สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การศึกษาการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

Study On Dyeing Silk Yarn Using Supercritical Carbon Dioxide

ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสรณ์
หัวหน้าโครงการวิจัย

RCH
TT
854.3
ค2547
ฉ.1

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....120198.....
วัน, เดือน, ปี.....9 ก.ค. 2555

b.....1233991X.....
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2551
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ($SC\text{-}CO_2$) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสะอาด เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวใช้ $SC\text{-}CO_2$ เป็นตัวกลางในการย้อมแทนน้ำ จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ การศึกษาการย้อมสีเส้นใยไหมในเครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิ 50-70 °C และความดัน 10-20 MPa โดยใช้สีย้อมประเภทกรด (Acid dye) ชื่อ C.I. Acid Red 42 นำเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมไปหาค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมด้วยวิธีการรีฟลักซ์โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ 72 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายสีย้อมที่ได้จากการรีฟลักซ์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อหาปริมาณสีย้อมในเส้นใยไหม และแสดงค่าการละลายในหน่วยกรัมสีย้อมต่อกรัมไหม $\left(g_{Dye}/g_{Silk}\right)$

จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิ และความดันเพิ่มขึ้นค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น เมื่อทำการศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหม พบว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมจะเริ่มมีค่าคงที่ที่ความดัน 15 MPa ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมมีค่าอยู่ในช่วง 2.5 – 6.7 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$ เมื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหมด้วยสมการของ อาร์เรเนียส พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ซึ่งค่า D_0 เท่ากับ 3.26×10^{-11} m^2/s และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_D) เท่ากับ 11.07 kJ/mole จากนั้นนำเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสีด้วย $SC\text{-}CO_2$ ที่ภาวะความคงที่ที่ 15 MPa และ อุณหภูมิ 70 °C ทำการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง การซักล้าง และเหงื่อ พบว่า ค่าความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่ออยู่ในระดับดีถึงดีมาก และความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับต่ำ

ABSTRACT

A dyeing process of silk yarn in a supercritical carbon dioxide (SC-CO_2) was studied in this research. Because this process is a clean technology, so the process enabled a dyestuff impregnated into silk yarn by avoiding the conventional dyeing media such as water and some additives. The experiments were carried out by using batch process with a high pressure vessel. At various temperatures and pressures, in range of 50 to 70 ^{O}C and 10 to 20 MPa, respectively. The acid dyestuff called "C.I. Acid Red 42" were used. The solubility and diffusivity of the acid dyestuff in silk yarn were investigated. The impregnated dyestuff in silk yarn was extracted by using a reflux method with ethanol at a given temperature 72 ^{O}C for 8 hours. An amount of the extracted dyestuff in the ethanol solution were determined by using an UV-Visible spectrophotometer. The solubility of the acid dyestuff in silk yarn were obtained as a unit of gram dyestuff per gram silk yarn (g_{dye} / g_{silk}).

The experimental results showed that the solubility and the diffusion coefficient of the acid dyestuff were increased when the processing temperature were increased. Moreover the effect of the processing pressure on the acid dyestuff solubility were found that the solubility is gradually increased when the pressure increased up to 15 MPa, and followed by a plateau curve as approaching its saturated point. The experimental obtained the solubility data of the acid dyestuff in silk yarn was in the range of 2.5 to 6.7 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$. By applying the Arrhenius's equation, we could estimate the diffusion coefficient of the dyestuff in silk yarn as a function of the processing temperature and pressure. Moreover, this research used the dyed silk yarn from the condition of constant pressure at 15 MPa and temperature 70 ° C to test the colourfastness to light, washing and perspiration. And the result was shown the colourfastness to light and perspiration were in good to excellent. But the colourfastness to washing was at a low level.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์นฤมล ศิริทรงธรรม สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่ให้ความอนุเคราะห์เส้นใยไหม สีย้อม การทดสอบความคงทนของสีย้อมในเส้นใยไหม และขอบคุณหน่วยงานที่ให้ทุนวิจัย

ผศ.ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

รายการสัญลักษณ์.....X

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 ขอบเขตการวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 เส้นใยสิ่งทอ.....3

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสีย้อม.....8

2.3 การย้อมสีเส้นใยสิ่งทอ.....12

2.4 ความคงทนของสี.....13

2.5 ของไหลเหนือวิกฤต.....15

2.6 การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม.....17

2.7 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง.....20

2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก.....22

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....22

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....25

3.1 การปรับสภาพเส้นใยไหม.....25

3.2 การย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมในเส้นใยด้วยเทคนิคยูวี-วิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์....27
3.4 การทดสอบคุณภาพของเส้นใยเมื่อผ่านกระบวนการย้อมสี....27

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์....29
4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต....29
4.1.1 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยไหม....30
4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่....31
4.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อ
ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม....32
4.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม
และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก....34
4.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม
โดยอาศัยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง....34
4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกและการศึกษาผลของอุณหภูมิ
และความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก....38
4.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยไหมหลังการย้อม....40
4.3.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง....40
4.3.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง....41
4.3.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ....42

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....43
5.1 สรุปผลการทดลอง....43
5.1.1 ผลการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต....43
5.1.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย
และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก....44
5.1.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยหลังการย้อม....44
5.2 ข้อเสนอแนะ....44
เอกสารอ้างอิง....45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.....47
ภาคผนวก ก การสร้างกราฟมาตรฐาน.....48
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม.....51
ภาคผนวก ค การคำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์
และค่าการละลายของสีย้อมคาร์บอนไดออกไซด์.....54
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าคงที่และการประมาณค่าการละลายของสีย้อม
ในเส้นใยไหมด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง.....62
ภาคผนวก จ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก.....66
ภาคผนวก ฉ การทดสอบความคงทนของสีย้อมในเส้นใย.....69
ภาคผนวก ช ตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง.....82
ภาคผนวก ฌ อุปกรณ์การทดลอง.....84

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยธรรมชาติ....3

2.2 การแบ่งชนิดของเส้นใยประดิษฐ์....3

2.3 สมบัติที่เหมือนกันในเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ....4

2.4 องค์ประกอบที่สำคัญในเส้นใยไหม....6

2.5 สมบัติต่างๆ ของของเหลว แก๊ส และของไหลเหนือวิกฤต....16

2.6 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะต่างๆ....17

4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ภาวะการทดลองต่างๆ....31

4.2 ค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิต่างๆ....34

4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ....38

ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ....49

ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยก....52

ค.1 อุณหภูมิลดรูป (T_r) ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่างๆ....56

ค.2 ความดันลดรูป (P_r) ที่ความดันที่ใช้ในการทดลองต่างๆ....56

ค.3 ค่า z^O และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิลดรูป 1.05 1.10 และ 1.15....57

ค.4 ค่า z^O และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิลดรูป 1.05 1.10 และ 1.15 และ ความดันลดรูปที่ใช้ในการทดลอง....57

ค.5 ค่าแฟกเตอร์สภาพกดอัด (z) ที่ได้จากการคำนวณ....58

ค.6 ค่าปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (v)....59

ค.7 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ....60

ค.8 ค่าคงที่ a b และ c....61

ค.9 ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (X) ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง....61

จ.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ....68

ฉ.1 ผ้าขาว 2 เส้นใย....70

ฉ.2 สีที่ใช้ในการย้อมผ้าขนสัตว์....75

ช.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง....83

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของกรดอะมิโน....4

2.2 โครงสร้างทางเคมีของไหม....6

2.3 การแพร่กระจายของสีย้อมในเส้นใยที่เวลาในกระบวนการย้อมต่างๆ....18

2.4 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง....21

3.1 โครงสร้างของสีย้อม C.I.Acid Red 42....25

3.2 แผนภาพกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต....26

4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยไหม....29

4.2 ผลของเวลาต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่
ความดันคงที่ที่ 15 MPa และอุณหภูมิต่างๆ....30

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่....32

4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม....33

4.5 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึม
แบบสองทางที่อุณหภูมิ 50°C....35

4.6 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึม
แบบสองทางที่อุณหภูมิ 60°C....35

4.7 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึม
แบบสองทางที่อุณหภูมิ 70°C....36

4.8 ผลความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลาย
ของสีย้อมในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ....37

4.9 ผลความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลาย
ของสีย้อมในเส้นใยไหมที่อุณหภูมิ 70°C....37

4.10 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก....39

4.11 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง....40

4.12 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงเมื่อเทียบกับผ้ามาตรฐานสีน้ำเงิน....41

ก.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม C.I.Acid Red 42....50

ง.1 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่อุณหภูมิ 50°C....64

ฉ.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าหลายเส้นใย....71

ฉ.2 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าขาว 2 เส้นใย....72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ฉ.3 การเปรียบเทียบการกระจายพลังงานของแสงซีนอนอาร์กและแสงแดด....74
ฉ.4 การวางชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐานในวิธีที่ 1....76
ฉ.5 การวางชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐานในวิธีที่ 2....77
ฉ.6 การวางชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐานในวิธีที่ 3....78
ฉ.7 การวางชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐานในวิธีที่ 4....78
ฉ.8 การเปรียบเทียบการกระจายพลังงานของแสงคาร์บอนอาร์กและแสงแดด....79
ฉ.9 เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ....81
ฌ.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง....85
ฌ.2 เครื่อง UV/Vis Spectrophotometer....85
ฌ.3 ปั๊มอัดความดันสูง Isco Model 260 D....85
ฌ.4 เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์....86
ฌ.5 ชุดอุปกรณ์รีฟลักซ์....86

รายการสัญลักษณ์

D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
D_0	pre-exponential factor (m^2/s)
E_D	พลังงานก่อกัมมันต์ (kJ/mol)
R	ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (kJ/mol.K)
T	อุณหภูมิ (K)
t	เวลาที่ใช้ในการกระบวนการย้อมสี (นาที)
r	รัศมีของเส้นใย
Z	แนวแกนตามความยาวของเส้นใย
M_t	ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่เวลาใดๆ (g_{Dye}/g_{Silk})
M_α	ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่สมดุล (g_{Dye}/g_{Silk})
C	ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye} / g_{Silk})
k_D	ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี่ (g_{Dye} / g_{Silk}) (MPa)
b	ค่าคงที่ของรูช่องว่างร่วม (Hole affinity constant) (MPa^{-1})
p	ค่าความดัน (MPa)
C'_H	ค่าคงที่ของรูช่องว่างอิ่มตัว (Hole saturated constant) (g_{Dye} / g_{Silk})
C_D	ค่าการดูดซึมแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้(g_{Dye} /g_{Silk})
C_H	ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดเล็กมากๆ (Microvoid) (g_{Dye} / g_{Silk})
K	ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก
X	ค่าการละลายของสีย้อมในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})
Y	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 nm
x	ความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยก (g/cm^3)
V	ปริมาตรเอทานอลที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (cm^3)
W	น้ำหนักเส้นใยไหมก่อนย้อม (g)
ρ	ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (g/cm^3)
ρ_{ref}	ความหนาแน่นอ้างอิง (g/cm^3)
m	น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (g/mol)
v	ปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (cm^3/mol)
z	ค่าแฟกเตอร์สภาพกดอัด

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

z^{0} และ z^{1}	correlation factor
ω	อะเซนตริกแฟกเตอร์
T_r	อุณหภูมิลดรูป
P_r	ความดันลดรูป
T_c	อุณหภูมิวิกฤต
P_c	ความดันวิกฤต

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา[1]

ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตไหม และผลิตภัณฑ์จากเส้นใยไหมที่มีคุณภาพแห่งหนึ่งของโลก และยังสามารถผลิตเส้นใยไหมได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงนิยมนำเส้นใยไหมมาทอเป็นเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่มเพราะให้ความสบาย มีความทนทาน และเพื่อให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย ไปจนถึงการตกแต่งเพื่อให้เกิดความสวยงามดูมีคุณค่า เนื่องจากไหมเป็นเส้นใยที่ไม่นำความร้อน เหมาะสำหรับเสื้อผ้าที่ใช้ในฤดูหนาว รวมทั้งผ้าพันคอ ผ้าไหมบางๆ ยังใช้ทำเป็นชุดนอน หรือเสื้อคลุมนอน เพื่อให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย ผ้าไหมที่ทอหลวมๆ อาจใช้สำหรับอากาศร้อนได้ เพราะความร้อนจากร่างกายสามารถแทรกผ่านช่องว่างของผ้าทอแบบนี้ได้ นอกจากนี้สีของผ้าเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้ซื้อต้องการ ดังนั้นกระบวนการย้อมสีจึงเป็นสิ่งที่สำคัญเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีสันสวยงาม สะดุดตาผู้ที่พบเห็น แต่โดยทั่วไปกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการย้อม สีสังเคราะห์เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการย้อมสี เพราะสีย้อมที่อุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่เลือกใช้ก็คือสีสังเคราะห์ เพราะสามารถหาได้ง่าย แต่การใช้สีสังเคราะห์ในกระบวนการย้อมก็จะมีผลเสียตามมาคือน้ำที่เหลือจากกระบวนการย้อมส่วนใหญ่จึงเกิดเป็นน้ำเสีย ทำให้ต้องเสียงบประมาณในการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำในธรรมชาติ

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนากระบวนการย้อมสีเส้นใยไหม โดยนำเอาเทคโนโลยีในการย้อมเส้นใยไหมแบบใหม่มาใช้เรียกว่า "การย้อมสีด้วยของไหลเหนือวิกฤต" (Supercritical Fluid Dyeing) กระบวนการย้อมสีโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤตเป็นตัวกลางในการย้อม เป็นกระบวนการที่มีการยอมรับว่าเป็นกระบวนการที่สะอาด ลดของเสียและพลังงานจากอุตสาหกรรมการย้อม โดยของไหลเหนือวิกฤตที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวกลางในการย้อมแทนที่น้ำ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะเหนือวิกฤต ($SC\text{-}CO_2$)[2-3] เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ราคาถูก มีภาวะวิกฤตที่ต่ำ คือ อุณหภูมิวิกฤต (T_c) 32 °C และความดันวิกฤต (P_c) 7.38 MPa[4-5] มีแรงตึงผิวต่ำและมีการแพร่ได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ $SC\text{-}CO_2$ สามารถพาเอาสีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนของเส้นใยได้ง่าย[6-7] การย้อมสีด้วยของไหลเหนือวิกฤตมีข้อดีกว่าการย้อมสีโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการย้อมคือ สามารถควบคุมค่าการละลายของสีย้อมได้โดยการปรับความดันทำให้ควบคุมสีและความเข้มของสีได้ โดยกระบวนการย้อมสีนี้ เป็นกระบวนการที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการย้อมแล้ว สามารถนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจากคุณสมบัติดังกล่าว $SC\text{-}CO_2$จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อมแทนที่น้ำได้

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ซึ่งสีย้อมที่เหมาะแก่การนำมาใช้ในกระบวนการย้อมเส้นใยไหมนี้มี 3 ชนิดคือ สีรีแอกทีฟ สีเอซิด และสีเมทัลคอมเพล็กซ์ แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สีเอซิดซึ่งเป็นสีย้อมประเภทกรด ซึ่งมีชื่อทางการค้า คือ C.I.Acid Red 42 เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้เหมาะสมในการย้อมเส้นใยโปรตีน และมีความคงทนของสีต่อแสงดีมาก และเมื่อนำมาทดลองย้อมสีเส้นใยพบว่า สีย้อมชนิดนี้สามารถย้อมติดกับเส้นใยได้ดีกว่าสีย้อมชนิดอื่นที่ภาวะในการทดลองเดียวกัน ซึ่งภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ ความดัน 10-20 MPa อุณหภูมิ 50-70 °C ผลการทดลองในการศึกษาจะกล่าวในบทถัดไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษากลไกการย้อมสีเส้นไหมด้วยสี C.I. Acid Red 42โดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อม
2) เพื่อหาความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นไหมด้วยสี C.I. Acid Red 42โดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อม
3) ประมาณค่าการละลายของสีย้อม C.I. Acid Red 42 โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) ศึกษากลไกการย้อมสีเส้นไหมด้วยสี C.I. Acid Red 42 ด้วย SC-CO_2
2) ศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลา ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย้อมสีด้วย SC-CO_2 โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษาคือ ความดัน 10-20 MPa อุณหภูมิ 50-70 °C และเวลาในช่วง 30-240 นาที
3) ทดสอบความคงทนของสีต่อแสง การซักล้าง และเหงื่อของเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสีด้วย SC-CO_2
4) ทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1) พัฒนากระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยสี C.I. Acid Red 42
2) สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าการละลายของสีย้อม C.I. Acid Red 42 ในเส้นใยได้อย่างเหมาะสม
3) เพื่อเป็นแนวทางสำหรับกระบวนการย้อมสีเส้นใยชนิดอื่น เช่น เส้นใยขนสัตว์ ฝ้าย

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 เส้นใยสิ่งทอ [8]

เส้นใยสิ่งทอ คือวัสดุที่ความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่หน้าตัดตามขวางไม่น้อยกว่า 100 เท่า เส้นใยสิ่งทอสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ เช่น เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม เครื่องประดับ เฟอร์นิเจอร์ นอกจากนี้ยังมีความสำคัญในกระบวนการทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การนำเส้นใยไปทำเป็นผ้าหุ้มเบาะ และที่สำคัญในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเส้นใยสิ่งทอเพื่อนำไปใช้ในทางการแพทย์ โดยนำมาทำเป็นอวัยวะเทียม เช่น ลิ้นหัวใจกำมะหยี่พอลิเอสเทอร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใยสิ่งทอที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะถูกแบ่งชนิดของเส้นใยได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มของเส้นใยธรรมชาติและกลุ่มของเส้นใยประดิษฐ์ ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยธรรมชาติ [8]

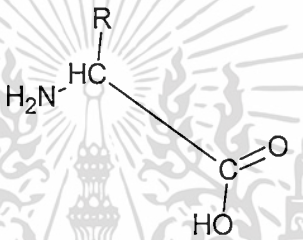
กลุ่มเส้นใย	ชนิดของเส้นใย
เซลลูโลส (เส้นใยพืช)	ฝ้าย (cotton) ลินิน (linen) ปอ (jute) รามี (ramie) ป่าน (hemp) นุ่น (kapok)
โปรตีน (เส้นใยสัตว์)	ขนสัตว์ (wool) ไหม (silk) ผม (hair)
แร่	แร่ใยหิน (asbestos)
ยาง	ยาง (rubber)

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชนิดของเส้นใยประดิษฐ์ [8]

กลุ่มเส้นใย	ชนิดของเส้นใย
เซลลูโลส	เรยอน (rayon) ไลโอเซลล์ (lyocell) อะซิเทต (acetate) ไตรอะซิเทต (triacetate)
พอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส	โอเลฟินส์ (olefins) พอลิเอสเทอร์ (polyester) ซาราน (saran) สแปนเด็กซ์ (spandex) ไวเนียน (vinyon) อะคริลิก (acrylic) มอดอะคริลิก (modacrylic) อะรามิด (aramid) ไนลอน (nylon) โนโวลอยด์ (novoloid)
แร่และเหล็ก	โลหะ (metallic) แก้ว (glass) เซรามิก (ceramic) กราไฟต์(graphite)

2.1.1 เส้นใยโปรตีน

เส้นใยโปรตีน คือเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ เช่น ไหม ขนแกะแม้ว่าในปัจจุบันเส้นใยประดิษฐ์จะมีปริมาณการผลิตสูงขึ้น แต่ความต้องการเส้นใยโปรตีนก็ไม่ได้ลดลง เนื่องจากเส้นใยโปรตีนจะมีลักษณะเฉพาะตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรรมชาติหลาย ๆ อย่าง เส้นใยโปรตีนมีองค์ประกอบหลักที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของโพลีเปปไทด์ของกรดอะมิโนเป็นสายโซ่ยาว จึงทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง ซึ่งธาตุหลักๆ ที่ประกอบในโมเลกุล คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน โปรตีนของเส้นใยไหมเรียกว่า ไพโบรอิน (fibroin) และโปรตีนของขนสัตว์เรียกว่า เคราติน (keratin) โดยเส้นใยโปรตีนมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความเป็นกรดและเบสในโครงสร้างเดียวกัน ดังรูปที่ 2.1



หมู่อะมิโน หมู่คาร์บอกซิล

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของกรดอะมิโน[8]

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยโปรตีนจะมีสมบัติต่างๆ ที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากเส้นใยโปรตีนมีลักษณะโครงสร้างหลักทางเคมีที่เหมือนกัน ซึ่งสมบัติต่างๆ สามารถบ่งบอกได้ถึงการใช้งานและการดูแลเก็บรักษาให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับผู้บริโภค โดยสมบัติที่เหมือนกันในเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่เหมือนกันในเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ [8]

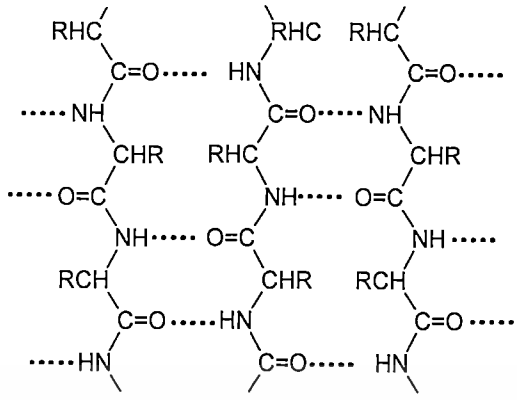
สมบัติ	ความสำคัญต่อผู้ใช้
การคืนตัว	- ป้องกันการยับ - รอยยับย่นสามารถทำให้หายได้โดยการแขวนทิ้งไว้หลังการใช้
การดูดซึมความชื้นดี	- สวมใส่สบายในสภาพภูมิอากาศที่เย็นชื้นและการดูดซึมน้ำดี - ทำให้พรมขนสัตว์ไม่เปราะแตกง่าย
ความแข็งแรงลดลงเมื่อเปียก	- ต้องระวังในขณะซักล้าง - ขนสัตว์มีความแข็งแรงลดลง 40% ในขณะที่ไหมลดลง 15%

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่เหมือนกันในเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ (ต่อ)

ความถ่วงจำเพาะต่ำ	- ผ้าขนสัตว์น้ำหนักเบากว่าผ้าที่ทำจากเส้นใยพืชที่ความหนาเท่ากัน
ถูกทำลายได้ด้วยด่าง	- ต้องใช้สบู่หรือน้ำยาซักล้างที่เป็นกลางหรือด่างอ่อน - เหงื่อจะมีโอกาสทำให้ความแข็งตัวลดลง
ถูกทำลายได้ด้วยสารที่ทำให้เกิดการออกซิไดส์	- สารซักฟอกประเภทคลอรีนจะไปทำลายเส้นใยจึงควรหลีกเลี่ยง - แสงแดดทำให้ผ้าเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลือง
ถูกทำลายได้ด้วยความร้อนแห้ง	- ขนสัตว์กระด้าง เปราะ และหลอมง่ายด้วยความร้อนแห้ง - ผ้าเกิดการเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองได้
ทนต่อเปลวไฟ	- เผาไหม้ไม่หมด ดับไฟได้ด้วยตัวมันเองให้กลิ่นเหมือนการเผาเส้นผมโดยมีขี้เถ้าสีดำและสามารถบดแตกได้

2.1.2 เส้นใยไหม [9-10]

ไหมเป็นเส้นใยยาวที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ มีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นโปรตีนที่มีสมบัติที่ดีเหมาะแก่การทำเป็นเสื้อผ้า เพราะให้ความสบาย ความสวยงาม ซึ่งไหมถูกจัดเป็นเส้นใยที่มีความหรูหรา และมีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง เช่น มีความเงางามตามธรรมชาติ มีชีวิตชีวา และยังมีความแข็งแรงสูง ลักษณะโครงสร้างเกิดจากการต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวของกรดอะมิโน โดยมีการเรียงต่อกันด้วยแขนแอไมด์หรือเปปไทด์ ไหมมีปริมาณซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่น้อยมากจนเกือบไม่พบ อีกทั้งโมเลกุลไหมจะมีการจัดเรียงตัวยาวเป็นระเบียบส่งให้มีความแข็งแรงสูง เส้นใยไหมดิบมีความหนาประมาณ 24-30 μm เส้นใยไม่สม่ำเสมอ เพราะมีกาวติดอยู่รอบเส้นใย ในรังไหมหนึ่งรังจะได้เส้นใยไหมยาวประมาณ 400-700 m ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่นับเป็นเส้นใยยาว ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยไหมแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยประกอบด้วย เส้นใยโปรตีนเรียกว่า fibroin และ sericin หรือกาวไหมเป็นส่วนใหญ่ และนอกจากนี้ยังมี น้ำ แร่ธาตุ และแว็กซ์ องค์ประกอบที่สำคัญในเส้นใยไหมแสดงได้ดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไหม[9]

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบที่สำคัญในเส้นใยไหม

องค์ประกอบที่สำคัญ	ปริมาณในเส้นใย (เปอร์เซ็นต์)
Sericin	22-25
Fibroin	62.5-67
น้ำ	10-11
เกลือและอื่นๆ	1-1.5

สมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมสามารถแบ่งได้เป็น สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังนี้

1. **สมบัติทางกายภาพของไหม**

1.1 ลักษณะภายนอก ไหมดิบจะมีลักษณะของเส้นใยคู่เกาะติดกันด้วยกาวไหม ผิวนอกดูเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย

1.2 ความยาวของเส้นใย ไหมมีความยาวมากและเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาว ความยาวโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 400-700 m

1.3 สี ไหมมีสีตั้งแต่เหลืองไปจนถึงเทา

1.4 ความมัน หลังจากลอกกาวไหมออกแล้วมีความมันดีมาก

1.5 ความแข็งแรง ไหมเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เนื่องจากไหมมีลักษณะที่เป็นเส้นใยยาวอย่างต่อเนื่อง มีพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวสม่ำเสมอ และมีผิวที่เรียบมัน ในขณะที่แห้งไหมมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดอยู่ที่ 3.5-5.0 g/dm^{3}และความแข็งแรงลดลงเล็กน้อยขณะเปียก

1.6 สภาพยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นตัวได้ดี โดยเส้นใยไหมสามารถยืดได้ถึง 15-20% ของความยาวเดิมก่อนขาดและสามารถคืนกลับที่ความยาวเดิมได้อย่างช้าๆ แม้ว่าเส้นใยจะมีความเรียบสม่ำเสมอแต่ก็มีผิวสัมผัสที่ไม่นุ่มเหมือนขนแกะและมีความแข็งเล็กน้อย

1.7 การคืนตัวจากแรงอัด ไหมมีความสามารถในการคืนตัวได้ดี ไม่เกิดการยับย่นง่าย

1.8 ความสามารถในการดูดซึมความชื้น ไหมมีความสามารถในการดูดความชื้นที่ดี เนื่องจากที่ภาวะมาตรฐานไหมมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นอยู่ที่ 11% จึงทำให้มีความสามารถในการดูดสีย้อมและสารตกแต่งที่ดีอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถดูดสารชนิดอื่นเช่น เกลือของโลหะต่างๆ เข้าไปเก็บไว้ภายในเส้นใยได้ ดังนั้นการซักน้ำหรือการตกแต่งผ้าไหมด้วยน้ำที่ไม่สะอาด มีเกลือของโลหะผสมอยู่จะทำให้ผ้าไหมขาดเร็ว

1.9 ความร้อน ไหมมีความสามารถในการทนความร้อนได้ถึง135 °C แต่ที่อุณหภูมิ 170 °C จะทำให้ไหมเกิดการเหลืองไหม้หรือสลายตัว ดังนั้นการรีดผ้าไหมจึงไม่ควรใช้ความร้อนสูงและเมื่อจะทำการรีดผ้าไหมขาวควรใช้ผ้าฝ้ายชื้นปิดข้างบน เนื่องจากผ้าไหมขาวสามารถเปลี่ยนเป็นสีเหลืองได้ง่ายไหมจะเกิดการติดไฟง่าย แต่เมื่อเอาออกจากไฟก็จะดับได้เอง เถ้าที่เหลือเป็นเม็ดเล็กสีดำ เปราะ มีกลิ่นเหมือนขนนกไหม้ไฟ

1.10 สภาพนำความร้อน ไหมเป็นเส้นใยที่ไม่นำความร้อน จึงเหมาะที่จะนำมาตัดเป็นเสื้อผ้าที่ใช้ในฤดูหนาว แต่ในช่วงฤดูร้อนผ้าไหมที่ทอหลวมๆ ก็ยังสามารถนำมาตัดเป็นเสื้อผ้าได้ เนื่องจากความร้อนจากร่างกายสามารถแทรกผ่านช่องว่างของผ้าทอได้

1.11 การทำความสะอาด เนื่องจากผิวที่เรียบของเส้นใยจึงทำให้เส้นใยไหมไม่ติดฝุ่นจึงทำให้ไหมเป็นเส้นใยที่สะอาดจึงสามารถทำความสะอาดได้ง่าย ด้วยการใช้สบู่อ่อนหรือน้ำยาซักแห้ง

2. สมบัติทางเคมีของไหม

2.1 กรด ไม่ถูกทำลายด้วยกรดทั่วไป แต่กรดที่มีความเข้มข้นสูงจะละลายไหมได้ และกรดที่มีความเข้มข้นปานกลางจะทำให้ไหมหดย่น โครงสร้างของใยไหมดูดซึมกรดได้เร็วและเก็บไว้ภายในเส้นใยได้ด้วยทำให้ซักออกยาก

2.2 ด่าง ด่างที่มีความเข้มข้นสูงและมีอุณหภูมิสูงจะทำลายไหมได้ ดังนั้นในการซักล้างจึงควรใช้สารซักฟอกที่เป็นด่างอ่อนๆ เช่น สบู่

2.3 เกลือคลอไรด์ ไหมถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ เช่น เหงื่อ เมื่อสัมผัสเหงื่อที่เป็นกรด ผ้าไหมจะอ่อนแอลงและสีของผ้าจะเปลี่ยนไป

2.4 สารซักฟอก ไหมถูกทำลายได้ด้วยสารซักฟอกประเภทออกซิไดส์

2.5 การทนต่อราและแมลง โดยปกติแล้วไหมจะไม่ขึ้นราง่ายได้ง่าย ยกเว้นแต่ถูกปล่อยทิ้งไว้ในภาชนะที่เปียกชื้นเป็นเวลานาน

2.6 แสงแดด ไหมอ่อนไหวต่อแสงแดด โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานาน ความแข็งแรงของผ้าไหมจะลดลงเร็วกว่าฝ้ายหรือผ้าขนแกะ เวลาเก็บจึงควรห่อด้วยผ้าหรือกระดาษสีดำ ไหมไม่นำกระแสไฟฟ้า แต่สามารถทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตได้ ไม่นำความร้อน ทำให้สวมใส่สบายและเส้นใยสามารถปรับอุณหภูมิภายในเส้นใยเองได้อย่างน้อยประมาณ 5 °C

2.7 การย้อมสี ไหมมีความสามารถในการรับสีย้อมผ้าได้ดีมากจึงทำให้สีติดทนทาน ผ้าไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสีไม่เหมาะที่จะนำมาตัดเย็บเป็นผ้าม่านเนื่องจากเมื่อเจอแสงแดดเป็นเวลานานจะทำให้สีของผ้ามีความซีดจางได้ สีที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยไหมคือสีย้อมชนิดแอซิด สีเบสิก หรือสีไดเรกซ์ และผ้าไหมนิยมทำผ้าพิมพ์เพราะผ้าไหมติดสีพิมพ์ได้ดีเช่นกัน

2.1.3 การพิจารณาคุณภาพเส้นใยไหม [11]

คุณลักษณะที่จะแสดงว่า ไหมดีหรือไม่นั้น พิจารณาจากสาเหตุ 8 ประการด้วยกัน ดังนี้

1. ใยไหมและเส้นด้ายต้องมีขนาดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด

2. ไหมควรมีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงที่ดี เนื่องจากเวลาทอจะได้ผ้าเนื้อเรียบสม่ำเสมอ

3. ไหมจะต้องมีความสดใสและเป็นมันสม่ำเสมอตลอดทั้งผืนผ้า

4. Crossing คือ ลักษณะที่ใยไหมพองเป็นแห่งๆ มักจะเกิดในระยะที่สาวหรือพันใยเมื่อนำใยไหมที่มีลักษณะเช่นนี้มาทอเป็นผืนผ้าจะทำให้ผิวผ้าขรุขระ

5. ขน เกิดจากการที่ใยขาดมาก กลายเป็นใยสั้นทำให้ปลายเส้นใยโผล่พ้นผิวผ้าขึ้นมามากเกินไป

6. เส้นด้ายมีจุดขาวๆ อยู่ประปรายทั่วไป เวลาย้อมสีจะติดไม่เท่ากัน

7. มีปุ่มปมของเส้นใยที่ขาดและพันกันอยู่ในเส้นใย

8. ห่วง เกิดจากการสาวไหมซึ่งดึงใยไหมออกมาแต่ละเส้นยาวไม่เท่ากัน ทำให้หย่อนเกิดเป็นห่วงในเส้นด้าย

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสีย้อม [9-10]

ในอดีตสีที่ใช้ในกระบวนการย้อมสีผ้าส่วนใหญ่ยังเป็นสีที่ได้มาตามธรรมชาติ เช่น สีย้อมที่ได้จากครั่งตัวเมียซึ่งจะมีสีม่วงแดง เหมาะสำหรับย้อมไหมและขนสัตว์ สีย้อมที่ได้จากแกนของต้น log wood จะมีสีดำ นิยมย้อมผ้าไหมแท้และผ้าฝ้ายสีดำ แต่ในปัจจุบันเพื่อให้สะดวกในกระบวนการย้อม สีสังเคราะห์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการย้อมสี เพราะสามารถหาได้ง่าย

สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด กระบวนการย้อมติดของสีบนเส้นใยเกิดจากการที่โมเลกุลของสีย้อมและเส้นใยรวมกันเกิดเป็นสารประกอบใหม่ ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพ เช่น เส้นใยจะเกิดเป็นสีขึ้นมา โดยพันธะที่เกิดขึ้นในขณะที่สีย้อมแพร่เข้าไปละลายหรือย้อมติดในรูพรุนของเส้นใย คือพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) หรือพันธะไอออนิก (Ionic bond) ซึ่งเส้นใยทุกชนิดจะมีขนาดรูพรุนของเส้นใยไม่เท่ากัน และขนาดโมเลกุลของสีย้อมก็มีขนาดไม่เท่ากันอีกด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่จะทำให้สีย้อมเกิดการย้อมติดบนเส้นใยได้หรือไม่

โดยทั่วไปแล้วในกลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอได้จำแนกสีย้อมออกเป็น 11 ประเภท โดยจะจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ การเลือกใช้สีย้อมเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการการย้อมสีเส้นใย เพราะสีแต่ละประเภทจะมีสมบัติและวิธีการใช้ที่แตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกสีย้อมให้เหมาะกับเส้นใยที่ต้องการย้อม เช่น เส้นใยไหม ส่วนใหญ่จะใช้สีแอซิดในการย้อม ประเภทของสีย้อมสามารถจำแนกได้ดังนี้

1) สีแอซิด (Acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก สีแอซิดมีหลายเฉดสี ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนแกะ ไหม ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่านและยังเหมาะสำหรับใช้ย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด เช่นไนลอน อะคลิริก สีแอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ ความคงทนของสีต่อแสงดีมาก ชนิดโครงสร้างของสีส่วนใหญ่คือ monazo และ anthraquinone สีย้อมที่ประกอบด้วยโลหะก็จัดเป็นสีแอซิด โดยโมเลกุลของโลหะ เช่น โครเมียม หรือ โคบอลท์ จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของสี การย้อมด้วยสีแอซิดทำได้ทั้งวิธีย้อมแบบแช่และการย้อมแบบต่อเนื่อง การย้อมแบบแช่นิยมใช้ในการย้อมผ้าถัก ผ้าทอ และพรม ซึ่งสีแอสิดสามารถจำแนกตามลักษณะการย้อมได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1.1 Leveling Dyeing Acid Dyes การย้อมด้วยสีชนิดนี้จะทำให้สีสม่ำเสมอบนเส้นใย เนื่องจากสีย้อมสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี สีย้อมมีโมเลกุลขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการดูดติดของสีย้อมในรูพรุนของเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องเติมเกลือโซเดียมซัลเฟต (Glauber's salt) เพื่อช่วยชะลอการดูดซึมของสีในเส้นใย โดยทำการย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด มีค่า pH 2-3 ซึ่งสีชนิดนี้มีค่าความคงทนต่อแสงแดดดีแต่ความคงทนต่อการซักล้างไม่ดี

1.2 Milling Dyeing Acid Dyes สีย้อมชนิดนี้จะมีการกระจายตัวที่ไม่ดี โดยจะทำการย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดที่ pH 5.2-6.2 โดยไม่จำเป็นต้องเติมเกลือเพื่อช่วยชะลอการดูดติดของสีย้อม เนื่องจากน้ำย้อมที่มีค่า pH มากกว่า 4.7 การเติมเกลือลงไปกลับทำให้เร่งการดูดติดของสีย้อม ซึ่งสีย้อมชนิดนี้จะมีความคงทนต่อการซักล้างมากกว่ากลุ่ม 1

1.3 Neutral Dyeing Acid Dyes หรือ Super Milling ทำการย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกลางหรือมีความเป็นกรดน้อยที่สุด โดยที่อุณหภูมิต่ำสีย้อมจะกระจายตัวเป็นวุ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงจะกระจายตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งมีความคงทนต่อแสงและการซักล้างดี

2) สีไดเร็กท์ (Direct dye) หรือสีย้อมผ้า สารประกอบส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบเอโซ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอยู่ที่ประมาณ 400-1200 เป็นสีที่ได้รับความนิยมในการย้อมสีเส้นใยเซลลูโลส ที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถนำมาใช้ในการย้อมสีเส้นใยฝ้ายโดยไม่ต้องเติมสารช่วยติด สีย้อมและเส้นใยจะยึดติดกันด้วยพันธะทุติยภูมิซึ่งเป็นพันธะที่อ่อน เช่นพันธะไฮโจรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นสีย้อมจึงมีโครงสร้างโมเลกุล

ที่มีขนาดใหญ่และยาว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับเส้นใย โครงสร้างของสี จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีส่วนที่เป็นวงแหวน การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการย้อมจะทำให้สีย้อมเคลื่อนตัวเข้าไปละลายในตัวกลางได้ดีมากขึ้น โดยสีไดเร็กซ์จะมีความคงทนต่อการซักล้างต่ำ เพราะเมื่อทำการซักผ้าหลายๆ ครั้งจะทำให้ผ้ามีสีที่ซีดจาง แต่มีข้อดีคือ มีความคงทนของสีต่อแสง ใช้งานง่าย และราคาไม่แพง

3) สีเบสิก (Basic or cationic dye) ในบางครั้งอาจเรียกว่าสีแคทไอออนิก เนื่องจากโครโมฟอร์มีประจุบวก สีเบสิกจะใช้ย้อมเส้นใยที่มีหมู่ที่เป็นกรด โดยพันธะที่เกิดระหว่างสีกับเส้นใยคือ พันธะเกลือ ซึ่งสีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทนแต่ความทนทานของสีแบสิกค่อนข้างไม่แน่นอน ขึ้นกับว่าใช้ย้อมเส้นใยชนิดใดคือ ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง แต่ถ้านำไปย้อมเส้นใยอะคริลิก จะมีความทนทานต่อแสงและความทนทานต่อการซักล้างจะอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก

4) สีดิสเพิร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในการย้อมเส้นใยอะซิเทต เป็นเส้นใยที่ดูดน้ำได้น้อย สีดีสเพิร์สเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติการกระจายที่ดี โดยจะกระจายตัวเป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ย้อมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ไนลอน และอะคลิริกได้อีกด้วย โดยสีดิสเพิร์สมีคุณสมบัติสีที่ทนแสงและการซักล้างค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด สารที่สำคัญอีกอย่างที่ใช้ในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยด้วยสีดิสเฟิร์สคือ สารพา (Carrier) เพื่อช่วยพาเอาสีย้อมเข้าไปในรูพรุนของเส้นใย สารช่วยกระจายตัว (dispersing agents) ซึ่งเป็นประเภทหนึ่งของสารลดแรงตึงผิว ประกอบด้วยส่วนที่ละลายได้ในน้ำและส่วนที่ละลายได้ในน้ำมันอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เมื่อเติมสารนี้ลงในน้ำ จะเกิดเป็นไมเซลล์ (micelle) โดยหันปลายด้านที่ไม่ชอบน้ำเข้าด้านใน และเป็นการช่วยในการละลายสีด้วย ส่วนด้านที่ชอบน้ำที่มีประจุลบจะหันออกด้านนอก ซึ่งทำให้ไมเซลล์แต่ละหยดผลักกัน เป็นการช่วยในการกระจายตัวของสีในน้ำ สีดิสเพิร์สกลุ่มใหญ่ๆ ประกอบด้วย monazo และ anthraquinone และเป็นสีที่ไม่มีประจุจึงทำให้ละลายน้ำได้น้อย

5) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนท์ในภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกภาวะธรรมชาติของสีรีแอกทีฟจะทำปฏิกิริยากับน้ำ สีที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยจะเรียกว่า fixed dyes ส่วนสีที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า hydrolysed dyes ซึ่งข้อดีของสีรีแอกทีฟ คือ สีจะละลายน้ำได้ดี สีแพร่

เข้าสู่เส้นใยได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำ มีสีสดใส และ มีความคงทนต่อการซักล้างได้ดี เนื่องจากสีที่ย้อมติดในรูพรุนของเส้นใยจะยึดติดกันแน่น แต่มีข้อเสียคือ สีรีแอกทีฟสามารถยึดติดกับผิวเส้นใยได้น้อย เนื่องจากสีชนิดนี้มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างเล็ก และยังทำให้เกิดปัญหาน้ำเสีย เพราะโครงสร้างของสีประกอบด้วยหมู่ซัลโฟเนตเพื่อช่วยในการละลายน้ำ ดังนั้นจึงต้องทำการล้างสีย้อมออกก่อนที่กระบวนการย้อมจะสิ้นสุด

6) สีอะโซอิค (Azoic dye) สีชนิดนี้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส แต่ไม่นิยมมากนักเนื่องจากมีเฉดสีที่จำกัด คือสีส้ม แดง เหลือง และอื่นๆ เล็กน้อย สีอะโซอิคถูกจัดเป็นสีอินแกรน (Ingran dye) คือสีจะก่อรูปในเส้นใยได้จะต้องเกิดจาการทำปฏิกิริยาของสาร 2 ชนิด คือ diazonium salt ซึ่งเป็นกลุ่มอนุพันธ์ของแอนนีลีนและ coupling component เป็นสารเคมีจำพวกเนพธอล โดยกระบวนการการย้อมสีชนิดนี้จะต้องเริ่มจากการเติม coupling component เข้าไปในเส้นใยก่อนโดยจะเกิดการแพร่เข้าไปเหมือนกับสีย้อม จากนั้นย้อมทับอีกครั้งด้วย diazonium salt จะได้เป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย สีอะโซอิคเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (Vat dye) สีย้อมชนิดนี้มีราคาแพงและมีขั้นตอนการย้อมที่ยุ่งยาก เหมาะที่นำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากสีแว็ตเป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำ ดังนั้นในกระบวนการย้อมจะต้องเตรียมน้ำย้อม โดยให้สีแว็ตทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้สีแว็ตสามารถรีดิวซ์กลายเป็นเกลือเข้าไปในรูพรุนของเส้นใย จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการย้อมแล้วไปผึ่งในอากาศเพื่อให้เกิดการออกซิไดส์ของสีย้อมในเส้นใยกลายเป็นสีแว็ต สีแว็ตโดยส่วนใหญ่มีความคงทนต่อแสงดีมาก ยกเว้นสีแว็ตชนิดอินดิโกที่ให้สีน้ำเงิน จะมีความคงทนของสีอยู่ในระดับต่ำ

8) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or Chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลีเอไมด์ได้ดี

9) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้เหมาะสำหรับย้อมฝ้าย

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dye) สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้ในกระบวนการย้อมสีฝ้าย ซึ่งเป็นสีที่มีราคาถูก ไม่ทนต่อสารฟอกขาวที่มีคลอรีน สีซัลเฟอร์ในกลุ่มสีเข้มจะมีความทนทานต่อการซักล้างดีถึงดีมาก และความทนทานต่อแสงค่อนข้างดี ส่วนในกลุ่มสีอ่อนจะมีความคงทนของสี

ต่อแสงต่ำ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นเมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้

2.3 การย้อมสีเส้นใยสิ่งทอ [12]

การย้อมสีเป็นวิธีการหนึ่งในการตกแต่งผืนผ้าให้มีความสวยงาม สะดุดตา ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากผู้บริโภคนิยมเลือกผลิตภัณฑ์จากสีสันก่อนการพิจารณาคุณภาพอย่างอื่นของผ้า ดังนั้นในกระบวนการย้อมสี จึงต้องทำให้สีมีความสม่ำเสมอ ไม่ย้อมด่าง สีย้อมติดทน ผู้ย้อมจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจในการเลือกสีย้อมและวิธีการย้อมให้เหมาะกับสิ่งทอ เพื่อให้กระบวนการย้อมดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ และในการย้อมสีจะขึ้นอยู่กันชนิดของเส้นใยด้วย เช่น ไหมควรใช้สีย้อมชนิด แอซิด รีแอกทีฟ เนื่องจากไม่มีด่างแก่เป็นส่วนผสมอยู่ เพราะเส้นใยไหมสามารถถูกทำลายได้ด้วยด่างแก่

กระบวนการย้อมสีเกิดได้จากการที่โมเลกุลของสีย้อมและเส้นใยรวมกันโดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่น การเกิดสีบนเส้นใย โดยโมเลกุลของสีย้อมจะต้องมีขนาดเล็กกว่ารูช่องว่างในเส้นใยจึงจะทำให้เกิดการติดสีได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านช่องว่างเข้าไปภายในเส้นใยแล้ว สีย้อมที่อยู่ในตัวกลางการย้อมจะซึมเข้าไปในเส้นใย ดังนั้นเส้นใยจะค่อยๆ มีโมเลกุลของสีรวมมากขึ้นทำให้สีมีความเข้มมากขึ้นด้วย ซึ่งเส้นใยทุกชนิดมีขนาดช่องว่าง และขนาดโมเลกุลของสีย้อมไม่เท่ากัน จึงเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้สีบางตัวย้อมเส้นใยบางชนิดไม่ติดหรือติดได้ ขั้นตอนที่สีย้อมผ่านเข้าสู่เส้นใยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การดูดซับของสีย้อมที่ผิวของเส้นใย (Sorption) โมเลกุลของสีย้อมที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางการย้อมจะเคลื่อนตัวเข้ามาเกาะที่ผิวของเส้นใย ซึ่งแรงที่ช่วยในการยึดเกาะนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยและสีย้อม เช่น สีย้อมชนิดแอซิดจะสร้างประจุของสีย้อมในน้ำย้อมเป็นลบ และเมื่อทำการย้อมเส้นใยไหม ซึ่งไหมแสดงประจุบวกเมื่ออยู่ในอ่างน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด ดังนั้น จะเกิดแรงในการดึงดูดระหว่างสีแอซิดและเส้นใย นอกจากนี้ ยังอาจมีแรงดึงดูดอื่นๆ ที่สำคัญเกิดขึ้นด้วย เช่น แรงดึงดูดที่ไม่ชอบน้ำ ที่ทำให้สีย้อมชอบที่จะอยู่ติดที่ผิวเส้นใยมากกว่าที่จะอยู่ในอ่างย้อม

2. การดูดซึมของสีย้อมเข้าสู่เส้นใย (Diffusion) ในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสีย้อมเคลื่อนที่เข้ามาเกาะติดที่ผิวของเส้นใยเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเส้นใยจะเริ่มดูดซับสีย้อม จึงทำให้ภายในเส้นใยมีความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มมากขึ้น การที่สีย้อมจะแพร่ผ่านเข้าสู่ภายในเส้นใยนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย เช่น เส้นใยที่ชอบน้ำ จะมีโครงสร้างภายในที่เป็นรู ซึ่งทำให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถแพร่เข้าสู่เส้นใยได้ง่าย แต่เส้นใยที่ไม่ชอบน้ำจะมีการดูดซึมน้ำต่ำ จึงต้องทำการเพิ่มพื้นที่รูพรุนของเส้นใยเพื่อในสีย้อมเคลื่อนตัวเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยได้ ซึ่งในกระบวนการย้อมการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการช่วยเร่งให้โมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนตัวเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยได้เร็วขึ้น

3. ความคงทนของสีบนเส้นใย (Retention) เมื่อโมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนภายในเส้นใย จะเกิดการยึดติดระหว่างสีย้อมกับเส้นใยโดยอาศัยกลไกทางเคมีและทางกายภาพ การที่สีย้อมจะยึดติดในรูพรุนของเส้นใยได้ดีนั้น เกิดจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับเส้นใยมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับตัวกลางในการย้อม ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการย้อมติดของสีบนเส้นใยจะต้องใช้แรงอย่างน้อย 2 ชนิด บางครั้งอาจมากถึง 4 ชนิด ซึ่งแรงที่ทำให้สีย้อมเกิดการยึดติดกับเส้นใยมีดังนี้

พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (Hydroxy group) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่น ได้แก่ พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ

แรงแวนเดอร์วาล์ล (Van der Waals'forces) แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นแรงอย่างอ่อนๆ จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมและเส้นใยเกิดการยึดติดกันได้เอง ซึ่งการเกิดพันธะชนิดนี้จะมีสมบัติความคงทนของสีในเส้นใยไม่ค่อยดี เนื่องจากเป็นสีย้อมที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ทำให้แพร่เข้าไปในรูพรุนของเส้นใยได้อย่างลำบาก

พันธะไอออนิก (Ionic bond) เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่มีประจุต่างกัน เช่น ในการย้อมเส้นใยโปรตีนด้วยสีแอสิด หรือการย้อมเส้นใยอะคริลิกด้วยสีเบสิค สีย้อมและเส้นใยที่เกิดพันธะชนิดนี้จะมีความคงทนของสีต่อการซักล้างดี เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะระหว่างสีย้อมกับเส้นใยและขนาดโมเลกุลของสีย้อมที่เกิดพันธะนี้จะมีขนาดเล็ก จึงมีการดูดกลืนแสงในช่วงที่แคบ ดังนั้นสีย้อมจึงมีเฉดสีที่สว่าง

พันธะโควาเลนท์ (Covalent bond) พันธะชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังจากที่สีย้อมถูกดูดแนบกับเส้นใยแล้ว เช่นในกรณีของสีรีแอกทีฟสามารถยึดติดกับเส้นใยได้โดยพันธะโคเวเลนท์ ซึ่งพันธะนี้เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้สีย้อมที่เกิดพันธะชนิดนี้มีความคงทนต่อการซักล้างดี

ในงานวิจัยนี้คาดว่าพันธะที่เกิดการยึดติดระหว่างสีย้อมกับเส้นใยไหม คือ พันธะไอออนิก เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้สีแอสิดในการย้อมสีเส้นใยไหม ซึ่งสีแอสิดจะประกอบด้วยหมู่ที่เป็นกรด เช่น $-SO_3Na$ ซึ่งจะสร้างประจุของสีย้อมเป็นลบในตัวกลางในการย้อม จะทำปฏิกิริยากับหมู่ที่เป็นเบสบนเส้นใย เช่น $-NH_2$ ซึ่งจะแสดงประจุบวกเมื่ออยู่ในกระบวนการย้อม[10] ดังนั้นจึงทำให้การยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยมีความแข็งแรง

2.4 ความคงทนของสี (Color Fastness)

ความคงทนของสีย้อม เป็นค่าที่แสดงให้ทราบถึงระดับคุณภาพของสีย้อมที่แพร่เข้าไปยึดติดในรูพรุนในโครงสร้างของเส้นใยสิ่งทอ ซึ่งค่าความคงทนของสีย้อมจะขึ้นอยู่กับสมบัติของสีย้อม สมบัติของเส้นใยสิ่งทอ และวิธีการย้อม ซึ่งในการทดสอบหาค่าความคงทนของสีย้อมจะมี

การทดสอบอยู่หลายรายการ ซึ่งในเลือกใช้การทดสอบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของเส้นใยสิ่งทอนั้น โดยเส้นใยสิ่งทอที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ควรผ่านการทดสอบความคงทนของสีย้อมในเส้นใย เช่น ความคงทนของสีต่อการซักล้าง ความคงทนของสีต่อแสง และความคงทนของสีต่อเหงื่อเป็นต้น เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพและลักษณะของงานที่จะนำเส้นใยสิ่งทอที่ผ่านการย้อมสีไปใช้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคงทนของสีย้อมในเส้นใยสิ่งทอ มีดังนี้

1. โครงสร้างทางเคมีของเส้นใย ซึ่งเส้นใยแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างทางเคมีต่างกันจึงมีความสามารถในการรับสีย้อมได้แตกต่างกัน
2. โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม
3. การเติมสารเติมแต่ง
4. วิธีการและเทคนิคในการย้อมสี

2.4.1 ความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Color Fastness to Washing) [13-14]

ความคงทนของสีต่อการซักล้าง หมายถึงความสามารถของเส้นใยที่จะทนต่อกระบวนการซักล้าง ไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสี มักจะมีปัญหาที่สำคัญคือ เมื่อนำผลิตภัณฑ์จากไหมที่ผ่านการย้อมสีไปทำการซักล้าง จะเกิดปัญหาสีตกทำให้ผ้าไหมมีความซีดจาง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงกระบวนการย้อมสี เพื่อให้เส้นใยมีความคงทนต่อการซักล้างเพิ่มขึ้น ปัญหาสีตกของไหมอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น การลอกกาวออกจากไหมออกไม่หมด การใช้สีย้อมที่มีราคาถูกและมีสมบัติของสีไม่ดี ใช้วิธีการย้อมที่ไม่เหมาะสม อุณหภูมิในการย้อมไม่สม่ำเสมอ และน้ำที่ใช้ในกระบวนการย้อมมีความกระด้าง มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง มีหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ISO 105 C01-C03 C06 Test A-C C10 มาตรฐานBS EN 20105 C01 C02 C03 C06 Test A-C มาตรฐานBS EN ISO 105 C01-C03 C06 Test A-C มาตรฐานBS 1006 C06 Test A-C มาตรฐานAATCC 61 (1A 2A) มาตรฐาน JIS L 0844 Test A1-A3 B1 C1-C3 C5 และ มอก.121 เล่ม 3

2.4.2 ความคงทนของสีต่อแสง (Color Fastness to Light) [15-16]

ความคงทนของสีต่อแสง หมายถึงความสามารถของเส้นใยสิ่งทอที่จะทนต่อแสงแดด รังสีที่อยู่ในแสงแดดเป็นตัวการที่สำคัญที่จะทำให้สีย้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ความคงทนของสีต่อแสงเป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของสีย้อม ซึ่งขึ้นกับความเข้มของแสงแดด และสมบัติของสีที่ใช้ย้อมเส้นใย โดยเฉพาะในประเทศที่มีอากาศร้อน เช่นประเทศไทย ค่าความคงทนของสีต่อแสงจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีโอกาสสูงที่ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากเส้นใยสิ่งทอจะถูกแสงแดดแรงๆ และเป็นเวลานานในระหว่างการใช้งาน ซึ่งในกระบวนการย้อมสีเส้นใย หากผู้ย้อมเลือกใช้สีย้อมที่ไม่เหมาะสมกับเส้นใยและวิธีการย้อม ก็อาจจะทำให้สีของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือซีดจางก่อนหมดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถใช้งานผลิตภัณฑ์นั้นต่อไปได้ ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมก็จะส่งผลต่อค่าความคงทนของสีย้อมด้วย แสงจะทำให้สีย้อมทุกชนิดเกิด

การเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสงสามารถกระตุ้นให้สีย้อมทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่อยู่ใกล้เคียงจนทำให้สีย้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่สามารถพบได้มากที่สุดคือ เกิดการซีดจางของสี การเปลี่ยนเฉดสีของสีย้อม สีย้อมมีความสดใสลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม
2. ภาวะแวดล้อม
3. สูตรโครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเส้นใย
4. ความยาวคลื่นของแสงที่มาตกกระทบ
5. ปริมาณของสีย้อมที่อยู่ภายในเส้นใย
6. ปริมาณสารอื่นๆ ภายในเส้นใย

มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงมีหลายมาตรฐาน เช่นมาตรฐานของ AATCC ISO JIS และ มอก. ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ซึ่งในแต่ละมาตรฐานจะถูกออกแบบให้ได้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากธรรมชาติและจะต้องให้ได้ผลการทดสอบที่สม่ำเสมอด้วย

2.4.3 ความคงทนของสีต่อเหงื่อ (Color Fastness to Perspiration)

เหงื่อสามารถทำให้สีของเส้นใยสิ่งทอเกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจทำให้เกิดการตกติดสีบนวัสดุอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นสิ่งทอที่จะนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ จึงต้องมีการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อด้วย และมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อจะทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 :1994 ตามมาตรฐาน BS EN ISO 105-E04-1996 และ มอก.121 เล่ม 4

2.5 ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid)

ของไหลเหนือวิกฤตเป็นสารบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิและความดัน สูงกว่าจุดวิกฤตของสารนั้น นอกจากนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้สมบัติของสารนั้นเปลี่ยนแปลงไปได้ ดังนั้นของไหลเหนือวิกฤตจึงเหมาะสมที่จะนำไปเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ในอุตสาหกรรม ซึ่งของไหลเหนือวิกฤตที่นิยมนำมาใช้ส่วนใหญ่ คือคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะเหนือวิกฤต

2.5.1 สมบัติของของไหลเหนือวิกฤต

โดยทั่วไปแล้วของไหลเหนือวิกฤตจะมีสมบัติที่อยู่ระหว่างสถานะแก๊สและของเหลว แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆ ของของเหลว แก๊สและของไหลเหนือวิกฤต

สถานะ	ความหนาแน่น (Kg/m^3)	ความหนืด ($\mu Pa.s$)	การแพร่ (mm^2/s)
แก๊ส	1	10	1 – 10
ของไหลเหนือวิกฤต	100 – 1000	50 -100	0.01 – 0.1
ของเหลว	1000	500 – 1000	0.001

สมบัติที่สำคัญของของไหลเหนือวิกฤตอีกหนึ่งอย่างคือ เมื่ออุณหภูมิคงที่ ค่าการละลายของของไหลเหนือวิกฤตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของของไหลเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าการละลายจึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นด้วย

2.5.2 ประโยชน์ของของไหลเหนือวิกฤต

ของไหลเหนือวิกฤตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายๆ อย่างเช่น

1. การสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤต ข้อดีของการสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤตเมื่อเปรียบเทียบกับการสกัดด้วยของเหลว คือของไหลเหนือวิกฤตมีความหนืดต่ำและมีความสามารถในการแพร่สูง โดยในกระบวนการการสกัดจะสามารถควบคุมความหนาแน่นของของไหลได้ และยังสามารถนำของไหลเหนือวิกฤตกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการลดความดันในการสกัด เนื่องจากการลดความดันจะทำให้ของไหลเหนือวิกฤตเปลี่ยนกลับไปอยู่ในสถานะแก๊ส โดยตัวอย่างที่ใช้ของไหลเหนือวิกฤตในการสกัด เช่น การสกัดคาเฟอีนจากเมล็ดกาแฟสีเขียว การผลิตน้ำมันหอมระเหยและผลิตภัณฑ์ยาจากพืช

2. การใช้ของไหลเหนือเหนือวิกฤตในกระบวนการทำความสะอาด

2.5.3 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ($SC\text{-}CO_2$)

ดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่า ของไหลเหนือวิกฤตที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คือ $SC\text{-}CO_2$ ซึ่ง $SC\text{-}CO_2$ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดวิกฤต และจะมีสมบัติอยู่ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะแก๊สและสถานะของเหลว โดย $SC\text{-}CO_2$ จะมีอุณหภูมิวิกฤต (T_C) 32 °C และความดันวิกฤต (P_C) 7.38 MPa สมบัติของของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะต่างๆสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะต่างๆ [6]

	แก๊ส	ของไหลวิกฤต	ของเหลว
อุณหภูมิ (^{o}C)	15 – 30	T_c = 32	15 – 30
ความดัน (MPa)	0.1	P = 28.0	0.1
ความหนาแน่น (g / cm^3)	0.0006 - 0.002	0.4 - 0.9	0.6 - 1.6
ความหนืด (μ Pa.s)	10 – 30	30 – 90	200 - 3000
สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2 / s)	0.001 - 0.004	0.002	(0.2-2) $\times 10^{-7}$

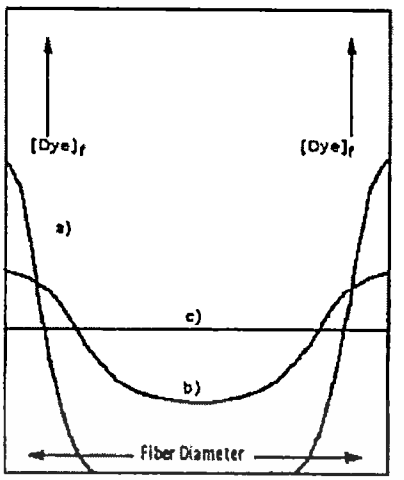
จากตารางที่ 2.6 พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะไหลเหนือวิกฤตมีสมบัติใกล้เคียงกับสถานะแก๊สและสถานะของเหลว เช่นมีความหนาแน่นที่สูงใกล้เคียงกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของเหลว จึงทำให้มีความสามารถในการละลายสูง และมีความหนืดต่ำใกล้เคียงกับสถานะแก๊ส จึงทำให้มีความสามารถในการแพร่หรือการถ่ายเทมวลที่รวดเร็วในลักษณะของแก๊สทั่วไป

2.6 การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม (Diffusivity of simple dye in silk yarn system) [17-18]

กระบวนการย้อมสีเส้นใยมี ขั้นตอนหลักๆ คือ โมเลกุลของสีย้อมที่ละลายอยู่ในตัวกลางแพร่ไปที่ผิวของเส้นใย และสีย้อมที่อยู่ติดกับผิวของเส้นใยเริ่มแพร่เข้าสู่ภายในเส้นใย หลังจากนั้นสีย้อมจะแพร่กระจายจากภายในของผิวเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยและเกิดการย้อมติดของสีย้อมกับเส้นใย ซึ่งกระบวนการย้อมสีของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใย (D) โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหมจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ในกระบวนการย้อมจะสิ้นสุดเมื่อสีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนและยึดติดกับเส้นใย โดยรูปที่ 2.3 แสดงความเข้มข้นของสีย้อมในเส้นใยที่เวลาในกระบวนการย้อมต่างๆ ซึ่งความเข้มข้นของสีย้อมในเส้นใยแทนด้วย $[Dye]_f$ เมื่อ [Dye] คือความเข้มข้นของสีย้อม และ f คือเส้นใย

120198



รูปที่ 2.3 การแพร่กระจายของสีย้อมในเส้นใย ที่เวลาในกระบวนการย้อมต่างๆ [19]

จากรูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายของสีย้อมในเส้นใย ที่เวลาในกระบวนการย้อมต่างๆ โดยกราฟ a เป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการย้อมสีเส้นใย ดังนั้นความเข้มข้นของสีย้อมที่ผิวของเส้นใยจะมีค่าสูงกว่าตรงกลางเส้นใย เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการย้อมจึงทำให้สีย้อมแพร่เข้าไปในใจกลางของเส้นใยได้ในปริมาณน้อย และเมื่อเวลาในกระบวนการย้อมเพิ่มขึ้น แสดงดังกราฟ b สีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนของเส้นใยอย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นภายในรูพรุนมีค่าสูงขึ้น และเมื่อกระบวนการย้อมถึงจุดสมดุล ดังแสดงในกราฟ c สีย้อมจะกระจายตัวตลอดทั่วทั้งเส้นใยจึงทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากันทั้งเส้นใย

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหมที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius-type equation) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \qquad (2.1)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

D_0 คือ pre-exponential factor (m^2/s)

E_D คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (kJ/mol.K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

จากสมการที่ 2.1 พบว่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_D) เป็นพลังงานที่ทำให้โมเลกุลของแก๊สและสีย้อมเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งใหม่ ดังนั้นจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญ โดยค่าคงที่ E_D และ D_0 สามารถหาได้จากการจัดรูปสมการที่ 2.1 ได้ดังสมการที่ 2.2

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_D}{RT} \tag{2.2}$$

จากสมการที่ 2.2 เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง ln D กับ 1/T มาพล็อตกราฟ จะได้ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และนำสมการเส้นตรงของกราฟนี้ ไปหาค่า E_D/R จากความชันของกราฟ และค่าคงที่ D_0 จากจุดตัดแกน y

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยไหมจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของเส้นใย ดังนั้นจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเพื่อใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยที่เป็นรูปทรงกระบอกที่มีความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยทิศทางของการแพร่จะเกิดในแนวรัศมีเท่านั้น โดยมีขอบเขตการแพร่ดังนี้

$$C(t,r) = C_0 \, , \, t = 0 \, , \, r = r_0$$

$$C(t,r) = C_t \, , \, t > 0 \, , \, 0 < r < r_0$$

สามารถอธิบายขอบเขตการแพร่ของสีย้อมในเส้นใยได้ดังนี้คือ ที่เวลาเริ่มต้น และรัศมีที่บริเวณผิวของเส้นใยจะมีความเข้มข้นของสีย้อมที่แพร่เข้าสู่เส้นใยมีค่าเท่ากับความเข้มข้น C_0 และเมื่อถึงเวลาใดๆ สีย้อมที่แพร่เข้าสู่เส้นใยที่รัศมีที่มากกว่าศูนย์ ความเข้มข้นของสีย้อมที่แพร่เข้าสู่เส้นใยที่เวลาใดๆ จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้น C_t ดังนั้นจึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่แพร่ที่เวลาใดๆได้ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{\partial c}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{D}{r}\frac{\partial c}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(rD\frac{\partial c}{\partial z}\right)\right] \tag{2.3}$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye}/g_{Silk})

t คือ เวลาในการย้อมสี (s)

r คือ รัศมีของเส้นใย (mm)

Z คือ แนวแกนตามความยาวของเส้นใย

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

แต่เนื่องจากเส้นใยมีความยาวอย่างต่อเนื่องและมีความยาวมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ในการทดลองจึงได้ม้วนเส้นใยให้มีขนาดพอดีกับเครื่องปฏิกรณ์ก่อนที่จะบรรจุเส้นใยไหมลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานว่าเกิดการแพร่ในแนวแกน Z และ θ น้อยมาก เมื่อเทียบกับการแพร่ในแนวแกน r ทำให้สามารถลดรูปสมการที่ 2.3 ได้ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{\partial C}{\partial r}\right) \tag{2.4}$$

และสามารถนำสมการที่ 2.4 มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยโดยใช้สมการที่เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่เวลาใดๆ กับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่สมดุล ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$M_t/M_\alpha = 1 - A\exp\left(-aDt/r^2\right) - B\exp\left(-bDt/r^2\right) - C\exp\left(-cDt/r^2\right) \tag{2.5}$$

เมื่อ M_t คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่เวลาใดๆ (g_{Dye}/g_{Silk})

M_α คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่สมดุล (g_{Dye}/g_{Silk})

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

t คือ เวลา (s)

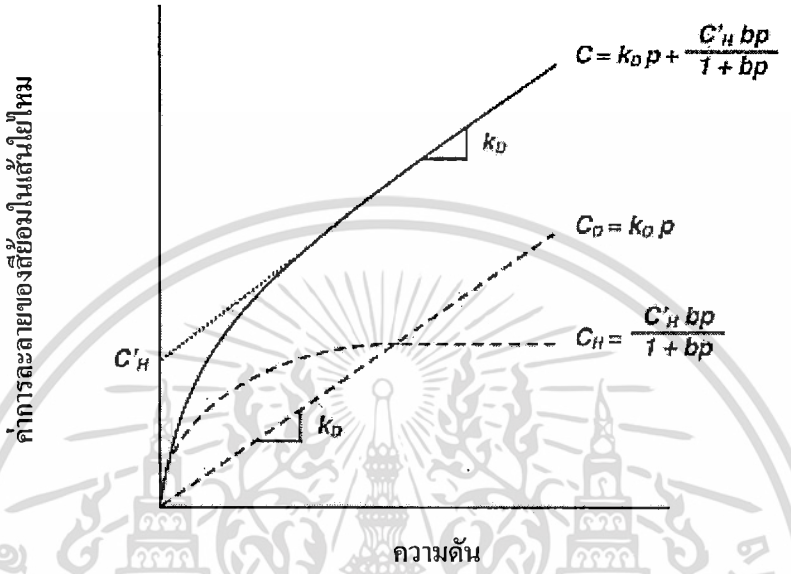
r คือ รัศมีของเส้นใย (mm)

A B C a b และ c คือค่าคงที่

2.7 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง [17,20]

แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทางได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซึมของสีย้อมในเส้นใยในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยในกระบวนการนี้จะเกิดกลไกสองแบบคือ การละลายตามกฎของเฮนรี่ (Henry's law) และการดูดซึมตามกฎของแลงเมียร์ (Langmuir-type sorption) กล่าวคือ ในช่วงแรกที่ความดันของกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมต่ำการละลายที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสีย้อมที่ละลายในตัวกลางและเข้าไปย้อมติดในเส้นใยไหม ซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ โดยพบว่า การเพิ่มความดันในกระบวนการย้อมจะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการละลายสีย้อมได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วย และในช่วงที่ความดันในกระบวนการย้อม

สูงจะเกิดการดูดซึมซึ่งเป็นไปตามกฎของแลงเมียร์ โดยการดูดซึมที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณรูพรุนในเส้นใยไหม ดังนั้นแม้ว่าจะเพิ่มความดันในกระบวนการทดลองแต่ปริมาณรูพรุนที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงทำให้ที่ความดันสูงค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมเริ่มมีค่าคงที่ โดยแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทางแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง

$$C = C_D + C_H = k_D p + \frac{C'_H bp}{1+bp} \tag{2.6}$$

เมื่อ C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye} / g_{Silk})

k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี่ (g_{Dye} / g_{Silk}) (MPa)

b คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างร่วม (Hole affinity constant) (MPa^{-1})

p คือ ค่าความดัน (MPa)

C'_H คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างอิ่มตัว (Hole saturated constant) (g_{Dye} / g_{Silk})

C_D คือ ค่าการดูดซึมแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้ (g_{Dye} / g_{Silk})

C_H คือ ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดเล็กมากๆ (Microvoid) (g_{Dye} / g_{Silk})

ที่ความดันในกระบวนการทดลองต่ำๆ คือเทอมของผลคูณระหว่าง b และ p มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง สามารถลดรูปสมการที่ 2.6 ได้ดังสมการที่ 2.7

$$C = [k_D + C'_H]P \tag{2.7}$$

และที่ความดันที่สูงมากๆ เนื่องจากปริมาณรูพรุนของเส้นใยมีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้ไม่สามารถดูดซึมสีย้อมได้อีก ดังนั้นเทอมของผลคูณระหว่าง b และ p มีค่ามากกว่าหนึ่ง จึงสามารถลดรูปสมการที่ 2.6 ได้ดังสมการ

$$C = k_D p + C'_H \tag{2.8}$$

แต่เนื่องจากกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมจะทำที่ช่วงความดันสูงกว่าความดันเหนือวิกฤตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟจะต้องทำที่ช่วงความดันเข้าใกล้จุดกำเนิดของเส้นกราฟ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางในสมการที่ 2.6 ได้ดังสมการ

$$C = C_D + C_H = k_D (P\text{-}P_C) + \frac{C'_H b (P\text{-}P_C)}{1 + b(P\text{-}P_C)} \tag{2.9}$$

2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Dye Partition Coefficient, *K*) [21]

เนื่องจากกลไกการดูดซึมที่เกิดขึ้นในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยจะเกิดการดูดซึมสองกลไก คือกลไกแรกจะเกิดการดูดซึมระหว่างสีย้อมกับ SC-CO_2 และกลไกที่สองคือ การย้อมติดหรือการแพร่ของสีย้อมเข้าไปในรูพรุนของเส้นใยโดยมี SC-CO_2 เป็นตัวกลาง ดังนั้นจึงนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของสีย้อมหรือเส้นใย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.10

$$K = \frac{C}{X} \tag{2.10}$$

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye}/g_{Silk})

X คือ ค่าการละลายของสีย้อมในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัชรีพร แสงวัชรพันธุ์ [22] ได้ทำการศึกษาการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ด้วย SC-CO_2 โดยใช้สีย้อม C.I. Disperse Red 1 ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิช่วง 50 - 70 °C และความดันในช่วง 10 - 20 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนภาวะในกระบวนการย้อมที่ความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้น เส้นใยมีลักษณะการติดของสีแดงที่เข้มมากกว่าเส้นใยที่ผ่าน

การย้อมที่ภาวะความดันและอุณหภูมิต่ำ จึงให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันระหว่างกระบวนการย้อมจะทำให้ความหนาแน่นของ CO_2 มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น CO_2 จึงทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายที่ดีในการพาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปละลาย หรือย้อมติดในเส้นใยพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น และยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในการทดลองนี้ที่อุณหภูมิ 50-70 °C มีค่าเท่ากับ 1.88×10^{-14} 1.95×10^{-14} และ 2.42×10^{-14} m^2/s ตามลำดับ

Pier Luigi Beltrame และคณะ[23] ได้ทำการศึกษาการย้อมสีเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมชนิดดิสเพิร์สและสีย้อมธรรมชาติโดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อม และใช้ PEG ในการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนทำการย้อม ภาวะที่ใช้ในกระบวนการย้อมคือ อุณหภูมิ 98 °C ความดัน 200 - 250 bar เป็นเวลา 30 นาที พบว่า สารละลาย 8wt% PEG400 หรือ PEG600 ทำให้สีย้อมแพร่เข้าไปติดในเส้นใยได้ดีที่สุด และเมื่อนำไปทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง พบว่าจะมีความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับต่ำเมื่อพิจารณาการปรับสภาพเส้นใยเซลลูโลสด้วย PEG ร่วมกับ benzamide พบว่าเมื่อนำเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย PEG ร่วมกับ benzamide มาสีย้อมสีโดยใช้ SC-CO_2 พบว่า จะทำให้ค่าความคงทนของสีต่อการซักล้างและค่าความคงทนของสีต่อแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

A. Schmidt และคณะ[24] ได้ศึกษากระบวนการย้อมเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ด้วยสีย้อม C.I. Disperse Yellow 23 ซึ่งถูกปรับปรุงด้วย 2-bromoacrylic acid และ 1,3,5-trichloro-2,4,6-triazine ด้วย SC-CO_2 ภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิ 120 - 160°C ความดัน 280 bar เป็นเวลา 30 - 240 นาที จากการศึกษาพบว่า SC-CO_2 สามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อมสีเส้นใยได้ และยังพบว่าสีย้อมสามารถแพร่เข้าไปในเส้นใยไหมและขนสัตว์ได้ดีกว่าฝ้าย เมื่อนำเส้นใยที่ผ่านการย้อมไปทดสอบค่าความคงทนของสีต่อการขัดและความคงทนของสีต่อแสงพบว่าทั้งเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ จะมีค่าความคงทนของสีอยู่ระหว่าง 4 และ 5 โดยสีย้อม C.I. Disperse Yellow 23 ซึ่งถูกปรับปรุงด้วย 2-bromoacrylic acid จะให้ค่าความคงทนของสีได้ดีกว่า สีย้อม C.I. Disperse Yellow 23 ซึ่งถูกปรับปรุงด้วย 1,3,5-trichloro-2,4,6-triazine

อัญชุลี มานิตสกลุและคณะ[25] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการการลอกกาวในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดปัญหาเส้นไหมย้อมไม่สม่ำเสมอโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัย พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการลอกกาว คืออุณหภูมิของน้ำ ระยะเวลาในการต้มและค่า pH ของน้ำ แล้วใช้หลักการการทดลองเพื่อหาพื้นผิวตอบสนอง เพื่อกำหนดค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ให้สมดุลกันคือ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 86 °C เวลาในการต้ม 45 นาที

และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 8.6 เมื่อทำการทดสอบภายใต้ภาวะดังกล่าวพบว่าเปอร์เซ็นต์การลอกกาวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 22-23 เป็นร้อยละ 25-27 โดยน้ำหนัก และยังสามารถลดปัญญาเส้นไหมย้อมไม่สม่ำเสมอจากเดิมร้อยละ 57.2 เป็นร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก

ลลิดา บุญโฉม[26] ได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและการย้อมติดสีของเส้นใยไหม โดยทำการศึกษาการลอกกาวด้วยสารเคมีหลายชนิดได้แก่ กรดทาร์ทาริก โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนตและไตรเอทิลเอมีน ในช่วงอุณหภูมิและช่วงเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าความสามารถในการลอกกาวของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นและเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวด้วยสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และได้ทำการศึกษากระบวนการต่อกิ่งไวนิลมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ เมทาคริลาไมด์และเมทิลเมทาไครเลท ที่อัตราส่วน อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ จากนั้นนำเส้นใยที่ผ่านการต่อกิ่งไปศึกษาความสามารถในการย้อมติดสีโดยทำการเปรียบเทียบความสามารถในการย้อมของสี 2 ชนิด คือ สีแอสิดและสีเบสิก พบว่าเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งเมทาคริลาไมด์มีปริมาณการเพิ่มของสีย้อมบนเส้นใยใกล้เคียงกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการต่อกิ่งแต่เส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งจะมีความคงของสีสูงกว่า นอกจากนี้เส้นใยไหมก่อนและหลังการต่อกิ่งเมื่อนำไปย้อมด้วยสีแอสิดจะมีความคงทนของสีมากกว่าการย้อมด้วยสีเบสิก

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การปรับสภาพเส้นใยไหม

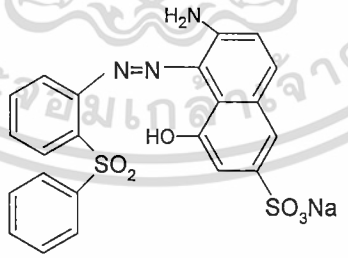
ก่อนเข้าสู่กระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 จำเป็นจะต้องทำการปรับสภาพเส้นใยไหมก่อน เพื่อให้กาวที่เคลือบบนผิวของเส้นใยไหมหลุดออก ทำให้สีย้อมเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยไหมได้ง่ายขึ้น โดยมีขั้นตอนในการปรับสภาพเส้นใยไหมดังนี้

1) ต้มน้ำปริมาตร 1000 cm^3 ให้มีอุณหภูมิประมาณ 80 °C
   เติม Na_2CO_3 5 g น้ำสบู่ 5 g และเส้นใยไหมน้ำหนักประมาณ 3 g ใช้เวลาใน
2) การปรับสภาพเส้นใย 60 นาที
3) เมื่อกระบวนการปรับสภาพเส้นใยถึงระยะเวลาที่กำหนด ให้นำเส้นใยไหมที่ผ่านการปรับสภาพไปล้างด้วยน้ำร้อนประมาณ 2 ครั้ง และล้างน้ำอุณหภูมิห้อง 1 ครั้ง
4) จากนั้นนำเส้นใยไหมที่ได้ไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.2 การย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เส้นใยไหม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.19 mm ความยาว 60 cm
2) สีย้อมชนิด Acid ชื่อทางการค้า C.I. Acid Red 42 ผลิตโดย บริษัท Dystar ซึ่งโครงสร้างของสีแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



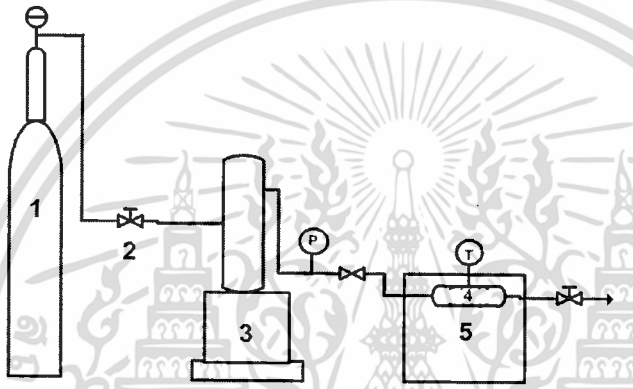
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสีย้อม C.I. Acid Red 42

3) เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงปริมาตร 15 ml
4) ปั๊มอัดความดันสูง
5) คาร์บอนไดออกไซด์ความบริสุทธิ์ 99.95 %
6) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
7) อุปกรณ์ชุดรีฟลักซ์

3.2.2 วิธีการทดลอง

ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 จะทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง ที่ภาวะความดัน 10 12 15 และ 20 MPa อุณภูมิ 50 60 และ 70 °C และเวลาในช่วง 30 - 240 นาที โดยมีขั้นตอนในการทดลองคือ

1) ชั่งผงสีให้ได้น้ำหนักในช่วง 0.02-0.03 g
2) ตัดเส้นใยไหมให้ได้ความยาว 60 cm แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
3) จากนั้นจึงบรรจุเส้นใยไหมและสีย้อมลงในเครื่องปฏิกรณ์และประกอบชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมที่ความดันสูงดังแสดงในรูปที่ 3.2



1. ถังบรรจุ CO_2
2. วาล์ว
3. ปั๊มอัดความดันสูง
4. เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง
5. ส่วนควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการย้อมสีเส้นไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

4) เติม CO_2 เข้าไปแทนที่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ พร้อมกับเปิดวาล์วไล่อากาศภายใน และ CO_2 ออกจากเครื่องปฏิกรณ์
5) ทำการอัดความดันด้วยเครื่องอัดความดันสูง จนได้ความดันตามที่ต้องการพร้อมกับเพิ่มอุณหภูมิจนได้อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วจึงเริ่มจับเวลา
6) เมื่อกระบวนการย้อมดำเนินไปถึงเวลาที่กำหนด จึงทำการหยุดขั้นตอนการย้อมโดยการปล่อย CO_2ออกจากเครื่องปฏิกรณ์
7) นำเส้นใยออกจากเครื่องปฏิกรณ์ นำไปล้างน้ำ แล้วนำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
8) นำเส้นใยที่ผ่านการย้อมไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมในเส้นใยไหม โดยการรีฟลักซ์ด้วยเอทานอล

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมในเส้นใยด้วยเทคนิคยูวี-วิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสี
2) ตัวทำละลายเอทานอล (AR Grade) ความบริสุทธิ์ 99.9 %
3) อุปกรณ์ชุดรีฟลักซ์
4) เครื่องยูวี-วิซิเบิลสเปกโตรโฟรโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)

3.3.2 การสกัดสีย้อมออกจากเส้นใยด้วยวิธีการรีฟลักซ์

การสกัดสีย้อมออกจากเส้นใยไหมด้วยวิธีรีฟลักซ์สามารถทำได้โดยการนำเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสีด้วย SC-CO_2 มารีฟลักซ์ด้วยเอทานอลที่อุณหภูมิ 72 °C เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมที่ย้อมติดในรูพรุนของเส้นใย ซึ่งมีขั้นตอนการสกัดสีย้อมออกจากเส้นใยไหมดังนี้

1) นำเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสีมาสกัดเอาสีย้อมออกจากเส้นใยด้วยวิธีการรีฟลักซ์ในตัวทำละลายเอทานอลปริมาตร 20 cm^3 พร้อมทั้งให้ความร้อนที่ 72°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
2) เก็บสารละลายที่ได้จากการรีฟลักซ์ และปรับปริมาตรด้วยเอทานอลให้ได้ปริมาตร 100 cm^3
3) นำสารละลายที่ได้จากการสกัดเอาสีย้อมออกจากเส้นใยด้วยวิธีการรีฟลักซ์ บรรจุลงในเซลล์ จากนั้นทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 535 nm
4) บันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมที่ละลายในเส้นใยด้วยการเทียบกับกราฟมาตรฐานและรายงานผลค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมในหน่วย g_{Dye}/g_{Silk}

3.4 การทดสอบคุณภาพของเส้นใยเมื่อผ่านกระบวนการย้อมสี

ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมที่เส้นใยด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะความดันคงที่ที่ 15 MPa อุณหภูมิ 70 °C มาทำการทดสอบคุณภาพของเส้นใยเมื่อผ่านกระบวนการย้อมสี โดยการทดสอบคุณภาพของเส้นใยได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งทำการทดสอบดังนี้

3.4.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C01 : 1989(E) ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.4.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง

การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-B02 : 1994 (E) ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงซีนอน เพื่อเลียนแบบแสงธรรมชาติภายใต้ภาวะที่กำหนด

3.4.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อจะทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 1994 (E) โดยแบ่งการภาวะของเหงื่อที่ใช้คือ เหงื่อสังเคราะห์ที่มีภาวะเป็นกรดและด่าง

การทดสอบทั้ง 3 รายการจะประเมินผลโดยพิจารณาความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาว มาตรฐาน 2 ชนิด คือ COTTON และ SILK และนำไปเปรียบเทียบระดับสีที่เปลี่ยนแปลงกับสเกลสีเทา

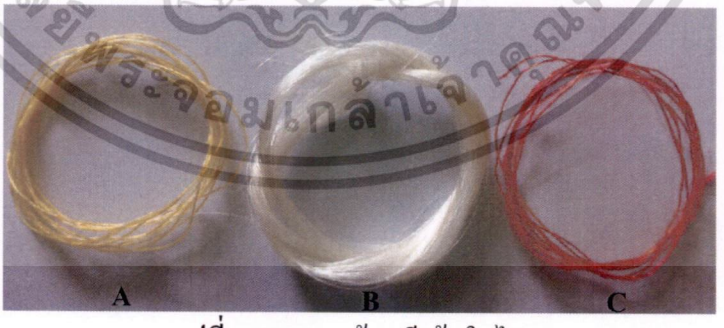
บทที่ 4
ผลและการวิเคราะห์การทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการทดลองการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ซึ่งเป็นการหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหม คือ เวลา ความดัน และอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม โดยภาวะที่ใช้ในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยไหม คือที่ ความดัน 10 12 15 และ 20 MPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และเวลาในช่วง 30 - 240 นาที

โดยในงานวิจัยนี้ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและประเมินความสามารถในการย้อมสีเส้นใยในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 โดยการอาศัยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก นอกจากนี้ได้นำเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมไปทดสอบคุณภาพของเส้นใยไหมหลังการย้อมด้วยวิธีที่เป็นมาตรฐานเพื่อศึกษาความคงทนของสีย้อมในเส้นใยไหมหลังกระบวนการย้อม ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การศึกษาเพื่อหาภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมในการย้อมสีเส้นใยไหมโดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางแทนที่น้ำ ทำได้โดยการศึกษากระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมที่ภาวะความดัน 10 12 15 และ 20 MPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และเวลาในช่วง 30 - 240 นาที ซึ่งผลของการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยสีย้อมชนิดเอซิด แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

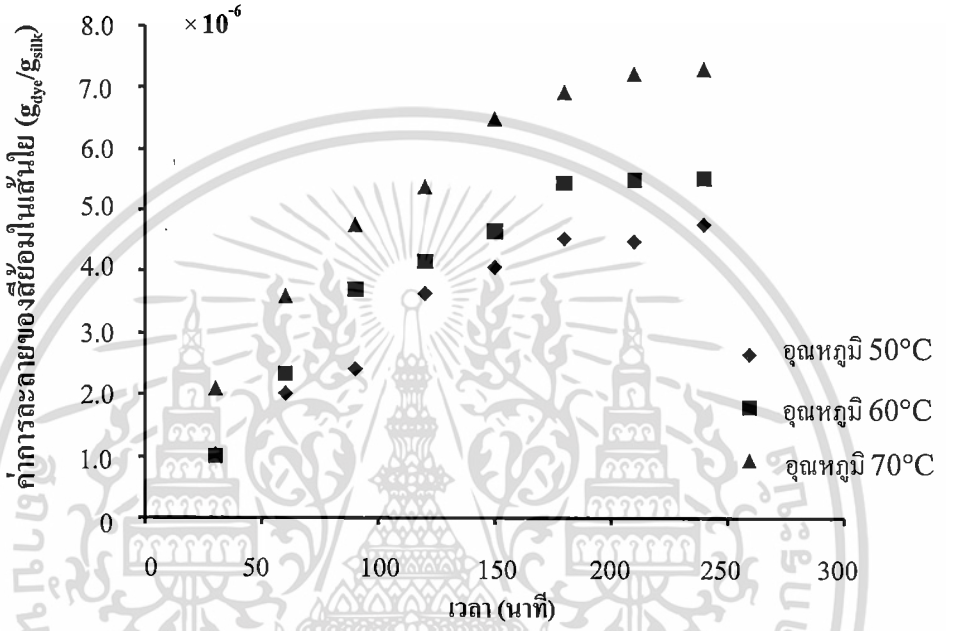


รูปที่ 4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยไหม

รูปที่ 4.1 แสดงเส้นใยไหมดิบ (A) เส้นใยไหมหลังลอกกาว (B) และเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสี (C) โดยเมื่อนำเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวมาทำการย้อมสีด้วยสีย้อม C.I. Acid Red 42 พบว่าสีย้อมชนิดสามารถย้อมเส้นใยไหมได้ โดยสังเกตได้จากเส้นใยไหมมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีแดง

4.1.1 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยไหม

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหม SC-CO_2 สามารถหาได้จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหม ที่ภาวะความดันคงที่ที่ 15 MPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C เวลาในช่วง 30 - 240 นาทีโดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในการย้อม ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่เวลาใดๆ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของเวลาต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่ความดันคงที่ที่15 MPa และอุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของเวลาที่มีต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการย้อมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 50 °C จะมีค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมในช่วง 1.0-4.7 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมเป็น 70 °C ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.1-7.3 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$ เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมจะทำให้ CO_2 มีความสามารถในการแพร่เพิ่มขึ้น และการเพิ่มของเวลาในการทดลองจะทำให้ CO_2 ที่เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อมพาเอาสีย้อมเข้าไปติด หรือละลายในรูพรุนของเส้นใยในปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย และจากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมเริ่มมีค่าคงที่ที่เวลา 210 นาที โดยมีค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมเท่ากับ 4.4 5.4 และ 7.2 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$ ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณรูพรุนในโครงสร้างของเส้นใยมีจำนวนจำกัด ดังนั้นถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการย้อมสีเส้นใยมากกว่า 210 นาที ก็จะไม่ส่งผล

ให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นมากนัก ดังนั้นจึงถือว่า ที่เวลานี้เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.19 mm ด้วย SC-CO_2

4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

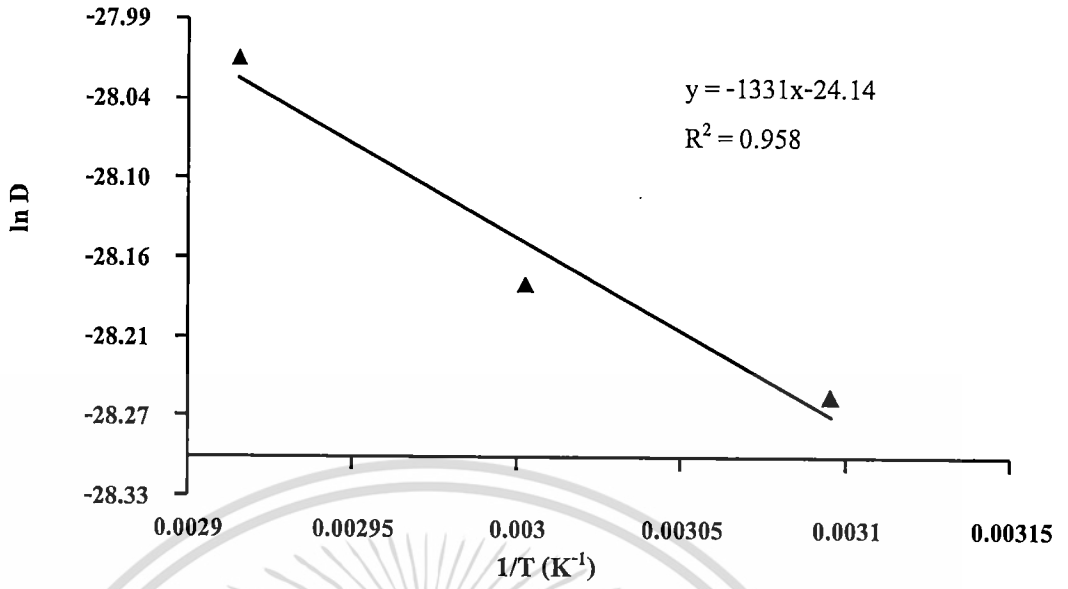
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม สามารถหาได้จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ที่ความดันคงที่ที่ 15 MPa เวลาในช่วง 30 - 240 นาที โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่เวลาใดๆ กับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่สมดุลจากรูปที่ 4.2 มาทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วยสมการที่ 2.6 และใช้วิธีการ Curve fitting แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ภาวะการทดลองต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
50	15	5.35×10^{-13}
60	15	5.80×10^{-13}
70	15	6.81×10^{-13}

จากตารางที่4.1 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมจะทำให้พลังงานจลน์ของแก๊สสูงขึ้น ส่งผลให้สีย้อมเกิดการละลายใน CO_2 และ CO_2 จึงพาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปย้อมติดในรูพรุนของเส้นใยได้เพิ่มขึ้น

สมการของอาร์รีเนียสได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งสมการอาร์เรเนียสแสดงในสมการที่ 2.1 เมื่อจัดรูปสมการและพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln D กับ 1/T จะได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และสามารถนำไปหาค่าซึ่งค่าคงที่ E_D และ D_0 ได้โดยค่า E_D/R สามารถหาได้จากความชันของกราฟ และค่าคงที่ D_0 จากจุดตัดแกน y ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

นำสมการเส้นตรงที่ได้จากรูปที่ 4.3 มาแทนในสมการที่ 2.2 ได้ดังสมการที่ 4.1

$$\ln D = -\frac{1331}{T} - 24.147 \qquad (4.1)$$

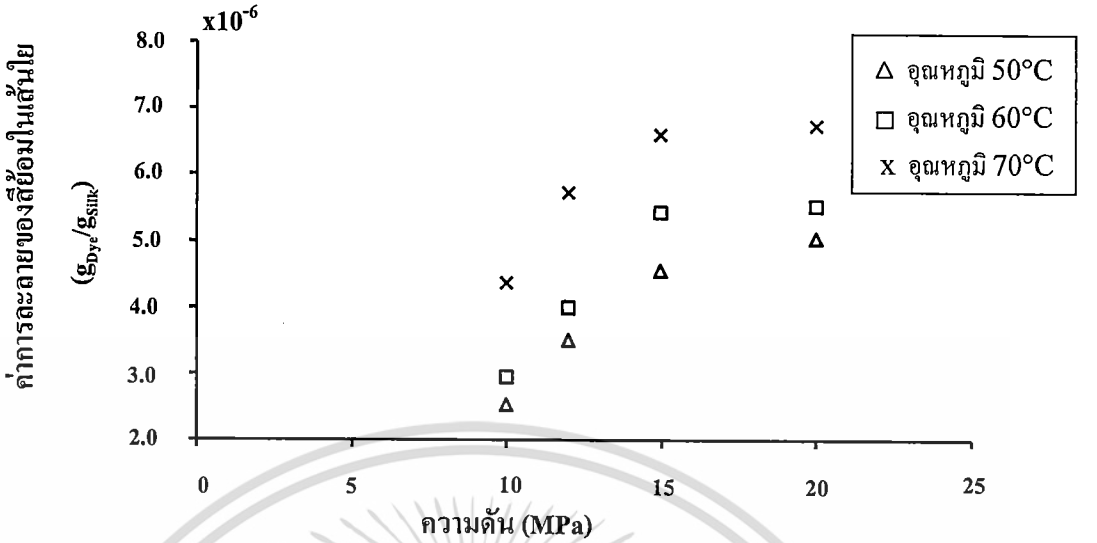
เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม (m^2/s)

T คือ อุณหภูมิในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 (K)

จากสมการที่ 4.1 พบว่าความชันของกราฟคือ E_D/R มีค่าเท่ากับ -1331 หรือ E_D มีค่าเท่ากับ 11.07 kJ/mol และ จุดตัดแกน y คือ ln D_0 มีค่าเท่ากับ -24.147 หรือ D_0 มีค่าเท่ากับ 3.26×10^{-11} m^2/s

4.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม สามารถหาได้จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะความดัน10 12 15 และ 20 MPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) แสดงได้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม

รูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมพบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการย้อมคงที่ เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อความดันในการทดลองเพิ่มขึ้นจะทำให้ CO_2 มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้มีความสามารถในการละลายที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงละลายสีย้อมได้ในปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จึงทำให้ CO_2 พาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปย้อมติดในรูพรุนของเส้นใยได้เพิ่มขึ้น ที่ความดัน 10-15 MPa พบว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณรูพรุนของเส้นใยยังมีปริมาณเพียงพอที่จะรับสีย้อม นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความดันในช่วง 15- 20 MPa ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของสีย้อมที่แพร่เข้าไปติดในเส้นใยจะขึ้นกับจำนวนรูพรุนในโครงสร้างของเส้นใยซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด และเมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 มีค่าลดลง แต่ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงแก๊สจะมีความว่องไวและมีความสามารถในการแพร่เข้าสู่รูพรุนของเส้นใยได้สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความดันและอุณหภูมิในกระบวนการย้อมสีเส้นใย จะส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันจนถึง 15 MPa ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมจะเริ่มมีค่าคงที่เนื่องจากปริมาณรูพรุนของเส้นใยที่มีอยู่อย่างจำกัด

4.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

4.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมโดยอาศัยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง

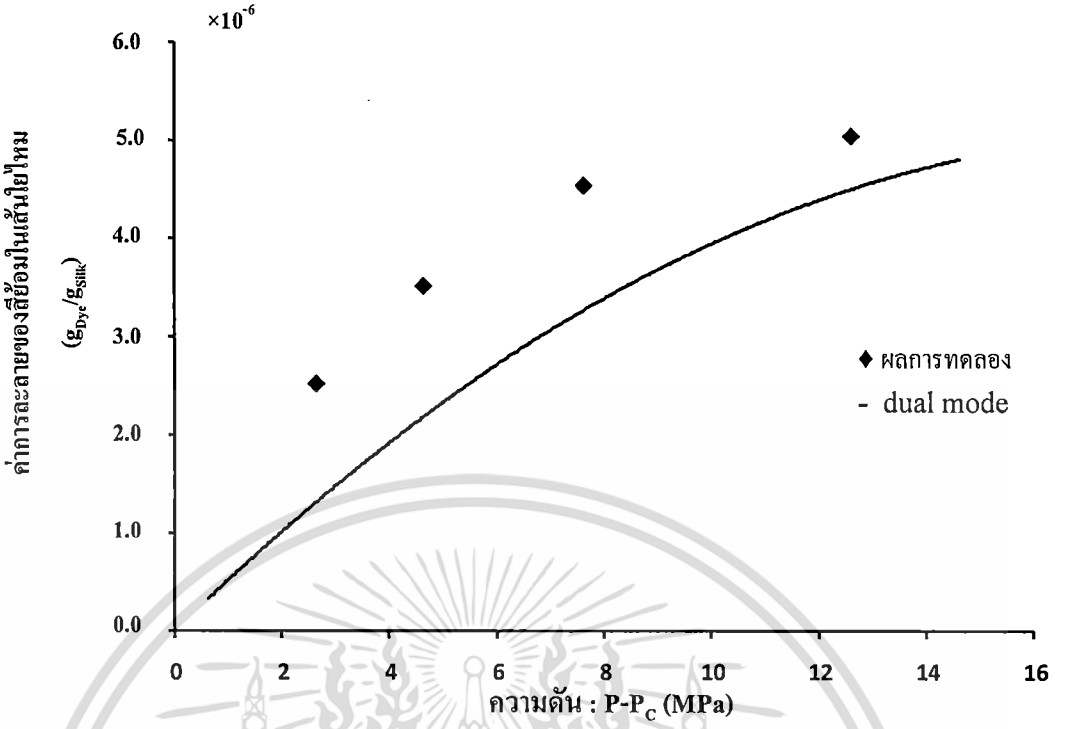
การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางจะอาศัยข้อมูลค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมจากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะความดัน 10 12 15 และ 20 MPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและความดัน จากนั้นหาค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางในสมการที่ 2.9 โดยการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟ

การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางนี้ จะแบ่งช่วงในการคำนวณเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงความดันในการทดลองสูงและความดันในการทดลองต่ำ ซึ่งค่าคงที่ k_D และ C'_H ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมกับความดันที่ช่วงความดันสูง โดยค่าคงที่ k_D และ C'_H สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟที่ลากผ่านจุดที่ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเริ่มมีค่าคงที่ และจุดตัดของแกน y ตามลำดับ และค่าคงที่ b สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมกับความดันที่ช่วงความดันต่ำ ซึ่งค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิต่างแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

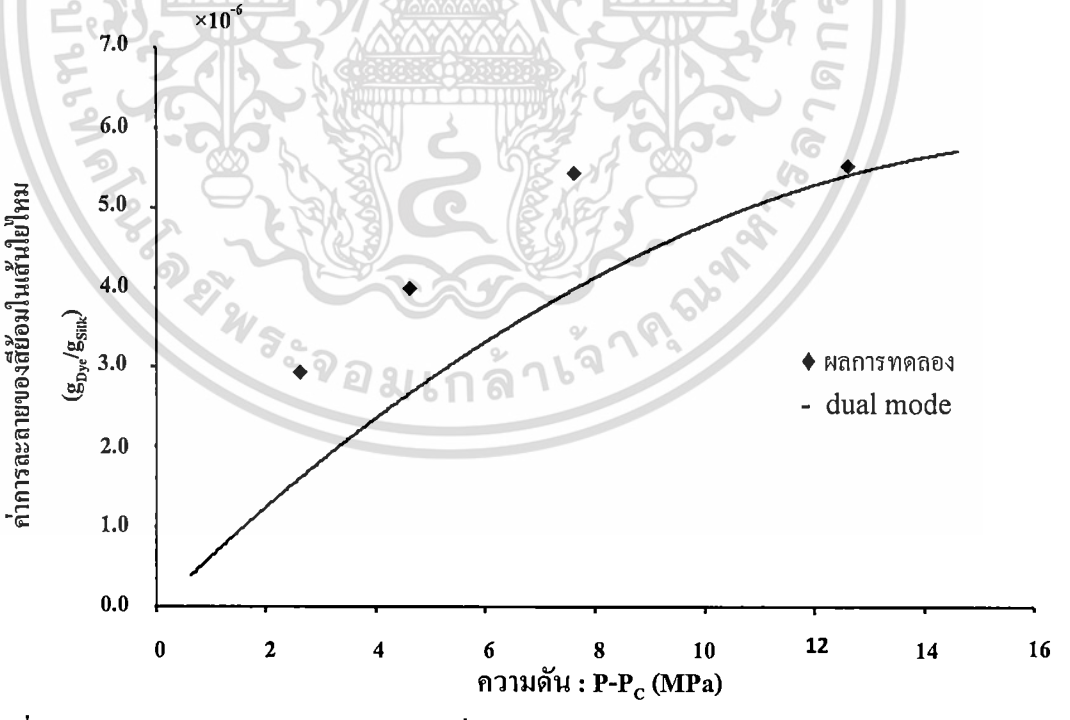
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่าคงที่	อุณหภูมิ (°C)		
	50	60	70
k_D	1.500×10^{-7}	7.500×10^{-8}	6.250×10^{-8}
C'_H	3.500×10^{-6}	4.800×10^{-6}	6.000×10^{-6}
b	0.214	0.203	0.281

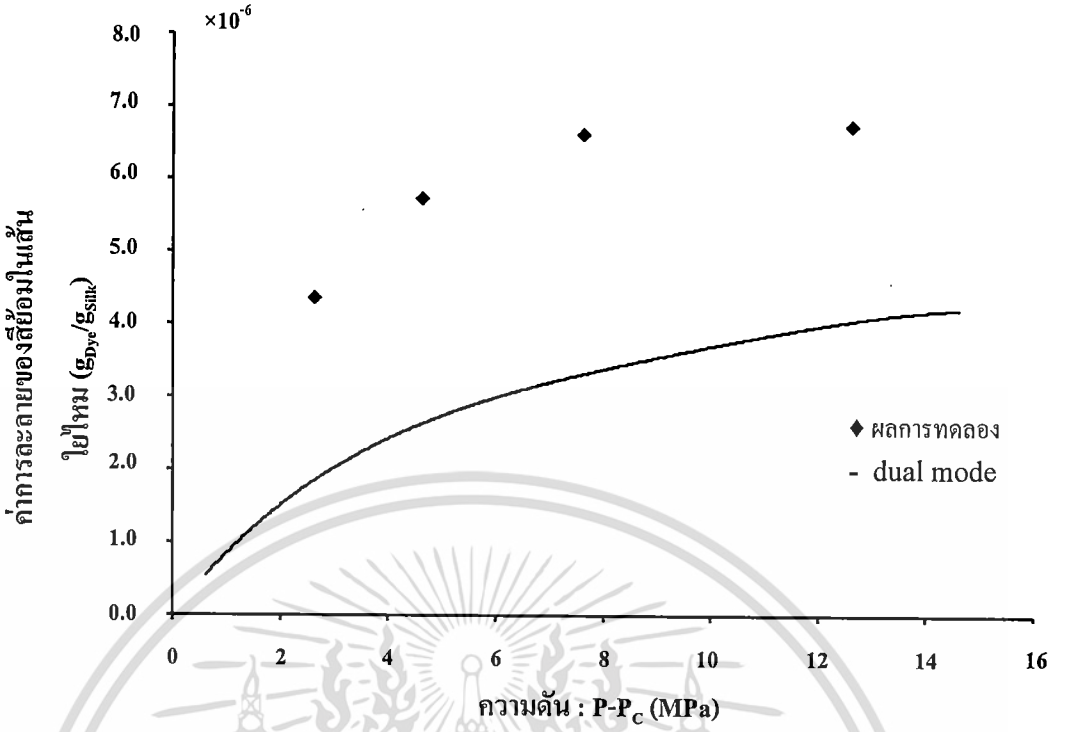
เมื่อได้ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทาง และนำไปคำนวณเพื่อหาค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่ได้จากการทดลอง (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) ดังนั้นค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมจากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.5 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิ 50 ºC



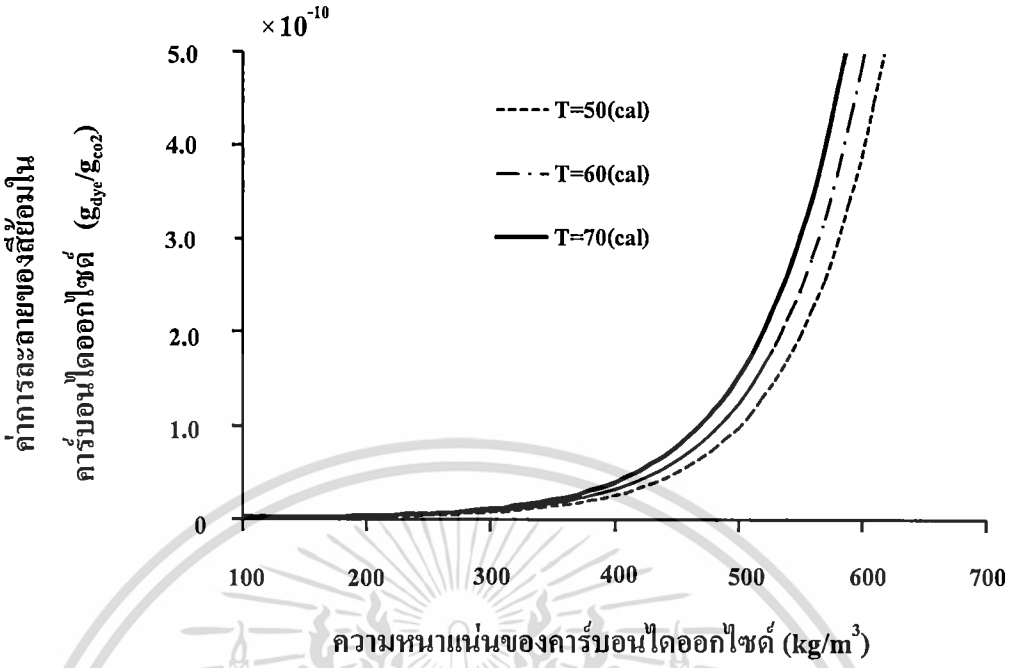
รูปที่ 4.6 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิ 60 ºC



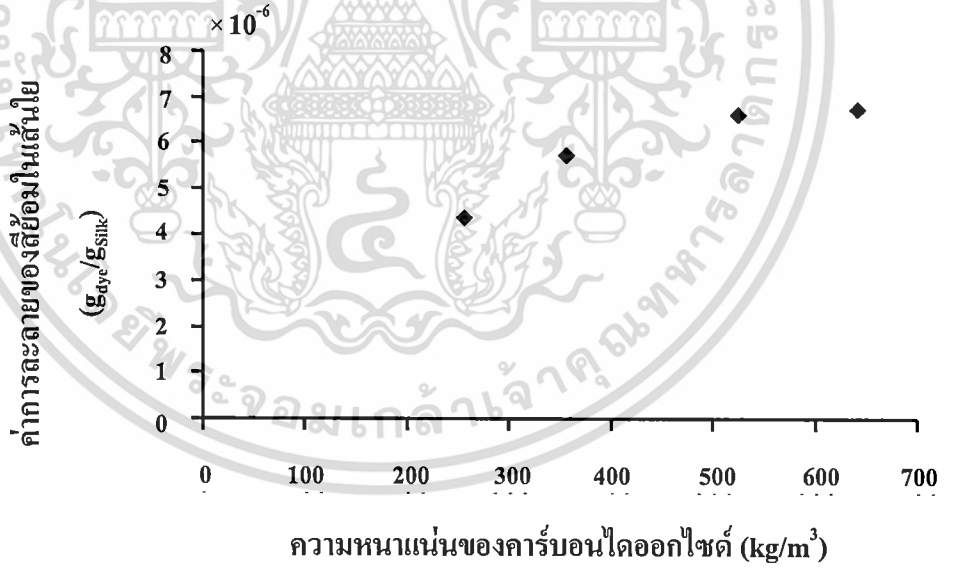
รูปที่ 4.7 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิ 70 °C

จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการทดลองค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในการทดลอง เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของ CO_2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ CO_2 มีความสามารถในการละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น และเมื่อความดันในกระบวนการทดลองสูงซึ่งอยู่ในช่วง 15 - 20 MPa จะพบว่าความชันของกราฟเริ่มมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณรูพรุนของเส้นใยไหมมีปริมาณจำกัด

จากที่กล่าวมาว่าการเพิ่มความดันในการทดลองจะทำให้ความหนาแน่นของแก๊สจะมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้จากการคำนวณค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 ด้วยสมการอย่างง่ายที่ถูกเสนอโดย Adnan O¨ zcan และ A. Safa O¨ zcan [1] (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าในช่วงความหนาแน่นของ CO_2 สูง จะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 สูงขึ้น เนื่องจากที่ความหนาแน่นสูง แก๊สจะมีความความสามารถในการละลายสูงด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อความสามารถในการละลายของสีย้อมใน CO_2 เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของวัชรีพร แสงวัชรพันธุ์[22]



รูปที่ 4.8 ผลความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของสีย้อมในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.9 ผลความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่อุณหภูมิคงที่ 70 °C

จากรูปที่ 4.9 พบว่าการเพิ่มความดันในกระบวนการย้อมจะส่งผลให้ความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเพิ่มขึ้นด้วย และเริ่มคงที่เมื่อความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่า 525 kg/m^3 หรือที่ความดันมากกว่า 15 MPa

4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก และการศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

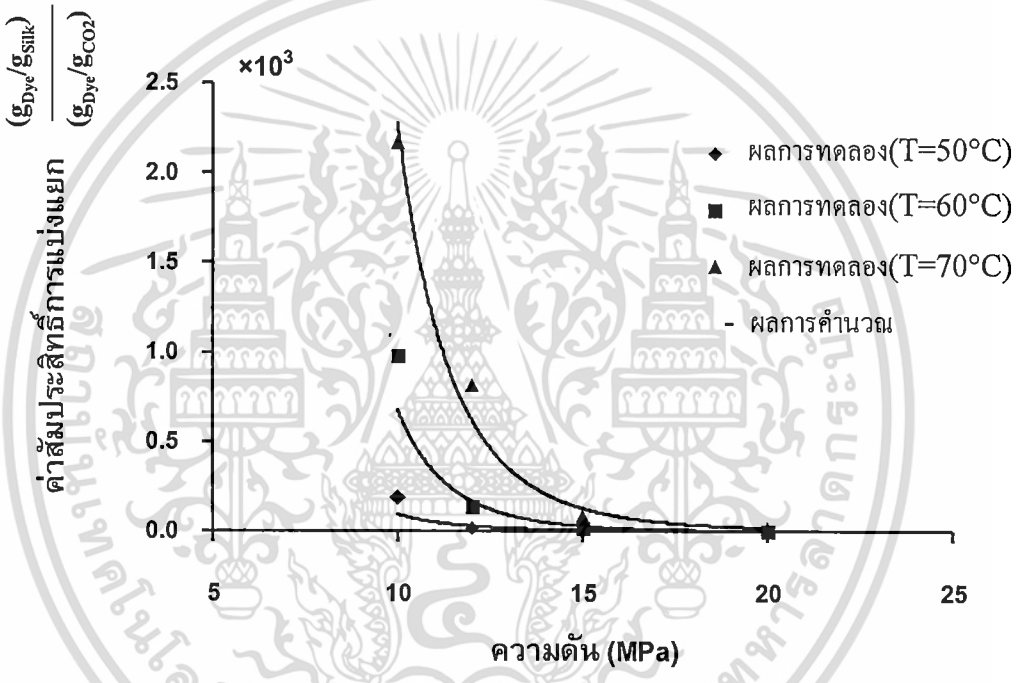
เนื่องจากในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมโดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในการย้อมแทนที่น้ำ จะมีกลไกเกิดขึ้นในกระบวนการย้อม สองกลไกคือ กลไกแรกเป็นการละลายของสีย้อมใน CO_2 และกลไกที่สองที่เกิดขึ้นคือ CO_2 พาเอาสีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนในเส้นใยไหม ดังนั้นการประเมินความสามารถในการย้อมสีเส้นใยจำเป็นต้องอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมาใช้ในการอธิบาย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกคืออัตราส่วนหรือจำนวนเท่าของมวลสีย้อมที่สามารถละลายในเส้นใยไหมต่อมวลสีย้อมที่ละลายใน CO_2 สามารถหาจากสมการที่ 2.10 โดยรายละเอียดการคำนวณค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก แสดงได้ดังในตารางที่ 4.3 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม $(g_{Dye}/g_{Silk}) \times 10^{-6}$	ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 $(g_{Dye}/g_{CO_2}) \times 10^{-6}$	สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก $\left(\frac{g_{Dye}/g_{Silk}}{g_{Dye}/g_{CO_2}}\right)$
50	10.0	2.518	0.013	194.46
	12.0	3.511	0.203	17.30
	15.0	4.540	1.102	4.12
	20.0	5.044	2.631	1.92
60	10.0	2.942	0.003	980.67
	12.0	3.986	0.029	137.45
	15.0	5.422	0.277	19.57
	20.0	5.510	1.065	5.17
70	10.0	4.350	0.002	2175.00
	12.0	5.731	0.007	818.71
	15.0	6.620	0.075	88.27
	20.0	6.744	0.352	19.16

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการเพิ่มความดันในกระบวนการทดลองจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความดันในกระบวนการทดลองเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของ CO_2 ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยดังนั้นจึงทำให้ CO_2 มีความสามารถในการละลายสีย้อมที่ดีขึ้น

และส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 มีค่าสูงขึ้น แต่ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณรูพรุนที่มีอยู่อย่างจำกัด และเมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนาแน่นของ CO_2 ลดลงจึงทำให้ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 มีค่าลดลงด้วย แต่การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมกลับทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ CO_2 มีความสามารถในการแพร่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่อุณหภูมิ ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.10 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

จากรูปที่ 4.10 พบว่าที่ช่วงความดัน 10-12 MPa แก๊ส CO_2 จะมีความสามารถในการละลายสีย้อมต่ำ จึงส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกจะมีค่าสูง ซึ่งทำให้ต้องใช้สีย้อมในปริมาณมากเพื่อช่วยให้เกิดการย้อมติดที่ดี แต่ที่ความดัน 15-20 MPa พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าต่ำ เนื่องจากที่ความดันสูง แก๊สจะมีความสามารถในการละลายสูงใกล้เคียงกับ CO_2 ที่อยู่ในสถานะของเหลว การใช้สีย้อมในกระบวนการย้อมในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เกิดการย้อมติดในรูพรุนของเส้นใยได้ดี จึงถือได้ว่าที่ความดันในช่วง 15-20 MPa เป็นความดันที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.19 mm ด้วย SC-CO_2

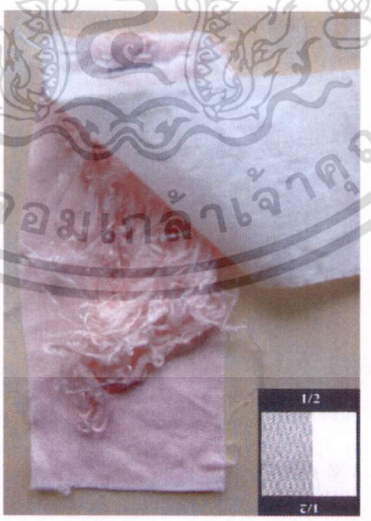
เมื่อเปรียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมใน CO_2 และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในน้ำย้อม พบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยและค่าการละลายของสีย้อมในตัวกลางของกระบวนการการย้อมสีด้วย SC-CO_2 มีค่ามากกว่ากระบวนการการย้อมสีด้วยน้ำ ดังนั้นในการย้อมสีด้วย SC-CO_2 การใช้สีย้อมในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดการละลายใน CO_2 ได้ดี และทำให้แพร่เข้าไปละลายหรือยึดติดในรูพรุนได้ดีด้วย

4.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยไหมหลังการย้อม

การทดสอบคุณภาพของเส้นใยไหมหลังกระบวนการย้อม จะทำการทดสอบคุณภาพเส้นใยไหมหลังการย้อม 3 รายการคือ การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง และการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

4.3.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างทำได้โดยการนำเส้นใยไหมที่ผ่านกระบานการการย้อมสีเส้นใยด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะการทดลองที่ความดันคงที่ที่ 15 MPa อุณหภูมิ 70 °C โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C01 : 1989 (E) ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 30 นาที และประเมินผลโดยพิจารณาความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาวมาตรฐาน 2 ชนิด คือ COTTON และ SILK แล้วบันทึกผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบสีของเส้นใยที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสเกลสีเทา ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



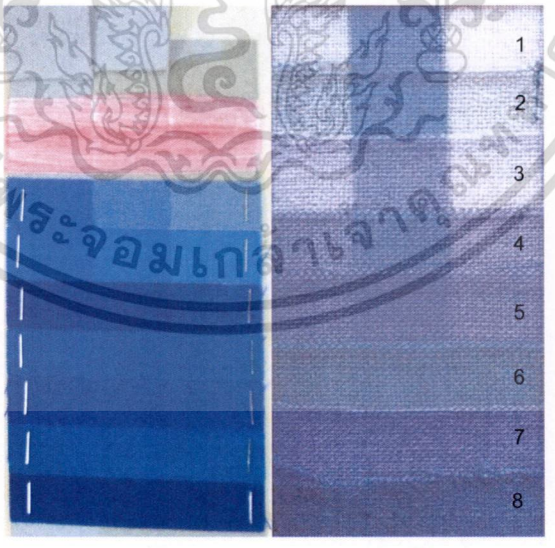
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง พบว่าผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับ 1-2 หมายความว่าชิ้นงานมีความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากสีย้อมแพร่เข้าสู่

รูพรุนของเส้นใยได้ในปริมาณน้อย สังเกตได้จากค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย ซึ่งมีอยู่ค่าต่ำ ส่งผลให้ความสามารถในการย้อมสีต่ำ เมื่อนำเส้นใยไปทดสอบความคงทนต่อการซักล้าง จะทำให้เส้นใยมีความซีดจาง และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของกระบวนการย้อมเส้นใยด้วย SC-CO_2 และกระบวนการย้อมเส้นใยด้วยน้ำ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกเป็นค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพในการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมต่อการละลายของสีย้อมตัวกลางในกระบวนการย้อม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของกระบวนการย้อมเส้นใยด้วย SC-CO_2มีค่าสูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5.17-2175.00 และค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของกระบวนการย้อมเส้นใยด้วยน้ำ มีค่าอยู่ในช่วง 2-80[27] ซึ่งหมายความว่า การย้อมสีด้วย SC-CO_2 จะทำให้สีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนของเส้นใยได้มากกว่าการย้อมด้วยน้ำที่ภาวะการทดลองเดียวกัน ในหน่วยของ $\frac{\mu g_{Dye}/g_{Silk}}{\mu g_{Dye}/g_{Solvent}}$

4.3.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง

การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงทำได้โดยการนำเส้นใยไหมที่ผ่านกระบานการการย้อมสีเส้นใยด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะการทดลองที่ความดันคงที่ที่ 15 MPa อุณหภูมิ 70 °C โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-B02 : 1994 (E) ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงซีนอนเพื่อเลียนแบบแสงธรรมชาติภายใต้ภาวะที่กำหนด บันทึกผลการทดสอบ ซึ่งความคงทนของสีจะถูกประเมินผลโดยการเปรียบเทียบระดับสีที่เปลี่ยนแปลงกับสเกลสีเทา ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (A) เมื่อเทียบกับผ้ามาตรฐานสีน้ำเงิน (B)

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง พบว่าผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับ 5 หมายความว่าชิ้นงานมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับดี เนื่องจากสีย้อมชนิดเอซิดที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติด้านความคงทนต่อแสงดีมาก และเมื่อนำไปย้อมสีเส้นใยไหมจะเกิดการยึดติดด้วยพันธะไอออนิกระหว่างสีย้อมและเส้นใยไหม โดยสีแอซิดที่ใช้ในการทดลองนี้จะสร้างประจุของสีย้อมเป็นลบในตัวกลางในการย้อม และทำจะทำการดูดติดกับเส้นใยไหมที่แสดงประจุบวกเมื่ออยู่ในกระบวนการย้อมที่เป็นกรด จึงทำให้เกิดความคงทนสูง ซึ่งธรรมชาติของแรงที่ช่วยในการยึดติดนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมและชนิดของเส้นใย ซึ่งเส้นใยไหมยังมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดีทำให้ดูดซึมสีย้อมได้ดีด้วย

4.3.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อทำได้โดยการนำเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการการย้อมสีเส้นใยด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะการทดลองที่ความดันคงที่ที่ 15 MPa อุณหภูมิ 70 °C ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 1994 (E) สามารถแบ่งภาวะของเหงื่อสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบได้ 2 ภาวะ คือ

- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีภาวะเป็นกรด
- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีภาวะเป็นเบส

การประเมินผลจะพิจารณาความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาวมาตรฐาน 2 ชนิดคือ COTTON และ SILK แล้วบันทึกผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบสีของเส้นใยที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสเกลสีเทา ผลที่ได้จากการทดสอบความคงทนของสีต่อการเหงื่อในภาวะกรดและภาวะด่าง พบว่าผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับ 4-5 หมายความว่าชิ้นงานมีความคงทนของสีต่อเหงื่ออยู่ในระดับดีถึงดีมาก ซึ่งค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเส้นใยและสีย้อม ถึงแม้ว่าสีย้อมชนิดแอซิดจะมีคุณสมบัติที่ไม่ทนต่อเหงื่อ แต่เนื่องจากมีการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยด้วยพันธะไอออนิก จึงทำให้การยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยมีความแข็งแรง ทำให้มีความคงทนต่อเหงื่อที่ดี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถสรุปได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1.1 ผลการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

5.1.1.1 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยไหม

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้น และการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมเริ่มมีค่าคงที่ที่เวลาประมาณ 210 นาที จึงถือได้ว่าที่เวลา 210 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย้อมสีเส้นไหมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.19 mm ด้วย SC-CO_2

5.1.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะความดันคงที่ที่ 15 MPa อุณหภูมิ 50 60และ 70°C ในช่วงเวลา 30 - 240 นาทีพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ภาวะการทดลองดังกล่าวคือ 5.35×10^{-13}, 5.80×10^{-13} และ 6.81×10^{-13} m^2/s ตามลำดับ และจากการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยสมการของอาร์รีเนียส มีค่า D_0 เท่ากับ 3.26×10^{-11} m^2/s และ E_D เท่ากับ 11.07 kJ/mol ตามลำดับ

5.1.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ภาวะความดัน 10 12 15 และ 20 MPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความดันในกระบวนการย้อมสีเส้นใย จะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย และค่าการละลายของสีย้อมใน SC-CO_2 มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันถึง 15-20 MPa ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเนื่องจากปริมาณรูพรุนที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย มีค่า 2.5-6.7 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$ และค่าการละลายของสีย้อมใน SC-CO_2 มีค่า 0.002-2.6 $\mu g_{Dye}/g_{CO_2}$

5.1.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

5.1.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

แบบจำลองกลไลการดูดซึมแบบสองทางสามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมได้ ซึ่งจากการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่ได้จากการทดลองที่ภาวะความดัน 10 -20 MPa อุณหภูมิ 50-70°C พบว่ามีค่าการละลายอยู่ในช่วง 0.5-5 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$

5.1.2.2 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะต่างๆ พบว่าอุณหภูมิและความดันมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและความดันจะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าสูงขึ้นและเมื่อถึงจุดอิ่มตัวจึงเริ่มคงที่ แต่ค่าการละลายของสีย้อมใน SC-CO_2 กลับมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น และพบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ ที่ความดัน 15 - 20 MPa

5.1.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยหลังการย้อม

5.1.3.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (Color fastness to Light)

จากการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง พบว่าผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับ 5 หมายความว่าชิ้นงานมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับดี

5.1.3.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Color fastness to Washing)

จากการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง พบว่าผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับ 1-2 หมายความว่าชิ้นงานมีความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับต่ำ

5.1.2.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (Color fastness to Perspiration)

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการเหงื่อในภาวะกรดและภาวะด่าง พบว่าผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับ 4-5 หมายความว่าชิ้นงานมีความคงทนของสีต่อเหงื่ออยู่ในระดับดีถึงดีมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เปลี่ยนสารเคมีและวิธีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยไหม ก่อนนำไปย้อมด้วย SC-CO_2
- เติมสารเติมแต่ง เพื่อให้เกิดความคงทนของสีย้อมในเส้นใย
- ปรับสภาพความเป็นกรดในกระบวนย้อมให้มีความเป็นกรดมากขึ้น เพื่อให้สีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนของเส้นใยในปริมาณมากขึ้น เพื่อเพิ่มค่าการละลายและความคงทนของสีย้อมเส้นใยไหม

เอกสารอ้างอิง

[1] Adnan Özcan and A. Safa Özcan, "Solubility of an acid dye in supercritical carbon dioxide by ion-pairing with dodecyltrimethylamonium bromide," **Fluid Phase Equilibria**. Vol.249, pp. 1-5, 2006.

[2] Sameer P. Nalawade, Francesco Picchioni and L.P.B.M. Janssen, " Supercritical carbon dioxide as a green solvent for processing polymer melts," **Progress in Polymer Science**, Vol.31, pp.19-43, 2006.

[3] Hyo-Kwang Bae, Jung-Ho Jeon and Heun Lee, "Influence of co-solvent on dye solubility in supercritical carbon dioxide," **Fluid Phase Equilibria**, Vol. 222, pp.119-125, 2004.

[4] K. Sawada and M. Ueda, "Evaluation of the dyeing mechanism of an acid dye on protein fibers in supercritical CO_2," **Dyes and Pigments**, vol. 63, pp.77-81, 2004.

[5] A.S. Özcan, A.A. Clifford, K.D. Bartle, P.J. Broadbent and D.M. Lewis, ''Dyeing of modified cotton fibers with disperse dyes from supercritical carbon dioxide,''**J. Soc. Dyers Colourists**, vol 114, pp.169, 1998.

[6] Kirk O., **Encyclopedia of Chemical Technology**. 4th ed., New York : John Wiley, 1991.

[7] Frederick J. and Francis S., **Encyclopedia of Food Science and Technology**. Vol. 4, 2nd ed., New York : John Wiley, 2000.

[8] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, "ความรู้พื้นฐานเคมีเส้นใยสิ่งทอ," **Colour Way**, vol. 8, no. 45, pp. 13-17, 2003.

[9] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, **อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย** . กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[10] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน, **เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : คราฟแมนเพรส, 2550.

[11] อัจฉราพร ไศละสูต, **ความรู้เรื่องผ้า**. กรุงเทพฯ:สร้างสรรค์-วิชาการ, 2517.

[12] อัจฉราพร ไศละสูต, **คู่มือการย้อมสี**. กรุงเทพฯ:อักษรบัณฑิต, 2517.

[13] อภิชาต สนธิสมบัติ, **กระบวนการเคมีสิ่งทอ**. กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2542.

[14] รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์, **วิธีการทดสอบความคงทนของสีบนวัสดุสิ่งทอตามมาตรฐาน**. กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

[15] ศิริวรรณ กิตตินวรัตน์, "Colour Fastness to Light and Perspiration," **Colour Way**, vol. 8, no.43, pp. 45-50, 2002.

[16] สิรีรัตน์ จารุจินดา, " ความคงทนของสีต่อแสง," **Colour Way**, vol. 13, no.72, pp. 42-44, 2007.

[17] Wolf R., **Diffusion In and Through Polymers.** New York : Hanser Publishers, 1991.

[18] Donald G. and Dimitris I., **Polymer Processing Principles and Design**. New York : John Wiley. 1998.

[19] J.Richard Aspland, **Textile Dyeing and Coloration**.3rded. American Association of Textile Chemists and Colorists, 1997.

[20] Shinji Kanehashi and Kazukiyo Nagai, "Analysis of dual-mode model parameters for gas sorption in glassy polymers," **Journal of membrane science**, Vol.253, pp.117-138, 2005.

[21] A. Ferri M. Banchero L Manna and S. Sicardi, "Dye uptake and partition ratio of disperse dyes between a PET yarn and supercritical carbon dioxide," **The Journal of Supercritical Fluids**, vol. 37, pp. 107-114, 2006.

[22] วัชรีพร แสงวัชรพันธุ์, "การศึกษาการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

[23] Pier Luigi Beltrame, Antonella Castelli, Elena Selli, Andrea Mossa, Giovanni Tesla, Anna Maria Bonfatti and Alberto Seves, "Dyeing of Cotton in Supercritical Carbon Dioxide." **Dye and Pigments**. Vol.39, pp. 335-340, 1996.

[24] A. Schmidt E. Bach and E. Schollmeyer, "The dyeing of natural fibres with reactive disperse dyes in supercritical carbon dioxide," **Dye and Pigments**. Vol.56, pp. 27-35, 2003.

[25] อัญชุลี มานิตสกุล, กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญและธีระพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์, " การปรับปรุงกระบวนการการลอกกาวเพื่อลดปัญหาเส้นไหมย้อมไม่สม่ำเสมอโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง," **Colour Way**, vol. 13, no. 71, pp. 52-55, 2007.

[26] ลลิดา บุญโฉม, "สมบัติทางกายภาพและการย้อมติดสีของเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์," วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.

[27] Paisan Kongkachuichay, Aroonsiri Shitangkoonb and Nontalee Chinwongamorn, "Thermodynamics of adsorption of laccaic acid on silk." **Dye and Pigments**. Vol. 53, pp. 179-185, 2002

[28] Smith J.M., Van Ness H.C. and Abbott M.M, **Introduction to Chemical Engineering Themodynamics**. 7thed., London:Mc Graw Hill, 2500.

[29] สิรีรัตน์ จารุจินดา, " ความคงทนของสีต่อแสง," **Colour Way**, vol. 13, no.73, pp. 46-49, 2007.

ภาคผนวก

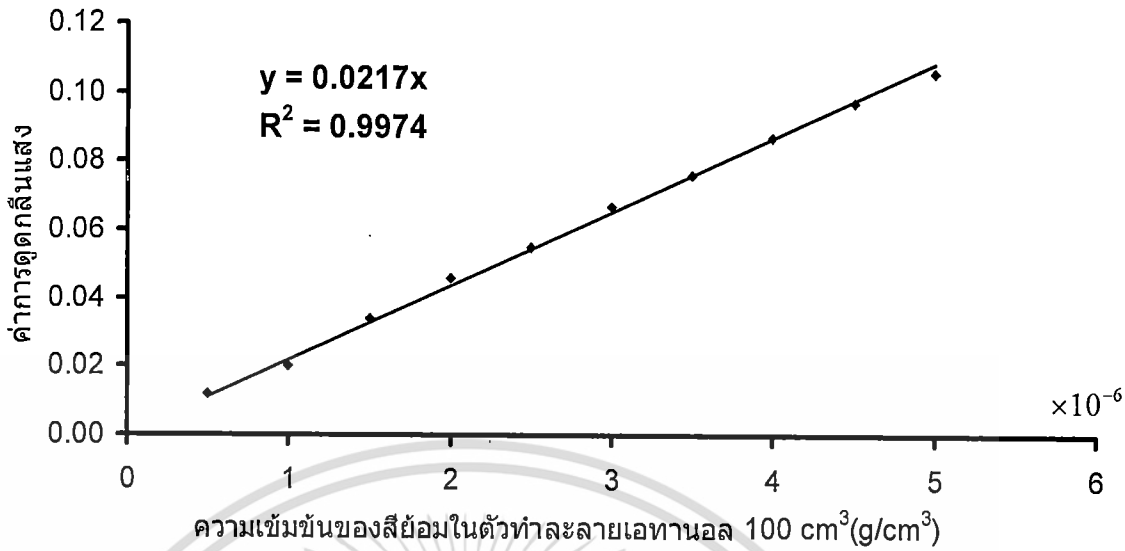
ภาคผนวก ก
การสร้างกราฟมาตรฐาน

การสร้างกราฟมาตรฐาน

การสร้างกราฟมาตรฐานสามารถทำได้โดยการเตรียมความเข้มข้นของสีย้อมโดยการชั่งผงสีประมาณ 0.05 g นำมาเจือจางในตัวทำละลายเอทานอล 100 cm^3 ซึ่งจะได้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 5×10^{-4} g/cm^3 จากนั้นนำมาเจือจางด้วยเอทานอลให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.5 - 5 $\mu g/cm^3$ แล้วจึงนำสารละลายสีย้อมมาสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สูงที่สุดด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งความยาวคลื่นที่ได้คือ 535 nm จากนั้นนำสารละลายสีย้อมมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าว ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ก.1 และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสีย้อมในตัวทำละลายเอทานอล ดังรูปที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสีย้อมในตัวทำละลายเอทานอล 100 cm^3(g/cm^3) $\times10^{-6}$	**ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 nm**
0.5	0.012
1.0	0.020
1.5	0.034
2.0	0.046
2.5	0.055
3.0	0.067
3.5	0.076
4.0	0.087
4.5	0.097
5.0	0.106



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม C.I. Acid Red 42

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม

การคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม สามารถทำได้โดย

นำเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมโดยใช้ SC-CO_2เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อม ที่ภาวะอุณหภูมิ 50-70°C ความดัน 10-20 MPa มาสกัดนำสีย้อมออกจากรูพรุนของเส้นใย โดยวิธีรีฟลักซ์ด้วยเอทานอลปริมาตร 20 cm^3 ที่อุณหภูมิ 72°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาว 535 nm โดยค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่ความยาวคลื่นนี้แสดงได้ดังตารางที่ ข.1 จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงของที่สีย้อมที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสีที่สกัดแยก (g/cm^3) ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟมาตรฐานของสีย้อมในภาคผนวก ก ดังสมการต่อไปนี้

$$y = 0.0217x \qquad \text{(ข. 1)}$$

เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 nm

x คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยก (g/cm^3)

ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยก

อุณหภูมิในการทดลอง (°C)	ความดันในการทดลอง (MPa)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 nm	ความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยก(g/cm^3) ($\times 10^{-6}$)
50	10.0	0.005	0.2304
	12.0	0.008	0.3687
	15.0	0.010	0.4608
	20.0	0.011	0.5069
60	10.0	0.006	0.2765
	12.0	0.008	0.3687
	15.0	0.011	0.5069
	20.0	0.011	0.5069
70	10.0	0.009	0.4147
	12.0	0.012	0.5530
	15.0	0.014	0.6452
	20.0	0.015	0.6912

จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C = \frac{\text{ความเข้มข้นของสีที่สกัดแยก } (g/cm^3)}{100} \times \frac{V}{W} \qquad \text{(ข. 2)}$$

เมื่อ C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye}/g_{Silk})

V คือ ปริมาตรเอทานอลที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (cm^3)

W คือ น้ำหนักเส้นใยไหมก่อนย้อม (g)

ตัวอย่างการคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม

จากตารางที่ ข.1 ที่ภาวะความดัน 15 MPa อุณหภูมิ 70 °C จะมีค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสีที่สกัดแยก เท่ากับ 0.014 และ 0.6452×10^{-6} g/cm^3 ตามลำดับ จากนั้น คำนวณค่าความเข้มข้นของสีย้อมในเส้นใยไหมได้ดังสมการที่ ข.2 ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$C = \frac{0.6452\times10^{-6}\left(g/cm^3\right)}{100} \times \frac{20\left(cm^3\right)}{0.0195(g)} = 6.617\times10^{-6}\left(\frac{g_{Dye}}{g_{Silk}}\right)$$

ดังนั้นที่ภาวะในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมนี้ จะมีค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม มีค่าเท่ากับ $6.617\times10^{-6}\left(g_{Dye}/g_{Silk}\right)$ และที่ภาวะในกระบวนการย้อมอื่นๆ ก็สามารถคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมได้เช่นเดียวกัน

ภาคผนวก ค
การคำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์

การคำนวณหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิฤต สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\rho = \frac{m}{v} \qquad (ค.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (g/cm^3)

m คือ น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 44 g/mol

v คือ ปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (cm^3/mol)

สามารถหาค่าปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (v) ในสมการที่ ค.1 ได้จากสมการ

$$z = \frac{pv}{RT} \qquad (ค.2)$$

เมื่อ z คือ ค่าแฟกเตอร์สภาพกดอัด

p คือ ความดันในการทดลอง (MPa)

v คือ ปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์ (cm^3/mol)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ (0.08206 dm^3.atm/mol.K)

T คือ อุณหภูมิในการทดลอง (K)

โดยการคำนวณค่าแฟกเตอร์สภาพกดอัด (z) ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$z = z^0 + \omega z^1 \qquad (ค.3)$$

เมื่อ z คือ ค่าแฟกเตอร์สภาพกดอัด

z^0 และ z^1 คือ correlation factor

ω คือ อะเซนตริกแฟกเตอร์

จากนั้นคำนวณหาอุณหภูมิและความดันลดรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดังสมการ

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad \text{และ} \quad P_r = \frac{P}{P_c}$$

เมื่อ $T_c = 304$ K

$P_c = 7.38$ MPa

T คือ อุณหภูมิในการทดลอง (K)

P คือ ความดันในการทดลอง (MPa)

ซึ่งค่าอุณหภูมิลดรูปและความดันลดรูปที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ ค.1 และ ตารางที่ ค.2 ตามลำดับ

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิลดรูป (T_r) ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (°C)	อุณหภูมิลดรูป (T_r)
50	1.0625
60	1.1000
70	1.1500

ตารางที่ ค.2 ความดันลดรูป (P_r) ที่ความดันที่ใช้ในการทดลอง

ความดันที่ใช้ในการทดลอง (MPa)	ความดันลดรูป (P_r)
10.0	1.35
12.0	1.62
15.0	2.03
20.0	2.70

จากนั้นนำอุณหภูมิลดรูปและความดันลดรูปในตารางที่ ค.1 และ ค.2 มาเปิดตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation [28] เพื่อหาค่า z^0 และ z^1 ซึ่งมีค่าดังแสดงในตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ค่า z^O และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิลดรูป 1.05 1.10 และ 1.15

อุณหภูมิลดรูป (Tr)	ความดันลดรูป (Pr)	z^O	z^1
1.05	1.2000	0.4437	0.1059
	1.5000	0.3131	0.0451
	2.0000	0.3452	-0.0432
	3.0000	0.4604	-0.0838
1.10	1.2000	0.5984	0.0897
	1.5000	0.4580	0.1630
	2.0000	0.3953	0.0698
	3.0000	0.4770	-0.0373
1.15	1.2000	0.6803	0.0943
	1.5000	0.5798	0.1548
	2.0000	0.4760	0.1667
	3.0000	0.5042	0.0332

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ค่าความดันลดรูปจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.3-2.7 ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณค่า z^O และ z^1 เพื่อให้อยู่ในช่วงความดันลดรูปดังกล่าว ซึ่งค่า z^O และ z^1 ที่ประมาณได้จะมีค่าแสดงดังตารางที่ ค.4

ตารางที่ ค.4 ค่า z^O และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิลดรูป 1.05 1.10 และ 1.15 และ ความดันลดรูปที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิลดรูป (T_r)	ความดันลดรูป (P_r)	z^O	z^1
1.05	1.35	0.3784	0.0755
	1.62	0.3208	0.0239
	2.03	0.3487	-0.0444
	2.7	0.4258	-0.0716

ตารางที่ ค.4 ค่า z^O และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิลดรูป 1.05 1.10 และ 1.15 และ ความดันลดรูปที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

อุณหภูมิลดรูป (T_r)	ความดันลดรูป (P_r)	z^O	z^1
1.1	1.35	0.5282	0.1264
	1.62	0.4430	0.1406
	2.03	0.3978	0.0666
	2.7	0.4525	0.0694
1.15	1.35	0.6301	0.1246
	1.62	0.5545	0.1577
	2.03	0.4768	0.1627
	2.7	0.4960	0.0733

เมื่อได้ค่า z^O และ z^1 ที่อุณหภูมิลดรูปและความดันลดรูปต่างๆ ในตารางที่ ค.4 แล้วสามารถนำไปคำนวณหาแฟกเตอร์สภาพกดอัด (z) ได้โดยนำ z^O และ z^1 แทนในสมการที่ ค.2 ซึ่งค่าแฟกเตอร์สภาพอัดที่คำนวณได้จะแสดงได้ดังตารางที่ ค.5

ตารางที่ ค. 5 ค่าแฟกเตอร์สภาพกดอัด (z) ที่ได้จากการคำนวณ

อุณหภูมิลดรูป (T_r)	ความดันลดรูป (P_r)	z
1.05	1.35	0.3953
	1.62	0.3262
	2.03	0.3388
	2.70	0.4098
1.10	1.35	0.4999
	1.62	0.4115
	2.03	0.3829
	2.70	0.4370
1.15	1.35	0.6022
	1.62	0.5192
	2.03	0.4404
	2.70	0.4800

จากนั้นนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณแทนลงในสมการที่ ค.2 ซึ่งตัวอย่างในการคำนวณปริมาตรจำเพาะของ SC-CO_2 ที่อุณหภูมิ 50 °C ความดัน 10 MPa แสดงได้ดังนี้

$$v = \frac{zRT}{P} = \frac{0.3388 \times 0.8206 \frac{dm^3 \times atm}{mol \times K}}{15MPa} \times 323K \times \frac{1000cm^3}{dm^3} \times \frac{0.101325MPa}{atm} = 60.66 \frac{cm^3}{mol}$$

ดังนั้นปริมาตรจำเพาะของSC-CO_2 ที่อุณหภูมิ 50°C ความดัน 10 MPa จะมีค่า $60.66\ cm^3/mol$ ส่วนค่าปริมาตรจำเพาะของ SC-CO_2 ที่อุณหภูมิ และ ความดันอื่นๆ แสดงค่าในตารางที่ ค.6

ตารางที่ ค.6 ค่าปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (v)

อุณหภูมิในการทดลอง (°C)	ความดันในการทดลอง (MPa)	ปริมาตรจำเพาะของ SC-CO_2 (cm^3/mol)
50	10.0	106.16
	12.0	73.01
	15.0	60.66
	20.0	55.03
60	10.0	138.41
	12.0	94.95
	15.0	70.68
	20.0	60.50
70	10.0	171.74
	12.0	123.39
	15.0	83.73
	20.0	68.45

จากนั้นนำค่าปริมาตรจำเพาะของSC-CO_2 ที่หาได้ มาทำการคำนวณหาความหนาแน่นของ SC-CO_2 จากสมการที่ ค.1 ซึ่งค่าความหนาแน่นของ SC-CO_2 ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ ค.7

ตารางที่ ค. 7 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

อุณหภูมิในการทดลอง (°C)	ความดันในการทดลอง (MPa)	ความหนาแน่นของ SC-CO_2 (kg/m^3)
50	10.0	414.67
	12.0	602.66
	15.0	725.35
	20.0	799.56
60	10.0	317.90
	12.0	463.40
	15.0	622.52
	20.0	727.27
70	10.0	256.20
	12.0	356.59
	15.0	525.50
	20.0	642.80

การคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ค่าการละลายของสีย้อมใน SC-CO_2 สามารถคำนวณได้จากสมการอย่างง่าย (empirical equation) ของ Adnan O¨ zcan และ A. Safa O¨ zcan [1] ดังสมการ

$$\ln\left(\frac{Xp}{p_{ref}}\right) = a + \left(\frac{b}{T}\right) + c(\rho - \rho_{ref}) \qquad (ค.4)$$

เมื่อ X คือ ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ $\left(g_{Dye}/g_{CO_2}\right)$

p คือ ความดันในการทดลอง (MPa)

p_{ref} คือ ความดันอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (g/cm^3)

ρ_{ref} คือ ความหนาแน่นอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 0.7 g/cm^3

T คือ อุณหภูมิ (K)

a b c คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการคำนวณในการทดลอง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ ค.8

ตารางที่ ค.8 ค่าคงที่ a b และ c [23]

ค่าคงที่สำหรับสมการที่ ค.1	
a	-1.655
b (K^{-1})	-2406.84
c ($g.dm^{-3}$)	0.0156

ค่าการละลายของสีย้อมใน SC-CO_2 ที่คำนวณได้จากสมการที่ ค.4 แสดงในตารางที่ ค.9

ตารางที่ ค.9 ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (X) ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ความดัน (MPa)	ค่าการละลายของสีย้อมใน SC-CO_2 (g_{Dye}/g_{CO_2}) ($\times 10^{-6}$)
50	10.0	0.013
	12.0	0.203
	15.0	1.102
	20.0	2.631
60	10.0	0.003
	12.0	0.029
	15.0	0.277
	20.0	1.065
70	10.0	0.002
	12.0	0.007
	15.0	0.075
	20.0	0.352

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าคงที่และการประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง

การคำนวณค่าคงที่ในสมการที่ 2.9 (k_D C'_H และ b) สามารถสามารถทำได้โดยการอาศัยกราฟระหว่าง ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมกับความดัน โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง แสดงได้ดังสมการที่ ง.1 ซึ่งในกระบวนการทดลองนี้ใช้ภาวะความดันเหนือจุดวิกฤต ดั้งนั้นจึงนำความดันที่จุดวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์มาลบกับความดันจริงที่ใช้ในการทดลอง

$$C = C_D + C_H = k_D(p - p_C) + \frac{C'_H b(p - p_C)}{1 + b(p - p_C)} \qquad (ง.1)$$

เมื่อ C คือ ค่าการละลาย (g_{Dye} / g_{Silk})

k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี่ (g_{Dye} / g_{Silk}) (MPa)

b คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างร่วม (Hole affinity constant) (MPa^{-1})

p คือ ค่าความดัน (MPa)

P_C คือ ความดันวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 7.4 MPa

C'_H คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างอิ่มตัว (Hole saturated constant) (g_{Dye} / g_{Silk})

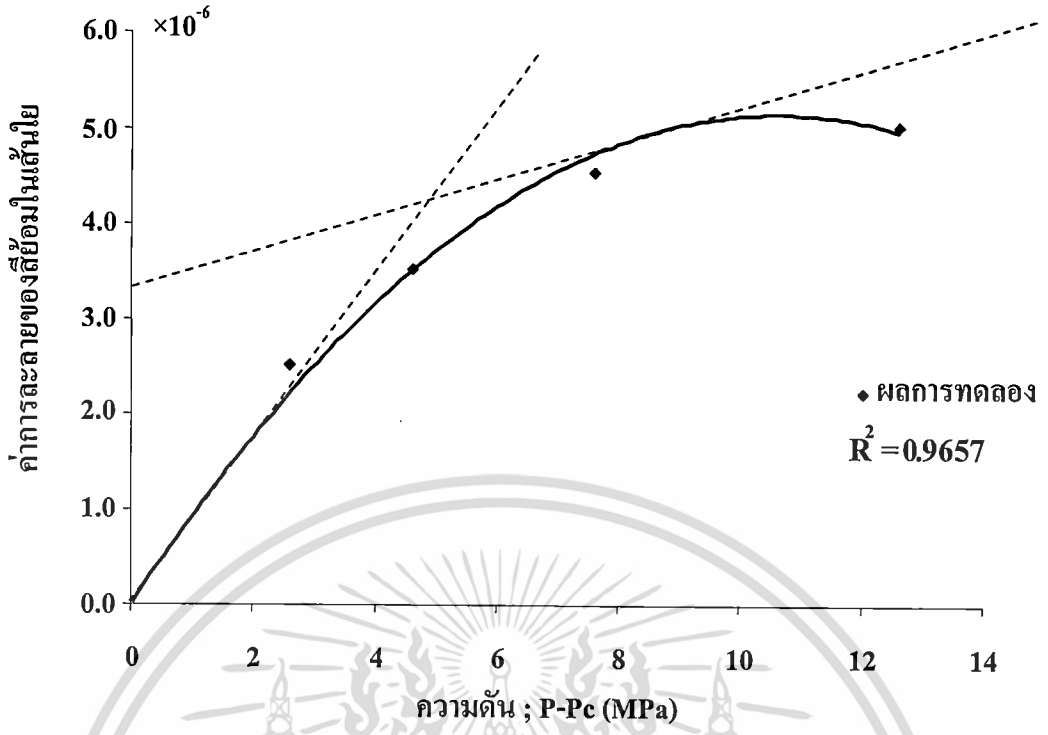
C_D คือ ค่าการดูดซึมแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้ (g_{Dye} / g_{Silk})

C_H คือ ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดเล็กมากๆ (g_{Dye} / g_{Silk})

ค่าคงที่ C'_H และ k_D ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและความดันที่ช่วงความดันสูง และทำการประมาณค่าเส้นตรงของกราฟ โดยค่าคงที่ k_D สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟที่ลากผ่านจุดที่ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเริ่มมีค่าคงที่ ค่าคงที่ C'_H สามารถหาได้จากจุดตัดของแกน y และค่าคงที่ b สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและความดันที่ช่วงความดันต่ำ

ตัวอย่างการหาค่าคงที่ต่างๆ ในสมการที่ ง.1 และ การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมโดยอาศัยกลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิ 50 °C แสดงได้ดังนี้

การหาค่าคงที่ C'_H และ k_D สามารถหาได้โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและความดันในดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่อุณหภูมิ 50°C

ซึ่งค่าคงที่ C'_H และ k_D สามารถหาได้จากกราฟที่ช่วงความดันในการทดลองสูง โดยค่าคงที่ C'_H คือค่าที่จุดตัดแกน y ดังนั้น $C'_H = 3.4\times10^{-6}\, g_{Dye}/g_{Silk}$ และ ค่าคงที่ k_D สามารถหาได้จากความชันของกราฟ ดังนี้

$$\text{Slope} = \frac{(4.8-3.4)\times10^{-6}}{(8-0)} = 0.175\times10^{-6}$$

ดังนั้น $k_D = 0.175\times10^{-6}\,\dfrac{g_{Dye}/g_{Silk}}{\text{MPa}}$

ค่าคงที่ b หาได้จากความชันของเส้นกราฟที่ช่วงความดันต่ำ

$$\text{Slope} = \frac{(2.2-0)}{(3-0)}\times10^{-6} = 0.73\times10^{-6}$$

จากนั้นแทนค่าคงที่ k_D, C'_H และความชันของเส้นกราฟที่ช่วงความดันต่ำที่หาได้ข้างต้นลงไปในสมการ $\text{Slope} = (k_D + C'_H b)$ ดังนี้

$$0.73\times10^{-6} = \left[\left(0.175\times10^{-6}\right)+\left(3.4\times10^{-6}\times b\right)\right]$$

$$b = \left[\frac{\left(0.73\times10^{-6}\right)-\left(0.175\times10^{-6}\right)}{\left(3.4\times10^{-6}\right)}\right]$$

$$b = 0.16\left(\mathrm{MPa}^{-1}\right)$$

การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ ง.1 โดยนำค่าคงที่ต่างๆ ที่คำนวณได้ข้างต้นแทนค่าลงไปในสมการ ดังนี้

$$C = \left[\left(0.175\times10^{-6}\,\frac{g_{Dye}/g_{Silk}}{MPa}\right)\times\left(8-7.38\mathrm{MPa}\right)\right] + \left[\frac{\left(3.4\times10^{-6}\,g_{Dye}/g_{Silk}\right)\times\left(0.16\mathrm{MPa}^{-1}\right)\times\left(8-7.38\mathrm{MPa}\right)}{1+\left(0.16\mathrm{MPa}^{-1}\times\left(8-7.38\mathrm{MPa}\right)\right)}\right]$$

$$C = 0.415\times10^{-6}\ g_{Dye}/g_{Silk}$$

ดังนั้นที่อุณหภูมิคงที่ 50 °C ความดัน 8 MPa สามารถคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยได้เท่ากับ $0.415\times10^{-6}\ g_{Dye}/g_{Silk}$ และที่ภาวะการทดลองอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกัน

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{C}{X} \qquad (จ.1)$$

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye}/g_{Silk})

X คือ ค่าการละลายของสีย้อมในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่ภาวะอุณหภูมิ 70°C ความดัน 15 MPa สามารถคำนวณได้โดยนำค่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและค่าการละลายของสีย้อมในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งคำนวณได้จากประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง และจากสมการอย่างง่ายของ Adnan O¨ zcan และ A. Safa O¨ zcan [1] ตามลำดับจากตารางที่ จ.1 แทนลงในสมการที่ จ.1 ดังนี้

$$K = \frac{6.620\times10^{-6}}{0.075\times10^{-6}} \frac{\left(g_{Dye}/g_{Silk}\right)}{\left(g_{Dye}/g_{CO_2}\right)}$$

$$K = 88.27 \frac{\left(g_{Dye}/g_{Silk}\right)}{\left(g_{Dye}/g_{CO_2}\right)}$$

ดังนั้นที่ภาวะอุณหภูมิ 70°C ความดัน 15 MPa ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าเท่ากับ $88.27 \frac{\left(g_{Dye}/g_{Silk}\right)}{\left(g_{Dye}/g_{CO_2}\right)}$ สำหรับการคำนวณที่ภาวะอื่นๆ ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม $(g_{Dye}/g_{Silk}) \times 10^{-6}$	ค่าการละลายของสีย้อมใน CO_2 $(g_{Dye}/g_{CO_2}) \times 10^{-6}$	สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก $\frac{(g_{Dye}/g_{Silk})}{(g_{Dye}/g_{CO_2})} \times 10^{-6}$
50	10.0	2.518	0.013	194.46
	12.0	3.511	0.203	17.30
	15.0	4.540	1.102	4.12
	20.0	5.044	2.631	1.92
60	10.0	2.942	0.003	980.67
	12.0	3.986	0.029	137.45
	15.0	5.422	0.277	19.57
	20.0	5.510	1.065	5.17
70	10.0	4.350	0.002	2175.00
	12.0	5.731	0.007	818.71
	15.0	6.620	0.075	88.27
	20.0	6.744	0.352	19.16

ภาคผนวก ฉ

การทดสอบความคงคนของสีย้อมในเส้นใย

ฉ.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง [13-14]

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างตามมาตรฐาน ISO 105-C01:1989(E) จะใช้เครื่องลอนเดอร์ โอ มิเตอร์ (Launder-o-meter) ในการทดสอบ ซึ่งมีภาวะที่ใช้ตั้งแต่ระดับที่เบาที่สุดถึงระดับที่แรงที่สุด โดยเครื่องลอนเดอร์ โอ มิเตอร์ มีหลักการในการทำงานดังนี้ นำเส้นใยที่ผ่านการย้อมสีมาประกบติดกับผ้าขาว 2 เส้นใย (Two single fiber adjacent fabrics) หรือกับผ้าหลายเส้นใย (Multifiber adjacent fabric) ซึ่งชนิดของผ้าหลายเส้นใยคือ อะซิเตท,ฝ้าย, ไนลอน, พอลิเอสเทอร์, อะคริลิคและขนสัตว์ ส่วนชนิดของผ้าขาว 2 เส้นใย แสดงได้ดังตารางที่ ฉ.1

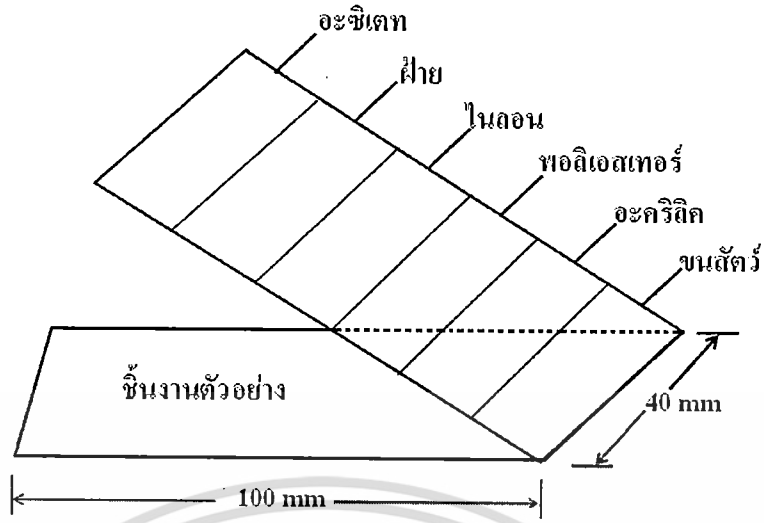
ตารางที่ ฉ.1 ผ้าขาว 2 เส้นใย

ชนิดเส้นใยตัวอย่าง	ชนิดของผ้าขาวชิ้นที่ 1	ชนิดของผ้าขาวชิ้นที่ 2
ฝ้าย	ฝ้าย	ขนสัตว์
ขนสัตว์	ขนสัตว์	ฝ้าย
ไหม	ไหม	ฝ้าย
ลินิน	ลินิน	ขนสัตว์
วิสโคส	วิสโคส	ขนสัตว์
อะซิเตท	อะซิเตท	วิสโคส
พอลิเอไมด์ หรือไนลอน	พอลิเอไมด์ หรือไนลอน	ขนสัตว์หรือวิสโคส
พอลิเอสเทอร์	พอลิเอสเทอร์	ขนสัตว์หรือ ฝ้าย
อะครีลิค	อะครีลิค	ขนสัตว์หรือ ฝ้าย

ฉ.1.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าหลายเส้นใย

ในกรณีที่เกิดการตกติดสี เช่น เสื้อสีขาวที่มีลวดลายสีแดงสลับ เพื่อให้แน่ใจว่าสีแดงจะไม่ตกติดบริเวณสีขาว ดังนั้นจึงใช้ผ้าใยผสมหลายชนิดมาประกบกับชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าหลายเส้นใย (กรณีที่ชิ้นงานตัวอย่างเป็นผืนผ้า) เตรียมได้โดย ตัดชิ้นงานตัวอย่าง และผ้าหลายเส้นใย ตามความยาวของผ้าให้มีขนาด 40×100 mm จำนวน 2 และ 1 ชิ้นตามลำดับ แล้วเย็บริมทั้ง 4 ด้านเพื่อป้องกันการหลุดของเส้นใย จากนั้นนำชิ้นงานมาประกบกับผ้าหลายเส้นใยโดยเย็บตรงตำแหน่งเส้นใยขนสัตว์ทางด้านกว้างเพียงด้านเดียว ดังรูปที่ ฉ.1 แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณสารละลายน้ำสบู่ที่ต้องใช้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ฉ.1

$$\text{ปริมาณสารละลายน้ำสบู่ที่ใช้ (ml)} = \text{น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง (g)} \times 50 \qquad \text{(ฉ.1)}$$

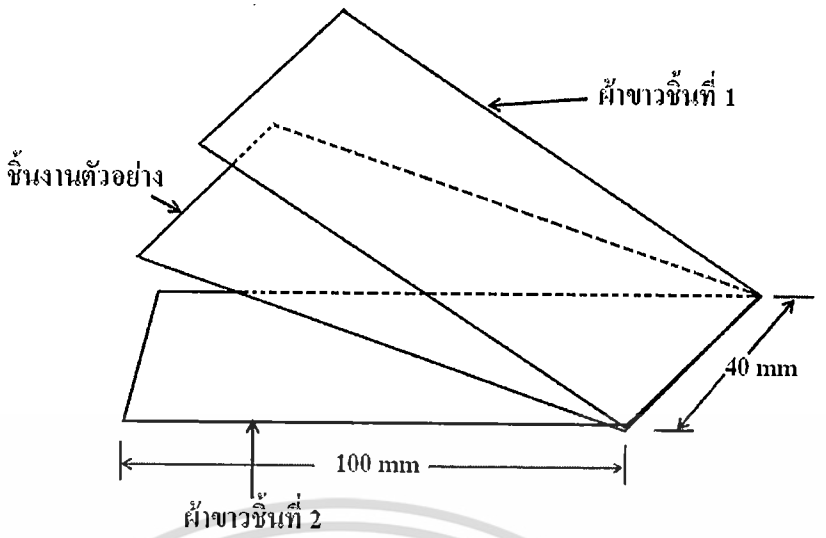


รูปที่ ฉ.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าหลายเส้นใย

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าหลายเส้นใย (กรณีที่ชิ้นงานตัวอย่างเป็นเส้นใย) สามารถเตรียมชิ้นงานได้โดย ตัดผ้าหลายเส้นใยและผ้า Non-dyeable fabric ให้มีขนาด 40×100 mm จำนวน 1 และ 2 ชิ้นตามลำดับและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักโดยให้มีน้ำหนักเป็น 0.5 เท่าของน้ำหนักผ้าหลายเส้นใย แล้วนำมาวางบนผ้า Non-dyeable fabric ให้เป็นแผ่น ทั้ง 2 ชิ้นเย็บริมทั้ง 4 ด้าน จากนั้นนำผ้าหลายเส้นใยมาประกบและเย็บริมทั้ง 4 ด้าน นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณสารละลายน้ำสบู่ที่ต้องใช้ คำนวณได้จากสมการที่ ฉ.1

ฉ.1.2 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าขาว 2 เส้นใย

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าขาว 2 เส้นใย (กรณีที่ชิ้นงานตัวอย่างเป็นผืนผ้า) เตรียมได้โดย ตัดชิ้นงานตัวอย่าง และผ้าขาว 2 เส้นใยตามความยาวของผ้าให้มีขนาด 40×100 mm อย่างละ 2 ชิ้น แล้วเย็บริมทั้ง 4 ด้าน จากนั้นนำชิ้นงานมาประกบกับผ้า 2 เส้นใย โดยให้ชิ้นงานอยู่ตรงกลางระหว่างผ้าขาวทั้งสอง และเย็บผ้าทางด้านกว้างเพียงด้านเดียว ดังรูปที่ ฉ.2 แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณสารละลายน้ำสบู่ที่ต้องใช้ คำนวณได้จากสมการที่ ฉ.1



รูปที่ ฉ.2 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าขาว 2 เส้นใย

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างประกบกับผ้าขาว 2 เส้นใย (กรณีที่ชิ้นงานตัวอย่างเป็นเส้นใย) สามารถเตรียมชิ้นงานได้โดย ตัดผ้าขาว 2 เส้นใย ขนาด 40×100 mm และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักโดยให้มีน้ำหนักเป็น 0.5 เท่าของน้ำหนักผ้าขาว จำนวน 2 ชุด แล้วนำมาวางบนผ้าขาวให้เป็นแผ่นเท่ากับขนาดของผ้าขาว และเย็บริมทั้ง 4 ด้าน จากนั้นนำผ้าขาวมาประกบทั้งสองด้านและเย็บริมทั้ง 4 ด้าน นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณสารละลายน้ำสบู่ที่ต้องใช้ จากสมการที่ ฉ.1

หลังจากเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาบรรจุลงในกระบอกโลหะที่มี น้ำ สบู่สังเคราะห์ ลูกบอลเหล็ก และคลอรีน(ถ้ามี) จากนั้นนำไปทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ที่อุณหภูมิ 40 ± 2 °C และเวลา 30 นาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทดสอบจึงนำเส้นใยมาล้างน้ำและผึ่งให้แห้ง แล้วนำมาประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นงานตัวอย่าง และการเปื้อนสีบนผ้าที่ใช้ประกบโดยใช้เกรย์สเกลสำหรับประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของสี และเกรย์สเกลสำหรับประเมินค่าการติดเปื้อนสี มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างมีอยู่หลายมาตรฐาน และวิธีการซักล้างก็ยังสามารถทำได้หลายวิธี ดังนั้นจึงต้องเลือกมาตรฐานที่เหมาะสมกับวิธีการซักล้าง โดยในแต่ละมาตรฐานการทดสอบ จะมี อุณหภูมิ สารฟอกขาว ปริมาณการหมุนเวียนของน้ำ และปริมาณการใช้สบู่สังเคราะห์ ที่แตกต่างกัน

ฉ.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง

ในการออกแบบการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง จะต้องทำการออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด ทั้งแหล่งกำเนิดแสงและภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงมีค่าใกล้เคียงกับผลทางธรรมชาติ มีความถูกต้อง

และให้ความสม่ำเสมอของการทดสอบ โดยกระบวนการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงสามารถแบ่งได้เป็น กระบวนการใช้แสงแดดธรรมชาติ และกระบวนการที่ใช้แสงแดดเทียมที่ติดตั้งภายในเครื่องทดสอบ เครื่องทดสอบที่นิยมใช้ เช่น เครื่องเวเธอร์ โอ มิเตอร์ (Weather-o-meter) และเฟด โอ มิเตอร์ (Fade-o-meter) โดยเครื่องทดสอบทั้งสองเครื่องนี้เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงที่นิยมใช้กันมาก ภายในเครื่องจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงแดดเทียมที่เลียนแบบแสงแดด โดยสามารถปรับอุณหภูมิ และความชื้นในเครื่องได้ ความแตกต่างของเครื่องทดสอบทั้งสองเครื่อง คือ เวเธอร์ โอ มิเตอร์ เป็นเครื่องที่ใหม่กว่า มีการพ่นน้ำและตั้งเวลาเปิดและปิดไฟในระหว่างการทดสอบได้ แต่สิ่งที่เหมือนกันของทั้งสองเครื่องนี้ คือ แหล่งกำเนิดแสงที่ติดตั้งภายในเครื่องจะต้องเลือกหลอดคาร์บอนอาร์ก (Carbon-arc Lamp) หรือ หลอดซีนอนอาร์ก (Xenon-arc Lamp) เพียงชนิดเดียวเท่านั้น เนื่องจากหลอดทั้งสองจะให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกันและไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงแดดและแสงแดดเทียมมีหลักการและวิธีการทดสอบ ดังนี้

ฉ2.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (แสงแดด) [29]

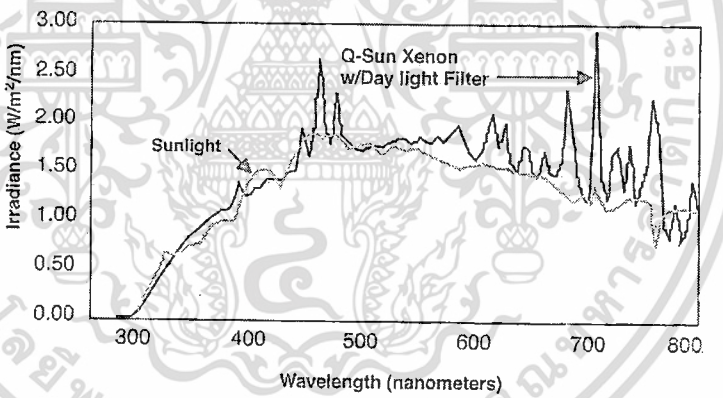
มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (แสงแดด) ได้แก่ มาตรฐาน AATCC Test Method 16-2004 Option 6 มาตรฐาน ISO 105-B01:1994 (E) JIS L 0841 และมาตรฐาน มอก. 121 เล่ม 1-2518 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ เช่นแสงแดด จะต้องใช้เวลาในทดสอบนานพอสมควร และมีปัญหาเนื่องจากความเข้มของแสงแดดไม่คงที่ เช่น ฤดูกาลต่างๆ จะให้ความเข้มของแสงไม่เท่ากัน ทำให้ผลการทดสอบออกมาไม่ค่อยมีความแม่นยำ โดยวิธีการทดสอบโดยใช้แสงแดด มีดังนี้ นำเส้นใยที่จะทำการทดสอบมาติดกับผ้าใยขนสัตว์มาตรฐาน แล้วปิดทับด้วยกระจกใส จากนั้นปล่อยให้ถูกแสงแดดในช่วงเวลา 9.00-15.00 น. โดยจะเอียงตัวอย่างไปทางทิศใดนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของประเทศที่ทำการทดสอบ เช่นประเทศที่อยู่ส่วนเหนือของโลกจะต้องเอียงตัวอย่างไปทางทิศใต้ และประเทศที่อยู่ส่วนใต้ของโลกจะต้องเอียงตัวอย่างไปทางทิศเหนือ ในระหว่างกระบวนการทดสอบถ้าชิ้นตัวอย่างมีความร้อนสะสมมากจะทำให้เกิดการซีดจางของสีได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นการระบายอากาศของตัวอย่างจึงมีความสำคัญอย่างมากในการวัดค่าความคงทนของสีต่อแสงสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างมาปิดทับด้วยกระดาษแข็งสีดำครึ่งหนึ่งและปิดทับผ้าขนสัตว์ที่ถูกย้อมด้วยมาตรฐานสีน้ำเงินด้วยกระดาษแข็งสีดำครึ่งหนึ่งเช่นกัน แสงนำไปส่องแสงให้มีความซีดจางเท่ากับเกรย์สเกลสีเทาหมายเลข 3 แล้วนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่างที่ไม่ถูกแสงกับตัวอย่างที่ถูกแสง จากนั้นเปรียบเทียบกับผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานและมาตรฐานที่สีซีดจาง ถ้าได้หมายเลข 6 หมายความว่าตัวอย่างจะมีค่าความคงทนของสีต่อแสงเท่ากับ 6 แต่เนื่องจากการทดสอบด้วยแสงแดดจะใช้เวลาในการทดสอบที่นาน และ มักจะขึ้นอยู่กับภูมิประเทศนั้นๆ ทำให้ผลการทดสอบที่ได้อาจจะไม่ค่อยแม่นยำนัก ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานมาใช้แทนแสงแดด

ฉ2.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียม [14,29]

ฉ.2.2.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงซีนอนอาร์ก

มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงซีนอนอาร์ก ได้แก่ มาตรฐาน AATCC Test Method 16-2004 Option 3 Option 4 และ Option 5 มาตรฐาน ISO 105-B02 :1994 (E) มาตรฐาน ISO 105-B04 :1994 (E) มาตรฐาน ISO 105-B06 :1994 (E) JIS L 0843 และ มาตรฐาน มอก. 121 เล่ม 2-2518

การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงโดยใช้หลอดไฟซีนอนอาร์กแทนแสงแดดจากธรรมชาติ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนของสีบนวัสดุสิ่งทอทุกชนิด และยังใช้ทดสอบวัสดุสิ่งทอที่มีสีขาวหรือย้อมขาว โดยแสงซีนอนอาร์กมีหลักการการกระจายพลังงานดังนี้ หลอดไฟซีนอนอาร์กจะให้แสงโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านแก๊ส ดังนั้นจึงทำให้เกิดแสงที่มีการกระจายพลังงานอยู่ในช่วงของรังสีอัลตร้าไวโอเวต (UV light) และรังสีอินฟราเรด (Infrared light) และมีอุณหภูมิ 5500-6500 K จากนั้นใช้กระจกกรองแสงเพื่อลดความเข้มของรังสีอัลตร้าไวโอเวตลงและใช้อุปกรณ์กรองความร้อนเพื่อลดความเข้มของรังสีอินฟราเรดให้ต่ำลง จึงทำให้แสงซีนอนอาร์กที่ได้มีการกระจายพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ ใกล้เคียงกับแสงแดด ดังรูปที่ ฉ.3



รูปที่ฉ.3 การเปรียบเทียบการกระจายพลังงานของแสงซีนอนอาร์กและแสงแดด[15]

การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงตามมาตรฐาน ISO 105-B02 :1994 (E) สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือAir-Cooled หรือ Water-Cooled Xenon arc lamp โดยขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวอย่างหรือรูปร่างของตัวรองรับตัวอย่างในเครื่องทดสอบ เช่น ถ้าใช้เครื่องทดสอบ Water-Cooled ขนาดของตัวอย่างกับขนาดของตัวรองรับตัวอย่างไม่จำเป็นที่จะต้องมีขนาดเท่ากัน ซึ่งขนาดของตัวรองรับมีขนาดที่แน่นอนคือ 70×120 mm และต้องนำชิ้นงานไปติดบนกระดาษขาว แต่ถ้าใช้ Air-Cooled ในการทดสอบ ตัวอย่าง และผ้าใยขนสัตว์มาตรฐาน จะต้องมีรูปร่างและขนาดเท่ากัน มีขนาดอย่างน้อย 45×10 mm ระดับความคงทนตามมาตรฐานนี้จะใช้ผ้าใยขนสัตว์ระดับความคงทนของสีต่อแสง 1 - 8 และ ผ้าใยขนสัตว์

ระดับความคงทนของสีต่อแสง L2 - L9โดยผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานระดับความคงทนของสีต่อแสง 1 - 8 ถูกผลิตขึ้นในยุโรป และสีที่นำมาใช้ย้อมผ้า แสดงได้ดังตารางที่ ฉ.2

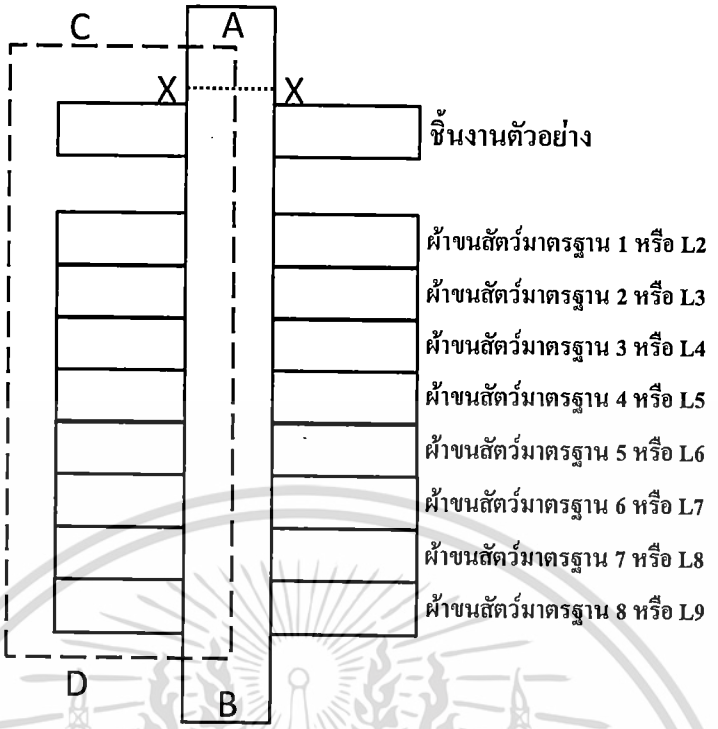
ตารางที่ ฉ.2 สีที่ใช้ในการย้อมผ้าขนสัตว์ [14]

ระดับความคงทนของสีต่อแสง	สีย้อม	ระดับคุณภาพ
1	CI.Acid Blue 104	ต่ำมาก
2	CI.Acid Blue 109	ต่ำ
3	CI.Acid Blue 83	พอใช้
4	CI.Acid Blue 121	ปานกลาง
5	CI.Acid Blue 47	ดี
6	CI.Acid Blue 23	ดีมาก
7	CI.Solubilized Vat Blue 5	ดีเยี่ยม
8	CI.Solubilized Vat Blue 5	ดีเลิศ

ส่วนผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานระดับความคงทนของสีต่อแสง L2 - L9 จะผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสีย้อม CI. Mordant Blue 1 และ CI. Solubilized Vat Blue 8 โดยความคงทนจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในแต่ละระดับ ซึ่งการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงตามมาตรฐานนี้ จะมีวิธีการทดสอบ 5 วิธีดังนี้

ฉ.2.2.1.1 การทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงวิธีที่ 1

วิธีนี้จะใช้ชิ้นงานตัวอย่างเพียงชิ้นเดียว โดยนำชิ้นงานตัวอย่างและผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานมาวางเรียงกันดังรูปที่ ฉ.4 และปิดทับด้วยแผ่นทึบแสงไปที่จุดกึ่งกลางของผ้า (ที่ตำแหน่ง AB) นำไปวางในเครื่องทดสอบโดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดซีนอนอาร์ก ภายใต้ภาวะที่กำหนด ให้ผึ่งแสงจนกระทั่งสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างส่วนที่ปิดด้วยแผ่นทึบแสงกับส่วนที่ถูกแสงมีค่าเกรย์สเกลเท่ากับ 4 โดยระหว่างนี้ให้เปิดแผ่นทึบแสงดูอย่างสม่ำเสมอเพื่อสังเกตสิ่งที่เปลี่ยนแปลง จากนั้นให้นำแผ่นทึบแสงอีก 1 อันมาวางในตำแหน่ง CD แล้วผึ่งแสงต่อไปอีกจนมีความแตกต่างระหว่างส่วนที่โดนแสงกับส่วนที่ไม่โดนแสงมีค่าเกรย์สเกลเท่า 3 และสำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีสีขาวให้ทำการผึ่งแสงต่อจนส่วนที่ถูกแสงกับส่วนที่ไม่ถูกแสงมีค่าเกรย์สเกลเท่ากับ 4 จากนั้นเก็บชิ้นงานมาประเมินความคงทนของสีต่อแสง โดยรายงานผลเป็นตัวเลข 1-8 ถ้าใช้ผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานระดับความคงทนของสีต่อแสง 1 - 8 และถ้าใช้ผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานระดับความคงทนของสีต่อแสง L2 - L9 ให้รายงานผลเป็น L2 - L9



รูปที่ ฉ.4 การวางชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐานในวิธีที่ 1

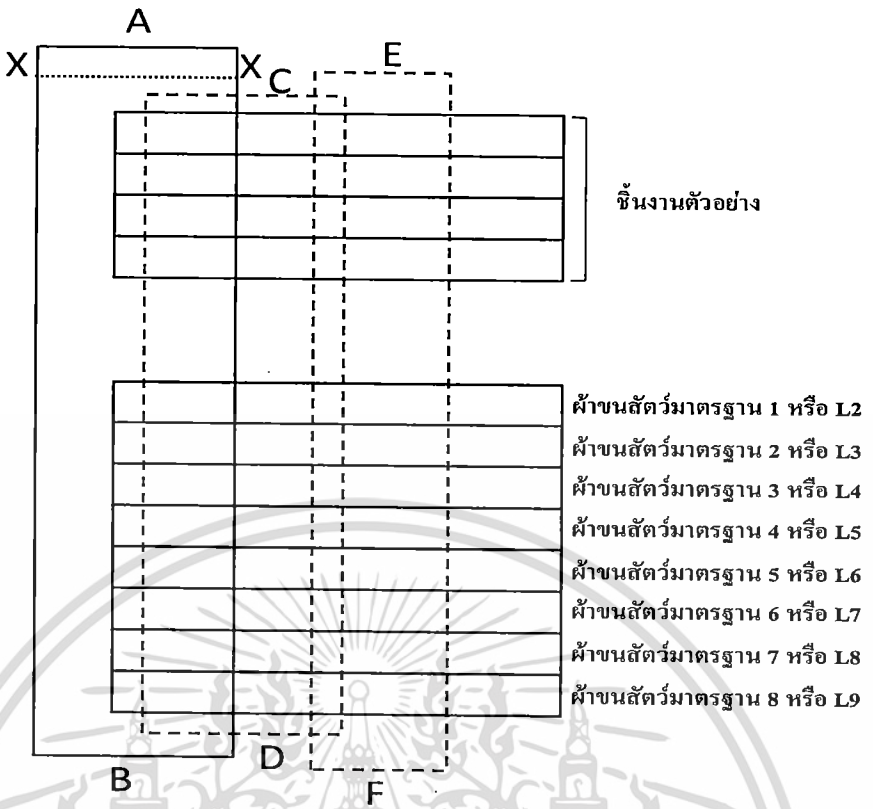
เมื่อ AB แผ่นทึบแสงแผ่นที่ 1

CD แผ่นทึบแสงแผ่นที่ 2

XX คือ ตำแหน่งของบานพับที่ถูกทำขึ้นบนแผ่นทึบแสงแผ่นที่ 1 เพื่อเปิดดูชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐาน

ฉ.2.2.1.2 การทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงวิธีที่ 2

วิธีนี้เหมาะสำหรับเวลาที่มีชิ้นงานตัวอย่างหลายชิ้น โดยการวางชิ้นงานทดสอบจะแสดงได้ ดังรูปที่ ฉ.5 ปิดชิ้นงานทดสอบด้วยแผ่นทึบแสง AB แล้วนำไปวางในเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อแสงภายใต้ภาวะที่กำหนด โดยให้ดูเป็นระยะเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสีเทียบกับส่วนที่ปิดไว้ไม่ให้ถูกแสง เมื่อผ้าขนสัตว์มาตรฐาน 2 มีการเปลี่ยนแปลงของสีเท่ากับเกรย์สเกลระดับ 3 และหาระดับความคงทนของสีทำได้โดยการเปรียบเทียบกับสีที่เปลี่ยนไปของผ้าขนสัตว์มาตรฐาน 1, 2 และ3 หรือ L2 จากนั้นให้วางแผ่นทึบแสง AB ไว้ที่ตำแหน่งเดิมและนำไปผึ่งแสงต่อจนผ้าขนสัตว์มาตรฐาน 4 หรือ L3 มีการเปลี่ยนแปลงของสีเท่ากับเกรย์สเกลระดับ 4 จึงนำแผ่นทึบแสง CD มาวางบนชิ้นงานดังรูป ฉ.5 และผึ่งชิ้นงานต่อจนกระทั่งผ้าขนสัตว์มาตรฐาน 6 หรือ L4 เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีมีค่าเกรย์สเกลระดับ 4 แล้วจึงนำแผ่นทึบแสง EF มาวางที่ตำแหน่งในรูปที่ ฉ.5 แล้วนำไปผึ่งแสงอีกครั้ง



รูปที่ ฉ.5 การวางชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐานในวิธีที่ 2

เมื่อ AB คือ แผ่นทึบแสงแผ่นที่ 1

CD คือ แผ่นทึบแสงแผ่นที่ 2

EF คือ แผ่นทึบแสงแผ่นที่ 3

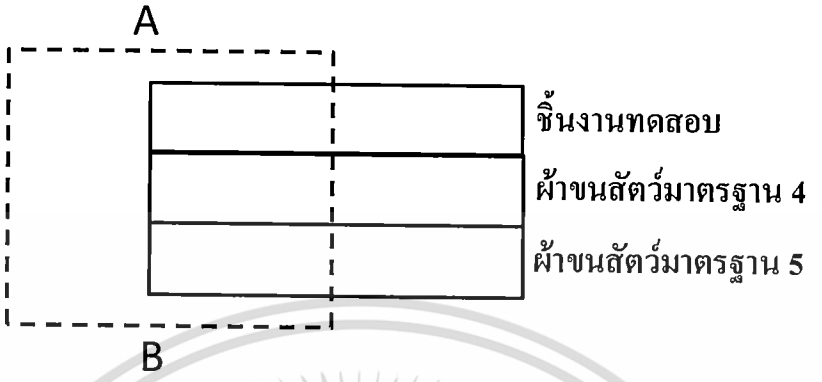
XX คือ ตำแหน่งของบานพับที่ถูกทำขึ้นบนแผ่นทึบแสงแผ่นที่ 1 เพื่อเปิดดูชิ้นงานตัวอย่างและผ้าขนสัตว์มาตรฐาน

เมื่อนำชิ้นงานทดสอบไปผึ่งแสงในเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อแสงอีกครั้งจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานอย่างใดอย่างหนึ่งคือ ผ้าขนสัตว์มาตรฐาน 7 หรือ L7 เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี หรือ ชิ้นงานทดสอบที่มีความคงทนสูงสุดเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเท่ากับเกรย์สเกลระดับ 3 และสำหรับชิ้นงานที่เป็นสีขาวมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของส่วนที่ถูกแสงกับส่วนที่ไม่ถูกแสง มีค่าเกรย์สเกลเท่ากับ 4 จากนั้นเก็บชิ้นงานมาประเมินความคงทนของสีต่อแสง โดยรายงานผลเป็นตัวเลข 1-8 และ ถ้าใช้ผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานระดับความคงทนของสีต่อแสง L2 - L9 ให้รายงานผลเป็น L2 - L9

ฉ.2.2.1.3 การทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงวิธีที่ 3

วิธีการทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงด้วยวิธีนี้ ลูกค้าที่นำชิ้นงานมารับการทดสอบจะเป็นผู้ที่กำหนดค่ามาตรฐานเอาไว้ก่อนแล้ว ดังนั้นผ้าขนสัตว์มาตรฐานชิ้นแรกที่จะนำมาทดสอบ จะต้องมีระดับความคงทนในระดับเดียวกับชิ้นงานทดสอบ และผ้าขนสัตว์มาตรฐานอีกชิ้นจะต้องมีระดับความคงทนต่ำกว่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด 1 ระดับ เช่น ลูกค้า

กำหนดค่ามาตรฐานไว้ที่ระดับ 5 ดังนั้นผ้าขนสัตว์มาตรฐานที่จะนำมาทดสอบ คือผ้าขนสัตว์มาตรฐาน 5 และ4 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบและผ้าขนสัตว์มาตรฐานมาเรียงติดบนกระดาษแข็ง และปิดด้วยแผ่นทึบแสง AB ดังรูปที่ ฉ.6



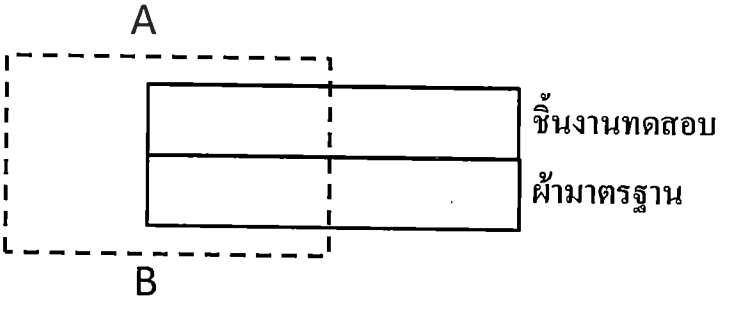
รูปที่ ฉ.6 การวางชิ้นงานทดสอบและผ้าขนสัตว์มาตรฐานในวิธีที่ 3

เมื่อ AB คือ แผ่นทึบแสง

จากนั้นนำไปผึ่งแสงที่เครื่องทดสอบค่าความคงทนของสีต่อแสง ในภาวะที่กำหนดจนกระทั่งผ้าขนสัตว์มาตรฐานที่ระดับสูงสุดมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีมีค่าเกรย์สเกลเท่ากับ 4 เช่นเดียวกับชิ้นงานทดสอบที่มีสีขาว ส่วนที่ถูกแสงกับส่วนที่ไม่ถูกแสงของผ้าขนสัตว์มาตรฐานระดับสูงสุดมีค่าเกรย์สเกลเท่ากับ 4 และเก็บชิ้นงานมาประเมินค่าความคงทนของสีต่อแสง โดยรายงานผลเป็น “Satisfactory” และ “Unsatisfactory”

ฉ.2.2.1.4 การทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงวิธีที่ 4

วิธีการทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงด้วยวิธีนี้จะไม่ใช้ผ้าขนสัตว์มาตรฐาน แต่จะใช้ผ้ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบที่ลูกค้าต้องการทราบระดับความคงทนของสีต่อแสงว่ามีระดับความคงทนต่างกันหรือไม่ โดยนำผ้ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนดและชิ้นงานทดสอบที่ลูกค้าต้องการทราบระดับความคงทนของสีมาเรียงติดบนกระดาษแข็ง และปิดด้วยแผ่นทึบแสง AB ดังรูปที่ ฉ.7



รูปที่ ฉ.7 การวางชิ้นงานทดสอบและผ้ามาตรฐานในวิธีที่ 4

เมื่อ AB คือ แผ่นทึบแสง

จากนั้นนำการวางชิ้นงานทดสอบและผ้ามาตรฐานไปผึ่งแสงในเครื่องทดสอบค่าความคงทนของสีต่อแสง จนกระทั่งผ้ามาตรฐานมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีและส่วนที่ถูกแสงกับส่วนที่ไม่ถูกแสงของผ้าขนสัตว์มาตรฐานระดับสูงสุดมีค่าเกรย์สเกลเท่ากับ 4 เช่นเดียวกับชิ้นงานทดสอบที่มีสีขาว และเก็บชิ้นงานมาประเมินค่าความคงทนของสีต่อแสง โดยรายงานผลเป็น "Satisfactory" และ "Unsatisfactory"

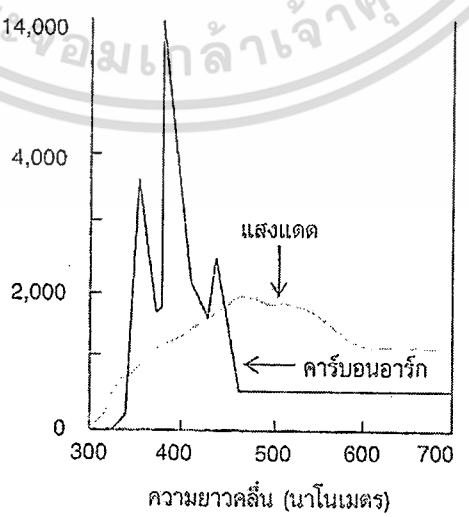
ฉ.2.2.1.5 การทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงวิธีที่ 5

วิธีการทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อแสงด้วยวิธีนี้จะนำชิ้นงานทดสอบเข้าไปทดสอบเพียงอย่างเดียวหรือจะทดสอบพร้อมกับผ้าขนสัตว์มาตรฐานก็ได้ โดยจะมีการตกลงกันระหว่างลูกค้ากับผู้ทดสอบในเรื่องของระดับพลังงานในการแผ่รังสีที่ใช้ในการทดสอบ และชิ้นงานจะถูกผึ่งแสงตามปริมาณของระดับพลังงานในการแผ่รังสีที่กำหนด จากนั้นนำชิ้นงานออกมาเพื่อประเมินระดับความคงทนของสีต่อแสง จากนั้นเก็บชิ้นงานมาประเมินความคงทนของสีต่อแสง โดยรายงานผลเป็นตัวเลข 1-8 และ ถ้าใช้ผ้าใยขนสัตว์มาตรฐานระดับความคงทนของสีต่อแสง L2 - L9 ให้รายงานผลเป็น L2 - L9 และถ้าใช้ Gray Scale ก็รายงานผลตามตัวเลขของเกรย์สเกล

ฉ.2.2.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (แสงคาร์บอนอาร์ก)

มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อ แสงคาร์บอนอาร์ก ได้แก่มาตรฐาน AATCC Test Method 16-2004 Option 1 และ Option 2 และมาตรฐาน JIS L 0842

แสงคาร์บอนอาร์กเป็นแสงประดิษฐ์หรือแสงแดดเทียมที่ได้จากหลอดไฟคาร์บอนอาร์ก จะเปล่งแสงออกมาทั้งการลุกโชติช่วงของอิเล็กโทรดและจากการเรืองแสงของไอระเหยของสารที่ใช้ผลิตอิเล็กโทรด แสงคาร์บอนอาร์กที่ได้จากการกระจายพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ แตกต่างจากแสงแดด ดังรูปที่ ฉ.8



รูปที่ ฉ.8 การเปรียบเทียบการกระจายพลังงานของแสงคาร์บอนอาร์กและแสงแดด [13]

จากการเปรียบเทียบกราฟในรูปที่ ฉ.3 และ ฉ.8 พบว่าสเปกตรัมของรังสีที่ปล่อยออกมาจากแสงซีนอนอาร์ก มีความใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติมากกว่าสเปกตรัมของแสงคาร์บอนอาร์ก ดังนั้นวิธีทดสอบความคงทนของสีต่อแสงที่ใช้แสงซีนอนอาร์ก จะให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ และใกล้เคียงธรรมชาติมากกว่าแสงคาร์บอนอาร์ก

ฉ.3 ความคงทนของสีต่อเหงื่อ

เหงื่อที่ถูกขับออกมาจากร่างกายของแต่ละคนจะมีภาวะความเป็นกรดและด่างต่างกัน เนื่องจากในร่างกายของแต่ละคนจะมีเหงื่อที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเหงื่อเป็นสารละลายที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ดังนั้นในการทดสอบหาค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อจึงต้องมีการเตรียมสารละลายเหงื่อเทียมที่ภาวะกรด (Acid artificial perspiration solution) และสารละลายเหงื่อเทียมที่ภาวะด่าง (Alkaline artificial perspiration solution) เนื่องจากภาวะทั้งสองนี้อาจจะทำปฏิกิริยากับสีย้อม และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีได้

การเตรียมเหงื่อเทียมที่ใช้ในการทดสอบ สามารถเตรียมได้ดังนี้

ฉ.3.1 การเตรียมเหงื่อเทียมที่ภาวะด่าง

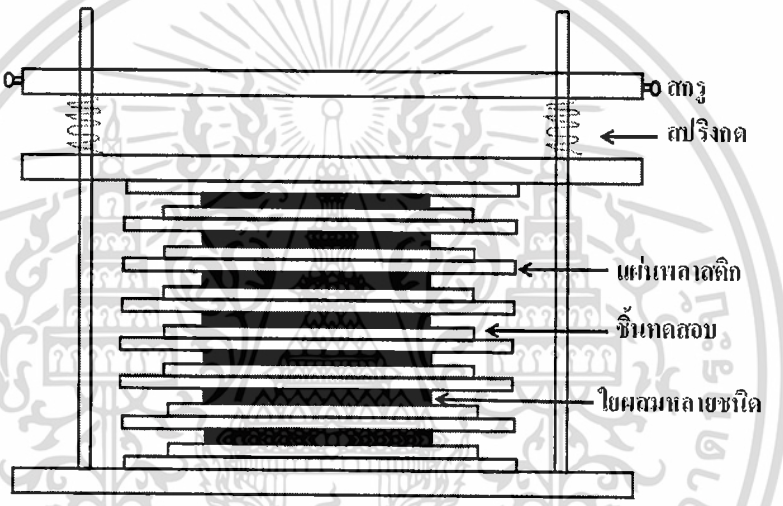
การเตรียมเหงื่อเทียมที่ภาวะด่างจะต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนที่จะนำไปใช้ทดสอบ โดยนำL-histidine monohydrochloride monohydrate($C_6H_9O_2N_3.HCl.H_2O$) Sodium chloride(NaCl) ในปริมาณอย่างละ 5 g และ Disodium hydrogen orthophosphate dodeca hydrat($Na_2HPO_4.12H_2O$) ปริมาณ 5 g หรือDisodium hydrogen orthophosphate dihydrat ($Na_2HPO_4.2H_2O$) ปริมาณ 2.5g จากนั้นละลายสารเคมีทั้งหมดใน volumetric flask ปริมาตร 1 l และปรับ pH ด้วย Sodium hydroxyl 0.1 mol/l ให้มี pH 8.0

ฉ.3.2 การเตรียมเหงื่อเทียมที่ภาวะกรด

การเตรียมเหงื่อเทียมที่ภาวะกรด จะต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนที่จะนำไปใช้ทดสอบ L-histidine monohydrochloride monohydrate ($C_6H_9O_2N_3.HCl.H_2O$) Sodium chloride (NaCl) ในปริมาณอย่างละ 5.0 g และ Sodium dihydrogen orthophosphate dihydrat ($NaH_2PO_4.2H_2O$) ปริมาณ 2.2 g จากนั้นละลายสารเคมีทั้งหมดใน volumetric flask ปริมาตร 1 l และปรับ pH ด้วย Sodium hydroxyl 0.1 mol/l ให้มี pH 5.5

การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อตามมาตรฐานนี้ ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อของเส้นใยสิ่งทอทุกชนิดและทุกลักษณะที่มีสี ซึ่งเส้นใยสิ่งทอที่นำมาทำการทดสอบสามารถเตรียมชิ้นงานทดสอบเหมือนกับการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง และเตรียมชิ้นงานทดสอบแยกออกเป็น 2 ชุด โดยชิ้นงานทดสอบชุดแรกจะนำไปทดสอบในสารละลายเหงื่อเทียมที่มีภาวะเป็นกรด และชิ้นงานทดสอบชุดที่สองนำไปทดสอบในสารละลายเหงื่อเทียมที่มีภาวะเป็นด่าง โดยมีขั้นตอนการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อเทียม

ดังนี้ นำชิ้นงานทดสอบมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอนและนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสารละลายเหงื่อเทียมที่ใช้ในการทดสอบโดยใช้สมการที่ ฉ.1 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในสารละลายเหงื่อเทียมที่เตรียมไว้ เป็นเวลา 30 นาที และกำจัดสารละลายส่วนเกินบนชิ้นงานทดสอบออกโดยการใช้แท่งแก้วบีบอัดชิ้นงานแล้วนำไปวางบนแผ่นอะคริลิกที่อยู่ในเครื่องทดสอบดังรูปที่ ฉ.9 และปรับให้มีแรงกด 12.5 KPa ซึ่งจะต้องแยกเครื่องทดสอบที่ใช้เป็น 2 ชุด (ห้ามใช้เครื่องทดสอบเครื่องเดียวกัน) จากนั้นนำเครื่องทดสอบไปวางในตู้อบที่อุณหภูมิ 37±2 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อถึงเวลาที่กำหนดในการทดสอบให้นำชิ้นงานทดสอบออกจากตู้อบและผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C โดยการแขวนไว้กับราวแขวน เมื่อชิ้นงานทดสอบแห้งแล้ว จึงนำชิ้นงานทดสอบไปประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของสี และค่าการติดเปื้อนของสีด้วย Grey scale



รูปที่ ฉ.9 เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

ภาคผนวก ช

ตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง

ข้อมูลผลการทดลองจากการศึกษาการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ช.1

ตารางที่ช.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

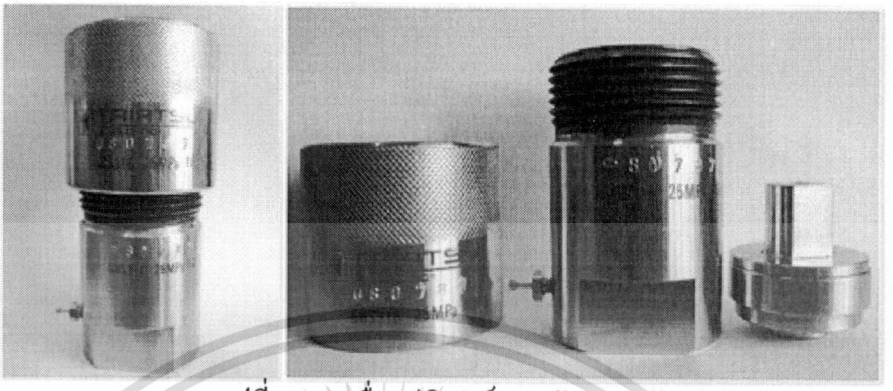
ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	เวลา (นาที)	น้ำหนักเส้นใยไหมหลังการย้อม (g)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 nm
1	50	15	30	0.0178	0.002
2	50	15	60	0.0182	0.004
3	50	15	90	0.0190	0.005
4	50	15	120	0.0177	0.007
5	50	15	150	0.0181	0.008
6	50	15	180	0.0203	0.010
7	50	15	210	0.0205	0.010
8	50	15	240	0.0193	0.010
9	60	15	30	0.0186	0.002
10	60	15	60	0.0198	0.005
11	60	15	90	0.0175	0.007
12	60	15	120	0.0178	0.008
13	60	15	150	0.0179	0.009
14	60	15	180	0.0187	0.011
15	60	15	210	0.0202	0.012
16	60	15	240	0.0201	0.012
17	70	15	30	0.0175	0.004
18	70	15	60	0.0179	0.007
19	70	15	90	0.0174	0.009
20	70	15	120	0.0171	0.010
21	70	15	150	0.0170	0.012
22	70	15	180	0.0186	0.014
23	70	15	210	0.0191	0.015
24	70	15	240	0.0189	0.015

ภาคผนวก ฌ

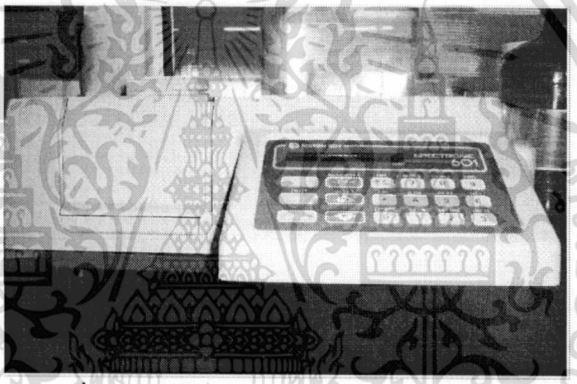
อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์

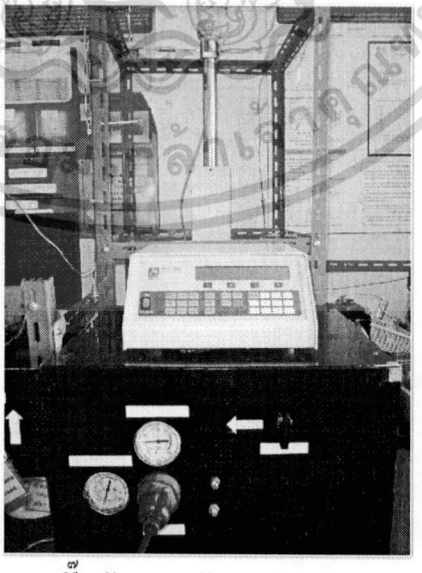
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2



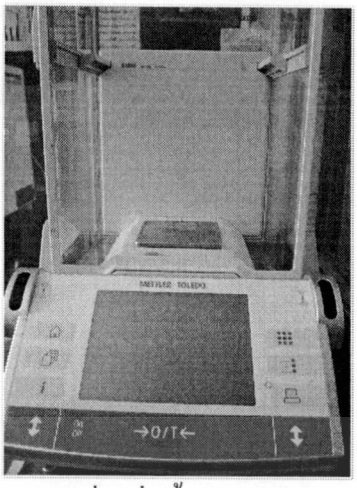
รูปที่ ฌ.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง



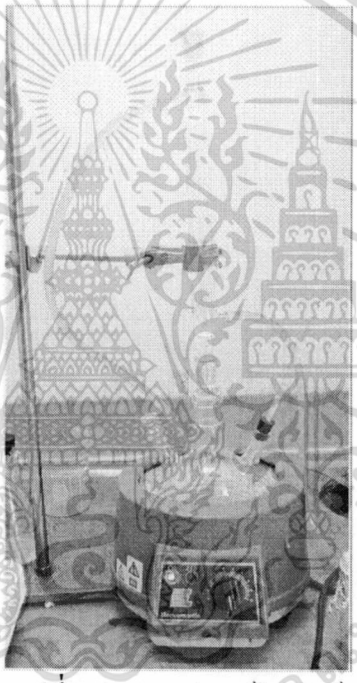
รูปที่ ฌ.2 เครื่อง UV/Vis Spectrophotometer



รูปที่ ฌ.3 ปั๊มอัดความดันสูง Isco Model 260 D



รูปที่ ฌ.4 เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ ฌ.5 ชุดอุปกรณ์รีฟลักซ์