

การศึกษาการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

STUDY OF DYEING POLYESTER FIBERS USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-220-013

การศึกษาการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

STUDY OF DYEING POLYESTER FIBERS USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE



วัชรินทร์ แสงวัชรพันธุ์

WATCHAREEPORN SANGWATCHARAPUNT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 76702
วัน,เดือน,ปี..... - 6 S.A. 2550

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-220-013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF DYEING POLYESTER FIBERS USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE**



WATCHAREEPORN SANGWATCHARAPUNT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปี 2007 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก **KMITL-2007-EN-M-220-013** ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

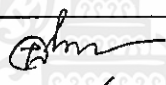





COPYRIGHT 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
Study of Dyeing Polyester Fibers Using Supercritical Carbon Dioxide
นักศึกษา นางสาววัชรพร แสงวัชรพันธุ์
รหัสประจำตัว 48060116
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิศรณ	
ดร.พรสวรรค์	กาญจนวณิชย์กุล	พรส 4116
ดร.สุชาติณี	เนรมิตตกพงศ์	
ดร.วุฒิพงษ์	รังสีสันติวานนท์	
ผศ.ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 กรกฎาคม 2550 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



วันที่ 25 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการข้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤต
นักศึกษา	นางสาววัชรินทร์ แสงวัชรพันธุ์
รหัสประจำตัว	48060116
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการข้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ด้วยสีข้อม C.I. Disperse Red 1 โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวกลางในกระบวนการข้อมแทนที่น้ำ ในลักษณะกระบวนการข้อมแบบกะ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทนความดันสูง สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 70 °C และความดันในช่วง 10 ถึง 20 MPa ตามลำดับ จากการทดลองสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีข้อมในเส้นใยที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ได้เท่ากับ 1.88×10^{-14} , 1.95×10^{-14} และ 2.42×10^{-14} m²/s ตามลำดับ และพบว่าที่เวลาประมาณ 180 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการข้อม โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการข้อมสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น ในลักษณะความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียส และสามารถประมาณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ ได้เท่ากับ 11.54 kJ/mole นอกจากนี้จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความดัน ที่มีต่อค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใย พบว่าค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกับความดัน โดยมีค่าการละลายอยู่ในช่วง 30 ถึง 75 ไมโครกรัมสีข้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ และสามารถนำเอาแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง (Dual Mode Sorption Model) มาประมาณค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยที่มีการปรับเปลี่ยนสภาวะในการข้อม ในช่วงความดัน 10 ถึง 20 MPa และอุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 70 °C ได้อย่างเหมาะสม และจากผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Dyeing Partition Coefficient) ทำให้ทราบความดันที่เหมาะสมในการข้อมมีค่าประมาณ 12 ถึง 15 MPa และผลการทดสอบความคงทนของตัวอย่างเส้นใยที่ผ่านการข้อมที่ความดัน 15 MPa อุณหภูมิ 50 °C เวลา 180 นาที พบว่ามีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับปานกลางถึงดี ความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับดีถึงดีมาก และความคงทนของสีต่อเหงื่อ

เอกสารนี้อยู่ในระดับดีถึงดีมาก ได้รับความใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study of Dyeing Polyester Fibers Using Supercritical Carbon Dioxide
Student	Miss Watchareeporn Sangwatcharapunt
Student ID.	48060116
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

ABSTRACT

This thesis proposes a study of dyeing polyester fibers by dyeing stuff called "C.I. Disperse Red 1", using supercritical carbon dioxide instead of water as a dyeing medium. The experiment is a batch dyeing process in a high pressure vessel which temperature and pressure were varied within the range of 50 - 70 °C and 10 - 20 MPa, respectively. From the experimental results, the suitable diffusion time at 180 minutes could be determined for a batch dyeing process. The diffusion coefficients for dyeing stuff diffuse into polyester fibers could be estimated which the values are $1.88 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ at 50 °C, $1.95 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ at 60 °C and $2.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ at 70 °C. As expected, the diffusion coefficient increased when temperature increased. The changes of diffusion coefficient as a function of temperature can be considered by Arrhenius's equation which the obtained activation energy (E_p) was 11.54 kJ/mole. The study of effects of temperature and pressure on the solubility of dyestuff in fibers revealed that increasing of temperature and pressure leads to the solubility increase within the range of 30 to 75 microgram of dyestuff per gram of polymer. In order to estimate the solubility of dyestuff as a function of temperature and pressure within the range of 50 - 70 °C and 10 - 20 MPa, respectively, the dual mode sorption model was used. The estimation of the solubility data of C.I. Disperse Red 1 into polyester fibers could be obtained appropriately. The suitable of pressure in dyeing process determined from the dyeing partition coefficient (K) were between 12 and 15 MPa. From the colour fastness testing results of dyed fiber samples at 15 MPa, 50 °C and soaking time at 180 minutes were found that fastness to light, washing and perspiration are medium to good, good to excellent and good to excellent, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ลำดับแรกผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ตลอดจนคำแนะนำเกี่ยวกับสีย้อมและเส้นใยชนิดต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และคำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ใดๆอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้

วัชรินทร์ แสงวัชรพันธุ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์การวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤต.....	3
2.2 การละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	6
2.3 การแพร่ของก๊าซในพอลิเมอร์.....	10
2.4 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง.....	12
2.5 คำศัพท์ประสิทธิภาพแบ่งแยก.....	14
2.6 ความรู้พื้นฐานเคมีเส้นใยสังทอ.....	15
2.7 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสีย้อม.....	21
2.8 ความสามารถในการย้อมติดของสี.....	23
2.9 ความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่อ.....	26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	40
3.2 วิธีการดำเนินงาน.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 การออกแบบอุปกรณ์สำหรับกระบวนการย้อมที่ความดันสูง.....	40
3.2.2 การย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	42
3.2.3 การการวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมในเส้นใยด้วยเทคนิคยูวี-วิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	43
3.2.4 การทดสอบคุณภาพเส้นใยหลังการย้อม.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	46
4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	46
4.1.1 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์.....	46
4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่.....	47
4.1.3 ผลของอุณหภูมิ และความดันที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์.....	51
4.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก.....	54
4.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง.....	54
4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกพร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก.....	59
4.3 ผลการทดสอบคุณภาพเส้นใยพอลิเมอร์หลังการย้อม.....	63
4.3.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง.....	63
4.3.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง.....	64
4.3.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.1.1 ผลการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 02-254-4000 หรือ 02-254-4001

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย.....	68
และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก	
5.1.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยหลังการย้อม.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก ก การคำนวณความเข้มข้นของสีย้อมเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน.....	73
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์.....	76
ภาคผนวก ค การคำนวณความหนาแน่นและค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์.....	80
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าคงที่และการประมาณค่าการละลายของสีย้อมใน เส้นใยพอลิเมอร์ด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง	89
ภาคผนวก จ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก.....	94
ภาคผนวก ฉ ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	97
ภาคผนวก ช เครื่องมือและอุปกรณ์.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ.....	4
2.2 สภาวะวิกฤตของสารชนิดต่างๆ.....	5
2.3 จุดเดือด (T_b, K), อุณหภูมิวิกฤต (T_{cr}, K), Lennard-Jone temperature ($\epsilon/k, K$).....	8
และ collision diameter (σ, nm) ของก๊าซชนิดต่างๆ	
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($D, 10^{-10} m^2/s$) และพลังงานก่อกัมมันต์ในการแพร่.....	10
($E_D/R, 10^3 K$)	
2.5 ค่าคงที่ α, β, δ และ γ	11
2.6 การแบ่งชนิดของเส้นใยธรรมชาติ.....	16
2.7 การแบ่งชนิดของเส้นใยประดิษฐ์.....	16
2.8 ตัวอย่างเส้นใยสังเคราะห์ และองค์ประกอบของหน่วยซ้ำในโมเลกุล.....	17
2.9 สีย้อมที่ใช้ย้อมผ้าขนสัตว์เพื่อใช้เป็น blue wool reference.....	32
4.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อม C.I. Disperse Red 1 ในเส้นใย.....	49
พอลิเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อม	
C.I. Disperse Red 324 ในพอลิเอสเตอร์ที่ได้จากงานวิจัยของ Fleming	
4.2 ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต และ.....	52
ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ	
4.3 ค่าคงในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางสำหรับการย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์.....	55
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ.....	60
4.5 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงตามมาตรฐาน.....	64
4.6 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง.....	64
4.7 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์.....	65
4.8 เปรียบเทียบคุณภาพเส้นใยหลังย้อมกับงานวิจัยอื่น.....	66
ก. 1 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่ความเข้มข้นต่าง.....	74
ข. 1 แสดงค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยกมาแล้ว.....	78
ก.1 อุณหภูมิลดรูป (T_r) ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่างๆ.....	82
ก.2 ความดันลดรูป (P_r) ที่ความดันที่ใช้ในการทดลองต่างๆ.....	82
ก.3 ค่า z^0 และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิลดรูป.....	83
คงที่เท่ากับ 1.05 และ ความดันลดรูปต่างๆ	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.4 ค่า z^0 และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิคงรูป.....	83
คงที่เท่ากับ 1.05 และ ความดันคงรูปที่ใช้ในการทดลอง	
ก. 5 ค่า z^0 และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิคงรูป.....	84
คงที่เท่ากับ 1.1 กับ 1.15 และความดันคงรูปที่ใช้ในการทดลอง	
ก. 6 แสดงค่าแฟกเตอร์สภาพก่อดัด (z) ที่ได้จากคำนวณ	84
ก. 7 ค่าปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	86
ก. 8 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	87
ที่ใช้ในการทดลอง	
ก.9 ค่าคงที่ α , β , δ และ γ	88
ก. 10 ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (y_2) ที่อุณหภูมิและความ.....	88
ดันต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง	
ง.1 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณด้วย.....	93
กลไกการดูดซึมแบบสองทาง	
จ.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก.....	96
ฉ.1 ค่าการบันทึกผลการทดลอง.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ แสดงบริเวณสถานะ และกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์	3
2.2 จำลองการแพร่ของก๊าซในเส้นใยที่มีรูปทรงกระบอก	6
2.3 ค่าการละลายของมีเทนในพอลิสไตรีนที่ได้จากการประมาณค่า โดยรูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง	13
2.4 กระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต	20
2.5 ปฏิกิริยาการเกิด Norrish type I และ Norrish type ของหมู่คาร์บอนิล ที่ดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต	27
2.6 สเปกตรัมของแสงแคด และสเปกตรัมของซีนอนอาร์ค	28
2.7 สเปกตรัมของแสงแคด และสเปกตรัมของคาร์บอนอาร์ค	29
2.8 ภาพตัดขวางของชิ้นส่วนต่างๆ ในอุปกรณ์เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อแสง ของ Xenon arc air – cooled test chamber	30
2.9 ขวดโหลแก้วที่ใช้ใส่ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบในมาตรฐาน JIS 0888-1 9888	33
3.1 แผนภาพกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต	40
3.2 แสดงแบบและภาคตัดขวางของเครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง	41
3.3 ป้อนอัดความดันสูง	41
3.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม C.I. Disperse Red 1	42
4.1 ผลของเวลาต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคาล และอุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส	47
4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคาล	48
4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	51
4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์	53
4.5 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 50 °C และ 180 นาที ตามลำดับ	56

เอกสารนี้ 4.6 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 60 °C และ 180 นาที ตามลำดับ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่าจะครั้งใด

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึม.....	57
แบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 70 °C และ 180 นาที ตามลำดับ	
4.8 ผลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของสีข้อม	58
ที่อุณหภูมิต่างๆ	
4.9 ผลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของ.....	59
สีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิกงที่ 60 องศาเซลเซียส	
4.10 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่เวลาคงที่ 180 นาที	62
ก. 1 กราฟมาตรฐานของสีข้อม C.I.Disperse Red 1.....	75
ง.1 ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึม.....	91
แบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 50 °C และ 180 นาที ตามลำดับ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่มนับว่าเป็นหนึ่งในปัจจัยสี่ ที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ดังนั้นอุตสาหกรรมสิ่งทอจึงได้มีการพัฒนาและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ยิ่งไปกว่านั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่สิ่งทอ จึงได้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมฟอกย้อมควบคู่กันไป และเป็นที่ทราบกันว่าอุตสาหกรรมฟอกย้อมหรืออุตสาหกรรมการย้อมสีสิ่งทอ จำเป็นต้องใช้น้ำในกระบวนการย้อมและกระบวนการล้างในปริมาณมาก และน้ำที่เหลือจากกระบวนการดังกล่าวยังถูกเจือปนด้วยสารเคมีต่างๆเช่น สีย้อม (dye stuff) สารลดแรงตึงผิว (surfactant) สารช่วยกระจายตัวสี (dispersing agent) ฯลฯ ซึ่งยากแก่การบำบัดไม่ว่าจะเป็นการบำบัดแบบปกติหรือการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ ทำให้เกิดมลภาวะทางน้ำ นอกจากนี้ยังต้องสูญเสียงบประมาณในการก่อสร้าง โรงบำบัดน้ำเสีย ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการใช้สารตัวกลางชนิดอื่น เช่น ของไหลเหนือวิกฤต มาทดแทนการใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอ โดยเริ่มแรกกระบวนการย้อมสีด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤต ได้ใช้กับพอลิเมอร์จำพวก พอลิเอสเทอร์ พอลิโพรพิลีน พอลิเอมาคด์ เป็นต้น โดยใช้สีย้อมต่างชนิดกัน ซึ่งกระบวนการย้อมจะทำให้สภาวะความดันและอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤตของสาร ซึ่งโดยจะทำให้สีย้อมละลายในของไหลเหนือวิกฤตได้ดี และสีย้อมยังสามารถแพร่เข้าไปละลายและย้อมติดในเส้นใยได้ดีอีกด้วย สารตัวกลางที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการย้อมด้วยของไหลเหนือวิกฤตคือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (supercritical carbon dioxide) เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ มีสภาวะวิกฤตที่ต่ำ ราคาถูก ไม่เป็นพิษ นอกจากนี้ โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีขนาดเล็ก จึงสามารถพาเอาโมเลกุลของสีละลายและแพร่เข้าไปย้อมติดในเส้นใยได้ดี และการย้อมสีแบบนี้ยังนับได้ว่าเป็นนวัตกรรมใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างสูงในขณะนี้ เนื่องจากเป็น

เทคโนโลยีที่สะอาด (green technology) ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งคาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูกและไม่เป็นพิษ นอกจากนี้หลังเสร็จสิ้นกระบวนการย้อมยังสามารถแยกเอาคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งสีย้อมกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม แม้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต จะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อมแทนที่น้ำอยู่หลายประการ แต่การที่จะนำเอามาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงค่อนข้างมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบเครื่องมือให้ทนสภาวะความดันสูง จำเป็นต้องใช้งบประมาณที่ค่อนข้างมาก และยังคงคำนึงถึงความปลอดภัยระหว่างใช้งานด้วย ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาถึงผลกระทบเหล่านี้ ควบคู่กับการพัฒนาการนำเอาของไหลเหนือวิกฤตมาใช้ประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษากลไกการเชื่อมสี่เส้นใย โดยใช้คาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวกลางในกระบวนการเชื่อมแทนที่น้ำ
- 1.2.2 ออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์ สำหรับใช้ในกระบวนการเชื่อมสี่เส้นใยพอลิเมอร์ ที่สภาวะความดันสูง
- 1.2.3 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการประมาณค่าการละลายของสี่เชื่อมที่สัมพันธ์กับสภาวะในการเชื่อม
- 1.2.4 ศึกษาผลของเวลาและอุณหภูมิ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสี่เชื่อมในเส้นใยพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษากลไกการเชื่อมสี่เส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้คาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวกลางในกระบวนการเชื่อม
- 1.3.2 ออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ในกระบวนการเชื่อมสี่เส้นใยพอลิเมอร์ ที่สภาวะความดันสูง
- 1.3.3 ศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลา ที่เหมาะสมต่อกระบวนการเชื่อมสี่
- 1.3.4 ทดสอบความทนทานของสี่ต่อกรด และด่างของเส้นใยหลังผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีการที่เป็นมาตรฐาน
- 1.3.5 ทำนายค่าการละลายของสี่เชื่อมในเส้นใย โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง
- 1.3.6 ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสี่เชื่อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎี และกลไกที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมสี่เส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต
- 1.4.2 สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำนายค่าการละลายของสี่เชื่อมในเส้นใยได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

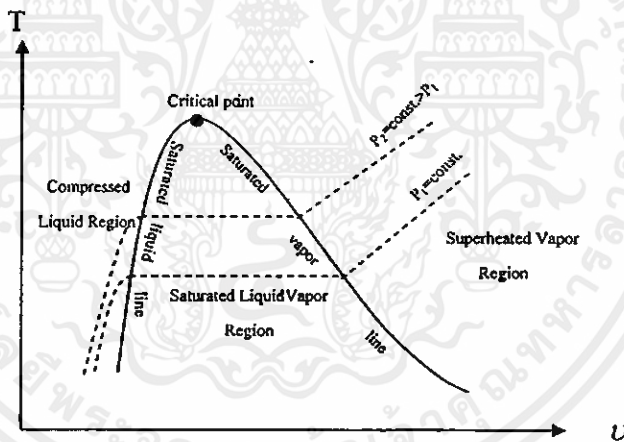
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤต [1]

ของไหลเหนือวิกฤต (supercritical fluid) เริ่มได้รับความสนใจตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 1800 เมื่อ Baron Cagniard De La Tour ค้นพบจุดวิกฤต (critical point) ของสารประกอบ โดยที่จุดวิกฤตนี้สารที่มีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวจะมีสมบัติเหมือนกัน สำหรับสารต่างชนิดกันจะมีสถานะที่จุดวิกฤตแตกต่างกันออกไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารที่ความดันเหนือจุดวิกฤต จะไม่พบการเปลี่ยนสถานะ โดยจะสังเกตเห็นได้แต่เพียงว่าปริมาตรจำเพาะของสารจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตลอดกระบวนการสารจะมีเพียงสถานะเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าสารนั้นมีสมบัติเป็นของเหลวหรือไอ และมักจะเรียกสารที่มีความดันสูงกว่าความดันที่จุดวิกฤตว่าเป็นของไหลเหนือวิกฤต



รูปที่ 2.1 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ แสดงบริเวณสถานะและกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์ [2]

จากรูปที่ 2.1 พบว่าเมื่อเชื่อมสถานะของของเหลวอิ่มตัวที่ระดับความดันต่างๆ เข้าด้วยกันจะได้เส้นที่เรียกว่าเส้นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid line) เช่นเดียวกันเมื่อทำการเชื่อมสถานะของไออิ่มตัวที่ระดับความดันต่างๆ เข้าด้วยกันจะได้เส้นที่เรียกว่าเส้นไออิ่มตัว (saturated vapor line) ซึ่งเส้นของสารอิ่มตัวทั้งสองจะมาบรรจบกันที่จุดวิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งด้านซ้ายของเส้นของเหลวอิ่มตัวเป็นบริเวณที่แสดงสถานะของสารที่มีสถานะเป็นของเหลวอัด (compressed liquid

region) ด้านขวาของเส้นไออิมตัวเป็นบริเวณของไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor region) ส่วนบริเวณที่อยู่ภายในโคมเป็นบริเวณของของเหลว-ไออิมตัว (saturated liquid-vapor mixture region)

สำหรับของไหลเหนือวิกฤตที่ได้รับความสนใจมากคือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เนื่องจากมีจุดวิกฤตที่ต่ำ คือความดันวิกฤต 72.9 บรรยากาศ (7.4 เมกะพาสกาล) และอุณหภูมิวิกฤต 31.1 องศาเซลเซียส [3]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ [4-5]

	ก๊าซ	ของไหลวิกฤต	ของเหลว
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	15 - 30	$T_c = 32$	15 - 30
ความดัน (MPa)	0.1	$P_c = 28.0$	0.1
ความหนาแน่น (g / cm^3)	0.0006 - 0.002	0.4 - 0.9	0.6 - 1.6
ความหนืด ($\mu \text{ Pa}\cdot\text{s}$)	10 - 30	30 - 90	200 - 3000
สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2 / sec)	0.1 - 0.4	0.2	$(0.2-2) \times 10^{-5}$

จากตารางที่ 2.1 พบว่าของไหลเหนือวิกฤต มีสมบัติบางประการอยู่ระหว่างสถานะของเหลวและสถานะก๊าซ เมื่อพิจารณาสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และความดัน 28 เมกะพาสกาล พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความหนาแน่นที่สูงใกล้เคียงกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะของเหลว ดังนั้นจึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความสามารถในการละลาย หรือการสกัดตัวทำละลายของเหลวทั่วไปสูง และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตยังมีความหนืดที่ต่ำใกล้เคียงกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะก๊าซ จึงทำให้มีความสามารถในการแพร่หรือการถ่ายเทมวลที่รวดเร็วในลักษณะของก๊าซทั่วไป

จากคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลเหนือวิกฤตที่กล่าวมา ทำให้มีการนำเอาของไหลเหนือวิกฤตมาประยุกต์ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและในงานวิจัยต่างๆ เช่น การสกัดเอาสารสำคัญออกจากพืชด้วยเทคนิคการสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤต (supercritical fluid extraction, SFE) ซึ่งสามารถสกัดเอาสารสำคัญออกมาได้ง่าย และมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากกว่าการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เนื่องจากไม่สามารถแยกเอาตัวทำละลายอินทรีย์ออกมาได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้มีตัวทำละลายอินทรีย์ตกค้างอยู่ นอกจากนี้ยังได้นำเอาของไหลเหนือวิกฤต มาใช้ในการวิเคราะห์สารด้วยวิธีการทางโครมาโทกราฟี (supercritical fluid chromatography, SFC)

นอกจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแล้วยังมีการนำสารอื่นมาทำเป็นของไหลเหนือวิกฤตอีก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

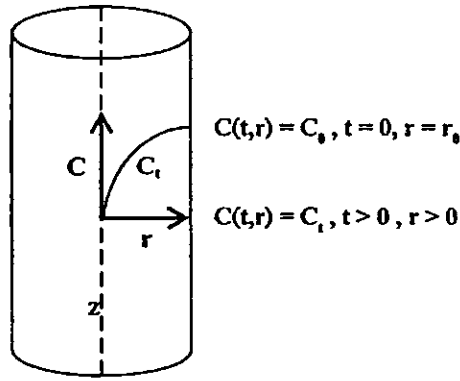
ตารางที่ 2.2 สภาวะวิกฤตของสารชนิดต่างๆ [4-5]

สาร	สูตรโมเลกุล	อุณหภูมิวิกฤต ($^{\circ}\text{C}$)	ความดันวิกฤต (MPa)
Ammonia	NH_3	132.5	11.28
Argon	Ar	-122	4.86
Bromine	Br_2	311	10.34
Carbon dioxide	CO_2	31.1	7.39
Chlorine	Cl_2	144	7.71
Deuterium	D_2	234.6	1.66
Helium	He	-267.7	0.23
Hydrogen	N_2	-239.7	1.30
Krypton	Kr	-33.6	5.50
Neon	Ne	-228.5	2.73
Nitrogen	N_2	-146.8	3.39
Nitrus Oxide	N_2O	36.7	7.27
Oxygen	O_2	-118.2	5.08
Sulfur Dioxide	SO_2	157.7	7.88
Water	H_2O	374.3	22.09
Xenon	Xe	16.8	5.88

2.2 การแพร่ของก๊าซในพอลิเมอร์ (Diffusivity of simple gas in polymer system) [6, 7]

ความเข้มข้นของก๊าซที่แพร่เข้าสู่เส้นใยพอลิเมอร์ที่มีรูปทรงกระบอกที่เวลาใดๆ สามารถจำลองการแพร่โดยใช้รูปแบบ cylindrical coordinate ซึ่งมี concentration profile ของการแพร่ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 จำลองการแพร่ของก๊าซในเส้นใยที่มีรูปทรงกระบอก

จากรูปที่ 2.2 สามารถอธิบาย concentration profile การแพร่ของก๊าซในเส้นใยได้ดังนี้คือ ที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) และรัศมีที่บริเวณผิวของเส้นใย ($r = r_0$) ความเข้มข้นของก๊าซที่แพร่เข้าสู่เส้นใยมีค่าเท่ากับความเข้มข้น C_0 และเมื่อถึงเวลาใดๆที่ $t > 0$ และก๊าซแพร่เข้าสู่เส้นใยที่รัศมี $r > 0$ ความเข้มข้นของก๊าซที่แพร่เข้าสู่เส้นใยที่เวลาใดๆจะมีค่าเท่ากับความเข้มข้น C_1 ซึ่งจากสมมุติฐานข้างต้นสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซที่แพร่ที่เวลาใดๆในพิกัด cylindrical coordinate ได้ดังสมการที่ (2.1) [6]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{D}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(rD \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] \quad (2.1)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของก๊าซ
 t คือ เวลา
 r คือ รัศมีของเส้นใย
 z คือ ความยาวของเส้นใย
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่

แต่เนื่องจากเส้นใยมีความยาวมาก ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานว่าไม่เกิดการแพร่ในแนวแกน z ดังนั้นจึงสามารถลดรูปสมการที่ (2.1) ได้ดังสมการที่ (2.2) [6]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.2) พบว่าสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซที่แพร่ที่เวลาใดๆ มาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซได้ ด้วยสมการที่ถูกลเสนอโดย Hill ดังแสดงในสมการที่ (2.3) [6]

$$M_t/M_\infty = 1 - A \exp(-aDt/r^2) - B \exp(-bDt/r^2) - C \exp(-cDt/r^2) \quad (2.3)$$

เมื่อ M_t คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ($g_{Dye}/g_{Polymer}$)

M_∞ คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่สมดุล ($g_{Dye}/g_{Polymer}$)

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

t คือ เวลา (วินาที)

r คือ รัศมีของเส้นใย

$$A = 2.41$$

$$a = 5.785$$

$$B = -6.0$$

$$b = 30.5$$

$$C = 0.0536$$

$$c = 74.9$$

ก๊าซที่มีความสามารถในการถูกกักอัด เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ มีเทน จะมีรูปแบบสมการซึ่งใช้ประยุกต์หาความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการแพร่และการละลายของก๊าซได้ ซึ่งเรียกว่าสมการ Lennard-Jone ดังแสดงในสมการที่ (2.4) [7]

$$\phi(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (2.4)$$

ϕ คือ แรงกระทำระหว่างโมเลกุล

r คือ รัศมี

ϵ คือ potential energy constant

σ คือ potential length constant

ค่าคงที่ ϵ และ σ เรียกว่า Lennard-Jone scaling factors และเมื่อนำค่าคงที่ของ Boltzman (k) มาหารค่า ϵ จะได้ตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า Lennard-Jone temperature หรือ $\frac{\epsilon}{k}$ มีหน่วยเป็นเคลวิน ซึ่ง

ค่าคงที่และสมบัติต่างๆของก๊าซแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 จุดเดือด (T_b, K), อุณหภูมิวิกฤต (T_{cr}, K), Lennard-Jone temperature ($\epsilon/k, K$) และ collision diameter (σ, nm) ของก๊าซชนิดต่างๆ [7]

ก๊าซ	จุดเดือด (K)	อุณหภูมิวิกฤต (K)	ϵ/k (K)	σ (nm)
He	4.2	5.2	10.22	25.51
Air	-	-	78.6	37.11
N ₂	77.4	126.2	71.4	37.98
O ₂	90.2	154.6	106.7	34.67
H ₂	20.4	33.2	59.7	28.27
CO ₂	194.7	304.2	195.2	39.41
CO	81.7	132.9	91.7	36.90
Ar	87.3	150.8	93.3	35.42
CCl ₄	349.7	556.4	322.7	59.47

โดยทั่วไปก๊าซมักจะมีแรงกระทำกับพอลิเมอร์ต่ำ ตามพฤติกรรมการแพร่ของ Fickian ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius-type equation) ดังแสดงในสมการที่ (2.5) [7]

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

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

E_D คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (KJ/mole)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ (KJ/mol.K)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากสมการที่ (2.5) จะพบว่ามีความสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ เช่น พลังงานก่อกัมมันต์ (E_D) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการแพร่ของก๊าซ เนื่องจากเป็นพลังงานที่จำเป็นสำหรับให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ (jump) ไปอยู่ในตำแหน่งใหม่ (hole) จึงเห็นได้ว่าถ้าเป็นการแพร่ของก๊าซที่มีโมเลกุลใหญ่ จำเป็นต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์ที่มากกว่าการแพร่ของก๊าซโมเลกุลเล็ก ซึ่งขนาดโมเลกุลของก๊าซ (x) หาได้จากค่า collision diameter (σ_x) เมื่อใช้

ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซมาตรฐานในการแพร่ (standard diffusing gas) ดังนั้นจากสมการที่ (2.5) จึงสามารถประมาณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้ดังสมการที่ (2.6) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ประมาณค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับยางหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะยาง และสมการที่ (2.7) สำหรับพอลิเมอร์อสัณฐานในลักษณะคล้ายแก้ว (glassy amorphous polymers) [7]

$$10^{-3} \frac{E_D}{R} = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}} \right)^2 \left[7.5 - (2.5 \times 10^{-4}) (298 - T_g)^2 \right] \pm 0.6 \quad (2.6)$$

$$10^{-3} \frac{E_D}{R} = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}} \right)^2 \left[7.5 - (2.5 \times 10^{-4}) (T_g - 298)^{3/2} \right] \pm 1.0 \quad (2.7)$$

ตัวแปรที่มีความสำคัญในสมการที่ (2.5) อีกหนึ่งตัวคือค่าคงที่ D_0 ซึ่งสามารถประมาณค่าคงที่ D_0 ที่สัมพันธ์กับค่าคงที่ E_D ได้ดังสมการที่ (2.8) สำหรับยางหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะยาง และสมการ (2.9) สำหรับพอลิเมอร์อสัณฐานในลักษณะคล้ายแก้ว [7]

$$\log D_0 = \frac{E_D \times 10^{-3}}{R} - 4.0 \pm 0.4 \quad (2.8)$$

$$\log D_0 = \frac{E_D \times 10^{-3}}{R} - 5.0 \pm 0.8 \quad (2.9)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซชนิดต่างๆ ในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสมการข้างต้น แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($D, 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) และพลังงานก่อกัมมันต์ในการแพร่ ($E_p/R, 10^3 \text{ K}$) [7]

Gas/Polymer	N_2		O_2		CO_2	
	D	E_p/R	D	E_p/R	D	E_p/R
Silicone rubber	15	1.35	25	1.10	15	1.35
HDPE	0.10	4.5	0.17	4.40	0.12	4.25
LDPE	0.35	4.95	0.46	4.80	0.37	4.60
PET	0.0014	5.25	0.0036	5.50	0.0015	5.95
PS	0.06	4.25	0.11	4.15	0.06	4.35
PVC	0.0038	7.45	0.012	6.55	0.0025	7.75
PVAc	0.03	6.15	0.056	7.30	-	-
PC	0.015	4.35	0.021	3.85	0.005	4.50
Poly(methyl methacrylate)	0.17	5.14	0.89	3.82	3.79	3.98
Teflon(FEP)	0.0948	4.63	0.184	4.17	0.105	4.40

2.3 การละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [3]

(Dye Solubility in Super Critical Carbon Dioxide)

กลไกแรกที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อมคือ การแพร่เข้าไปละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถหาค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้จากสมการอย่างง่ายที่ถูเสนอโดย Sung และ Shim [8] ดังแสดงในสมการที่ (2.10)

$$\ln y = \alpha + \frac{\beta}{T} + \left(\delta + \frac{\gamma}{T} \right) \ln p \quad (2.10)$$

y คือ ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ ($g_{\text{dye}}/g_{\text{CO}_2}$)

α , β , δ และ γ คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

p คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/m^3)

ค่าคงที่ α , β , δ และ γ สามารถหาได้จากผลการทดลอง ซึ่งค่าเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ α , β , δ และ γ [3]

ระบบ	ค่าคงที่สำหรับสมการ (2.10)				AAD%
	α	β (เคลวิน)	δ	γ (เคลวิน)	
CO ₂ +C.I.Disperse Red 1	21.650	-26262	-1.2076	2633.7	11.7
CO ₂ +C.I.Disperse Red 13	14.685	-23572	0.69467	2457.1	8.1

AAD% = Absolute Arithmetic mean Deviation

ส่วนความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าแฟกเตอร์สภาพกีดกัน (compressibility factor, z) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ประเมินความเบี่ยงเบนพฤติกรรม ของก๊าซอุดมคติที่สถานะใดๆ ดังสมการต่อไปนี้ [1]

$$z = z^0 + \omega z^1 \quad (2.11)$$

z คือ ค่าแฟกเตอร์สภาพกีดกัน

z^0 และ z^1 คือ correlation factor

ω คือ อะเซนตริกแฟกเตอร์

เมื่อก๊าซมีความดันต่ำและมีอุณหภูมิสูง อาจพิจารณาให้เป็นก๊าซอุดมคติได้ แต่ในทางปฏิบัติพบว่า เป็นการยากที่จะบอกว่าคุณสมบัติหรือความดันเท่าไรที่ถือว่าสูงหรือต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงสำหรับก๊าซชนิดหนึ่งอาจถือว่าต่ำสำหรับก๊าซอีกชนิดหนึ่ง ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการเปรียบเทียบ อุณหภูมิหรือความดันของก๊าซที่สถานะใดๆ กับค่าอุณหภูมิและความดันที่จุดวิกฤตของก๊าซชนิดนั้นๆ โดยการนิยามตัวแปรไร้มิติสำหรับการเปรียบเทียบดังกล่าวนี้จำนวนสองตัวแปร ได้แก่ ความดันลดรูปและอุณหภูมิลดรูป ซึ่งนิยามได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (2.12)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด P_r คือ ความดันลดรูป คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_c คือ ความดันวิกฤต

T_R คือ อุณหภูมิผลรูป

T_C คือ อุณหภูมิวิกฤต

จากนั้นนำค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัดที่หาได้ มาหาปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์ (v) ดังสมการต่อไปนี้

$$z = \frac{Pv}{RT} \quad (2.14)$$

P คือ ความดันในการทดลอง

v คือ ปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ โมล)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ (0.08206 ลูกบาศก์เดซิเมตร บรรยากาศ ต่อ โมล เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

แล้วจึงนำค่าปริมาตรจำเพาะ (v) ที่ได้มาหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (ρ) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.15)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

m คือ น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัมต่อ โมล)

ปกติก๊าซอุดมคติจะมีค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัดเท่ากับหนึ่ง แต่ถ้าเป็นก๊าซจริงจะมีค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัดมากกว่าหรือน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนั้นถ้าก๊าซที่สภาวะใดๆมีค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัดมากกว่าหรือน้อยกว่าหนึ่งมากๆแสดงว่าก๊าซที่สภาวะนั้น มีพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนจากพฤติกรรมของก๊าซอุดมคติมากเช่นกัน

2.4 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง [6]

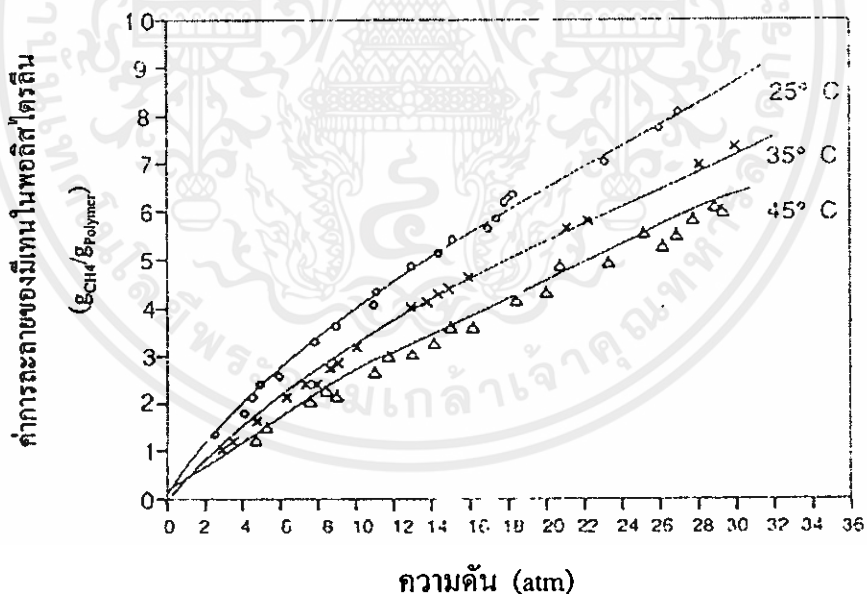
(Dual Mode Sorption Model)

กลไกที่สองที่เกิดระหว่างกระบวนการข้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือ

นอกจากนี้เป็นการแพร่เข้าไปละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถนำเอาแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง มาใช้เพื่อพิจารณาการดูดซึมที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมกับเส้นใยพอลิเมอร์ได้

คือ เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกแพร่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเข้าไปละลายและอยู่ในสมดุล

กับสีย้อม จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นก๊าซพา (carrier gas) นำเอาสีย้อมเข้าไปข้อมติคเส้นใยโดยการแพร่เข้าไปละลาย และอยู่ในสมดุลกับเส้นใยในที่สุด นั่นคือการข้อมสีได้เกิดขึ้นแล้ว โดยในระหว่างกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดการดูดซึมสองแบบคือ แบบแรกเป็นการดูดซึมตามปกติ ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงความดันของกระบวนการข้อมต่ำๆหรือที่ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่สูงมากนัก โดยในช่วงแรกนี้จะพบว่า การเพิ่มความดันจะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's Law) และการดูดซึมแบบที่สองจะเกิดขึ้นในช่วงความดันของกระบวนการข้อมที่สูง หรือที่ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามาก โดยจะพบว่าค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก แต่การละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์กลับมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Lagmuir เนื่องจากรูและช่องว่างภายในรูพรุนที่มีขนาดเล็กระดับไมโครพอร์ (Micropore) ในเส้นใยมีจำนวนจำกัดไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความดัน จึงทำให้สีย้อมแพร่เข้าไปข้อมติคในพื้นที่ผิวของรูพรุนได้ในปริมาณที่จำกัด ซึ่งตัวอย่างค่าการละลายที่ได้จากการประมาณค่าด้วยรูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าการละลายของมีเทนในพอลิสไตรีนที่อุณหภูมิในช่วง 25-45 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการรูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง



รูปที่ 2.3 ค่าการละลายของมีเทนในพอลิสไตรีนที่ได้จากการประมาณค่าโดยรูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ เมื่อนำค่าการละลายตามกฎของเฮนรี และค่าการดูดซึมตามกฎของ Lagmuir มารวมกันใช้ จะได้เป็นค่าการละลายทั้งหมดของสีย้อมในพอลิเมอร์ ดังสมการที่ (2.16)

$$C = C_D + C_H = k_D P + \frac{C'_H b P}{1 + b P} \quad (2.16)$$

- เมื่อ C คือ ค่าการละลายของสีข้อมในพอลิเมอร์ ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)
 k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี ($g_{Dye} / g_{Polymer})(MPa^{-1})$
 b คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างร่วม (Hole affinity constant) (MPa^{-1})
 P คือ ความดัน (MPa)
 C'_H คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างอิ่มตัว (Hole saturated constant) ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)
 C_D คือ ค่าการละลายแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้ ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)
 C_H คือ ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดระดับไมครอน ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)

จากสมการข้างต้นสามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 ถ้าที่ความดันต่ำมากๆ ($bP \ll 1$) จะสามารถลดรูปสมการที่ (2.16) ได้ดังนี้ [6]

$$C = [k_D + C'_H b] P \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) จะพบว่าค่าการละลายของสีข้อมในเส้นในพอลิเมอร์ จะมีค่าแปรผันตรงกับ ความดัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี

และเมื่อความดันที่สูงมากๆ ($bP \gg 1$) ช่องว่างภายในพอลิเมอร์ จะถึงค่าจำกัดที่จุดอิ่มตัว ดังนั้นจึงสามารถลดรูปสมการที่ (2.16) ได้ดังนี้ [6]

$$C = k_D P + C'_H \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.18) พบว่าค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ มีค่าแปรผันตรงกับทั้ง ความดันและค่าคงที่ของรูช่องว่างอิ่มตัวในพอลิเมอร์

2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก [9]

(Dye Partition Coefficient, K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก เป็นอัตราส่วนหรือจำนวนเท่าของมวลสีข้อมที่สามารถละลายใน พอลิเมอร์ต่อมวลสีข้อมที่ละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากกลไกการดูดซึมที่เกิดขึ้นใน

กระบวนการย้อมสีพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีสองกลไกคือ กลไกแรกเมื่อทำการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใน สีย้อมจะเกิดการละลายในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อน และกลไกที่สองคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นตัวกลางในการพาเอาสีย้อมเข้าไปย้อมหรือแพร่เข้าไปละลายในเส้นใยพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงสามารถนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก มาใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของพอลิเมอร์หรือประสิทธิภาพของสีย้อม ทำให้สามารถเลือกชนิดของสีย้อม และชนิดของพอลิเมอร์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$K = \frac{w_i^p}{w_i^f} \quad (2.19)$$

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

w_i^p คือ ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ ($G_{Dye}/G_{Polymer}$)

w_i^f คือ ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (G_{Dye}/G_{CO_2})

ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต หรือ w_i^f หาได้จากสมการอย่างง่าย (empirical equation) ของ Sung และ Shim [8] ซึ่งได้กล่าวในข้างต้นแล้ว ส่วนค่า w_i^p ได้จากค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จากประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง

2.6 ความรู้พื้นฐานเคมีเส้นใยสังทอ [10]

เส้นใยนับเป็นวัตถุดิบพื้นฐานสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมายเช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม เครื่องเรือน เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น แต่มีเส้นใยจำนวนหนึ่งที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานด้านผลิตภัณฑ์สังทอ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติที่ครอบคลุมตั้งแต่สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ตลอดจนสมบัติทางเคมี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการกำหนด โครงสร้างภายในของเส้นใยหรือกำหนดองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยแต่ละชนิด โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของเส้นใยที่ใช้ในอุตสาหกรรมสังทอได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ 2.7 ได้แก่กลุ่มของเส้นใยธรรมชาติและกลุ่มของเส้นใยประดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 การแบ่งชนิดของเส้นใยธรรมชาติ [10]

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

ตารางที่ 2.7 การแบ่งชนิดของเส้นใยประดิษฐ์ [10]

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

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเส้นใยประดิษฐ์ชนิดพอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส

2.6.1 เส้นใยประดิษฐ์ชนิดพอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส

เส้นใยชนิดนี้เป็นเส้นใยประดิษฐ์ ที่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบที่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งได้จากผลผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีทั้งหมด ดังนั้นจึงเรียกเส้นใยชนิดนี้ว่าเส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fibers) เส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมและใช้งานอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้แก่ พอลิเอสเทอร์ ไนลอน อะคริลิก เป็นต้น ตัวอย่างของเส้นใยเหล่านี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 โดยระบุชนิดของเส้นใย พร้อมทั้งองค์ประกอบทางเคมีหลักซึ่งเป็นหน่วยซ้ำใน โมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างเส้นใยสังเคราะห์ และองค์ประกอบของหน่วยซ้ำใน โมเลกุล [10]

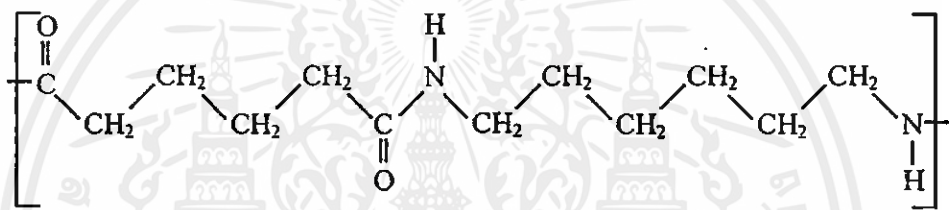
ชนิดของเส้นใย	สูตรทางเคมีของหน่วยซ้ำพื้นฐาน
Polyamide : nylon 6,6 nylon 6	$-NH \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot NH \cdot$ $CO \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CO-$ $-NH \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CO-$
Polyester : Poly (ethylene terephthalate)	$-O \cdot CO \cdot \text{C}_6\text{H}_4 \cdot CO \cdot O \cdot CH_2 \cdot CH_2-$
Acrylic: Polyacrylonitrile	$-CH_2 \cdot \underset{\text{C} \equiv \text{N}}{\text{CH}}-$
Polyolefin : Polyethylene Polypropylene	$-CH_2-CH_2-$ $-CH_2 \cdot \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$
Other addition-polymer fibers : Poly (vinyl chloride) Poly (vinyl alcohol) other vinyl monomers vinylidene monomers	$-CH_2 \cdot \text{CHCl}-$ $-CH_2 \cdot \underset{\text{OH}}{\text{CH}}-$ $-CH_2 \cdot \underset{\text{R}}{\text{CH}}-$ $-CH_2 \cdot \text{CR}_2-$

จากตารางที่ 2.8 พบว่าเส้นใยเหล่านี้มีหมู่ซ้ำที่คล้ายกัน ซึ่งได้มาจากการสังเคราะห์ทางเคมีทั้งสิ้น ดังนั้นจึงมีสมบัติที่มีความคล้ายคลึงกันหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติในด้านความสามารถในการดูดซึมความชื้นต่ำ ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากองค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยที่เป็นพวกไม่ชอบน้ำ ซึ่งต่างจากเส้นใยธรรมชาติในกลุ่มของเส้นใยเซลลูโลส ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ภายในโครงสร้างที่สมบัติที่ไม่ชอบน้ำ หรือความสามารถในการดูดซึมความชื้นต่ำของเส้นใยสังเคราะห์เหล่านี้ ได้ส่งผลกระทบต่อสมบัติอื่นๆตามมา ไม่ว่าจะเป็นเรื่องปัญหาการเกิด

ไฟฟ้าสถิตย์ ปัญหาของความสะดวกใช้งานหรือสวมใส่ ตลอดจนปัญหาการย้อมติดของสีที่ยาก ปัจจุบันปัญหาการย้อมติดสีของเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยพอลิเอสเตอร์สามารถแก้ปัญหาได้โดยมีการพัฒนาสีย้อมชนิดดิสเพิร์ส ซึ่งเป็นสีย้อมสำหรับใช้ในการย้อมเส้นใยที่มีความสามารถในการรับสีย้อมได้ดี ตัวอย่างเส้นใยประดิษฐ์ชนิดพอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลสได้แก่ ไนลอน พอลิเอสเตอร์ และ อะคริลิก เป็นต้น

2.6.1.1 ไนลอน (Nylon)

ไนลอนเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมีระหว่าง hexamethylene diamine และ adipic acid ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชื่อด้วยการกำกับตัวเลขที่บ่งบอกจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ได้ในแต่ละหน่วยซ้ำซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอน 6 ตัว จาก hexamethylene diamine และคาร์บอนอีก 6 ตัว จาก adipic acid เรียกชื่อเป็น ไนลอน 6,6 มีโครงสร้างเคมีดังนี้



(Nylon 6, 6)

จากโครงสร้างของไนลอน ที่เป็นโมเลกุลที่ค่อนข้างยาว และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ไนลอน มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการขีดสี มีการยืดตัวดี มีความสวยงาม ใช้งานได้หลากหลาย แต่ในขณะเดียวกันก็มีข้อด้อยคือ มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำเช่นเดียวกับเส้นใยสังเคราะห์ชนิดอื่น ทำให้ย้อมติดสีได้ยาก นอกจากนั้นยังเกิดปัญหาด้านการสะสมประจุไฟฟ้า ทำให้ขาดความสบายในการสวมใส่ อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาพัฒนากันอย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จนในปัจจุบันมีการสังเคราะห์ไนลอนชนิดต่าง ๆ มากมาย เช่น ไนลอน 6 และ ไนลอน 12

2.6.1.2 พอลิเอสเตอร์ (Polyester)

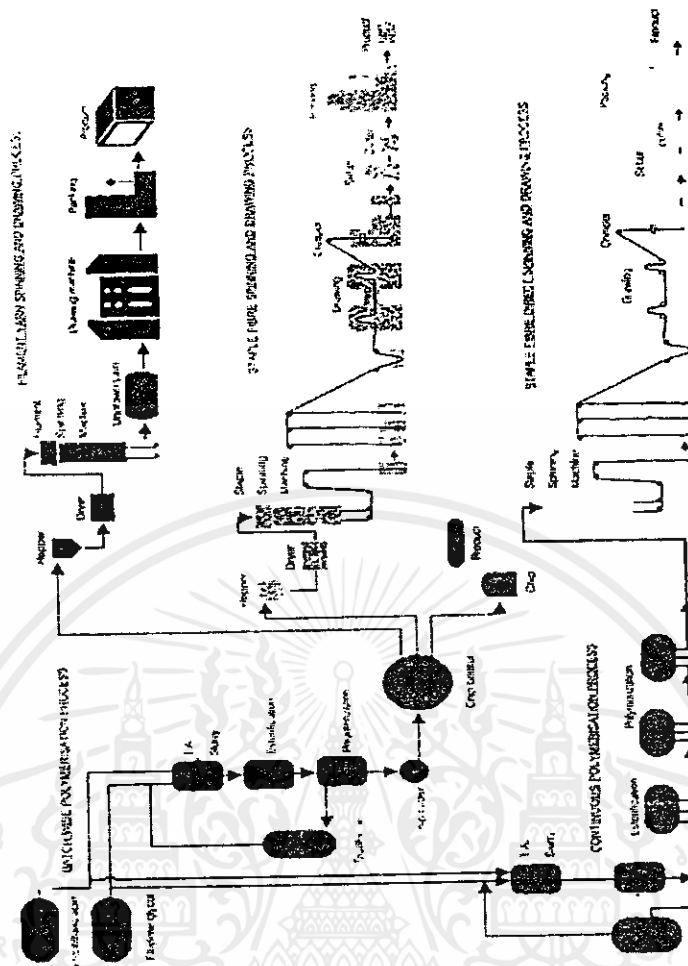
เส้นใยพอลิเอสเตอร์ หรือ Dacron เป็นเส้นใยที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากความสามารถในการผสมเข้ากับเส้นใยชนิดอื่นได้แทบทุกชนิด โดยไม่ทำให้สมบัติที่ดีของเส้นใยที่ผสมนั้นเปลี่ยนไป จึงทำให้มีการสังเคราะห์และพัฒนาการผลิตเส้นใยชนิดนี้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของพอลิเอสเตอร์ได้เป็นสองประเภทตามโครงสร้างทางเคมีคือ ประเภทที่เป็นพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) และประเภทที่เป็น 1,4-ไซโคลเฮกซิลีนไดเมทิลีน [Poly(1,4-cyclohexylene dimethylene terephthalate), PCDT] แต่ส่วนมากที่ผลิตจะเป็นชนิดพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตในประเทศไทย

อุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ภายในประเทศ นับว่าเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ใช้เงินลงทุนที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงเป็นกิจการการลงทุนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 10 แห่ง เป็นการผลิตเส้นใยสั้นมากที่สุด รองลงมาเป็นเส้นด้ายพอลิเอสเตอร์ชนิด POY และเส้นด้ายใยยาว

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ บางชนิดสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ แต่บางชนิดยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น กรดเทรฟทาสิกบิสูทธิ เป็นต้น สารเคมีหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์คือ EG และ TPA มีตัวเลขการนำเข้า EG เมื่อปี พ.ศ. 2541 คือประมาณ 2307.7 ล้านลิตร มูลค่า 4,887.1 ล้านบาท ในขณะที่ TPA มีการนำเข้าประมาณ 356,777 ตัน มูลค่า 7,056.6 ล้านบาท แต่จากการปรับค่าเงินบาทลอยตัวเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม 2540 ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัดส่วนของวัตถุดิบที่ต้องนำเข้าและสั่งซื้อด้วยเงินดอลลาร์ มีการประมาณการว่าผลที่ตามมาทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นมากถึง 10 %

กระบวนการผลิตพอลิเอสเตอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต เริ่มต้นจากสารเคมีที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม คือ นำเอาเอทิลีนมาทำการออกซิไดส์ให้เป็นไกลคอลในลักษณะไดไฮดริกแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับกรดเทรฟทาสิกบิสูทธิในหม้อปฏิกรณ์แบบทนความดันสูงภายใต้สภาวะสุญญากาศ พร้อมทั้งเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป กระบวนการเกิดพอลิเมอร์เกิดขึ้นจากสารเคมีหลักทั้งสองตัวดังกล่าว โดยพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสีใส จากนั้นจึงขึ้นรูปทำเป็นเส้น แล้วจึงตัดเป็นเม็ด พร้อมทั้งทำการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้น เม็ดพอลิเอสเตอร์ที่ได้จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นเส้นใยพอลิเอสเตอร์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทอร์เฟทาเลต [11]

รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว ซึ่งคล้ายกับหลักการของการผลิตเส้นใยไนลอน แต่ต่างกันที่กระบวนการดึงยืด เนื่องจากพอลิเอสเตอร์มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูงกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้เส้นใยมีลักษณะแข็ง ดังนั้นจึงต้องทำการดึงยืดแบบร้อน (hot drawing) นอกจากนี้ ยังมีการยืดดึงและการแต่งผิวเข้าด้วยกันเช่นเดียวกับการผลิตไนลอน

เส้นใยพอลิเอสเตอร์มีสมบัติที่ดีทั้งขณะเปียกและแห้ง เมื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์แล้วสามารถดูแลรักษาได้ง่าย ไม่ยับ ไม่หด ราคาถูก สามารถใช้ผสมได้ดีทั้งกับเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์ชนิดอื่น ที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง เช่น ผ้า T/C ผสมระหว่างพอลิเอสเตอร์และฝ้ายในอัตราส่วน 65 ต่อ 35 หรือ ผ้า T/R ผสมระหว่างพอลิเอสเตอร์กับเรยอน เป็นต้น ซึ่งผ้าทั้งสองชนิดสามารถนำไปผลิตเป็นทั้งผ้าถัก หรือผ้าทอ เป็นผ้าปูที่นอน ผ้าปูเฟอร์นิเจอร์ เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม เนคไท ตลอดจนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอน โปรดใช้เอกสารนี้เพื่อประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนถึงพรม นอกจากนั้นยังสามารถนำพอลิเอสเทอร์มาใช้งานด้านอุตสาหกรรม เช่น สายพาน เชือก ไปจนถึงผ้าใบยางรถยนต์

2.6.1.3 อะคริลิก (Acrylic)

เส้นใยอะคริลิกมีความเป็นมาคล้ายกับเส้นใยที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ คือ เกิดจากการวิจัยและพัฒนาของทีมงาน Dr. Carothers ในบริษัท ดูปองท์ สหรัฐอเมริกา และประสบความสำเร็จสามารถผลิตออกสู่ตลาดเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2493 โดยให้ชื่อทางการค้าว่า Orion จากนั้นจึงมีบริษัทอื่นๆ พัฒนาตามกันมา เกิดเป็นชื่อทางการค้าต่างๆ เช่น Acrilan, Creslan และ Zefran เป็นต้น โรงงานผลิตเส้นใยอะคริลิกในประเทศไทยมีเพียงบริษัทเดียว คือ บริษัทไทยอะคริลิกไฟเบอร์ จำกัด ตั้งอยู่ที่จังหวัดสระบุรี วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเส้นใยอะคริลิกคือ อะคริโลไนไตรด์ (acrylonitrile) สังเคราะห์ได้จากการนำก๊าซธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย ได้กรดไฮโดรไซยานิก (hydrocyanic acid หรือ HCN) เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับแอซิติลีนจะได้เป็นอะคริโลไนไตรด์ ขั้นตอนการผลิตต่อมาคือการเกิดพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรด์ เพื่อให้ได้พอลิอะคริโลไนไตรด์ เป็นโคป หรือวัตถุดิบเข้าสู่การผลิตให้เป็นเส้นใย ซึ่งอาจใช้กระบวนการผลิตแบบเปียกหรือแบบแห้ง ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของแต่ละบริษัท

2.7 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสีย้อม [12]

สีย้อมเป็นสารสังเคราะห์ หรือ สารที่สกัดได้จากธรรมชาติ เพื่อนำมาตกแต่งเพิ่มความสวยงามให้กับเสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่ม ซึ่งสีที่ใช้ในระยะเริ่มแรกได้มาจากการสกัดจากธรรมชาติ โดยมีการใช้สารย้อม (Mordant) เพื่อช่วยทำให้สีติดคงทน สีที่ได้จากการสกัดจากธรรมชาติ ได้แก่ สีนํ้าเงินที่สกัดจากใบของพืช Indigofera หรือ สีนินดิโก (Indigo) แต่เนื่องจากการสกัดสีจากธรรมชาติมีความยุ่งยากซับซ้อน และเมล็ดที่ได้มีค่อนข้างจำกัด ทำให้ความนิยมในการใช้งานสีชนิดนี้ลดลง จึงได้มีการผลิตสีจากการสังเคราะห์ทางเคมีขึ้นมาเพื่อรองรับความต้องการในการอุปโภคการผลิตสี ย้อมจากการสังเคราะห์ทางเคมีเพื่อเชิงพาณิชย์เริ่มต้นเมื่อปี ค.ศ. 1856 โดยชาวอังกฤษวัย 18 ปี ชื่อ William Henry Perkin สีที่ผลิตขึ้นเป็นชนิดแรกชื่อ Mauveine สังเคราะห์โดยการนำเอาสารอะนิลีน (aniline) มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นตะกอนสีดำ ซึ่งต่อมาเรียกว่า Aniline Black จากนั้นสกัดตะกอนสีดำด้วยแอลกอฮอล์จะได้เป็นสีม่วงสด (mauve) และตั้งชื่อว่า Aniline Purple หรือ Tyrian Purple ต่อมาได้มีผู้ทำการวิจัยเรื่องสีสังเคราะห์อย่างกว้างขวาง และได้มีการผลิตสีเบสิกเป็นสีต่อมา ซึ่งการจำแนกประเภทของสีย้อมทำได้ดังนี้

1. การจำแนกตามกรรมวิธีการย้อม เช่น สีไคเร็กซ์ สีแวต สีแอสิค สีเบสิก สีดีสเพิร์ส เป็นต้น
2. การจำแนกตามแหล่งที่มาของสี เช่น สีธรรมชาติ สีสังเคราะห์ เป็นต้น
3. การจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี เช่น เอโซ (azo) สติลบิน (stilbene) แอนทราควิโนน (anthraquinone) อินดิโกยด์ (indigoid) เป็นต้น

4. การจำแนกตามวัสดุเส้นใย เช่น สีย้อมขนสัตว์ สีย้อมเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น

หากแบ่งกลุ่มสีย้อมตามความสามารถในการละลายสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ สีย้อมที่ละลายในน้ำได้ และ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ

2.7.1 สีย้อมที่ละลายน้ำได้

สีย้อมที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะมีหมู่เกลืออยู่ภายในโครงสร้างอย่างน้อย 1 หมู่ เกลือที่พบมากที่สุดได้แก่ เกลือของกรดซัลโฟนิก (sulphonic acid) นอกจากนั้นยังมีกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) เข้าไปในสารตัวกลางเพื่อให้เกิดเป็นเกลือ ซึ่งเมื่อสีย้อมละลายน้ำจะได้อยู่ในรูปของเกลือโซเดียมที่มีประจุลบ (anion) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้สี ตัวอย่างของสีกลุ่มนี้ได้แก่ สีไครเร็กซ์ สีแอตติค และสีรีแอคทีฟ เป็นต้น มีสีอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเมื่อละลายน้ำจะให้โครงสร้างหลักที่มีประจุเป็นบวก (cation) สีกลุ่มนี้เรียกว่า สีแคทไอออนิก (cationic dyes) หรือ สีเบสิก (Basic dyes) โดยส่วนที่เป็นเกลือจะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ด่างและกรด

2.7.2 สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ

สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มคือ

- สีที่ละลายในเนื้อวัสดุ (dyes soluble in the substrate)

สีกลุ่มนี้ได้แก่ สีคิสเพิร์ส ซึ่งย้อมโดยการเตรียมให้สีกระจายตัวในน้ำ ก่อนที่จะย้อมบนเส้นใยสังเคราะห์ นอกจากนั้นยังได้แก่ สีที่ละลายได้ในตัวทำละลาย (solvent-soluble-dyes)

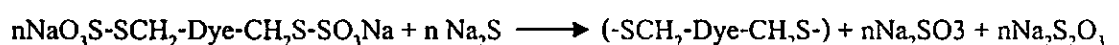
- สีที่ละลายน้ำได้ชั่วคราว (temporarily solubilised dyes)

สภาวะปกติสีกลุ่มนี้จะไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทางเคมี จึงจะสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ และสีจะกลับไปอยู่ในรูปของสีที่ไม่ละลายน้ำเมื่อนำสีไปทำการย้อมเส้นใย เนื่องจากสีได้แทรกซึมเข้าสู่เส้นใยแล้ว ตัวอย่างของสีกลุ่มนี้ได้แก่ สีซัลเฟอร์และสีแวต ซึ่งถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ โดยการทำให้ปฏิกิริยารีดักชันในสารละลายต่าง แล้วจึงเปลี่ยนกลับให้อยู่ในรูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำ โดยการทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอากาศหรือสารเคมี

- สีผลึกควบ (Polar condensation dyes)

เป็นสีที่สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับโมเลกุลของสีด้วยกัน หรือ กับสารประกอบอื่นๆ (ที่ไม่ใช่วัสดุสิ่งทอ) เกิดเป็นสารประกอบ หรือ โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มักเรียกสีชนิดนี้ว่า สีผลึกควบ (condense dyes) สีชนิดนี้ได้แก่ inthion ซึ่งโมเลกุลของสีจะเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใย โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่กรดไธโอซัลโฟนิก

(thiosulphonic acid) ของสีกับโซเดียมซัลไฟด์ที่เติมลงไป เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (disulphide) ดังปฏิกิริยา



- สีที่เกิดภายในเส้นใย (dyes formed within the fiber)

สีกลุ่มนี้ได้แก่ สีเอโซอิก (Azoic dyes) จัดเป็นสีเอโซ ซึ่งไม่ละลายน้ำ (insoluble azo) ดังนั้น การย้อมสีชนิดนี้ต้องทำโดยการใส่สารเคมีคู่ควบ (coupling component) ทำปฏิกิริยากับสารไดเอโซ (diazo component) เกิดเป็นสีเอโซขึ้นมาภายในเส้นใย เมื่อนำวัสดุสิ่งทอมาทำการกำจัดสีส่วนเกินออก โดยการต้มด้วยน้ำสบู่ จะทำให้สีผลึกติดกับเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น สีชนิดนี้จึงมีความคงทนต่อการซักล้าง

นอกจากสีเอโซอิกแล้ว สีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ยังได้แก่ สีพทาโลโซยาไนน์ ซึ่งขั้นตอนการทำให้เกิดสีภายในเส้นใยทำได้ดังนี้คือ นำสารอะมิโนอิมิโนไอโซอินโดล (aminoiminoisindole) มาทำปฏิกิริยากับเกลือทองแดงหรือเกลื่อนิกเกิล (nickel) และสารรีดิวซ์ จากนั้นนำผ้าที่ย้อมไปอบเพื่อทำการผลึกสี นอกจากนั้นยังอาจใช้สารประกอบเชิงซ้อนโลหะ (metal complex) ของพอลิไอโซอินโดลีน (polyisindolines) เพื่อเพิ่มคุณภาพให้แก่สี แทนการใช้เกลือทองแดงหรือเกลื่อนิกเกิล สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สี Phthalogen เป็นต้น ส่วนสีมอร์เดินที่ประเภทอะลิซาริน (alizarin) และสีเบสิกที่ใช้ย้อมผ้าฝ้ายและย้อมทับด้วยกรดแทนนิก หรือ สารสังเคราะห์บางชนิด ก็จัดอยู่ในสีกลุ่มนี้เช่นเดียวกัน

- รงค์วัตถุ (pigments)

รงค์วัตถุแตกต่างจากสีย้อม เนื่องจากรงค์วัตถุไม่มีความสามารถในการยึดเหนี่ยวกับเส้นใยหรือวัสดุ การใช้งานรงค์วัตถุมักใช้ในรูปของสารแขวนลอยในน้ำมัน หรือ สารที่มีลักษณะคล้ายเรซินไม่ละลายในน้ำ

2.8 ความสามารถในการย้อมติดของสี (Substantivity) [13]

ความสามารถในการย้อมติดของสี หมายถึง สมบัติในการดึงดูดกันระหว่างวัตถุและสี โดยสีจะถูกดึงดูดจากตัวกลางเข้าไปเกาะติดในวัตถุ ดังนั้นสีย้อมที่มีความสามารถในการดูดติดบนเส้นใยสูงก็จะสามารถย้อมติดเส้นใยได้ดี

2.8.1 ประเภทของแรงดึงดูดที่ทำให้สีย้อมสามารถดูดติดเส้นใย

2.8.1.1 แรงอิออนิก (ionic forces)

เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่มีประจุต่างกัน เช่น ในการย้อมเส้นใยโปรตีนด้วยสีแอสิด หรือการย้อมเส้นใยอะคริลิกด้วยสีเบสิก

2.8.1.2 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) หรือแรงลอนดอน (London forces)

เป็นแรงดึงดูดที่เกิดกับสารที่ไม่มีประจุ เกิดเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้รูปแบบการกระจายตัวของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปมาตลอด ในบางขณะไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม อากาศรอบๆ ตัวเรามีการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของโมเลกุลมากกว่าที่ส่วนอื่น

ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการเกิดขั้วที่ตรงกันข้ามขึ้นบนโมเลกุลอื่นที่อยู่โดยรอบ เกิดเป็นแรงดึงดูดชั่วคราวระหว่างขั้วที่ต่างกันของโมเลกุลเหล่านั้น

แรงดึงดูดชนิดนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ โมเลกุลเหล่านี้อยู่ใกล้กัน และขนาดของแรงก็จะขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ผิวหรือขนาดของโมเลกุล โดยโมเลกุลที่มีพื้นที่ผิวมากหรือมีขนาดใหญ่จะเกิดแรงดึงดูดนี้ได้มากกว่าโมเลกุลที่มีพื้นที่ผิวน้อยหรือมีขนาดเล็ก ซึ่งแรงดึงดูดชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับเส้นใยและสีย้อมทุกประเภท

2.8.1.3 แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Polar forces)

เกิดขึ้นกับสารเคมีที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนที่ไม่สมดุลภายในโมเลกุล เนื่องจากการมีอะตอมในโมเลกุลที่มีแรงดึงดูดต่ออิเล็กตรอนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดเป็นขั้วบวกหรือลบขึ้นภายในโมเลกุลและไปดึงดูดกับขั้วที่ต่างกันของโมเลกุลอื่น ซึ่งแรงดึงดูดชนิดนี้แบ่งได้เป็น 2 ชนิดได้แก่

- แรงไดโพล – ไดโพล (Dipole – dipole interaction) เกิดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วตรงข้ามกัน เช่น ขั้วบวกและลบ ซึ่งแรงดึงดูดชนิดนี้จะเกิดขึ้นอย่างถาวร
- แรงไดโพล – ไดโพลเหนี่ยวนำ (Dipole - induced dipole interaction) เกิดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วบวกและลบถาวร และโมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วบวกและลบขึ้นโดยโมเลกุลแรก แรงดึงดูดระหว่างขั้วนี้เกิดขึ้นกับสีย้อมและเส้นใยทุกประเภท โดยเฉพาะระหว่างสตีติสเฟิร์สกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์



2.8.1.4 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding)

เกิดขึ้นกับสารที่มีอะตอมไฮโดรเจนและอะตอมที่มีความสามารถในการเกิดประจุลบ (Electronegativity) สูง เช่น อะตอมออกซิเจน ไนโตรเจน และฮาโลเจน เป็นต้น โดยอะตอมไฮโดรเจนของโมเลกุลหนึ่งจะเกิดประจุบวกขึ้น และเกิดแรงดึงดูดกับอะตอมที่มีประจุลบของอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งแรงดึงดูดชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมกับเส้นใยทุกประเภท

2.8.1.5 พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

เป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากการแบ่งปันและใช้คู่อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสีกับ

โมเลกุลของเส้นใย แรงดึงดูดชนิดนี้เป็นแรงดึงดูดที่ค่อนข้างแข็งแรงและถาวร เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยกับสี เช่น สีอะครีลิกกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์ หรือสีรีแอคทีฟกับเส้นใยเซลลูโลส เช่น ฝ้ายหรือเรยอนกับสีรีแอคทีฟ

2.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีกับความสามารถในการดูดติด ของสีย้อมบนเส้นใยต่างๆ

2.8.2.1 เส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์

แรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ ได้แก่ แรงอิออนระหว่างสีแอนไอออนหรือสีย้อมลบ (เฉพาะเส้นใยโปรตีน) กับเส้นใย อย่างไรก็ตามถ้าสีย้อมมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น แรงดึงดูดชนิดนี้จะลดบทบาทลง ส่วนแรงดึงดูดที่มีบทบาทเพิ่มขึ้น ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้ว ซึ่งโดยปกติแล้วสีย้อมจะมีความสามารถในการดูดติดเส้นใยมากขึ้นเมื่อมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น

2.8.2.2 เส้นใยพอลิเอสเตอร์

แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วและการเกิดพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นหากสีย้อมที่มีกลุ่มเคมีที่มีความสามารถในการเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วและพันธะไฮโดรเจนมาก ก็จะส่งผลให้มีความสามารถในการดูดติดสีกับเส้นใยมากด้วย นอกจากนี้สีย้อมที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ก็จะมีสามารถในการดูดติดกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์ได้มากขึ้นด้วย

2.8.2.3 เส้นใยฝ้าย

เส้นใยฝ้ายจัดเป็นเส้นใยเซลลูโลส ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ภายในโมเลกุล ดังนั้นจึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสีย้อมได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสีไครเร็กซ์ นอกจากนี้เส้นใยฝ้ายยังสามารถเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์กับสีย้อมได้อีกด้วยด้วย

เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรง (Linearity) และค่อนข้างแบนราบ (Planarity) ดังนั้นสีย้อมที่จะมีความสามารถในการดูดติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดี นอกจากจะต้องมีกลุ่มเคมีที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้แล้ว ยังควรมีลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของสีเป็นแนวเส้นตรงและแบนราบด้วยเช่นกัน เพื่อให้โมเลกุลของสีและเส้นใยอยู่ใกล้กันมากขึ้น และจะส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างเส้นใยกับสีได้มากขึ้นด้วย ตัวอย่างของสีย้อมที่มีโครงสร้างเป็นแนวเส้นตรง แบนราบ และมีขนาดใหญ่ คือ สิริแอคทีฟ ซึ่งจะเกิดพันธะโควาเลนต์อย่างถาวรระหว่างสีย้อมกับเส้นใย

ในกรณีของสีแว็ค ถึงแม้จะมีลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลที่ไม่ใช่แนวเส้นตรง แต่ก็ยังมีลักษณะแบนราบอยู่ในระนาบเดียวกันและมีขนาดโมเลกุลใหญ่ ทำให้สีแว็คมีความสามารถในการดูดติดกับเส้นใยฝ้ายได้ดีเช่นกัน

2.8.2.4 เส้นใยอะคริลิก

แรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับเส้นใยอะคริลิก คือ แรงอิออนระหว่างสีย้อมลบกับเส้นใย โดยปัจจัยเรื่องขนาดโมเลกุลจะคล้ายคลึงกับในกรณีเส้นใยโปรตีน

2.9 ความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่อ [14]

(Colour Fastness to Light and Perspiration)

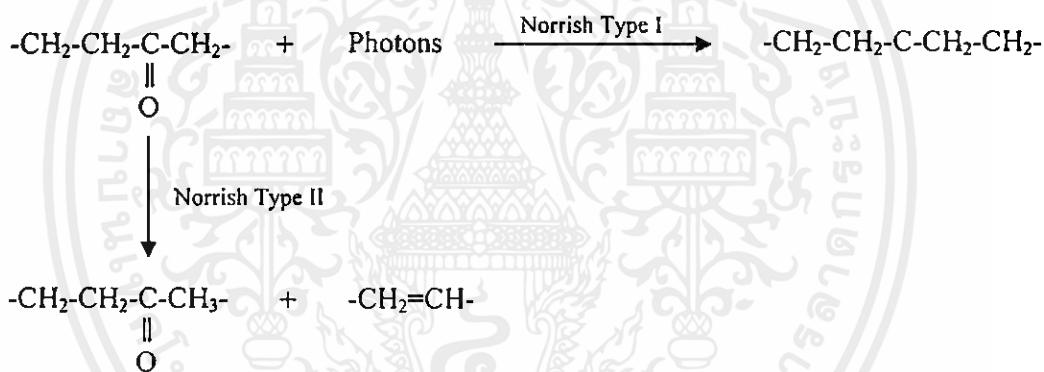
เมื่อวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ดูดซับคลื่นแสง เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่นสั้นแต่มีพลังงานและความถี่สูง) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์นั้นได้ เช่น เกิดการซีดจางของสีบนผลิตภัณฑ์ซึ่งเรียกว่า fading หรือเกิดการแตกหักของพันธะในโครงสร้างโมเลกุลซึ่งเรียกว่า degradation ซึ่งมีผลทำให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป เป็นต้น ปัญหาการซีดจางของสีข้อมบนผลิตภัณฑ์ที่มักพบได้บ่อยๆ ได้แก่

2.9.1 การซีดจางและการย่อยสลายของวัสดุโดยแสง (Photofading and Photodegradation)

วัสดุหรือผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีความคงทนต่อแสงได้ในระดับที่แตกต่างกัน เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางเคมีและส่วนประกอบของโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น วัสดุเส้นใยแก้วไม่ถูกทำลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แต่เส้นใยไหมและปอมีความไวต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตมาก จึงถูกทำลายได้ง่ายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต อย่างไรก็ตามแม้ว่าตัววัสดุจะมีความคงทนต่อแสงได้ดี แต่ก็มีปัจจัยภายนอกที่สามารถส่งผลให้ความคงทนต่อแสงของวัสดุนั้นลดลงได้ เช่น การเติมสารเติมแต่งต่างๆ (รงควัตถุ สารตกแต่งสำเร็จ) เจือปนลงในวัสดุระหว่างการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้น เสื้อผ้า ผ้าผืน หรือสิ่งทออื่นๆ ก็สามารถซีดจางได้จากหลายสาเหตุ เช่น แสงแดด การซักล้าง การซักแห้ง เหงื่อ น้ำทะเล เป็นต้น ซึ่งการซีดจางลงของสีไม่ได้เกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง แต่เกิดจากหลายสาเหตุรวมกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการทดสอบความคงทนของสีข้อมต่อแสงและเหงื่อ

ความคงทนของสี (colour fastness) เป็นคำที่บ่งบอกถึง ประสิทธิภาพของสีบนผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เสื้อผ้า ผ้าผืน หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ว่าจะมีผลต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสีบนผลิตภัณฑ์หรือสีของผลิตภัณฑ์ไปเป็นชนิดวัสดุชนิดอื่นที่อยู่ใกล้กันน้อยเพียงใด เมื่อผลิตภัณฑ์นั้นถูกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมต่างๆ หรือถูกใช้ในการทดสอบ หรือระหว่างกระบวนการผลิตหรือระหว่างการเก็บ ซึ่งคำว่าความคงทนของสีจะไม่ใช้โดดเดี่ยว แต่จะใช้ร่วมกับคำอื่นที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี เช่น แสงเป็นสาเหตุนำมาใช้ร่วมกับคำว่าความคงทนสี ก็จะเป็นความคงทนของสีต่อแสง (colour fastness to light) เหงื่อเป็นสาเหตุนำมาใช้ร่วมกับคำว่าความคงทนสี ก็จะเป็นความคงทนของสีต่อเหงื่อ (colour fastness to perspiration) น้ำเป็นสาเหตุนำมาใช้ร่วมกับคำว่าความคงทนสี ก็จะเป็นความคงทนของสีต่อน้ำ (colour fastness to water) การขัดถูเป็นสาเหตุนำมาใช้ร่วมกับคำว่าความคงทนสี ก็จะเป็นความคงทนของสีต่อการขัดถู (colour fastness to rubbing) เป็นต้น แต่ในที่นี้จะเน้นเรื่องความคงทนของสีต่อแสง ซึ่งจะอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้สีเกิดการซีดจางเมื่อถูกแสง และมาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงรวมทั้งความคงทนของสีต่อเหงื่อเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีแสงอยู่ด้วย

สีที่ทนทานต่อแสง (lightfast colour) มีความหมายว่า สีนั้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆเลยในโครงสร้างของสี เมื่อถูกแสงที่เป็นแสงอาทิตย์หรือแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ แต่โดยทั่วไปสีจะมีความคงทนต่อแสงได้ในระดับที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบหาระดับความคงทนของสีต่อแสงว่าอยู่ระดับใด การที่สีมีประสิทธิภาพทนต่อแสงแตกต่างกันก็เพราะโครงสร้างของสีประกอบด้วยหมู่โครโมฟอร์ และหมู่ออกโซโครมต่างกัน ซึ่งแต่ละหมู่สามารถดูดซับพลังงานคลื่นแสงได้ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากแสงเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ดังนั้นเมื่อโมเลกุลสีรับพลังงานแสงจึงมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสี เช่น ทำให้พันธะเคมีของสีแตกออก ซึ่งเกิดจากการที่ออกโซโครมอาจถูกกำจัดออก ส่งผลให้รงควัตถุของสีไม่เหมือนเดิม ซึ่งมีผลทำให้เฉดสี ระดับความเข้มสี และระดับความสดใสของสีเปลี่ยนไป ผลเหล่านี้เป็นเพราะ โครงสร้างทางเคมีของสีไม่ทนต่อแสงจึงทำให้สีนั้นเกิดการซีดจาง นอกจากหมู่โครโมฟอร์แล้ว หมู่คาร์บอนิล (-C=O) ซึ่งเป็นหมู่ที่สำคัญหมู่หนึ่งในโมเลกุลของสี ก็สามารถดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต และเกิดปฏิกิริยาประเภท Norrish type I และ Norrish type II ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเกิด Norrish type I และ Norrish type ของหมู่คาร์บอนิล ที่ดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต [14]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้น มีผลทำให้เกิดการแตกออกของพันธะในโมเลกุลของสี ทำให้สีเกิดการซีดจางหรือเฉดสีเปลี่ยนไป เพราะโมเลกุลสีมีโครงสร้างไม่เหมือนเดิม ส่วนอนุมูลอิสระ (free radical) ที่เกิดขึ้นระหว่างการแตกออกของพันธะในโมเลกุลของสี จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่อง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการย่อยสลายของผลิตภัณฑ์ได้ต่อไป ผลกระทบที่มีต่ออัตราการซีดจางของสี นอกจากแสงแล้ว ยังมีปัจจัยต่างๆร่วมด้วย เช่น

- ปฏิกิริยาทางเคมีของโมเลกุลสีเมื่อมีแสงหรือถูกแสงกระทบ
- สภาพพื้นฐานทางธรรมชาติของสี
- โครงสร้างทางเคมีของวัสดุ
- สิ่งแปลกปลอมในวัสดุ

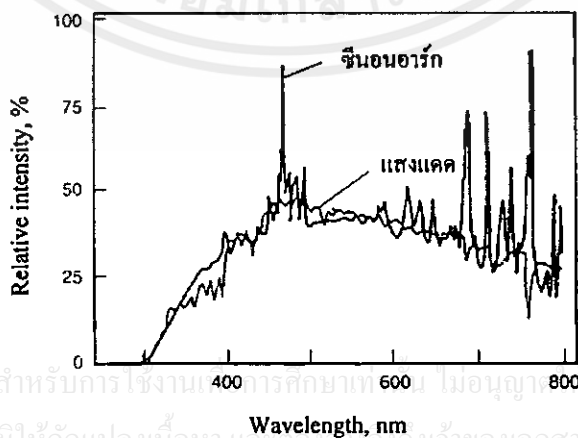
- สภาพแวดล้อม
- แหล่งกำเนิดแสง

จะพบว่าปัจจัยทางสภาพแวดล้อมและแหล่งกำเนิดแสง ก็มีผลต่อการซีดจางของสีได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นวิธีทดสอบความคงทนของสีที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงหรือสภาพแวดล้อมต่างกัน จะทำให้ได้ผลจากการทดสอบแตกต่างกันออกไป

2.9.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (colour fastness to light)

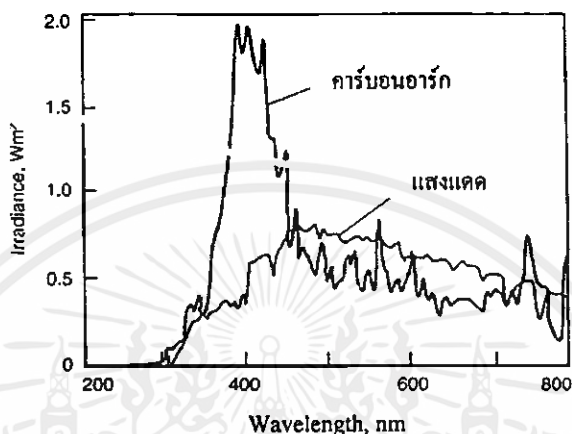
ในอดีตการทดสอบความคงทนของสีบนวัสดุต่างๆ ทำได้โดยการปล่อยให้วัสดุนั้นอยู่ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติตามระยะเวลาที่กำหนด อาจนานเป็นปีหรือเป็นเดือน แต่ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถนำมาทำการเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากสถานที่ทดสอบอาจไม่ได้เป็นสถานที่เดียวกัน ทั้งนี้เพราะความเข้มของรังสีจากแสงอาทิตย์ในแต่ละประเทศไม่เท่ากัน นอกจากนี้สภาพแวดล้อม มลภาวะต่างๆที่เกิดขึ้นในแต่ละประเทศก็แตกต่างกันออกไป จึงเป็นเรื่องยากที่จะทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ และการทดสอบในลักษณะนี้ต้องใช้เวลานานเป็นเดือนหรือปี ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นอุปกรณ์ในการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงขึ้นมา เพื่อให้ง่ายและสะดวกในการทดสอบรวมทั้งการตั้งมาตรฐานต่างๆที่ใช้ในการควบคุมการทดสอบ เพื่อสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบได้

อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด เช่น แหล่งกำเนิดแสงเมอคิวรี (mercury vapour lamp) แหล่งกำเนิดแสงคาร์บอนอาร์ค (carbon arc lamp) และแหล่งกำเนิดแสงซีนอน (xenon arc lamp) แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ แหล่งกำเนิดแสงซีนอนอาร์ค เพราะสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงซีนอนอาร์ค มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของแสงธรรมชาติมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของแสงแดด และสเปกตรัมของซีนอนอาร์ค [14]

จากรูปที่ 2.6 ได้แสดงกราฟความเข้มของแสง (relative intensity, %) แต่ละความยาวคลื่น (wavelength, nm) ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง คือ แสงซินอนอาร์คเปรียบเทียบกับแสงธรรมชาติ เช่น แสงแดด (sunlight) ส่วนกราฟความเข้มของแสงแต่ละความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง คือ แสงคาร์บอนอาร์คเปรียบเทียบกับแสงธรรมชาติ เช่นแสงแดด ได้แสดงในรูปที่ 2.7

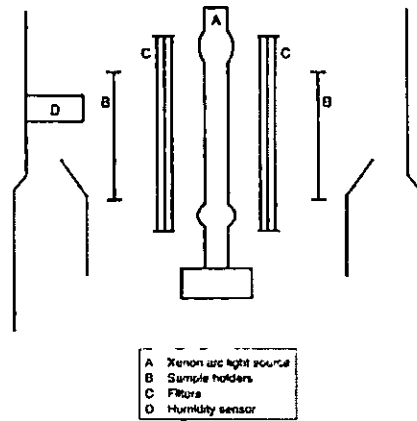


รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของแสงแดด และสเปกตรัมของคาร์บอนอาร์ค [14]

จากการเปรียบเทียบกราฟในรูปที่ 2.6 และ 2.7 พบว่าสเปกตรัมของรังสีที่ปล่อยออกมาจากแสงซินอนอาร์ค มีความใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติมากกว่าสเปกตรัมของแสงคาร์บอนอาร์ค

เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อแสงโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแสงประดิษฐ์อย่างใดอย่างหนึ่ง แล้วยังมีส่วนประกอบอื่นๆอีก เช่น ตัวกรองแสง (filter) มี 2 ส่วนคือ ตัวกรองด้านในที่อยู่รอบๆแหล่งกำเนิดแสง และตัวกรองด้านนอกที่เป็นรูปทรงกระบอกหุ้มอีกชั้น ตัวกรองทั้งสองส่วนนี้ทำหน้าที่รวมกันเพื่อควบคุมความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงในช่วงต่างๆ ไม่ให้เท่ากัน เพื่อลอกเลียนแบบพฤติกรรมของแสงธรรมชาติที่มีความเข้มของแสงไม่เท่ากันตลอดทั้งวัน อีกทั้งยังช่วยกรองรังสีอุลตราไวโอเลตให้น้อยลงด้วย ส่วนต่อไปคือ ที่จับชิ้นทดลอง (sample holders) จะวางรอบๆแหล่งกำเนิดแสงด้วยระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงที่เท่ากัน และส่วนสุดท้ายคือ ตัวควบคุมความชื้น (humidity sensors) เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสม โดยส่วนประกอบทั้งสี่จะวางอยู่ในกรอบหรือห้องที่เรียกว่า chamber ภาพตัดขวางที่จำลองส่วนต่างๆเหล่านี้ในอุปกรณ์การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงของ xenon arc air-cooled test chamber แสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของชิ้นส่วนต่างๆ ในอุปกรณ์เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อแสงของ Xenon arc air – cooled test chamber [14]

เพื่อให้ได้ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงที่ดี ดังนั้นในขณะที่ทำการทดสอบจึงต้องมีการตรวจเช็คตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ก่อนคือ

1. การกระจายสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ (spectral distribution of the light source) ว่ายังมีลักษณะเหมือนเดิมหรือไม่
2. ความเข้มของแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสง (intensity of the light source) คงที่หรือเหมือนเดิมหรือไม่ เนื่องจากหลอดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยทั่วไปจะมีอายุการใช้งานที่จำกัด ดังนั้นถ้าหลอดถูกใช้งานเกินกว่าจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ ความเข้มของรังสีจากการกระจายของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ อาจจะไม่ได้รับความเข้มที่เหมาะสม
3. ระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงกับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ (distance of light source from sample) เพราะระยะห่างที่ไม่เท่ากันจะมีผลทำให้ชิ้นงานทดสอบได้รับปริมาณความเข้มของแสงไม่เท่ากัน
4. ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ความชื้นสัมพัทธ์มีผลกระทบต่อความคงทนของสีต่อแสงโดยตรง ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลกระทบต่อความคงทนของสีต่อแสงมาก ดังนั้นการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในการทดสอบแต่ละครั้งจึงมีความสำคัญมาก เพื่อให้การทดสอบแต่ละครั้งสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้
5. การเตรียมชิ้นงาน (specimen preparation)
6. ระยะเวลาการทดสอบ (duration of test)
7. อุณหภูมิของบริเวณโดยรอบที่ทำการทดสอบ (ambient temperature)
8. อุณหภูมิของชิ้นทดสอบ ซึ่งสามารถวัดได้จากอุณหภูมิของแผ่นฝ้าสีดำ (black-panel or black-standard temperature) ที่ใช้ทำเป็นกำแพงของห้อง chamber

2.9.3 มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง [14]

มีหลายมาตรฐานด้วยกัน เช่น

1. มาตรฐานที่จัดตั้งขึ้น โดยองค์กรระหว่างประเทศหลายประเทศมารวมกัน เพื่อตั้งกฎเกณฑ์ในการทดสอบขึ้น องค์กรดังกล่าวมีชื่อว่า ISO และมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงคือ ISO 105 B02
2. มาตรฐานที่จัดตั้งขึ้น โดยองค์กรในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งตัวขององค์กรนี้คือ AATCC ส่วนมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ AATCC 16E ซึ่งจะมีการแบ่งระดับความคงทนของสีต่อแสงเป็น 3 ระดับ ระดับการซีดจาง 20 หน่วยหรือต่ำกว่า (20 fading units or below) ระดับการซีดจาง 40 หน่วย (40 fading units) และระดับการซีดจาง 80 หน่วยหรือมากกว่า (80 fading units or above)
3. มาตรฐานที่จัดตั้งขึ้น โดยองค์กรในประเทศเยอรมนี ซึ่งตัวขององค์กรนี้คือ DIN ส่วนมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ DIN54004 ซึ่งมีการแบ่งระดับความคงทนของสีต่อแสงเช่นเดียวกับมาตรฐานของ AATCC แต่การแบ่งระดับความคงทนของสีต่อแสงจะไม่ใช้เกณฑ์ที่เหมือนกัน มาตรฐานนี้จะแบ่งเป็น 3 เกรด คือ เกรด 4 หรือต่ำกว่า (grade 4 or below) เกรด 5 (grade 5) เกรด 6 หรือสูงกว่า (grade 6 or above)
4. มาตรฐานที่จัดตั้งขึ้น โดยองค์กรในประเทศอังกฤษ ซึ่งตัวขององค์กรนี้คือ BS ส่วนมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ BS 1006 E01
5. มาตรฐานที่จัดตั้งขึ้น โดยองค์กรในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งตัวขององค์กรนี้คือ JIS มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ JIS 0841 ถึง JIS 0843

เนื่องจากมาตรฐานของ ISO เป็นการจัดตั้งจากองค์กรระหว่างหลายประเทศ จึงเป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมมาก ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงตามมาตรฐานของ ISO 105 B02 เท่านั้น ซึ่งเป็นการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงซินอนอาร์ค

หลักทั่วไปในการทดสอบคือ นำชิ้นทดสอบที่ต้องการและชิ้นทดสอบมาตรฐานที่เรียกว่า blue wool reference วางคู่กันภายใต้แสงซินอนอาร์ค ที่สภาวะของความชื้นและเวลาที่ต้องการทดสอบ จากนั้นประเมินความคงทนของสี โดยการเปรียบเทียบความคงทนของสีของชิ้นทดสอบมาตรฐาน โดยทั่วไปชิ้นทดสอบมาตรฐานหรือ blue wool reference จะประกอบด้วยระดับความคงทนของสี 8 ระดับคือ ระดับ 1 ถึง 8 ซึ่งหมายความว่า blue wool reference 1 ชุด จะประกอบด้วยชิ้นผ้ามาตรฐาน 8 ชิ้น ที่ย้อมด้วยสีต่างๆ ซึ่งสีที่ใช้มีโครงสร้างของ โมเลกุลสีต่างกัน มีผลทำให้ระดับความคงทนของสีต่อแสงของผ้าขนสัตว์มาตรฐาน 8 ชิ้นไม่เท่ากัน ซึ่งในแต่ละระดับที่สูงกว่าจะมีระดับความคงทนของสีต่อแสงมากกว่า 2 เท่า ระบบ blue wool reference ของผ้าขนสัตว์ที่ย้อมติดด้วยสีแสดและสี แอสดที่มีรหัสสีแตกต่างกันได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.9 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในยุโรป และญี่ปุ่น สำหรับสหรัฐอเมริกา ก็มีระบบ blue wool reference ซึ่งดัดแปลงมาจากยุโรป และใช้วิธีการแบ่งระดับที่แตกต่างออกไป กล่าวคือสหรัฐอเมริกาใช้ระบบ L2 ถึง L9 และสีที่ใช้ย้อมจะเป็นอัตรา

ส่วนผสมต่างๆ ของสีย้อมที่ผสมกันระหว่างสีมอร์แดนต์ของ CI Mordant 1 และสีแว้ดของ CI Solubilized Vat Blue 8 ที่นำมาย้อมผ้าขนสัตว์ ซึ่งในแต่ละระดับที่สูงกว่าจะมีระดับความคงทนของสีต่อแสงมากกว่า 2 เท่า เมื่อเทียบกับระดับที่ต่ำกว่าเช่นกัน และระดับที่ 1 จะมีค่าความคงทนของสีต่อแสงน้อยที่สุด ส่วนระดับ 8 จะมีค่าความคงทนของสีต่อแสงมากที่สุด

ตารางที่ 2.9 สีย้อมที่ใช้ย้อมผ้าขนสัตว์เพื่อใช้เป็น blue wool reference [14]

ระดับความคงทนของสีต่อแสง	สีย้อมและรหัสของสี
1	CI Acid Blue 104
2	CI Acid Blue 109
3	CI Acid Blue 83
4	CI Acid Blue 121
5	CI Acid Blue 47
6	CI Acid Blue 23
7	CI Solubilized Vat Blue 5
8	CI Solubilized Vat Blue 8

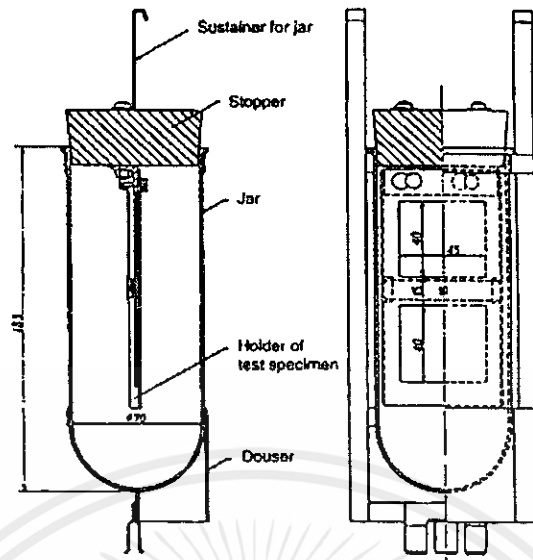
2.9.4 มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่อ

ในมาตรฐานของญี่ปุ่นนอกจากจะมีการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆแล้ว ยังมีมาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่อในเวลาเดียวกันอีกด้วย ซึ่งมาตรฐานของประเทศอื่นๆ จะทำแยกกันระหว่างการทดสอบทั้งสอง แต่ในมาตรฐานญี่ปุ่นจะมีทั้งแบบแยกและแบบรวมกัน ซึ่งหลักการคร่าวๆของมาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่อตาม JIS L 0888-1988: Testing Methods for Colour Fastness to light and perspiration มีหลักการดังนี้คือ นำชิ้นทดสอบมาแช่ในสารละลายเหงื่อที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบขึ้นแขวนบนแท่งแก้ว จนกระทั่งไม่มีสารละลายเหงื่อหยดลงมา แล้วจึงนำชิ้นทดสอบที่เปียกไปด้วยสารละลายเหงื่อที่ทำขึ้นมาใส่ไว้ในที่ยึดจับชิ้นทดสอบ พร้อมกับชิ้นทดสอบมาตรฐาน (blue wool reference) ในขวดโหลแก้วดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งส่วนประกอบของขวดโหลแก้วประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆดังนี้

1. ตัวยึดหรือตัวค้ำจุนขวดโหลแก้ว (Sustainer for jar)
2. จุกปิดขวดโหลแก้ว (Stopper)
3. ขวดโหลแก้ว (Jar)
4. ที่ถือหรือที่ยึดจับชิ้นทดสอบ (Holder of test specimen)
5. ขายึดขวดโหลแก้ว (Douser) เพื่อนำไปยึดติดกับเครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามสงวนลิขสิทธิ์ไว้ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ขวดโหลแก้วที่ใช้ใส่ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบในมาตรฐาน JIS 0888-1 9888 [14]

จากนั้นนำขวดโหลแก้วมาวางไว้ที่ตู้ทดสอบความคงทนของสีและเหงื่อที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในมาตรฐานนี้คือ คาร์บอนอาร์ค การทดสอบจะทำงานกระทั่งเจดสีของผ้าขนสัตว์มาตรฐานเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ระดับ 3 หลังจากนั้นนำเอาชิ้นทดสอบมาล้างด้วยน้ำเปล่าแล้วทำให้แห้ง และตามด้วยการประเมินค่าความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่อตามเกรย์สเกล (gray scale)

โดยปกติเหงื่อที่ขับออกมาจากร่างกายของคนเราจะเป็นสารละลายที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นได้ทั้งกรดและเบสและยังมีส่วนประกอบของเกลือรวมอยู่ด้วย เหงื่อของแต่ละคนจะมีส่วนประกอบที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับเคมีในร่างกายของแต่ละคน ทำให้เหงื่อของคนเรามีความเป็นกรดหรือด่างที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเตรียมสารละลายเหงื่อจึงต้องทำการเตรียมทั้งเหงื่อที่เป็นกรดและด่าง เนื่องจากเหงื่ออาจจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ โมเลกุลของสี ซึ่งส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของเจดสี หรือ เกิดการซีดจางของสีได้

การเตรียมเหงื่อที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานของญี่ปุ่นสามารถเตรียมได้ดังนี้
เหงื่อที่มีสภาวะเป็นกรด (Acid artificial perspiration solution) เตรียมได้โดยสูตรนี้

0.5 กรัมต่อลิตร ของ L-histidine hydrochloride monohydrate

0.5 กรัมต่อลิตร ของ Sodium chloride

2.2 กรัมต่อลิตร ของ Sodium dihydrogenphosphate dihydrate

เติม 15 มิลลิลิตร ของสารละลาย Sodium hydroxide ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ซึ่งสารละลาย 1 ลิตร ที่เตรียมได้ควรมีความเป็นกรดด่าง (pH) ที่ 5.5

เหงื่อที่มีสภาวะเป็นด่าง (Alkaline artificial perspiration solution) เตรียมได้โดยสูตรนี้

0.5 กรัมต่อลิตร ของ L-histidine hydrochloride monohydrate

0.5 กรัมต่อลิตร ของ Sodium chloride

5.0 กรัมต่อลิตร ของ Disodium hydrogenphosphate dodecahydrate

เติม 25 มิลลิลิตร ของสารละลาย Sodium hydroxide ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ซึ่งสารละลาย 1 ลิตร ที่เตรียมได้ควรมีความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ 8.0

เนื่องจากสาร L-histidine เป็นสารที่ไม่เสถียรไม่สามารถเก็บไว้ได้นาน ดังนั้นควรเตรียมสารเมื่อต้องการใช้เท่านั้นและควรเก็บสารที่เตรียมในที่มืดและมีความเย็น การเตรียมสารละลายเหงื่อในแต่ละมาตรฐานอาจจะไม่เหมือนกัน ถ้าต้องการใช้มาตรฐานใดทำการทดสอบก็ควรเตรียมสารละลายตามมาตรฐานนั้น

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Ferri และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาการนำเอาประโยชน์จากของไหลเหนือวิกฤต มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการข้อมสีสิ่งทอ ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจและมีประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมการฟอกข้อม เนื่องจากคุณสมบัติของของไหลเหนือวิกฤต โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีความสามารถในการละลายในสีข้อมได้ดี นอกจากนั้นคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต ยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ (glass transition temperature, T_g) ทำให้พอลิเมอร์หรือเส้นใยสังเคราะห์นุ่มลง ซึ่งส่งผลให้เกิดการแพร่ของสีเข้าไปข้อมติดได้ดี พร้อมทั้งยังช่วยลดอุณหภูมิในกระบวนการข้อมสีและคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตยังมีสมบัติที่จุดวิกฤตต่ำคือ ความดันวิกฤต 7.38 เมกะพาสคาล อุณหภูมิวิกฤต 31.1 องศาเซลเซียส ส่วนข้อดีอื่นๆของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตคือ ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ราคาถูก และสามารถแยกนำเอาคาร์บอนไดออกไซด์กับสีข้อมที่ตกค้างในกระบวนการข้อมกลับมาใช้ใหม่ได้

N. S. Oliveira และคณะ [15] ได้อธิบายกลไกการดูดซึมแบบสองทาง (dual mode sorption model) ว่าเป็นการดูดซึมสองชนิดที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำระหว่างของไหลกับพอลิเมอร์คล้ายแก้ว (glassy polymer) ซึ่งกลไกแรกอธิบายได้ด้วยกฎการดูดซึมของเฮนรี ซึ่งจะเกิดในวัฏภาคของเหลว และกลไกที่สองอธิบายได้ด้วยกฎของแลงเมียร์ ซึ่งจะเกิดในวัฏภาคของแข็งโดยการดูดซึมจะเกิดภายในรูพรุนของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M. Bohning และคณะ [16] ได้อธิบายการแพร่ของโมเลกุลก๊าซไปยังพื้นผิวอสัณฐานพอลิเมอร์ (amorphous polymer) ว่าสามารถอาศัยพื้นฐานกลไกการแพร่ของสารละลายมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งการแพร่เกิดจากความแตกต่างของความดันระหว่างสารละลายที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของชั้นเนื้อเยื่อ โดยค่าการแพร่ผ่านรวม (overall transport) สามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึม ซึ่งมีสามขั้นตอนดังนี้

1. การซึมผ่านของโมเลกุลสารละลายที่อยู่ด้านบนของชั้นเนื้อเยื่อ (อธิบายได้จากค่าการละลาย, S)
2. การแพร่ของโมเลกุลผ่านผิวชั้นเนื้อเยื่อ (อธิบายได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, D)
3. การแพร่ของโมเลกุลสารละลายออกจากชั้นเนื้อเยื่อที่อยู่ด้านล่าง
ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึม (\bar{P}) สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{P} = D \times S$$

ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ สามารถประมาณค่าได้ด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทางดังสมการต่อไปนี้

$$C = C_D + C_H = k_D p + \frac{C'_H b p}{1 + b p}$$

ซึ่งค่าการละลายทั้งหมดของสีในเส้นใยพอลิเมอร์ (C) เป็นผลรวมของค่าการละลายแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้ (C_D) กับค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดระดับไมครอน (C_H)

J. Fasahi และคณะ [17] ได้ศึกษาการละลายของสีย้อมเอโซ 3 ชนิด คือ 4-(N,N-dimethylamino)-4-nitroazobenzene (D_1), 4-(N,N-diethylamino)-4-nitroazobenzene (D_2) และ Parared (D_3) ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งทำการทดลองที่สภาวะที่อุณหภูมิ 308-358 เคลวิน และความดันช่วง 122-355 บาร์ โดยจากการศึกษาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ความดันต่ำ ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของสีย้อมมีค่าลดลง เนื่องจากจะทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงอย่างมาก ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิขณะความดันสูง ส่งผลให้การละลายของสีย้อมมีค่าสูงขึ้นด้วย เพราะการเพิ่มความดันจะส่งผลให้ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูง ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นตัวทำละลายสีย้อมได้ดี จากการทดลองพบว่าค่าการละลายของสีย้อมเอโซในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าลดลงดังนี้คือ $D_3 < D_1 < D_2$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของสี โดยสีที่มีอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวสูงจะมีความสามารถในการละลายต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถนำเอาข้อมูลสมมูล

การละลายมาสร้างความสัมพันธ์จนได้สมการเอมพิริคัล และพบว่าค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองอีกด้วย

M. Rita De Giorgi และคณะ [18] ได้ทำการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยสีย้อมชนิดคิสเพิร์ส โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวกลางในกระบวนการย้อม ซึ่งทำการทดลองที่สภาวะความดัน 17.0 ถึง 27.0 เมกะพาสกาล และอุณหภูมิช่วง 80 ถึง 120 องศาเซลเซียส พบว่าความดันและอุณหภูมิ มีผลต่อค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ดูดซับในเส้นใยพอลิเอสเตอร์ โดยการเพิ่มความดันจะทำให้ค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ดูดซับในเส้นใยพอลิเอสเตอร์มีค่าสูงขึ้น และพบว่าเมื่อเพิ่มความดันมากกว่า 24 เมกะพาสกาล ค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ดูดซับในเส้นใยมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่สูงขึ้นมาก ซึ่งอาจเป็นเพราะการดูดซึมของสีย้อมในเส้นใยได้เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวแล้ว นอกจากนั้นยังพบว่าสามารถทำการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเอสเตอร์ได้ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ลงได้ จึงทำให้พอลิเมอร์นิ่มลง ดังนั้นความสามารถในการแพร่ของสีเข้าสู่เส้นใยจึงเกิดได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์

T. Shinoda และ K. Tamura [3] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของสีย้อม C.I. Disperse Red 1 และ C.I. Disperse Red 13 ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยทำการวิจัยเพื่อหาค่าการละลายของสีย้อม C.I. Disperse Red 1 และสีย้อม C.I. Disperse Red 13 ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิ 50 80 และ 110 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 10.0 ถึง 30.0 เมกะพาสกาล สีย้อมทั้ง 2 ชนิด เป็นสีย้อมชนิดเอโซ โดยสีย้อม C.I. Disperse Red 1 นิยมใช้ในการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ส่วนสีย้อม C.I. Disperse Red 13 สามารถสังเคราะห์ได้จากการเติมหมู่คลอรีนลงไปบนสีย้อม C.I. Disperse Red 1 ซึ่งผลกระทบของการเติมหมู่คลอรีนที่มีผลต่อการละลายของสีในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตก็ได้ถูกตรวจสอบในการทดลองครั้งนี้ด้วย จากนั้นได้นำค่าการละลายของสีย้อมทั้ง 2 ชนิดในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตไปสร้างความสัมพันธ์โดยอาศัยสมการเอมพิริคัลที่ถูกเสนอโดย Sung และ Shim นอกจากนั้นยังสามารถนำสมการสถานะของ เปง-โรบินสัน ร่วมกับกฎการผสมพื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ k_{ij} และ l_{ij} มาใช้ทำนายค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้อย่างเหมาะสม และยังพบว่าการเพิ่มสภาวะในการทดลองยังทำให้การละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย

J. Von Schnitzler และ R. Eggers [19] ได้ทำการศึกษาผลของการถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมออร์ โดยพบว่าที่สภาวะความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (PET) มีลักษณะแข็ง เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลตมีโครงสร้างกิ่งผลึก ซึ่งภายในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการขึ้นรูปพอลิเมออร์ ดังนั้นจึงทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมออร์มีจำกัด ไม่ยืดหยุ่นเหมือนยาง ซึ่งการถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดในบริเวณที่เป็นอสัณฐานเท่านั้น โดยทั่วไปการถ่ายโอนมวลของก๊าซในพอลิเมออร์มักอธิบายด้วยรูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ซึ่งมีกลไกสองอย่างคือการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดเล็ก ระดับไมโครเมตรของพอลิเมออร์ และการแพร่ของก๊าซบริเวณเนื้อพอลิเมออร์ ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต ที่สภาวะความดันและอุณหภูมิต่างๆ พบว่าการลดอุณหภูมิขณะที่ความดันค่าส่งผลให้การดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลตมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิที่ความดันสูงทำให้การดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลตมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้พบว่าเส้นกราฟการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต มีลักษณะเป็นรูป s-bend ซึ่งที่ความดันต่ำเส้นกราฟการดูดซึมที่ได้ มีลักษณะเช่นเดียวกันกับเส้นกราฟที่ได้จากกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ในขณะที่ความดันสูงเส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟที่ได้จากการแพร่ที่เป็นไปตามกฎของ Fickian เพื่อจะอธิบายเรื่องการแพร่ของก๊าซในพอลิเมออร์ จึงจำเป็นต้องมีความรู้เรื่องกลไกการถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในสีย้อม เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นก๊าซพาพาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปละลายในพอลิเมออร์ ซึ่งได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางในเรื่องการแพร่ของสารโมเลกุลใหญ่ (สีย้อม) ในพอลิเมออร์คล้ายแก้ว พบว่าที่ความดันและอุณหภูมิสูง คาร์บอนไดออกไซด์จะมีสมบัติเป็นของไหลเหนือวิกฤต ซึ่งมีความสามารถละลายสีย้อมได้ดี ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็น molecular lubricant ให้สีย้อมที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่แพร่เข้าไปในพอลิเมออร์ได้ง่ายขึ้น และจากการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ด้วยสีย้อมเอโซ 2 ชนิด คือ ชนิด A และ B พบว่าสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมชนิด A และ B ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 30 เมกะพาสกาล มีค่าเท่ากับ 1.07×10^{-13} และ 1.93×10^{-13} m²/s ตามลำดับ

Min-Woo Park และ Hyo-Kwang Bae [20] ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของสีย้อมในระหว่างกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยได้ทำการทดลองในท่อทรงกระบอก และใช้วิธีการไหลผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ท่อ แล้วนำข้อมูลการละลายของสีที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์เพื่อนำไปหาค่าการกระจายตัวของสีย้อม

ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยอาศัยรูปแบบสมการทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งจะพิจารณาว่าของไหลเหนือวิกฤตและเส้นใยพอลิเอสเตอร์อยู่ในสถานะของเหลว จากการประมาณค่าการกระจายตัวของสีในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต พบว่าการเพิ่มความดันทำให้สีมีการละลายได้ดีขึ้น ซึ่งการแพร่ของสีในเส้นใยพอลิเอสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อเพิ่มความดัน ในขณะที่การละลายของสีในก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความดัน

A. Safa Ozcan และ A. Ozcan [21] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการดูดซึมของสีย้อมในกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความดัน 30 เมกะพาสกาล ซึ่งจากการทดลองพบว่าระดับความเข้มข้นของสีย้อมที่ข้อมติคในเส้นใยพอลิเอสเตอร์ มีระดับความเข้มข้นของสีสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสีย้อม และการเพิ่มความดันในกระบวนการยังทำให้การละลายของสีในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอีกด้วย เพราะความหนาแน่นของก๊าซเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของก๊าซลดลง แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสีกับโมเลกุลของก๊าซจึงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้สีเกิดการละลายในก๊าซได้ดีขึ้น โดยทั่วไปพฤติกรรมการละลายของสีในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตค่อนข้างซับซ้อน เพราะมีผลกระทบจากทั้งอุณหภูมิและความดันร่วมกัน ในทางทฤษฎีพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ความดันคงที่ มักจะทำให้การละลายของสีในก๊าซเกิดขึ้นได้ดี แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของก๊าซกลับมีค่าต่ำลง ซึ่งถ้าแยกพิจารณาจะสามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ กรณีที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ความดันต่ำ จะส่งผลให้ความหนาแน่นของก๊าซลดลงอย่างมาก ซึ่งทำให้การละลายของสีในก๊าซลดต่ำลงด้วย แต่ในกรณีที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ความดันสูง พบว่าความหนาแน่นของก๊าซเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และมีค่าความหนาแน่นของก๊าซสูงอีกด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความดันต่ำ จึงส่งผลให้สีย้อมเกิดการละลายได้ดีในสภาวะเช่นนี้ เพราะฉะนั้นการเพิ่มอุณหภูมิขณะความดันสูงจะช่วยเพิ่มอัตราการดูดซึมของสีในเส้นใย หรือ สีสามารถข้อมติคในเส้นใยได้ดีขึ้น และยังพบว่าระดับความเข้มข้นของสีที่ข้อมติคในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับโมเลกุลของก๊าซ ดังนั้นอัตราการแพร่ของสีย้อมเข้าสู่เส้นใยจึงสูงขึ้น นอกจากนั้นของไหลเหนือวิกฤตยังช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ลงได้ ทำให้สามารถลดอุณหภูมิของกระบวนการย้อมสีลงได้ในขณะที่กระบวนการย้อมสีโดยใช้ของเหลวเป็นตัวกลางในการย้อมต้องทำที่อุณหภูมิสูงถึง 130 องศาเซลเซียส

T. Kyung Kim และคณะ [22] ทำการศึกษาตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ เช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ที่ผ่านการย้อมสีโดยมีน้ำเป็นตัวกลางในกระบวนการย้อม พบว่าขั้นตอนในการแพร่ของสีย้อมเข้าสู่เส้นใยโดยทั่วไปแบ่งได้เป็นสามขั้นตอนคือ 1) การแพร่ของสีย้อมในตัวกลางน้ำ 2) การดูดซึมของสีย้อมเข้าสู่ผิวชั้นนอกของเส้นใย 3) การแพร่ของสีย้อม

เข้าสู่ผิวชั้นในของเส้นใย ซึ่งโดยทั่วไปมักตั้งสมมุติฐานว่าการแพร่ในชั้นคอนที่สองเกิดได้เร็วที่สุด และการแพร่ของสีย้อมเข้าสู่ผิวชั้นในของเส้นใยเกิดได้ช้ากว่าการแพร่ของสีย้อมในตัวกลางน้ำ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อม C.I.Disperse Violet 1 ในเส้นใย 3 ชนิด คือ PTT EDP และ PET ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.09×10^{-20} 0.87×10^{-20} และ 0.02×10^{-20} m^2/s ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

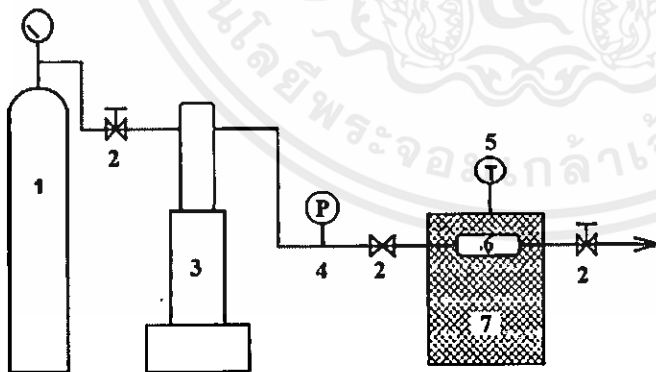
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

- 3.1.1 ทำการรวบรวม พร้อมทั้งศึกษาข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมสี่เส้นใยพอลิเมอร์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
- 3.1.2 ออกแบบอุปกรณ์สำหรับกระบวนการเชื่อมที่ความดันสูง
- 3.1.3 ทำการทดลองเชื่อมสี่เส้นใยพอลิเมอร์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยทำการปรับเปลี่ยนสถานะในการทดลอง คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลา
- 3.1.4 ตรวจสอบวิเคราะห์หาปริมาณสี่เชื่อมที่ละลายในเส้นใยพอลิเมอร์ ด้วยการสกัดแยกสี่เชื่อมออกจากเส้นใยด้วยตัวทำละลายเอทานอล โดยวิธีการรีฟลักซ์
- 3.1.5 การทดสอบคุณภาพของเส้นใยที่ผ่านการเชื่อมด้วยวิธีที่เป็นมาตรฐาน เช่น AATCC, ISO
- 3.1.6 สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน

3.2 วิธีการดำเนินงาน

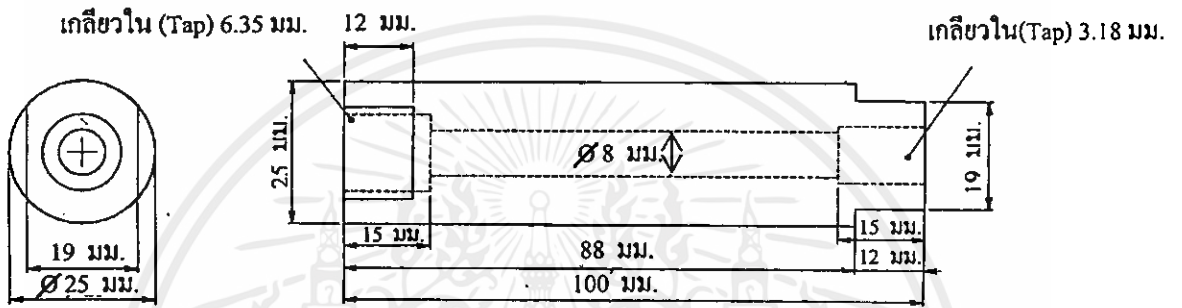
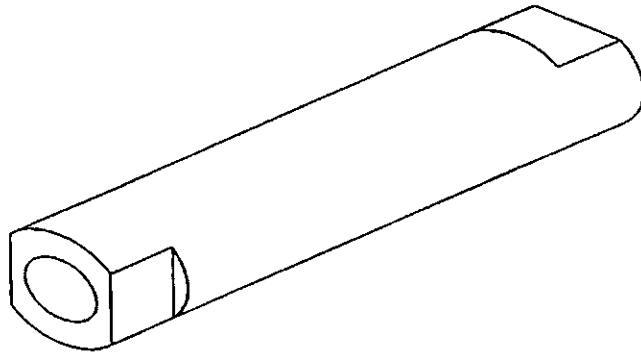
- 3.2.1 การออกแบบอุปกรณ์สำหรับกระบวนการเชื่อมที่ความดันสูง
ทำการออกแบบอุปกรณ์สำหรับกระบวนการเชื่อมที่ความดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



1. ถังบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
2. วาล์ว
3. ป้อนอัดความดันสูง
4. มาตรวัดความดัน
5. มาตรวัดอุณหภูมิ
6. เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง
7. ส่วนควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการเชื่อมสี่เส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แบบและภาคตัดขวางของเครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง



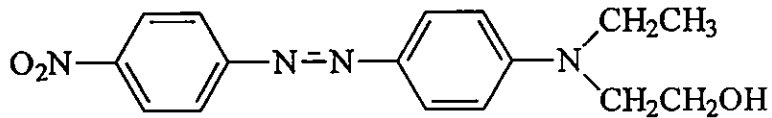
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกาน... กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ปืนอัดความดันสูง

3.2.2 การย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

3.2.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- สีย้อมชนิดเอโซชื่อ C.I. Disperse Red 1 หรือมีชื่อทางเคมี (2-[4-(4-nitrophenylazo)-*n*-ethyl-phenylamino]ethanol), Dye content 50 % จาก บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด



รูปที่ 3.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม C.I. Disperse Red 1

- เส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิดเส้นด้ายสีขาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 42.4 ไมครอน
- เครื่องปฏิกรณ์ทนความดันสูง ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
- ป้อนอัดความดันสูง
- คาร์บอนไดออกไซด์ความบริสุทธิ์ 99.99 % จาก บริษัทแพรกแอร์ จำกัด
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

3.2.2.2 กระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์

ชั่งผงสีให้ได้น้ำหนักในช่วง 0.02-0.03 กรัม



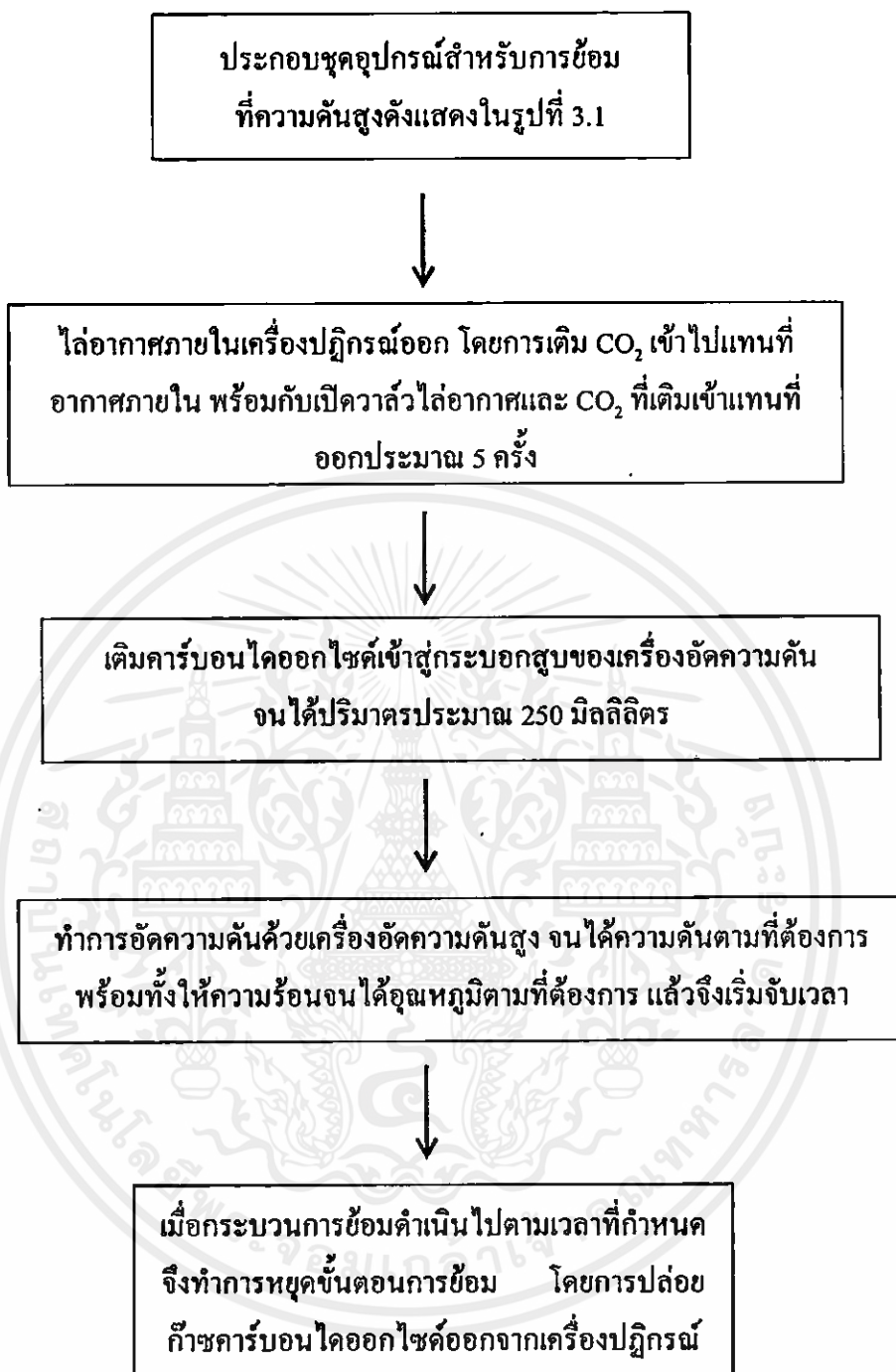
ตัดเส้นใยพอลิเมอร์ให้ได้ความยาว 60 ซม. แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักเส้นใย



บรรจุเส้นใยพอลิเมอร์และสีย้อมลงในเครื่องปฏิกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณฮีตในเส้นใยด้วยเทคนิคยูวี-วิจิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- เส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านการชั่งฮีต
- ตัวทำละลายเอทานอล (AR Grade) ความบริสุทธิ์ 99.9 % จากบริษัท Lab Scan จำกัด
- ขวดกั้นกลม 3 ทาง
- แท่นวางชุดรีฟลักซ์

- เครื่องให้ความร้อน
- สารละลายที่ได้จากการรีฟลักซ์เส้นใย ที่ผ่านการข้อม
- เครื่องยูวี-วิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.3.2 การสกัดสีข้อมออกจากเส้นใยด้วยวิธีการรีฟลักซ์

1) นำเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านการข้อม มาล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดเอาสีที่ติดเกินออกไป จากนั้นฝั่งเส้นใยให้แห้ง แล้วทำการชั่งน้ำหนักเส้นใยที่ได้

2) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ โดยการสกัดเอาสีข้อมออกจากเส้นใย ด้วยวิธีการรีฟลักซ์ในตัวทำละลายเอทานอล ปริมาตร 20 มิลลิลิตร พร้อมทั้งให้ความร้อนที่ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ถึง 10 ชั่วโมง หรือจนกว่าสีข้อมจะละลายออกจากเส้นใยพอลิเมอร์ได้หมด (โดยการเปรียบเทียบจากสีของเส้นใยก่อนผ่านการข้อม

3.2.3.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ได้จากการรีฟลักซ์

1) นำสารละลายที่ได้จากการรีฟลักซ์เส้นใยพอลิเมอร์ ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการข้อม (blank) บรรจุลงในเซลล์ควอทซ์ แล้วเซ็ทค่าการดูดกลืนแสงให้มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยใช้ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 479 นาโนเมตร

2) นำสารละลายที่ได้จากการสกัดเอาสีข้อมออกจากเส้นใยด้วยวิธีการรีฟลักซ์ บรรจุลงในเซลล์ควอทซ์ จากนั้นจึงทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 479 นาโนเมตร

3) บันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณสีข้อมที่ละลายในเส้นใยด้วยการเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมไว้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) และรายงานผลค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ในหน่วย กรัมสีข้อมต่อกรัมพอลิเมอร์

3.2.4 การทดสอบคุณภาพเส้นใยหลังการข้อม

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ เส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการข้อม ที่สภาวะความดัน 15.0 เมกะพาสคาล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที โดยในการทดสอบต้องใช้เส้นใยที่ผ่านการข้อมที่น้ำหนัก 5 กรัม ต่อหนึ่งรายการทดสอบ ซึ่งได้ทำการทดสอบคุณภาพสิ่งทอ 3 รายการ คือ การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ โดยการทดสอบดังกล่าวได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ

3.2.4.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (Colourfastness to Light)

เอกสารนี้เป็น ทดสอบตามมาตรฐาน AATCC Test Method 16-2004 OPTION 3 (20 AATCC FADING UNITS) ซึ่ง เป็นมาตรฐานที่ถูกจัดตั้งขึ้น โดยองค์กรในประเทศสหรัฐอเมริกา ในการทดสอบครั้งนี้ ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์เพื่อเลียนแบบแสงธรรมชาติ ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่ใช้คือ

แหล่งกำเนิดแสงซีนอน (xenon arc lamp) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-750 นาโนเมตร โดยใช้เวลาในการทดสอบ 20 ชั่วโมง และบันทึกผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบสีของเส้นใยที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสเกลสีเทา (gray scale) ซึ่งแบ่งระดับผลการทดสอบไว้ที่ระดับ 1-5 โดยระดับ 1 หมายถึง สีมืดความคงทนต่อแสงต่ำสุด หรือเจดสีทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงต่อแสงได้ดีที่สุด และระดับ 5 หมายถึง สีมืดความคงทนต่อแสงสูงสุด หรือเจดสีทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงต่อแสงได้ต่ำที่สุด

3.2.4.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Colourfastness to Washing)

ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C01 : 1989 (E) ซึ่งได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และประเมินผลโดยพิจารณาความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาวมาตรฐาน (wool reference) 6 ชนิด คือ ACETATE, COTTON, NYLON, POLYESTER, ACRYLIC และ WOOL แล้วบันทึกผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบสีของเส้นใยที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับสเกลสีเทา ซึ่งแบ่งระดับผลการทดสอบไว้ที่ระดับ 1-5 โดย ระดับ 1 หมายถึง สีมืดความคงทนต่อการซักล้างต่ำสุด หรือสีมีการตกติดผ้าขาวมาตรฐานได้ดีที่สุด ระดับ 5 หมายถึง สีมืดความคงทนต่อการซักล้างสูงสุด หรือสีมีการตกติดผ้าขาวมาตรฐานได้ต่ำที่สุด

3.2.4.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (Colourfastness to Perspiration)

ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 1994 (E) ซึ่งการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสามารถแบ่งสถานะของเหงื่อสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบได้ 2 สถานะ คือ

- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีสถานะเป็นกรด
- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีสถานะเป็นเบส

การประเมินผลจะพิจารณาความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาวมาตรฐาน 6 ชนิดคือ ACETATE, COTTON, NYLON, POLYESTER, ACRYLIC และ WOOL แล้วบันทึกผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบสีของเส้นใยที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสเกลสีเทา ซึ่งแบ่งระดับผลการทดสอบไว้ที่ระดับ 1-5 โดย ระดับ 1 หมายถึง สีมืดความคงทนต่อเหงื่อสังเคราะห์ต่ำสุด หรือสีมีการตกติดผ้าขาวมาตรฐานได้ดีที่สุด ระดับ 5 หมายถึง สีมืดความคงทนต่อเหงื่อสังเคราะห์สูงสุด หรือสีมีการตกติดผ้าขาวมาตรฐานได้ต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การนำเสนอผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้ดังนี้คือ การศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิ และความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ พร้อมทั้งใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ และการทดสอบคุณภาพเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการย้อม ด้วยวิธีที่เป็นมาตรฐาน

4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

หัวข้อที่ศึกษา คือ

4.1.1 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์

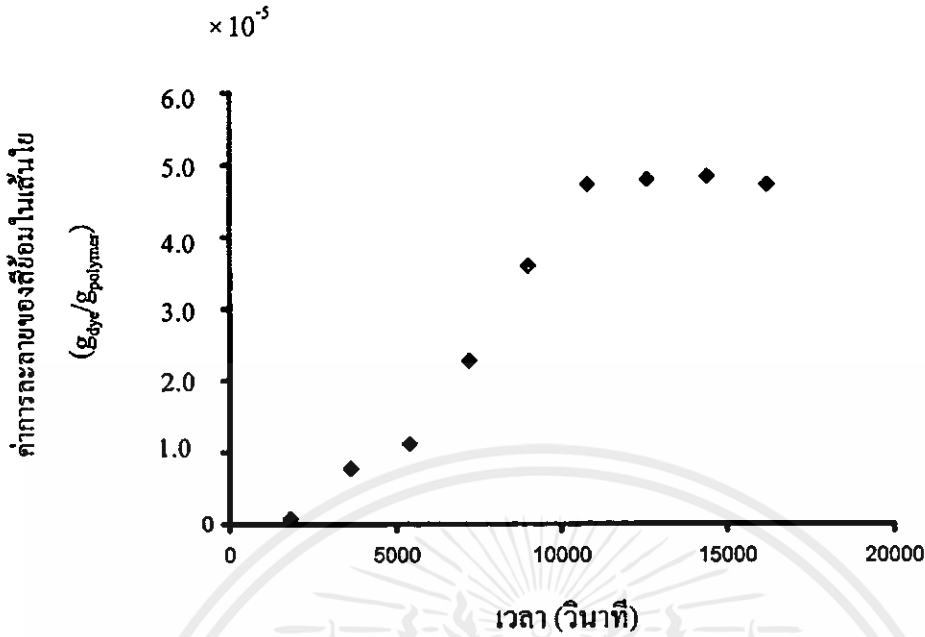
4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

4.1.3 ผลของอุณหภูมิ และความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์

4.1.1 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์

การศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการย้อมสีเส้นใย สามารถหาได้จากการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยทำการทดลองที่สภาวะความดันคงที่ แต่จะทำการปรับเปลี่ยนเวลาในกระบวนการย้อม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่สภาวะความดันคงที่ 15 เมกะพาสกาล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลาในช่วง 30 ถึง 270 นาที โดยเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านการย้อม เมื่อสังเกตจากตาเปล่า พบว่ามีลักษณะการติดของสีย้อมที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเส้นใย ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ (M_t) แสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



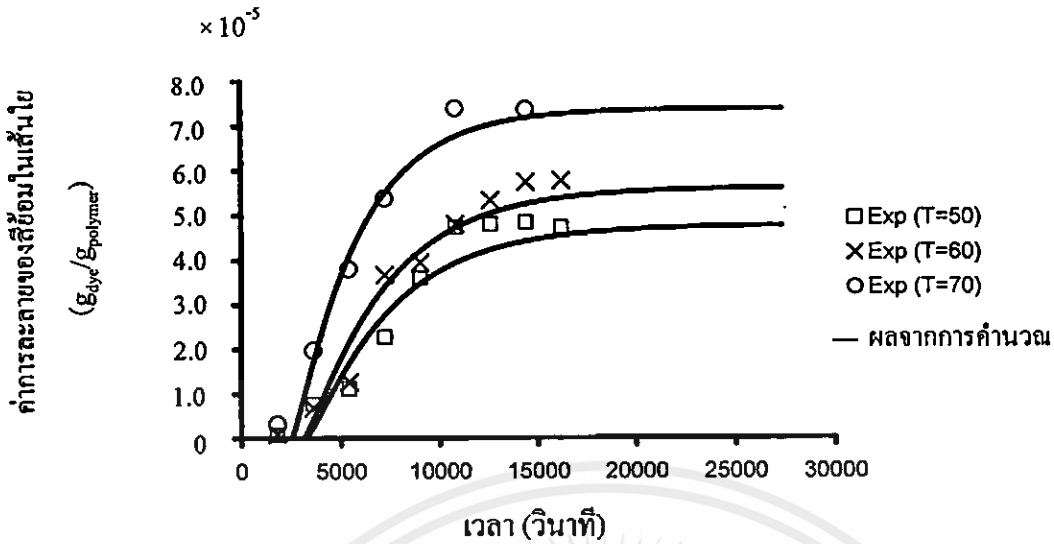
รูปที่ 4.1 ผลของเวลาต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคาล และอุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ (M_t) มีค่าอยู่ในช่วง 50 ไมโครกรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ และยังพบว่า การเพิ่มเวลาในกระบวนการย้อมจะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาจะทำให้สีย้อมมีเวลาในการละลายและอยู่ในสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น นอกจากนี้จากกราฟยังพบว่าที่เวลามากกว่า 180 นาที ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์เริ่มมีค่าคงที่ หรืออาจกล่าวได้ว่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์เริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 180 นาที ดังนั้นที่เวลา 180 นาที จึงถือว่าเป็นเวลาที่เหมาะสม สำหรับใช้ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ สามารถหาได้จากการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยทำการทดลองที่สภาวะความดันคงที่ 15 เมกะพาสคาล อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส เวลาในช่วง 30 ถึง 270 นาที โดยเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านการย้อม เมื่อสังเกตจากตาเปล่าพบว่า มีลักษณะการติดของสีย้อมที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเส้นใย และเส้นใยที่ผ่านการย้อมที่อุณหภูมิสูงยังมีลักษณะการติดของสีย้อมที่เข้มกว่าเส้นใยที่ผ่านการย้อมที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งผลของอุณหภูมิและเวลาต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทางอื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสกาล

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสกาล มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการย้อม โดยที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการละลายอยู่ในช่วง 30 ถึง 75 ไมโครกรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมจะทำให้พลังงานจลน์ของก๊าซสูงขึ้น จึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสีย้อมและโมเลกุลของก๊าซลดลง ดังนั้นสีย้อมจึงเกิดการละลายได้ดีในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พาเอาสีย้อมเข้าไปละลายและย้อมติดในเส้นใยพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น และจากกราฟยังพบว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์เริ่มมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที หรืออาจพิจารณาได้ว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ได้เข้าสู่สมดุล (M_∞) เมื่อเวลาของกระบวนการย้อมมากกว่า 180 นาที ดังนั้นจึงอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ กับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่สมดุล มาทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ได้จากสมการที่ถูกเสนอโดย Hill ดังแสดงในสมการที่ (2.3) [6]

$$M_t/M_\infty = 1 - A \exp(-aDt/r^2) - B \exp(-bDt/r^2) - C \exp(-cDt/r^2) \quad (2.3)$$

เมื่อ M_t คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ($g_{Dye}/g_{Polymer}$)
 M_∞ คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่สมดุล ($g_{Dye}/g_{Polymer}$)
 D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) [7] ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

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

E_D คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (KJ/mole)

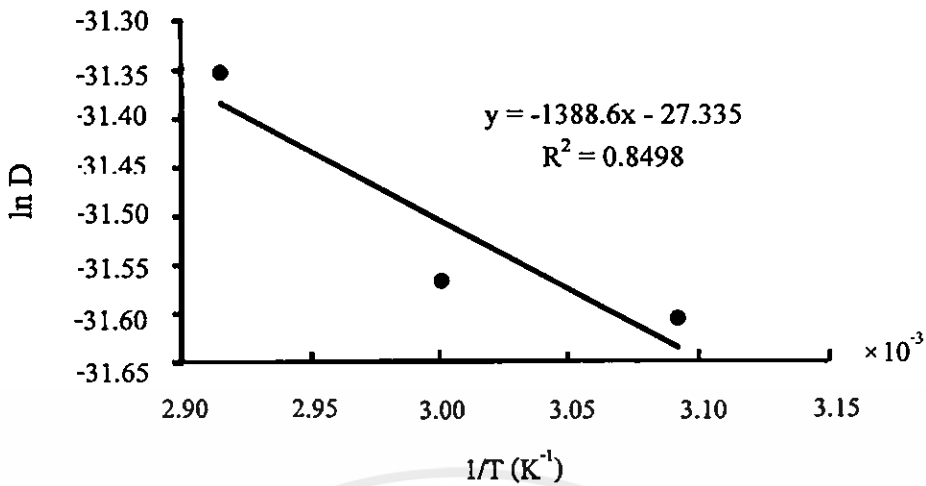
R คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

พลังงานก่อกัมมันต์ (E_D) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการแพร่ของก๊าซ เนื่องจากเป็นพลังงานที่จำเป็นสำหรับให้โมเลกุลของก๊าซแพร่หรือเคลื่อนที่ (jump) ไปอยู่ในตำแหน่งใหม่ (hole) จึงเห็นได้ชัดว่าถ้าเป็นการแพร่ของก๊าซที่มีโมเลกุลใหญ่ จำเป็นต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์ที่มากกว่าการแพร่ของก๊าซโมเลกุลเล็ก ซึ่งค่าคงที่ D_0 และ E_D สามารถหาได้โดยการจัดรูปสมการที่ (2.5) และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ ที่ได้จากการทดลองกับ $1/T$ จะได้สมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_D}{RT} \quad (4.1)$$

จากสมการ (4.1) สามารถนำมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ซึ่งจะได้เป็นสมการเส้นตรง จากนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงนี้ มาหาค่าคงที่ D_0 จากจุดตัดแกน y และค่า E_D/R จากความชันของเส้นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

สมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4.3 คือ

$$\ln D = \frac{-1388.6}{T} - 27.335 \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) พบว่าความชันคือค่า E_p/R มีค่าเท่ากับ -1388.6 หรือ E_p มีค่าเท่ากับ 11.54 KJ/mole ส่วนจุดตัดแกน y คือค่าคงที่ $\ln D_0$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ -27.335 หรือ D_0 มีค่าเท่ากับ $1.34 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ นอกจากนี้ยังสามารถนำเอาสมการที่ (4.2) มาใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียสได้

4.1.3 ผลของอุณหภูมิและความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์

เนื่องจากกลไกที่เกิดขึ้นในการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มี 2 กลไกที่สำคัญคงที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น ดังนั้นการศึกษาถึงผลของค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ โดยการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่สภาวะความดัน 10 12 15 และ 20 เมกะพาสกาล ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาคงที่ 180 นาที พบว่าเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านการย้อม เมื่อสังเกตจากตาเปล่ามีลักษณะการติดของสีย้อมที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเส้นใย และเส้นใยที่ผ่านการย้อมที่อุณหภูมิและความดันสูง จะมีลักษณะการติดของสีแดงที่เข้มกว่าเส้นใยที่ผ่านการย้อมที่อุณหภูมิและความดันต่ำ ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัลของ Sung กับ Shim [8] (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) และค่า

การละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการละลายของสีข้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (y) และ ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ (C) ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	y (g _{dye} /g _{CO2})×10 ⁻⁷	C (g _{dye} /g _{polymer})×10 ⁻⁵
50	10.0	0.18	0.165
	12.0	2.53	1.870
	15.0	9.15	4.732
	20.0	18.00	4.753
60	10.0	0.08	0.989
	12.0	1.04	3.361
	15.0	7.53	4.799
	20.0	21.34	5.013
70	10.0	0.05	1.531
	12.0	0.46	3.609
	15.0	5.69	7.395
	20.0	20.94	7.698

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ การเพิ่มความดันในช่วง 10 ถึง 20 เมกะพาสคาล จะส่งผลให้ค่าการละลายของสีข้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความดันระหว่างกระบวนการข้อมจะทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายที่ดีในการพาเอาสีข้อมแพร่เข้าไปละลาย หรือข้อมติดในเส้นใยพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น

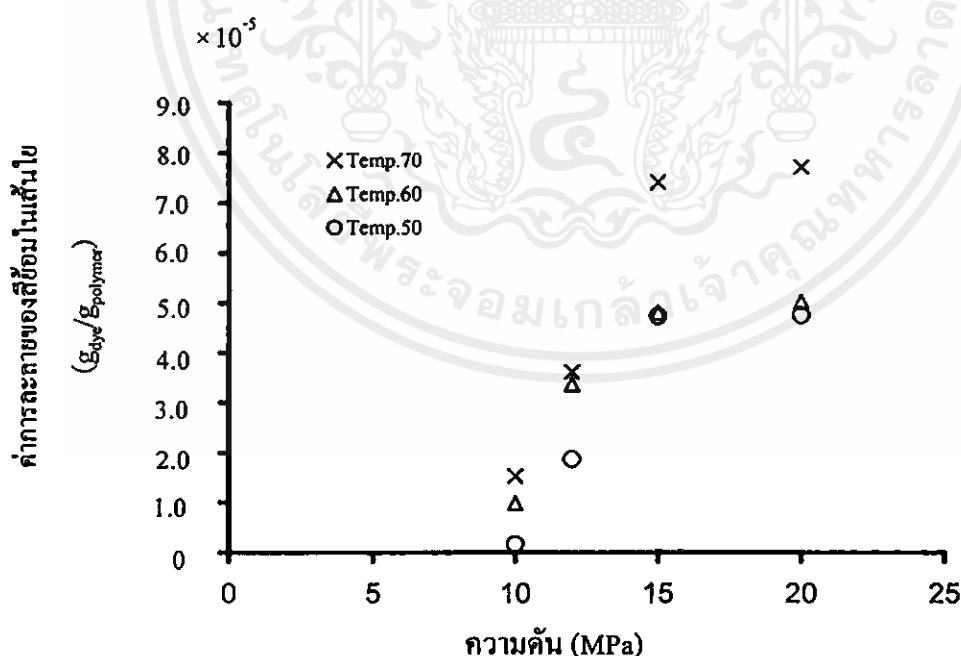
แต่เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิ จะส่งผลให้ค่าการละลายของสีข้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะไปลดความหนาแน่นของก๊าซลง จึงทำให้สีเกิดการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ได้ลดลงเช่นกัน ส่วนค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงก๊าซจะมีความว่องไว และมี

ความสามารถในการแพร่สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยที่แสดงในตารางที่ 4.1

นอกจากนั้นยังพบว่า ในแต่ละอุณหภูมิ ที่ความดันในช่วง 15 ถึง 20 เมกะพาสกาล ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากโครงสร้างภายในของเส้นใยพอลิเมอร์มีความเป็นรูพรุน และมีปริมาณของรูพรุนที่จำกัด ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความดัน ดังนั้นแม้ว่าการเพิ่มความดันจะทำให้สีย้อมละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้น แต่คาร์บอนไดออกไซด์ก็สามารถพาเอาสีแพร่เข้าไปละลายภายในรูพรุนของเส้นใยพอลิเมอร์ได้ในจำนวนที่จำกัด จึงเป็นผลทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ความดันสูงมีค่าคงที่

หรือจากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่าค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ จะมีค่าสูงขึ้นและคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยไม่ขึ้นกับความดัน และในแต่ละอุณหภูมิเมื่อเพิ่มความดัน จะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และยังพบว่าเมื่อกระบวนการย้อมเข้าสู่สมดุล หรือค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์มีค่าคงที่ พบว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มากกว่าความดัน

เมื่อพิจารณาผลของความดันและอุณหภูมิ ที่มีต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มความดันและอุณหภูมิ ส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำเอารูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง มาใช้ประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความดันได้ ซึ่งจะทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

4.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

หัวข้อที่ศึกษา คือ

4.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก พร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

4.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

การแพร่เข้าไปละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับความดัน สามารถทำนายได้โดยอาศัยรูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง โดยการนำเอาข้อมูลการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ได้จากการทดลองที่ความดัน 10 12 15 และ 20 เมกะพาสกาล และที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาคงที่ 180 นาที มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์และความดัน จากนั้นทำการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟ เพื่อหาค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ซึ่งแสดงในสมการที่ (2.16) แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่สภาวะความดันสูงกว่าความดันเหนือจุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟผ่านจุดกำเนิด เพื่อหาค่าคงที่ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสมการจึงต้องทำที่ช่วงความดันเข้าใกล้จุดกำเนิดของเส้นกราฟ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทาง โดยการนำเอาความดันที่จุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์มาลบความดันจริงที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C = C_D + C_H = k_D (P - P_c) + \frac{C'_H b (P - P_c)}{1 + b (P - P_c)} \quad (4.3)$$

เมื่อ C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)

k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)(MPa⁻¹)

b คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างร่วม (Hole affinity constant) (MPa⁻¹)

P คือ ความดันในการทดลอง (MPa)

P_C คือ ความดันวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 7.4 MPa

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

C_D คือ ค่าการละลายแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้ ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)

C_H คือ ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดระดับไมครอน ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)

การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับความดันที่ใช้ สามารถทำได้ โดยการประมาณค่า k_D , C'_H และ b ซึ่งเป็นค่าเฉพาะสำหรับคู่ของสีย้อมและพอลิเมอร์ที่ใช้เท่านั้น โดยค่าคงที่ k_D และ C'_H สามารถหาได้จากการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ช่วงความดันในการทดลองสูง ซึ่งค่าคงที่ k_D คือ ความชันของเส้นกราฟ ค่าคงที่ C'_H คือ จุดตัดแกน y และค่าคงที่ b ได้จากการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟผ่านจุดกำเนิด และค่าคงที่ b ได้จากการประมาณค่าเชิงเส้นตรง แสดงในตารางที่ 4.3 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

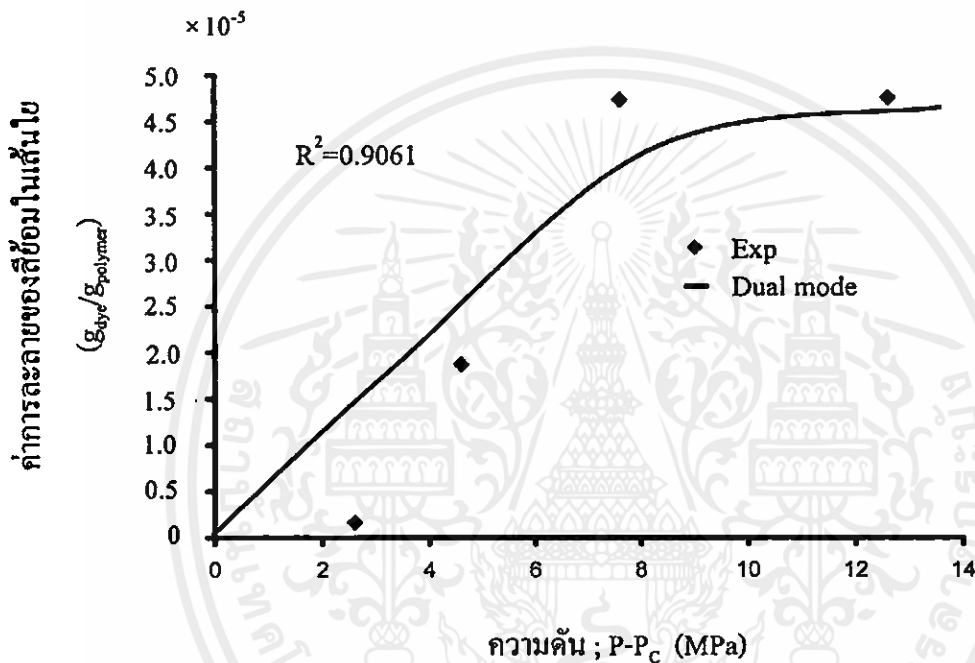
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางสำหรับการย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์

ค่าคงที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)		
	50	60	70
$k_D \left(\frac{g_{Dye}/g_{Polymer}}{MPa} \right)$	5.0×10^{-7}	7.5×10^{-7}	1.25×10^{-6}
$C'_H \left(\frac{g_{Dye}}{g_{Polymer}} \right)$	4.0×10^{-5}	4.1×10^{-5}	5.7×10^{-5}
$b (MPa^{-1})$	0.12	0.158	0.145

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า k_D ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทดลองเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่า k_D มีค่าสูงขึ้นในช่วง 5.0×10^{-7} ถึง 1.25×10^{-6} เนื่องจากค่า k_D เป็นค่าที่ใช้แสดงความสามารถในการละลายตามกฎของเฮนรี ซึ่งโดยปกติจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูง ส่วนค่าคงที่ C'_H แสดงความอิ่มตัวของจำนวนช่องว่างขนาดเล็ก เมื่อมีการดูดซึมของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 10^{-5} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงความสามารถในการละลายได้ของสีย้อมในพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ในช่องว่างขนาดเล็กในสภาวะอิ่มตัวที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ส่วนค่า b ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงความสามารถในการละลายของสีย้อมที่เกิดขึ้น จากความเข้ากันได้ระหว่างรูช่องว่างขนาดเล็ก

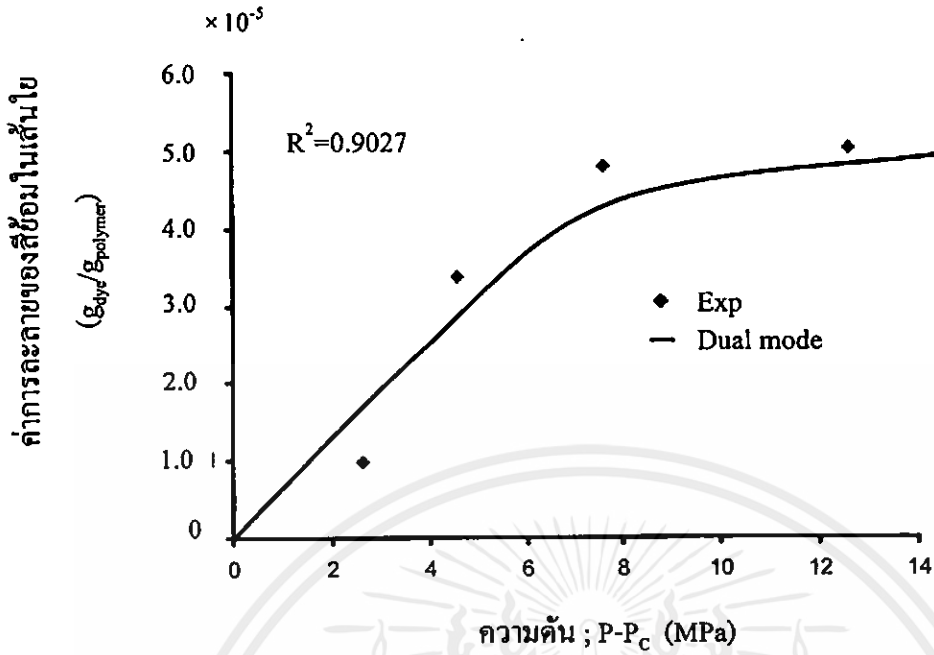
กับโมเลกุลของสีย้อม พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าคงที่ b มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ จะเป็นการทำให้ก๊าซมีพลังงานจลน์สูงขึ้น หรือก๊าซมีความว่องไวมากขึ้น ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงพาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปละลายภายในรูพรุนได้ดีขึ้นนั่นเอง

ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้ กลไกการดูดซึมแบบสองทาง (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) แสดงดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

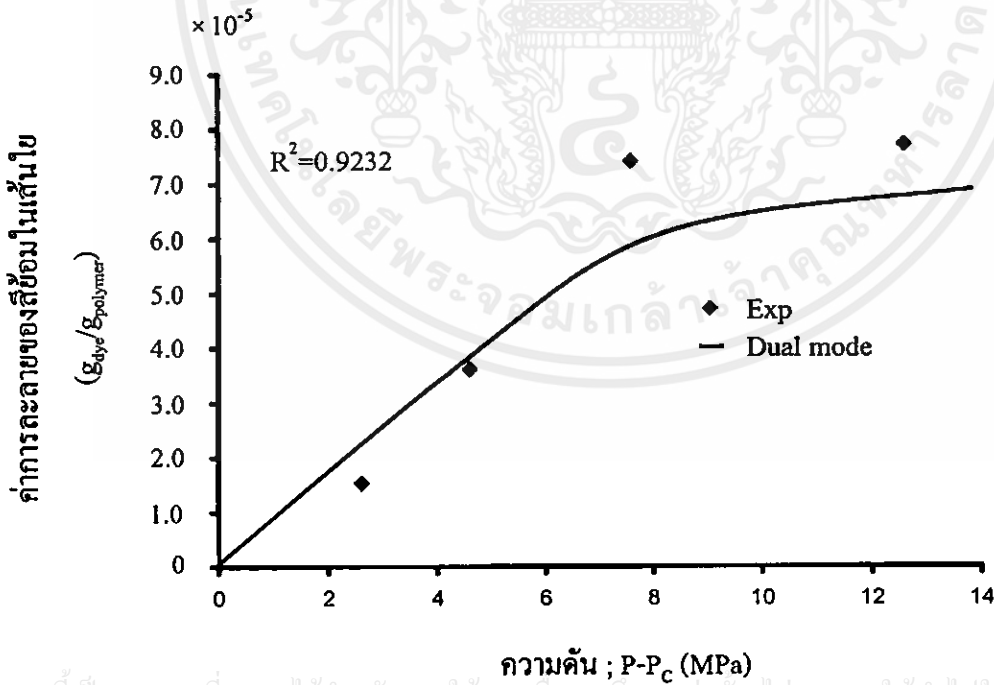


รูปที่ 4.5 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาที่ 50 °C และ 180 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



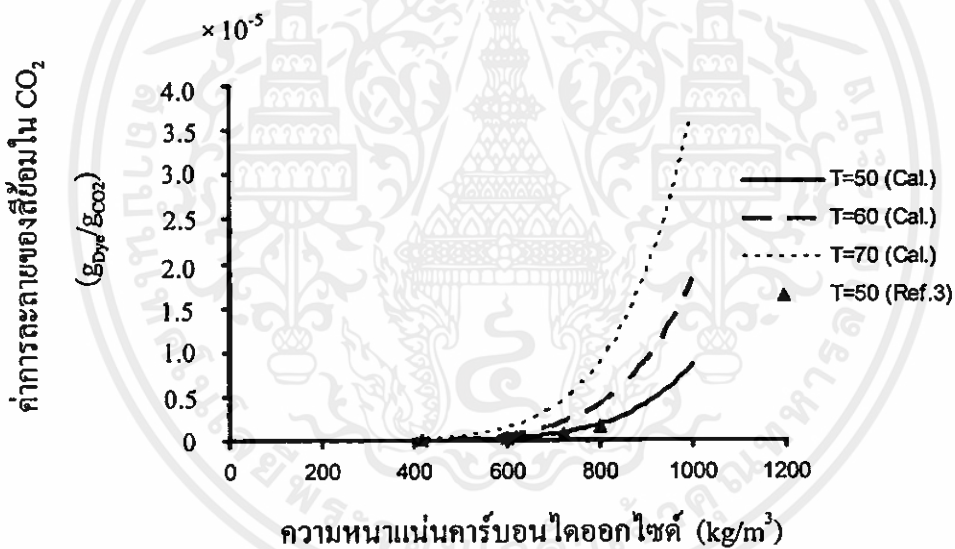
รูปที่ 4.6 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 60 °C และ 180 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 70 °C และ 180 นาที ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 พบว่าในช่วงเริ่มต้นขณะที่ความดันในการทดลองต่ำ ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการละลายแบบปกติของสารที่สามารถแพร่ได้ อธิบายได้ด้วยกฎของเฮนรี (Henry's law) โดยทำนายค่าการละลายในช่วงต้นได้จากค่าคงที่ของเฮนรี (k_D) และเมื่อความดันอยู่ในช่วง 15 ถึง 20 เมกะพาสกาล จะพบว่าค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์เริ่มคงที่ ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของ Lagmuir โดยจะเป็นการดูดซึมของโมเลกุลสีย้อมกับรูช่องว่างภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ซึ่งขึ้นกับค่าคงที่ C_H และ b ตามลำดับ

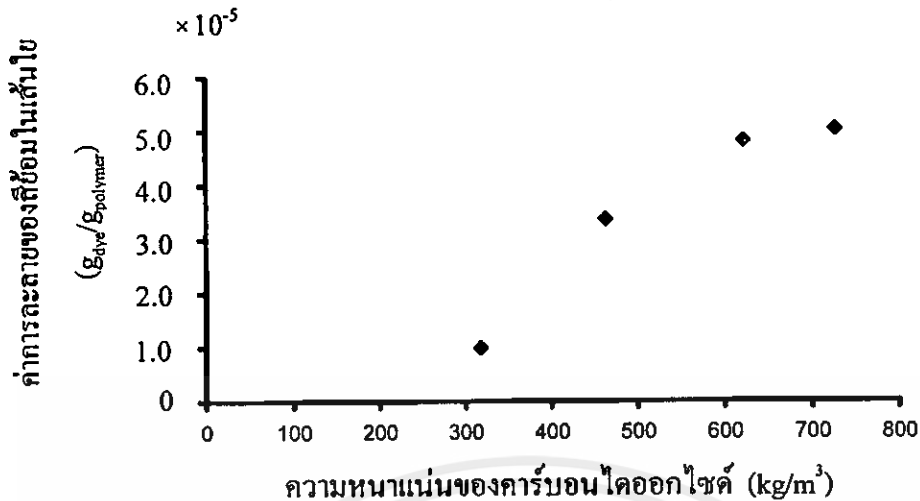
นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเพิ่มเติมถึงความหนาแน่นของก๊าซ ที่มีความสัมพันธ์กับทั้งความดันและอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของก๊าซที่เป็นผลมาจากความดันในการทดลองที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถนำสมการที่ (2.10) ซึ่งเป็นสมการอย่างง่ายที่ถูกเสนอโดย Sung และ Shim [8] มาใช้เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ได้ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ

จากความสามารถในการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันผลการทดลองได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ กับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.9 พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลมาจากการเพิ่มความดันในการย้อม จะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเริ่มคงที่เมื่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่า 650 kg/m^3 (หรือความดันมากกว่า 15 MPa) ถึงแม้ว่าค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความหนาแน่นของก๊าซสูงขึ้นก็ตาม เนื่องจากภายในเส้นใยพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่มีรูพรุน และจำนวนรูพรุนมีอยู่อย่างจำกัด ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความดันในการย้อม ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงพาเอาสีแพร่เข้าไปละลายหรือย้อมติดภายในรูพรุนได้ในปริมาณที่จำกัด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ได้เข้าสู่สมดุลภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้ทำให้ในการพิจารณาความสามารถในการย้อม ต้องทำการเปรียบเทียบทั้งความสามารถในการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ และความสามารถในการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ไปพร้อมๆกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้แสดงผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในกระบวนการย้อมด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ซึ่งจะได้อธิบายผลการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก พร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก เป็นอัตราส่วนหรือจำนวนเท่าของมวลสีย้อมที่สามารถละลายในพอลิเมอร์ต่อมวลสีย้อมที่ละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากกลไกการดูดซึมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีสองกลไกคือ กลไกแรกเมื่อทำการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป สีย้อมจะเกิดการละลายในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก่อน และกลไกที่สองคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นตัวกลางในการพาเอาสีย้อมเข้าไปย้อมหรือแพร่เข้าไปในตัวอย่างเส้นใยพอลิเมอร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ดังนั้นจึงสามารถนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก มาใช้บ่งชี้ความสามารถในการย้อมเช่น เมื่อต้องการเปรียบเทียบความสามารถของสีย้อมชนิดต่างๆเมื่อย้อมเส้นใยชนิดเดียวกัน หรือเปรียบเทียบความสามารถในการติดสีของเส้นใยชนิดต่างๆเมื่อทำการย้อมด้วยสีย้อมชนิดเดียวกัน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกจึงสามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของสีย้อมหรือชิ้นงานพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะในการทดลองได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสามารถหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$K = \frac{w_i^P}{w_i^F} \quad (2.20)$$

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

w_i^P คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ($g_{Dye}/g_{Polymer}$)

w_i^F คือ ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})

ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ w_i^F สามารถได้จากสมการอย่างง่าย (empirical equation) ของ Sung และ Shim [8] ส่วนค่า w_i^P สามารถได้จากค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จากประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก แสดงในตารางที่ 4.4 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ค่าการละลายของ สีย้อมในเส้นใย ($g_{Dye}/g_{Polymer}$) $\times 10^{-5}$	ค่าการละลายของ สีย้อมใน คาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2}) $\times 10^{-7}$	สัมประสิทธิ์ การแบ่งแยก $\frac{(g_{Dye}/g_{Polymer})}{(g_{Dye}/g_{CO_2})}$
50	10.0	0.165	0.18	91.7
	12.0	1.870	2.53	73.9
	15.0	4.732	9.15	51.7
	20.0	4.753	18.00	26.4

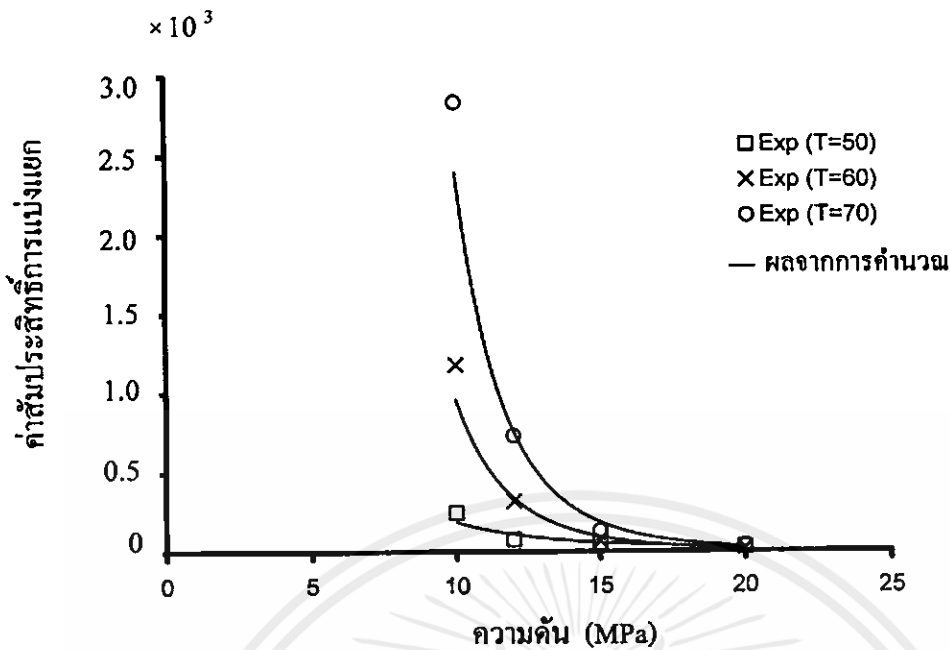
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความ ดัน (MPa)	ค่าการละลายของ สีข้อมในเส้นใย ($g_{Dye}/g_{Polymer}$) $\times 10^{-5}$	ค่าการละลายของ สีข้อมใน คาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2}) $\times 10^{-7}$	สัมประสิทธิ์ การแบ่งแยก ($g_{Dye}/g_{Polymer}$) (g_{Dye}/g_{CO_2})
60	10.0	0.989	0.08	1240
	12.0	3.361	1.04	323
	15.0	4.799	7.53	63.7
	20.0	5.013	21.34	23.5
70	10.0	1.531	0.05	3060
	12.0	3.609	0.46	785
	15.0	7.395	5.69	130
	20.0	7.698	20.94	36.8

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ การเพิ่มความดันจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ค่าการละลายของสีข้อมในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์กลับมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนาแน่นของก๊าซมีค่าต่ำลง และส่งผลให้การละลายของสีข้อมในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์กลับมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นรูปแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่อุณหภูมิ ความดันต่างๆ และเวลาคงที่ 180 นาที



รูปที่ 4.10 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก
ที่เวลาคงที่ 180 นาที

จากรูปที่ 4.10 เมื่อทำการพิจารณาค่าความสามารถในการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ กับความสามารถในการละลายของสีข้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ พบว่าในช่วงความดันต่ำกว่า 12 เมกะพาสคาล ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าสูงมาก ทำให้ต้องใช้สีในการข้อมเป็นปริมาณมาก แต่ในช่วงความดัน 12 ถึง 15 เมกะพาสคาล ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณการใช้สีข้อมและเวลาในกระบวนการข้อมให้น้อยลงได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าในช่วงความดัน 12 ถึง 15 เมกะพาสคาล เป็นความดันที่เหมาะสมในกระบวนการข้อม

นอกจากนั้นยังสามารถทำนายได้ว่า เมื่อเพิ่มความดันมากกว่า 20 เมกะพาสคาล ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะที่สภาวะความดันสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความหนาแน่นมาก ดังนั้นจึงทำให้สีข้อมเพียงปริมาณเล็กน้อยก็สามารถเกิดการละลายในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง ในขณะที่สีข้อมกลับละลายในพอลิเมอร์ได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการเพิ่มความดัน เพราะรูพรุนหรือช่องว่างภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์มีจำนวนจำกัด ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความดัน จึงส่งผลให้โมเลกุลของสีไม่สามารถแพร่เข้าไปข้อมติดได้มากขึ้นเนื่องจากพื้นผิวในการดูดซับมีจำกัด หรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาณของสีข้อมที่ละลายในพอลิเมอร์ ได้เข้าสู่สมดุลภายในรูช่องว่างขนาดเล็กของโครงสร้างพอลิเมอร์ ดังนั้นการข้อมสีที่สภาวะความดันสูงเกินไป แม้ว่าจะลดปริมาณการใช้สีข้อมและลดเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการข้อมลงได้ แต่ก็เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการอัดความดัน อีกทั้งค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ใกล้เคียงกับค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ในช่วงความดัน 12 ถึง 15 เมกะพาสคาล

4.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยพอลิเมอร์หลังการย้อม

วัสดุหรือผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีความทนต่อแสงได้ในระดับที่แตกต่างกัน เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางเคมีและส่วนประกอบของโครงสร้างที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามแม้ว่าตัววัสดุจะมีความทนต่อแสงได้ดี แต่ก็มีปัจจัยภายนอกที่สามารถส่งผลให้ความทนต่อแสงของวัสดุนั้นลดลงได้ เช่น การเติมสารเติมแต่งต่างๆ เจือปนลงในวัสดุระหว่างการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นแสงแดด การซักล้าง การซักแห้ง เหงื่อ หรือ น้ำทะเล ยังส่งผลต่อการซีดจางของสีย้อมได้อีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบความทนของสีย้อมต่อแสง (Colourfastness to Light) การซักล้าง (Colourfastness to Washing) และ เหงื่อ (Colourfastness to Perspiration) ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการระบุคุณภาพของสิ่งทอที่ผ่านกระบวนการย้อมสี

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพของเส้นใยพอลิเมอร์ในงานวิจัยครั้งนี้คือ เส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการย้อมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่สภาวะความดัน 15.0 เมกะพาสกาล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 180 นาที สีย้อมที่ใช้คือ C.I. Disperse Red 1 โดยในการทดสอบต้องใช้เส้นใยที่ผ่านการย้อมที่น้ำหนัก 5 กรัม ต่อหนึ่งรายการทดสอบ ซึ่งได้ทำการทดสอบคุณภาพสิ่งทอ 3 รายการ คือ

- 4.3.1 การทดสอบความทนของสีต่อแสง (Colourfastness to Light)
- 4.3.2 การทดสอบความทนของสีต่อการซักล้าง (Colourfastness to Washing)
- 4.3.3 การทดสอบความทนของสีต่อเหงื่อ (Colourfastness to Perspiration)

ผลที่ได้จากการทดสอบคุณภาพของเส้นใยพอลิเมอร์แสดงในหัวข้อดังนี้คือ

4.3.1 การทดสอบความทนของสีต่อแสง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความทนของสีต่อแสงตามมาตรฐาน AATCC TM 16:2004 OPTION 3 (20 AATCC FADING UNITS) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่จัดตั้งโดยองค์กรในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยในการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์เพื่อเลียนแบบแสงธรรมชาติ ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่ใช้คือ แหล่งกำเนิดแสงซีนอน (xenon arc lamp) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400- 750 นาโนเมตร โดยใช้เวลาในการทดสอบ 20 ชั่วโมง และบันทึกผลการทดสอบโดยใช้การสอบเทียบระดับสีที่เปลี่ยนแปลงกับสเกลสีเทา (gray scale) ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง

ความคงทนของสีต่อแสง : ทดสอบตามมาตรฐาน AATCC TM 16 :2004 OPTION 3
(20 AATCC Fading UNITS)

สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	3-4*
--------------------------	------

ผลที่ได้จากการประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง พบว่าได้ผลอยู่ที่ระดับ 3-4 ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับปานกลางถึงดี

4.3.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

ทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างตามมาตรฐาน ISO 105-C01 : 1989 (E) ซึ่งได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และประเมินผลโดยพิจารณาความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาวมาตรฐาน 6 ชนิด คือ ACETATE, COTTON, NYLON, POLYESTER, ACRYLIC และ WOOL และบันทึกผลการทดสอบโดยใช้การสอบเทียบระดับสีที่เปลี่ยนแปลงกับสเกลสีเทา ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

ความคงทนของสีต่อการซัก : ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C01 : 1989(E)

สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4-5
--------------------------	-----

ผลที่ได้จากการประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง พบว่าได้ผลอยู่ที่ระดับ 4-5 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับที่ดีถึงดีมาก

4.3.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

ทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อตามมาตรฐาน ISO 105-E04:1994 (E) ซึ่งการทดสอบความคงทนของสีต่อ เหงื่อ สามารถแบ่งสถานะของเหงื่อสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบได้ 2 สถานะ คือ

- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีสถานะเป็นกรด
- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีสถานะเป็นเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม การประเมินผลจะพิจารณาที่ความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาวมาตรฐาน 6 ชนิด คือ ACETATE, COTTON, NYLON, POLYESTER, ACRYLIC และ WOOL

COTTON, NYLON, POLYESTER, ACRYLIC และ WOOL และบันทึกผลการทดสอบโดยใช้การสอบเทียบระดับสีที่เปลี่ยนแปลงกับสเกลสีเทา ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์

ความคงทนของสีต่อเหงื่อ : ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 1994 (E) #

สภาวะต่าง สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4-5
สภาวะกรด สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4-5

หมายเหตุ: - ผลการทดสอบที่มีการทำเครื่องหมาย # ในรายงานผลการทดสอบ หมายถึง เป็นผลการทดสอบที่อยู่ในขอบข่ายที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน มอก. 17025-2548 จากสำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ผลที่ได้จากการประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ สังเคราะห์ที่สภาวะต่างและสภาวะกรด ได้ผลอยู่ที่ระดับ 4-5 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์อยู่ในระดับที่ดีถึงดีมาก

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบคุณภาพสิ่งทอที่ได้จากงานวิจัยนี้ มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคุณภาพสิ่งทอที่ได้จากจากงานวิจัยของ M.Rita De Giorgi และคณะ [18] ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบคุณภาพเส้นใยหลังการย้อมกับงานวิจัยอื่น

แหล่ง ข้อมูล	Dyeing in supercritical CO ₂				Dyeing in water (120 °C ,dispersing agent, 1h)			
	Washing		Perspiration		Washing		Perspiration	
	40 °C	60 °C	Acid	Alkali	40 °C	60 °C	Acid	Alkali
M.Rita De Giorgi และ คณะ [18]	5	5	5	5	5	5	5	5
M.Rita De Giorgi และ คณะ [18]	5	5	5	5	5	5	5	5
M.Rita De Giorgi และ คณะ [18]	5	5	5	5	5	5	5	5
[ผลการ ทดลอง]	4-5	-	4-5	4-5	-	-	-	-

หมายเหตุ :- ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยของ M. Rita De Giorgi และคณะ คือ เส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ย้อมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ความดัน 24 MPa อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที และ เส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ย้อมด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการเติมสารช่วยกระจายตัวสี

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการย้อมสีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต วิกฤต ที่ความดัน 15 เมกะพาสกาล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที โดยใช้สีย้อม C.I. Disperse Red 1 กับข้อมูลการทดสอบของ M.Rita De Giorgi และคณะ พบว่ามีค่าความคงทนของสีต่อการซักล้าง และความคงทนของสีต่อเหงื่ออยู่ในระดับดีถึงดีมาก และเมื่อเปรียบเทียบค่าความคงทนของสีต่อการซักล้าง และความคงทนของสีต่อเหงื่อ ของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการย้อมด้วยตัวกลางน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และมีการเติมสารช่วยกระจายตัวของสี พบว่ามีค่าอยู่ในระดับดีถึงดีมากเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ด้วยสีย้อมชนิดเอโซ ชื่อ C.I. Disperse Red 1 โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวกลางในกระบวนการย้อมแทนที่น้ำ พบว่าเส้นใยที่ผ่านการย้อม มีการติดของสีย้อมที่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย และพบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนสภาวะการย้อมที่ความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้น พบว่าเส้นใยมีลักษณะการติดของสีแดงที่เข้มมากกว่าเส้นใยที่ผ่านการย้อมที่สภาวะความดันและอุณหภูมิต่ำ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1.1 ผลการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

5.1.1.1 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใย

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ 15 เมกะพาสกาล และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มเวลาในกระบวนการย้อมจะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้น และพบว่าที่เวลามากกว่า 180 นาที ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเริ่มมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงถือว่าเวลา 180 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

5.1.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการทดลองย้อมสีเส้นใย ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสกาล อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 ถึง 270 นาที พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดังนี้คือ 1.88×10^{-14} 1.95×10^{-14} และ 2.42×10^{-14} m^2/s ตามลำดับ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ประมาณค่าได้จากผลการทดลอง ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้สามารถทำนายได้ด้วยสมการของอาร์เรเนียส มีค่า D_0 เท่ากับ 1.34×10^{-12} m^2/s และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_0) เท่ากับ 11.54 KJ/mole ตามลำดับ และยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น

5.1.1.3 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย

จากการทดลองย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ความดัน 10 12 15 และ 20 เมกะพาสกาล อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาคงที่ 180 นาที พบว่าการเพิ่มความดัน และอุณหภูมิ ส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเอสเตอร์มีค่าสูงขึ้น และจากการคำนวณพบว่าได้ค่าการละลายของสีย้อม

ในการ์บอนไดออกไซด์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 2.0 ไมโครกรัมสีต่อกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 75 ไมโครกรัมสีต่อกรัมพอลิเมอร์

5.1.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

5.1.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

ผลที่ได้การใช้รูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง เพื่อใช้ทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ที่ผ่านการย้อมที่สภาวะความดัน 10 12 15 และ 20 เมกะพาสคาล อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาที่ 180 นาที พบว่าได้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยในช่วง 30 ถึง 75 ไมโครกรัมสีต่อกรัมพอลิเมอร์

5.1.2.2 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

พบว่า การเพิ่มความดันและอุณหภูมิในขั้นตอนการย้อม ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันและอุณหภูมิในกระบวนการย้อม ทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเอสเตอร์มีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกและเริ่มคงที่ ในขณะที่ค่าการละลายของสีย้อมในการ์บอนไดออกไซด์กลับมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใย ต่อค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกยังสามารถใช้ทำนายความดันที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย้อมคือ ที่ 12 ถึง 15 เมกะพาสคาล

5.1.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยหลังการย้อม

5.1.3.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (Colourfastness to Light)

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง พบว่าได้ผลอยู่ที่ระดับ 3 – 4 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับปานกลางถึงดี

5.1.3.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Colourfastness to Washing)

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง พบว่าได้ผลอยู่ที่ระดับ 4 – 5 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับดีถึงดีมาก

5.1.2.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (Colourfastness to Perspiration)

แสดงผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ พบว่าค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่สภาวะต่าง และที่สภาวะกรดได้ผลอยู่ที่ระดับ 4-5 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อเหงื่ออยู่ในระดับที่ดีถึงดีมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เปลี่ยนชนิดของเส้นใยพอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยฝ้าย หรือ ไหม พร้อมทั้งเลือกชนิดสีย้อมให้เหมาะสมกับชนิดของเส้นใย เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการละลายของสีย้อม
- ปรับเปลี่ยนสภาวะในการทดลองพร้อมทั้งทำการบันทึกเจดสีต่างๆ ที่ย้อมได้ในแต่ละสภาวะเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกเจดสี และปรับปรุงคุณภาพเส้นใยที่ผ่านกระบวนการย้อมให้สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอได้ต่อไปในอนาคต
- ทำการศึกษาการประยุกต์การใช้งานของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในการช่วยย้อมสารเคมีชนิดอื่นๆ เช่น อนุภาคนาโน หรือสารเติมแต่งต่างๆ ที่ไม่เสถียรต่อความร้อนในขั้นตอนการย้อมแบบปกติ เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพเส้นใย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Smith, J.M., Van Ness, H.C. and Abbott, M.M. 2500. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**. 7th. London : Mc Graw Hill.
- [2] Yonus, A. and Michael, A. 2546. **Thermodynamics**. London : Mc Graw Hill.
- [3] Takashi, S. and Kazuhiro, T. "Solubilities of C.I. Disperse Red 1 and C.I. Disperse Red 13 in Supercritical carbon dioxide.", **Fluid Phase Equilibria**, vol. 213, 2003, pp. 115-123.
- [4] Kirk, O. 1991. **Encyclopedia of Chemical Technology**. 4th. New York : John Wiley.
- [5] Frederick, J., Francis, S., 2000. **Encyclopedia of Food Science and Technology**. 2nd. New York : John Wiley.
- [6] Wolf, R. 1991. **Diffusion In and Through Polymers**. New York : Hanser Publishers.
- [7] Donald, G., Dimitris, I., 1998. **Polymer Processing Principles and Design**. New York : John Wiley.
- [8] Sung, H.D. and Shim, J.J. "Solubilities of C.I. Disperse Red 60 and C.I. Disperse Blue 60 in Supercritical carbon dioxide.", **Chem Eng Data**, vol 44, 1999, pp.985- 989
- [9] Ferri, A., Banchemo, M., Manna, L and Sicardi, S. "An experimental technique for measuring high solubilities of dyes in supercritical carbon dioxide.", **The Journal of Supercritical Fluids**, vol. 37, 2003, pp. 107-114.
- [10] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. "ความรู้พื้นฐานเคมีเส้นใยสิ่งทอ.", **Colour Way**, vol. 8, no. 45, 2003. pp. 13-17.
- [11] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2544. **อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [12] อังคณา อมรศรี. "Colour Chemistry.", **Colour Way**, vol. 8, no. 45, 2003. pp. 21-24.
- [13] อังคณา อมรศรี. "Colour Chemistry.", **Colour Way**, vol. 8, no. 46, 2003. pp. 14-16.
- [14] ศิริวรรณ กิตตินวรัตน์. "Colour Fastness to Light and Perspiration.", **Colour Way**, vol. 8, no. 43, 2002. pp. 45-50.
- [15] Oliveira, N.S., Oliveira, J., Gomes, T., Ferreira, A., Dorgan, J. and Marrucho, I.M. "Gas sorption in poly(lactic acid) and packaging materials.", **Fluid Phase Equilibria**, vol. 222-223, 2004, pp. 317-324.

- [16] Bohning, M., Goering, H., Hao, N., Mach, R., Oleszak, F. and Schonhal, A. "Molecular mobility and gas transport properties of polycarbonate-based nanocomposites.", **Rev. Adv. Mater. Sci.**, vol. 5, 2003, pp.155-159.
- [17] Fasihi, J., Yamini, Y., Nourmohammadian, F. and Bahramifar, N. "Investigations on the solubilities of some disperse azo dyes in supercritical carbon dioxide .", **Dyes and Pigments**, vol. 63, 2004, pp.161-168.
- [18] Rita De Giorgi, M., Cadoni, E., Maricca, E. And Piras, A. "Dyeing polyester fibres with disperse dyes in supercritical CO₂." **Dyes and Pigments**, vol. 45, 2000, pp.75-79.
- [19] Von Schnitzler, J. and Eggers, R. "Mass transfer in polymers in supercritical carbon dioxide atmosphere.", **The Journal of Supercritical Fluids**, vol. 16, 1999, pp.81-92.
- [20] Woo Park, M. and Kwang Bae, H. "Dye distribution in supercritical dyeing with carbon dioxide.", **The Journal of Supercritical Fluids**, vol. 22, 2006, pp.65-73.
- [21] Ozcan, A.S. and Ozcan, A. "Adsorption behavior of a disperse dye on polyester in supercritical carbon dioxide.", **The Journal of Supercritical Fluids**, vol. 32, 2005, pp. 1-7.
- [22] Kyung Kim, T., Son Young, A. and Jin Lim, Y. "Thermodynamic parameters of disperse dyeing on several polyester fibers having different molecular structures.", **Dyes and Pigments**, vol. 67, 2005, pp.229-234.
- [23] Fleming, O.S., Kazarian, S.G., Bach, E and Schollmeyer, E. "Confocal Raman study of poly(ethylene terephthalate) fibres dyed in supercritical carbon dioxide : dye diffusion and polymer morphology." **Polymer**, vol. 10, 2005, pp. 1-7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

การคำนวณความเข้มข้นของสีย้อมเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

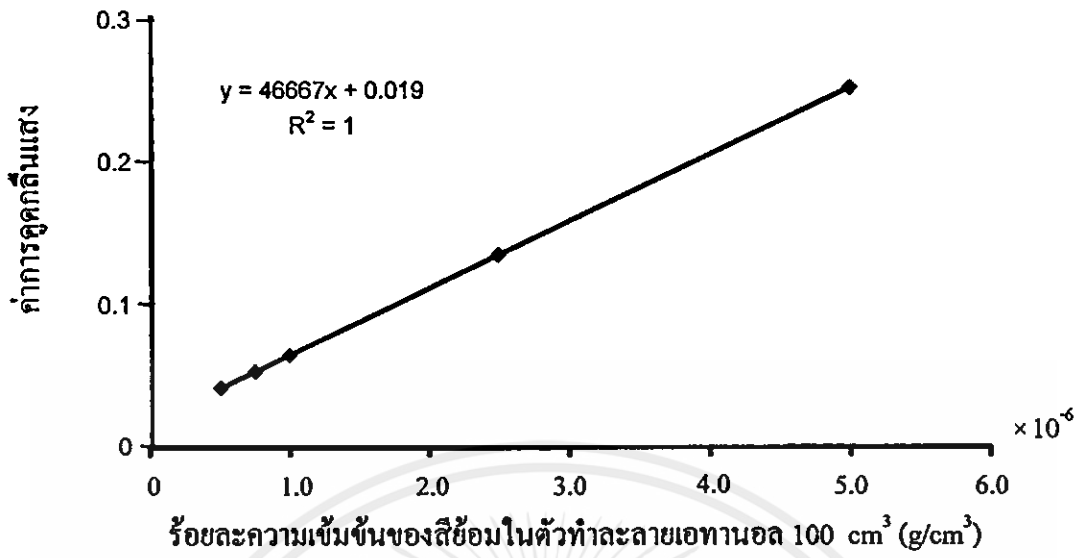
ขั้นตอนการเตรียมความเข้มข้นสีย้อม

1) ทำการเตรียมความเข้มข้นของสีย้อมในตัวทำละลายเอทานอล ให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 5.0×10^{-4} กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อใช้เป็น Stock Solution โดยการชั่งผงสีน้ำหนัก 0.05 กรัม จากนั้นนำมาเจือจางในตัวทำละลายเอทานอล ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะได้ความเข้มข้นของสารละลาย (Stock Solution) เป็น 5.0×10^{-4} กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วจึงทำการเจือจาง Stock Solution จนได้ความเข้มข้นของสีย้อมในช่วง 0.5 ถึง 5.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงนำสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ มาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงในตาราง ก. 1 ส่วนกราฟมาตรฐานของสีย้อม แสดงในรูปที่ ก. 1

ตาราง ก. 1 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ

ร้อยละความเข้มข้นของสีย้อมในตัวทำละลาย เอทานอล $100 \text{ cm}^3 (\text{g/cm}^3) \times 10^{-6}$	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 479 นาโนเมตร
5.0	0.239
2.50	0.115
1.0	0.042
0.75	0.029
0.50	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก. 1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม C.I. Disperse Red 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
การคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ (Dye solubility)

ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ สามารถคำนวณได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$C = \frac{\text{ร้อยละความเข้มข้นของสีที่สกัดแยกมาแล้ว (g/cm}^3)}{100} \times \frac{V}{W} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ (g Dye/ g Polymer)

V คือ ปริมาตรเอทานอลที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (มิลลิลิตร)

W คือ น้ำหนักเส้นใยพอลิเมอร์ก่อนย้อม (กรัม)

จากสมการ (ข.1) พบว่ามีเพียงค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยกมาแล้วเท่านั้นที่ไม่ทราบค่า ซึ่งสามารถหาได้จากการสร้างกราฟมาตรฐานของสีย้อม ดังแสดงในภาคผนวก ก. ซึ่งสมการของกราฟมาตรฐานของสีย้อมคือ

$$y = 46667x + 0.019$$

เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 479 นาโนเมตร

x คือ ร้อยละความเข้มข้นของสีย้อมที่สกัดแยกมาแล้ว (g/cm³)

เมื่อนำเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการย้อมสีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มาทำการสกัดเอาสีย้อมออกจากเส้นใยด้วยวิธีการรีฟลักซ์ในตัวทำละลายเอทานอล จนสีย้อมละลายออกจากเส้นใยหมด แล้วนำสารละลายที่ได้จากการรีฟลักซ์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเทคนิคยูวี-วิชิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จะทำให้ทราบค่า y แล้วจึงแก้สมการหาค่า x หรือ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดแยกมาแล้วแสดงในตาราง ข.1

ตาราง ข. 1 แสดงค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสี้อมที่สกัดแยกมาแล้ว

อุณหภูมิในการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ความดันในการทดลอง (เมกะพาสกาล)	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 479 นาโนเมตร	ร้อยละความเข้มข้น ของสี้อมที่สกัดแยก มาแล้ว (g/cm^3) $\times 10^{-6}$
50	10.0	0.021	0.043
	12.0	0.043	0.514
	15.0	0.072	1.140
	20.0	0.080	1.310
60	10.0	0.031	0.257
	12.0	0.059	0.857
	15.0	0.075	1.200
	20.0	0.081	1.330
70	10.0	0.039	0.429
	12.0	0.067	0.103
	15.0	0.107	1.890
	20.0	0.116	2.080

ตัวอย่างการคำนวณค่าการละลายของสี้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ผ่านกระบวนการย้อมที่สภาวะความดัน 15 เมกะพาสกาล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที และเส้นใยก่อนทำการย้อมมีน้ำหนัก 0.0048 กรัม เมื่อทำการสกัดแยกเอาสี้อมออกจากเส้นใยด้วยการรีฟลักซ์ในตัวทำละลายเอทานอลปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยก่อนนำสารละลายที่สกัดได้จากการรีฟลักซ์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงต้องทำการปรับปริมาตรสารละลายให้ได้ 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 479 นาโนเมตร ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.072 เมื่อแทนค่าในสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน จะได้ร้อยละความเข้มข้นของสี้อมที่สกัดแยกมาแล้ว มีค่าเท่ากับ 1.14×10^{-6} (g/cm^3) และสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของสี้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ได้ดังสมการที่ (ข.1) ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{1.14 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3}{100} \times \frac{20 \text{ cm}^3}{0.0048 \text{ g}} = 4.732 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{gDye}}{\text{gPolymer}} \right) \quad (\text{ข.2})$$

โดยสรุปค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ความดัน 15 เมกะพาสกาล และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 4.732×10^{-5} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ สำหรับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการทดลองในสภาวะอื่นๆก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัด (Compressibility Factor, z) ของคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤต

1. ค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัด (Compressibility Factor, z) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$z = z^0 + \omega z^1 \quad (\text{ก.1})$$

z คือ ค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัด

z^0 และ z^1 คือ correlation factor

ω คือ อะเซนตริกแฟกเตอร์

เปิดตารางหาค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ความดันวิกฤต (P_c) และ ω ของคาร์บอนไดออกไซด์

$$T_c = 304 \text{ เคลวิน}$$

$$P_c = 7.4 \text{ เมกะพาสกาล}$$

$$\omega = 0.224$$

นำค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) และความดันวิกฤต (P_c) มาคำนวณหา อุณหภูมิลดรูป (T_r) และ ความดันลดรูป (P_r) ดังสมการต่อไปนี้

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

T และ P คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และความดัน (เมกะพาสกาล) ในการทดลอง

เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส (323 เคลวิน) ดังนั้นอุณหภูมิลดรูป (T_r) มีค่าเท่ากับ

$$T_r = \frac{323}{304} = 1.0625$$

เพื่อให้ง่ายต่อการประมาณค่า จึงให้ T_r มีค่าเท่ากับ 1.05 ส่วนอุณหภูมิลดรูป (T_r) ที่ใช้ในการทดลองอื่นๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งค่าอุณหภูมิลดรูปที่คำนวณได้ แสดงในตารางที่ ก.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิลดรูป (T_r) ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิลดรูป (T_r)
50	1.0625
60	1.1
70	1.15

เมื่อความดันที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 15 เมกะพาสกาล ดังนั้นความดันลดรูป (P_r) มีค่าเท่ากับ

$$P_r = \frac{15}{7.4} = 2.03$$

ส่วนความดันลดรูป (P_r) ที่ความดันที่ใช้ในการทดลองอื่นๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งค่าความดันลดรูป ที่คำนวณได้ แสดงในตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 ความดันลดรูป (P_r) ที่ความดันที่ใช้ในการทดลองต่างๆ

ความดันที่ใช้ในการทดลอง (เมกะพาสกาล)	ความดันลดรูป (P_r)
10.0	1.35
12.0	1.62
15.0	2.03
20.0	2.7

ค่า z^0 และ z^1 สามารถหาได้จากการประมาณค่าในตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation [1] ซึ่งค่า z^0 และ z^1 ที่ได้จากการประมาณค่ามีค่าดังแสดงในตาราง ค.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ค่า z^0 และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิครูป
คงที่เท่ากับ 1.05 และความดันครูปต่างๆ

อุณหภูมิครูป (T_r)	ความดันครูป (P_r)	z^0	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

จากตาราง ค.3 เนื่องจากค่าความดันครูป ที่ใช้ในการทดลองไม่มีบันทึกในตาราง ดังนั้นจึง
ต้องทำการประมาณค่าในช่วงของตารางเพื่อหาค่า z^0 และ z^1 ที่อยู่ในช่วง P_r เท่ากับ 1.35 -2.7 ซึ่งค่า
 z^0 และ z^1 ที่ประมาณได้ แสดงในตาราง ค.4

ตารางที่ ค.4 ค่า z^0 และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิครูป
คงที่เท่ากับ 1.05 และความดันครูปที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิครูป (T_r)	ความดันครูป (P_r)	z^0	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

ส่วนค่า z^0 และ z^1 ที่อุณหภูมิครูปอื่นๆก็สามารถประมาณค่าได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งแสดง
ในตารางที่ ค.5

ตารางที่ ค. 5 ค่า z^0 และ z^1 จากตาราง Lee/Kesler Generalized-correlation ในช่วงอุณหภูมิลดรูป
 ลงที่เท่ากับ 1.1 กับ 1.15 และความดันลดรูปที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิลดรูป (T_r)	ความดันลดรูป (P_r)	z^0	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

จากนั้นนำค่า z^0 และ z^1 ที่ประมาณค่าได้มาหาค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัด (Compressibility Factor, z) จากสมการต่อไปนี้

$$z = z^0 + \omega z^1 \quad (\text{ค.1})$$

ซึ่งค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัด (z) ที่คำนวณได้ แสดงในตาราง ค.6

ตาราง ค. 6 แสดงค่าแฟกเตอร์สภาพกคอัด (z) ที่ได้จากคำนวณ

อุณหภูมิลดรูป (T_r)	ความดันลดรูป (P_r)	z
1.05	1.35	0.3953
	1.62	0.3262
	2.03	0.3388
	2.7	0.4098
1.1	1.35	0.4999
	1.62	0.4115
	2.03	0.3829
	2.7	0.4370

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก. 6 (ต่อ)

อุณหภูมิคงรูป (T_r)	ความดันคงรูป (P_r)	z
1.15	1.35	0.6022
	1.62	0.5192
	2.03	0.4404
	2.7	0.4800

การคำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

นำค่าแฟกเตอร์สภาพกักอัด (z) ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มาทำการคำนวณเพื่อหาปริมาณจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (v) ได้ด้วยสมการต่อไปนี้ [1]

$$z = \frac{Pv}{RT} \quad (\text{ก.2})$$

P คือ ความดันในการทดลอง (บรรยากาศ)

v คือ ปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ (0.08206 ลูกบาศก์เดซิเมตร บรรยากาศ ต่อ โมล เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิในการทดลอง (เคลวิน)

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (v) กรณี อุณหภูมิ และ ความดันที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส (323 เคลวิน) และ 15 เมกะพาสคาล ตามลำดับ ค่า z มีค่าเท่ากับ 0.3388

$$v = \frac{zRT}{P} = \frac{0.3388 \times 0.08206 \frac{\text{dm}^3 \times \text{atm}}{\text{mol} \times \text{K}} \times 323 \text{K} \times \frac{1000 \text{cm}^3}{\text{dm}^3} \times \frac{0.101325 \text{MPa}}{\text{atm}}}{15 \text{MPa}} = 60.66 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

ค่าปริมาณจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (v) ที่อุณหภูมิ และ ความดันที่ใช้ในการทดลองอื่นๆ ก็คำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งแสดงค่าในตาราง ก.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.7 ค่าปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (v)

อุณหภูมิในการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ความดันในการทดลอง (เมกะพาสกาล)	ปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤต ($\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$)
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

จากนั้นนำค่าปริมาตรจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่หาได้ มาทำการคำนวณหาความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{ก.3})$$

ρ คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

m คือ น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 44 กรัมต่อโมล

ค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่คำนวณได้แสดงในตาราง ก.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค. 8 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

อุณหภูมิในการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ความดันในการทดลอง (เมกะพาสกาล)	ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
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

นำค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ได้ มาคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ จากสมการเอนพีริคัลของ Sung และ Shim [3]

$$\ln y = \alpha + \frac{\beta}{T} + \left(\delta + \frac{\gamma}{T} \right) \ln p \quad (\text{ก.4})$$

y คือ ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})

α , β , δ และ γ คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

p คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/m^3)

เอกสารนี้ ค่าคงที่ α , β , δ และ γ สามารถหาได้จากผลการทดลอง ซึ่งค่าเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.5 ในการคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ค่าคงที่ α , β , δ และ γ [3]

ระบบ	ค่าคงที่สำหรับสมการ (2.1)				AAD%
	α	β (เคลวิน)	δ	γ (เคลวิน)	
CO ₂ +C.I.Disperse Red 1	21.650	-26262	-1.2076	2633.7	11.7

AAD% = Absolute Arithmetic mean Deviation

ค่าการละลายของสีข้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่คำนวณได้จากสมการ (ก.4) แสดงในตาราง ก.10

ตาราง ก. 10 ค่าการละลายของสีข้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (y) ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิในการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ความดันในการทดลอง (เมกะพาสคาล)	ค่าการละลายของสีข้อมใน คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ($\times 10^{-7}$)
50	10.0	0.18
	12.0	2.53
	15.0	9.15
	20.0	18.00
60	10.0	0.08
	12.0	1.04
	15.0	7.53
	20.0	21.34
70	10.0	0.05
	12.0	0.46
	15.0	5.69
	20.0	20.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง

**การคำนวณค่าคงที่และการประมาณค่าการละลายของสีย้อมใน
เส้นใยพอลิเมอร์ด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง**

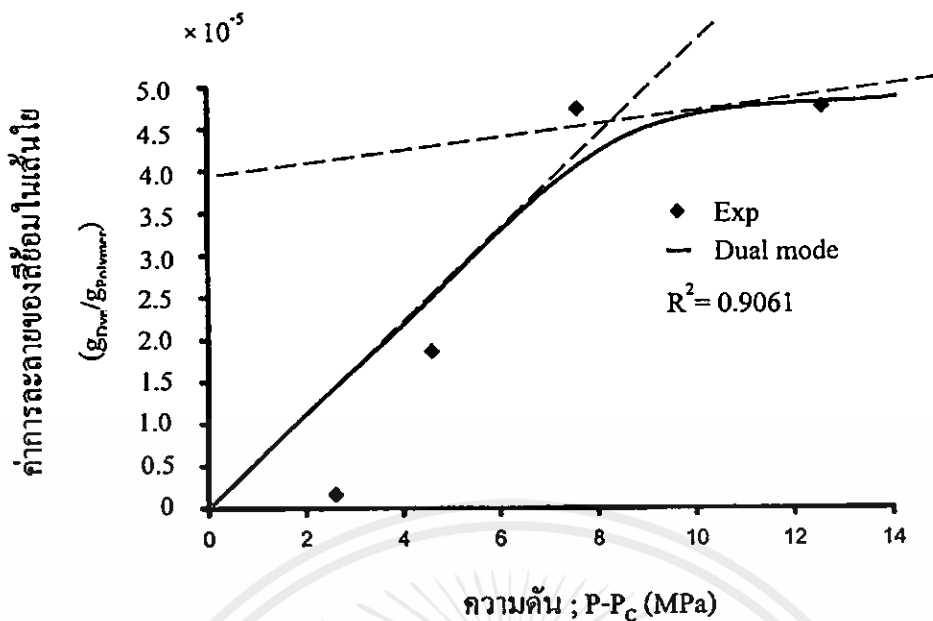
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าคงที่ k_D , C'_H และ b สามารถทำได้โดยการประมาณค่าเชิงเส้นตรง จากกราฟที่พล็อตระหว่าง ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ กับ ความดัน โดยอาศัยสมการของแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่สภาวะความดันสูงกว่าความดันเหนือจุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟผ่านจุดกำเนิด เพื่อหาค่าคงที่ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสมการจึงต้องทำในช่วงความดันเข้าใกล้จุดกำเนิดของเส้นกราฟ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทาง โดยการนำเอาความดันที่จุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์มาลบความดันจริงที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังสมการที่ (ง.1)

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

- เมื่อ C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)
 k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี ($g_{Dye} / g_{Polymer}$) (MPa⁻¹)
 b คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างร่วม (Hole affinity constant) (MPa⁻¹)
 P คือ ความดันในการทดลอง (MPa)
 P_C คือ ความดันวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 7.4 เมกะพาสกาล
 C'_H คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างอิ่มตัว (Hole saturated constant) ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)
 C_D คือ ค่าการละลายแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้ ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)
 C_H คือ ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดระดับไมครอน ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)

ซึ่งกราฟที่ได้จากการประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ โดยรูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทางที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที แสดงดังในรูปที่ ง.1



รูปที่ 3.1 ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 50 °C และ 180 นาที ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.1 สามารถแบ่งพิจารณากราฟได้เป็น 2 ช่วง คือ ที่ช่วงความดันต่ำ และที่ช่วงความดันสูง ซึ่งค่าคงที่ k_D สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟที่ช่วงความดันสูง ส่วนค่าคงที่ C'_H คือค่าที่จุดตัดแกน y ของกราฟที่ช่วงความดันสูงเช่นกัน และค่าคงที่ b คือความชันของเส้นกราฟที่ช่วงความดันต่ำ ตัวอย่างการคำนวณสามารถทำได้ดังนี้คือ จากเส้นกราฟที่ช่วงความดันสูง พบว่าจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ 4.0×10^{-5}

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad C'_H = 4.0 \times 10^{-5} \left(\frac{G_{Dye}}{G_{Polymer}} \right)$$

จากเส้นกราฟที่ช่วงความดันสูง สามารถหาความชันของเส้นกราฟได้ดังนี้

$$\text{slope} = \frac{(4.2-4) \times 10^{-5}}{(4-0)} = 0.05 \times 10^{-5}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad k_D = 0.05 \times 10^{-5} \left(\frac{G_{Dye}/G_{Polymer}}{\text{MPa}} \right)$$

ค่าคงที่ b หาได้จากความชันของเส้นกราฟที่ช่วงความดันต่ำซึ่งเท่ากับ $(k_D + C'_H b)$ เมื่อแทนค่าตัวแปร k_D และ C'_H ที่หาได้ข้างต้นก็จะสามารถคำนวณหาค่า b ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{slope} = \frac{(2.1-0) \times 10^{-5}}{(4-0)} = 0.53 \times 10^{-5}$$

ดังนั้นจะได้ $(k_D + C'_H b) = 0.53 \times 10^{-5}$

แทนค่าคงที่ C'_H และ k_D จะได้

$$(0.05 \times 10^{-5}) + (4 \times 10^{-5} \times b) = 0.53 \times 10^{-5}$$

$$b = 0.12 \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$$

กล่าวโดยสรุปสามารถคำนวณหาค่าคงที่ C'_H , k_D และ b ที่ความดันในช่วง 10 ถึง 20 เมกะพาสกาลและอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่า $4.0 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{g}_{\text{Dye}}}{\text{g}_{\text{Polymer}}} \right)$, $0.05 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{g}_{\text{Dye}}/\text{g}_{\text{Polymer}}}{\text{MPa}} \right)$ และ $0.12 \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$ ตามลำดับ สำหรับที่สภาวะอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำค่าคงที่ที่คำนวณได้มาแทนค่าในสมการที่ (ง.1) ก็จะสามารถประมาณค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยได้ดังเช่น ตัวอย่างการคำนวณค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใย ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 8 เมกะพาสกาล เวลา 180 นาที

$$C = \left[\left(0.05 \times 10^{-5} \frac{\text{g}_{\text{Dye}}/\text{g}_{\text{Polymer}}}{\text{MPa}} \right) \times (8 - 7.4 \text{ MPa}) \right] + \left[\frac{(4 \times 10^{-5} \text{ g}_{\text{Dye}}/\text{g}_{\text{Polymer}}) \times \left(0.12 \frac{1}{\text{MPa}} \right) \times (8 - 7.4 \text{ MPa})}{1 + \left(0.12 \frac{1}{\text{MPa}} \right) \times (8 - 7.4 \text{ MPa})} \right]$$

$$C = 0.29 \times 10^{-5} \frac{\text{g}_{\text{Dye}}}{\text{g}_{\text{Polymer}}}$$

กล่าวโดยสรุปที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 8 เมกะพาสกาล เวลา 180 นาที สามารถคำนวณค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยได้เท่ากับ $0.29 \times 10^{-5} \frac{\text{g}_{\text{Dye}}}{\text{g}_{\text{Polymer}}}$ ส่วนที่สภาวะการทดลองอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน และค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ ง.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณด้วย
กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

P-P _c (เมกะพาสคาล)	ค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ × 10 ⁻⁵ (g Dye/g Polymer)		
	50°C	60°C	70°C
0.6	0.29	0.4	0.53
1.6	0.72	0.94	1.27
2.6	1.08	1.39	1.89
3.6	1.39	1.76	2.40
4.6	1.65	2.07	2.86
5.6	1.89	2.34	3.25
6.6	2.10	2.59	3.61
7.6	2.29	2.81	3.94
8.6	2.46	3.01	4.24
9.6	2.62	3.19	4.52
10.6	2.77	3.36	4.78
11.6	2.91	3.52	5.02
12.6	3.04	3.67	5.26
13.6	3.16	3.82	5.48
14.6	3.28	3.96	5.70
15.6	3.39	4.09	5.90
16.6	3.49	4.21	6.10
17.6	3.59	4.34	6.30
18.6	3.69	4.45	6.48
19.6	3.79	4.57	6.67
20.6	3.88	4.68	6.85
21.6	3.97	4.79	7.02
22.6	4.05	4.90	7.19
23.6	4.14	5.00	7.36
24.6	4.22	5.11	7.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากพบให้ติดต่อแจ้งและต้องอ้างอิงถึงงานเอกสารทศครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{w_i^P}{w_i^f} \quad (จ.1)$$

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

w_i^P คือ ค่าการละลายของสีข้อมในพอลิเมอร์ ($g_{Dye}/g_{Polymer}$)

w_i^f คือ ค่าการละลายของสีข้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})

ซึ่งค่าการละลายของสีข้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต หรือ w_i^f หาได้จากสมการอย่างง่าย (empirical equation) ของ Sung และ Shim [8] ซึ่งได้กล่าวในข้างต้นแล้ว ส่วนค่า w_i^P ได้จากค่าการละลายของสีข้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จากประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ที่สภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 15 เมกะพาสคาล เวลา 180 นาที สามารถแทนค่าในสมการที่ (จ.1) ได้ดังต่อไปนี้

$$K = \frac{4.732 \times 10^{-5} (g_{Dye}/g_{Polymer})}{8.90 \times 10^{-7} (g_{Dye}/g_{CO_2})}$$

$$K = 53.12 \frac{(g_{Dye}/g_{Polymer})}{(g_{Dye}/g_{CO_2})}$$

กล่าวโดยสรุป ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 15 เมกะพาสคาล เวลา 180 นาที สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกได้เท่ากับ $53.12 \frac{g_{Dye}/g_{Polymer}}{g_{Dye}/g_{CO_2}}$ สำหรับการคำนวณที่สภาวะอื่นๆ ก็สามารทำได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ จ.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ค่าการละลายของ สีย้อมในเส้นใย $(g_{Dye}/g_{Polymer}) \times 10^{-5}$	ค่าการละลายของสีย้อม ในคาร์บอนไดออกไซด์ $(g_{Dye}/g_{CO_2}) \times 10^{-7}$	สัมประสิทธิ์ การแบ่งแยก $\frac{(g_{Dye}/g_{Polymer})}{(g_{Dye}/g_{CO_2})}$
50	10.0	0.165	0.18	91.7
	12.0	1.870	2.53	73.9
	15.0	4.732	9.15	51.7
	20.0	4.753	18.00	26.4
60	10.0	0.989	0.08	1240
	12.0	3.361	1.04	323
	15.0	4.799	7.53	63.7
	20.0	5.013	21.34	23.5
70	10.0	1.531	0.05	3060
	12.0	3.609	0.46	785
	15.0	7.395	5.69	130
	20.0	7.698	20.94	36.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกานำไปใช้

ตาราง ฉ. 1 ค่าการบั่นทอนผลการทดลอง

ครั้งที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนช้อม (กรัม)	น้ำหนักพอลิเมอร์หลังช้อม (กรัม)	น้ำหนักสีช้อม (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	30	50	15	0.0056	0.0057	0.0224	0.020
2	60	50	15	0.0050	0.0051	0.0203	0.028
3	90	50	15	0.0050	0.0051	0.0234	0.032
4	120	50	15	0.0049	0.0050	0.0249	0.045
5	150	50	15	0.0050	0.0051	0.0221	0.061
6	180	50	15	0.0048	0.004	0.0301	0.072
7	210	50	15	0.0050	0.0050	0.0243	0.075
8	240	50	15	0.0054	0.0054	0.0244	0.080
9	270	50	15	0.0048	0.0048	0.0277	0.072
10	30	60	15	0.0050	0.0050	0.0225	0.020
11	60	60	15	0.0050	0.0051	0.0235	0.027
12	90	60	15	0.0051	0.0051	0.0216	0.034
13	120	60	15	0.0049	0.0049	0.0203	0.061
14	150	60	15	0.0050	0.0051	0.0230	0.065
15	180	60	15	0.0050	0.0050	0.0250	0.075
16	210	60	15	0.0049	0.0049	0.0264	0.080
17	240	60	15	0.0050	0.0050	0.0252	0.086
18	270	60	15	0.0052	0.0052	0.0241	0.089
19	30	70	15	0.0053	0.0053	0.0269	0.023
20	60	70	15	0.0052	0.0053	0.0256	0.043
21	90	70	15	0.0053	0.0053	0.0265	0.066
22	120	70	15	0.0051	0.0052	0.0238	0.083
23	180	70	15	0.0051	0.0051	0.0251	0.107
24	240	70	15	0.0050	0.0051	0.0222	0.105
25	180	50	10	0.0052	0.0052	0.0215	0.021
26	180	50	12	0.0055	0.0055	0.0269	0.043
27	180	50	20	0.0055	0.0055	0.0264	0.080

ตาราง น. 1 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	น้ำหนักพอลิ เมอร์ก่อนเชื่อม (กรัม)	น้ำหนักพอลิ เมอร์หลังเชื่อม (กรัม)	น้ำหนัก สีเชื่อม (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง
28	180	60	10	0.0052	0.0052	0.0214	0.031
29	180	60	12	0.0051	0.0052	0.0301	0.059
30	180	60	20	0.0053	0.0053	0.0300	0.081
31	180	70	10	0.0056	0.0057	0.0277	0.039
32	180	70	12	0.0057	0.0058	0.0270	0.067
33	180	70	20	0.0054	0.0056	0.0237	0.116



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง

วัสดุสแตนเลส ขนาด 5 มิลลิเมตร

2. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

JENWAY LTD., FELSTED , DUNMOW , ESSEX , CM 6 3LB

Model 6405 UV/Vis Spectrophotometer

Serial No. 1177

Voltage 230 V – 1.6 A (T) , 115 V – 3.2 A (T)

Power 200 VA

Frequency 50/60 Hz

3. ป้อนอัดความดันสูง

Isco D Series Syringe Pumps

Isco SFX 2-10 System

Model 260 D

4. เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์

DRAGON 204 METTLER TOLEDO

NO. 200500396

ITEM 12106615

Power Requirements 8-14.5 V ~ 50/60 Hz

6 VA of 9.5-20 V , 6 W

5. ชุดรีฟลักซ์

Electromantle

Cat No. EM0500/C MK5

Volts 230 V 50/60 Hz

Watts 200 W Fuse F 1.25 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	วัชรินทร์ แสงวัชรพันธุ์
วัน เดือน ปีเกิด	18 กันยายน 2523
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร- ลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2547
ประสบการณ์การทำงาน	1. นักศึกษาฝึกงาน ฝ่ายตรวจสอบคุณภาพสินค้า บริษัท Clariant Thailand จำกัด มีนาคม 2546- พฤษภาคม 2546
ผลงานทางวิชาการ	1. วัชรินทร์ แสงวัชรพันธุ์ อุดิพล พัฒนาวสิน ศิริพันธ์ เรืองมณีชัชวาล และสุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษาการย้อมสีพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 23, ฉบับที่ 4., ธันวาคม 2549. หน้า 48-53 2. “Study of Dyeing Polymers Using Supercritical Carbon Dioxide ” 5 th International Materials Technology Conference and Exhibition, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้