บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์พอลิเมอร์อะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกโดยปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ (Free radical copolymerization) ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนระหว่างทำปฏิกิริยา ศึกษาถึงผลของปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยา สารริเริ่มปฏิกิริยาร่วม สารเชื่อมขวาง และกรดมาเลอิกต่อค่าการดูดซึมน้ำ ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการแพร่ของน้ำเข้าสู่พอลิเมอร์ ศึกษาถึงการนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปดูดซับสีย้อมประเภทประจุบวกที่พบในน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ ศึกษาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยเทคนิค FTIR และ SEM รวมทั้งศึกษาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของอะคริลาไมด์และกรดมาเลอิกและกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้ Cyclic voltammetry จากผลการทดลองสามารถสรุปผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น สรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การสังเคราะห์ได้พอลิเมอร์โซ่สั้น (short kinetic chains) ให้น้ำหนักโมเลกุลน้อย โซ่สั้นเหล่านี้มีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ 45 องศาเซลเซียส

5.1.2 อิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น สรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าการดูดซึมน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก เพราะว่าปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ดำเนินจนเสร็จสิ้นภายในเวลาไม่เกินกว่า 30 นาที ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจึงไม่มีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ โดยระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ 30 นาที

5.1.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น สรุปได้ว่า การเพิ่มอัตราการไหลก๊าซไนโตรเจนมีผลทำให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถ

ในการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์มีมากขึ้นด้วย อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 60 จาก 45 มิลลิลิตร/นาทีเป็นเวลา 5 นาที

5.1.4 อิทธิพลของปริมาณกรดมาเลอิกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น สรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกรดมาเลอิกซึ่งประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic, -COOH) ซึ่งเป็นหมู่ไอออนิกซึ่งมีสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำสัมผัสกับน้ำโดยตรง ทำให้เกิดการผลักกันของประจุลบของคาร์บอกซิลิกทำให้โซ่ขยายมากขึ้นมีผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นและการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันอะคริลาไมด์กับกรดมาเลอิกเป็นการเกิดปฏิกิริยาที่กรดมาเลอิกมีหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง (ที่อัตราส่วนอะคริลาไมด์:กรดมาเลอิก 0.092 : 0.008 – 0.099 : 0.001) มากกว่าที่จะเป็นมอนอเมอร์ร่วม (comonomer) (ที่อัตราส่วนอะคริลาไมด์:กรดมาเลอิก 0.090 : 0.010) อัตราส่วนโดยโมลของอะคริลาไมด์ : กรดมาเลอิกที่ให้ค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของอะคริลาไมด์ : กรดมาเลอิก 0.092 : 0.008 มีค่าการดูดซึมน้ำ 310 $\pm$ 10 กรัม/กรัมพอลิเมอร์แห้ง มีปริมาณสารเชื่อมขวาง สารริเริ่มปฏิกิริยาและสารริเริ่มปฏิกิริยาร่วมร้อยละ 1, 1และ 10 โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ทั้งสองตามลำดับ

5.1.5 อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น สรุปได้ว่า สารเชื่อมขวางมีผลทำให้โครงสร้างของโซ่พอลิเมอร์มีการเชื่อมขวางมากขึ้น และมีความยืดหยุ่นดีขึ้นสามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้มาก ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางมากเกินไป ค่าการดูดซึมน้ำกลับลดลง แสดงว่าปริมาณสารเชื่อมขวางมากทำให้โครงสร้างของโซ่พอลิเมอร์มีความแข็งตึง และความยืดหยุ่นลดลงทำให้ไม่สามารถขยายตัวเพื่อกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง ปริมาณสารเชื่อมขวางที่ให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด คือ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ทั้งสอง

5.1.6 อิทธิพลของปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น สรุปได้ว่า ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรซันได้ง่าย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาจากร้อยละ 1 จนถึง 10 โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ทั้งสอง ค่าการดูดซึมน้ำกลับลดลง แสดงว่าปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยามากเกินไปจนทำให้เกิดการถ่ายโอนโซ่ (Chain transfer) ทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสิ้นสุดปฏิกิริยาได้เร็วจึงเกิดพอลิเมอร์ที่ได้มีโซ่ที่สั้น โซ่ที่สั้นนั้นทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้างได้น้อยลงมีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง

ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด คือ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ทั้งสอง

5.1.7 อิทธิพลของปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาร่วมที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น สรุปได้ว่า สารริเริ่มปฏิกิริยาร่วมซึ่งเมื่อรวมกับสารริเริ่มปฏิกิริยาแล้วจะเป็นสารคู่รีดอกซ์ (redox pair) เกิดการริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ (Redox initiation) สารริเริ่มปฏิกิริยาร่วมจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สารริเริ่มปฏิกิริยาสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาร่วมที่ให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด คือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ทั้งสอง

5.1.8 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์การแพร่ของน้ำเข้าสู่พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นสรุปได้ว่ามีกลไกการแพร่เป็นแบบนอนฟิกเกียน (Non-fickian diffusion) คือ อัตราการแพร่เข้าสู่พอลิเมอร์เท่ากับอัตราการขยายโครงสร้างของพอลิเมอร์

5.1.9 ผลของการศึกษาการดูดซับสีย้อมในน้ำกลั่นของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นสรุปได้ว่าร้อยละการดูดซับสีย้อมในน้ำกลั่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกรดมาเลอิก เพราะสีย้อมที่ใช้ในการทดลอง คือ BB-41 ซึ่งเป็นสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นสีย้อมประเภทประจุบวก (Cationic dye) ส่วนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีประจุลบจากหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดมาเลอิก จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุลบของพอลิเมอร์กับประจุบวกของสีย้อม ทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้ดี

5.1.10 ผลของการศึกษาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้โดย FTIR ประกอบด้วยอัตราส่วนโดยโมลของอะคริลาไมด์ต่อกรดมาเลอิกเท่ากับ 0.092 : 0.008 ซึ่งให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด คือ 310 $\pm$ 10 กรัม/กรัมพอลิเมอร์แห้ง ปรากฏพีกต่าง ๆ จากสเปกตรัม ดังนี้ O-H stretching ที่ 3443 cm^{-1}, Aliphatic C-H stretching ที่ 2935 cm^{-1}, C=O asymmetric stretching for the carboxylate ion ที่ 1655 cm^{-1}, C-H asymmetric bending ที่ 1454 cm^{-1}, C=O symmetric stretching for the carboxylate ion ที่ 1412 cm^{-1}, C-N aliphatic stretching ที่ 1323 cm^{-1}

5.1.11 ผลของการศึกษาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้โดย SEM สรุปได้ว่า พื้นผิวของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยามากเกินไปมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ แต่ไม่มีช่องว่างขนาดใหญ่ที่พื้นผิวเลย ทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้น้อย พื้นผิวของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางมากเกินไปมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและแน่นแทบไม่มีปริมาณของช่องว่างที่พื้นผิวและช่องว่างมีขนาดเล็ก จึงทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้น้อย และภาพ SEM ของพอลิเมอร์ที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด คือ 310 $\pm$ 20 กรัม/กรัมของพอลิเมอร์แห้ง พอลิ

เมอร์มีอัตราส่วนของอะคริลาไมด์:กรดมาเลอิก 0.092 : 0.008 ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ทั้งสอง, ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ทั้งสอง และปริมาณสารเชื่อมขวางร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ทั้งสอง จากรูปแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์มีความขรุขระและมีช่องว่างขนาดใหญ่ ส่วนที่เชื่อมระหว่างช่องว่างแต่ละช่องมีลักษณะที่ยืดหยุ่นได้ จึงทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์มีมาก

5.1.12 ผลของการศึกษาการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของมอนอเมอร์ทั้งสองชนิด, สารเชื่อมขวางและสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ โดย Cyclic voltammetry สรุปได้ว่า อะคริลาไมด์ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับขั้วทำงาน เพราะมีสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และกรดมาเลอิกซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับขั้วทำงาน จึงมีสมบัติเป็นตัวรับอิเล็กตรอน

5.1.13 ผลของการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดย Cyclic voltammetry สรุปได้ว่า มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของการใช้สารเกิดโฟมและ foam stabilizer แทนการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนว่าให้ค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ใกล้เคียงกันหรือไม่
2. ศึกษาผลของการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนก๊าซไนโตรเจน
3. ศึกษากลไกการแพร่ของพอลิเมอร์ในรูปทรงอื่น ๆ แทนรูปทรงกระบอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย