactic acid) fiber. Biodegradable and sustainable fibres, 191-220.
- [8]. Dorgan J R, Lehermerier H, Mang M. 2000. Thermal and rheological properties of commercial-grade poly(lactic acid)s. Journal of Polymer and the Environmental, Vol. 8: 1-9.
- [9]. Phatthalung, N. I., Sae-be, P., Suesat, J., Suwanruji, P., and Soonsinpai, N. 2012. Investigation of the Optimum Pretreatment Conditions for the Knitted Fabric Derived from PLA/Cotton Blend. International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics. Vol. 2(3): 179-182.
- [10]. Nakumara, T. 2003. International Textile Bulletin. Vol. 4: 68.
- [11]. Perkins, W.S. 1996. Textile Coloration and Finishing. Carolina Academic Press.
- [12]. Yang, Y.Q. and Huda, S. 2003. AATCC Review. Vol. 3(8): 56.
- [13]. Suesat, J., Sae-be, P., and Suwanruji, P. 2012. Effect of Pretreatment and Dyeing Processes on the Physical Properties of Poly (Lactic Acid)/Cotton) Blended Fabric. Advanced Materials Research. vol. 486: 253-259.
- [14]. Nakumara, T. 2003. International Textile Bulletin. Vol. 4: 68.
- [15]. Yang, Y.Q. and Huda, S. 2003. AATCC Review. Vol. 3(8): 56.
- [16]. Karst, D., Nama, D., and Yang, Y. 2007. Effect of disperse dye structure on dye sorption onto PLA fiber. Journal of Colloid and Interface Science. 310: 106-111.
- [17]. Bae, J.S., Park, J.H., Koh, J., and Kim, S.D. 2006. Dyeing and Fastness Properties of a Reactive Disperse Dye on PET, Nylon, Silk and N/P Fabrics. Fiber and Polymers. Vol. 7(2): 174 – 179.

- [18]. Kim, S.D., Lee, H.Y., Choi, Y.J., and Lee, J.L. 2011. Dyeing Characteristics of Nylon, Cotton, and N/C Mixture Fabrics with Reactive-Disperse Dyes Containing a Sulphatoethylsulphone Group. *Fiber and Polymers*. Vol. 12(7): 932 – 938.
- [19]. Kim, S.D., Choi, Y.J., Lee, H.Y., and Lee, J.L. 2012. Dyeing Properties of Nylon, PET, and N/P Mixture Fabrics with Reactive-Disperse Dyes Having a Sulphatoethylsulphone Group. *Fiber and Polymers*. Vol. 13(2): 199 – 205.
- [20]. Young, R.J. and P.A. Lovell. 1991. *Introduction to Polymers*, 2nd edition., Chapman and hall. 287-290.
- [21]. Broadbent, A.D. 2001. *Basic Principles of Textile Coloration*, Society of Dyers and Colourists, England.
- [22]. Gamal, A.M., S.A. Farha, H.B. Sallam, G.E.A. Mahmoud and L.F.M. Ismail. 2010. Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of reactive dyes adsorption onto cotton fiber. *Nature and Science*. 8 (11): 95-110.
- [23]. Society of Dyers and Colourists. 2008. *Colour Index for Dyes*. Available Source: <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/3117>, June 18, 2015.
- [24]. Koh, J.S. 2011. Dyeing with disperse dyes. *Textile Dyeing*. 195-220.
- [25]. Sisodia, N. and M.S. Parmar. 2014. Dyeing behavior and fastness properties of corn (PLA) fiber. *Journal of Polymer and Textile Engineering*. 1 (2): 1-7.
- [26]. Phillips, D., J. Suesat, J.A. Taylor, M. Wilding, D. Farrington, J. Bone and S. Dervan. 2003. Effect of heat setting on dimensional stability and dyeing properties of Poly(lactic acid) fibres. *Coloration Technology*. 119 (3): 128-133.
- [27]. Kameoka, T., I. Kawamura, I. Ghoda, M. Ajioka, K. Takuma, A. Yamaguchi and H. Suizu. 1997. *Dyeing Method*. U.S. Patent Number 5,630,849.