

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การนำเสนอผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้ดังนี้คือ การศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิ และความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ พร้อมกับการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ และการทดสอบคุณภาพเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการย้อม ด้วยวิธีที่เป็นมาตรฐาน

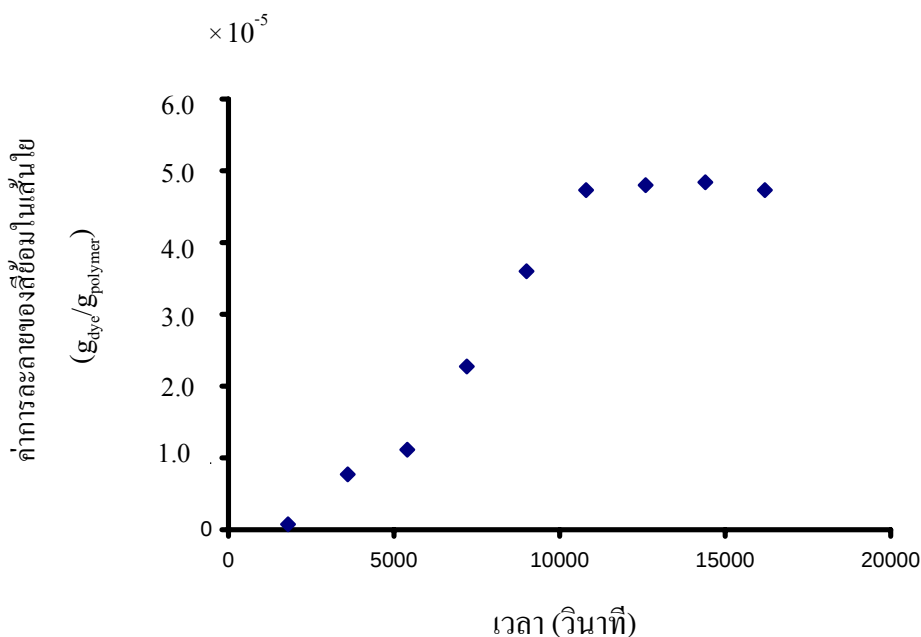
#### 4.1 ผลการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

หัวข้อที่ศึกษา คือ

- 4.1.1 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์
- 4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
- 4.1.3 ผลของอุณหภูมิ และความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์

##### 4.1.1 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์

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

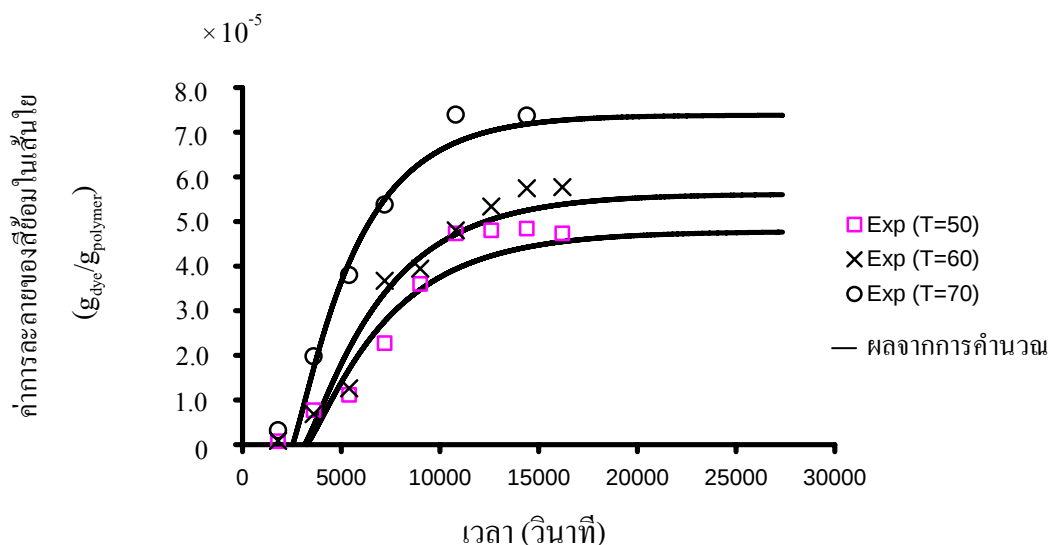


**รูปที่ 4.1** ผลของเวลาต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสกาล และอุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ( $M_t$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 50 ไมโคร กรัมสีย้อมต่อกรัมพอลิเมอร์ และยังพบว่าการเพิ่มเวลาในกระบวนการย้อมจะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาจะทำให้สีย้อมมีเวลาในการละลายและอยู่ในสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น นอกจากนั้นจากกราฟยังพบว่าที่เวลามากกว่า 180 นาที ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์เริ่มมีค่าคงที่ หรืออาจกล่าวได้ว่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์เริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 180 นาที ดังนั้นที่เวลา 180 นาที จึงถือว่าเป็นเวลาที่เหมาะสม สำหรับใช้ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

#### 4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

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



**รูปที่ 4.2** ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสกาล

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสกาล มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการย้อม โดยที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการละลายอยู่ในช่วง 30 ถึง 75 ไมโครกรัมสีต่อกรัมพอลิเมอร์ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการย้อมจะทำให้พลังงานจลน์ของก๊าซสูงขึ้น จึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสีและโมเลกุลของก๊าซลดลง ดังนั้นสีจึงเกิดการละลายได้ดีในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พาเอาสีแพร่เข้าไปละลายและย้อมติดในเส้นใยพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น และจากกราฟยังพบว่าค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์เริ่มมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที หรืออาจพิจารณาได้ว่าค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ได้เข้าสู่สมดุล ( $M_\infty$ ) เมื่อเวลาของกระบวนการย้อมมากกว่า 180 นาที ดังนั้นจึงอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ กับค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ที่สมดุล มาทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ได้จากสมการที่ถูกเสนอโดย Hill ดังแสดงในสมการที่ (2.3) [6]

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

เมื่อ  $M_t$  คือ ค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ที่เวลาใดๆ ( $g_{Dye}/g_{Polymer}$ )  
 $M_\infty$  คือ ค่าการละลายของสีของเส้นใยพอลิเมอร์ที่สมดุล ( $g_{Dye}/g_{Polymer}$ )  
 $D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $m^2/s$ )



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

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

เมื่อ  $D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D_0$  คือ pre-exponential factor ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$E_D$  คือ พลังงานก่อกัมมันต์ ( $\text{KJ/mole}$ )

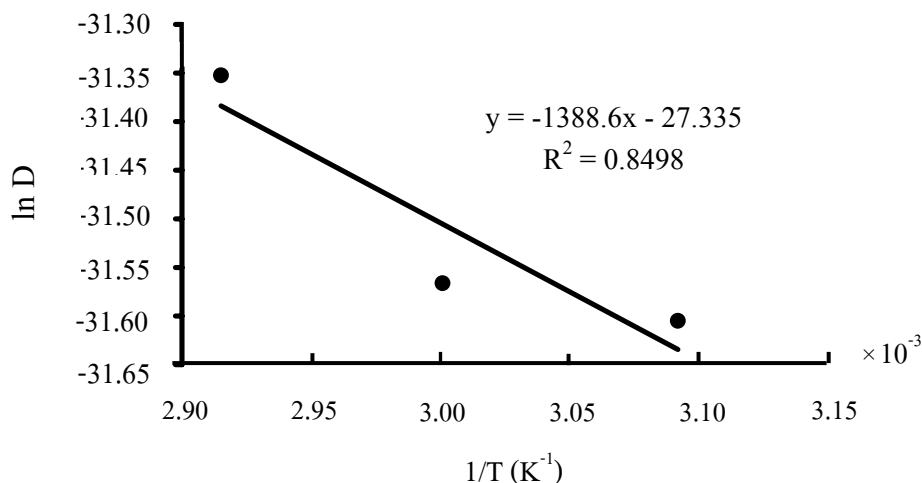
$R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

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

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

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



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

สมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4.3 คือ

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

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

#### 4.1.3 ผลของอุณหภูมิและความดัน ที่มีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์

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

การละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) แสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (y) และ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ (C) ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

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

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ การเพิ่มความดันในช่วง 10 ถึง 20 เมกะพาสคาล จะส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความดันระหว่างกระบวนการย้อมจะทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายที่ดีในการพาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปละลาย หรือย้อมติดในเส้นใยพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น

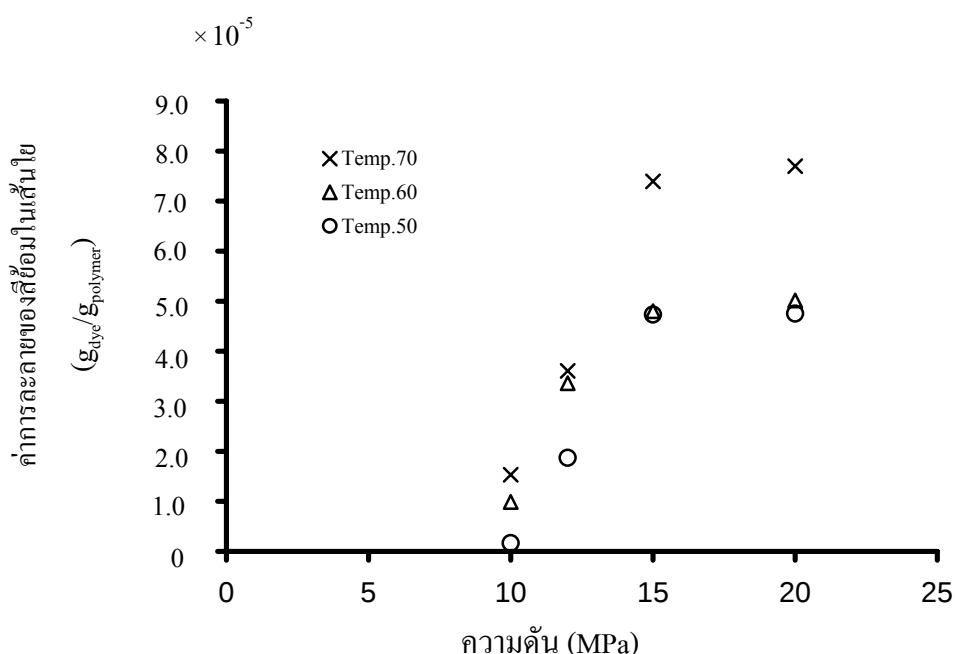
แต่เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิ จะส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะไปลดความหนาแน่นของก๊าซลง จึงทำให้สีเกิดการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ได้ลดลงเช่นกัน ส่วนค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงก๊าซจะมีความว่องไว และมี

ความสามารถในการแพร่สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยที่แสดงในตารางที่ 4.1

นอกจากนั้นยังพบว่า ในแต่ละอุณหภูมิ ที่ความดันในช่วง 15 ถึง 20 เมกะพาสคาล ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากโครงสร้างภายในของเส้นใยพอลิเมอร์มีความเป็นรูพรุน และมีปริมาณของรูพรุนที่จำกัดไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความดัน ดังนั้นแม้ว่าการเพิ่มความดันจะทำให้สีย้อมละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้น แต่คาร์บอนไดออกไซด์ก็สามารถพาเอาสีแพร่เข้าไปละลายภายในรูพรุนของเส้นใยพอลิเมอร์ได้ในจำนวนที่จำกัด จึงเป็นผลทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ความดันสูงมีค่าคงที่

หรือจากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่าค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์ จะมีค่าสูงขึ้นและคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยไม่ขึ้นกับความดัน และในแต่ละอุณหภูมิเมื่อเพิ่มความดัน จะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และยังพบว่าเมื่อกระบวนการย้อมเข้าสู่สมดุล หรือค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์มีค่าคงที่ พบว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มากกว่าความดัน

เมื่อพิจารณาผลของความดันและอุณหภูมิ ที่มีต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มความดันและอุณหภูมิ ส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำเอารูปแบบกลไกการดูดซึมแบบสองทาง มาใช้ประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความดันได้ ซึ่งจะทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

## 4.2 การประมาณค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

หัวข้อที่ศึกษา คือ

4.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก พร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

### 4.2.1 การทำนายค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้กลไกการดูดซึมแบบสองทาง

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

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

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

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

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

$P$  คือ ความดันในการทดลอง ( $MPa$ )

$P_C$  คือ ความดันวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 7.4 MPa

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

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

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

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

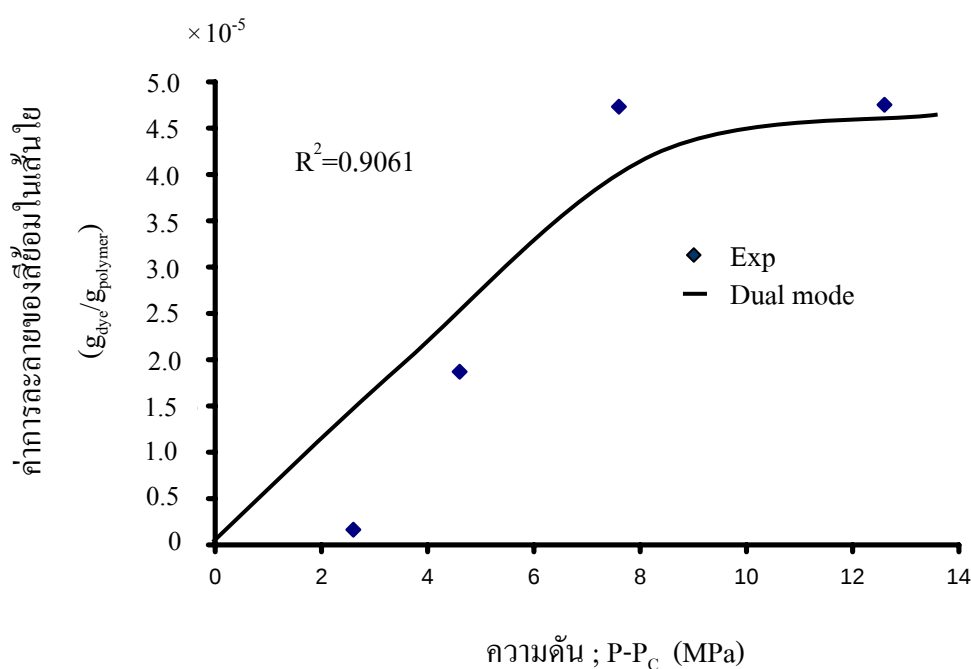
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ในสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางสำหรับการย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์

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

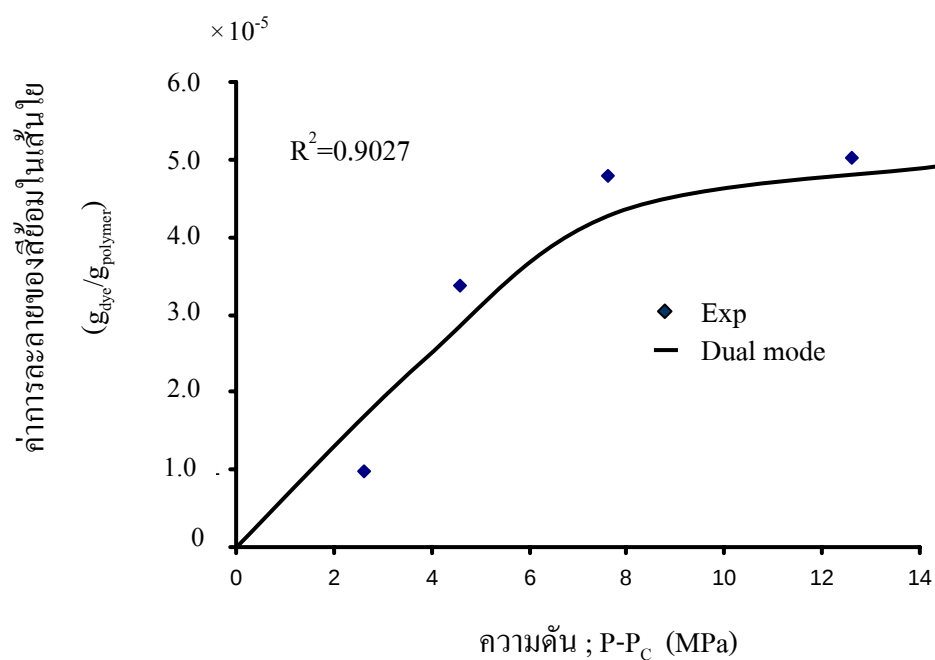
จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $k_D$  ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทดลองเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่า  $k_D$  มีค่าสูงขึ้นในช่วง  $5.0 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.25 \times 10^{-6}$  เนื่องจากค่า  $k_D$  เป็นค่าที่ใช้แสดงความสามารถในการละลายตามกฎของเฮนรี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

กับโมเลกุลของสีย้อม พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าคงที่  $b$  มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ จะเป็นการทำให้ก๊าซมีพลังงานจลน์สูงขึ้น หรือก๊าซมีความว่องไวมากขึ้น ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงพาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปละลายภายในรูพรุนได้ดีขึ้นนั่นเอง

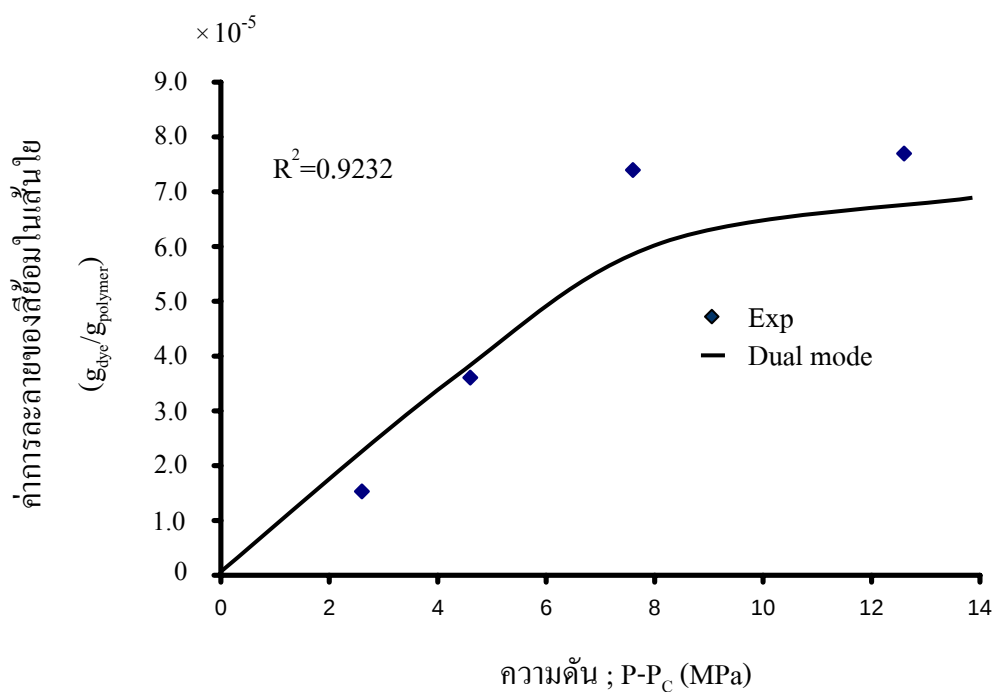
ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้ กลไกการดูดซึมแบบสองทาง (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) แสดงดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่  $50^\circ\text{C}$  และ 180 นาที ตามลำดับ



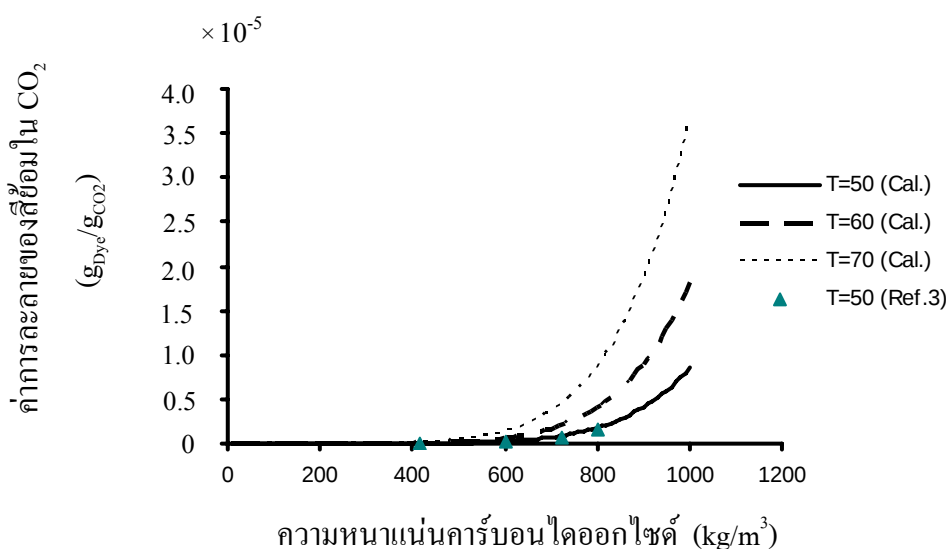
รูปที่ 4.6 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 60 °C และ 180 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ 70 °C และ 180 นาที ตามลำดับ

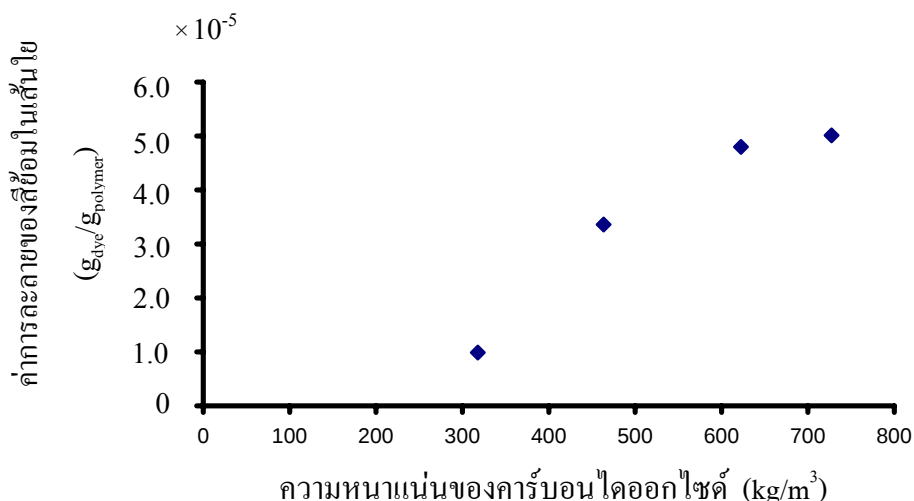
จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 พบว่าในช่วงเริ่มต้นขณะที่ความดันในการทดลองต่ำ ค่าการละลายของสีย้อมในพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการละลายแบบปกติของสารที่สามารถแพร่ได้ อธิบายได้ด้วยกฎของเฮนรี (Henry's law) โดยทำนายค่าการละลายในช่วงต้นได้จากค่าคงที่ของเฮนรี ( $k_D$ ) และเมื่อความดันอยู่ในช่วง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

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



**รูปที่ 4.8** ผลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ

จากความสามารถในการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันผลการทดลองได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ กับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.9



**รูปที่ 4.9** ผลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.9 พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลมาจากการเพิ่มความดันในการย้อม จะทำให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเริ่มคงที่เมื่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่า  $650 \text{ kg/m}^3$  (หรือความดันมากกว่า 15 MPa) ถึงแม้ว่าค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความหนาแน่นของก๊าซสูงขึ้นก็ตาม เนื่องจากภายในเส้นใยพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่มีรูพรุน และจำนวนรูพรุนมีอยู่อย่างจำกัด ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความดันในการย้อม ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงพาเอาสีย้อมเข้าไปละลายหรือย้อมติดภายในรูพรุนได้ในปริมาณที่จำกัด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ได้เข้าสู่สมดุลภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้ทำให้ในการพิจารณาความสามารถในการย้อม ต้องทำการเปรียบเทียบทั้งความสามารถในการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ และความสามารถในการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ไปพร้อมๆกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้แสดงผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในกระบวนการย้อมด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก พร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก เป็นอัตราส่วนหรือจำนวนเท่าของมวลสีย้อมที่สามารถละลายในพอลิเมอร์ต่อมวลสีย้อมที่ละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากกลไกการดูดซึมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกระบวนการย้อมสีเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีสองกลไกคือ กลไกแรกเมื่อทำการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป สีย้อมจะเกิดการละลายในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก่อน และกลไกที่สองคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นตัวกลางในการพาเอาสีย้อมเข้าไปย้อมหรือแพร่เข้าไปในตัวอย่างเส้นใยพอลิเมอร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ดังนั้นจึงสามารถนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก มาใช้บ่งชี้ความสามารถในการย้อมเส้น เมื่อต้องการเปรียบเทียบความสามารถของสีย้อมชนิดต่างๆเมื่อย้อมเส้นใยชนิดเดียวกัน หรือเปรียบเทียบความสามารถในการติดสีของเส้นใยชนิดต่างๆเมื่อทำการย้อมด้วยสีย้อมชนิดเดียวกัน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกจึงสามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของสีย้อมหรือชิ้นงานพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับสถานะในการทดลองได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสามารถหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$K = \frac{w_i^p}{w_i^f} \quad (2.20)$$

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

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

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

ซึ่งค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ  $w_i^f$  คำนวณได้จากสมการอย่างง่าย (empirical equation) ของ Sung และ Shim [8] ส่วนค่า  $w_i^p$  คำนวณได้จากค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จากประมาณค่าด้วยกลไกการดูดซึมแบบสองทาง ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก แสดงในตารางที่ 4.4 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ

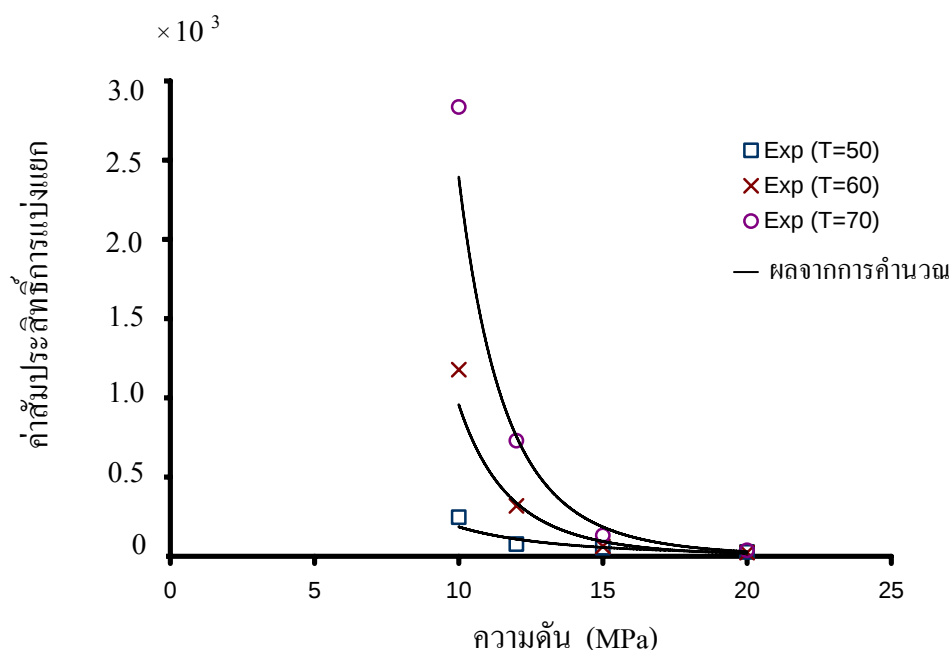
| อุณหภูมิ<br>(°C) | ความดัน<br>(MPa) | ค่าการละลายของ<br>สีย้อมในเส้นใย<br>( $g_{Dye}/g_{Polymer}$ ) $\times 10^{-5}$ | ค่าการละลายของ<br>สีย้อมใน<br>คาร์บอนไดออกไซด์<br>( $g_{Dye}/g_{CO_2}$ ) $\times 10^{-7}$ | สัมประสิทธิ์<br>การแบ่งแยก<br>( $\frac{g_{Dye}/g_{Polymer}}{g_{Dye}/g_{CO_2}}$ ) |
|------------------|------------------|-----------------------------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

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

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

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ การเพิ่มความดันจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์กลับมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ความหนาแน่นของก๊าซมีค่าต่ำลง และส่งผลให้การละลายของสีย้อมในคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์กลับมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นรูปแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่อุณหภูมิ ความดันต่างๆ และเวลาคงที่ 180 นาที



รูปที่ 4.10 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก  
ที่เวลาคงที่ 180 นาที

จากรูปที่ 4.10 เมื่อทำการพิจารณาค่าความสามารถในการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ กับความสามารถในการละลายของสีย้อมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ พบว่าในช่วงความดันต่ำกว่า 12 เมกะพาสกาล ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าสูงมาก ทำให้ต้องใช้สีย้อมเป็นปริมาณมาก แต่ในช่วงความดัน 12 ถึง 15 เมกะพาสกาล ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณการใช้สีย้อมและเวลาในกระบวนการย้อมให้น้อยลงได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าในช่วงความดัน 12 ถึง 15 เมกะพาสกาล เป็นความดันที่เหมาะสมในกระบวนการย้อม

นอกจากนั้นยังสามารถทำนายได้ว่า เมื่อเพิ่มความดันมากกว่า 20 เมกะพาสกาล ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะที่สภาวะความดันสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความหนาแน่นมาก ดังนั้นจึงทำให้สีย้อมเพียงปริมาณเล็กน้อยก็สามารถเกิดการละลายในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง

ในขณะที่สีย้อมกลับละลายในพอลิเมอร์ได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการเพิ่มความดัน เพราะรูพรุนหรือช่องว่างภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์มีจำนวนจำกัด ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความดัน จึงส่งผลให้โมเลกุลของสีย้อมไม่สามารถแพร่เข้าไปย้อมติดได้มากขึ้นเนื่องจากพื้นผิวในการดูดซับมีจำกัด หรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาณของสีย้อมที่ละลายในพอลิเมอร์ ได้เข้าสู่สมดุลภายในรูช่องว่างขนาดเล็กของโครงสร้างพอลิเมอร์ ดังนั้นการย้อมสีที่สภาวะความดันสูงเกินไป แม้ว่าจะลดปริมาณการใช้สีย้อมและลดเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการย้อมลงได้ แต่ก็เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการอัดความดัน อีกทั้งค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ใกล้เคียงกับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยพอลิเมอร์ในช่วงความดัน 12 ถึง 15 เมกะพาสกาล

### 4.3 การทดสอบคุณภาพเส้นใยพอลิเมอร์หลังการย้อม

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

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

4.3.1 การทดสอบความทนของสีต่อแสง (Colourfastness to Light)

4.3.2 การทดสอบความทนของสีต่อการซักล้าง (Colourfastness to Washing)

4.3.3 การทดสอบความทนของสีต่อเหงื่อ (Colourfastness to Perspiration)

ผลที่ได้จากการทดสอบคุณภาพของเส้นใยพอลิเมอร์แสดงในหัวข้อดังนี้คือ

#### 4.3.1 การทดสอบความทนของสีต่อแสง

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

#### ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง

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

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

ผลที่ได้จากการประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง พบว่าได้ผลอยู่ที่ระดับ 3-4 ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับปานกลางถึงดี

#### 4.3.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

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

#### ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง

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

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

ผลที่ได้จากการประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง พบว่าได้ผลอยู่ที่ระดับ 4-5 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับที่ดีถึงดีมาก

#### 4.3.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

ทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อตามมาตรฐาน ISO 105-E04:1994 (E) ซึ่งการทดสอบความคงทนของสีต่อ เหงื่อ สามารถแบ่งสภาวะของเหงื่อสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบได้ 2 สภาวะ คือ

- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีสภาวะเป็นกรด
- การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่มีสภาวะเป็นเบส

การประเมินผลจะพิจารณาที่ความสามารถของสีที่ตกติดผ้าขาวมาตรฐาน 6 ชนิด คือ ACETATE,

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

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์

ความคงทนของสีต่อเหงื่อ : ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 1994 (E) <sup>#</sup>

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

หมายเหตุ: - ผลการทดสอบที่มีการทำเครื่องหมาย <sup>#</sup> ในรายงานผลการทดสอบ หมายถึง เป็นผลการทดสอบที่อยู่ในขอบข่ายที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน มอก. 17025-2548 จากสำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ผลที่ได้จากการประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ พบว่าความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์ที่สภาวะต่างและสภาวะกรด ได้ผลอยู่ที่ระดับ 4-5 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานทดสอบมีความคงทนของสีต่อเหงื่อสังเคราะห์อยู่ในระดับที่ดีถึงดีมาก

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

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบคุณภาพเส้นใยหลังการย้อมกับงานวิจัยอื่น

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

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

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