สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการย้อมสีพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ

นายฐิติพล พัฒนวสิน
นายศิริพันธ์ เรืองมณีชัชวาล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62388
วัน,เดือน,ปี 17 ส.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF DYEING POLYMERS USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

MR. TITHIPOL PATTANAVASIN

MR. SIRIPAN RUANGMANEECHATCHAWAN

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาการย้อมสีพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
โดย	นายฐิติพล พัฒนวศิน
	นายศิริพันธ์ เรืองมณีชัชวาล
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ
(ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์)

.....กรรมการ
(อ.รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาการย้อมสีพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
โดย	นายฐิติพล พัฒนวศิน
	นายศิริพันธ์ เรืองมณีชัชวาล
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์ในการศึกษาการย้อมสีพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตด้วยสีย้อม Violet 23 โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย เพื่อนำผลการศึกษาไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนากระบวนการย้อมสีพอลิเมอร์ในปัจจุบัน โดยทั่วไปการย้อมสีพอลิเมอร์ในตัวกลางที่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต สามารถที่จะอธิบายผลของความดันต่อการย้อมสีโดยใช้แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง (Dual Mode Sorption Model) ได้

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองย้อมสีแบบกะของพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ตัวอย่าง โดยใช้สีย้อม Violet 23 ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง โดยทำการย้อมสีที่อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส ในช่วงความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 7-28 เมกะพาสคาล เป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อกะ โดยนำชิ้นตัวอย่างของพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตที่ย้อมเป็นสีม่วง มาสกัดหาปริมาณสีย้อมโดยใช้วิธีการรีฟลักซ์ด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ปริมาตรประมาณ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายสีย้อม Violet 23 นี้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Violet 23 ในชิ้นงานพอลิเมอร์ ซึ่งปริมาณสีย้อม Violet 23 ที่ตรวจวัดได้ ใช้แสดงค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง ในหน่วยกรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์

จากผลการทดลอง พบว่าค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิเมอร์ตัวอย่างทั้งสองชนิดนั้น ค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันที่ใช้ในการทดลองเพิ่มมากขึ้น โดยค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต มีค่า 10^{-6} และ 10^{-5} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ ตามลำดับ และจากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิเมอร์ตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Tile	Study of Dyeing Polymers Using Supercritical Carbon Dioxide
By	Mr. Tithipol Pattanavasin
	Mr. Siripan Ruangmaneechatchawan
Senior Project Advisor	Dr. Surat Areerat
Report for	Bachelor's Degree of Chemical Engineering
	Department of Chemical Engineering
	Faculty of Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This senior project proposes a study of dyeing polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) by dyeing stuff called "Violet 23" , using supercritical carbon dioxide as a dyeing medium. The study aims to provide a preliminary data to develop current polymer dyeing process. In general the effect of pressure on the polymer dyeing process using supercritical carbon dioxide can describe by the dual mode sorption model.

This experiment is a batch dyeing process of PP and PET in high pressure reactor which a constant temperature at 100 °C and pressure within the range of 7–28 MPa at given sorption time 4 hours per batch. Samples of PP and PET which stain to be violet has been extract to determine amount of dyeing stuff by using reflux process at operating temperature 45 °C for 10 hours. After that we can measure an absorbance of Violet 23 in dichloromethane solution using UV-Vis. Spectrophotometer. Amount of Violet 23 that can be measured which use to represent a dyeing solubility of polymer sample in unit of gram dye per gram polymer ($g_{Dye} / g_{Polymer}$).

From experimental data , we could found that solubility data of PP and PET are increase when operating pressure increase. The solubility data of PP is in the range of 10^{-6} gram dye in polymer and 10^{-5} for PET. From the calculation , the dual mode sorption model could provide useful description for dyeing of polymer , as well as the estimation of the solubility data of Violet 23 in polymer sample appropriately.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาต่างๆ ตลอดจนความรู้ และประสบการณ์ จาก ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ คณะผู้วิจัยรู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

ขอขอบพระคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่คอยช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณวัชรีพร แสงวัชรพันธ์ ที่ให้การช่วยเหลือให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนช่วยดูแลการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณถนอมขวัญ ถาวร ที่เอื้อเฟื้อชุดอุปกรณ์ และเครื่องมือ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้งาน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แด่ บิดา มารดา ของคณะผู้วิจัย ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกๆ ท่าน ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง จนทำให้สามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

ฐิติพล พัฒนวศิน

ศิริพันธ์ เรืองมณีชัชวาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของปัญหา 1

1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

1.4 วิธีการดำเนินการ 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.6 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน 4

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของของไหลเหนือวิกฤตและสมบัติต่างๆ 4

2.2 การประยุกต์ใช้งานของของไหลเหนือวิกฤต 7

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

2.4 สมการที่ใช้ในการคำนวณ 17

บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน 20

3.1 ขั้นตอนการศึกษา 20

3.2 วิธีการดำเนินงาน 20

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ 27

4.1 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ 27

4.2 การประมาณค่าการละลายโดยใช้แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง 30

4.3 การเปรียบเทียบค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
และในชิ้นงานพอลิเมอร์ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 36

5.1 สรุปผลการทดลอง 36

5.2 ข้อเสนอแนะ 37

เอกสารอ้างอิง 38

ภาคผนวก ก. การคำนวณเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของการย้อมสี 39

ภาคผนวก ข. การคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ 42

ภาคผนวก ค. การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 44

ภาคผนวก ง. การคำนวณหาค่าคงที่ k_D C'_H และ b ของพอลิเมอร์จากการทดลอง 49

ภาคผนวก จ. การคำนวณหาค่าการละลายโดยใช้แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง 52

ภาคผนวก ฉ. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก 54

ภาคผนวก ช. ตารางบันทึกผลการทดลอง 55

ภาคผนวก ซ. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และการถ่ายเทมวลของ
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะก๊าซ ของเหลว และของไหลวิกฤต 6

ตารางที่ 2.2 สภาวะวิกฤตสำหรับสารละลายวิกฤตชนิดต่างๆ 7

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของสีย้อมและสมบัติทางเคมี 12

ตารางที่ 2.4 ค่า a b และ C ที่ได้จากการคำนวณ 14

ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองกระบวนการย้อมด้วยสีย้อม Disperse orange 3 14

ตารางที่ 2.6 ผลการทดลองกระบวนการย้อมด้วยสีย้อม Disperse blue 79 15

ตารางที่ 2.7 ผลการทดลองกระบวนการย้อมด้วยสีย้อม Solvent brown 15

ตารางที่ 4.1 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ชนิด พอลิพรอพิลีน ที่ความดันต่างๆ 28

ตารางที่ 4.2 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ชนิด พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต
ที่ความดันต่างๆ 28

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ที่หาได้สำหรับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด 31

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิพรอพิลีน 34

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต 34

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการคำนวณค่าความเข้มข้นที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน
และค่าการดูดกลืนแสง 41

ตารางที่ ค.1 ค่า Z^0 Z^1 และ Z ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ 45

ตารางที่ ค.2 ปริมาตรต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ 45

ตารางที่ ค.3 ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ 46

ตารางที่ ค.4 ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ 47

ตารางที่ ค.5 ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันที่ใช้ในการทดลอง .. 48

ตารางที่ จ.1 ผลการคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดที่ความดันต่างๆ กัน .. 53

ตารางที่ ช.1 ค่าการบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิพรอพิลีน 55

ตารางที่ ช.2 ค่าการบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ 4
รูปที่ 2.2 เครื่องโครมาโทรกราฟี โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย แบบที่ 1 9
รูปที่ 2.3 เครื่องโครมาโทรกราฟี โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย แบบที่ 2 10
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
และค่า Partition coefficient 16
รูปที่ 2.5 Compressibility chart ของก๊าซต่างๆ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ 18
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดัน 21
รูปที่ 3.2 ปั๊มอัดความดันสูง 22
รูปที่ 3.3 คอนโทลเลอร์ของปั๊มอัดความดัน 22
รูปที่ 3.4 การขันน็อตที่เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดัน 23
รูปที่ 3.5 วาล์วหมายเลข 1 และหมายเลข 2 23
รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและวัดความดัน 24
รูปที่ 3.7 วาล์วหมายเลข 3 24
รูปที่ 3.8 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง 26
รูปที่ 3.9 ชุดการรีฟลักซ์ 26
รูปที่ 4.1 ค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ความดันต่างๆ 29
รูปที่ 4.2 สูตรโครงสร้างของสีย้อม Violet 23 29
รูปที่ 4.3 สูตรโมเลกุลของพอลิพรอพิลีน 30
รูปที่ 4.4 สูตรโมเลกุลของพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต 30
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันที่มีต่อค่าการละลายของพอลิพรอพิลีน 32
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันที่มีต่อค่าการละลายของพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต 32
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด
ที่ความดันต่างๆ 35
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของการย้อมสี 41
รูปที่ ค.1 กราฟแสดงค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ 47
รูปที่ ง.1 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิพรอพิลีน ที่ความดันต่างๆ กัน 49
รูปที่ ง.2 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ที่ความดันต่างๆ กัน 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในกระบวนการของการย้อมสีตามปกติทั่วไปในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้น จะใช้ของเหลวเป็นสารตัวกลางในการย้อม (Dyeing medium) ซึ่งจะทำให้เกิดของเสียขึ้นในกระบวนการ เช่น น้ำเสีย และยังเป็นการใช้สีย้อมในปริมาณมาก ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองในด้านต้นทุน อีกทั้งสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการนั้นยังไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก นอกจากนี้แล้ว สารที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการนั้นยังเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีการวิจัย และคิดค้นถึงวิธีการที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้ขึ้น โดยการใช้สารที่มีคุณสมบัติที่เป็นของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid) ตัวอย่างเช่น คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide , SC-CO_2) เป็นต้น

SC-CO_2 เป็นตัวทำละลายที่เป็นที่ยอมรับกันมากว่า เป็นสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการผลิตสิ่งทอจะใช้ตัวทำละลายนี้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตแบบเก่า คือ กระบวนการที่ใช้ SC-CO_2 ในการย้อมจะไม่มีการใช้ของเหลวในกระบวนการ โดยสีที่นำมาทำการย้อมนั้นสามารถที่จะแยกออกจาก SC-CO_2 ได้โดยการขยายตัว (Expansion) อย่างง่ายๆ ซึ่งทำให้สามารถนำทั้ง คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และสีย้อมกลับมาใช้ได้อีก และยังสามารถลดการใช้สารเติมแต่งที่มีราคาแพงได้ เช่น สารที่ช่วยในการย้อม และสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น ซึ่งข้อได้เปรียบต่างๆ นี้ ทำให้เทคโนโลยีการย้อมนี้เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ แต่อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้ก็ยังมีข้อจำกัด คือ สีย้อมนั้นสามารถย้อมได้ดีในพอลิเมอร์ชนิด ลิโพฟีลิก (Lipophilic) เท่านั้น สีย้อมที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่นั้น เป็นสีที่พัฒนามาเพื่อใช้กับกระบวนการการผลิตด้วยน้ำ ซึ่งทำให้ค่าการละลายใน SC-CO_2 ต่ำ จึงได้มีการพัฒนาสีย้อมขึ้นมาเพื่อใช้กับ SC-CO_2 โดยเฉพาะ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงกลไกของการย้อมสีโดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในการย้อมสี

1.2.2 เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆ สำหรับกระบวนการย้อมสีพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาถึงการย้อมสีพอลิเมอร์ โดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม

1.3.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความดัน ที่มีผลต่อพฤติกรรมการย้อมสีของพอลิเมอร์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

1.3.3 เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการย้อมสีพอลิเมอร์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และ เพื่อทำนายความเข้มข้นของการย้อมสีโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.4 วิธีการดำเนินการ

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย้อมสี

1.4.2 จัดเตรียมวัตถุดิบและออกแบบการทดลอง

1.4.3 ทำการทดลองกระบวนการย้อมสี

1.4.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อกระบวนการย้อมสี

1.4.5 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปทำนายค่าความเข้มข้นของสีในการย้อม

1.4.6 สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีการย้อมสี ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมากยิ่งขึ้น

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในกระบวนการย้อมสี ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมากยิ่งขึ้น

1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจพฤติกรรมของสีย้อม ที่ประพฤติตัวในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมากยิ่งขึ้น

1.5.4 สามารถนำค่าที่ได้จากการคำนวณตัวแปรต่างๆ จากสมการการละลาย นำไปทำนายหาค่าการละลายได้โดยไม่ต้องทำการทดลองก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย วิธีการดำเนินการ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีอะไรบ้าง รวมถึงสมการที่เกี่ยวข้องกับโครงงานวิจัยทั้งหมด

บทที่ 3 กล่าวถึง ขั้นตอนการศึกษา วิธีการดำเนินงานของโครงงานวิจัย และวิธีการที่ใช้ในการทดลองแต่ละขั้นตอนโดยละเอียด

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดลองของโครงงานวิจัยในด้านต่างๆ ผลการหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์

บทที่ 5 กล่าวถึง การสรุปผลและข้อเสนอแนะ ซึ่งจะกล่าวถึงบทสรุปของโครงงานวิจัย สิ่งที่ได้รับจากโครงงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อๆ ไป

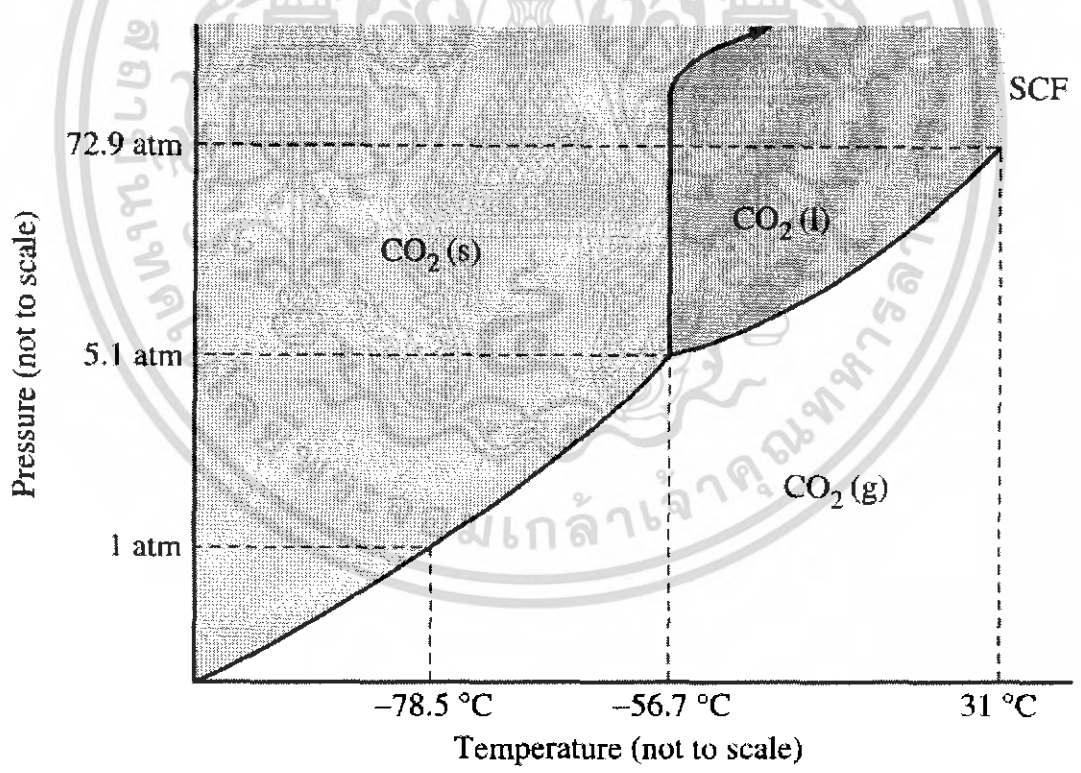
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวกับโครงงานวิจัย ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของของไหลเหนือวิกฤต ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และสมการที่ใช้ในการคำนวณ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของของไหลเหนือวิกฤตและสมบัติต่างๆ

ของไหลเหนือวิกฤต เริ่มได้รับความสนใจมาตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 1800 หรืออาจราวต้นทศวรรษ 1822 เมื่อ Baron Cagniard De La Tour ค้นพบจุดวิกฤต (Critical point) ของสารประกอบซึ่งพบว่าของไหลเหนือวิกฤตนั้น เป็นวัสดุที่มีอุณหภูมิ และความดันอยู่ในช่วงที่เหนือกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature , T_C) และ ความดันวิกฤต (Critical pressure , P_C) ดังแสดงในแผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ



รูปที่ 2.1 แผนภูมิวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 1870 ได้มีการค้นพบว่า ก๊าซหนาแน่น (Dense Gas) จะมีความสามารถในการละลายสูงและจากการสังเกตผลของความดันที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของระบบ โพแทสเซียมไอโอไดด์ - เอทานอล (Potassium Iodide - Ethanal) [1] หลังจากนั้น เทคโนโลยีทางด้านนี้ ได้ดำเนินไปช้ามากจนกระทั่งปลายทศวรรษที่ 1970 และต้นทศวรรษที่ 1980 จำนวนของกระบวนการที่คิดค้นขึ้นทั้งทางด้านธุรกิจ และงานวิจัยก็เพิ่มขึ้นอย่างมากมายและรวดเร็ว โดยเริ่มแรกนั้นมีเพียงบริษัทที่เน้นในการประยุกต์ใช้ของไหลเหนือวิกฤต ในการบำบัดของเสียและการลดการใช้พลังงาน การพัฒนากระบวนการสกัดขึ้นมาใช้แทนการกลั่นหรือเพื่อลดอันตรายจากของเสียที่เป็นพิษ ซึ่งในเวลาเดียวกันนี้ยังไม่มีบริษัททั้งในยุโรป และเอเชียที่เสนองานเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤตขึ้นเลย แต่ก็ยังมีห้องแลบของทาง สถาบันแม็กแพลงค์สำหรับการวิจัยถ่านหินในประเทศเยอรมนี (Max Planck Institute for Coal Research in Germany , FRG) ได้ทำการวิจัยและพัฒนาในเรื่องการนำเอาของไหลเหนือวิกฤตมาใช้เกี่ยวกับอาหารประเภทต่างๆ เครื่องปรุง และเครื่องดื่ม และทางสถาบันก็ยังเผยแพร่เทคโนโลยีการสกัดให้กับอุตสาหกรรมในประเทศเยอรมนีด้วย โดยในช่วงทศวรรษที่ 1970 - 1980 ได้มีการจัดตั้งโรงงานสกัดคาเฟอีนจากเมล็ด ที่เมืองเบรเมน และโรงงานสกัดดอกฮ๊อป (Hop) ขึ้นสองโรงงาน ที่เมืองมิวนิค โดยการใช้เทคโนโลยีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ได้รับการพัฒนามาจาก สถาบันแม็กแพลงค์

คุณสมบัติของของไหลเหนือวิกฤตนั้น มีสมบัติบางประการอยู่ระหว่างทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ ดังตารางที่ 2.1 ทำให้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีลักษณะเป็นก๊าซหนาแน่น (Dense Gas)
- ความสามารถในการละลาย และความหนาแน่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับของเหลว (Solubility approaching liquid phase)
- มีความสามารถในการแพร่ใกล้เคียงกับสถานะก๊าซ (Diffusivities approaching gas phase)

นอกจากนี้ ของไหลเหนือวิกฤต ยังมีการถ่ายเทมวลที่รวดเร็วและมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากกว่าของเหลวถึงสิบเท่า ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ของไหลเหนือวิกฤตมีความสามารถเป็นตัวทำละลาย (Solvent) ที่ดี ซึ่งอาจเรียกสารที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ว่า “ตัวทำละลายเหนือวิกฤต”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และการถ่ายเทมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สถานะก๊าซ ของเหลว และของไหลวิกฤต [2-3]

	ก๊าซ	ของไหลวิกฤต		ของเหลว
สภาวะอุณหภูมิ	15 - 30 ^{O}C	T_C = 32 ^{O}C	T_C = 32 ^{O}C	15 - 30 ^{O}C
สภาวะความดัน	0.1 MPa	P = 7.0 MPa	P = 28.0 MPa (4P)	0.1MPa
ความหนาแน่น (g / cm^3)	0.0006 - 0.002	0.2 - 0.5	0.4 - 0.9	0.6 - 1.6
ความหนืด (μ Pa.s)	10 - 30	10 - 30	30 – 90	200 - 3000
สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2 / sec)	0.1 - 0.4	0.7×10^{3}	0.2×10^{3}	$(0.2\text{-}2) \times 10^{-5}$

จากคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลเหนือวิกฤตที่กล่าวมานี้ ทำให้มีการนำเอาของไหลเหนือวิกฤต มาประยุกต์ใช้ประโยชน์ ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม และงานวิจัยต่างๆ อย่างเช่น การสกัดเอาสารที่ต้องการออกจากพืชต่างๆ ด้วยเทคนิค การสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid Extraction , SFE) ซึ่งสามารถสกัดสารออกมาได้ง่าย และมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากกว่าการสกัดโดยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ที่ไม่สามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้มีตัวทำละลายตกค้างอยู่ หรือ การนำของไหลเหนือวิกฤต มาช่วยในการวิเคราะห์สารด้วยวิธีการทางโครมาโทรกราฟี (Chromatography) เป็นเทคนิคการทำโครมาโทรกราฟีโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid Chromatography , SFC) เป็นต้น

สำหรับตัวทำละลายเหนือวิกฤตที่ได้รับความสนใจมาก คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical carbon dioxide) เพราะว่ามีจุดวิกฤตที่ต่ำ คือที่สภาวะความดัน 72.9 บรรยากาศ (7.37 เมกะพาสคาล) และที่อุณหภูมิ 31.1 องศาเซลเซียส ซึ่งสำหรับในสภาวะวิกฤตอย่างนี้ คาร์บอนไดออกไซด์จะมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายอย่างดี และสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้โดยง่ายหลังจากสิ้นสุดการสกัดสารแล้ว จึงทำให้ไม่มีการตกค้างในผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังไม่เป็นพิษและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมด้วย ข้อดีเหล่านี้จึงส่งผลให้มีการประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในงานสกัดต่างๆ มากขึ้น เช่น การนำไปสกัดนิโคตินออกจากใบยาสูบ การนำไปสกัดไขมันออกจากถั่วเหลือง การนำไปสกัดอัลฟาแอซิดเรซิน (alpha - acid - resin) ออกจากดอกฮ๊อป (Hop) เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเบียร์ และการนำไปสกัดคาเฟอีน เป็นต้น

นอกจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแล้วยังมีการนำสารอื่นมาทำเป็นของไหลเหนือวิกฤตอีก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สภาวะวิกฤตสำหรับสารละลายวิกฤตชนิดต่างๆ [2-3]

ของไหล	อุณหภูมิวิกฤต (^{0}C)	ความดันวิกฤต (MPa)
Carbon dioxide	31.0	7.38
Ethane	32.3	4.88
Ethylene	9.25	5.04
Propane	96.7	4.25
Propylene	91.8	4.60
Trifluoromethane (Fluoroform)	126.2	4.86
Chlorotrifluoromethane	28.9	3.87
Trichlorofluoromethane	198.1	4.41
Ammonia	132.4	11.35
Water	374.2	22.12
Cyclohexane	280.4	4.07
n-Pentane	196.6	3.37
Toluene	318.7	4.10

2.2 การประยุกต์ใช้งานของ ของไหลเหนือวิกฤต

2.2.1 กระบวนการย้อมสีด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid Dyeing)

ตั้งแต่ทศวรรษที่ 19 เป็นต้นมานั้น การใช้ตัวทำละลายเหนือวิกฤต ถือว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับกระบวนการย้อมสีพอลิเมอร์แทนกระบวนการแบบใช้น้ำเป็นอย่างมาก [4-5] นั่นก็เพราะว่ากระบวนการย้อมสีโดยใช้ตัวทำละลายเหนือวิกฤต จะสามารถลดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมได้เป็นจำนวนมาก รวมทั้งเป็นการลดค่าใช้จ่ายจากการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการอีกด้วย

กระบวนการย้อมสีพอลิเมอร์แบบใช้น้ำนั้นจะมีของเสียที่เกิดจาก ตัวเร่งอัตราการย้อม สารลดแรงดึงผิว และสีที่หลงเหลือจากกระบวนการ ซึ่งทำให้เป็นการยากที่จะทำการบำบัดทั้งหมดด้วยวิธีการปกติ และวิธีการทางชีวภาพ

โดยเริ่มแรกนั้น กระบวนการย้อมสีด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤต จะเริ่มใช้กับพอลิเมอร์จำพวก พอลีเอสเตอร์ พอลิพรอพิลีน พอลิเอมายด์ เป็นต้น โดยใช้สีย้อมต่างชนิดกัน หลังจากนั้นจึงได้มีการพัฒนามาใช้กับกระบวนการย้อมสีพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ต่อมามีการศึกษาผลของการให้ความร้อนชิ้นงานพอลิเมอร์ก่อนเข้าสู่กระบวนการย้อมสี โดยใช้สีต่างชนิดกันไป ในกระบวนการย้อมสีด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤตนั้น มักจะทำที่สภาวะรุนแรง เนื่องจากที่ความดันและอุณหภูมิสูงๆนั้นจะช่วยให้สีย้อมนั้นละลายในของไหลเหนือวิกฤตได้มากขึ้น และทำให้สีสามารถซึมผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปยังชิ้นงานพอลิเมอร์ได้มากขึ้นอีกด้วย โดยความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ที่ อุณหภูมิตั้งแต่ 100 องศาเซลเซียส และความดัน 100 บาร์ ขึ้นไป

2.2.2 การสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid Extraction , SFE)

การสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤตที่เป็นของไหล Supercritical Fluid Extraction (SFE) ได้ประยุกต์ใช้เมื่อไม่นานมานี้ เทคนิคนี้คล้ายกับ ซ็อคห์เลท (Soxhlet) ซึ่งมีหลักการที่ตัวทำละลายจะเป็นของไหลเหนือวิกฤต (คือสารที่มีอุณหภูมิและความดันเหนือค่าวิกฤต) ซึ่งของไหลนี้มีคุณสมบัติที่มีประโยชน์มาก ผลประโยชน์หลักของการใช้ของไหลเหนือวิกฤต คือ การลดความสามารถของตัวทำละลายอินทรีย์ออกไป ซึ่งจะช่วยในการลดปัญหาของการบันทึก และการจัดวางในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ (Lipidologist) ที่มองถึงการลดสารอินทรีย์เพราะอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ คุณประโยชน์ข้อหนึ่งของของไหลเหนือวิกฤตที่น่าสนใจ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของลิพิด (Lipid) ในของไหลเหนือวิกฤตสูง ซึ่งมากเกินกว่าตัวทำละลายของของเหลวปกติ จะทำให้อัตราการสกัดมากขึ้น ในขณะที่ตัวทำละลายเสื่อมสภาพลงเพียงเล็กน้อย ในการศึกษาหลายต่อหลายครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่า ของไหลเหนือวิกฤต ใช้วิธีการแทนที่ โดยเทคนิคกราวิเมตริก (Gravimetric) ดั้งเดิม นอกจากนี้ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นของไหลเหนือวิกฤตที่นิยมนำมาใช้เพราะว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีราคาต่ำ และเป็นสารที่ไม่ติดไฟ ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาของไหลเหนือวิกฤต มาประยุกต์ใช้ทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร การผลิตยา การรักษาสิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรมน้ำมัน

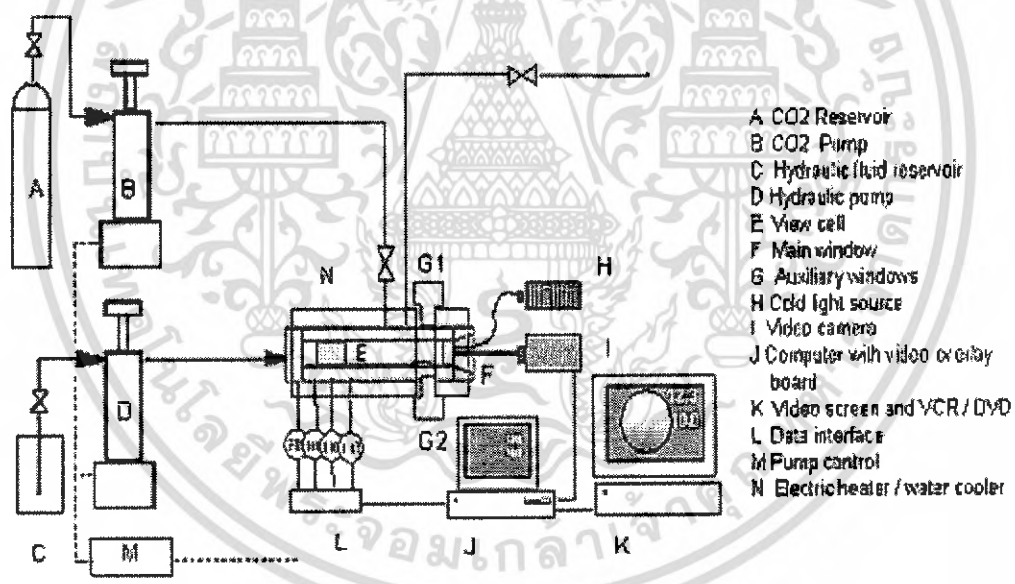
2.2.3 การสกัดด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤตโดยวิธีโครมาโทรกราฟี (Supercritical Fluid Chromatography , SFC)

เทคนิคทางโครมาโทรกราฟีจะเกี่ยวข้องกับการกระจายของสารระหว่าง สารสองวัฏภาค คือ วัฏภาคอยู่กับที่ (Stationary phase) และวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) ถ้าวัฏภาคอยู่กับที่เป็นของแข็ง เช่น ซิลิกาเจล หรืออะลูมินา เราเรียกว่า แอดซอร์พชั่นโครมาโทรกราฟี (Adsorption Chromatography) และถ้าวัฏภาคอยู่กับที่เป็นของเหลวเราเรียกว่า พาร์ทิชั่นโครมาโทรกราฟี (Partition Chromatography) ส่วนวัฏภาคเคลื่อนที่จะเป็นของเหลวหรือก๊าซก็ได้ เทคนิคทางโครมาโทรกราฟี (Chromatography) ทำได้ง่ายและไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงแต่สามารถใช้แยกสารผสมออกจากกันให้บริสุทธิ์ได้ และยังใช้ในการพิสูจน์สาร (Identify) ด้วยเทคนิคที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ คอลัมน์โครมาโทรกราฟี (Column Chromatography) ทินเลเยอร์โครมาโทรกราฟี (Paper Chromatography) ซึ่งในที่นี้จะใช้เทคนิค คอลัมน์โครมาโทรกราฟี โดยที่คอลัมน์โครมาโทรกราฟีจะใช้คอลัมน์แก้วบรรจุผงของตัวดูดซับ ที่ใช้กันมากคือ อะลูมินา (Alumina ; Al_2O_3) หรือ ซิลิกาเจล (Siliga gel ; SiO_2) ซึ่งซิลิกาเจลใช้ได้ดีมากกับสารทุกชนิด (สารที่เป็นกรด เป็นกลาง หรือ เบสที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

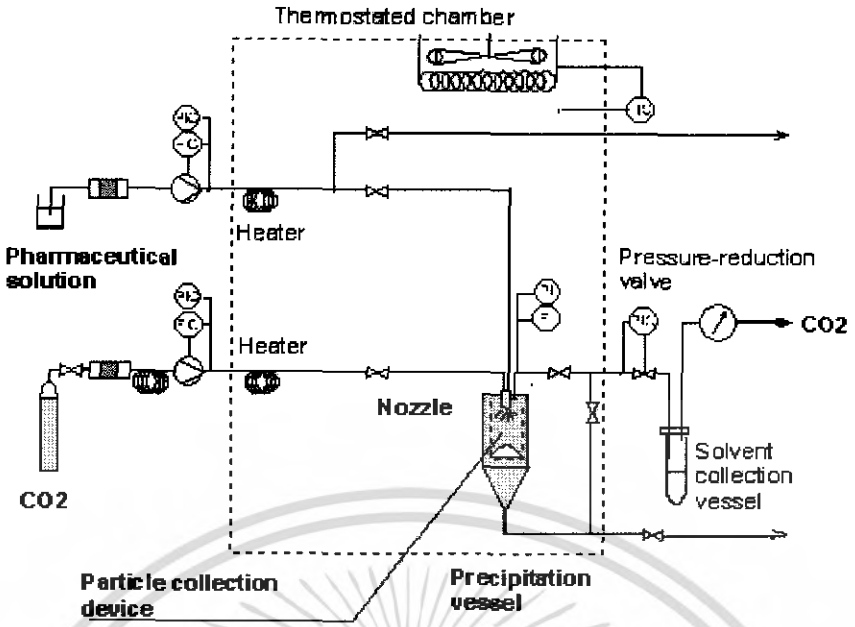
อ่อนมาก ถ้าเป็นเบสแก่จะละลายซิลิกาได้) ส่วนอะลูมินาใช้กับสารที่เป็นเบส และนอกจากนี้ ยังมีอีกมากมาย เช่น แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) โซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และ สตาร์ชซูโครส (Starch Sucrose) เป็นต้น โดยทำเป็นผงละเอียดให้มีพื้นที่ผิวมาก เพื่อใช้ดูดซับสารเอาไว้

สำหรับการสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤตโดยวิธีโครมาโทรกราฟี เป็นกลไกการสกัดที่ใช้ก๊าซหรือของเหลวเป็นของไหลเหนือวิกฤต ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ปริมาตรเป็นปัจจัยสำคัญ ความหนาแน่นของตัวทำละลายเหนือวิกฤตที่เป็นของไหลอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างก๊าซและของเหลว อย่างไรก็ตามของไหลจะมีความเร็วต่ำกว่า ดังนั้นเราจึงบรรจุความเร็วที่สูงกว่าลงไป ขณะที่ความเร็วต่ำกว่าของเหลว ความสามารถของ SFC ก็เพียงพอต่อการใช้ในอุตสาหกรรมแล้ว เพราะว่าความสมดุลต่อความสามารถที่ต้องการจะทำให้งานดำเนินไปได้ดี และการจัดตั้งสภาพต่างๆ ก่อนการลงมือ เป็นสิ่งสำคัญในการทำ SFC ซึ่งเป็นตัวอย่างมือดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 เครื่องโครมาโทรกราฟี โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย แบบที่ 1 [2-3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เครื่องโครมาโทรกราฟี โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย แบบที่ 2 [2-3]

เครื่องมือทางอุตสาหกรรมต้องถูกสร้างมาอย่างประณีตเพื่อความปลอดภัย การปฏิบัติการภายใต้ความดันที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดผลดี โดยเทคโนโลยีทางเคมี ได้ถูกออกแบบระบบมาอย่างค่อนข้างเรียบง่าย

นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายร่วมใน SFC เป็นสิ่งหนึ่งที่ได้รับการสนใจในด้านการศึกษาและด้านอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้วตัวทำละลายร่วมเป็นสารที่ถูกเติมลงไปในตัวทำละลายเหนือวิกฤตเพียงเล็กน้อย ซึ่งทำให้คุณสมบัติของตัวทำละลายเปลี่ยนไปทันที ยกตัวอย่างเช่น สารผสมของตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วที่ดีสองตัว คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลีน ซึ่งมีผลในด้านธุรกิจ อย่างไรก็ตามมันเป็นสิ่งสำคัญที่เราจะต้องเข้าใจขอบเขตของสมดุลสถานะ พื้นที่ส่วนใหญ่ที่สารไอออนิกที่มีตัวสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา คือ ตัวให้ และ ตัวรับโปรตอน ซึ่งจะมีมากในโมเลกุลแบบ 2 ขั้ว (Dipolar molecules) สารลดแรงดึงผิว (Surfactants) และ โมเลกุลซับซ้อน (Complex molecules) และอื่นๆ อีกมากมาย ตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพเกี่ยวกับเรื่องนี้ เช่น การทดลองของ Edison [2-3] ที่ค้นพบพันธะไฮโรเจน ซึ่งเป็นหลักการผลิตส่วนผสมในตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูง

หลักการทำนายพฤติกรรมของตัวทำละลายร่วม ในการสกัดด้วยวิธีการโครมาโทรกราฟีนั้น ค่อนข้างจะซับซ้อนกว่าการสกัดที่ใช้ตัวทำละลายร่วม ซึ่งในตอนหลังนั้นจะมีความเท่ากันทางกายภาพของสารละลายระหว่างของเหลวหรือของแข็ง และสารผสมที่เป็นตัวทำละลาย โดยผสมกับของแข็งตัวอย่างเช่น ดิน เป็นต้น การสกัดสารด้วยวิธีโครมาโทรกราฟีนี้ เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนสารละลายที่หลากหลาย สารผสมเหนือวิกฤต และสารละลายดูดซับ ซึ่งผลที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ปฏิกิริยา (Reactions)

ของไหลเหนือวิกฤต ได้รับความสนใจในการใช้เป็นตัวกลางสำหรับปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น มีความสามารถในการละลายสาร มีค่าความหนืด มีค่าการแพร่ และค่าคงที่ความเป็นฉนวน ซึ่งอยู่ระหว่างทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ และการที่ความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเหล่านี้ มีผลกระทบต่อสภาวะของปฏิกิริยา และตัวทำละลายเหนือวิกฤต จะมีผลต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยาน้อย

ในปฏิกิริยาชีวภาพ (Bioreactions) ได้มีการใช้ของไหลเหนือวิกฤติ คือคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกลางของปฏิกิริยาสำหรับการสร้างเอนไซม์ที่ใช้เป็นตัวเร่ง (Enzymatic catalysis) การที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตนั้นมีการแพร่ที่สูง และมีแรงดึงผิวน้อย จึงทำให้สามารถควบคุมการละลายได้ รวมทั้งไม่เป็นพิษ และมีปัญหาน้อย จึงทำให้มีความเหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการใช้ของไหลเหนือวิกฤต ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์อีกด้วย

2.2.5 วัสดุศาสตร์ (Materials)

ของไหลเหนือวิกฤตมีความเหมาะสมมากในกระบวนการทางด้านวัสดุศาสตร์ เช่น การตกผลึก (Crystallization) การนำกลับมาตกผลึกใหม่ (Recrystallization) คอมมินิวชั่น (Comminution) การสังเคราะห์เส้นใย (Fiber formation) การกวนผสม (Blend formation) และ การสร้างโฟม (Microcellular foam formation)

นอกจากนี้ ของไหลเหนือวิกฤตได้ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์และการทำให้เกิดรูพรุนของสารพอลิเมอร์ในระดับนาโนเมตร โดยได้มีการแสดงความก้าวหน้าในการพัฒนา และลักษณะทางโครงสร้างในระดับนาโนเมตร และการใช้ของไหลเหนือวิกฤตในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ระดับนาโนเมตร เทคโนโลยีในระดับนาโนเมตรสามารถช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุพอลิเมอร์ได้ โดยใช้ของไหลเหนือวิกฤตมาช่วยในกระบวนการผลิต และงานค้นคว้าใหม่ๆ ได้เน้นการศึกษาการลดขนาดของการกระจายส่วนประกอบให้อยู่ในระดับนาโนเมตร

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

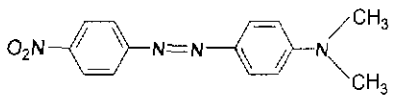
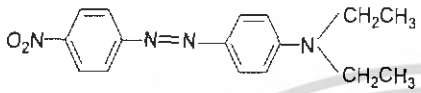
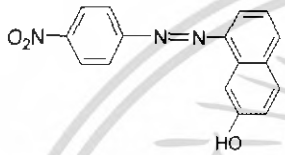
2.3.1 การศึกษาพฤติกรรมการละลายของสีย้อมบางชนิดในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตนั้น เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเลือกสี และกำหนดอุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในกระบวนการ โดยข้อมูลการละลายเป็นที่ต้องการ เพื่อจะนำไปสู่กระบวนการในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ [6] จะใช้สี 3 ชนิดคือ 4-(N,N-dimethylamino)-4'-nitroazobenzene (D_1) 4-(N,N-diethylamino)-4'-nitroazobenzene (D_2) และ Parared (D_3) ซึ่งจะวัดค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อที่จะนำไปออกแบบกระบวนการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวัดค่าการละลายนั้น จะทำที่อุณหภูมิ 35 - 85 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 12.2 - 35.5 เมกะพาสคาล

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของสีย้อมและสมบัติทางเคมี [6]

Dyes	Structure	Melting point (K)	λ_{max} (nm)	Mw (g mol^{-1})	Solvent
D_1		488–489	471	270.12	MeOH
D_2		418–419	472	298.14	EtOH
D_3		529–530	482	293.13	CH_3CN

จะเห็นว่าค่าการละลายของ D_2 มากกว่า D_1 และ D_3 ประมาณ 7 และ 20 เท่าตามลำดับ กลุ่มเมทธิลีนที่เพิ่มเข้ามาในโมเลกุล D_2 นั้นมีผลต่อค่าการละลายอย่างมีนัยสำคัญของ D_2 เมื่อเทียบกับ D_1

Javad Fasihi และคณะ [6] สันนิษฐานว่าการสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในนั้นทำให้ค่าการละลายลดลง และยิ่งกว่านั้นค่าการละลายมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับจุดหลอมเหลวของสีย้อมเอง นั่นคือยิ่งจุดหลอมเหลวสูง ค่าการละลายก็จะยิ่งต่ำลง และมีการสังเกตว่า โดยทั่วไปนั้นค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความดัน ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ นั้นสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการละลาย ด้วยตัวอย่างผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าการละลาย Javad Fasihi และคณะ [6] พบพฤติกรรมการลดลงของสีย้อมทั้ง 3 ชนิดที่ความดัน 18.0 เมกะพาสคาล โดยผลกระทบทั้ง 2 อย่างนั้นสามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ ในทางทฤษฎีนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีส่วนช่วยเพิ่มค่าการละลายโดยผ่านความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ในเวลาเดียวกัน ความหนาแน่นของสารละลายจะลดลง ที่ความดันต่ำๆนั้นการลดลงของความหนาแน่นของสารละลายนั้น จะทำให้ค่าการละลายลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน ค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เพราะความหนาแน่นในช่วงความดันสูงๆจะมีผลน้อยมากต่ออุณหภูมิ และที่อุณหภูมิปกติมีผลต่อการละลาย

ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ค่อนข้างยากที่จะคาดเดา ดังนั้นจึงทำการสร้างสมการโดยสังเกตจากผลการทดลองที่ได้ ดังสมการต่อไปนี้ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln\left(yP/P_{ref}\right) = A + C\left(\rho - \rho_{ref}\right) \tag{2.1}$$

ซึ่ง y คือ สัดส่วนโมลของตัวถูกละลาย

P คือ ความดันที่ใช้ในการทดลอง

P_{ref} คือ ความดันมาตรฐานที่ 0.1 เมกะพาสคาล

ρ คือ ความหนาแน่นของสารละลายในการทดลอง

ρ_{ref} คือ ความหนาแน่นมาตรฐานของสารละลาย ซึ่งมีค่า 0.7 กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร

A และ C คือ ค่าคงที่

ρ_{ref} นั้นถูกใช้ จุดตัดที่ A จะอยู่ในช่วงข้อมูลที่ได้จากการทดลองเท่านั้น และไม่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรอื่นๆ โดยจะทำการต่อกราฟมายังจุดที่มีความหนาแน่นเป็น 0 ค่าคงที่ C หาได้โดยการแก้สมการของของไหล และสมมุติให้เป็นค่าคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิและค่าคงที่ A หาได้จากความดันไอของตัวทำละลาย ดังสมการต่อไปนี้ [6]

$$A = a + \frac{b}{T} \tag{2.2}$$

ซึ่ง a และ b เป็นค่าคงที่ และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ ซึ่งเมื่อรวมสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะได้เป็นสมการรวม ดังนี้ [6] คือ

$$\ln\left(yP/P_{ref}\right) = a + \frac{b}{T} + C\left(\rho - \rho_{ref}\right) \tag{2.3}$$

โดยในขั้นตอนแรกนั้นจะทำการพล็อตค่า $\ln\left(yP/P_{ref}\right)$ กับ ค่าความหนาแน่น จะได้กราฟเป็นเส้นตรงโดยใช้วิธีการถดถอย (Least regression) เพื่อหา A และ C ตามสมการที่ (2.1) ผลของการพล็อตกราฟจะได้เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากัน ค่าของ C จะได้จากความชันของเส้นกราฟที่ตรงกัน จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละองค์ประกอบ

ทำการพล็อตกราฟระหว่าง A และ $1/T$ ของแต่ละองค์ประกอบให้ผลเป็นเส้นตรง ซึ่งจะหาค่า a และ b ได้จากความชันของกราฟและจุดตัดที่แกน y เมื่อเราได้ค่า a b และ C เพื่อนำไปหาค่าการละลายด้วยสมการที่ (2.3) จากนั้น นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองพบว่าสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่า *a* *b* และ *C* ที่ได้จากการคำนวณ [6]

Solubility constants *a*, *b*, and *C* and the estimated ΔH_{vap} values and AARD% obtained from the data correlation procedure

Dye	*a*	*b* (K)	*C* (kg^{-1} m^3)	ΔH_{vap} (kJ mol^{-1})	AARD%[a]
D_1	16.23	−7820.1	0.010	65	6.36−17.68
D_2	19.86	−8489.3	0.012	71	5.97−16.03
D_3	14.15	−7529.7	0.0082	63	13.05−25.45

2.3.2 Dye uptake และ Partition ratio ของสีย้อมบางชนิดระหว่าง พอลิเอทิลีน เทอเรฟ-ทาเลต และคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ในงานวิจัยนี้ [7] จะทำการศึกษาค่า การเกิดมวลสีย้อม (Dye uptake) และ อัตราส่วนการแบ่งแยก (Partition ratio) ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้สีย้อม 3 ชนิดคือ Disperse blue 79 Disperse orange 3 และ Solvent brown 1 และทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 353.2 - 393.2 องศาเคลวิน ความดัน 180 - 240 บาร์

ตารางที่ 2.5 ผลการการทดลองกระบวนการย้อมด้วยสีย้อม Disperse orange 3 [7]

Dye uptakes and partition coefficient of Disperse orange 3

T (K)	*P* (bar)	Dye uptake in the polymer (g/g × 10^3)	Dye solubility in the fluid (g/g × 10^6)	Partition coefficient *K*
353.2	160	17.9	9	2000
	180	18.4	18	1000
	200	18.5	28	660
	220	18.5	46	400
	240	18.5	54	340
373.2	160	25.2	8	3200
	180	25.3	17	1500
	200	25.1	33	760
	220	25.3	53	480
	240	24.7	77	320
393.2	160	26.2	9	2900
	180	30.8	18	1700
	200	30.5	27	1100
	220	30.6	60	510
	240	30.1	96	310

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ผลการทดลองกระบวนการย้อมด้วยสีย้อม Disperse blue 79 [7]

Dye uptakes and partition coefficients of Disperse blue 79

T (K)	P (bar)	Dye uptake in the polymer ($g/g \times 10^3$)	Dye solubility in the fluid ($g/g \times 10^6$)	Partition coefficient K
353.2	180	9.33	8	1200
	200	11.0	25	440
	220	13.6	53	230
	240	14.3	103	130
373.2	180	32.3	8	4100
	200	35.1	20	1800
	220	36.4	48	760
	240	36.4	129	280
393.2	180	52.2	8	6700
	200	52.3	21	2500
	220	53.1	51	1000
	240	53.6	66	820

ตารางที่ 2.7 ผลการทดลองกระบวนการย้อมด้วยสีย้อม Solvent brown 1 [7]

Dye uptakes and partition coefficients of Solvent brown 1

T (K)	P (bar)	Dye uptake in the polymer ($g/g \times 10^3$)	Dye solubility in the fluid ($g/g \times 10^6$)	Partition coefficient K
353.2	140	20.3	–	–
	160	22.6	–	–
	180	24.9	–	–
	200	26.2	17	1600
	220	26.2	27	960
	240	26.2	41	640
373.2	140	30.0	–	–
	160	32.8	–	–
	180	35.7	8	4600
	200	37.0	15	2500
	220	37.9	27	1400
	240	38.8	43	890
393.2	140	29.4	–	–
	160	37.2	–	–
	180	45.1	–	–
	200	45.4	–	–
	220	46.1	23	2000
	240	46.8	34	1400

จากตารางแสดงผลการทดลอง พบว่าค่า Dye uptake นั้นจะมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง โดยที่จะไม่ขึ้นกับค่าความดัน และในแต่ละอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มความดันนั้น จะทำให้ค่าการละลายนั้นเพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Partition coefficient , K) นั้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

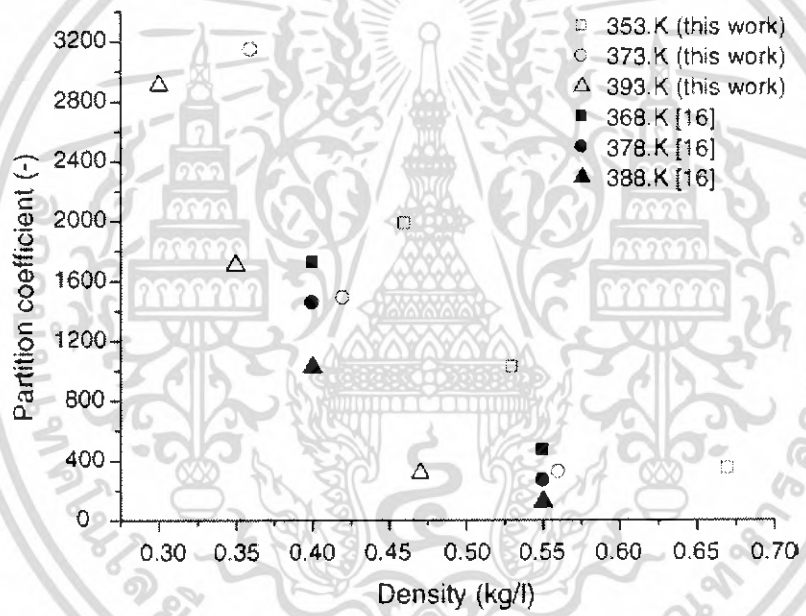
$$K = \frac{w_i^p}{w_i^f} \tag{2.4}$$

โดย w_i^p คือ อัตราส่วนโดยมวลของสีย้อมในชิ้นงานพอลิเมอร์

w_i^f คือ อัตราส่วนโดยมวลของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อกระบวนการย้อมเข้าสู่สมดุล อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า Dye uptake มากกว่าความดัน โดยจะเห็นได้จากค่า K ที่ลดลงเมื่อเพิ่มความดันมากขึ้น

เมื่อทำการศึกษาต่อไปนั้น จะพบว่าค่าความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีผลต่อค่า K โดยจะแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และค่า Partition coefficient [7]

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า K ที่อุณหภูมิต่างๆนั้นจะลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะการทดลองจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นในแต่อุณหภูมิ ในขณะที่ค่า Dye uptake ของสีย้อมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวภายในชิ้นงานพอลิเมอร์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

2.4.1 Pitzer Correlations for The Compressibility Factor [8]

ความสัมพันธ์ของค่า Z สามารถอธิบายได้ดังสมการดังต่อไปนี้ [8]

$$Z = Z^0 + \omega Z^1 \tag{2.5}$$

เมื่อ Z^0 และ Z^1 คือ ฟังชั่นของ T_r และ P_r

T_r คือ อุณหภูมิรีดิวซ์

P_r คือ ความดันรีดิวซ์

ω คือ อะเซนดริกแฟกเตอร์ (Acentric factor)

โดยที่ค่า Z นั้นสามารถอธิบายได้โดยสมการ [8]

$$Z = P\nu / RT \tag{2.6}$$

เมื่อ P คือ ความดันที่ใช้ในการทดลอง (บรรยากาศ)

ν คือ ปริมาตรต่อโมลของก๊าซ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

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

T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (เคลวิน)

จากความสัมพันธ์นี้ทำให้เราสามารถนำไปหาค่าความหนาแน่นที่ความดันคงที่ต่างๆกัน โดยหาจากสมการ [8]

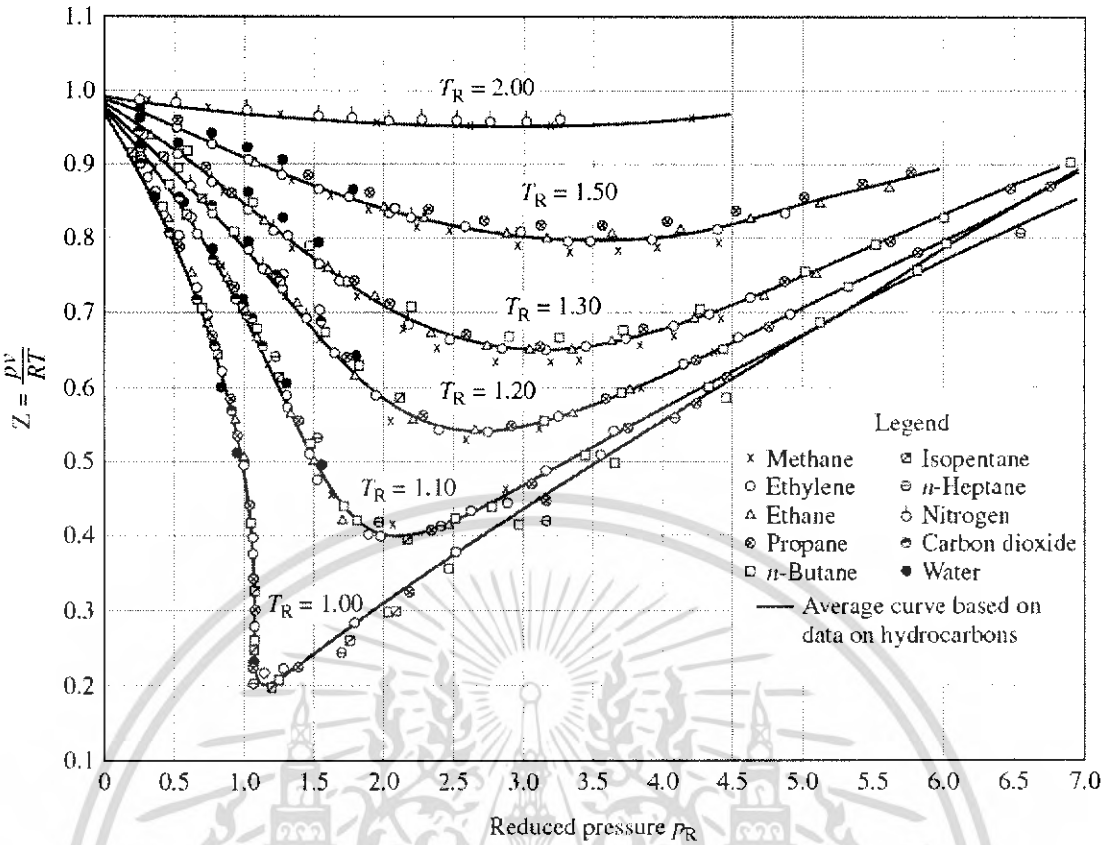
$$\rho = \frac{m}{\nu} \tag{2.7}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

m คือ มวลโมเลกุลของก๊าซ (กรัมต่อโมล)

ν คือ ปริมาตรต่อโมลของก๊าซ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

62388
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 Compressibility chart ของก๊าซต่างๆที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ [8]

2.4.2 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง (Dual Mode Sorption Model)

ในกระบวนการการดูดซึมสำหรับในกรณีนี้ จะพิจารณาโดยใช้กลไกของการดูดซึมแบบสองทาง กล่าวคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแพร่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ เข้าไปละลายและอยู่ในสมดุลกับสีย้อมก่อน จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงพาสีย้อมเข้าสู่ชิ้นพอลิเมอร์โดยการแพร่เข้าไปละลาย และอยู่ในสมดุลกับชิ้นงานพอลิเมอร์ในที่สุด นั่นคือการย้อมสีได้เกิดขึ้นแล้ว โดยในระหว่างกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดการดูดซึมสองแบบ คือ ในแบบแรก จะเป็นการดูดซึมตามปกติ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ (Henry's Law) และแบบที่สอง จะเกิดการดูดซึมระหว่างรูและช่องว่างภายใน ในระดับที่เล็กมากๆ (Microvoid) และเมื่อนำค่าการดูดซึมทั้งสองแบบมารวมกัน ก็จะได้เป็นค่าการละลายทั้งหมดของสีย้อม ตามสมการต่อไปนี้ [9]

$$C = C_D + C_H = k_D p + \frac{C'_H bp}{1 + bp} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี่ ($g_{Dye} / g_{Polymer}$ MPa)

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

p คือ ค่าความดัน (MPa)

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

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

C_H คือ ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดเล็กมากๆ (Microvoid) ($g_{Dye} / g_{Polymer}$)

ถ้าที่ความดันต่ำๆ ($bp << 1$) สามารถลดรูปสมการที่ (2.8) ได้ดังนี้ [9]

$$C = [k_D + C'_H b]p \tag{2.9}$$

และเมื่อเริ่มถึงความดันที่สูงมากๆ ($bp >> 1$) ช่องว่างภายในพอลิเมอร์ จะถึงค่าจำกัดที่จุดอิ่มตัว C'_H สามารถลดรูปสมการที่ (2.8) ได้ดังนี้ [9]

$$C = k_D p + C'_H \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1.1 รวบรวม และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยศึกษาจากบทความ และจากหนังสือ

3.1.2 การทำกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) เพื่อใช้หาค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ได้

3.1.3 ทำการทดลอง จำลองกระบวนการย้อมสี

3.1.4 สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 การทำกราฟมาตรฐาน

3.2.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- สีย้อม
- สารละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane , CH_2Cl_2)
- ขวดวัดปริมาตร
- กระบอกตวง
- เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Vis. Spectrophotometer)

3.2.1.2 การเตรียมสาร

1) เตรียมสาร โดยการชั่งผงสีน้ำหนัก 0.03 กรัม จากนั้นนำมาละลายในสารละลายไดคลอโรมีเทนปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะได้ความเข้มข้นของสารละลาย เป็น 0.0003 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2) จากนั้น นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมไว้ข้างต้น มาทำการเจือจางจนได้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 3×10^{-8} - 3×10^{-5} กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 การสร้างกราฟมาตรฐาน

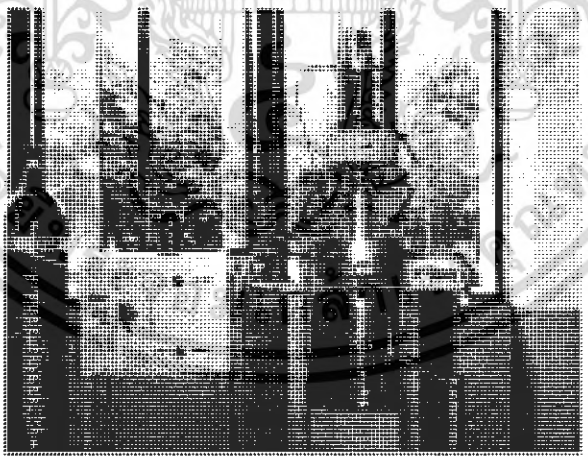
1) นำสารละลายไดคลอโรมีเทนบรรจุลงในเซลล์ควอทซ์ จากนั้นทำการสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงโดย โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 - 950 นาโนเมตรใช้ความละเอียดในการแสกนที่ 0.1 ไมโครเมตร จะได้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดที่ 528 นาโนเมตร

2) จากนั้นนำเอาสารละลายสีย้อมที่เตรียมความเข้มข้นในช่วง 3×10^{-8} - 3×10^{-5} กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง สเปกโตรโฟโต-มิเตอร์ โดยใช้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดที่ 528 นาโนเมตร

3.2.2 การทดลองกระบวนการย้อมสี

3.2.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์

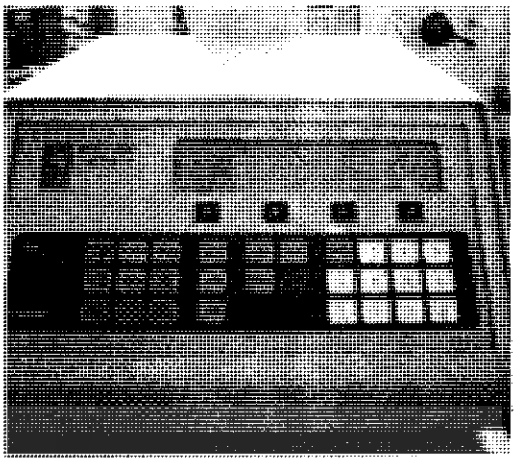
- สีย้อม
- พอลิเมอร์ชนิด พอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต
- อุปกรณ์ที่ใช้ คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดันสูง
- ปั๊มอัดความดันสูง
- ถังบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- เครื่องให้ความร้อน



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 ปั๊มอัดความดันสูง



รูปที่ 3.3 คอนโทลเลอร์ของปั๊มอัดความดัน

3.2.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.2.2.1 การเตรียมชิ้นงาน

1) ขึ้นรูปพอลิเมอร์ โดยการอัดขึ้นรูปร้อน

2) นำชิ้นพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปแล้ว มาตัดให้ได้ขนาดประมาณ 1×2 เซนติเมตร

3) วัดความหนาและชั่งน้ำหนักชิ้นงาน แล้วจดบันทึกไว้

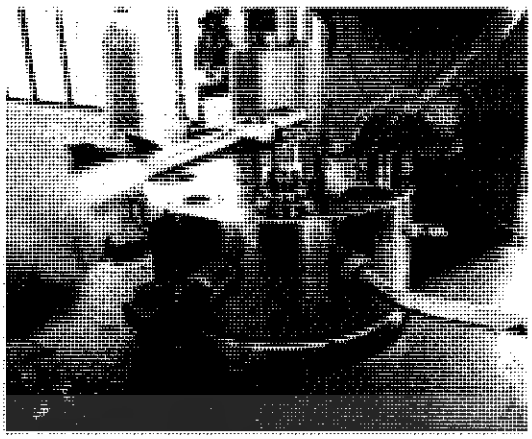
4) ชั่งผงสีน้ำหนักประมาณ 2 กรัม เพื่อใช้ในการทดลองในแต่ละครั้ง

3.2.2.2.2 การทดลองกระบวนการย้อมสี

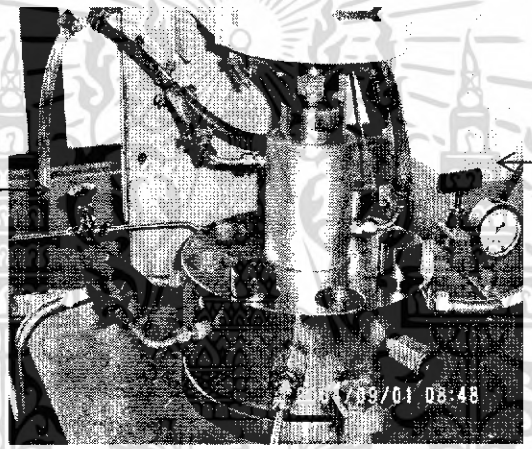
1) นำชิ้นพอลิเมอร์ และผงสีที่เตรียมไว้แล้ว เข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดัน

2) ขันน็อตทั้ง 8 ตัวให้แน่น เพื่อให้ระบบนั้น เป็นระบบปิดตามรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การขันน็อตที่เครื่องปฏิกรณ์แบบอัดความดัน



รูปที่ 3.5 วาล์วหมายเลข 1 และหมายเลข 2

3) ปิดวาล์วหมายเลข 2 ให้สนิท และเปิดวาล์วหมายเลข 1 เพื่อปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อเป็นการไล่อากาศออกจากเครื่องปฏิกรณ์

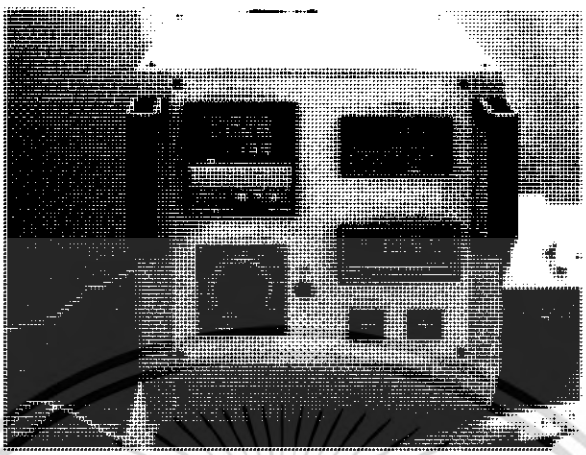
4) ปิดวาล์วหมายเลข 1 และเปิดวาล์วหมายเลข 2 เพื่อไล่เอาอากาศที่ค้างอยู่ในระบบออกให้หมดก่อน จึงปิดวาล์วหมายเลข 2

5) ทำซ้ำในข้อ 3 และ 4 อีก 2 ครั้ง

6) เมื่อไล่อากาศออกจากระบบหมดแล้ว จึงเปิดวาล์วหมายเลข 2 เพื่อเพิ่มความดันเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยเปิดไว้จนได้ความดันสูงสุด

7) ตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองไว้ที่ 212 องศาฟาเรนไฮต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและวัดความดัน

8) ปิดปั๊มอัดความดัน เพื่อเริ่มอัดความดันให้ได้สูงตามที่ต้องการ

9) เปิดปั๊มอัดความดัน เมื่อเริ่มอัดความดัน ทำการปิดวาล์วหมายเลข 1 และเปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่ปั๊มอัดความดัน

รูปที่ 3.7 วาล์วหมายเลข 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) ปิดวาล์วหมายเลข 3 จากนั้นจึงใช้ปั๊มเพื่อเพิ่มความดันตามที่เราต้องการในแต่ละการทดลอง

11) เมื่อได้ความดันมากกว่าในเครื่องปฏิกรณ์แล้ว จึงเปิดวาล์วหมายเลข 1 เพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์

12) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 9 - 11 จนได้ความดันในเครื่องปฏิกรณ์สูงตามที่ต้องการในแต่ละการทดลอง

13) ทำการตั้งค่าการควบคุมของปั๊มอัดความดัน เพื่อปรับความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ตลอดการทดลอง

14) ตั้งเครื่องทิ้งไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยในระหว่างนั้นทำการวัดอุณหภูมิ ความดันทุกๆ 1 ชั่วโมง

15) เมื่อครบ 4 ชั่วโมงแล้ว จึงปิดเครื่องให้ความร้อนและปั๊มอัดความดัน จากนั้น เปิดวาล์วหมายเลข 2 เพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์เย็นตัวลง

16) ปิดวาล์วหมายเลข 2 สักครู่ จึงทำการเปิดวาล์วหมายเลข 1

17) เปิดวาล์วหมายเลข 2 จนสุด เพื่อไล่ก๊าซให้ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ให้หมด จากนั้นจึงทำการขันน็อตทั้งหมดออก

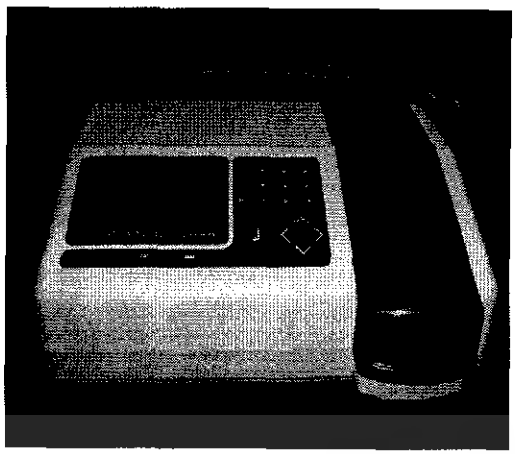
18) นำชิ้นงานมาทำการชั่งน้ำหนักแล้วทำการจดบันทึก

3.2.3 กระบวนการรีฟลักซ์ (Reflux)

3.2.3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- ชิ้นงานที่ผ่านการย้อมสีแล้ว
- สารละลายไดคลอโรมีเทน
- อุปกรณ์ที่ใช้ คือ ชุดรีฟลักซ์
- ขวดวัดปริมาตร
- ขวดก้นกลม 3 ทาง
- แท่นวางชุดรีฟลักซ์
- เทอร์โมมิเตอร์
- บีกเกอร์
- กระบอกตวง
- เครื่องให้ความร้อน
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

รูปที่ 3.9 ชุดการรีฟลักซ์

3.2.3.2 ขั้นตอนการทำรีฟลักซ์

1) ทำการตัดชิ้นงาน พอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ที่ผ่านกระบวนการย้อมสีแล้ว ให้ได้น้ำหนัก 0.06 และ 0.03 กรัม ตามลำดับ

2) ติดตั้งชุดอุปกรณ์การรีฟลักซ์ ดังรูปที่ 3.9

3) ใส่สารละลายไดคลอโรมีเทนปริมาตร 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในขวดก้นกลม 3 ทาง แล้วใส่ชิ้นงานตัวอย่างลงไป

4) ทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 - 15 ชั่วโมง หรือจนกว่าสีย้อมจะละลายออกจากชิ้นงานพอลิเมอร์หมด

5) นำสารละลายที่ได้จากกระบวนการรีฟลักซ์ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์

การวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาหาผลของค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ พอลิ-พรอพิลีน และ พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตทำหน้าที่เป็นตัวกลางช่วยในการย้อมสีพอลิเมอร์ ทำการศึกษาอิทธิพลของความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการย้อมสีในช่วง 7 - 28 เมกะพาสคาล ทั่วไปค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงานพอลิเมอร์ จะนิยามโดยใช้ปริมาณสีย้อมในหน่วยกรัมที่สามารถละลายในเนื้อพอลิเมอร์ปริมาณ 1 กรัม

จากผลการทดลองพบว่า สีย้อมสามารถละลายในเนื้อพอลิเมอร์ตัวอย่างได้ดี สังเกตได้จากสีของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสีม่วง หลังจากถูกแช่ไว้ในถังปฏิกรณ์อัดความดันสูงที่อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง จากนั้นปริมาณสีย้อมที่ละลายในชิ้นงานพอลิเมอร์จะถูกสกัดในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน โดยวิธีการรีฟลักซ์ เป็นเวลานานกว่า 10 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจว่า ปริมาณสีย้อมที่ละลายในชิ้นงานพอลิเมอร์นั้น ได้ถูกสกัดแยกออกจากชิ้นงานจนหมด จากนั้นนำสารละลายของสีย้อม Violet 23 ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ไปวัดค่าความเข้มข้นโดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงยูวี ที่ความยาวคลื่น 528 นาโนเมตร ซึ่งปริมาณของสีย้อมสามารถคำนวณได้จากการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในหน่วยร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรกับค่าการดูดกลืนแสง ตามสมการที่ (4.1)

$$y = 0.3948x \qquad (4.1)$$

โดยที่ ค่า x หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสง
ค่า y หมายถึง ค่าความเข้มข้นเป็นร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร

เมื่อทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ความดันสูง ตั้งแต่ 7 - 28 เมกะพาสคาล พบว่าค่าการละลายของสีย้อมมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองของพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตสามารถแสดงได้ตังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ชนิด พอลิพรอพิลีน ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (MPa)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (% w / v)	ค่าการละลาย (g_{Dye} / $g_{Polymer}$)
7.684	0.020	5.07×10^{-7}	1.35×10^{-6}
10.441	0.083	2.10×10^{-6}	1.63×10^{-6}
13.887	0.025	6.33×10^{-7}	2.11×10^{-6}
17.334	0.089	2.25×10^{-6}	2.52×10^{-6}
20.780	0.058	1.47×10^{-6}	1.94×10^{-6}
24.227	0.042	1.06×10^{-6}	2.49×10^{-6}
27.673	0.054	1.37×10^{-6}	3.17×10^{-6}

ตารางที่ 4.2 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ชนิด พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ที่ความดันต่างๆ

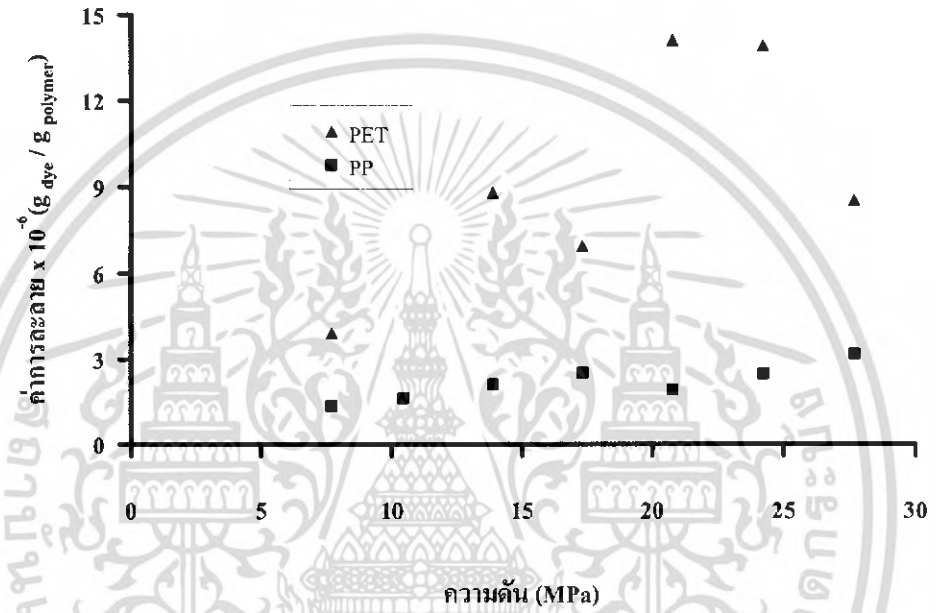
ความดัน (MPa)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (% w / v)	ค่าการละลาย (g_{Dye} / $g_{Polymer}$)
7.684	0.030	7.60×10^{-7}	3.90×10^{-6}
13.887	0.062	1.57×10^{-6}	8.81×10^{-6}
17.334	0.080	2.03×10^{-6}	6.97×10^{-6}
20.780	0.125	3.17×10^{-6}	1.41×10^{-5}
24.227	0.050	1.27×10^{-6}	1.39×10^{-5}
27.673	0.135	3.42×10^{-6}	8.57×10^{-6}

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลต โดยจะพบว่าค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิพรอพิลีนจะอยู่ในช่วง 10^{-6} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ และในช่วง 10^{-5} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ สำหรับ พอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลต จากค่าการละลายดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สีย้อม violet 23 สามารถละลายในพอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลตได้ดีกว่าพอลิพรอพิลีน ประมาณ 10 เท่า

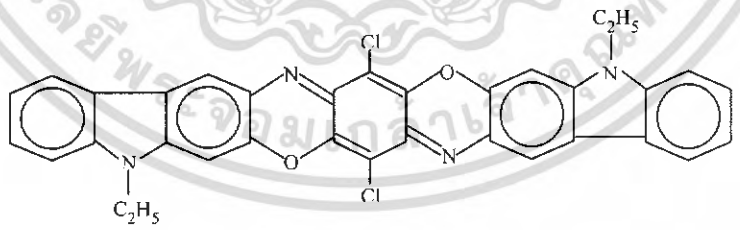
เมื่อทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลต ในทุกช่วงความดันตั้งแต่ 7 - 28 เมกะพาสคาล ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.1 พบว่าค่าการละลายสีย้อมสามารถละลายในพอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลตได้ดีกว่าพอลิพรอพิลีน ตลอดทุกช่วงความดันที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งโดยทั่วไป ความสามารถในการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์สามารถอธิบายได้จาก โครงสร้างของสีย้อมและโครงสร้างของพอลิเมอร์ พบว่าสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Violet 23 ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีสูตรโครงสร้างดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสูตรโมเลกุลของพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นได้ว่าสูตรโครงสร้างของสีย้อมนี้เป็นแบบมีขั้ว เนื่องจากมีวงแหวนเบนซีนในสูตรโครงสร้าง ซึ่งพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตนั้นเป็นพอลิเมอร์แบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic polymer) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วจากมีวงแหวนเบนซีน เช่นกัน จึงเป็นสาเหตุให้สีย้อมชนิด Violet 23 ละลายลงในพอลิเอทีลีนเทอเรพทาเลตได้ดีกว่าพอลิพรอพิลีน ที่เป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic polymer) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดไม่มีขั้ว

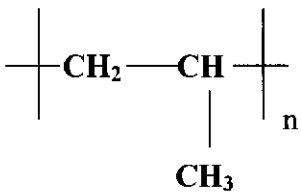


รูปที่ 4.1 ค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ความดันต่างๆ

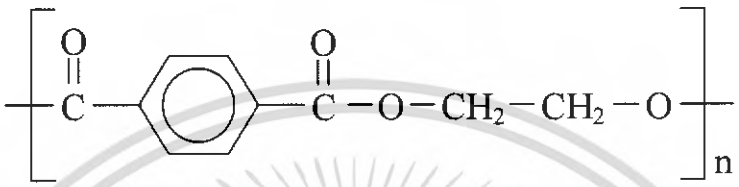


รูปที่ 4.2 สูตรโครงสร้างของสีย้อม Violet 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สูตรโมเลกุลของพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 4.4 สูตรโมเลกุลของพอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลต

4.2 การประมาณค่าการละลายโดยใช้แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง

จากผลการทดลองที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.1 ที่แสดงค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 เพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ความดันที่ใช้สูงขึ้น ซึ่งตามสมการที่ (2.8)

$$C = C_D + C_H = k_D p + \frac{C'_H bp}{1+bp} \qquad (2.8)$$

ลักษณะผลการทดลองที่ได้นั้นสามารถนำแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง มาใช้ในทำนายค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ได้ เมื่อพิจารณากลไกการดูดซึมของสีย้อมในพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เนื่องจากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะทำหน้าที่พาสีย้อมเข้าสู่ชิ้นงานพอลิเมอร์โดยการแพร่ จากผลการทดลองพบว่าในช่วงความดันเริ่มต้นค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นไปตามการดูดซึมแบบปกติที่อธิบายด้วยกฎของเฮนรี่ (Henry's law) โดยทำนายค่าการละลายในช่วงต้นได้จากค่าคงที่ของเฮนรี่ (k_D) และเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ จะอธิบายได้ด้วยการดูดซึมของโมเลกุลสีย้อมกับรูช่องว่างภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ซึ่งขึ้นกับค่าคงที่ C'_H และ b ตามลำดับ ดังนั้นการประมาณค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับความดันที่ใช้ สามารถทำได้โดยการหาค่า k_D C'_H และ b จากผลการทดลอง ซึ่งเป็นค่าเฉพาะสำหรับคู่ของสีย้อมและพอลิเมอร์ที่ใช้เท่านั้น ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้สามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการประมาณค่าภายในช่วงกราฟ (Interpoltion Graph) จากผลการทดลองที่สร้างขึ้นมา สำหรับรายละเอียดการประมาณค่า จะแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

ผลการประมาณค่าคงที่ เพื่อทำการหาค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ของพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ที่หาได้สำหรับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด

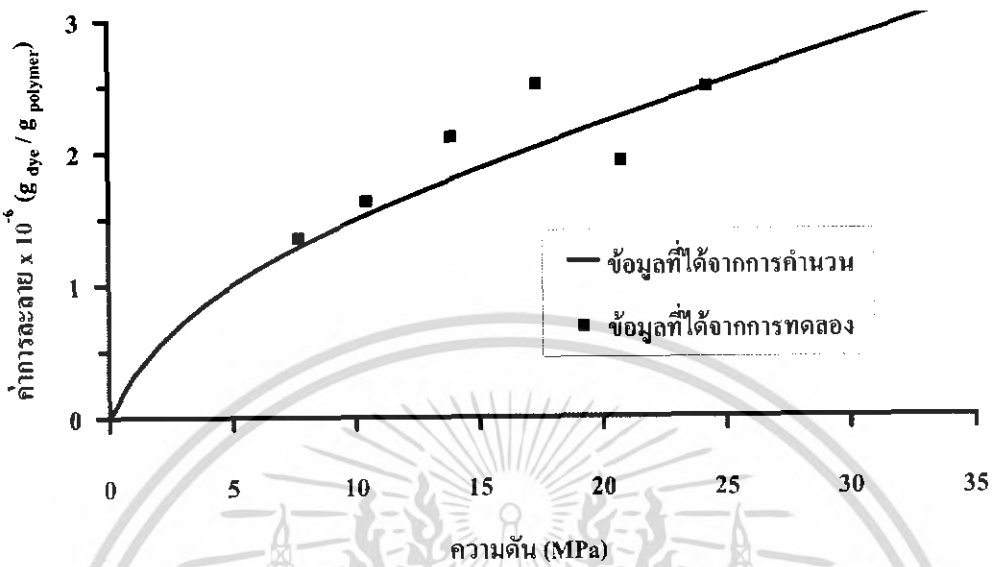
ค่าคงที่	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	พอลิพรอพิลีน	พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต
$k_D \left(\frac{g_{Dye} / g_{Polymer}}{MPa} \right)$	5.750×10^{-8}	2.135×10^{-7}
$C'_H \ (g_{Dye} / g_{Polymer})$	1.281×10^{-6}	7.465×10^{-6}
$b \ (MPa^{-1})$	0.250	0.1038

จากตารางที่ 4.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า k_D ของพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต พบว่าค่า k_D ของพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตมีค่ามากกว่าพอลิพรอพิลีน ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตได้ดีกว่าพอลิพรอพิลีน ส่วนค่าคงที่ C'_H ที่แสดงความอิ่มตัวของจำนวนช่องว่างขนาดเล็ก เมื่อมีการดูดซึมของสีย้อมในพอลิเมอร์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับช่วง 10^{-6} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ ซึ่งอาจแสดงถึงความสามารถในการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น จากการแทนที่ในช่องว่างขนาดเล็กในสภาวะอิ่มตัวที่มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าคงที่ b ซึ่งใช้แสดงความสามารถในการละลายของสีย้อมที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากความเข้ากันได้ระหว่างรูช่องว่างขนาดเล็กกับโมเลกุลของสีย้อม (Hole affinity) พบว่าค่าคงที่ b ของพอลิพรอพิลีนมีค่ามากกว่าพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสีย้อม Violet 23 ละลายเข้ากับพอลิพรอพิลีนได้ไม่ดีในช่วงการดูดซึมแบบกฎของเฮนรี่ เนื่องจากพอลิพรอพิลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรโฟบิก ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ ส่วนสีย้อม Violet 23 มีโครงสร้างกึ่งชอบน้ำ ดังนั้นการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิพรอพิลีนจึงน่าจะเกิดขึ้นจากกลไกการดูดซึมเนื่องจากการแทนที่ของโมเลกุลสีย้อมในช่องว่างขนาดเล็กของพอลิพรอพิลีนเท่านั้น จึงทำให้ปริมาณสีย้อมรวมในพอลิพรอพิลีนน้อยกว่าพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ตลอดทุกช่วงความดัน

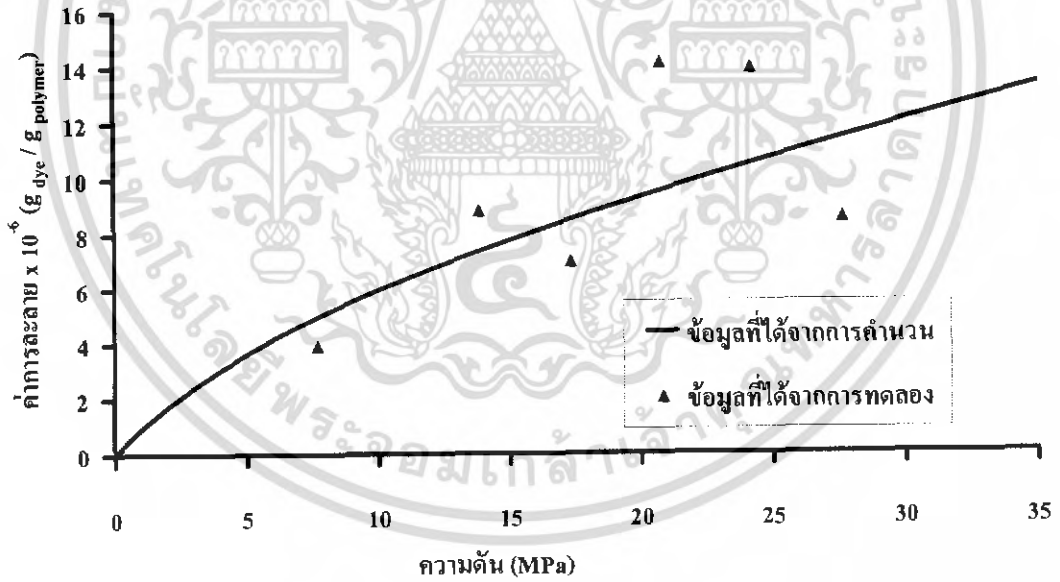
จากค่าคงที่ที่แสดงในตารางที่ 4.3 ทำให้เราสามารถทำนายค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตได้ ในช่วงความดัน 0 - 30 เมกะพาสคาล ผลการเปรียบเทียบค่าการละลายจากการทดลองและการประมาณค่าแสดงในกราฟรูปที่ 4.2 และ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต พบว่าการทำนายค่าการละลายสีย้อมในพอลิเมอร์ด้วยแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทางสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันที่มีต่อค่าการละลายของพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบผลของความดันที่มีต่อค่าการละลายของพอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเปรียบเทียบค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในชิ้นงานพอลิเมอร์ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Partition Coefficient , *K*)

จากผลการทดลองที่แสดงดังกราฟรูปที่ 4.1 พบว่า ค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงานพอลิ-เมอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในช่วงการทดลองที่ 7 - 28 เมกะพาสคาล ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการพาสีย้อม เข้าสู่ชิ้นงานพอลิ-เมอร์ เพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานตามที่กล่าวมานี้ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาการหาค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยค่านี้จะหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$\ln\left(yP/P_{ref}\right) = a + \frac{b}{T} + C\left(\rho - \rho_{ref}\right) \qquad (2.3)$$

ซึ่ง y คือ สัดส่วนโมลของตัวถูกละลาย

P คือ ความดันที่ใช้ในการทดลอง

P_{ref} คือ ความดันมาตรฐานที่ 0.1 เมกะพาสคาล

ρ คือ ความหนาแน่นของสารละลายในการทดลอง

ρ_{ref} คือ ความหนาแน่นมาตรฐานของสารละลาย ซึ่งมีค่า 0.7 กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร

a b และ C คือ ค่าคงที่หาได้จากการทดลอง

และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงานพอลิเมอร์ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Partition Coefficient , K) ซึ่งจะนิยามโดยใช้ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ต่อค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

$$K = \frac{w_i^p}{w_i^f} \qquad (2.4)$$

โดย w_i^p คือ อัตราส่วนโดยมวลของสีย้อมในชิ้นงานพอลิเมอร์

w_i^f คือ อัตราส่วนโดยมวลของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการเปรียบเทียบค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ กับค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มความดันที่ใช้ในการทดลอง ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.3) ในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ จะเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะอิ่มตัวในช่องว่างขนาดเล็กของพอลิเมอร์หรือค่าจำกัด C'_H นั่นเอง โดยจากกลไกดังกล่าวนี้ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความดันมากขึ้น ดังแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิพรอพีลีน

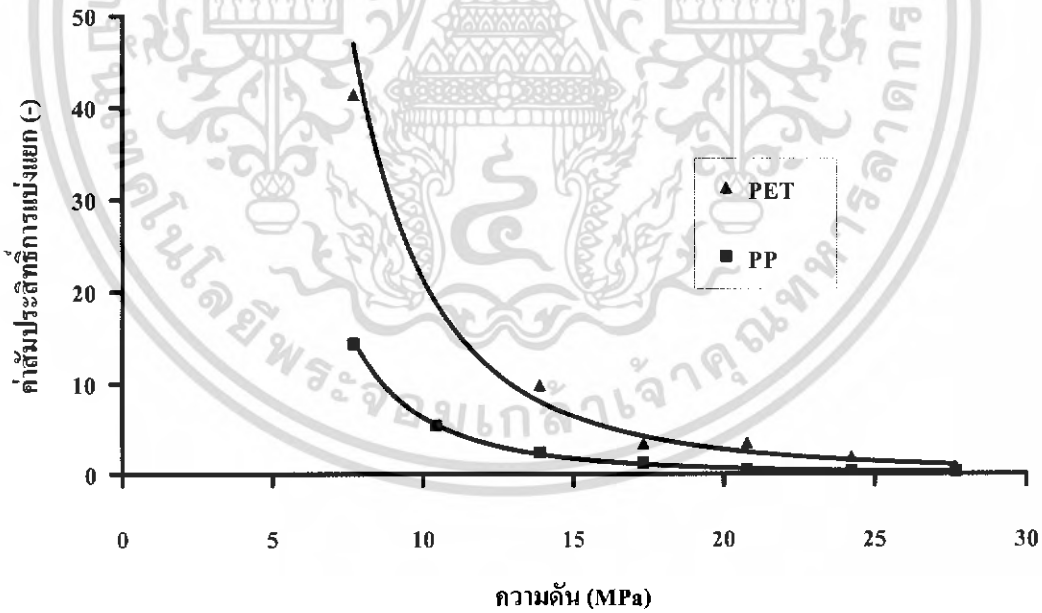
ความดัน (MPa)	ค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงาน $(g_{Dye}/g_{Polymer})$	ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})	สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก $\frac{(g_{Dye}/g_{Polymer})}{(g_{Dye}/g_{CO_2})}$
7.68	1.35×10^{-6}	9.41×10^{-8}	14.36
10.44	1.63×10^{-6}	3.02×10^{-7}	5.38
13.89	2.11×10^{-6}	8.95×10^{-7}	2.36
17.33	2.52×10^{-6}	2.08×10^{-6}	1.20
20.78	1.94×10^{-6}	4.15×10^{-6}	0.47
24.23	2.49×10^{-6}	7.45×10^{-6}	0.33
27.67	3.17×10^{-6}	1.24×10^{-5}	0.26

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิเอทีลีน เทอเรพทาเลต

ความดัน (MPa)	ค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงาน $(g_{Dye}/g_{Polymer})$	ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})	สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก $\frac{(g_{Dye}/g_{Polymer})}{(g_{Dye}/g_{CO_2})}$
7.68	3.90×10^{-6}	9.41×10^{-8}	41.43
13.89	8.81×10^{-6}	8.95×10^{-7}	9.84
17.33	6.97×10^{-6}	2.08×10^{-6}	3.35
20.78	1.41×10^{-5}	4.15×10^{-6}	3.40
24.23	1.39×10^{-5}	7.45×10^{-6}	1.87
27.67	8.57×10^{-6}	1.24×10^{-5}	0.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทดลองเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ของพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตที่ทุกช่วงความดันตั้งแต่ 7 - 28 เมกะพาสคาล ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.7 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตจะมีค่ามากกว่าในพอลิพรอพิลีน ในทุกช่วงความดัน เนื่องจากค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต มีค่ามากกว่าพอลิพรอพิลีน ซึ่งอธิบายได้จากกลไกที่กล่าวมาในขั้นต้น และเมื่อสังเกตจากกราฟจะเห็นได้ชัดว่าในช่วงความดันเริ่มต้น ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2.3) ในขณะที่ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าจำกัดที่สภาวะอิ่มตัว และในช่วงความดันสูงความดันสูงขึ้นไป ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกจะมีค่าต่ำลงและเริ่มคงที่ โดยมีสาเหตุจากค่าการละลายของสีย้อมเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวภายในช่องว่างขนาดเล็กในโครงสร้างของพอลิเมอร์ แล้ว ซึ่งจากกลไกที่กล่าวมานี้ สามารถบอกความดันที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการย้อมสี ที่อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองนี้ความดันที่เหมาะสมคือประมาณ 11 - 12 เมกะพาสคาล เพราะที่ความดันสูงนั้น ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์จะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวในช่องว่างขนาดเล็กของโครงสร้างพอลิเมอร์ ในขณะที่ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต นั้นเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2.3) ซึ่งเป็นผลเป็นการสิ้นเปลืองสีย้อมโดยไม่เกิดประโยชน์



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดที่ความดันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) จากผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่า กระบวนการย้อมสีด้วยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต จะให้ผลการย้อมที่มีประสิทธิภาพ โดยสามารถดูได้จากค่าการละลายของสีย้อมในพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ซึ่งค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิพรอพิลีนอยู่ในช่วง 10^{-6} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ และสำหรับพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตนั้นค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 อยู่ในช่วง 10^{-5} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ ซึ่งเห็นได้ว่าค่าการละลายของพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตมีค่ามากว่าพอลิพรอพิลีนถึง 10 เท่า

2) จากการทดลองกระบวนการย้อมสีพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ที่อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส และที่ความดันตั้งแต่ 7 - 28 เมกะพาสคาล พบว่าค่าการละลายของสีย้อมในชิ้นงานพอลิเมอร์นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทดลอง โดยเป็นไปตามกลไกการดูดซึมแบบสองทาง โดยค่าการละลายของพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต นั้นจะมีค่ามากกว่าพอลิพรอพิลีน

3) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการละลายจากการทดลอง และจากการประมาณค่า พบว่าการทำนายค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ด้วยแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยสามารถนำค่าคงที่ C'_H k_D และ b ที่ได้จากการประมาณค่า ไปใช้ในการทำนายค่าการละลายของสีย้อม Violet 23 ในพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลตที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และที่ความดันต่างๆ ได้

4) จากค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่ได้จากการทดลอง พบว่าการใช้ความดันที่ใช้ในการกระบวนการย้อมสีมากเกินไป จะเป็นการสิ้นเปลืองสีย้อมโดยเปล่าประโยชน์และความดันที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองที่ 11 – 12 เมกะพาสคาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ศึกษากระบวนการย้อมสีพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ด้วยสีย้อมชนิดอื่นๆ เพื่อศึกษาว่าชนิดของสีย้อมมีผลต่อค่าการละลายอย่างไร

2) ศึกษากระบวนการย้อมสี โดยเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ เพื่อศึกษาว่าค่าการละลายของสีย้อมที่ได้นั้นมีค่าเป็นอย่างไร

3) ศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าการละลาย

4) ศึกษากระบวนการ โดยการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาว่าเวลามีผลต่อค่าการละลายอย่างไร

5) ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้งานคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในกระบวนการต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] John W. Hill, Ralph H. Petrucci, *General Chemistry : an integrated approach*, 3rd Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

[2] Kirk-Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology Vol. 23*, 4th Ed., John Wiley, New York, 1991.

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

[4] Sameer P. Nalawade, Francesco Picchioni, L.P.B.M. Janssen, *Progress in Polymer Science*, Vol. 31, 2006, 19-43.

[5] Hyo-Kwang Bae, Jung-Ho Jeon, Heun Lee, *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 222-223, 2004, 119-125.

[6] Javad Fasihi, Yadollah Yamini, Farahnaz Nourmohammadian, Naader Bahramifar, *Dyes and Pigments*, Vol. 63, 2004, 161-168.

[7] A. Ferri, M. Banchero, L. Manna, S. Sicardi, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 37, 2006, 107-114.

[8] J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 6th Ed., McGraw-Hill International Edition, Singapore, 2001.

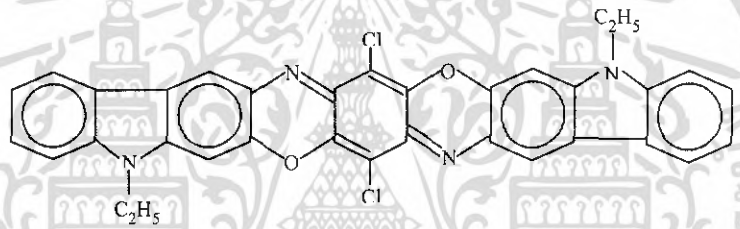
[9] Wolf R. Vieth, *Diffusion In and Through Polymers : principles and applications*, Hanser Publishers, Munich Vienna New York Barcelona, 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของการย้อมสี

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของการย้อมสี จะเริ่มต้นจากการหาความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2) เป็นร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรก่อน เพื่อใช้เป็นสารละลายเริ่มต้นในการทำการเจือจางสารลงไปเรื่อยๆ เพื่อทำเป็นกราฟมาตรฐานของการย้อมสีต่อไป โดยสีย้อมที่ใช้เป็นสีย้อมสีม่วง มีชื่อเรียกทางเคมีว่า คาร์บาโซล ไดออกซาทิออน ไวโอเลต (Carbazole Dioxathion Violet) หรือเรียกอย่างง่ายว่า Violet 23 มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{32}H_{22}O_2N_4Cl_2$ และน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 589.28 กรัมต่อโมล โดยแคสนัมเบอร์ (CAS No.) เท่ากับ 6358 - 30 - 1 อียูนัมเบอร์ (Eu No.) เท่ากับ 228 - 767 - 9 และ ซีไอนัมเบอร์ (C.I. No.) เท่ากับ 51319 โดยมีสูตรโครงสร้างดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 สูตรโครงสร้างของสีย้อม Violet 23

การเตรียมสารละลายเริ่มต้น จะทำที่ความเข้มข้นเป็น ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้คือ

ชั่งน้ำหนักของสีย้อมมาประมาณ 0.05 กรัม และนำไปใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นเติมสารละลายไดคลอโรมีเทนเข้าไปจนถึงขีดบอกปริมาตร ก็จะได้ความเข้มข้นเป็น ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสามารถคำนวณการเตรียมสารละลายได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเข้มข้นเป็น ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร} = \frac{0.05g}{100cm^3} \times 100 = 0.05\ g/cm^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำไปเจือจางลงอีกเพื่อทำเป็น Stock Solution ที่ความเข้มข้นเป็น ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร เท่ากับ 5×10^{-6} กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อไป

จากสมการ $C_1V_1 = C_2V_2$

แทนค่า $(0.05\ g/cm^3)(1\ cm^3) = (0.005\ g/cm^3)(V_2)$

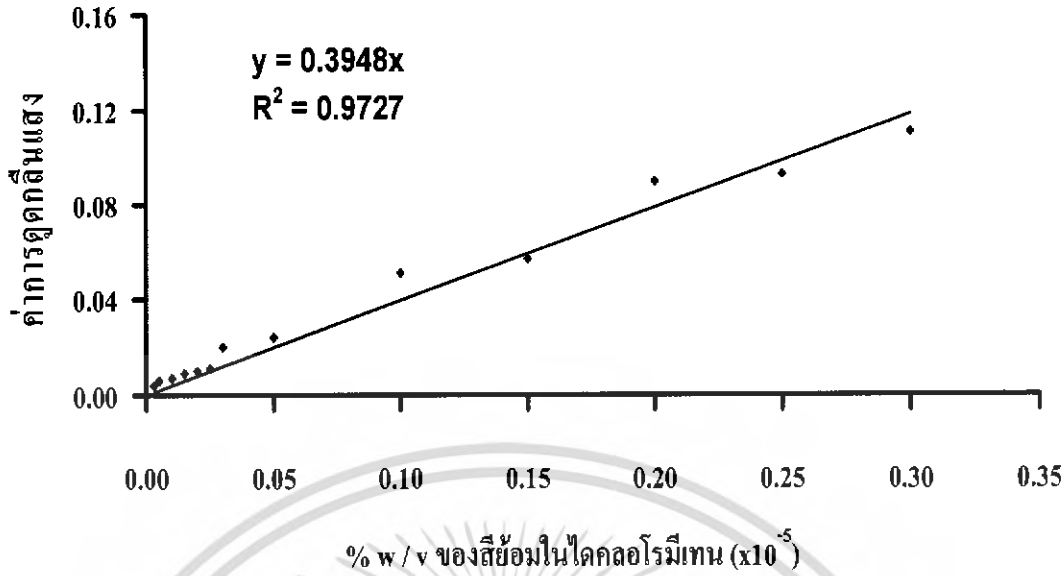
$V_2 = 10\ cm^3$

จากสมการข้างต้นได้ความหมายว่า ปิเปตสารละลายเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มา 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้น เติมสารละลายไดคลอโรมีเทน ลงไปในขวดวัดปริมาตรอีก 9 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะได้ความเข้มข้นใหม่เป็น 0.005 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำตามขั้นตอนนี้อีกจนได้ความเข้มข้นเท่ากับ 5×10^{-6} กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น Stock Solution ตามที่ต้องการ

เมื่อได้สารละลายที่เป็น Stock Solution แล้ว จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตร-โฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 528 นาโนเมตร จะได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.222 และบันทึกค่าเอาไว้ จากนั้นจึงเจือจางลงไปเรื่อยๆ อีกให้ได้ความเข้มข้นต่างๆ กัน ซึ่งใช้หลักการคำนวณเช่นเดียวกันกับข้างต้น แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง และบันทึกค่าเช่นเดียวกัน จากนั้นจึงนำไปพลอตกราฟเส้นตรง จะได้เป็นกราฟมาตรฐานของการย้อมสี

ผลการคำนวณค่าความเข้มข้นที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน และค่าการดูดกลืนแสง แสดงดังตารางที่ ก.1 ผลการพลอตกราฟมาตรฐานของการย้อมสี แสดงดังรูปที่ ก.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของการย้อมสี

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการคำนวณค่าความเข้มข้นที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน และค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้น $\times 10^{-5}$ (% w / v)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.003	0.004
0.005	0.006
0.010	0.007
0.015	0.009
0.020	0.010
0.025	0.011
0.030	0.020
0.050	0.024
0.100	0.051
0.150	0.057
0.200	0.090
0.250	0.093
0.300	0.111
0.500	0.222

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ สำหรับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด คือ พอลิ-พรอพิลีน (Polypropylene , PP) และ พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate , PET) สามารถทำได้ โดยใช้กราฟมาตรฐานของการย้อมสี ดังต่อไปนี้

สมการของกราฟมาตรฐานของการย้อมสีคือ

$$y = 0.3948x \tag{4.1}$$

สำหรับพอลิเมอร์ชนิด พอลิพรอพิลีน ที่ความดันเท่ากับ 10.441 เมกะพาสคาล (1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (212 องศาฟาเรนไฮต์) เมื่อนำไปรีฟลักซ์ โดยใช้น้ำหนักของชิ้นพอลิเมอร์เท่ากับ 0.2584 กรัม และวัดค่าการดูดกลืนแสงแล้ว จะได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.083 จากนั้น นำไปแทนค่าในสมการที่ (4.1) เพื่อหาค่าการละลายออกมาดังนี้

แทนค่า $$0.083 = 0.3948x$$

$$x = 0.2102$$

ดังนั้นจะได้ค่าความเข้มข้นเป็นร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร เท่ากับ $2.102\times10^{-6}\ g/cm^3$

จากนั้นนำค่าที่ได้นี้ไปคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ตามสมการต่อไปนี้

$$C = \frac{\%w/v}{100} \times \frac{V}{W} \tag{ข.1}$$

$$C = \left(\frac{2.102\times10^{-6}\ g/cm^3}{100}\right) \times \left(\frac{20cm^3}{0.2584g}\right) = 1.627\times10^{-6}\ \frac{g_{Dye}}{g_{Polymer}}$$

ดังนั้น ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์เท่ากับ 1.627×10^{-6} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ที่ความดันอื่นๆ และสำหรับการคำนวณของพอลิเมอร์ชนิด พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ก็สามารถคำนวณโดยใช้วิธีการเดียวกันกับข้างต้นได้เช่นเดียวกัน

ผลการคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ ทั้ง 2 ชนิด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และความดันต่างๆ กัน แสดงดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสีย้อม ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1. การหาค่า Correlation factor (Z)

จากสมการ $$Z = Z^0 + \omega Z^1 \qquad (2.5)$$

ทำการเปิดตารางเพื่อหาค่า T_C , P_C และ ω ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะได้

$\omega = 0.224$

$T_C = 304.2$ เคลวิน

$P_C = 7.38$ เมกะพาสคาล

ทำการเปิดตาราง หาค่า Z^0 และ Z^1 จากที่อุณหภูมิและความดันที่กำหนดไว้ที่จากสมการ

$$T_r = \frac{T}{T_C} \text{ และ } P_r = \frac{P}{P_C}$$

โดยที่ $$T_r = \frac{373.2}{304.2} = 1.226$$

และ P_r นั้นจะทำการเลือกมาโดยจะเลือกมาจากในตารางเพื่อความสะดวกในการคำนวณ

ตัวอย่างในการคำนวณหาค่า Z

ที่ $T_r = 1.226$ และ $P_r = 1.5$ จะได้ $Z^0 = 0.6605$ และ $Z^1 = 0.1477$

$$Z = 0.6605 + (0.224 \times 0.1477)$$

$$Z = 0.6936$$

จากสมการที่ (2.5) จะหาค่า Z ได้ดังตารางที่ ค.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ค่า Z^0 Z^1 และ Z ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ

T_r	P_r ที่เลือกมา	ความดัน (เมกะพาสคาล)	Z^0	Z^1	Z
1.226167	1.5	11.07	0.6605	0.1477	0.6936
	2	14.76	0.5605	0.1990	0.6051
	3	22.14	0.5425	0.1095	0.5670
	5	36.91	0.7069	-0.0141	0.7037
	7	51.68	0.8990	-0.0678	0.8838

2. การหาปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อได้ค่า Correlation factor ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละความดันมาแล้ว จึงนำมาหาปริมาตร ซึ่งในที่นี้จะคำนวณเป็นปริมาตรต่อโมล โดยใช้สมการที่ (2.6) ต่อไปนี้

$$Z = P\nu / RT \qquad (2.6)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาตรต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$\nu = \frac{0.6936 \times 0.08206 \frac{dm^3 \cdot atm}{mole \cdot K} \times 373.2K}{11.07MPa} \times \frac{1000cm^3}{dm^3} \times \frac{0.101325MPa}{atm}$$

$$\nu = 194.3764 \frac{cm^3}{mole}$$

ดังนั้นปริมาตรต่อโมลเท่ากับ 194.3764 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล

โดยจะได้ปริมาตรต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามตารางที่ ค. 2

ตารางที่ ค.2 ปริมาตรต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (เมกะพาสคาล)	Z	ปริมาตรต่อโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตร / โมล)
11.07	0.6936	194.3764
14.77	0.6051	127.1789
22.15	0.5670	79.4545
36.92	0.7037	59.1668
51.68	0.8838	53.0759

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การหาความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แต่ละความดัน

เมื่อคำนวณปริมาตรต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละความดันออกมาได้ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำมาคำนวณหาความหนาแน่น โดยสมการที่ (2.7) ต่อไปนี้

$$\rho = \frac{m}{v} \tag{2.7}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$\rho = \frac{44 \frac{g}{mol}}{194.3764 \frac{cm^3}{mol}}$$

ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.2264 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยจะได้ความหนาแน่นออกมาดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ

มวลโมเลกุล (กรัม / โมล)	ความดัน (เมกะพาสคาล)	ปริมาตรต่อโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตร / โมล)	ความหนาแน่น (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)
44	11.07	194.3764	0.2264
	14.77	127.1789	0.3460
	22.15	79.4545	0.5538
	36.92	59.1668	0.7437
	51.68	53.0759	0.8290

4. การคำนวณหาความเข้มข้นของสีในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละความดัน

เมื่อได้ค่าความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาแล้ว จึงนำไปหาค่าความเข้มข้นของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สมการที่ (2.3)

$$\ln\left(yP/P_{ref}\right) = a + \frac{b}{T} + C\left(\rho - \rho_{ref}\right) \tag{2.3}$$

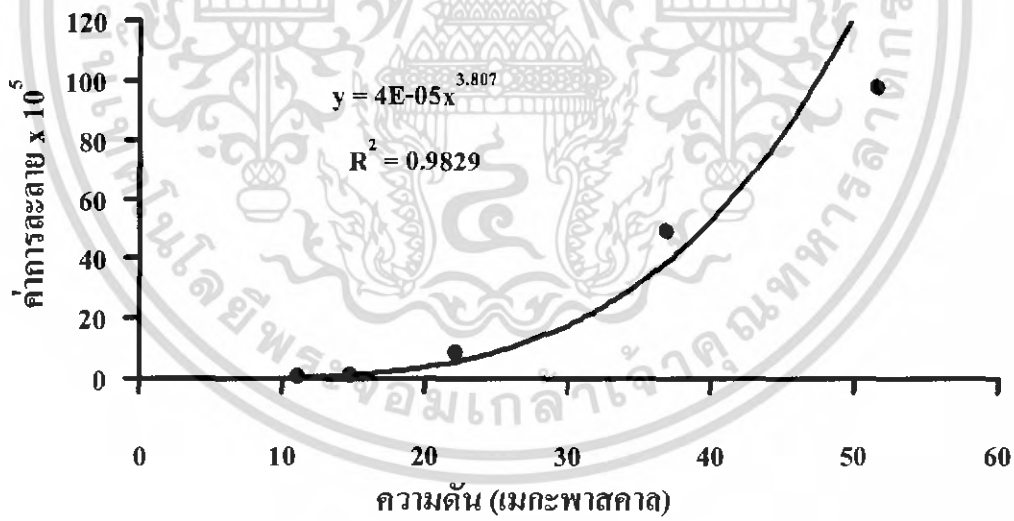
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่า โดยใช้ค่า a b และ C จากที่มีการตีพิมพ์ไว้แล้ว [6] ซึ่งจะได้ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดามตารางที่ ค.4

ตารางที่ ค.4 ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (เมกะพาสคาล)	ความหนาแน่น (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ค่าการละลาย$\times 10^5$ (กรัมสีย้อม / กรัมก๊าซ CO_2)
11.07	0.2264	0.3296
14.77	0.3460	1.0384
22.15	0.5538	8.3805
36.92	0.7437	49.0916
51.68	0.8290	97.6419

เมื่อทำการพลอตกราฟ ระหว่างค่าความดัน และค่าความเข้มข้นของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไตออกไซด์ จะได้กราฟดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 กราฟแสดงค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆ

จากนั้นนำค่าความดันที่ใช้ในแต่ละการทดลอง มาคำนวณหาความเข้มข้นของที่สีย้อมที่แต่ละความดันที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นของสีย้อมที่แต่ละความดัน

จากสมการที่ (ค.1) ที่ได้จากราฟเราจะสามารถหาความเข้มข้นได้ดังนี้

$$y = 4\times10^{-5}x^{3.807} \qquad \text{(ค.1)}$$

แทนค่า $y = 4\times10^{-5}\times7.68^{3.807}$

$$y = 0.094$$

เราจะหาความเข้มข้นได้ดังตารางที่ ค.5

ตารางที่ ค.5 ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันที่ใช้ในการทดลอง

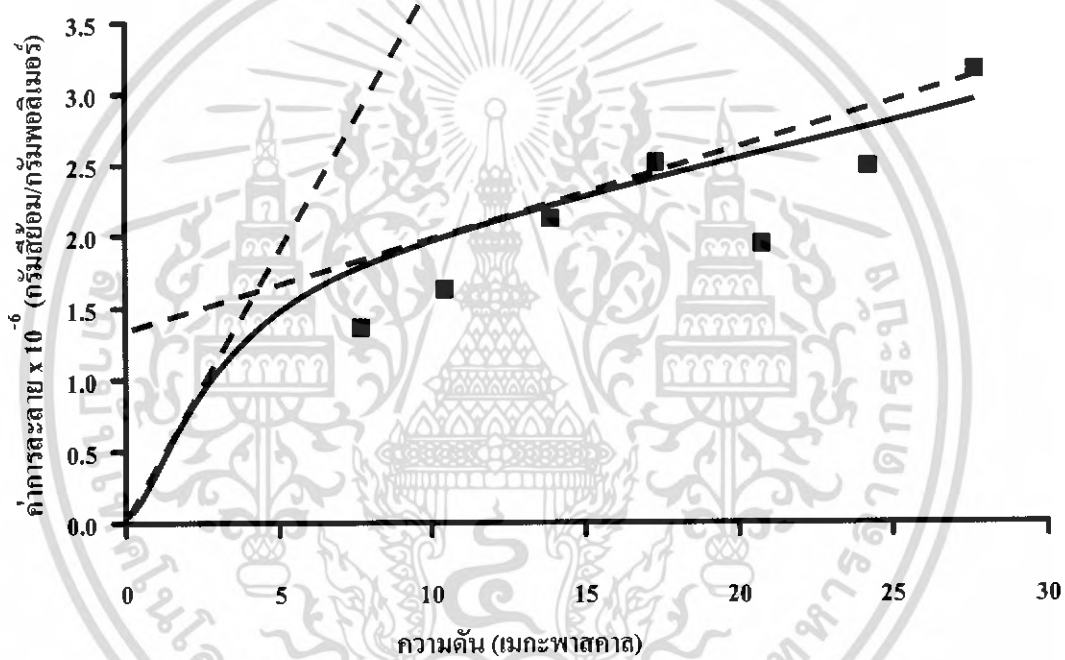
ความดัน (เมกะพาสคาล)	ค่าการละลาย $\times10^{6}$ (กรัมสีย้อม / กรัมก๊าซ CO_2)
7.68	0.094
10.44	0.302
13.89	0.895
17.33	2.082
20.78	4.153
24.23	7.449
27.67	12.359

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

การคำนวณหาค่าคงที่ k_D C'_H และ b ของพอลิเมอร์จากการทดลอง

การคำนวณหาค่าคงที่ทั้ง 3 ตัว คือ k_D C'_H และ b ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด จากการทดลอง สามารถทำได้จากการ Interpolation Graph จากกราฟที่พลอตระหว่าง ค่าการละลาย (แกน y) กับ ค่าความดัน (แกน x) โดยอ้างอิงกับสมการของ แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง ซึ่งกราฟที่ได้ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด แสดงดังรูปที่ ง.1 และ ง.2 ตามลำดับ



รูปที่ ง.1 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิพรอพิลีน ที่ความดันต่างๆ กัน

จากรูปที่ ง.1 ที่ได้นี้ ค่าคงที่ k_D สามารถหาได้จากค่าความชัน ส่วนค่าคงที่ C'_H สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้จะหาได้จากกราฟที่ความดันสูงๆ โดยมีวิธีการคำนวณหาดังนี้

จากกราฟที่ความดันสูงๆ จุดตัดแกน y เท่ากับ 1.281×10^{-6}

ดังนั้นจะได้ $$C'_H = 1.281\times10^{-6}\, g_{Dye} / g_{Polymer}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ความดันสูงๆ หาความชันได้

$$Slope = \frac{(1.511-1.281)\times10^{-6}}{4} = 5.750\times10^{-8}$$

ดังนั้นจะได้ $k_D = 5.750\times10^{-8}\, g_{Dye} / g_{Polymer} MPa$

ค่าคงที่ b สามารถหาได้จากกราฟที่ความดันต่ำๆ โดยความชันที่ได้เท่ากับ $(k_D + C'_H b)$ เมื่อแทนค่าคงที่ k_D และ C'_H ที่ได้ ก็จะสามารถคำนวณหาค่าคงที่ b ได้ ดังนี้

จากกราฟที่ความดันต่ำๆ หาความชันได้

$$Slope = \frac{1.511\times10^{-6}}{4} = 3.778\times10^{-7}$$

ดังนั้นจะได้ $(k_D + C'_H b) = 3.778\times10^{-7}$

แทนค่าคงที่ต่างๆ จะได้

$$(5.750\times10^{-8}) + (1.281\times10^{-6}\times b) = 3.778\times10^{-7}$$

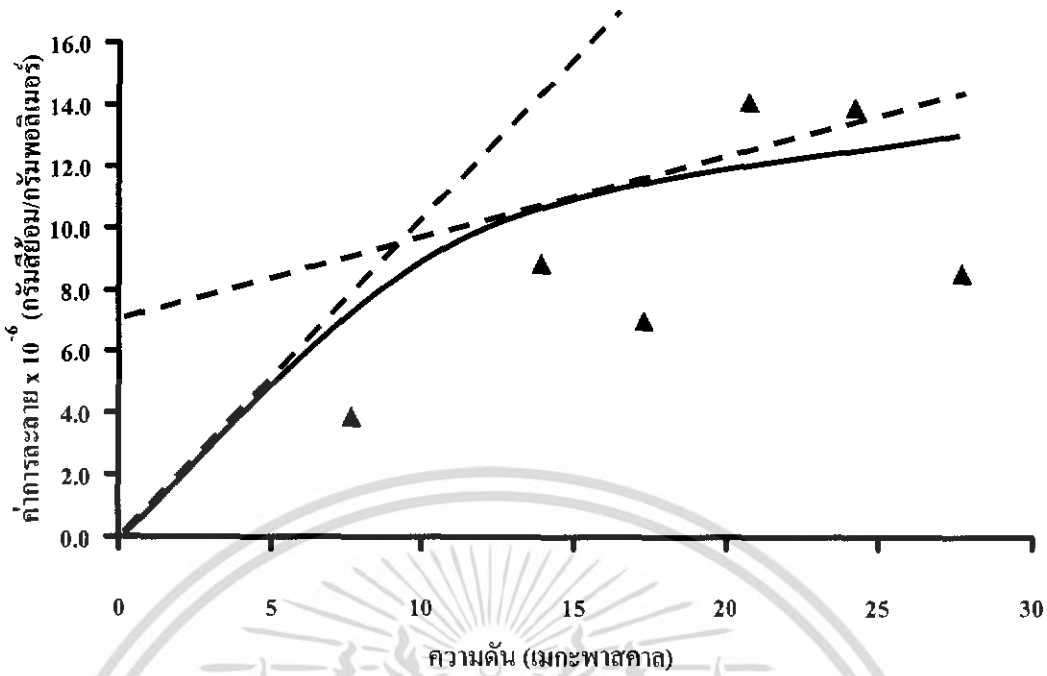
$$b = 0.250$$

ดังนั้น $b = 0.250 MPa^{-1}$

สำหรับการคำนวณค่าคงที่ทั้ง 3 ตัว ของพอลิเมอร์ชนิด พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ก็สามารถคำนวณได้โดยใช้ รูปที่ ง.2 และใช้วิธีการเดียวกันกับข้างต้นเช่นกัน

ผลการคำนวณหาค่าคงที่ k_D C'_H และ b ของพอลิเมอร์ชนิด พอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต แสดงดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.2 ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ที่ความดันต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

การคำนวณหาค่าการละลายโดยใช้แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ สำหรับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าการละลายที่หามาได้จากการทดลอง โดยใช้แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง (Dual Mode Sorption Model) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) ดังนี้

$$C = C_D + C_H = k_D p + \frac{C'_H bp}{1+bp} \tag{2.8}$$

แทนค่าตัวแปร k_D C'_H และ b ของพอลิพรอพิลีน ที่ได้จากการทดลองลงในสมการข้างต้นจะได้

$$C = \left[\left(5.750\times10^{-8}\frac{g_{Dye}/g_{Polymer}}{MPa}\right)\times(2MPa)\right] + \left[\frac{(1.281\times10^{-6}g_{Dye}/g_{Polymer})\times\left(0.250\frac{1}{MPa}\right)\times(2MPa)}{\left(1+\left(0.250\frac{1}{MPa}\right)\right)\times(2MPa)}\right]$$

$$C = 5.42\times10^{-7}\frac{g_{Dye}}{g_{Polymer}}$$

ดังนั้นจะได้ว่า ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ชนิดพอลิพรอพิลีนเท่ากับ 5.42×10^{-7} กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์

การคำนวณที่ค่าความดันอื่นๆ และการคำนวณสำหรับพอลิเมอร์ชนิด พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต สามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับข้างต้น

ผลการคำนวณแสดงดังในตารางที่ จ.1

ผลการสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณ ของพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต แสดงดังในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ผลการคำนวณค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ที่ความดันต่างๆ กัน

ความดัน (เมกะพาสคาล)	ค่าการละลาย $\times 10^{-6}$ (กรัมสีย้อม / กรัมพอลิเมอร์)	
	พอลิพรอพิลีน	พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต
0	0.00	0.00
2	0.54	1.71
4	0.87	3.04
6	1.11	4.15
8	1.31	5.09
10	1.49	5.94
12	1.65	6.70
14	1.80	7.41
16	1.94	8.08
18	2.08	8.71
20	2.22	9.31
22	2.35	9.89
24	2.48	10.45
26	2.61	11.00
28	2.73	11.53
30	2.86	12.06
32	2.98	12.57
34	3.10	13.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

(Partition Coefficient , K)

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Partition Coefficient , K) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และความดันต่างๆ กัน สามารถทำได้ โดยใช้สมการที่ (2.4) ดังนี้คือ

$$K = \frac{w_i^p}{w_i^f} \tag{2.4}$$

แทนค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ และ ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ความดัน 10.441 เมกะพาสคาล (1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของ พอลิพรอพิลีน ดังนี้

$$K = \frac{1.627\times10^{-6}}{0.302\times10^{-6}} \frac{(g_{Dye} / g_{Polymer})}{(g_{Dye} / g_{CO_2})}$$

$$K = 5.383 \frac{(g_{Dye} / g_{Polymer})}{(g_{Dye} / g_{CO_2})}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกของพอลิพรอพิลีนเท่ากับ $5.383 \frac{(g_{Dye} / g_{Polymer})}{(g_{Dye} / g_{CO_2})}$

การคำนวณที่ความดันอื่นๆ และการคำนวณสำหรับพอลิเมอร์ชนิด พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต ก็สามารถทำได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับข้างต้นนี้

ผลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด คือ พอลิพรอพิลีน และ พอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต แสดงดังตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช.

ตารางบันทึกผลการทดลอง

จากการทำการทดลองกระบวนการย้อมสีในแต่ละครั้ง จะทำการจดบันทึกค่าอุณหภูมิและความดัน ทุกๆ 1 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ช.1 และ ช.2

ตารางที่ ช.1 ค่าการบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิพรอพิลีน

ครั้งที่	ความหนาของชิ้นงานพอลิเมอร์ (mm.)	น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนทำการย้อม (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์หลังทำการย้อม (g)	อุณหภูมิ (^{0}F)	ความดัน (psig)
1	1.72	0.2546	0.2584	207	1418
				209	1378
				183	1333
				165	1280
2	1.76	0.2619	0.2623	90	1119
				209	1278
				208	1217
				211	1271
3	2.01	0.2503	0.252	188	2088
				176	2222
				160	2275
				143	2026
4	1.77	0.4243	0.4284	191	3537
				183	3422
				165	1800
				148	2190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.1 ค่าการบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิพรอพิลีน (ต่อ)

ครั้งที่	ความหนาของชิ้นงานพอลิเมอร์ (mm.)	น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนทำการย้อม (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์หลังทำการย้อม (g)	อุณหภูมิ (^{0}F)	ความดัน (psig)
5	1.79	0.1124	0.1133	209	2347
				210	2545
				202	2541
				226	2580
6	1.87	0.2874	0.2884	218	2350
				220	2544
				217	2567
				214	2543
7	1.83	0.2178	0.218	195	2520
				206	3100
				214	2540
				218	3016
8	1.87	0.2194	0.22	217	2004
				216	2024
				211	2029
				209	2029
9	1.78	0.2008	0.2019	215	3748
				212	4009
				211	4024
				213	4025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.1 ค่าการบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิพรอพิลีน (ต่อ)

ครั้งที่	ความหนาของชิ้นงานพอลิเมอร์ (mm.)	น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนทำการย้อม (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์หลังทำการย้อม (g)	อุณหภูมิ (^{0}F)	ความดัน (psig)
10	1.79	0.2013	0.2049	235	2500
				215	2425
	1.81	0.2930	0.2955	228	2160
	1.78	0.1228	0.1235	218	1884
11	1.76	0.1045	0.1052	215	4015
				212	4030
	1.73	0.1444	0.145	212	4039
				212	4040
12	1.81	0.0878	0.0881	205	3030
				220	3015
	1.95	0.1606	0.1674	215	2740
				213	2725
13	1.81	0.1136	0.1145	215	3515
				209	2588
	1.79	0.2323	0.2331	212	2819
				215	3460
14	1.94	0.1191	0.1193	215	3080
				212	3850
	1.94	0.2204	0.2212	215	4028
				218	3710

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.2 ตารางบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต

ครั้งที่	ความหนาของชิ้นงานพอลิเมอร์ (mm.)	น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนทำการย้อม (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์หลังทำการย้อม (g)	อุณหภูมิ (^{0}F)	ความดัน (psig)
1	0.44	0.0542	0.0551	207	1418
				209	1378
				183	1333
				165	1280
2	1.28	0.0902	0.0914	188	2088
				176	2222
				160	2275
				143	2026
3	0.3	0.0281	0.0284	191	3537
				183	3422
				165	1800
				148	2190
4	1.03	0.1013	0.1027	209	2347
				210	2545
				202	2541
				226	2580
5	2.42	0.1323	0.1361	218	2350
				220	2544
				217	2567
				214	2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.2 ตารางบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต (ต่อ)

ครั้งที่	ความหนาของชิ้นงานพอลิเมอร์ (mm.)	น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนทำการย้อม (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์หลังทำการย้อม (g)	อุณหภูมิ (^{0}F)	ความดัน (psig)
6	1.76	0.0701	0.0728	195	2520
				206	3100
				214	2540
				218	3016
7	1.52	0.0461	0.047	217	2004
				216	2024
				211	2029
				209	2029
8	1.55	0.0962	0.0988	215	3748
				212	4009
				211	4024
				213	4025
9	1.77	0.0835	0.0848	235	2500
	0.98	0.0481	0.0492	215	2425
	1.04	0.0289	0.0291	228	2160
				218	1884
10	1.62	0.0239	0.0243	215	4015
				212	4030
	2.16	0.0466	0.0483	212	4039
				212	4040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.2 ตารางบันทึกผลการทดลองกระบวนการย้อมสีในพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต (ต่อ)

ครั้งที่	ความหนาของชิ้นงานพอลิเมอร์ (mm.)	น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนทำการย้อม (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์หลังทำการย้อม (g)	อุณหภูมิ (^{0}F)	ความดัน (psig)
11	1.65	0.1121	0.114	205	3030
				220	3015
	2.41	0.1636	0.169	215	2740
				213	2725
12	2.81	0.1163	0.1194	215	3515
				209	2588
	2.43	0.1727	0.1776	212	2819
				215	3460
13	1.99	0.0663	0.0687	215	3080
				212	3850
	1.98	0.1715	0.177	215	4028
				218	3710
14	1.21	0.058	0.059	212	1240
				208	1216
	1.24	0.0458	0.0461	211	1167
				223	1167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ.

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง

   FC Series Reaction Vessel

   HP 1/2 RPM : 1725

   Pressure Products Industries , Inc.

   Reliability Under Pressure

   MAWP (BODY) 4800 PSI @ 1000 ^{O}F

   HYDRO (BODY) 7750 PSI @ Amb. Temperature

   MAWP (JACKET) N/A

   Year Built 1995

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. ปั๊มอัดความดันสูง

   Isco D Series Syringe Pumps

   Isco SFX 2-10 System

   SFX 220 Extractors

   Model 1000 DM , 100 DX , 260 D , 500 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชุดรีฟลักซ์

Electromantle

Cat No. EM0500/C MK5

Volts 230 V 50/60 Hz

Watts 200 W Fuse F 1.25 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้