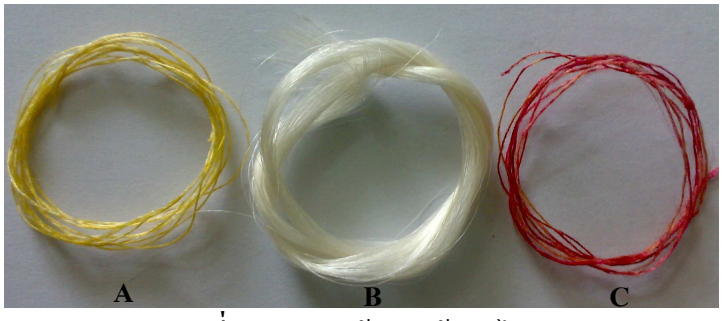
บทที่ 4
ผลและการวิเคราะห์การทดลอง

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

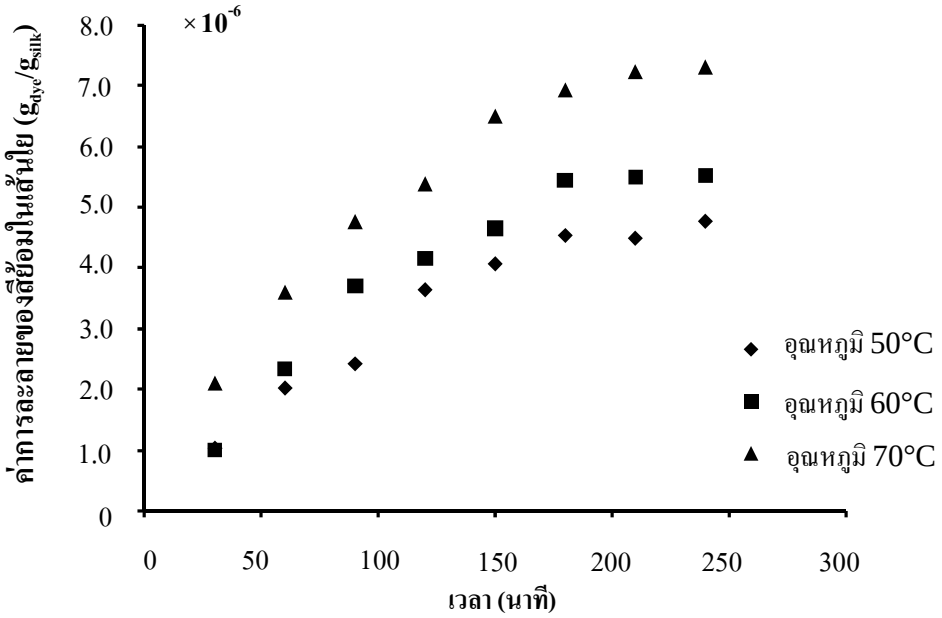


รูปที่ 4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยไหม

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 ºC จะมีค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมในช่วง 1.0-4.7 $\mu g_{Dye}/g_{Silk}$ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมเป็น 70 ºC 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 ºC 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

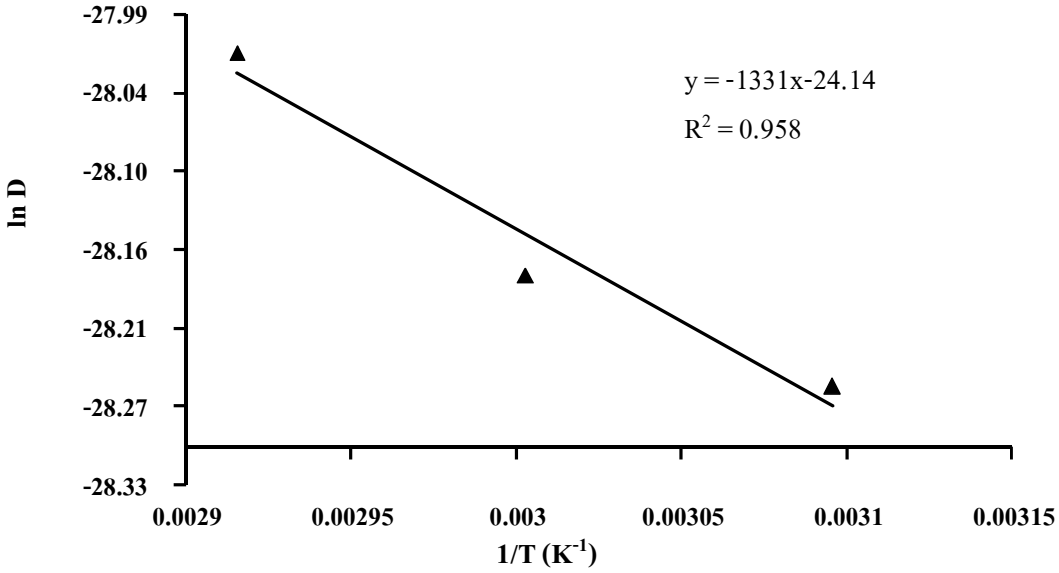
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม สามารถหาได้จากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ที่ความดันคงที่ที่ 15 MPa เวลาในช่วง 30 - 240 นาที โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่เวลาใดๆ กับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่สมดุลจากรูปที่ 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

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

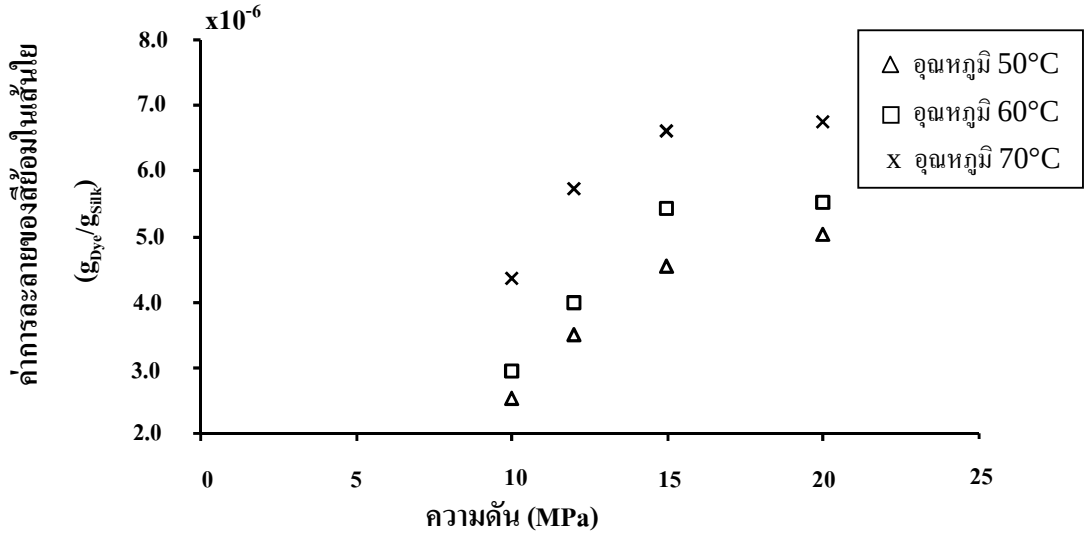
เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม (m^2/s)

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

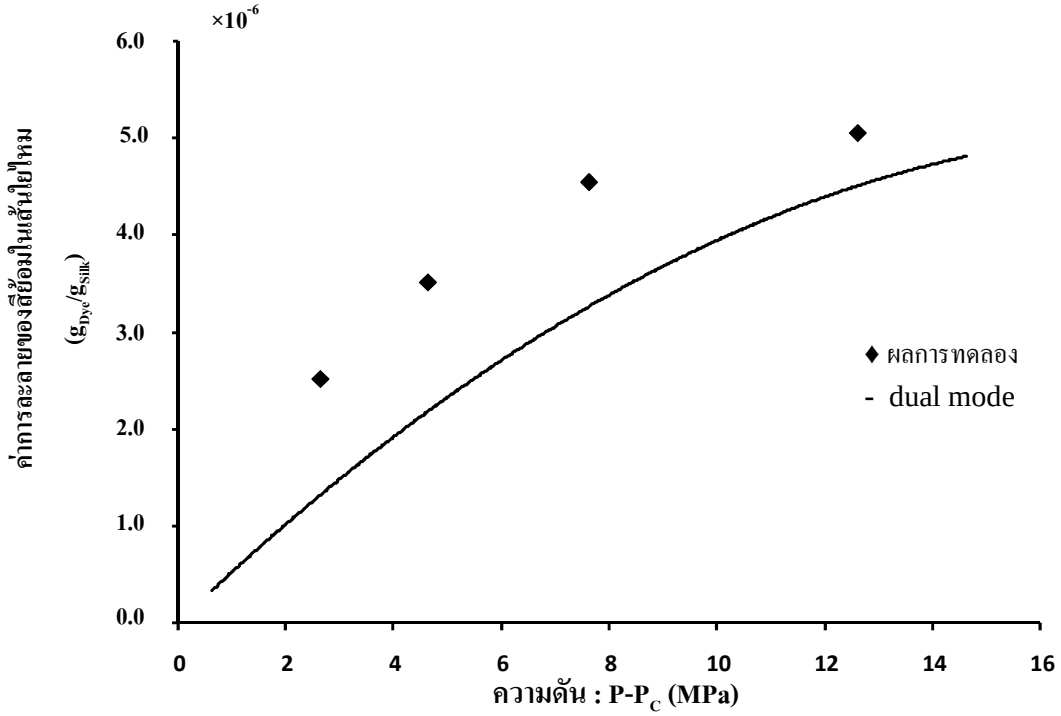
การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางจะอาศัยข้อมูลค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมจากการทดลองย้อมสีเส้นใยไหมด้วย SC-CO_2 ที่ภาวะความดัน 10 12 15 และ 20 MPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมและความดัน จากนั้นหาค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางในสมการที่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

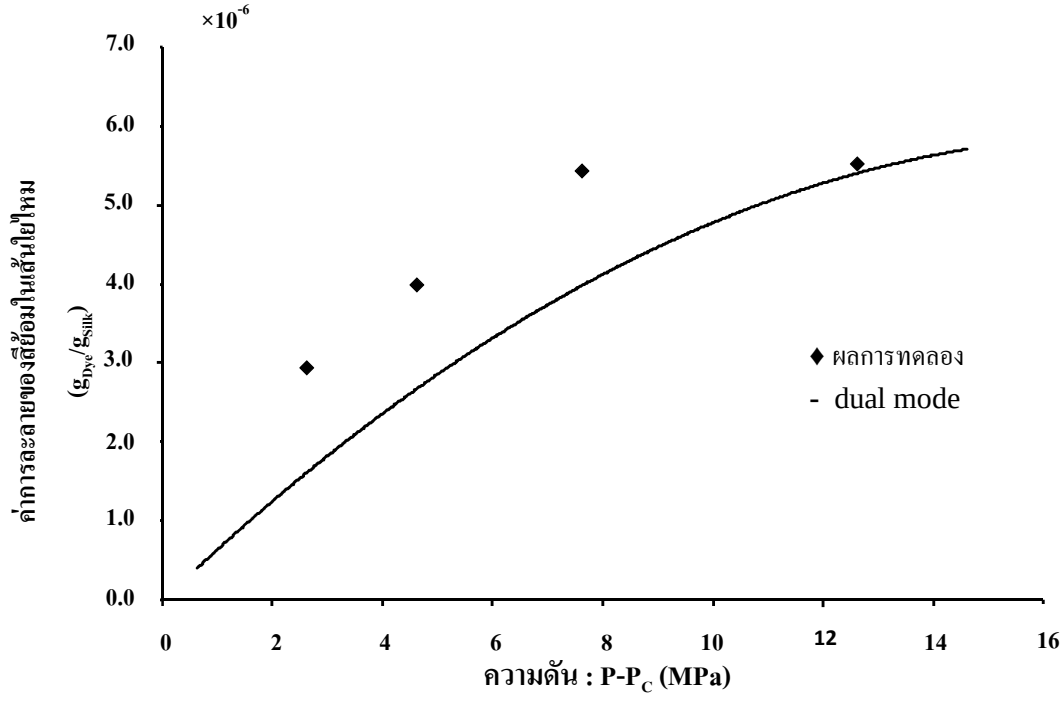
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่าคงที่	อุณหภูมิ (ºC)		
	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

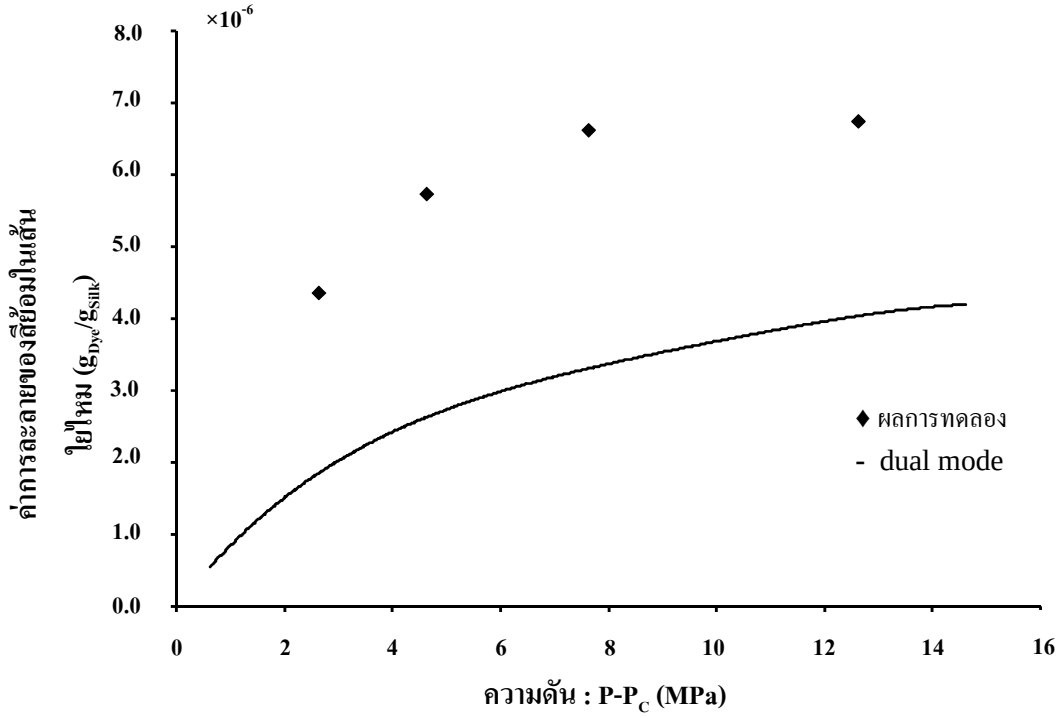
เมื่อได้ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทาง และนำไปคำนวณเพื่อหาค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมที่ได้จากการทดลอง (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) ดังนั้นค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมจากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.5 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิ 50 ºC



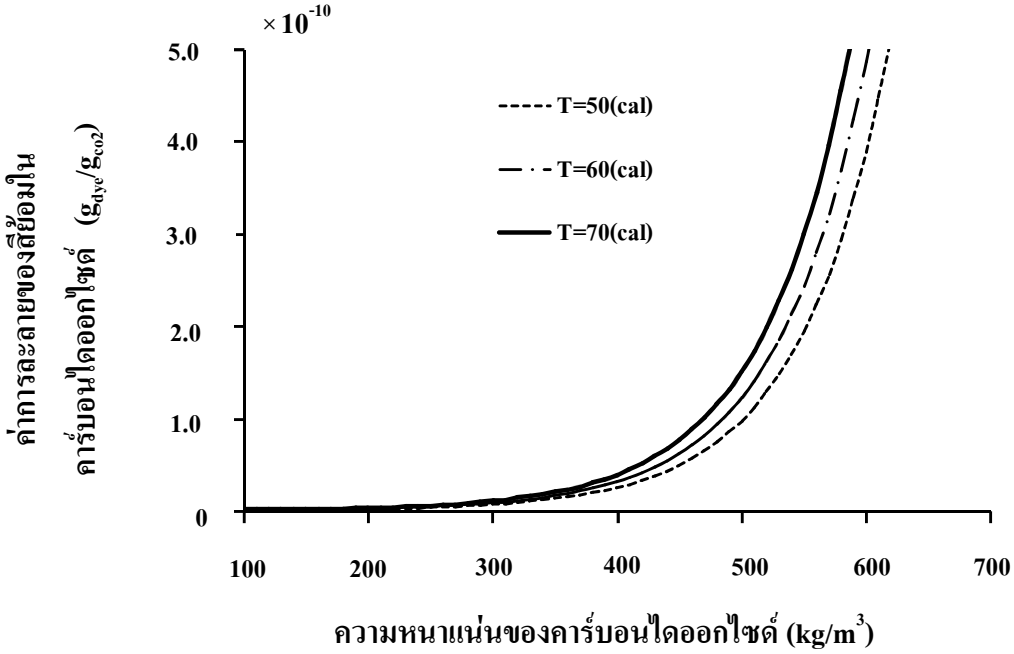
รูปที่ 4.6 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิ 60 ºC



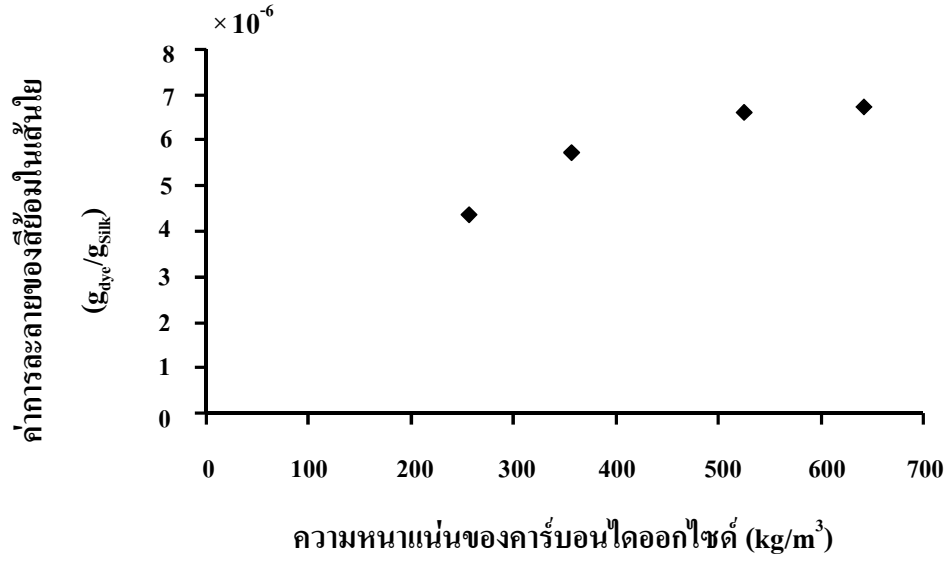
รูปที่ 4.7 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิ 70 ºC

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

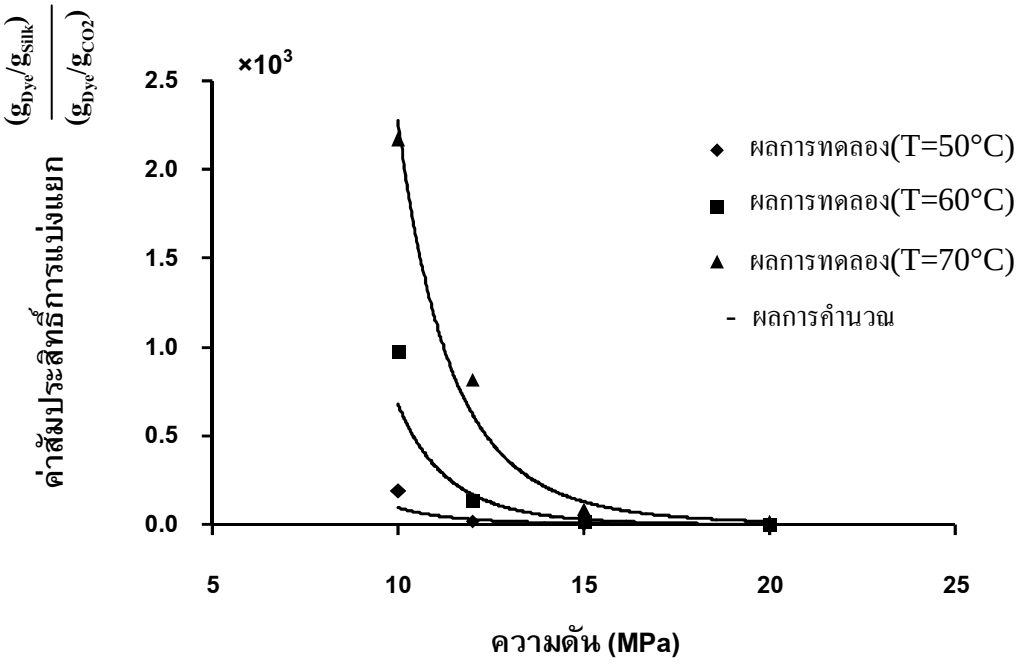
เนื่องจากในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมโดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในการย้อมแทนที่น้ำ จะมีกลไกเกิดขึ้นในกระบวนการย้อม สองกลไกคือ กลไกแรกเป็นการละลายของสีย้อมใน CO_2 และกลไกที่สองที่เกิดขึ้นคือ CO_2 พาเอาสีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนในเส้นใยไหม ดังนั้นการประเมินความสามารถในการย้อมสีเส้นใยจำเป็นต้องอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมาใช้ในการอธิบาย 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 (^oC)	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

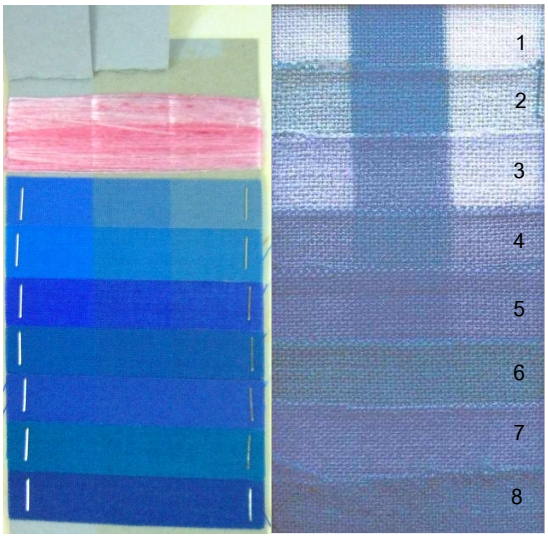
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

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