การย้อมสีอินดิโกบนเส้นด้ายฝ้ายโดยใช้สารละลายหลังการลอกแป้งด้วยอะไมเลสและการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเซลลูเลส

น.ส.จิตาภัค ชูดวง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INDIGO DYEING ON COTTON YARN USING SPENT SOLUTIONS FROM AMYLASE DESIZING AND CELLULASE-STONEWASHING OF DENIM FABRIC

Miss Jitapak Chooduang

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology
Department of Materials Science
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การย้อมสีอินดิโกบนเส้นด้ายฝ้ายโดยใช้สารละลายหลังการลอกแป้งด้วยอะไมเลสและการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเซลลูเลส
โดย	น.ส.จิตาภัค ชูดวง
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ธิดารัตน์ นิ่มเชื้อ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อาจองค์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ธิดารัตน์ นิ่มเชื้อ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นราพร รังสิมันตกุล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จิตาภัค ชูดวง : การย้อมสีอินดิโกบนเส้นด้ายฝ้ายโดยใช้สารละลายหลังการลอกแป้งด้วยอะไมเลสและการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเซลลูเลส. (INDIGO DYEING ON COTTON YARN USING SPENT SOLUTIONS FROM AMYLASE DESIZING AND CELLULASE-STONEWASHING OF DENIM FABRIC) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ธิดารัตน์ นิ่มเชื้อ

งานวิจัยนี้ทดลองนำน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลส (น้ำเสียมีกลูโคส) และการนำน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (น้ำเสียมีสีอินดิโก) มาใช้ในการรีดิวซ์และย้อมสีอินดิโกลงบนเส้นด้ายฝ้าย โดยเริ่มแรกผ้าเดนิมดิบจะผ่านการลอกแป้งด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลส น้ำเสียจากการลอกแป้งถูกวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสีย หลังจากนั้นผ้าเดนิมที่ผ่านการลอกแป้งแล้วจะถูกนำมาฟอกสีด้วยเอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับหินกรวด น้ำเสียจากการฟอกสีถูกนำมาวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสีย รีดิวซ์สีในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ กลูโคส และน้ำเสียจากการลอกแป้ง (น้ำเสียมีกลูโคส) จากนั้นน้ำเสียจากการฟอกสีที่ถูกรีดิวซ์จะถูกนำไปย้อมเส้นด้ายฝ้าย เส้นด้ายย้อมสีถูกวิเคราะห์หาค่าความเข้มสีและเฉดสี และร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้าย ผลการวิจัยพบว่า เส้นด้ายฝ้ายย้อมด้วยสีที่ถูกรีดิวซ์โดยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส (ณ ภาวะที่ทำให้สารละลายสีย้อมมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันและรีดักชัน (ไออาร์พี) ที่เหมาะสม คือ มีค่า -600 ถึง -700 mV) มีเฉดสีน้ำเงินโดยมีค่าความเข้มสี 1.41 และ 0.74 และการผนึกสีบนเส้นด้าย 74.8% และ 73.8% ตามลำดับ โดยเส้นด้ายย้อมด้วยสีที่ถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์มีสีน้ำเงินที่เข้มกว่าเส้นด้ายย้อมด้วยสีที่ถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคสประมาณ 1 เท่า แต่ต่างมีการผนึกสีใกล้เคียงกัน (74-75%) ในขณะที่การศึกษาเบื้องต้นของการใช้น้ำเสียจากการลอกแป้ง (น้ำเสียมีกลูโคส) เป็นสารรีดิวซ์สีในน้ำเสียจากการฟอกสี (แทนการใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และการใช้กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์สี) เส้นด้ายหลังย้อมมีเฉดสีน้ำเงินอ่อนมาก เนื่องจากค่าไออาร์พีของสารละลายสีมีค่าสูงเกินไป อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้พบว่า สามารถนำน้ำเสียจากการลอกแป้งและน้ำเสียจากการฟอกสีมาหมุนเวียนใช้เป็นวัตถุดิบในการย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย แต่ยังต้องปรับปรุงกระบวนการลอกแป้งให้น้ำเสียจากการลอกแป้งมีกลูโคสเกิดจากการลอกแป้งมากขึ้น อาจด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่ใช้ในการลอกแป้งหรือเติมกลูโคสเพิ่มลงไปในน้ำเสียจากการลอกแป้ง เพื่อลดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันและรีดักชันจนถึงค่าที่เหมาะสม คือ ต่ำกว่า -600 mV ลงไป จะทำให้สามารถนำน้ำเสียจากทั้งสองส่วนของการผลิตผ้าเดนิม (น้ำเสียจากการลอกแป้งและจากการฟอกสีผ้าเดนิม) มาหมุนเวียนใช้ต่อได้อย่างสมบูรณ์แบบ

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5972163723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORD: reuse of wastewater, enzymatic desizing, biostoning, denim, indigo dye
Jitapak Chooduang : INDIGO DYEING ON COTTON YARN USING SPENT SOLUTIONS FROM AMYLASE DESIZING AND CELLULASE-STONEWASHING OF DENIM FABRIC. Advisor: Asst. Prof. Dr. USA SANGWATANAROJ, Ph.D. Co-advisor: Dr. Thidarat Nimchua, Ph.D.

This research showed an attempt to reuse wastewater from amylase/glucoamylase desizing and wastewater from cellulase biostoning of denim fabric as raw materials for cotton yarn dyeing. In the research, wastewater from desizing was collected and was analyzed for glucose content. Similarly, wastewater from biostoning was analyzed for indigo dye content released from denim fabric. Indigo dye in wastewater from biostoning was reduced (into soluble dye) using sodium dithionite and glucose as reducing agents at optimal ORP value (oxidation-reduction potential) of -600 to -700 mV and the reduced wastewater was used for cotton yarn dyeing. Dyed yarn from sodium dithionite reduction showed deeper shade of blue than that from glucose reduction in which the former yarn contained its color strength of 1.41 while the latter contained 0.74, but they both showed similar % dye fixation between 74-75%. In addition to sodium dithionite and glucose reductions of indigo dye in wastewater from biostoning, this indigo dye in wastewater was also reduced with wastewater from enzymatic desizing (containing glucose) and then was used for cotton yarn dyeing. Unfortunately, the amount of glucose found in enzymatic desizing wastewater was too low for indigo dye reduction. This led to too high ORP value -325 mV during the dye reduction and the pale blue shade of dyed cotton yarn after dyeing. However, this experiment showed that it was possible to reuse both wastewaters from enzymatic desizing and biostoning of denim fabric for cotton dyeing.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Applied Polymer Science and Textile Technology	Student's Signature .....
Academic Year:	2020	Advisor's Signature .....
		Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ผู้วิจัยได้รับคำแนะนำรวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัย แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ และความดูแลเอาใจใส่จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ธิดารัตน์ นิ่มเชื้อ

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านและหน่วยงานต่างๆ ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและเครื่องมือในการทำวิจัย ดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อาจองค์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์ และ ดร.นราพร รังสิมันตกุล ที่สละเวลาสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. นางสาวปวีณา ทองเกร็ด ผู้ช่วยนักวิจัยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติและเจ้าหน้าที่ในหน่วยงานทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และการช่วยเหลือ

3. บริษัท วีพีซี กรุ๊ป จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เอนไซม์อะไมเลสและเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า

4. บริษัท เจ็บเซ่น แอนด์ เจ๊สเซ่น (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เอนไซม์กลูโคอะไมเลสทางการค้า 2 ชนิด

5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเครื่องมือ สารเคมีและสถานที่ในการทำงานวิจัย ขอบคุณพี่ๆ น้องๆ สำหรับความช่วยเหลือทั้งแรงกายแรงใจ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนข้าพเจ้าตลอดมา

จิตาภัค ชูดวง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ผ้าเดนิม (Denim fabric) 4

2.1.1 เส้นใยฝ้าย 4

2.1.2. การลงแป้งบนเส้นด้ายยืน (Warp sizing) 5

2.1.3 กระบวนการลอกแป้ง 5

2.1.4 กระบวนการฟอกสี 5

2.2 เอนไซม์ (Enzyme) 6

2.2.1 เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) 7

2.2.2 เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) 8

2.3 สีอินดิโก 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.1 ประวัติของสีอินดิโก 11
2.3.2 การรีดักชันของสีอินดิโก 12
2.3.3 การรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 14
2.3.4 การรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส 15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16
บทที่ 3 การทดลองและการดำเนินงานวิจัย 20
3.1 วัสดุและสารเคมี 20
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 23
3.3 การวิเคราะห์ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัย 24
3.3.1 การวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส 24
3.3.2 การวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลส 25
3.4 การลอกแป้งผ้าเดนิมและการวิเคราะห์ผล 26
3.4.1 การลอกแป้งผ้าเดนิม 26
3.4.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 27
3.5 การฟอกสีผ้าเดนิมและการวิเคราะห์ผล 28
3.5.1 การฟอกสีผ้าเดนิม 28
3.5.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากการฟอกสี 28
3.6 การรีดิวซ์สีอินดิโก 29
3.6.1 การรีดิวซ์สีอินดิโกทางการค้าโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส 29
3.6.2 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ 29
3.6.3 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้กลูโคส 30
3.6.4 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้ง 31
3.7 การย้อมสีเส้นด้าย 31
3.8 การวิเคราะห์เส้นด้ายย้อมสี 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.8.1 ความเข้มสีและเฉดสี 32
3.8.2 ร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้าย 32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 34
4.1 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 34
4.1.1 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลสที่ใช้ในการลอกแป้งผ้าเดนิม และกราฟมาตรฐานสำหรับใช้หาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส 34
4.1.2 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในการฟอกสีผ้าเดนิม และกราฟมาตรฐานสำหรับใช้หาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลส 35
4.2 การลอกแป้งผ้าเดนิมและผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 36
4.2.1 การลอกแป้งและกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 36
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 37
4.3 การฟอกสีผ้าเดนิมและผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี 38
4.3.1 การฟอกสีและกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากการฟอกสี 38
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี 40
4.4 ผลการศึกษาในเบื้องต้นของการนำน้ำเสียจากสองกระบวนการผลิตผ้าเดนิมประกอบด้วยน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการรีดิวซ์และย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย 40
4.4.1 ค่าพีเอชและค่าโออาร์พีของน้ำเสียจากสองกระบวนการผลิตผ้าเดนิม 40
4.4.2 ความเข้มสี เฉดสี และร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้ายฝ้ายหลังย้อมโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 41
4.5 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สี การย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย และผลการวิเคราะห์เส้นด้ายย้อมสี 42
4.5.1 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สี 42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.2 ความเข้มสีและเฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียหลังจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส 43

4.5.3 ร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส 44

4.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ ก่อนนำไปย้อมเส้นด้าย 44

4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี 45

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 45

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 46

4.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส ก่อนนำไปย้อมเส้นด้าย . 47

4.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี 47

4.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้กลูโคสและความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 48

4.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาในการรีดิวซ์ด้วยกลูโคส 49

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 50

5.1 สรุปผลการทดลอง 50

5.2 ข้อเสนอแนะ 52

บรรณานุกรม 53

ภาคผนวก ก แอกทิวิตีของเอนไซม์แต่ละชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 56

ภาคผนวก ข ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียหลังการลอกแป้ง 57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค ความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส 59

ภาคผนวก ง ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ กลูโคส และกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 60

ภาคผนวก จ ค่าเฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อม 62

ภาคผนวก ฉ น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีและเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 63

ภาคผนวก ช น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีและเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส 66

ประวัติผู้เขียน 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ปฏิกิริยารีดักชันของสีอินดิโก 2

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส 4

รูปที่ 2.2 หินภูเขาไฟ (pumice stones) 6

รูปที่ 2.3 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทำงานเอนไซม์ 7

รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสแป้งด้วยน้ำโดยใช้เอนไซม์อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสเป็นตัวเร่ง . 8

รูปที่ 2.5 การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับหินขัดในการฟอกสีผ้าเดนิม 9

รูปที่ 2.6 กลไกการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสที่เข้าไปเร่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของเซลลูโลส 10

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสีอินดิโก 11

รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์สีอินดิโกของ Heumann ในปี 1890 11

รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยารีดักชันของสีอินดิโก 12

รูปที่ 2.10 โครงสร้างต่างๆ ของสีอินดิโกในการเกิดไอออนไนซ์เซชัน (i) อินดิโก (indigo) (ii) โครงสร้างที่ไม่เป็นไอออนิก (non-ionic) (iii) โครงสร้างโมโน-ฟีโนเลต (mono-phenolate) และ (iv) โครงสร้างไบ-ฟีโนเลต (bi-phenolate) 13

รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมไดไทโอไนต์ในสารละลายด่าง 15

รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคสในสารละลายด่าง 15

รูปที่ 3.1 เครื่องย้อมระดับห้องปฏิบัติการ (ยี่ห้อ Labtec) 27

รูปที่ 3.2 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากการฟอกสีก่อน (ซ้าย) และหลังการรีดิวซ์จนสีละลายทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมด (ขวา) 31

รูปที่ 3.3 เครื่องวัดสี Macbeth Color-Eye 7000 32

รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับใช้วิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส 35

รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับใช้วิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลส 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.3 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 37

รูปที่ 4.4 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีอินดิโกเมื่อรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 39

รูปที่ 4.5 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีอินดิโกเมื่อรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส 39

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 45

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 46

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ 46

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส 48

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้กลูโคสและความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 48

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้กลูโคส 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 เอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัย 21

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 21

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไดไทโอไนต์ที่ใช้ในการรีดิวซ์สีในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 30

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และกลูโคสที่ใช้ในการรีดิวซ์สีในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 30

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นในน้ำเสียจากการลอกแป้งโดยใช้เอนไซม์อะไมเลสร่วมกับกลูโคอะไมเลส A และเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับกลูโคอะไมเลส B 38

ตารางที่ 4.2 ค่าโออาร์พีและค่าพีเอชของน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 41

ตารางที่ 4.3 ความเข้มสีและเฉดสีของเส้นด้ายฝ้ายหลังย้อมโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม 42

ตารางที่ 4.4 ค่าโออาร์พีและค่าพีเอชของน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส ณ ภาวะที่เหมาะสม 43

ตารางที่ 4.5 ความเข้มสีและเฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส 43

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการผนึกสีบนเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส 44

ตารางที่ ก.1 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์แต่ละชนิด 56

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้งจากการใช้ชนิดและปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ในปริมาณต่างๆ 57

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 59

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส 59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.1 ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 60

ตารางที่ ง.2 ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส 60

ตารางที่ ง.3 ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 61

ตารางที่ จ.1 เฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 62

ตารางที่ จ.2 เฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส 62

ตารางที่ จ.3 เฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง 62

ตารางที่ ฉ.1 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 1 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 63

ตารางที่ ฉ.2 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 2 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 64

ตารางที่ ฉ.3 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 3 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 64

ตารางที่ ฉ.4 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 4 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 65

ตารางที่ ฉ.5 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 5 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 65

ตารางที่ ช.1 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 1 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส 66

ตารางที่ ช.2 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 2 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส 67

ตารางที่ ช.3 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 3 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.4 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 4 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส..... 68

ตารางที่ ช.5 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 5 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส..... 68

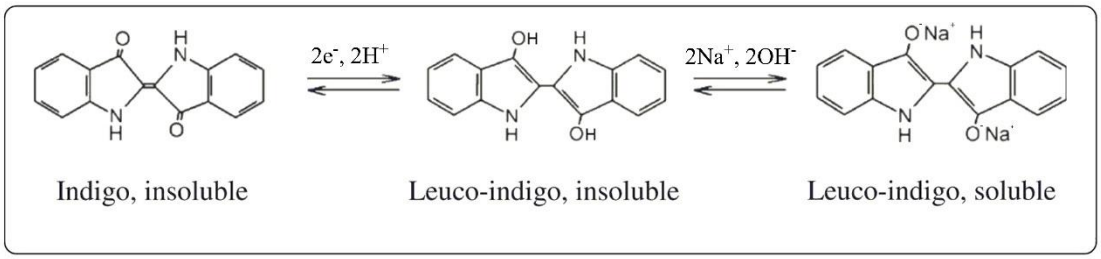
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผ้าเดนิมเป็นผ้าชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตผ้ายีนส์ ด้วยลักษณะพิเศษของผ้าเดนิมที่มีสีเป็นเอกลักษณ์ รูปทรงที่หลากหลายและมีความคงทนแข็งแรงสูง ทำให้ผ้าเดนิมได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ผ้าเดนิมถูกทอมาจากเส้นด้ายยืนขัดกับเส้นด้ายพุ่ง โดยที่เส้นด้ายยืนจะถูกย้อมด้วยสีอินดิโกและมีการลงแป้งไว้ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเส้นด้าย และลดการเสียดสีในระหว่างการทอผ้า ส่วนเส้นด้ายพุ่งจะเป็นเส้นด้ายฝ้ายสีขาว อย่างไรก็ตาม หลังการทอ แป้งที่อยู่บนผ้าเดนิมจะต้องถูกกำจัดหรือผ่านกระบวนการลอกแป้งก่อน เพื่อทำให้ผ้าสามารถดูดซึมน้ำและสารเคมีได้ดี ผ้าเดนิมมักจะนิยมนำมาฟอกสีให้ซีดจาง เพื่อทำให้ผ้าดูเหมือนเก่า สวยงาม มีสีที่เป็นเอกลักษณ์ การใช้เอนไซม์เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กับอุตสาหกรรมสิ่งทอ ในกระบวนการลอกแป้งและกระบวนการฟอกสี ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นหลังกระบวนการ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำน้ำเสียหลังกระบวนการลอกแป้งและน้ำเสียหลังกระบวนการฟอกสีผ้าเดนิมมาใช้ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย

สีอินดิโกหรือที่รู้จักกันดีในไทยว่า “สีคราม” ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตผ้ายีนส์จากผ้าเดนิม ซึ่งสีชนิดนี้เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ จำเป็นต้องรีดิวซ์สีในภาวะด่างให้ละลายน้ำก่อนนำมาย้อมลงบนเส้นด้ายใยเซลลูโลส เช่นเดียวกับการย้อมสีซัลเฟอร์ ซึ่งต้องรีดิวซ์สีซัลเฟอร์ให้ละลายน้ำก่อนนำไปย้อมใยเซลลูโลส โดยใช้สารเคมีชนิดรีดิวซ์ที่นิยมใช้กันทางอุตสาหกรรม คือ โซเดียมไดไทโอไนต์หรือโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เพื่อให้สีละลายน้ำและสามารถแพร่ผ่านน้ำเข้าสู่เส้นใย กลไกการย้อมสีอินดิโกจะเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดักชันและจบลงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน สีอินดิโกจะมีหมู่คาร์บอนิลต่อกันแบบคอนจูเกตในโครงสร้างสี เมื่อถูกรีดิวซ์ในภาวะด่าง หมู่คาร์บอนิลจะเปลี่ยนเป็นแซคคันดารีแอลกอฮอล์ (secondary alcohol) ที่เรียกว่า ลิวโก-อินดิโก (leuco-indigo) ที่ไม่ละลายน้ำ และเป็นลิวโก-อินดิโกที่ละลายน้ำได้ในที่สุด (รูปที่ 1.1) จากนั้นสีจะแพร่ผ่านน้ำเข้าเส้นใยเซลลูโลสในขั้นตอนการย้อมสีและสีถูกออกซิไดส์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นสีอินดิโกที่ไม่ละลายน้ำถูกขังอยู่ภายในเส้นใย



รูปที่ 1.1 ปฏิกิริยารีดักชันของสีอินดิโก [1]

สารรีดิวซ์สีอินดิโกที่รู้จักกันดีในทางอุตสาหกรรม คือ โซเดียมไดไทโอไนต์ แต่การใช้สารชนิดนี้ในปริมาณมากๆ นั้น จะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีความพยายามที่จะใช้สารรีดิวซ์ชนิดอื่นที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทดแทนการใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ อาทิ งานวิจัยของ Saikhao, Setthayanond, Karpkird, และ Suwanruji [2] แสดงให้เห็นถึงการใช้กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์สำหรับสีอินดิโกเปรียบเทียบกับการใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ พบว่า กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์สีอินดิโกที่มีประสิทธิภาพมากในการรีดิวซ์และย้อมสีอินดิโกลงบนผ้าฝ้าย แต่การใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ในการรีดิวซ์สีอินดิโกจะให้สีผ้าหลังย้อมมีความเข้มสีสูงกว่าการใช้กลูโคส และในงานวิจัยของณรงค์กร ตรีสาร [3] ได้ทดลองกำจัดสิ่งสกปรกบนเส้นด้ายสับปะรดด้วยมัลติเอนไซม์ (เพกติเนส เซลลูเลส และไซแลนเนส) ซึ่งได้น้ำหลังกำจัดสิ่งสกปรกที่มีน้ำตาลรีดิวซ์ และสามารถนำน้ำตาลรีดิวซ์นี้ไปรีดิวซ์สีซัลเฟอร์ ก่อนนำไปย้อมเส้นด้ายสับปะรดจนได้สีเข้มตามต้องการ

จากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้คณะผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาการนำกลูโคสในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบด้วยการใช้เอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลส มาใช้เป็นสารรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลส เปรียบเทียบกับการใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และการใช้กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมก่อนนำไปย้อมสีบนเส้นด้ายฝ้ายที่สามารถนำไปทอผ้าเดนิมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งและการฟอกสีผ้าเดนิมเป็นวัตถุดิบในการย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย

2. ศึกษาวิธีการรีดิวซ์สีอินดิโกโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคสเป็นสารรีดิวซ์

3. ลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการลอกแป้งและการฟอกสีผ้าเดนิม โดยนำน้ำเสียมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการอื่นๆ ต่อไป

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. การลอกแป้งผ้าเดนิมจะใช้เอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส ตามสูตรการลอกแป้งที่ดัดแปลงมาจากคำแนะนำของผู้ผลิตเอนไซม์

2. การฟอกสีผ้าเดนิมจะใช้เอนไซม์เซลลูเลส ตามสูตรการฟอกสีที่ดัดแปลงมาจากคำแนะนำของผู้ผลิตเอนไซม์

3. สารรีดิวซ์สีอินดิโกที่ใช้ประกอบด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ กลูโคส และกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิม

4. น้ำเสียจากการลอกแป้งและจากการฟอกสีผ้าเดนิมถูกใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการย้อมสีอินดิโกบนเส้นด้ายฝ้าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สารรีดิวซ์จากน้ำเสียหลังการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลส และได้สีอินดิโกจากน้ำเสียหลังการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลส สำหรับใช้ย้อมสีอินดิโกลงบนเส้นด้ายฝ้าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

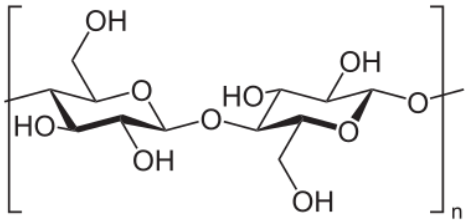
2.1 ผ้าเดนิม (Denim fabric)

ผ้าเดนิม คือ ผ้าฝ้ายทอโครงสร้างลายทแยงที่มีเส้นด้ายยืนขัดกับเส้นด้ายพุ่ง โดยเส้นด้ายยืนจะถูกย้อมด้วยสีน้ำเงินของสีอินดิโกและถูกลงแป้งไว้ ส่วนเส้นด้ายพุ่งจะเป็นเส้นด้ายฝ้ายสีขาว

คำว่า “เดนิม” มาจากสมัยศตวรรษที่ 16 ชาวฝรั่งเศสรู้จักผ้าชนิดนี้ดีในนามของผ้า Serge de Nimes (หมายถึง ผ้าทอโครงสร้างลายทแยงจากเมืองนีมส์) โดยผ้าชนิดนี้มีชื่อเสียงในด้านความคงทนแข็งแรงของผ้าฝ้ายทอสีขาว ต่อมาลีวาย สเตราท์ (Levi Strauss) ชาวอเมริกัน นำผ้าชนิดนี้มาตัดเย็บเป็นกางเกงให้กับคนงานขุดเหมืองทองในแคลิฟอร์เนีย เพราะในช่วงนั้นคนงานเหมืองมีความต้องการกางเกงที่มีความคงทนแข็งแรง และได้ให้ชื่อกางเกงชนิดนี้ว่า “ยีนส์” เพราะชื่อนี้มีจุดกำเนิดมาจากประเทศอิตาลีที่มีคนริเริ่มใช้ผ้าชนิดนี้มาตัดเย็บเป็นกางเกงขาสั้น [4, 5]

2.1.1 เส้นใยฝ้าย

เส้นใยฝ้ายจัดเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ โครงสร้างทางเคมีของฝ้าย คือ poly (1,4-β-D-anhydroglucopyranose) ดังรูปที่ 2.1 และมีหน่วยซ้ำ คือ เซลโลไบโอส (cellobiose) [4]



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [6]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเส้นใยฝ้าย มีดังนี้

- เส้นใยค่อนข้างแข็งแรง เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยเป็นผลึก
- เส้นใยไม่ค่อยยืดหยุ่นเนื่องจากความเป็นผลึกในโครงสร้าง
- เส้นใยฝ้ายมีความเป็นไฮโดรฟิลิก เพราะมีส่วนอสัณฐาน และมีการดูดซึมน้ำได้มากถึง 50%
- เส้นใยมีความสามารถในการพาความร้อน ลดการสะสมความร้อน และทนต่อความร้อนสูง
- เส้นใยทนต่อความเย็น กรดอ่อน แต่สลายในกรดแก่

เส้นใยฝ้ายที่ดีที่เหมาะแก่การนำมาทำเป็นเส้นด้ายยืนของผ้าเดนิมควรจะเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดและเป็นเส้นใยยาว จึงจะทำให้ผ้าเดนิมที่ทอได้มีความเรียบ รูปทรงสวยงาม และสวมใส่สบาย

2.1.2. การลงแป้งบนเส้นด้ายยืน (Warp sizing)

การลงแป้งบนเส้นด้ายยืนก่อนนำไปทอเป็นผ้าเดนิม มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ด้ายยืนและลดการเสียดสีกันในระหว่างการทอผ้า โดยสารลงแป้งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ [5] คือ

- สารลงแป้งที่ละลายน้ำ เช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) หรือสารลงแป้งที่มีองค์ประกอบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA-based sizes)
- สารลงแป้งที่ไม่ละลายน้ำ เช่น สารที่มีองค์ประกอบของแป้ง (starch-based sizes) ซึ่งเป็นสารที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีราคาถูกและใช้งานง่าย

2.1.3 กระบวนการลอกแป้ง

สารลงแป้งที่อยู่บนผ้าทอเดนิมจะต้องถูกกำจัดเพื่อให้ผ้าสามารถดูดซึมน้ำและสารเคมีในกระบวนการต่อไปได้ ปฏิกิริยาที่ใช้ในการลอกแป้ง มีดังนี้ [5, 7]

- ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) เช่น การแช่ด้วยกรด (acid steep) การหมัก (rot steep) การใช้เอนไซม์ (enzymatic steep)
- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) มักจะใช้พวกสารออกซิไดส์ เช่น เปอร์ซัลเฟต ($S_2O_8^{2-}$) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารอื่นๆ

2.1.4 กระบวนการฟอกสี

การฟอกสีผ้าเดนิมให้มีสีซีดจางลงหรือให้ดูเหมือนเก่า เป็นการเอาสีย้อมบางส่วนออกจากผ้า ซึ่งกระบวนการฟอกสีผ้าเดนิมที่ใช้กัน มีดังนี้ [5, 7]

1) การใช้หินขัด ในสมัยก่อนจะใช้หินภูเขาไฟ (pumice stones) ดังแสดงรูปที่ 2.2 ในการฟอกให้ผ้ามีสีซีดจางลง ซึ่งหินภูเขาไฟจะมีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ที่ถูกหลอมเหลวจากการปะทุของภูเขาไฟ โดยหินจะมีน้ำหนักเบาและมีความเป็นรูพรุนสูง จึงทำให้หินสามารถลอยน้ำได้ แต่การฟอกสีผ้าเดนิมด้วยหินภูเขาไฟในปริมาณมากจะทำให้ความแข็งแรงของผ้าลดลง อีกทั้งเศษหินยังไปทำลายเครื่องจักรและอุดตันในท่อระบายน้ำทิ้ง

รูปที่ 2.2 หินภูเขาไฟ (pumice stones) [8]

2) การใช้สารเคมี ส่วนมากจะใช้สารฟอกขาวในการฟอกสีผ้าเดนิม เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่อันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและทำลายเส้นใยผ้า รวมถึงใช้น้ำและพลังงานมาก

3) การใช้เลเซอร์ เป็นกระบวนการใช้ความร้อนจากเลเซอร์ทำให้สีที่ติดอยู่บนผ้าซีดจางลง โดยลำแสงของเลเซอร์ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ สามารถออกแบบลวดลายได้ตามต้องการ แต่เนื่องจากเป็นการใช้ความร้อนโดยตรงกับผ้าทำให้เส้นใยในผ้าถูกทำลาย

4) การใช้เอนไซม์ร่วมกับหินขัด โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสในการฟอกสีผ้าเดนิม ทำให้สีอินดิโกบนผ้าหลุดออกมาได้ง่ายและทำให้เส้นใยเกิดความเสียหายน้อยลง โดยมีรายละเอียดดังข้อ 2.2.2

2.2 เอนไซม์ (Enzyme)

เอนไซม์ คือ ตัวเร่งทางชีวภาพที่เป็นสารจำพวกโปรตีน ช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ข้อดีของการใช้เอนไซม์ มีดังนี้ [7]

- ภาวะของปฏิกิริยาไม่รุนแรง
- มีความจำเพาะเจาะจงต่อซับสเตรทนั้นๆ สูง
- มีอัตราการเร่งปฏิกิริยาสูง
- ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา

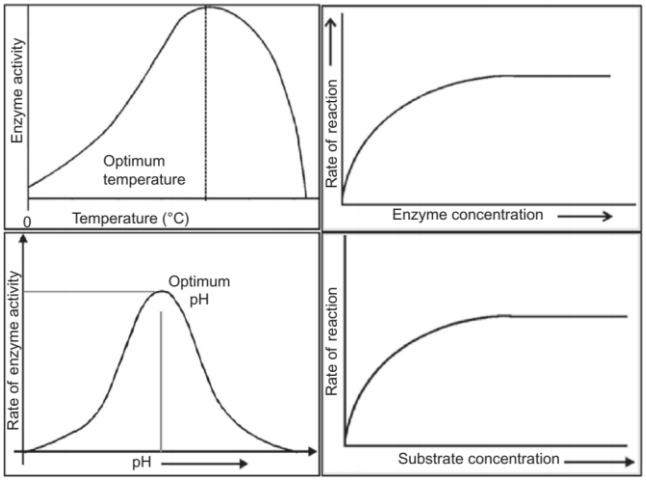
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เอนไซม์ถูกนำมาใช้อย่างมากทางอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น กระบวนการลอกแป้ง การกำจัดสิ่งสกปรก การฟอกขาว การฟอกสีผ้าเดนิม และการตกแต่งผ้าเดนิมทางชีวภาพ เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการทางสิ่งทอที่ใช้เอนไซม์เป็นกระบวนการที่ยั่งยืน ช่วยลดการใช้น้ำ พลังงาน ลดเวลาของกระบวนการ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ มีดังนี้

- อุณหภูมิ เอนไซม์แต่ละชนิดสามารถทำงานได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไป เอนไซม์จะถูกทำลาย (ดังรูปที่ 2.3)

- **พีเอช** เป็นปัจจัยที่คล้ายกับอุณหภูมิ เอนไซม์จะทำงานได้ดีที่ช่วงพีเอชหนึ่งๆ ดังแสดงรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่า พีเอชที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ จะทำให้เอนไซม์มีค่ากิจกรรมสูงสุด
- ความเข้มข้นของเอนไซม์ โดยถ้าเอนไซม์มีความเข้มข้นสูง จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลของเอนไซม์มากขึ้น ทำให้เอนไซม์สามารถจับกับซับสเตรทเพื่อเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของเอนไซม์ก็มีจุดที่เหมาะสมต่อการใช้ เพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเกินจุดที่เหมาะสม อัตราการเกิดปฏิกิริยายังคงเท่าเดิมหากปริมาณซับสเตรทคงที่ ดังแสดงรูปที่ 2.3
- ความเข้มข้นของซับสเตรท โดยเมื่อซับสเตรทเพิ่มมากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงเนื่องจากมีโมเลกุลของซับสเตรทที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ได้มากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น
- สารยับยั้ง เป็นสิ่งเจือปนที่จะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง หรือหยุดการเกิดปฏิกิริยา

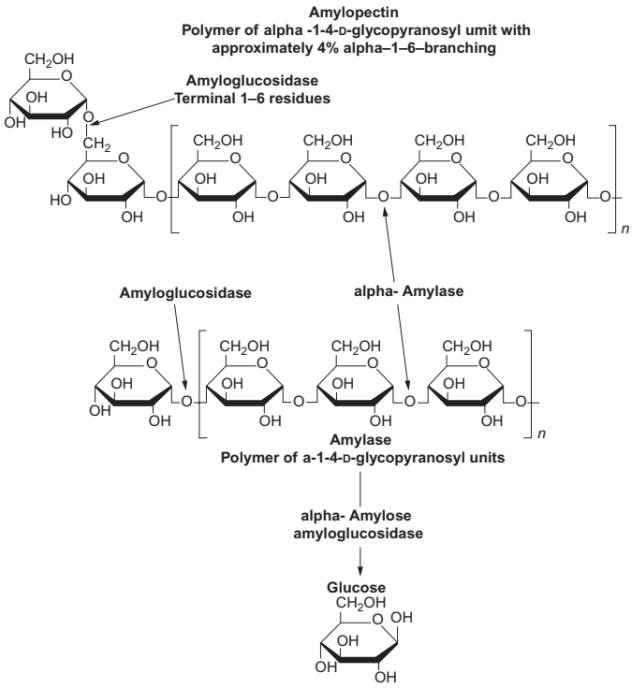


รูปที่ 2.3 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทำงานเอนไซม์ [7]

2.2.1 เอนไซม์อะไมเลส (Amylase)

เอนไซม์อะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดแป้งบนผ้า โดยจะเข้าไปช่วยเร่งการไฮโดรลิซิสแป้งที่ไม่ละลายน้ำให้กลายเป็นแป้งที่ละลายน้ำหรือที่เรียกว่า “โอลิโกแซ็กคาไรด์” เป็นโมเลกุลของแป้งที่สามารถซักล้างออกจากผ้าได้

เอนไซม์อะไมเลสจะเข้าไปช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของแป้งด้วยน้ำจนแป้งกลายเป็นน้ำตาลกลูโคสที่สามารถละลายน้ำได้ แสดงดังรูปที่ 2.4

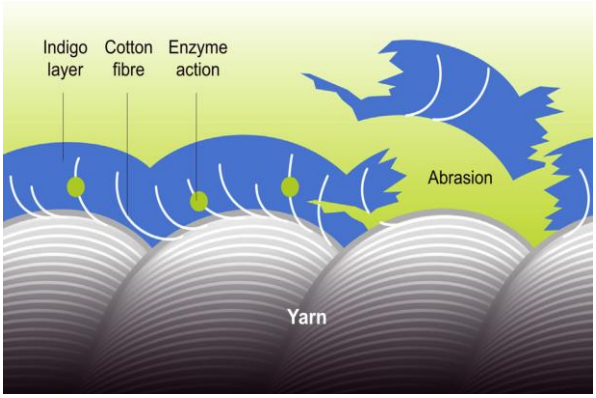


รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสแป้งด้วยน้ำโดยใช้เอนไซม์อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสเป็นตัวเร่ง [7]

2.2.2 เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase)

เอนไซม์เซลลูเลสเป็นเอนไซม์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายกับเส้นใยเซลลูโลส เช่น ฝ้าย ลินิน ปอ รามี วิสคอส ไลโอเซลล์ เพื่อปรับปรุงสัมผัสและลักษณะของผ้า เพราะเอนไซม์ชนิดนี้สามารถกำจัดขนผ้า ทำให้ผ้านุ่มและมีสัมผัสที่ดีขึ้น เอนไซม์จะเข้าไปเร่งการทำลายหรือการไฮโดรไลส์สายโซ่ของเซลลูโลสจนเกิดกลูโคส (หรือโมโนแซคคาไรด์) และเซลโลไบโอส (หรือไดแซคคาไรด์) [9-11]

การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับหินขัดในการฟอกสีผ้าเดนิมมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผ้ามีสีที่ซีดจางลงตามแฟชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การใช้เอนไซม์เซลลูเลสเพียงเล็กน้อยจะสามารถแทนการใช้หินภูเขาไฟได้หลายกิโลกรัม โดยเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในการฟอกสีควรจะเป็นชนิดเอนโด-เซลลูเลส เพราะมีปฏิกิริยาช่วยเร่งการไฮโดรไลส์สายโซ่เซลลูโลสในเส้นใยแบบไม่รุนแรงจนสายโซ่เซลลูโลสขาดออกจากกันเกิดเป็นปลายสายโซ่ (chain ends) ทำให้โมเลกุลของสีอินดิโกตรงบริเวณปลายสายโซ่แพร่ออกจากเส้นใยได้ ในปัจจุบันการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและหินภูเขาไฟร่วมกันจะทำลายเส้นใยในผ้าน้อยกว่าการใช้หินภูเขาไฟเพียงอย่างเดียว และทำให้ผ้านุ่ม มีสัมผัสที่ดีขึ้นและมีสีซีดจางลงตามต้องการ

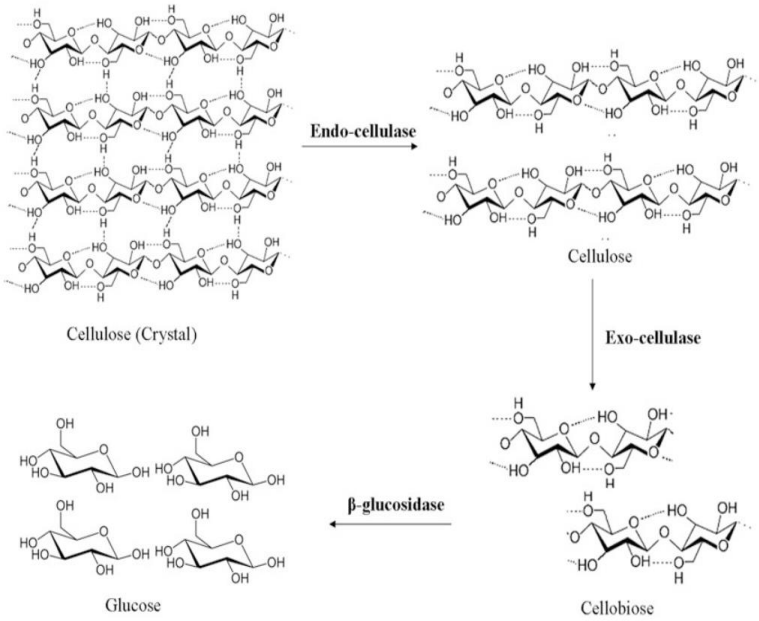


รูปที่ 2.5 การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับหินขัดในการฟอกสีผ้าเดนิม [11]

กลไกการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสที่เร่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสบนเส้นใยเซลลูโลส มีดังนี้ [7]

- เอนโด-เซลลูเลส (endo-cellulase) จะแพร่ไปที่ส่วนอสัณฐานของสายโซ่เซลลูโลสและเร่งการไฮโดรลิซิสของเซลลูโลส ทำให้สายโซ่เซลลูโลสขาดออกจากกันและเกิดเป็นปลายสายโซ่เซลลูโลส (cellulose chain ends) หากในเส้นใยมีสีอินดิโกอยู่ สีอินดิโกจะแพร่ออกจากเส้นใยในขั้นตอนนี้ได้
- เอ็กโซ-เซลลูเลส (exo-cellulase) จะแพร่ไปที่ปลายสายโซ่เซลลูโลสและเร่งการไฮโดรลิซิส ทำให้เกิดเป็นเซลโลไบโอส (cellobiose) เป็นส่วนใหญ่
- บีตา-กลูโคซิเดส (β-glucosidase) จะแพร่ไปเร่งการไฮโดรลิซิสเซลโลไบโอสให้กลายเป็นกลูโคส ดังรูปที่ 2.6

กลไกการทำงานของเซลลูเลสจะเกิดอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนสายโซ่เซลลูโลสสั้นลง เส้นใยบริเวณนี้จะอ่อนแอ ทำให้เส้นใยสามารถขาดและหลุดออกจากผ้าได้ ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดขุยขนบนผ้าใยเซลลูโลสและการฟอกสีผ้าเดนิมด้วย ดังแสดงรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 กลไกการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสที่เข้าไปเร่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของเซลลูโลส [6]

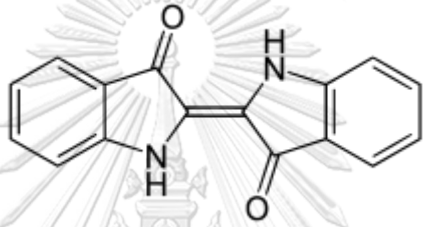
เอนไซม์เซลลูเลสมีทั้งชนิดที่ทำงานได้ดีในช่วงพีเอชกรด กลาง และด่าง ซึ่งทุกชนิดก็สามารถนำมาใช้ในการฟอกสีผ้าเดนิมร่วมกับหินภูเขาไฟได้ โดยปกติเอนไซม์เซลลูเลสที่ทนกรดจะทำงานได้ดีในช่วงพีเอช 4-5 เอนไซม์เซลลูเลสที่ทำงานได้ดีในช่วงพีเอชกลางจะสามารถทำงานได้ดีที่พีเอช 6.5 และเซลลูเลสที่ทนด่างที่มาจาก *alkalothermophilic Thermonospora sp.* จะทำงานได้ดีที่พีเอช 8 ซึ่งนิยมใช้กระบวนการตกแต่งผ้าเดนิมสำเร็จรูป เอนไซม์ชนิดนี้จะมีกิจกรรมของเอนโด-เซลลูเลสและไซลาเนสเป็นหลัก จึงไม่ทำปฏิกิริยาเร่งในส่วนที่เป็นผลึกของเซลลูโลส [10] นอกจากนี้ยังพบว่า ที่พีเอช 4-5 จะมีโอกาสในการตกกลับของสีอินดิโกลงบนเส้นด้ายพุ่งสูง ดังนั้น การใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่ทนกรดจะมีโอกาสในการเปื้อนติดของสีอินดิโกสูงกว่าการใช้เอนไซม์เซลลูเลสในภาวะอื่น แต่อย่างไรก็ตาม การตกกลับของสีอินดิโกจะขึ้นกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการมากกว่าความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้ แต่ข้อดีในการใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่ทนกรด คือ ใช้ระยะเวลาในการฟอกสีน้อยกว่าการใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่ทำงานได้ดีในช่วงพีเอชเป็นกลาง 2-10 เท่า โดยปกติเอนไซม์เซลลูเลสจะใช้อุณหภูมิในการฟอกสีอยู่ในช่วง 48-55 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 40-60 นาที และอัตราส่วนระหว่างผ้าต่อของเหลวคือ 1:4-1:8 ทำให้ได้ผ้าเดนิมที่ได้จากการฟอกสีด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ทนกรดมักจะได้เฉดสีแดงเล็กน้อย ในขณะที่เซลลูเลสที่ทำงานในช่วงพีเอชกลางจะให้เฉดสีเทาหรือน้ำเงิน [10]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3 สีอินดิโก

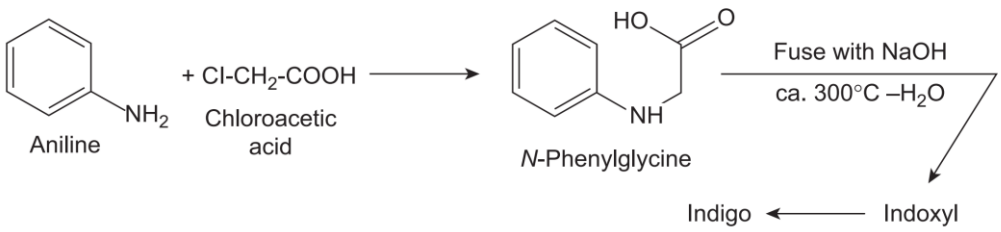
2.3.1 ประวัติของสีอินดิโก

สีอินดิโกหรือที่รู้จักกันในไทยว่า “สีคราม” เป็นสีที่ถูกนำมาใช้นานนับพันๆปี และเป็นหนึ่งในสีที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์ใช้กันมา ก่อนที่สีอินดิโกสังเคราะห์จะกำเนิดขึ้น มีหลักฐานพบว่า สีอินดิโกเคยถูกนำไปใช้กับผ้ามัมมี่ในยุคโบราณของอียิปต์ สีอินดิโกสามารถผลิตได้จากธรรมชาติ อย่างเช่น ต้นโวด (Woad) อินดิโกเฟอรา (Indigofera) นอตวีด (Knotweed) เป็นต้น ซึ่งให้สีอินดิโกที่มาจากธรรมชาติ ส่วนสีอินดิโกสังเคราะห์เกิดขึ้นเมื่อปี 1869 และ Adolf Von Bayer เป็นผู้ค้นพบโครงสร้างของสีอินดิโก [12] ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสีอินดิโก [13]

ในปี 1890 Heumann ได้ทำการสังเคราะห์สีอินดิโกเป็นครั้งแรก โดยใช้อนิลีน (aniline) สารเคมีในอุตสาหกรรมเป็นสารตั้งต้น ซึ่งถูกเปลี่ยนกลายเป็นฟีนิลไกลซีน (N-phenylglycine) แล้วถูกกลั่นกลับไปเป็นอินดอกซิล (Indoxyl) ในด่างหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส โดยอินดอกซิลจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วด้วยออกซิเจนในบรรยากาศ แล้วเกิดไดเมอร์ไรซ์ซิง (dimerising) ได้เป็นสีอินดิโก ดังรูปที่ 2.8 แต่วิธีนี้จะได้สีอินดิโกปริมาณน้อยเกินไปสำหรับที่จะนำมาใช้ผลิตในทางอุตสาหกรรม

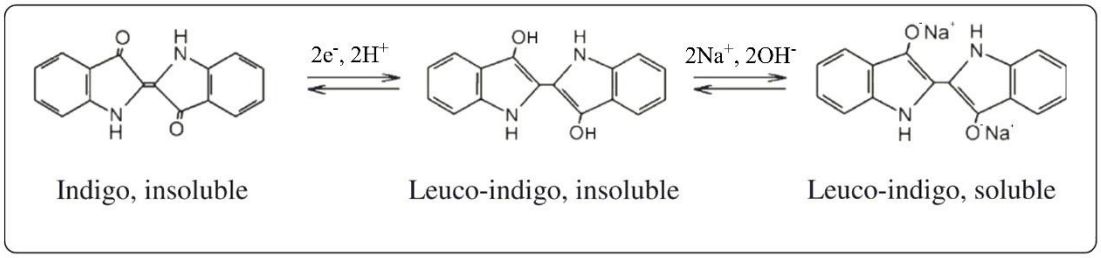


รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์สีอินดิโกของ Heumann ในปี 1890 [14]

ต่อมาในปี 1897 บริษัท BASF ของเยอรมันได้เริ่มผลิตสีอินดิโกสังเคราะห์โดยใช้กรดฟีนิลไกลซีน คาร์บอกซิลิก (Phenylglycine-o-carboxylic acid) ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นกรดอินดอกซิล คาร์บอกซิลิก (Indoxyl-2-carboxylic acid) จนได้สีอินดิโกสังเคราะห์ ซึ่งทำให้สีอินดิโกสังเคราะห์ได้เข้ามาแทนที่สีอินดิโกจากธรรมชาติได้อย่างสิ้นเชิง เนื่องจากสีอินดิโกสังเคราะห์มีความบริสุทธิ์มากกว่าสีที่ได้จากธรรมชาติและให้สีน้ำเงินที่เข้มกว่า

2.3.2 การรีดักชันของสีอินดิโก

สีอินดิโกเป็นสีแวตชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ จึงจำเป็นต้องรีดิวซ์สีให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ก่อนนำไปย้อมกับเส้นใยเซลลูโลส โดยโครงสร้างสีอินดิโกจะมีหมู่คาร์บอนิลต่อกันแบบคอนจูเกตในโครงสร้างสี เมื่อถูกรีดิวซ์ในภาวะด่าง หมู่คาร์บอนิลจะเปลี่ยนเป็นแซคคันดารีแอลกอฮอล์ (Secondary alcohol) ที่เรียกว่า ลิวโก-อินดิโก (Leuco-indigo) ที่ไม่ละลายน้ำ และเป็นลิวโก-อินดิโกที่ละลายน้ำได้ในที่สุด จากนั้นสีที่ละลายน้ำจะแพร่เข้าสู่เส้นใย และสีจะถูกออกซิไดส์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นสีอินดิโกที่ไม่ละลายน้ำถูกขังอยู่ในเส้นใย [12] ดังรูปที่ 2.9

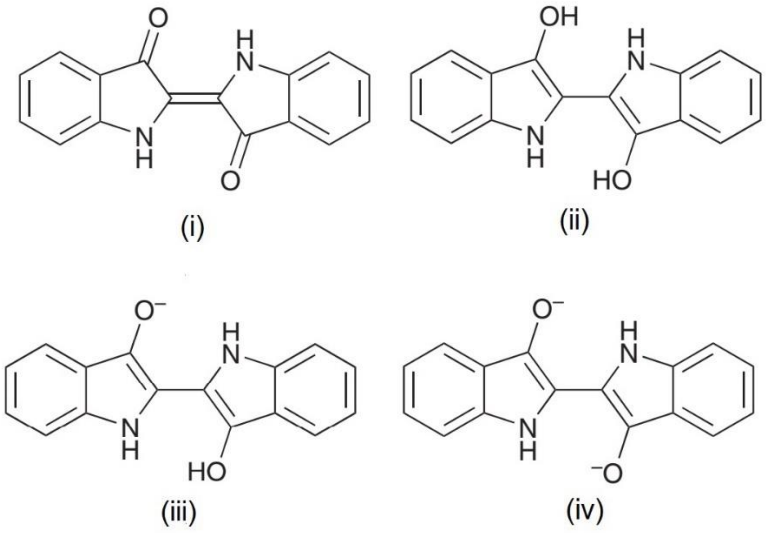


รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยารีดักชันของสีอินดิโก [1]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัจจัยที่มีผลต่อการรีดิวซ์สีอินดิโก

1) พีเอชในอ่างย้อม สีอินดิโกในอ่างย้อมจะมี 4 โครงสร้างที่แตกต่างกันไปตามค่าพีเอชต่างๆ ในอ่างย้อม แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างต่างๆ ของสีอินดิโกในการเกิดไอออนไนซ์เซชัน (i) อินดิโก (indigo) (ii) โครงสร้างที่ไม่เป็นไอออนิก (non-ionic) (iii) โครงสร้างโมโน-ฟีโนเลต (mono-phenolate) และ (iv) โครงสร้างไบ-ฟีโนเลต (bi-phenolate)

(i) โครงสร้างอินดิโกที่ความเป็นด่างอ่อนๆ

(ii) โครงสร้างที่ไม่เป็นไอออนิกที่ความเป็นด่างกลางๆ

(iii) โครงสร้างโมโน-ฟีโนเลตที่พีเอชค่อนข้างสูง

(iv) โครงสร้างไบ-ฟีโนเลตที่พีเอชสูงๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยโครงสร้างที่ i และ ii มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงต่ำกว่า 9-9.5 (โดยสัดส่วนของโครงสร้างของ i และ ii ขึ้นกับค่าพีเอชในอ่างย้อม) และเมื่อพีเอชสูงขึ้น โครงสร้าง i เริ่มเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแบบ ii และ iii หรือมีทั้งสองโครงสร้างผสมอยู่ในอ่างย้อม และเมื่อพีเอชสูงขึ้น (พีเอช >10) โครงสร้างทั้งแบบ ii และ iii จะค่อยๆเปลี่ยน และเมื่อถึงพีเอชประมาณ 11.5 โมเลกุลของสีอินดิโกทั้งหมดจะอยู่ในโครงสร้างโมโน-ฟีโนเลต ซึ่งโครงสร้าง iii นี้เป็นโครงสร้างที่ทำให้สีย้อมกับเส้นใยเซลลูโลสมีความชอบกันมากที่สุด และเมื่อพีเอชในอ่างย้อม > 11.5 หมู่คาร์บอนิลจะเปลี่ยนไป เมื่อมีปริมาณโซเดียมไดไทโอไนต์มากเกินพอ ทำให้โครงสร้างโมโนฟีโนเลตเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างไบ-ฟีโนเลต ค่าการเกิดปฏิกิริยา (extent of conversion) ขึ้นกับค่าพีเอช และเมื่อพีเอชในอ่างย้อม > 12.5 จะเกิดโครงสร้าง iv ของสีอินดิโก ซึ่งโครงสร้าง iv ทำให้สีย้อมกับเส้นใยมีความชอบกันน้อยลง (reduced affinity) ส่วนโครงสร้าง i เป็นโครงสร้างที่ทำให้สีย้อมกับเส้นใยไม่เกิดความชอบกัน (no affinity) ในขณะที่โครงสร้าง ii ทำให้สีย้อมกับเส้นใยมีความชอบกันเล็กน้อย (negligible affinity) ทั้ง

โครงสร้าง i และ ii ต่างเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นไอออนิก โครงสร้างโมโน-ฟีโนเลตเป็นโครงสร้างที่ต้องการในการรีดิวซ์สีอินดิโก เพราะเป็นโครงสร้างที่ทำให้สีย้อมดูดซึมลงในเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด นอกจากนี้เส้นใยเซลลูโลสจากฝ้ายจะมีประจุลบอยู่บนเส้นใยและอ่างย้อมที่มีพีเอชสูงมากเกินไปจะมีโครงสร้าง iv ของสีอินดิโก ทำให้ประจุลบจากเส้นใยกับสีย้อมเกิดการผลักกัน เป็นผลทำให้เส้นใยรับสีย้อมได้ต่ำ จากโครงสร้างที่กล่าวมาของสีอินดิโกแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างที่เหมาะสมกับการรีดิวซ์สีอินดิโกที่สุด คือ โครงสร้าง iii (mono-phenolate form) ซึ่งมีพีเอชในอ่างย้อมเท่ากับ 10.5-11.5 [15]

2) ค่าศักย์ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันหรือค่าโออาร์พี (Oxidation-reduction potential, ORP) คือ ค่าที่บ่งบอกระดับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในของเหลวนั้นๆ กล่าวคือ ถ้าเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดี ของเหลวจะมีค่าโออาร์พีติดลบมาก ส่วนถ้าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ของเหลวจะมีค่าโออาร์พีเป็นบวกมาก และในงานวิจัยของ Chakraborty และ Chavan [15] กล่าวค่าโออาร์พีของสารละลายสีอินดิโกที่ถูกรีดิวซ์ควรมีค่าโออาร์พีตั้งแต่ -700 มิลลิโวลต์ ลงไป

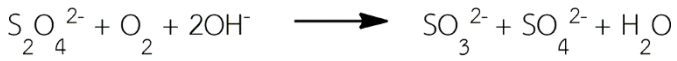
การรีดักชันสีอินดิโกมีหลายวิธี เช่น [14]

- การหมักหรือใช้แบคทีเรียในการรีดิวซ์ (Fermentation or bacterial reduction)
- การรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) เช่น โซเดียมไดไทโอไนต์ แอลฟาไฮดรอกซี-คีโตน กลูโคส ไทโอยูเรียไดออกไซด์ เป็นต้น
- การรีดักชันทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reduction)
- การเติมไฮโดรเจนเป็นตัวเร่ง (Catalytic hydrogenation)
- การเติมไฮโดรเจนเป็นตัวเร่งทางไฟฟ้า (Electrocatalytic hydrogenation)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.3 การรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

โซเดียมไดไทโอไนต์หรือ “โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์” มีสูตรทางเคมี คือ $Na_2S_2O_4$ เป็นสารรีดิวซ์ทางเคมีที่สำคัญตัวหนึ่งของอุตสาหกรรมเพื่อใช้ทำปฏิกิริยารีดักชันของสีแวตรวมถึงสีอินดิโกด้วย เป็นสารที่ไม่เสถียรถูกออกซิไดส์ได้ง่ายโดยออกซิเจนในบรรยากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการรีดิวซ์ >30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้โครงสร้างสีอินดิโกเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างไบ-ฟีโนเลต (bi-phenolate) หรือลิวโก-อินดิโกที่สามารถละลายน้ำได้ ผลผลิตข้างเคียงที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารชนิดนี้ คือ ไอออนซัลเฟต ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และกัดกร่อนตามท่อระบายน้ำทิ้ง ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมไดไทโอไนต์ในสารละลายด่าง [12] แสดงดังรูปที่ 2.11

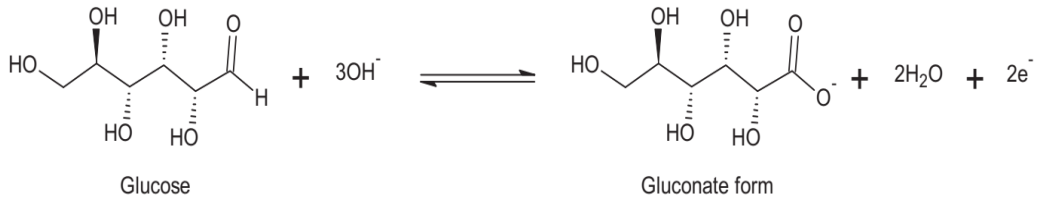


รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมไดไทโอไนต์ในสารละลายด่าง

จากงานวิจัยของ Meksi และคณะ [16] ใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ในการรีดิวซ์สีอินดิโก โดยใช้ความเข้มข้นสีอินดิโกสังเคราะห์ 2 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร โซเดียมไดไทโอไนต์ 3 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงสูตรการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ โดยใช้ความเข้มข้นสีอินดิโกสังเคราะห์ 2 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร โซเดียมไดไทโอไนต์ 5 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

2.3.4 การรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส

กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์ชนิดน้ำตาล ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันของแอลดีไฮด์ที่สามารถถูกออกซิไดส์ไปเป็นกรดคาร์บอกซิลิกได้ ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเมื่อนำมาใช้รีดิวซ์กับสีอินดิโกจะทำให้สีอินดิโกสามารถละลายน้ำได้ กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์ที่ไม่รุนแรง ดังนั้น ในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคสต้องใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์ค่อนข้างสูงกว่าการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ เพื่อให้ได้โครงสร้างของสีอินดิโกที่ละลายน้ำไม่ตกตะกอน และมีความเสถียรอยู่ในอ่างย้อมหลายชั่วโมง



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคสในสารละลายด่าง [16]

จากงานวิจัยของ Meksi และคณะ [16] พบว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส คือ ความเข้มข้นสีอินดิโกสังเคราะห์ 2 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมต่อลิตร กลูโคส 20 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคสตามวิธีของงานวิจัยของ Meksi และคณะ คือ ใช้ความเข้มข้นสีอินดิโกสังเคราะห์ 2 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมต่อลิตร กลูโคส 20 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Patra, Madhu และ Bala [17] ใช้เอนไซม์เซลลูเลสในภาวะกลางและภาวะกรดในการฟอกสีผ้าเดนิม เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเอนไซม์ที่ใช้ เวลาในการฟอกสี และระดับความรุนแรงในการขัดฟอกสี (จำนวนลูกเหล็กที่ใช้ขัดถูผ้า) ที่มีต่อค่าความเข้มสี น้ำหนักที่หายไปของผ้า และการเปื้อนติดสี โดยผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีจะมีสี 2 ชนิด คือ สีอินดิโกและสีซัลเฟอร์ พบว่า การใช้เอนไซม์เซลลูเลสทั้ง 2 ภาวะ ทำให้สีผ้าเดนิมซีดลง และพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเอนไซม์ทั้ง 2 ภาวะ เวลาที่ใช้ในการฟอก และระดับความรุนแรงในการขัดฟอกสี จะทำให้ผ้าเดนิมมีสีซีดลงมาก และสูญเสียน้ำหนักผ้าเพียงเล็กน้อย ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ผ้าเดนิมที่ฟอกสีด้วยเอนไซม์ในภาวะกรดจะสูญเสียน้ำหนักผ้ามากกว่าผ้าที่ฟอกสีด้วยเอนไซม์ในภาวะกลาง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฟอกสี พบว่า การใช้เอนไซม์ในภาวะกรดให้ประสิทธิภาพในการฟอกสีผ้าดีกว่าการใช้เอนไซม์ในภาวะกลาง การใช้เอนไซม์ในภาวะกรดฟอกสีผ้าเดนิมที่มีสีซัลเฟอร์ จะมีสีหลุดออกจากผ้าและกลับไปเปื้อนติดบนผ้าเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ ยังพบว่า ผ้าเดนิมที่ได้จากการฟอกสีด้วยเอนไซม์เซลลูเลสทั้ง 2 ภาวะ จะช่วยให้ผ้าเดนิมมีผิวสัมผัสที่ดีขึ้น

ผจงจิตร เหมพนม [18] ศึกษากระบวนการลอกแป้งและฟอกสีผ้าเดนิมหนา (มีสีอินดิโก) และบาง (มีสีอินดิโกและสีซัลเฟอร์) ในขั้นตอนเดียวโดยใช้มัลติเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นจากเชื้อรา *Aspergillus sp.* พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการใช้มัลติเอนไซม์จากเชื้อรา *Aspergillus sp.* สำหรับการลอกแป้งและฟอกสีผ้าเดนิมหนาและบาง คือ ที่พีเอช 5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้สารช่วยเปียก 4 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อสารละลายทั้งหมด 1:50 และอัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อน้ำหนักหินขัด 1:24 โดยผ้าเดนิมชนิดหนาที่มีสีอินดิโกใช้ความเข้มข้นมัลติเอนไซม์ร้อยละ 5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใน 1 อ่าง และผ้าเดนิมชนิดบางที่มีสีอินดิโกและสีซัลเฟอร์ใช้ความเข้มข้นมัลติเอนไซม์ร้อยละ 10 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใน 2 อ่าง (อ่างละ 1 ชั่วโมง) และภาวะที่เหมาะสมในการใช้เอนไซม์ทางการค้าสำหรับการลอกแป้งและฟอกสีผ้าเดนิมหนาที่มีสีอินดิโก คือ ที่พีเอช 6 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้สารช่วยเปียกร้อยละ 3 ของน้ำหนักผ้า อัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อสารละลายทั้งหมด 1:50 และอัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อน้ำหนักหินขัด 1:24 ที่ความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 6 ของน้ำหนักผ้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ใน 1 อ่าง แต่พบว่าไม่สามารถใช้เอนไซม์ทางการค้าสำหรับการลอกแป้งและฟอกสีผ้าเดนิมบางที่มีสีอินดิโกและสีซัลเฟอร์ในขั้นตอนเดียวใน 1 อ่างหรือ 2 อ่าง ผ้าเดนิมหนาและบางที่ผ่านการลอกแป้งและฟอกสีด้วยมัลติเอนไซม์จากเชื้อรา *Aspergillus sp.* และผ้าเดนิมหนาที่ลอกแป้งและฟอกสีด้วยเอนไซม์ทางการค้าตามภาวะที่เหมาะสม สามารถดูดซึมน้ำได้ทันทีและสม่ำเสมอทั่วทั้งผืน ประสิทธิภาพในการลอกแป้งและฟอกสีด้วยมัลติเอนไซม์จากเชื้อรา *Aspergillus sp.* ดีกว่าการลอกแป้งและฟอกสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ด้วยเอนไซม์ทางการค้า ผ้ามีสีซีดจางลงตามต้องการ และมีความแข็งกระด้างลดลง หรือผ้ามีความนุ่มมากขึ้น หลังการลอกแป้งและฟอกสี ผ้าสูญเสียน้ำหนักและความต้านทานแรงฉีกขาด แต่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

งานวิจัยของ Anis Davulcu และ Eren [27] ใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคออกซิเดส (กลูโคอะไมเลส) ในการลอกแป้ง เปรียบเทียบกับการใช้เอนไซม์อะไมเลสในการลอกแป้ง ซึ่งกลูโคสที่เกิดขึ้นจากสารละลายหลังการลอกแป้งจะนำไปใช้เป็นซับสเตรทให้กับเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส ในการเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อฟอกขาวผ้าฝ้าย พบว่า การใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลสให้ปริมาณกลูโคสในสารละลายหลังกการลอกแป้งได้มากกว่าการใช้เอนไซม์อะไมเลส แต่ประสิทธิภาพในการลอกแป้งบนผ้าโดยใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลสไม่ดีเทียบเท่ากับการใช้เอนไซม์อะไมเลส

ณรงค์กร ตรีสาร [3] ใช้น้ำตาลรีดิวซ์จากสารละลายหลังกำจัดสิ่งสกปรกเส้นด้ายสับปะรดเป็นสารรีดิวซ์สีซัลเฟอร์สำหรับย้อมเส้นด้ายสับปะรด โดยใช้มัลติเอนไซม์ประกอบด้วย เพกติเนส, เซลลูเลส และไซลาเนส ในการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใยสับปะรด โดยศึกษาหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลายหลังการกำจัดสิ่งสกปรก ภาวะที่เหมาะสมสำหรับรีดิวซ์สีซัลเฟอร์ด้วยน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลายหลังการกำจัดสิ่งสกปรก ด้วยกลูโคส และด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของเส้นด้ายหลังการย้อมสี เช่น ค่าความเข้มสี ค่าของสี ร้อยละการผนึกสีบนเส้นด้าย ความคงทนของสีต่อการซักล้าง และความคงทนต่อแรงดึงและการยืดตัวของเส้นด้าย พบว่า สารละลายหลังการกำจัดสิ่งสกปรกเส้นด้ายสับปะรดมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ประมาณ 153.43 มิลลิกรัม/50 มิลลิลิตร/ด้าย 1 กรัม หลังการรีดิวซ์สีด้วยน้ำตาลรีดิวซ์และย้อมสีบนเส้นด้ายสับปะรด พบว่า เส้นด้ายมีสีเข้มกว่า (ความเข้มสี 14.35) เส้นด้ายย้อมด้วยสีที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ (ความเข้มสี 13.22) ในขณะที่เส้นด้ายย้อมด้วยสีที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยกลูโคสมีสีเข้มมากที่สุด (ความเข้มสี 20.42) เส้นด้ายย้อมด้วยสีที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยกลูโคสและน้ำตาลรีดิวซ์ (สารละลายหลังการกำจัดสิ่งสกปรก) ต่างมีร้อยละการผนึกสีสูงกว่า สีคงทนต่อการซักล้างมากกว่า และเส้นด้ายหลังย้อมแข็งแรงมากกว่าเส้นด้ายหลังย้อมที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ นอกจากนี้ พบว่า ในระหว่างการรีดิวซ์สีด้วยสารรีดิวซ์ทั้ง 3 ชนิด สารละลายสีต่างมีค่าโออาร์พีอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ คือ ระหว่าง -450 ถึง -680 มิลลิโวลต์ ณ พีเอช 11 ส่วนเวลาที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีซัลเฟอร์ คือ เวลา 10 นาที สำหรับการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์และด้วยกลูโคส และเวลา 20 นาที สำหรับการรีดิวซ์สีด้วยน้ำตาลรีดิวซ์จากสารละลายหลังการกำจัดสิ่งสกปรก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Meksi, Ticha, Kechida และ Mhenni [19] ศึกษาการใช้แอลฟา-ไฮดรอกซีคาร์บอนิล (α-hydroxycarbonyls) เป็นสารรีดิวซ์ทางเลือกใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทนการใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ในการรีดิวซ์สีอินดิโก โดยใช้กลูโคส (ซึ่งเป็นสารประเภท α-hydroxyaldehyde), acetol และ acetoin (ซึ่งเป็นสารประเภท α-hydroxyacetone) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการรีดิวซ์ (50 และ 75 องศาเซลเซียส) ความเข้มข้นของสารรีดิวซ์ในสารละลายด่างที่มีสี (2 กรัมต่อลิตร) และไม่มีสีอินดิโกผสม ความเข้มข้นของสารละลายด่าง (4 และ 12 กรัมต่อลิตร) ที่มีต่อค่าโออาร์พีของสารละลายด่างและความเข้มสีของผ้าหลังย้อม ผลการทดลองพบว่า สารรีดิวซ์สีอินดิโกที่ให้ค่าโออาร์พีที่ติดลบมากสุด คือ โซเดียมไดไทโอไนต์ ในขณะที่ตัวแปรที่มีผลต่อค่าโออาร์พีอย่างเห็นได้ชัดสุด คือ ความเข้มข้นของสารละลายด่าง เมื่อเปลี่ยนจาก 4 กรัมต่อลิตร ไปเป็น 12 กรัมต่อลิตร ทำให้ค่าโออาร์พีติดลบมากขึ้นในสารรีดิวซ์ทุกชนิด และในสารละลายด่างที่ไม่มีสีอินดิโกอยู่จะมีค่าโออาร์พีติดลบมากกว่าสารละลายด่างที่มีสี ส่วนความเข้มสีของผ้าหลังย้อมจากการรีดิวซ์ด้วยสารแอลฟา-ไฮดรอกซีคาร์บอนิล ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายด่าง 12 กรัมต่อลิตร มีความเข้มสีมากกว่าการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ที่อุณภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายด่าง 4 กรัมต่อลิตร

Saikhao, Setthayanond, Karpkird และ Suwanruji [2] ใช้กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์สีอินดิโกเปรียบเทียบกับการใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ โดยศึกษาอุณหภูมิในการรีดิวซ์สีอินดิโกเพื่อย้อมผ้าฝ้าย (30-90 องศาเซลเซียส) เวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโก (0-60 นาที) และเวลาในการย้อม (10, 20 และ 30 นาที) พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดิวซ์สีอินดิโกทั้งการใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคสเป็นสารรีดิวซ์ คือ 70 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ค่าโออาร์พีของสารละลายสี (ค่าศักย์การเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือ oxidation-reduction potential, ORP) ที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคสมีค่า -924 และ -722 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ที่สูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าโออาร์พีของสารละลายสีมีค่าติดลบมากขึ้น ส่วนเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคสจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีของสารละลายสี นอกจากนี้พบว่า โซเดียมไดไทโอไนต์เป็นสารรีดิวซ์สีอินดิโกที่ให้ค่าโออาร์พีของสารละลายสีติดลบมากกว่าการใช้กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์ อย่างไรก็ตาม สารรีดิวซ์ทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพมากพอในการรีดิวซ์สีอินดิโกให้ละลายน้ำ การใช้เวลาย้อมสีเกิน 10 นาที จะทำให้ค่าโออาร์พีของสารละลายสีติดลบมากขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่า ค่าโออาร์พีในสารละลายสีส่งผลต่อค่าความเข้มสีของผ้าหลังย้อม ซึ่งพบว่า ค่าความเข้มสีของผ้าที่ใช้โซเดียมไดไทโอไนต์เป็นสาร

รีดิวซ์จะมีค่าสูงกว่าการใช้กลูโคสเป็นสารรีดิวซ์ประมาณ 1 หน่วย และเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกที่เหมาะสม คือ 10 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
การทดลองและการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการนำของเสียจากกระบวนการผลิตผ้าเดนิม 2 กระบวนการมาใช้ใหม่เป็นวัตถุดิบในกระบวนการย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย โดยเป็นการนำน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ซึ่งมีกลูโคสเป็นองค์ประกอบมาใช้เป็นสารรีดิวซ์สำหรับสีอินดิโก และการนำน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ซึ่งมีสีอินดิโกเป็นองค์ประกอบมาใช้เป็นสีย้อมสำหรับย้อมสีอินดิโกลงบนเส้นด้ายฝ้าย โดยในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ

1) วิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลสทางการค้าที่ใช้ในการลอกแป้งผ้าเดนิม ศึกษาวิธีการลอกแป้งและความเข้มข้นของเอนไซม์ที่เหมาะสมสำหรับการลอกแป้ง และวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการลอกแป้ง

2) วิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้าที่ใช้ในการฟอกสีผ้าเดนิม ศึกษาการฟอกสีและวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกที่เกิดขึ้นในน้ำเสียจากการฟอกสี

3) ศึกษาวิธีการรีดิวซ์สีอินดิโกโดยใช้สารรีดิวซ์ต่างๆ และวิธีการย้อมสีอินดิโกบนเส้นด้ายฝ้าย

4) วิเคราะห์ความเข้มสี เฉดสี ค่าสี และร้อยละของผนึกสีบนเส้นด้ายฝ้าย

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. ผ้า

ผ้าเดนิมดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท ลัคกี้เท็คซ์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ผ้ามีสีน้ำเงินเข้มของสีอินดิโก โครงสร้างผ้าทอลายสอง (twill weave) น้ำหนักผ้า 435 กรัมต่อตารางเมตร และมีแป้งธรรมชาติบนเส้นด้ายยืนของผ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. ด้าย

เส้นด้ายฝ้ายที่ใช้ผ่านการฟอกขาวแล้ว เป็นเส้นด้ายเบอร์ 40/2 จากบริษัท กรีนวิล เทรดดิ้ง จำกัด

3. สีอินดิโก

ผงสีอินดิโกที่มีความบริสุทธิ์อย่างต่ำร้อยละ 94 จากบริษัท ตั้งไท่ฮั้วเฮง จำกัด

4. เอนไซม์

เอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเอนไซม์ทางการค้า แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อทางการค้า	เอนไซม์	แอกทิวิตี*	ผู้ผลิต
Enzyme HT-5	อะไมเลส	6,181±37 ยูนิตต่อมิลลิตร	บริษัท วีพีซี จำกัด
Optimax® 4060 VHP	กลูโคอะไมเลส	16,586±145 ยูนิตต่อมิลลิตร	บริษัท ดูปองท์ จำกัด
Optimax® S	กลูโคอะไมเลส	24,436±535 ยูนิตต่อมิลลิตร	บริษัท ดูปองท์ จำกัด
Beizym Top Plus	เซลลูเลส	1,120±40 ยูนิตต่อกรัม	บริษัท ซีเอชที เบนซีมา จำกัด

*หมายเหตุ วิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์ตามวิธีในข้อ 3.3

5. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สารเคมี	ผู้ผลิต
<u>โซเดียมไดไทโอไนต์</u> (Sodium dithionite) โซเดียมไดไทโอไนต์ (Sodium dithionite) ความบริสุทธิ์ขั้นต่ำ 85 เปอร์เซ็นต์ (min. assay 85%)	KemAus, Australia
<u>กลูโคส</u> (Glucose) กลูโคส (Glucose) ชนิดโมโนไฮเดรต (Monohydrate)	Ajax Finechem, Australia
<u>โซเดียมไฮดรอกไซด์</u> (Sodium hydroxide) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ความบริสุทธิ์ขั้นต่ำ 98 เปอร์เซ็นต์ (min. assay 98%)	Scharlau, Spain

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

สารเคมี	ผู้ผลิต
<u>ซับสเตรทของเอนไซม์</u> (Enzyme substrate)	
แป้งละลายน้ำ (Starch soluble)	Carlo Erba, Italy
เกลือของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose sodium salt)	Sigma-Aldrich, Germany
<u>สารดีเอ็นเอส</u> (DNS reagent)	
กรดไดไนโตรซาลิไซลิก (3,5-dinitrosalicylic acid)	Sigma-Aldrich, Germany
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	Sigma-Aldrich, Germany
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium metabisulfite)	Sigma-Aldrich, Germany
โซเดียมโพแทสเซียมทาร์เทรต (Sodium potassium tartrate)	Carlo Erba, Italy
ฟีนอล (Phenol)	Fluka, Switzerland
<u>บัฟเฟอร์โซเดียมแอซีเทต</u> (Sodium acetate buffer)	
โซเดียมแอซีเทต (Sodium acetate) ความบริสุทธิ์ขั้นต่ำ 99 เปอร์เซ็นต์ (min. assay 99%)	Ajax Finechem, Australia
กรดแอซีทิก (Glacial acetic acid)	Ajax Finechem, Australia
<u>บัฟเฟอร์โพแทสเซียมฟอสเฟต</u> (Potassium phosphate buffer)	
ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไฮดรัส (di-potassium hydrogen phosphate anhydrous)	Merck, USA
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (potassium di-hydrogen phosphate) ความบริสุทธิ์ขั้นต่ำ 99 เปอร์เซ็นต์ (min. assay 99%)	Carlo Erba, Italy

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

สารเคมี	ผู้ผลิต
<u>สารอื่นๆ</u> (Others)	
สารช่วยเปียกไม่มีประจุ (nonionic wetting agent)	-
สารซักฟอกมาตรฐานไม่มีสารเรืองแสง (standard detergent without optical brightening agent)	-

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดความต่างศักย์ออกซิเดชันและรีดักชัน (ORP Testr 10, Eutech Instrument, Singapore)

2. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Testr 20, Eutech Instrument, Singapore)

3. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH 700, Eutech Instrument, Singapore)

4. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance, PA314, Ohaus Corporation, USA)

5. เครื่องวัดสี (Macbeth reflectance spectrophotometer, Color-Eye 7000, New York, USA)

6. เครื่องย้อมระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory dyeing machine, Labtec Newave Equipments Co., Ltd., Taiwan) ใช้ในลอกแป้งและฟอกสี

7. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, W200 Ring, Memmert, Schwabach, Germany) ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโก

8. UV-Visible spectrophotometer (Blue Star B, LabTech, Massachusetts, USA)

9. ตู้ดูดควัน (Fume Hood, Flexlab Official Equipment Manufacturing Co., Ltd., Nakhon Pathom, Thailand)

10. เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (5418 Microcentrifuge, Eppendorf™, Hamburg, Germany)

11. เครื่องบ่มให้ความร้อน (Block heater, Thermo Scientific™, Massachusetts, USA)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 การวิเคราะห์ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส

ทำการเตรียมกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0, 2.5, 5, 10, 25 และ 50 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร และค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกลูโคสด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) [20] โดยเติมสารละลายกลูโคสแต่ละความเข้มข้นข้างต้นปริมาตร 20 ไมโครลิตร ลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมแป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ละลายในบัฟเฟอร์โซเดียมแอซีเทต 0.1 โมลาร์ พีเอช 5.5 ในปริมาตร 320 ไมโครลิตร แล้วนำมาผสมกับสารละลาย 3,5-Dinitrosalicylic acid (DNS) ปริมาตร 680 ไมโครลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานดังกล่าวข้างต้น (รูปที่ 4.1 ในบทที่ 4) เพื่อใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการเร่งการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ เมื่อวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์ตามสมการ 3.1

จากนั้นเตรียมสารละลาย Blank โดยเติมสารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร ตามด้วยการเติมสาร DNS ปริมาตร 680 ไมโครลิตร เพื่อไปหยุดการทำงานของเอนไซม์ ผสมเข้ากัน หลังจากนั้น เติมซับสเตรทแป้ง 320 ไมโครลิตร แล้วเขย่า นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง นำสารละลายดังกล่าวมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ซึ่งจะถูกใช้ในการคำนวณแอกทิวิตีของเอนไซม์ต่อไป

การวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์จากปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และซับสเตรทแป้ง เริ่มจากการเตรียมซับสเตรท คือ แป้งที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมแอซีเทตที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 5.5 ปริมาตร 320 ไมโครลิตร ในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร นำหลอดไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตร 20 ไมโครลิตร เขย่าและนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และซับสเตรท หลังจากนั้นเติมสารละลาย 3,5-Dinitrosalicylic acid (DNS) ปริมาตร 680 ไมโครลิตร ผสมสารละลายทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความ

ยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงนี้ลบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank จะได้ค่าการดูดกลืนแสงที่แท้จริงของสารละลายแป้งที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์ นำค่าการดูดกลืนแสงดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสในสมการกราฟมาตรฐานที่เตรียมไว้ข้างต้น (รูปที่ 4.1 ในบทที่ 4) เพื่อหาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ ตามสูตรการคำนวณค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ แสดงดังสมการที่ 3.1

$$\text{แอกทิวิตีของเอนไซม์ (U/ml)} = \frac{\text{ปริมาณของกลูโคสที่เกิดขึ้น (ไมโครโมล)} \times \text{จำนวนเท่าที่เจือจางเอนไซม์ } (Dilution\ factor)}{\text{เวลาการเกิดปฏิกิริยา } (10 \text{ นาที}) \times \text{ปริมาตรเอนไซม์ } (20 \text{ ไมโครลิตร})} \qquad \text{(สมการที่ 3.1)}$$

3.3.2 การวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลส

ทำการเตรียมกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0, 2.5, 5, 10, 25 และ 50 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร และค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกลูโคสด้วยวิธี DNS โดยเติมสารละลายกลูโคสแต่ละความเข้มข้นข้างต้นปริมาตร 20 ไมโครลิตร ลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติม CMC 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ละลายในบัฟเฟอร์ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ปริมาตร 320 ไมโครลิตร แล้วนำมาผสมกับสาร DNS ปริมาตร 680 ไมโครลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานดังกล่าวข้างต้น (รูปที่ 4.2 ในบทที่ 4) เพื่อใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการเร่งการย่อยสลาย CMC ด้วยเอนไซม์ เมื่อวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์ตามสมการ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากนั้นเตรียมสารละลาย Blank โดยทำการเติมสารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นที่เหมาะสมปริมาตร 20 ไมโครลิตร ลงในหลอด 1.5 มิลลิลิตร ตามด้วยการเติมสาร DNS ปริมาตร 680 ไมโครลิตร เพื่อไปหยุดการทำงานของเอนไซม์ ผสมเข้ากัน หลังจากนั้น เติมซับสเตรท CMC 320 ไมโครลิตร แล้วเขย่า นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วหยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง หลังจากนั้นนำสารละลายดังกล่าวมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ซึ่งจะถูกใช้ในการคำนวณแอกทิวิตีของเอนไซม์ต่อไป

การวิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์จากปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และซับสเตรท CMC เริ่มจากการเตรียมซับสเตรท คือ CMC ที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในสารละลายบัฟเฟอร์ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ปริมาตร 320

ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้น ดูดซับสเตรทปริมาตร 320 ไมโครลิตร ลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร นำหลอดไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตร 20 ไมโครลิตร เขย่าและนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และซับสเตรท หลังจากนั้นเติมสารละลาย 3,5-Dinitrosalicylic acid (DNS) ปริมาตร 680 ไมโครลิตร ผสมสารละลายทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงนี้ลบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank จะได้ค่าการดูดกลืนแสงที่แท้จริงของสารละลาย CMC ที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์ นำค่าการดูดกลืนแสงดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสในสมการกราฟมาตรฐานที่เตรียมไว้ข้างต้น (รูปที่ 4.2 ในบทที่ 4) เพื่อหาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ ตามสูตรการคำนวณค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ แสดงดังสมการที่ 3.1 ข้างต้น

3.4 การลอกแป้งผ้าเดนิมและการวิเคราะห์ผล

3.4.1 การลอกแป้งผ้าเดนิม

การลอกแป้งบนผ้าเดนิมดิบด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลสดำเนินการทดลองดัดแปลงจากคำแนะนำของผู้ผลิตเอนไซม์ [21-23] เริ่มจากการนำผ้าเดนิมดิบ 1.5 กรัม มาลอกแป้งในสารละลายที่ประกอบด้วยเอนไซม์อะไมเลส ความเข้มข้น 3 กรัมต่อลิตร เอนไซม์กลูโคอะไมเลส A (Optimax®4060VHP) หรือ B (Optimax®s) ที่ความเข้มข้น 1.5, 3.0 และ 4.5 กรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกัน สารช่วยเปียก 4 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนผ้าต่อสารละลายทั้งหมด 1:50 โดยใช้สารละลายอยู่ในช่วงพีเอช 5.5 จากนั้นนำสารละลายทั้งหมดเทลงในกระบอกย้อมขนาด 550 มิลลิลิตร แล้วนำกระบอกใส่ในเครื่องย้อม (รูปที่ 3.1) โดยใช้อุณหภูมิในการลอกแป้งที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดกระบวนการลอกแป้ง นำน้ำเสียจากการลอกแป้งมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้น และนำไปใช้รีดิวซ์สีอินดิโกก่อนนำไปย้อมเส้นด้ายต่อไป ส่วนผ้าหลังการลอกแป้งถูกต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 10 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่อแป้งบนผ้า จากนั้นนำผ้าออกมาล้างด้วยน้ำสะอาด และตากผ้าให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บผ้าไว้ใช้ในการฟอกสีผ้าด้วยเอนไซม์เซลลูเลสต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.1 เครื่องย้อมระดับห้องปฏิบัติการ (ยี่ห้อ Labtec)

3.4.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง ทำโดยเตรียมกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 กรัมต่อลิตร และค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกลูโคสตามวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยเติมสารละลายกลูโคสแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 150 ไมโครลิตร ลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร แล้วนำมาผสมกับสารละลาย 3,5-Dinitrosalicylic acid (DNS) ปริมาตร 150 ไมโครลิตร นำไปต้มด้วยน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละความเข้มข้นมาสร้างเป็นกราฟมาตรฐาน (รูปที่ 4.3 ในบทที่ 4) เพื่อใช้วิเคราะห์หาความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิม

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง ทำโดยดูดตัวอย่างน้ำเสียจากการลอกแป้งมา 1 มิลลิลิตร เติมลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเจือจางน้ำเสียด้วยน้ำ (เพื่อให้สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงให้ได้ต่ำกว่า 1) ดูดออกมา 150 ไมโครลิตร ลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร เติมสาร DNS ลงไป 150 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาระหว่างสาร DNS และกลูโคสด้วยการแช่ในน้ำแข็ง แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง

สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณหาความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากกราฟมาตรฐานที่เตรียมขึ้น

3.5 การฟอกสีผ้าเดนิมและการวิเคราะห์ผล

3.5.1 การฟอกสีผ้าเดนิม

ผ้าหลังการลอกแป้งถูกนำไปฟอกสีด้วยวิธีที่ดัดแปลงจากคำแนะนำของผู้ผลิตเอนไซม์ [24] โดยเตรียมสารละลายเอนไซม์ที่ประกอบด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (Beizym Top Plus) ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็นพีเอช 7 โดยใช้ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.1 โมลาร์ และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.1 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 1:8 และเติมหินกรวดเพื่อเพิ่มการขัดสีผ้าในอัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อน้ำหนักหินกรวดเท่ากับ 1:24 แช่ผ้าลงในกระบอกย้อมขนาด 350 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายที่เตรียมไว้ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเครื่องย้อมฯ หลังการฟอกสีผ้า แยกผ้าออกและเก็บน้ำเสียจากการฟอกสีซึ่งมีสีน้ำเงินของสีอินดิโก เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นหรือปริมาณของสีในน้ำเสียและเพื่อใช้สำหรับการรีดิวซ์และย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายในขั้นต่อไป

3.5.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากการฟอกสี

ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี จำเป็นต้องจัดเตรียมกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสีอินดิโก (ที่ถูกรีดิวซ์ให้ละลายน้ำ) ที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร [25] และความเข้มข้นของสีอินดิโก โดยชั่งสีอินดิโกปริมาณต่างๆ และนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบปริมาตรแน่นอน จากนั้นรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคสตามวิธีในข้อ 3.6 เตรียมให้ได้สารละลายสีหลายๆ ค่าความเข้มข้น (5 ค่าขึ้นไป) โดยที่น้ำสีแต่ละความเข้มข้นควรมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นข้างต้นไม่เกิน 1 เมื่อวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer สุดท้ายจะได้กราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีอินดิโกที่ถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส ดังแสดงรูปที่ 4.4 และ 4.5 ในบทที่ 4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี สามารถกระทำได้โดยการนำน้ำเสียมารีดิวซ์ (วิธีการรีดิวซ์สีในน้ำเสียมีแสดงใน ข้อ 3.6) และวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงไปหาความเข้มข้นของสีในน้ำเสียที่ได้จากกราฟมาตรฐานที่เตรียมขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6 การรีดิวซ์สีอินดิโก

3.6.1 การรีดิวซ์สีอินดิโกทางการค้าโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส

การรีดิวซ์สีอินดิโกทางการค้าด้วยสารรีดิวซ์ชนิดโซเดียมไดไทโอไนต์เปรียบเทียบกับกลูโคส ได้ทดลองรีดิวซ์สีอินดิโกที่ภาวะต่างๆ โดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Meksi และคณะ [16] คือ รีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ 3-5 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3-5 กรัมต่อลิตร ในสารละลายสีอินดิโกความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-30 นาที และรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส 5-20 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4-12 กรัมต่อลิตร ในสารละลายสีอินดิโกความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 70 และ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-30 นาที โดยได้เลือกภาวะที่เหมาะสม (ภาวะที่รีดิวซ์สีแล้วสามารถย้อมเส้นด้ายฝ้ายได้สีเข้มที่สุด) มาใช้สำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าตามขั้นตอนต่อไปนี้ในข้อ 3.6.2, 3.6.3 และ 3.6.4

3.6.2 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์

สำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้สารรีดิวซ์ชนิดโซเดียมไดไทโอไนต์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไดไทโอไนต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของน้ำเสียที่จะนำมารีดิวซ์ โดยเริ่มจากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ใช้ ดังตารางที่ 3.3 ลงในน้ำเสียสีน้ำเงิน ผสมให้เข้ากัน (เพื่อให้น้ำเสียมีสภาพเป็นด่าง) จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสียจนเป็น 50 องศาเซลเซียส แล้วเติมโซเดียมไดไทโอไนต์ความเข้มข้นที่ใช้ ดังตารางที่ 3.3 ลงไป แล้วผสมให้เข้ากัน (เพื่อรีดิวซ์สีในน้ำเสีย) ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้จนสีของน้ำเสียเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มไปเป็นสีเขียวอมเหลือง (สีอินดิโกสีน้ำเงินที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนเป็นสีอินดิโกสีเขียวอมเหลืองที่ละลายน้ำ) หลังจากนั้นให้ลดอุณหภูมิของน้ำเสียลงมาจนถึงอุณหภูมิห้องเพื่อนำน้ำเสียนี้ไปย้อมเส้นด้ายฝ้ายต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไดไทโอไนต์ที่ใช้ในการรีดิวซ์สีในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

น้ำหนักผ้าที่นำมาใช้ฟอกสี (กรัม)	ปริมาตรน้ำเสีย (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่ใช้ (กรัมต่อลิตร)	
		โซเดียมไฮดรอกไซด์	โซเดียมไดไทโอไนต์
1.6654	9	1.25	1.25
3.2553	18	2.5	2.5
4.7745	24	3.75	3.75
6.2307	34	5	5
7.3379	39	5	5

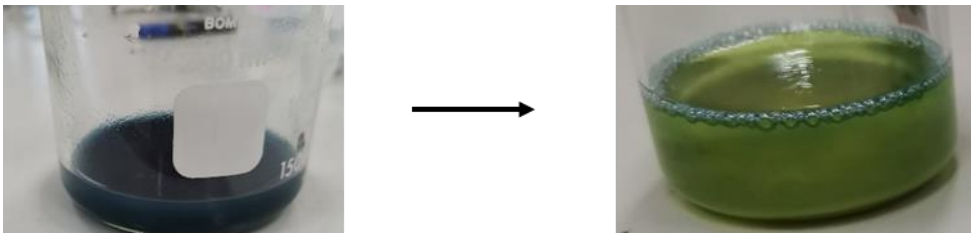
3.6.3 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้กลูโคส

สำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้สารรีดิวซ์ชนิดกลูโคส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกลูโคสที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของน้ำเสียที่จะนำมารีดิวซ์ โดยเริ่มจากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ใช้ ดังตารางที่ 3.4 ลงในน้ำเสียสีน้ำเงิน ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสียจนเป็น 75 องศาเซลเซียส แล้วเติมกลูโคสความเข้มข้นที่ใช้ ดังตารางที่ 3.4 ลงไปและผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้จนสีของน้ำเสียเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มไปเป็นสีเขียวอมเหลือง (ดูรูปที่ 3.2) หลังจากนั้นให้ลดอุณหภูมิของน้ำเสียลงมาจนถึงอุณหภูมิห้องเพื่อนำน้ำเสียนี้ไปย้อมเส้นด้ายฝ้ายต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และกลูโคสที่ใช้ในการรีดิวซ์สีในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

น้ำหนักผ้าที่นำมาใช้ฟอกสี (กรัม)	ปริมาตรน้ำเสีย (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่ใช้ (กรัมต่อลิตร)	
		โซเดียมไฮดรอกไซด์	กลูโคส
1.7094	9	3	5
3.1395	16	6	10
4.4252	23	9	15
5.9110	29	12	20
7.2789	39	12	20



รูปที่ 3.2 ลักษณะและสีของน้ำเสียจากการฟอกสีก่อน (ซ้าย) และหลังการรีดิวซ์จนสีละลายทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมด (ขวา)

3.6.4 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้ง

สำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งเป็นสารรีดิวซ์สีรีดิวซ์ตามวิธีเดียวกับการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 12 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำเสียจากการลอกแป้งปริมาตร 30 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 75 องศาเซลเซียส ค่อยเติมน้ำเสียจากการฟอกสีปริมาตร 8 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลาย รีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งสารละลายสีน้ำเงินเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลือง แล้วทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปย้อมเส้นด้ายฝ้ายต่อไป

3.7 การย้อมสีเส้นด้าย

หลังการรีดิวซ์สีในน้ำเสียจากการฟอกสีและลดอุณหภูมิของน้ำเสียลงมาถึงอุณหภูมิห้องก่อนนำมาย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย น้ำเสียถูกวิเคราะห์ค่าพีเอชและค่าโออาร์พี แสดงผลในตารางที่ 4.2 และ 4.4 โดย Chakraborty และ Chavan [15] ได้แนะนำไว้ว่าค่าพีเอชและค่าโออาร์พีของสารละลายสีอินดิโกที่นำมาย้อมสิ่งทอ ควรมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 10.5-11.5 และค่าโออาร์พีประมาณ -700 มิลลิโวลต์

นำน้ำเสียจากการฟอกสีที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ กลูโคส และกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง (ตามวิธีในข้อ 3.6.2, 3.6.3 และ 3.6.4 ตามลำดับ) มาย้อมเส้นด้ายฝ้าย อัตราส่วนของเส้นด้ายต่อสารละลายสี 1:50 โดยแช่เส้นด้ายฝ้ายลงในน้ำเสียเป็นเวลา 10-30 นาที (พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการย้อมคือ 15 นาที) ที่อุณหภูมิห้อง ให้ทุกส่วนของเส้นด้ายจมอยู่ในน้ำเสียตลอดเวลาเพื่อป้องกันการเกิดสีที่ถูกออกซิไดส์และให้สีที่ถูกรีดิวซ์แพร่เข้าไปในเส้นด้ายมากที่สุด จากนั้นนำเส้นด้ายออกจากน้ำเสียเพื่อทิ้งให้สีในเส้นด้ายถูกออกซิไดส์ในอากาศข้ามคืนหรือประมาณ 12 ชั่วโมง สีในเส้นด้ายจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำถูกกักเก็บไว้ในเส้นด้าย เป็นอันเสร็จสิ้นการย้อม นำเส้นด้ายหลังย้อมมาทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดแอซีติก [26] หลังจากนั้น ล้างน้ำเส้นด้าย

แล้วซักล้างด้วยสารซักฟอกมาตรฐานที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่สีส่วนเกินออกจากเส้นด้าย ล้างน้ำและตากแห้งเส้นด้าย [16]

3.8 การวิเคราะห์เส้นด้ายย้อมสี

3.8.1 ความเข้มสีและเฉดสี

นำเส้นด้ายหลังย้อมที่ผ่านการซักล้างแล้วมาวัดค่าความเข้มสี (ค่า K/S, color strength) และเฉดสี (L*, a*, b* และ c*) ที่ความยาวคลื่นแสง 660 นาโนเมตร [16] ด้วยเครื่องวัดสี spectrophotometer รุ่น Macbeth Color-Eye 7000 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยที่ ค่า K/S คือ ความเข้มของสีบนเส้นด้าย หาก K/S มีค่าสูงแสดงว่าเส้นด้ายมีสีเข้มและค่าต่ำแสดงว่าเส้นด้ายมีสีอ่อนเมื่อเทียบสีชนิดเดียวกันบนวัสดุเดียวกัน ค่า L* คือ ค่าแสดงความสว่างของสี ถ้าเส้นด้ายมีค่า L* สูง แสดงว่าเส้นด้ายมีสีที่สว่าง และถ้า L* ต่ำ แสดงว่าเส้นด้ายมีสีที่มืด ส่วน a* คือ ค่าแสดงเฉดสีเขียวกับสีแดง ซึ่งถ้า a* มีค่าเป็นบวกจะมีเฉดสีแดง และถ้า a* มีค่าเป็นลบมีเฉดเป็นสีเขียว ส่วน b* คือ ค่าแสดงเฉดสีเหลืองและสีน้ำเงิน ซึ่งถ้า b* มีค่าเป็นบวกจะมีเฉดสีเหลือง และถ้า b* มีค่าเป็นลบจะมีเฉดสีน้ำเงิน และ c* คือ ค่าความบริสุทธิ์ของสี

รูปที่ 3.3 เครื่องวัดสี Macbeth Color-Eye 7000

3.8.2 ร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้าย

นำเส้นด้ายหลังย้อมที่ถูกออกซิไดส์ในอากาศเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง มาวัดค่าความเข้มสีโดยใช้เครื่องวัดสี ที่ความยาวคลื่นแสง 660 นาโนเมตร จากนั้นนำเส้นด้ายไปสะเทินด้วยกรดแอซีติก ล้างน้ำ ซักล้างด้วยสารซักฟอกมาตรฐานที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ล้างน้ำ

และตากแห้ง แล้วนำเส้นด้ายมาวัดความเข้มสีอีกครั้ง นำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการผนึกสี ดังสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้าย} = \frac{\text{ความเข้มสีของเส้นด้ายหลังการซักล้าง}}{\text{ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนการซักล้าง}} \times 100 \quad \text{(สมการที่ 3.2)}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ทดลองลอกแป้งผ้าเดนิมดิบด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลส และฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลส เพื่อนำน้ำเสียที่ได้จากทั้งสองกระบวนการมาใช้ในการรีดิวซ์และย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย ทำให้ได้ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่แสดงในบทที่ 4 นี้ ซึ่งประกอบด้วย

1. ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัย

2. การลอกแป้งผ้าเดนิมและผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

3. การฟอกสีผ้าเดนิมและผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี

4. การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีด้วยน้ำเสียจากการลอกแป้ง การนำสีที่ถูกรีดิวซ์มาย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย และผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มสี เฉดสี และร้อยละการผนึกสีของเส้นด้ายหลังย้อม

5. การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโก การนำสีที่ถูกรีดิวซ์มาย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย และผลการวิเคราะห์ความเข้มสี เฉดสี และร้อยละการผนึกสีของเส้นด้ายหลังย้อม โดยมีรายละเอียดดังนี้

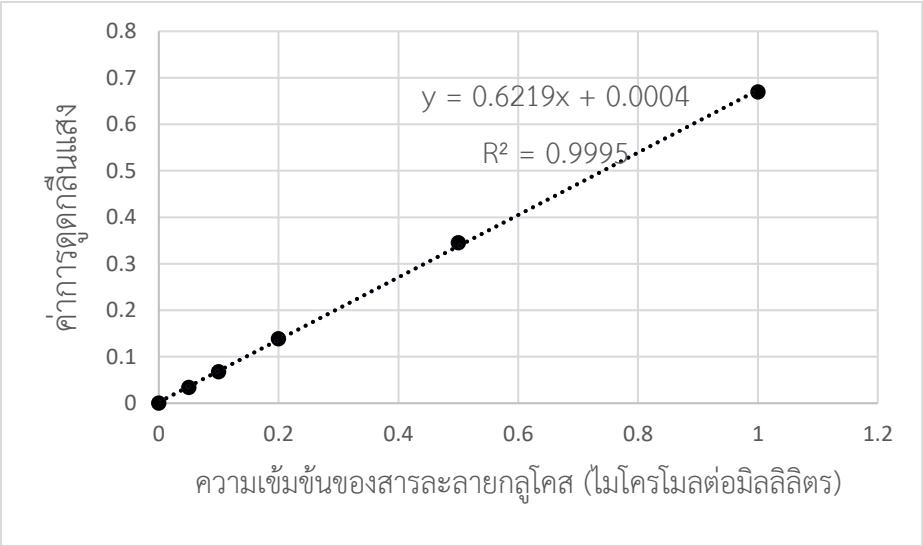
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.1.1 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลสที่ใช้ในการลอกแป้งผ้าเดนิม และกราฟมาตรฐานสำหรับใช้หาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส

เอนไซม์อะไมเลสและเอนไซม์กลูโคอะไมเลสถูกวิเคราะห์หาค่าแอกทิวิตี โดยที่ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ คือ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่เปลี่ยนซับสเตรทให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ภายใต้ภาวะที่กำหนด ในการหาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์เหล่านี้จะวัดผ่านปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลสที่เปลี่ยนแป้งไปเป็นกลูโคส จำเป็นต้องจัดเตรียมกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อนำสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานที่

ได้มาหาความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการเร่งการย่อยสลายแป้งให้กลายเป็นกลูโคส พบว่า ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลส เอนไซม์กลูโคอะไมเลสชนิด A และเอนไซม์กลูโคอะไมเลสชนิด B มีค่าอยู่ที่ 6,181±37, 16,586±145 และ 24,436±535 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

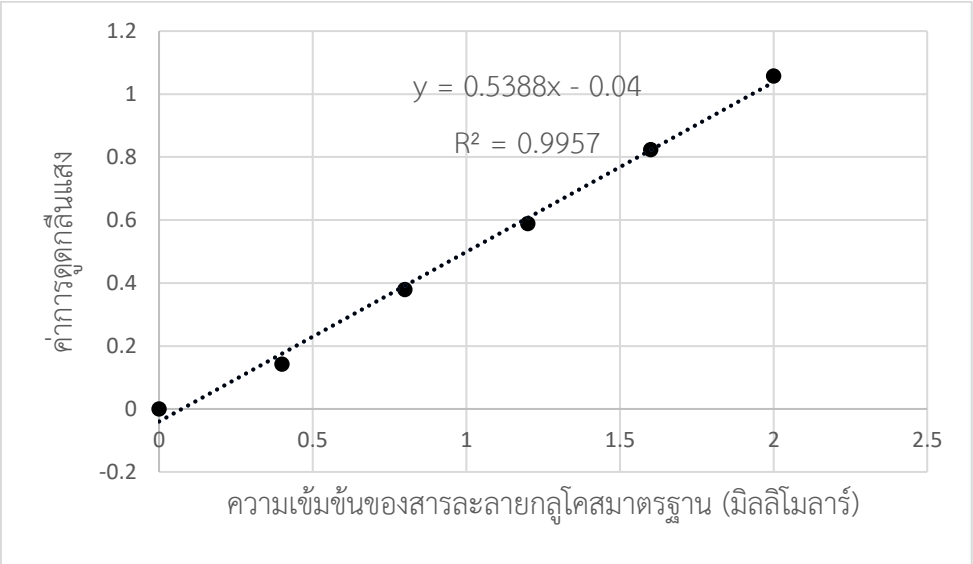


รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับใช้วิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส

4.1.2 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในการฟอกสีผ้าเดนิม และกราฟมาตรฐานสำหรับใช้หาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในการฟอกสีผ้าเดนิมถูกวิเคราะห์หาค่าแอกทิวิตี โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) เป็นซับสเตรท ในการหาค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์จะวัดผ่านปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์เซลลูเลสที่เปลี่ยนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปเป็นกลูโคส ซึ่งจำเป็นต้องจัดเตรียมกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เพื่อนำสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานที่ได้มาหาความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการเร่งการย่อยสลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้กลายเป็นกลูโคส ซึ่งพบว่า เอนไซม์เซลลูเลสมีค่าแอกทิวิตีอยู่ที่ 1,120±40 ยูนิตต่อกรัม



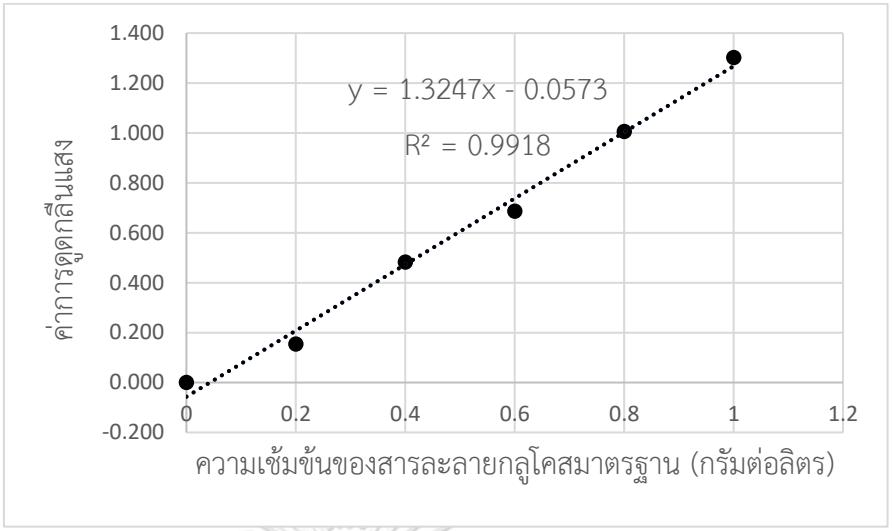
รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับใช้วิเคราะห์แอกทิวิตีของเอนไซม์เซลลูเลส

4.2 การลอกแป้งผ้าเดนิมและผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

4.2.1 การลอกแป้งและกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

หลังการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลสชนิด A และเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลสชนิด B นำน้ำเสียจากการลอกแป้งมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการลอกแป้งด้วยเอนไซม์ต่างๆ เพื่อคัดเลือกเอนไซม์และปริมาณการใช้เอนไซม์ที่เหมาะสมสำหรับการลอกแป้งเพื่อให้ได้กลูโคสปริมาณมากในน้ำเสียจากการลอกแป้ง โดยในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง จำเป็นต้องจัดเตรียมกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 540 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.3 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

หลังการลอกแป้งตามวิธีในข้อ 3.4.1 พบว่า การลอกแป้งผ้าเดนิมดิบน้ำหนัก 1.5 กรัม ด้วยเอนไซม์อะไมเลส ความเข้มข้น 3 กรัมต่อลิตร พีเอช 6 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้ได้น้ำเสียจากการลอกแป้งที่มีความเข้มข้นของกลูโคสค่อนข้างต่ำ คือ 0.48 ± 0.02 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเอนไซม์อะไมเลสเป็นเอนไซม์ชนิดเอนโดอะไมเลสที่ไปเร่งการทำลายพันธะ α-1,4 ไกลโคซิดิกได้เป็นบางส่วนในสายโซ่อะไมโลสหรืออะไมโลเพกทิน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเร่งการย่อยสลายของเอนไซม์อะไมเลสจะทำให้เกิดเป็นโอลิโกแซคคาไรด์ [27] ซึ่งเป็นโมเลกุลน้ำตาลขนาดใหญ่ ดังนั้น เพื่อให้เกิดกลูโคสปริมาณมากในน้ำเสียจากการลอกแป้ง จึงจำเป็นต้องใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลสเข้าร่วมด้วย เนื่องจากเอนไซม์กลูโคอะไมเลสเป็นเอนไซม์ชนิดเอกโซอะไมเลสที่สามารถเร่งการทำลายพันธะ α-1,4 ไกลโคซิดิกได้โดยเฉพาะ รวมถึงพันธะ α-1,6 ไกลโคซิดิกในสายโซ่อะไมโลสหรืออะไมโลเพกทิน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเร่งการย่อยสลายของเอนไซม์ชนิดนี้จะทำให้เกิดเป็นกลูโคส [27] ซึ่งพบว่า เมื่อนำเอนไซม์กลูโคอะไมเลสมาใช้ร่วมกับเอนไซม์อะไมเลสในกระบวนการลอกแป้งโดยปรับภาวะในการลอกแป้งให้เหมาะสม จะได้ความเข้มข้นต่างๆ ของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า น้ำเสียจากการลอกแป้งที่มีความเข้มข้นของกลูโคสสูงสุด คือ 1.38±0.04 กรัมต่อลิตร เกิดขึ้นเมื่อใช้เอนไซม์อะไมเลสที่ความเข้มข้น 3 กรัมต่อลิตร ร่วมกับเอนไซม์

กลูโคอะไมเลส A ที่ความเข้มข้น 4.5 กรัมต่อลิตร สำหรับการลอกแป้งผ้าเดนิม 1.5 กรัม ที่พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้น เอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลสชนิด A ที่ความเข้มข้นดังกล่าว จึงถูกเลือกเพื่อนำไปใช้ในการลอกแป้งผ้าเดนิมต่อไป

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นในน้ำเสียจากการลอกแป้งโดยใช้เอนไซม์อะไมเลสร่วมกับกลูโคอะไมเลส A และเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับกลูโคอะไมเลส B

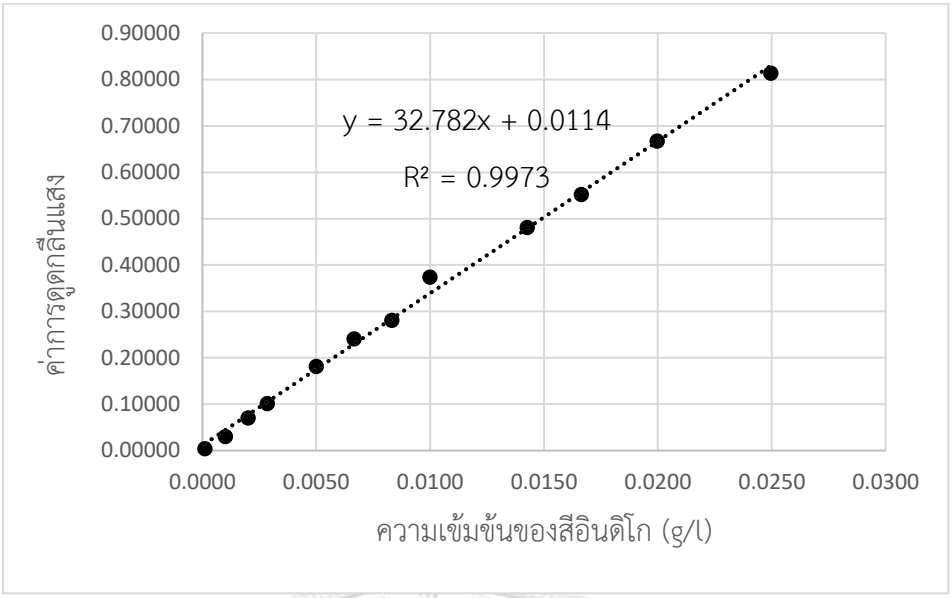
ความเข้มข้นของอะไมเลส (กรัมต่อลิตร)	เอนไซม์กลูโคอะไมเลส		ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง (กรัมต่อลิตร)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
	ชนิด	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)		
3.0	A	1.5	0.87	0.02
	A	3.0	1.07	0.01
	A	4.5	1.38	0.04
	B	1.5	0.92	0.03
	B	3.0	1.05	0.03
	B	4.5	1.20	0.02

4.3 การฟอกสีผ้าเดนิมและผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี

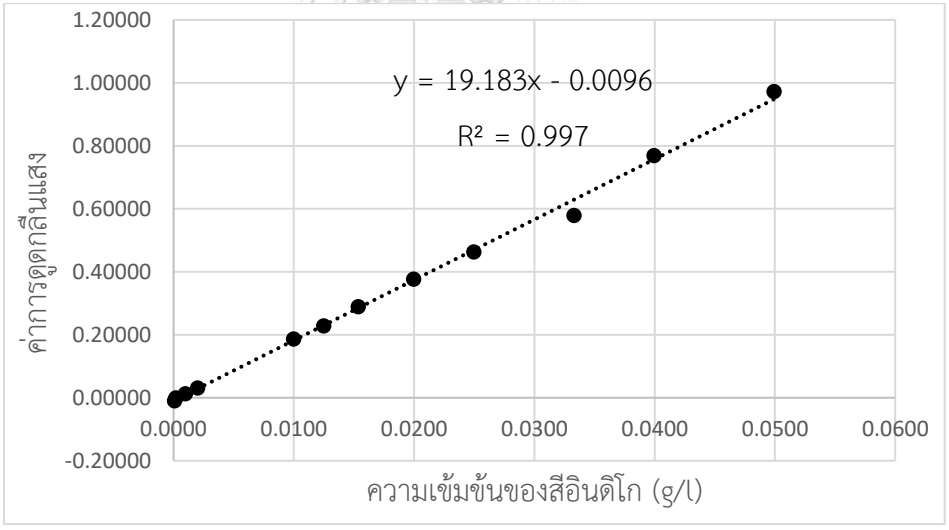
4.3.1 การฟอกสีและกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากการฟอกสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หลังการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและหินกรวด นำน้ำเสียที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสีย (สีอินดิโกหลุดออกจากผ้าเดนิมขณะฟอกสีผ้า) ก่อนนำน้ำเสียไปใช้ในขั้นตอนการรีดิวซ์สีและย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายต่อไป โดยในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจำเป็นต้องจัดเตรียมกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 350 นาโนเมตร และความเข้มข้นของสีอินดิโก (ละลายน้ำ) เมื่อรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และเมื่อรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีอินดิโกเมื่อรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์



รูปที่ 4.5 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีอินดิโกเมื่อรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี

เมื่อนำน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโก (ละลายน้ำ) หรือปริมาณสีในน้ำเสียโดยการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร และนำค่าการดูดกลืนแสงมาเทียบหาความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากกราฟมาตรฐานในรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อฟอกสีผ้าเดนิมน้ำหนัก 3.26 ± 0.05 กรัม โดยใช้เอนไซม์ เซลลูเลสและหินกรวดตามวิธีการฟอกและภาวะการฟอกในข้อ 3.5.1 (ดัดแปลงจากคำแนะนำของผู้ผลิตเอนไซม์) จะเกิดน้ำเสียปริมาตรประมาณ 18 มิลลิลิตร และมีสีอินดิโกในน้ำเสียโดยเฉลี่ยที่ความเข้มข้น 0.094 ± 0.04 กรัมต่อลิตร และสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีอินดิโก (ละลายน้ำ) หรือปริมาณสีในน้ำเสียโดยการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร และนำค่าการดูดกลืนแสงมาเทียบหาความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากกราฟมาตรฐานในรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อฟอกสีผ้าเดนิมน้ำหนัก 3.1 ± 0.1 กรัม โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสและหินกรวดตามวิธีการฟอกและภาวะการฟอกในข้อ 3.5.1 จะเกิดน้ำเสียปริมาตรประมาณ 16 มิลลิลิตร และมีสีอินดิโกในน้ำเสียโดยเฉลี่ยที่ความเข้มข้น 0.28 ± 0.03 กรัมต่อลิตร จากนั้นได้นำน้ำเสียที่ผ่านการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคสมาย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายต่อไป

จากผลการทดลองนี้ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกที่หลุดออกจากผ้าเมื่อผ้าถูกฟอกสี และเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส เพื่อเป็นข้อมูลในการนำน้ำเสียส่วนนี้ไปใช้งานต่อไป ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์เหล่านี้ในข้อ 4.6 และ 4.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 ผลการศึกษาในเบื้องต้นของการนำน้ำเสียจากสองกระบวนการผลิตผ้าเดนิมประกอบด้วยน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการรีดิวซ์และย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย

4.4.1 ค่าพีเอชและค่าโออาร์พีของน้ำเสียจากสองกระบวนการผลิตผ้าเดนิม

การศึกษานี้เริ่มจากการใช้เอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลสสำหรับการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบตามวิธีและภาวะในการทดลองหัวข้อ 3.4.1 เพื่อให้เกิดกลูโคสจากการลอกแป้งปริมาณมากสำหรับนำไปใช้เป็นสารรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีและนำไปย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายต่อไป โดยจากการศึกษาพบว่า การใช้เอนไซม์อะไมเลส 3 กรัมต่อลิตร ร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลสชนิด A 4.5 กรัมต่อลิตร สำหรับการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบ 1.5 กรัม ที่พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็น

เวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีกลูโคสความเข้มข้น 1.38 $\pm$ 0.04 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงที่สุดในภาวะการลอกแป้งทั้งหมดที่ได้ทดลอง (ตารางที่ 4.1 หัวข้อ 4.2.2) จึงได้นำน้ำเสียนี้ไปรีดิวซ์สีอินดิโกที่หลุดออกจากผ้าเดนิมเมื่อฟอกสีผ้าด้วยเอนไซม์เซลลูเลส โดยได้ปรับพีเอชและค่าโออาร์พีของน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมให้เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกตามคำแนะนำของ Chakraborty และ Chavan [15] คือ พีเอช 10.5-11.5 และค่าโออาร์พีตั้งแต่ -700 มิลลิโวลต์ ลงไป แต่ในการทดลองนี้สามารถปรับค่าโออาร์พีได้ต่ำสุดคือ ค่าโออาร์พี -325 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อการรีดิวซ์สีอินดิโกอย่างเหมาะสม โดยสาเหตุนี้น่าจะเนื่องมาจากปริมาณหรือความเข้มข้นของกลูโคส (ในน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบ) ที่นำมารีดิวซ์สีอินดิโก (ในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม) มีค่าต่ำเกินไปสำหรับการนำมารีดิวซ์สีอินดิโก คือมีความเข้มข้นของกลูโคสเพียง 1.38 $\pm$ 0.04 กรัมต่อลิตร (ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดลองและได้แนะนำปริมาณหรือความเข้มข้นของกลูโคส (5-20 กรัมต่อลิตร ตามปริมาตรน้ำเสีย) สำหรับนำมาใช้รีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม ดังตารางที่ 3.4 ในหัวข้อ 3.6.3 เพื่อปรับค่าโออาร์พีของน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมให้ต่ำกว่านี้ จึงอาจจำเป็นต้องเติมกลูโคสเพิ่มลงไปในน้ำเสียนี้ก่อนนำน้ำเสียมาย้อมเส้นด้ายฝ้ายต่อไป หรืออาจต้องเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่ใช้ในกระบวนการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ที่ความเข้มข้น 4.5 กรัมต่อลิตร โดยการเพิ่มความเข้มข้นนี้น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งการย่อยสลายแป้ง (อะไมโลเพกทิน) ให้เกิดเป็นกลูโคสมากขึ้นได้อีก) อย่างไรก็ตาม น้ำเสียที่ผ่านการรีดิวซ์ตามตารางที่ 4.2 ได้ถูกนำมาย้อมเส้นด้ายฝ้ายและผลการย้อมแสดงในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.2 ค่าโออาร์พีและค่าพีเอชของน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารรีดิวซ์	น้ำเสียจากการฟอกสีที่ผ่านการรีดิวซ์	
	ORP (mV)	pH
กลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง	-325	12.73

4.4.2 ความเข้มสี เฉดสี และร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้ายฝ้ายหลังย้อมโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

เส้นด้ายฝ้ายหลังย้อมโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม ถูกนำมาวัดค่าความเข้มสีและเฉดสี แสดงผลในตารางที่ 4.3 พบว่า เส้นด้ายฝ้ายหลังย้อมมีค่าความเข้มสี (K/S

0.08) โดยเส้นด้ายมีสีน้ำเงินอ่อน (b* ติดลบ) แกมเขียวเล็กน้อย (a* ติดลบเล็กน้อย) นอกจากนี้ การวิเคราะห์ร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้ายฝ้ายหลังย้อมพบว่า เส้นด้ายฝ้ายมีร้อยละของการผนึกสีอินดิโกบนเส้นด้ายฝ้าย คือ ร้อยละ 56.1

ตารางที่ 4.3 ความเข้มสีและเฉดสีของเส้นด้ายฝ้ายหลังย้อมโดยใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

เส้นด้ายฝ้าย	ความเข้มสี (K/S)	L*	a*	b*	c*
หลังย้อม	0.08	88.25	-2.12	-2.33	3.15

4.5 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สี การย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย และผลการวิเคราะห์เส้นด้ายย้อมสี

4.5.1 การรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สี

จากข้อ 3.6.1, 3.6.2 และ 3.6.3 ที่แสดงภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม คือ การรีดิวซ์สีในน้ำเสียจนสีละลายทั้งหมดโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ 2.5 กรัมต่อลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 กรัมต่อลิตร ในน้ำเสียปริมาตรประมาณ 18 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการรีดิวซ์มากสุดประมาณ 3 นาที และการรีดิวซ์สีในน้ำเสียจนสีละลายทั้งหมดโดยใช้กลูโคส 10 กรัมต่อลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 กรัมต่อลิตร ในน้ำเสียปริมาตรประมาณ 16 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการรีดิวซ์มากสุดประมาณ 4 นาที ณ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีในน้ำเสียข้างต้นนี้ไม่ว่าจะรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์หรือด้วยกลูโคส พบว่า ค่าพีเอชและค่าโออาร์พี (Oxidation-Reduction Potential) ของน้ำเสียก่อนนำไปย้อมเส้นด้ายฝ้ายต่างมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 คือ น้ำเสียมีค่า pH 13.12 และ 13.75 และค่าโออาร์พี -695 มิลลิโวลต์ และ -653 มิลลิโวลต์ เมื่อรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าโออาร์พีในน้ำสีอินดิโกที่ใกล้เคียงคำแนะนำของ Chakraborty และ Chavan [15] แต่ค่าพีเอชมีค่าที่สูงกว่าประมาณ 1-2 หน่วย อย่างไรก็ตาม การรีดิวซ์นี้ใช้เวลามากสุดเพียง 4 นาที จึงไม่น่าจะเกิดภาวะความเป็นด่างมากเกินไป (over alkalinity) หรือการรีดักชันมากเกินไป (over reduction) จนมีผลกระทบต่อการย้อมสีในขั้นต่อไป หลังการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีแล้ว จึงนำน้ำเสียนี้ไปย้อมเส้นด้ายฝ้ายและวิเคราะห์ผลการย้อมสีเส้นด้ายต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.4 ค่าโออาร์พีและค่าพีเอชของน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส ณ ภาวะที่เหมาะสม

สารรีดิวซ์	น้ำเสียจากการฟอกสีที่ผ่านการรีดิวซ์	
	ORP (mV)	pH
โซเดียมไดไทโอไนต์	-695	13.12
กลูโคส	-653	13.75

4.5.2 ความเข้มสีและเฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียหลังจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส

เส้นด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยสีในน้ำเสียจากการฟอกสีที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส ณ ภาวะที่เหมาะสม ถูกนำมาวัดค่าความเข้มสี (K/S, color strength) และเฉดสี แสดงผลในตารางที่ 4.5 โดยพบว่า เส้นด้ายฝ้ายย้อมด้วยสีในน้ำเสียที่รีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์มีค่าความเข้มสี (K/S 1.41) หรือมีสีที่เข้มกว่าเส้นด้ายฝ้ายย้อมด้วยสีในน้ำเสียที่รีดิวซ์ด้วยกลูโคส (K/S 0.73) อยู่ 1 เท่าตัว โดยเส้นด้ายทั้งสองมีสีน้ำเงิน (b* ติดลบ) แกมเขียวเล็กน้อย (a* ติดลบเล็กน้อย) เส้นด้ายย้อมด้วยสีที่รีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์มีเนื้อสีน้ำเงินมากกว่า (b* ติดลบมากกว่าและ c* มีค่ามากกว่า) และเส้นด้ายย้อมด้วยสีที่รีดิวซ์ด้วยกลูโคสมีสีน้ำเงินอ่อนกว่าและสีสว่างกว่า (L* มากกว่า) สาเหตุที่เส้นด้ายย้อมด้วยสีที่รีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์มีสีเข้มกว่าและออกเฉดสีน้ำเงินมากกว่าก็เนื่องมาจากน้ำเสียหลังการรีดิวซ์มีค่าโออาร์พีติดลบมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จึงทำให้สีอินดิโกสามารถละลายในน้ำและแพร่เข้าสู่เส้นด้ายได้มากกว่านั่นเอง

ตารางที่ 4.5 ความเข้มสีและเฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส

เส้นด้ายฝ้ายย้อมสี	ความเข้มสี (K/S)	L*	a*	b*	c*
สีรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์	1.41	66.74	-4.30	-16.60	17.17
สีรีดิวซ์ด้วยกลูโคส	0.73	73.63	-4.48	-13.69	14.41

4.5.3 ร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส

หลังการย้อมสีและการออกซิไดส์สีบนเส้นด้ายฝ้าย เส้นด้ายถูกนำมาวัดค่าความเข้มสี (K/S, color strength) ก่อนและหลังการซักล้างเพื่อคำนวณค่าร้อยละของการผนึกสีบนเส้นด้ายตามสมการที่ 3.2 แสดงผลในตารางที่ 4.6 และพบว่าเส้นด้ายฝ้ายย้อมด้วยสีในน้ำเสียที่รีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และที่รีดิวซ์ด้วยกลูโคส ต่างมีค่าร้อยละของการผนึกของสีบนเส้นด้ายใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 74-75

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการผนึกสีบนเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส

เส้นด้ายฝ้ายย้อมสี	ร้อยละการผนึกสีบนเส้นด้าย
สีรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์	74.8
สีรีดิวซ์ด้วยกลูโคส	73.8

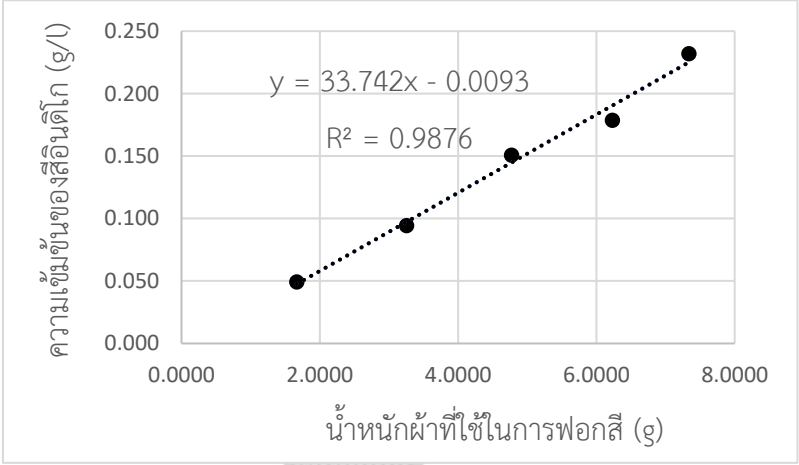
4.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ ก่อนนำไปย้อมเส้นด้าย

การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการนำน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมไปประยุกต์เป็นวัตถุดิบในกระบวนการย้อมสีต่อไป โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีผ้า ความเข้มข้นของสีอินดิโกที่หลุดออกจากผ้าเมื่อถูกฟอกสี และเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกเหล่านี้ก่อนนำไปใช้ในการย้อมต่อไป

น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอกสีผ้าเดนิมที่ต่างกันจะทำให้ได้น้ำเสียจากการฟอกสีที่มีปริมาตรและความเข้มข้นสีอินดิโกต่างกัน น้ำเสียที่ได้จากการฟอกสีจะถูกนำมารีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไดไทโอไนต์ แสดงดังตารางที่ 3.3 หลังการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ น้ำเสียจะถูกนำมาวัดหาค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีอินดิโกที่หลุดออกจากผ้า น้ำหนักต่างๆ ในกระบวนการฟอกสี รวมถึงศึกษาเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์ (น้ำเสียสีน้ำเงินเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลือง)

4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี

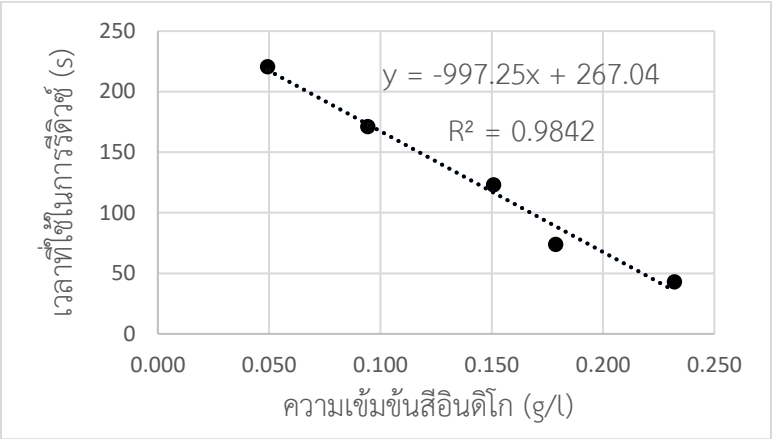
จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักผ้าเดนิมสำหรับการฟอกสีผ้าด้วยเอนไซม์ เซลลูเลสและหินกรวด จะทำให้ได้น้ำเสียจากการฟอกสีที่มีความเข้มข้นของสีอินดิโกที่หลุดออกมาจากผ้ามากขึ้นแปรผันตามกันเป็นสมการเส้นตรง y=33.742x-0.0093 โดยสัมพันธ์กันแบบมีนัยสำคัญ และความสัมพันธ์นี้เกิดขึ้นเฉพาะเมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์รีดิวซ์สีอินดิโกที่หลุดออกจากผ้าขณะฟอกสีผ้า



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

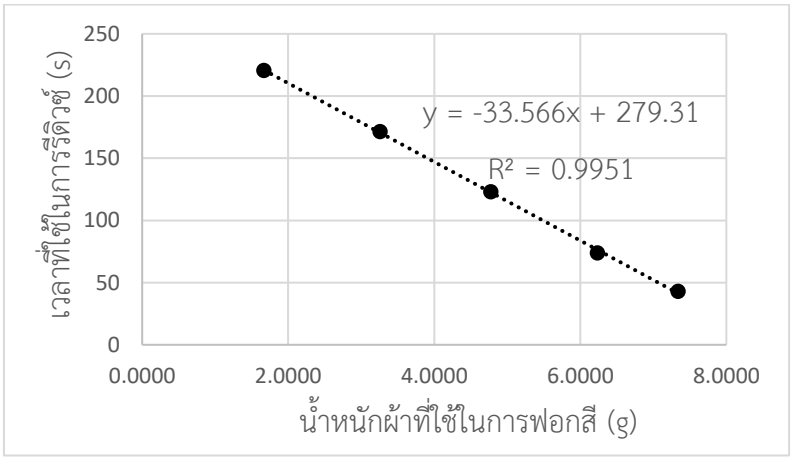
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียมีลักษณะแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียมากขึ้น (น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีมากขึ้นด้วย) การนำน้ำเสียมารีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ จะใช้เวลาในการรีดิวซ์สีน้อยลง โดยมีความสัมพันธ์แปรผกผันกันแบบเส้นตรงด้วยสมการ y=-997.25+267.04 อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ที่นำมาใช้ในการฟอกสีและเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีมีลักษณะแปรผกผันกันเป็นเส้นตรงสมการ y=-33.566x+279.31 อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อน้ำหนักของผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีเพิ่มขึ้น (ความเข้มข้นของสีอินดิโกที่หลุดออกจากผ้าเดนิมเมื่อถูกฟอกสีก็จะเพิ่มขึ้นด้วย) ระยะเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์จะมีค่าลดลง ซึ่งมีอัตราการลดลงของระยะเวลาในการรีดิวซ์สีใกล้เคียงกับอัตราการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีในข้อ 4.6.1 (สังเกตจากความชันของเส้นกราฟในรูปที่ 4.6 (ค่า 33.742) และ 4.8 (ค่า -33.566) ค่าใกล้เคียงกัน) เมื่อฟอกผ้าเดนิมมากขึ้น



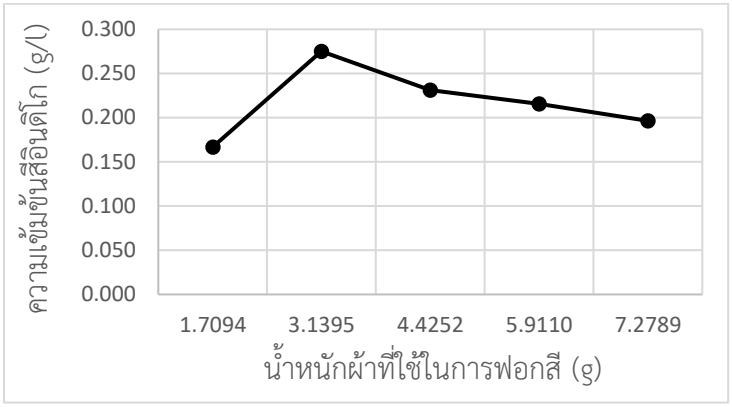
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์

4.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส ก่อนนำไปย้อมเส้นด้าย

เช่นเดียวกับเหตุผลการศึกษาความสัมพันธ์ในหัวข้อ 4.6 การศึกษานี้เกี่ยวกับความสัมพันธ์เหล่านี้เมื่อสีอินดิโกถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอกสีผ้าเดนิมที่ต่างกัน จะทำให้ได้น้ำเสียจากการฟอกสีที่มีปริมาตรและความเข้มข้นสีอินดิโกต่างกัน น้ำเสียที่ได้จากการฟอกสีจะถูกนำมารีดิวซ์ด้วยกลูโคส โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และกลูโคส แสดงดังตารางที่ 3.4 หลังการรีดิวซ์ด้วยกลูโคส น้ำเสียจะถูกนำมาวัดหาค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีอินดิโกที่หลุดออกจากผ้าที่น้ำหนักต่างๆ ในกระบวนการฟอกสี รวมถึงศึกษาเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้กลูโคส (น้ำเสียสีน้ำเงินเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลือง)

4.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี

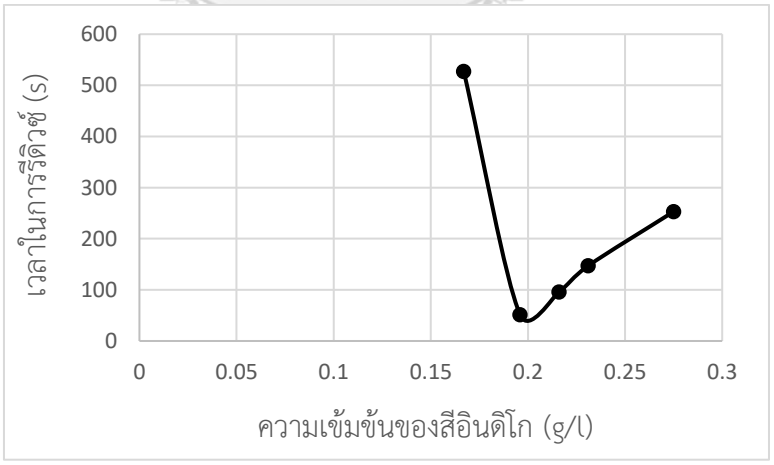
จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียที่ถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคสและน้ำหนักของผ้าที่นำมาใช้ฟอกสีนั้น พบว่า ความสัมพันธ์นี้ไม่ได้สัมพันธ์กันแบบเส้นตรงเหมือนความสัมพันธ์ที่แสดงในข้อ 4.6.1 ซึ่งคำนวณความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียโดยการรีดิวซ์สีให้ละลายน้ำด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ แต่ ณ ที่นี้เป็นการรีดิวซ์ด้วยกลูโคสและความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสีย แสดงความสัมพันธ์แปรผันตามกัน เมื่อน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีตั้งแต่ 1-3 กรัม และแปรผกผันกัน เมื่อฟอกผ้าเดนิมน้ำหนักมากกว่านี้ขึ้นไป โดยความสัมพันธ์นี้อาจไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นข้อมูลในการประยุกต์น้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคสและย้อมสีต่อไป



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส

4.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้กลูโคสและความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

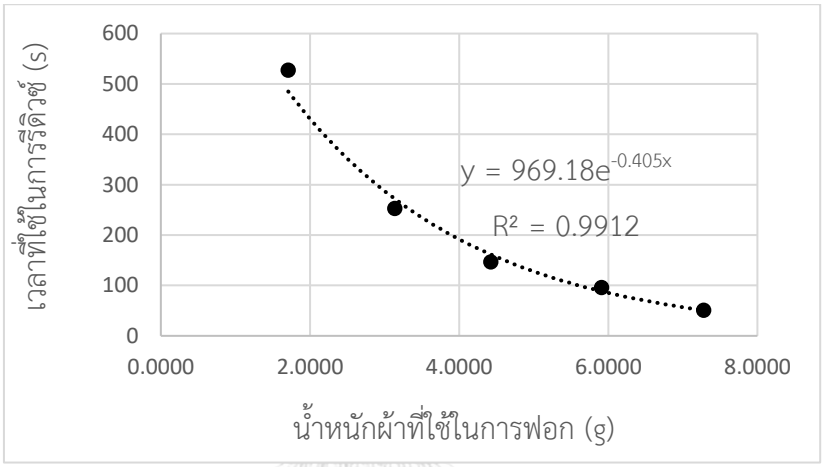
จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟมีการแปรผกผันกันในช่วงความเข้มข้นของสีอินดิโกที่หลุดออกมาจากผ้าเดนิม 0.16-0.20 กรัมต่อลิตร และแปรผันตามกันเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 0.20 กรัมต่อลิตรขึ้นไป โดยความสัมพันธ์นี้อาจไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้น้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคสและย้อมสีต่อไป



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้กลูโคสและความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม

4.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาในการรีดิวซ์ด้วยกลูโคส

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีด้วยกลูโคส พบว่า ลักษณะของเส้นกราฟลดลงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล กล่าวคือ เมื่อฟอกสีผ้าน้ำหนักมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจะลดลง ซึ่งจะมีอัตราการลดลงที่เร็วมาก จากผลความสัมพันธ์นี้ทำให้พอจะใช้ประโยชน์จากข้อมูลส่วนนี้ได้สำหรับประยุกต์การใช้น้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมน้ำหนักต่างๆ ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียด้วยกลูโคส และเวลาในการรีดิวซ์ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสีและเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียโดยใช้กลูโคส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แสดงการศึกษาการใช้น้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบด้วยเอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่มีกลูโคสเป็นองค์ประกอบมาใช้เป็นสารรีดิวซ์สำหรับสีอินดิโก และการนำน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่มีสีอินดิโกเป็นองค์ประกอบมาใช้เป็นสีย้อมสำหรับย้อมสีอินดิโกลงบนเส้นด้ายฝ้าย โดยศึกษาสิ่งต่างๆ ประกอบด้วย แอกทิวิตีของเอนไซม์ทั้งสามชนิดที่ใช้ในการลอกแป้งและการฟอกสีผ้าเดนิม การลอกแป้งผ้าเดนิมและความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการลอกแป้ง การฟอกสีผ้าเดนิมและความเข้มข้นของสีอินดิโกที่เกิดขึ้นจากการฟอกสี ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยใช้โซเดียมไดไทโอไนต์และด้วยกลูโคส และผลการย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย (ความเข้มสี เฉดสี และร้อยละการผนึกสีของเส้นด้ายหลังย้อม) และการทดลองในเบื้องต้นในการนำน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมมาเป็นวัตถุดิบในการย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย ผลการสรุปในงานวิจัยนี้จะหมายรวมเฉพาะผลที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวอย่างผ้าเดนิม เส้นด้ายฝ้าย เอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส และวัสดุสารเคมีต่างๆ ในงานวิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาแอกทิวิตีของเอนไซม์ที่ใช้แต่ละชนิดมีค่าแอกทิวิตี ดังนี้ เอนไซม์อะไมเลส 6,181±37 ยูนิตต่อมิลลิลิตร เอนไซม์กลูโคอะไมเลส A 16,586±145 ยูนิตต่อมิลลิลิตร เอนไซม์กลูโคอะไมเลส B 24,436±535 ยูนิตต่อมิลลิลิตร และเอนไซม์เซลลูเลส 1,120±40 ยูนิตต่อกรัม โดย 1 ยูนิต (U) ของเอนไซม์ หมายถึง ปริมาณเอนไซม์ที่สามารถเปลี่ยนซับสเตรท 1 ไมโครโมล ไปเป็นกลูโคสภายในเวลา 1 นาที ภายใต้ภาวะแวดล้อมที่กำหนด

2. จากการศึกษาภาวะการลอกแป้งผ้าเดนิมที่ให้ความเข้มข้นกลูโคสในน้ำเสียมากที่สุด คือ การใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์อะไมเลส 3 กรัมต่อลิตร เอนไซม์กลูโคอะไมเลส A 4.5 กรัมต่อลิตร สำหรับลอกแป้งผ้าเดนิม 1.5 กรัม ที่พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสีย 1.38±0.04 กรัมต่อลิตร

3. การฟอกสีผ้าเดนิมด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและหินกรวดในงานวิจัยนี้ พบว่า ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์มีค่า 0.094±0.04 กรัมต่อ

ลิตร ต่อน้ำเสียที่เกิดขึ้น 18 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักผ้าที่ใช้ฟอกสี 3.26±0.05 กรัม และความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคสมีค่า 0.28±0.03 กรัมต่อลิตร ต่อน้ำเสียที่เกิดขึ้น 16 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักผ้าที่ใช้ฟอกสี 3.1±0.1 กรัม

4. ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ คือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร โซเดียมไดไทโอไนต์ 5 กรัมต่อลิตร (เมื่อปริมาตรของน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีมากกว่า 30 มิลลิลิตร ขึ้นไปโดยประมาณ ถ้ามีปริมาตรน้อยกว่านั้นจะใช้ปริมาณความเข้มข้นตามตารางที่ 3.3) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการรีดิวซ์สี คือ ระยะเวลาที่ทำให้น้ำเสียเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มไปเป็นสีเขียวอมเหลือง และภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีโดยรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส คือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมต่อลิตร กลูโคส 20 กรัมต่อลิตร (เมื่อปริมาตรของน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีมากกว่า 30 มิลลิลิตร ขึ้นไปโดยประมาณ ถ้ามีปริมาตรน้อยกว่านั้นจะใช้ปริมาณความเข้มข้นตามตารางที่ 3.4) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการรีดิวซ์สี คือ ระยะเวลาที่ทำให้น้ำเสียเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มไปเป็นสีเขียวอมเหลือง

5. ความเข้มสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยสีในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ (K/S 1.41) มีสีที่เข้มกว่าเส้นด้ายหลังย้อมด้วยสีในน้ำเสียฯ ที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส (K/S 0.73) อยู่ 1 เท่าตัว และเฉดสีของเส้นด้ายทั้งสองมีสีน้ำเงิน (b* ติดลบ) แกมเขียวเล็กน้อย (a* ติดลบเล็กน้อย) เส้นด้ายย้อมด้วยสีที่ถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์มีเนื้อสีน้ำเงินมากกว่า (b* ติดลบมากกว่า และ c* มีค่ามากกว่า) และเส้นด้ายย้อมด้วยสีที่ถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคสมีสีน้ำเงินอ่อนกว่าและสีสว่างกว่า (L* มากกว่า) ส่วนร้อยละการผนึกสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยสีในน้ำเสียที่รีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และที่รีดิวซ์ด้วยกลูโคส ต่างมีค่าร้อยละของการผนึกของสีบนเส้นด้ายใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 74-75

6. การศึกษาในเบื้องต้นของการนำน้ำเสียจากสองกระบวนการผลิตผ้าเดนิมประกอบด้วยน้ำเสียจากการลอกแป้งผ้าเดนิมและน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการรีดิวซ์และย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายนั้น พบว่า การลอกแป้งด้วยภาวะที่ใช้ในงานวิจัยให้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของกลูโคสไม่เพียงพอต่อการนำมาใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิม ทำให้ค่าโออาร์พีของการรีดิวซ์สียังไม่ต่ำมากเท่าที่ควรเป็น (ควรเป็นตั้งแต่ -600 มิลลิโวลต์ลงไป) และผลการย้อมเส้นด้ายฝ้ายได้สีไม่เข้มเท่าที่ต้องการ เพื่อปรับค่าโออาร์พีของน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมให้ต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กว่านี้ จึงอาจจำเป็นต้องเติมกลูโคสเพิ่มลงไปในน้ำเสียนี้ก่อนนำน้ำเสียมาย้อมเส้นด้ายต่อไป หรืออาจต้องเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่ใช้ในกระบวนการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบ ณ ปัจจุบันใช้ที่ความเข้มข้น 4.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นนี้น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งการย่อยสลายแป้ง (อะไมโลเพกทิน) ให้เกิดเป็นกลูโคสมากขึ้นได้อีก

7. สำหรับการนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้งานจริง ผู้วิจัยขอเสนอแนะการนำน้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมไปใช้สำหรับการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และย้อมสีลงบนเส้นด้ายฝ้าย โดยใช้น้ำหนักของผ้าเดนิมในการฟอกสี ปริมาตรของน้ำเสียจากการฟอกสี ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของโซเดียมไดไทโอไนต์ ดังตารางที่ 3.3 (แต่สามารถปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไดไทโอไนต์ตามความเหมาะสม เพื่อให้ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ถูกรีดิวซ์ไม่ต่ำกว่า 11.5) และเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีตามสมการเส้นตรง y=-33.566x+279.31 (ดังรูปที่ 4.8) โดยที่ x คือ น้ำหนักของผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี และ y คือ เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์สีอินดิโก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการลอกแป้งผ้าเดนิมดิบอาจต้องปรับกระบวนการในการลอกแป้งเพื่อให้ได้กลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้งมากขึ้น ด้วยการเพิ่มน้ำหนักผ้าที่ใช้ในการลอกแป้ง หรือเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์กลูโคอะไมเลส หรือเติมกลูโคสเพิ่มลงไปในน้ำเสียจากการลอกแป้ง หรือเปลี่ยนชนิดเอนไซม์อะไมเลสให้ทำงานที่ภาวะเดียวกันกับเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ซึ่งจะช่วยให้น้ำเสียจากการลอกแป้งมีประสิทธิภาพที่ดีในการเป็นสารรีดิวซ์สีอินดิโก และช่วยเพิ่มค่าโออาร์พีให้ติดลบมากขึ้น จึงจะส่งผลทำให้ความเข้มสีของเส้นด้ายสูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

1. Shin, Y., Choi, M. & Yoo, D.I., *Eco-friendly indigo reduction using bokbunja (Rubus coreanus Miq.) sludge.* 2014. **1**(1): p. 6.
2. Saikhao, L., Setthayanond, J., Karpkird, T. & Suwanruji, P., *Green reducing agents for indigo dyeing on cotton fabrics.* Journal of Cleaner Production, 2018. **197**: p. 106-113.
3. ณรงค์กร ตรีสาร, การรีดิวซ์สีซัลเฟอร์โดยใช้น้ำตาลรีดิวซ์จากสารละลายหลังกำจัดสิ่งสกปรกเส้นด้ายสับปะรด, in สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ 2561, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 98.
4. McLoughlin, J., S. Hayes, and R. Paul, *Cotton fibre for denim manufacture*, in *Denim*. 2015. p. 15-36.
5. Choudhury, A.K.R., *12 - Finishing of denim fabrics*, in *Principles of Textile Finishing*, C. Kent, Editor. 2017, The Boulervard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, United Kingdom: Roy Choudhury, Asim Kumar. p. 383-415.
6. Wikimedia. *Cellulose*. 2020; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose.
7. Sheikh, J. and I. Bramhecha, *Enzymes for green chemical processing of cotton*, in *The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology*. 2019. p. 135-160.
8. Srilava ltd. *Pumice Stone*. 2015; Available from: https://www.srilava.com/?lang=en.
9. Kuhad, R.C. and A. Singh, *Biotechnology for environmental management and resource recovery*. 2013: Springer.
10. Simic, K., *Application of Cellulases in the Process of Finishing.* Scientific Review, 2015. **58(1)**: p. 47-56.
11. Colomera, A. and H. Kuilderd, *Biotechnological washing of denim jeans*, in *Denim*. 2015, Elsevier. p. 357-403.
12. Vuorema, A., *Reduction and Analysis Methods of Indigo*. 2008: University of Turku.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

13. Wikimedia. *Indigo dye*. 2019; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Indigo_dye.
14. Chavan, R.B., *3 - Indigo dye and reduction techniques*, in *Denim*, R. Paul, Editor. 2015, Woodhead Publishing. p. 37-67.
15. Chakraborty, J.N., & Chavan, R.B., *Dyeing of denim with indigo.* Indian Journal of Fibre & Textile Research, 2004. **39**: p. 100-109.
16. Meksi, N., Ticha, M.B., Kechida, M., & Mhenni, M.F., *Using of ecofriendly α-hydroxycarbonyls as reducing agents to replace sodium dithionite in indigo dyeing processes.* Journal of Cleaner Production, 2012. **24**: p. 149-158.
17. Patra, A.K., Madhu, A. and Bala, N., *Enzyme washing of indigo and sulphur dyed denim.* Fashion and Textiles, 2018. **5**(1): p. 3.
18. ผจงจิตร เหมพนม, การลอกแป้งและฟอกสีเชิงชีวภาพของผ้าเดนิมในขั้นตอนเดียวโดยใช้มัลติเอนไซม์จาก *Aspergillus sp.*, in สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 92.
19. Ben Ticha, M., et al., *A promising route to dye cotton by indigo with an ecological exhaustion process: A dyeing process optimization based on a response surface methodology.* Industrial Crops and Products, 2013. **46**: p. 350-358.
20. Garriga, M., M. Almaraz, and A. Marchiaro, *Actas de Ingeniería.* Actas de Ingeniería, 2017. **3**: p. 173-179.
21. V.P.C. GROUP, *ENZYME HT-5*. (Unpublished Work): Samaedam,Bangkhunthian,Bangkok.
22. DuPont, *OPTIMAX 4060 VHP*. 2012, (Unpublished Work): Rochester, New York, USA.
23. DuPont, *OPTIMAX S*. 2012, (Unpublished Work): Rochester, New York, USA.
24. CHT Group, *BEIZYME TOP PLUS*. 2016, (Unpublished Work): Tubingen, Germany.
25. Yao, M., Araki, M., Senoh, H., Yamazaki, S., Sakai, T., & Yasuda, K., *Indigo Dye as a Positive-electrode Material for Rechargeable Lithium Batteries.* Chemistry Letters, 2010. **39**(9): p. 950-952.
26. Luo, Y., Pei, L., Zhang, H., Zhong, Q., & Wang, J., *Improvement of the Rubbing Fastness of Cotton Fiber in Indigo/Silicon Non-Aqueous Dyeing Systems.* Polymers (Basel), 2019. **11**(11).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

27. Van der Maarel, M.J., et al., *Properties and applications of starch-converting enzymes of the α-amylase family.* Journal of biotechnology, 2002. **94**(2): p. 137-155.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
แอกทิวิตีของเอนไซม์แต่ละชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ ก.1 ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์แต่ละชนิด

ชนิดเอนไซม์	ค่าแอกทิวิตีของเอนไซม์ (U/ml)	ค่าแอกทิวิตีเฉลี่ยของเอนไซม์	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
อะไมเลส	6141 6213 6189	6181 (U/ml)	37
กลูโคอะไมเลส A	16626 16707 16425	16586 (U/ml)	145
กลูโคอะไมเลส B	24570 24891 23846	24436 (U/ml)	535
เซลลูเลส	108 116 112	1120* (U/g)	40

*หมายเหตุ: ชั่งเอนไซม์เซลลูเลสมา 0.1001

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข
ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียหลังการลอกแป้ง

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้งจากการใช้ชนิดและปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ในปริมาณต่างๆ

สูตร	ตัวอย่างที่	ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
อะไมเลส 3 g/l + กลูโคอะไมเลส A 1.5 g/l	1	0.87	0.87	0.01
	2	0.86		
	3	0.89		
อะไมเลส 3 g/l + กลูโคอะไมเลส A 3 g/l	1	1.06	1.07	0.01
	2	1.07		
	3	1.07		
อะไมเลส 3 g/l + กลูโคอะไมเลส A 4.5 g/l	1	1.31	1.38	0.04
	2	1.39		
	3	1.40		
	4	1.38		
	5	1.38		
	6	1.44		
อะไมเลส 3 g/l + กลูโคอะไมเลส B 1.5 g/l	1	0.92	0.92	0.03
	2	0.94		
	3	0.89		
อะไมเลส 3 g/l + กลูโคอะไมเลส B 3 g/l	1	1.01	1.05	0.03
	2	1.07		
	3	1.06		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้งจากการใช้ชนิดและความเข้มข้นของเอนไซม์ต่างๆ (ต่อ)

สูตร	ตัวอย่างที่	ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
อะไมเลส 3 g/l + กลูโคอะไมเลส B 4.5 g/l	1	1.18	1.20	0.02
	2	1.21		
	3	1.2		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค
ความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์และกลูโคส

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้า (g)	ปริมาตร (ml)	ความเข้มข้นสี (g/l)
1	3.2123	18.5	0.133
2	3.3209	18.5	0.060
3	3.2327	18	0.090
ค่าเฉลี่ย	3.2553	18	0.094
SD	0.0471	0	0.04

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้า (g)	ปริมาตร (ml)	ความเข้มข้นสี (g/l)
1	3.1382	16	0.308
2	3.2848	17	0.241
3	2.9954	15	0.276
ค่าเฉลี่ย	3.1395	16	0.275
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1	1	0.03

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ กลูโคส และกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

ตารางที่ ง.1 ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	ความเข้มสีก่อนซักล้าง	ความเข้มสีหลังซักล้าง	ร้อยละการผนึกสี
1	2.64	2.05	77.7
2	1.07	0.77	72.0
ค่าเฉลี่ย	1.86	1.41	74.8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1	0.9	4

ตารางที่ ง.2 ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวอย่างที่	ความเข้มสีก่อนซักล้าง	ความเข้มสีหลังซักล้าง	ร้อยละการผนึกสี
1	1.25	0.93	74.4
2	0.71	0.52	73.2
ค่าเฉลี่ย	0.98	0.73	73.8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4	0.3	0.8

ตารางที่ ง.3 ความเข้มสีของเส้นด้ายก่อนและหลังการซักล้าง และร้อยละการผนึกสีด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

ตัวอย่างที่	ความเข้มสีก่อนซักล้าง	ความเข้มสีหลังซักล้าง	ร้อยละการผนึกสี
1	0.17	0.09	52.9
2	0.14	0.08	57.1
3	0.12	0.07	58.3
ค่าเฉลี่ย	0.14	0.08	56.1
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.03	0.01	3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ
ค่าเฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อม

ตารางที่ จ.1 เฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	L*	a*	b*	c*
1	62.36	-4.10	-18.49	18.94
2	58.93	-4.01	-19.35	19.76
ค่าเฉลี่ย	60.65	-4.06	-18.92	19.35
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2	0.06	0.6	0.6

ตารางที่ จ.2 เฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคส

ตัวอย่างที่	L*	a*	b*	c*
1	70.67	-4.62	-15.32	16.00
2	76.58	-4.33	-12.06	12.81
ค่าเฉลี่ย	73.63	-4.48	-13.69	14.41
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4	0.2	2	2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ จ.3 เฉดสีของเส้นด้ายหลังย้อมด้วยน้ำเสียจากการฟอกสีที่สีถูกรีดิวซ์ด้วยกลูโคสในน้ำเสียจากการลอกแป้ง

ตัวอย่างที่	L*	a*	b*	c*
1	87.42	-2.15	-2.36	3.20
2	88.19	-2.11	-2.43	3.21
3	89.13	-2.11	-2.19	3.04
ค่าเฉลี่ย	88.25	-2.12	-2.33	3.15
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.9	0.02	0.1	0.1

ภาคผนวก ฉ
น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตารางที่ ฉ.1 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 1 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	1.6211	9	0.025	230
2	1.6746	9.5	0.058	222
3	1.7006	9.5	0.065	212
ค่าเฉลี่ย	1.6654	9.3	0.049	221
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.04	0.3	0.02	9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ฉ.2 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 2 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	3.2123	18.5	0.133	181
2	3.3209	18.5	0.060	160
3	3.2327	18	0.090	171
ค่าเฉลี่ย	3.2553	18.3	0.094	171
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.06	0.3	0.04	11

ตารางที่ ฉ.3 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 3 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	4.7863	25	0.177	129
2	4.7284	23	0.113	120
3	4.8087	25	0.163	120
ค่าเฉลี่ย	4.7745	24.3	0.151	123
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.04	1	0.03	5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ฉ.4 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 4 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	6.4163	34	0.152	72
2	5.9523	32	0.150	75
3	6.3236	35	0.235	74
ค่าเฉลี่ย	6.2307	33.7	0.179	74
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2	2	0.05	2

ตารางที่ ฉ.5 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 5 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	7.3554	39	0.219	44
2	7.2535	38.5	0.242	40
3	7.4047	40	0.235	46
ค่าเฉลี่ย	7.3379	39.2	0.232	43
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.08	0.8	0.01	3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ช

น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีอินดิโกด้วยกลูโคส

ตารางที่ ช.1 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 1 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	1.687	8	0.201	520
2	1.7216	9.5	0.147	537
3	1.7195	9.5	0.152	524
ค่าเฉลี่ย	1.7094	9	0.167	527
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.02	0.9	0.03	9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.2 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 2 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	3.1382	15.5	0.308	260
2	3.2848	16.5	0.241	240
3	2.9954	15	0.276	258
ค่าเฉลี่ย	3.1395	15.7	0.275	253
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1	0.8	0.03	11

ตารางที่ ช.3 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 3 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	4.3813	23	0.229	150
2	4.4611	22	0.244	150
3	4.4331	22.5	0.220	140
ค่าเฉลี่ย	4.4252	22.5	0.231	147
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.04	0.5	0.01	6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ช.4 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 4 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	5.9627	29	0.228	94
2	5.9387	29	0.221	100
3	5.8315	30	0.197	95
ค่าเฉลี่ย	5.9110	29.3	0.216	96
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.07	0.6	0.02	3

ตารางที่ ช.5 น้ำหนักผ้าเดนิมที่ใช้ในการฟอกสี (แบบ 5 กระบอกย้อม) ความเข้มข้นของสีอินดิโกในน้ำเสียจากการฟอกสี และเวลาในการรีดิวซ์สีด้วยกลูโคส

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผ้าที่ใช้ในการฟอก (g)	ปริมาตรน้ำเสียจากการฟอกสี (ml)	ความเข้มข้นของสีอินดิโก (g/l)	เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ (s)
1	7.2387	39	0.245	49
2	7.2741	38.5	0.177	55
3	7.3238	40	0.167	50
ค่าเฉลี่ย	7.2789	39.2	0.196	51
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.04	0.8	0.04	3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จิตาภัค ชูดวง
วัน เดือน ปี เกิด	7 พฤษภาคม 2531
สถานที่เกิด	อุทัยธานี
วุฒิการศึกษา	วศ.บ. มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	381 ม.4 ต.เขาบางแกรก อ.หนองฉาง จ.อุทัยธานี 61170
ผลงานตีพิมพ์	งานประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 51 "การใช้น้ำเสียจากการฟอกสีผ้าเดนิมสำหรับการย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย"

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY