

บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะเฉพาะเบื้องต้นของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์

3.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจล

ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) จากการเปรียบเทียบในระบบที่ต่างกัน ได้แก่ (ก) ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน (ข) ความเข้มข้นมอนอเมอร์แตกต่างกัน (ค) ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน (ง) ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน รวมถึง (จ) ไฮโดรเจลชนิดเบลนดระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS แสดงดังตารางและรูปที่ 3.1-3.6 ตามลำดับ

ตาราง 3.1 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole โดยมีระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน ได้แก่ ความร้อน รีดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเลต

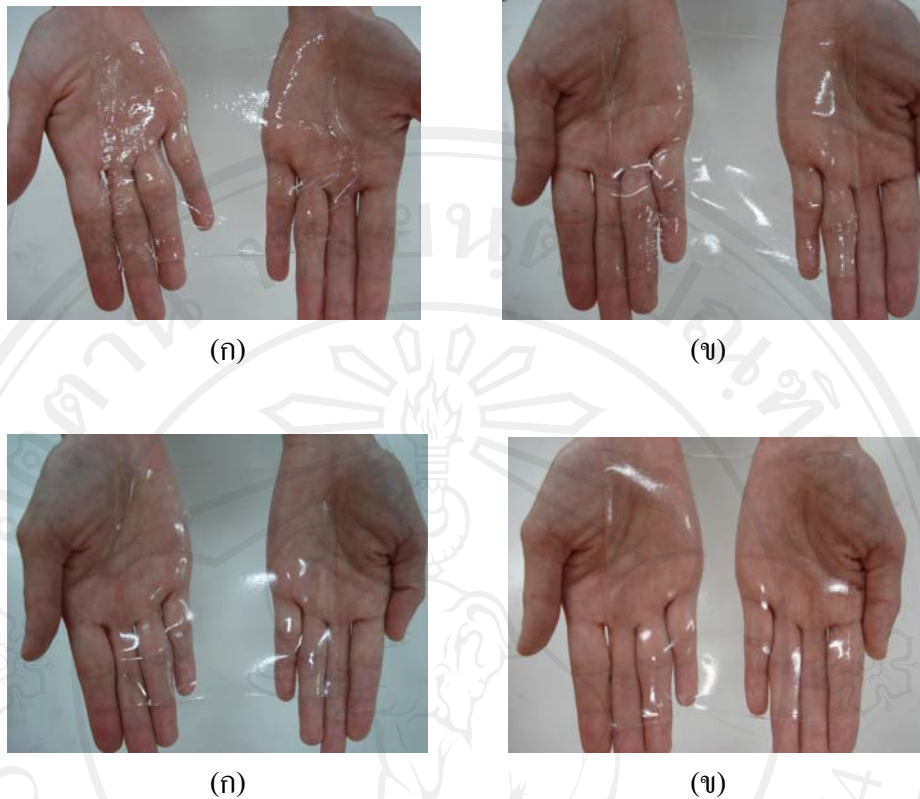
ตัวอย่าง	ระบบริเริ่ม	เมื่อสังเคราะห์เสร็จ	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
1.1	ความร้อน (thermal initiation)	เป็นแผ่นโปร่งใส ไม่มีสี ยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อดึง	คงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี เพราะ
1.2	รีดอกซ์ (redox initiation)	ลักษณะง่าย ผิวเรียบ ส่วนแผ่นที่สังเคราะห์จากระบบการใช้ความร้อน	เพิ่มขึ้น การเกาะติดกับผิวหนังลดลง
1.3	แสงอัลตราไวโอเลต (uv-photoinitiation)	ให้ผิวไม่เรียบ และแผ่นที่ได้จากรีดอกซ์มีสีเหลืองอ่อน	ผิวเจลมีความลื่น



รูป 3.1 แผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (ก) ความร้อน (ข) ริดอกซ์ และ (ค) แสงอัลตราไวโอเลต

ตาราง 3.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) ที่ใช้ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 30-60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ในระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น AMPS- Na^+	เมื่อสังเคราะห์เสร็จ	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
2.1	30% w/v	เป็นแผ่นโปร่งใส ไม่มีสี ยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความ	คงตัวเป็นแผ่นได้
2.2	40% w/v	ยืดหยุ่น ผิวเรียบบางแต่จะหนาและดึงก็ขาดได้ยากมากขึ้น	โปร่งใส ไม่มีสี เพราะ
2.3	50% w/v	เมื่อใช้ความเข้มข้น AMPS- Na^+ มากขึ้น แต่ที่ 60% w/v	เพิ่มขึ้น การเกาะติดกับผิวหนังลดลง ผิวเจลมีความลื่น
2.4	60% w/v	ค่อนข้างมีความเปราะมาก	



รูป 3.2 แผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS-Na⁺) ที่ใช้ความเข้มข้น (ก) 30% w/v (ข) 40% w/v (ค) 50% w/v และ (ง) 60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตาราง 3.3 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS-Na⁺) 50% w/v โดยใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM เพิ่มขึ้นในช่วง 0.1-3.0% mole ในระบบปริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตัวอย่าง	ปริมาณ EGDM	เมื่อสังเคราะห์เสร็จ	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
3.1	0.1% mole	คงตัวเป็นแผ่น โปร่งใส ไม่มีสี เกาะติดกับผิวหนังได้ดี ผิวเรียบ มี ความยืดหยุ่นลดลงและฉีกขาด มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัว เชื่อมต่อสายโซ่	คงตัวเป็นแผ่นได้ใส ไม่มี สี เพราะเพิ่มขึ้น การ เกาะติดกับผิวหนังลดลง ผิวเจลลื่น
3.2	0.5% mole		
3.3	1.0% mole		
3.4	2.0% mole		
3.5	3.0% mole		



รูป 3.3 แผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM (ก) 0.1% mole (ข) 0.5% mole (ค) 1.0% mole (ง) 2.0% mole และ (จ) 3.0% mole ในระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตาราง 3.4 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM และ NMBA 1.0% mole ในระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตัวอย่าง	ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่	เมื่อสังเคราะห์เสร็จ	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
4.1	EGDM	คงตัวเป็นแผ่น โปร่งใส ไม่มีสี ผิวเรียบ เกาะติดกับผิวหนังได้ดี	คงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี เพราะเพิ่มขึ้น การ เกาะติดกับผิวหนังลดลง
4.2	NMBA	แผ่นที่ใช้ EGDM มีความ ยืดหยุ่นมากกว่า NMBA	ผิวเจลลื่น



(ก)



(ข)

รูป 3.4 แผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (ก) EGDM และ (ข) NMBA 1.0% mole ในระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตาราง 3.5 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน 98.7:1.3, 96.2:3.8 และ 89.3:10.7% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตัวอย่าง	(AMPS- Na^+ : CMC)	เมื่อสังเคราะห์เสร็จ	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
5.1	98.7 : 1.3% wt	คงตัวเป็นแผ่นโปร่งใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CMC ผิวเรียบ เกาะติดกับผิวหนังได้ดี	คงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี เพราะเพิ่มขึ้น การเกาะติดกับผิวหนังลดลง ผิวเจลอ่อน
5.2	96.2 : 3.8% wt		
5.3	89.3 : 10.7% wt	ไม่สามารถคงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่น เกาะติดกับผิวหนังได้ดี	ไม่สามารถคงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี เพราะเพิ่มขึ้น การเกาะติดกับผิวหนังลดลง



(ก)



(ข)

รูป 3.5 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน (ก) 98.7:1.3 และ (ข) 96.2:3.8% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

(หมายเหตุ: ไฮโดรเจลชนิดเบลนด์อัตราส่วน 89.3:10.7% wt ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้จึงไม่ได้ทำการรายงานในรูป 3.5)

ตาราง 3.6 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน 96.8:3.2, 90.9:9.1 และ 76.9:23.1% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ในระบบวิธีเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

ตัวอย่าง	(AMPS- Na^+ : CMCTS)	เมื่อสังเคราะห์เสร็จ	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
6.1	96.8 : 3.2% wt	คงตัวเป็นแผ่นโปร่งใส ไม่มีสี เกาะติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น มีกลิ่นของ CMCTS ที่ไม่ละลายกระจายอยู่เพิ่มมากขึ้น	คงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี เพราะเพิ่มขึ้น การเกาะติดกับผิวหนังลดลง ผิวเจลลื่น
6.2	90.9 : 9.1% wt	ไม่สามารถคงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี มีกลิ่นของ CMCTS ที่ไม่ละลายกระจายอยู่ทั่ว มีความยืดหยุ่น เกาะติดกับผิวหนังได้ดี	ไม่สามารถคงตัวเป็นแผ่นได้ โปร่งใส ไม่มีสี เพราะเพิ่มขึ้น การเกาะติดกับผิวหนังลดลง ผิวเจลลื่น



(ก)



(ข)

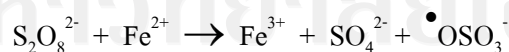
รูป 3.6 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน (ก) 96.8:3.2 และ (ข) 90.9:9.1% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบวิธีเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

(หมายเหตุ: ไฮโดรเจลชนิดเบลนด์อัตราส่วน 76.9:23.1% wt ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้จึงไม่ได้ทำการรายงานในรูป 3.6)

จากการทดลองสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลและประเมินถึงลักษณะทางกายภาพ เมื่อสังเคราะห์ในระบบที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบและหาลักษณะเฉพาะภายนอกเบื้องต้น ซึ่งจะได้เป็นแนวทางต่อการเลือกใช้ระบบของการสังเคราะห์เพื่อให้ได้แผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแผ่นปิดแผลต่อไป ซึ่งระบบของการสังเคราะห์ที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจได้แก่

- ก) ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบต่างๆ เช่น ความร้อน รีดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเลต
- ข) ความเข้มข้นของสารละลายมอนอเมอร์ AMPS- Na^+
- ค) ความเข้มข้นของตัวเชื่อมต่อสายโซ่
- ง) การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดเบลนดระหว่างสารละลาย AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS

การอธิบายถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบนั้นสามารถอธิบายเป็นลำดับดังนี้ จากการทดลองพบว่าระบบการสังเคราะห์โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเลตค่อนข้างมีความเหมาะสมมากที่สุดซึ่งคำนึงถึงประสิทธิภาพ ความสะดวก รวดเร็ว รวมถึงความเป็นไปได้ต่อการพัฒนาต่อไปในระบบอุตสาหกรรมแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เทคนิคอื่นเช่นการใช้ความร้อนก็สามารถใช้สังเคราะห์ได้เช่นกัน หากแต่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่นานกว่าและต้องการควบคุมอุณหภูมิที่คงที่ การใช้อุณหภูมิสูงมักจะมีผลเสียต่อระดับขององค์ประกอบน้ำภายในแผ่นไฮโดรเจลได้เช่นกัน เนื่องจากไอน้ำสามารถระเหยออกจากแผ่นไฮโดรเจลในระหว่างการสังเคราะห์ได้ สำหรับการสังเคราะห์ระบบของการใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์เพื่อให้การพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ที่อุณหภูมิห้องจำเป็นต้องมีการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาร่วม ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ตัวเร่ง (FeSO_4) เพื่อลดพลังกระตุ้นการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพื่อได้ฟรีเรดิคอลลดงสมการ



ซึ่งแน่นอนว่าภายในแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์จะยังคงเหลือไอออน Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำให้เกิดสีเหลืองอ่อนที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้นจะทำให้แผ่นไฮโดรเจลเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่มีสีเหลืองเพิ่มขึ้นซึ่งหากคำนึงถึงการนำไปเพื่อการใช้งานอาจเป็นที่ไม่พึงประสงค์ นอกจากนั้นการเตรียมสารละลายในระบบรีดอกซ์มีความยุ่งยากอีกทั้งยังใช้เวลาในการผสมสารละลาย (working time) ก่อนการเทลงแม่พิมพ์ค่อนข้างสั้น ซึ่งอาจทำให้สารละลายที่เตรียมเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเจลก่อนได้

ความเข้มข้นของสารละลายมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นไฮโดรฟิลิกมอนอเมอร์หลักที่สามารถกำหนดความสามารถของการดูดซับน้ำหรือของเหลวหลังจากที่เป็นไฮโดรเจลแล้ว รวมถึงยังเป็นส่วนที่ทำให้ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลมีลักษณะต่างกันด้วย จากการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในช่วง 30-60% w/v พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นสูงขึ้นจะได้แผ่นไฮโดรเจลที่มีความคงรูปขึ้นเนื่องจากโครงสร้างแบบร่างตาข่ายสามารถเกิดได้แน่นหนากว่า แต่อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นที่ 40% w/v และ 50% w/v ก่อนข้างให้แผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสมมีความคงรูป ขึ้นรูปได้ง่าย ง่ายต่อการนำไปใช้งาน (good handling properties) ไม่ยืดหยุ่น หรือมีความเหนียวมากจนเกินไป ซึ่งในการทดลองในระบบอื่นๆ ถัดไปได้ทำการเลือกความเข้มข้นของสารละลาย AMPS- Na^+ 50% w/v ในการศึกษาเนื่องด้วยสมบัติที่ดีหลายประการดังที่กล่าวมาแล้ว

ความเข้มข้นของตัวเชื่อมต่อสายโซ่เป็นส่วนที่กำหนดลักษณะโครงสร้างตาข่ายให้มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ในปริมาณที่มากกว่าจะเป็นผลให้โครงสร้างของไฮโดรเจลยึดกันด้วยความแน่นหนา และมีปริมาตรที่ว่าง (free volume) น้อยลงมีค่ามวลโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมของโครงร่างตาข่าย ($\bar{M}_c$) น้อยกว่า ทำให้ความยืดหยุ่นลดลงจนไฮโดรเจลมีลักษณะที่เปราะและฉีกขาดง่าย จากการทดลองพบว่าปริมาณที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.5-1.0% mole/mole ของมอนอเมอร์ โดยการประเมินจากความง่ายในการขึ้นรูปและการขึ้นรูปได้แผ่นไฮโดรเจลที่คงรูป มีความยืดหยุ่นที่เหมาะสม

ลักษณะโครงสร้างของตัวเชื่อมต่อสายโซ่ก็เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจล ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ EGDM และ NMBA ก็สามารถขึ้นรูปแผ่นไฮโดรเจลได้ดี หากแต่แผ่นไฮโดรเจลที่ใช้ EGDM จะให้ลักษณะที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า NMBA เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ EGDM ที่มีความยาวของโมเลกุลที่มากกว่าจึงทำให้ระยะห่างระหว่างพอลิเมอร์อยู่ห่างกันมากกว่า แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นปัจจัยอื่นที่มีผลสำคัญเช่นกันคือความสามารถในการกระจายตัวของตัวเชื่อมต่อสายโซ่ชนิดนั้นๆ ในขณะที่เกิดพอลิเมอร์เชื่อมกับมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ ซึ่งจะมีผลต่อความสม่ำเสมอ (uniform) ในการเกิดโครงร่างตาข่ายได้

นอกจากปัจจัยอื่นๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นการสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลในลักษณะของพอลิเมอร์เบลนด์แบบกึ่งอินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (semi-interpenetrating polymer network) ก็ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลได้เช่นกัน โดยในการทดลองได้มีการนำเอา CMC และ CMCTS เข้ามาทำการเบลนด์กับสารละลาย AMPS- Na^+ ในอัตราส่วนต่างๆ กัน จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ CMC เพิ่มขึ้นเป็น 10.7% wt และ CMCTS เท่ากับ 23.1% wt จะส่งผลต่อการขึ้นรูปของแผ่นไฮโดรเจล โดยจะได้แผ่นที่ไม่คงรูป ไม่แข็งแรงและฉีกขาดง่าย

ไม่เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ต่อการนำไปใช้งานจริง ซึ่งผลการทดลองส่วนนี้อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่าถึงแม้ CMC และ CMCTS จะเป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่การจะทำให้แผ่นไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์เบเลนส์มีความแข็งแรง คงรูป ก็ยังคงต้องขึ้นอยู่กับการปริมาณของ AMPS- Na^+ ซึ่งประกอบด้วย $\text{C}=\text{C}$ ซึ่งจะเป็นส่วนที่เกิดโครงร่างตาข่ายกับ EGDM แล้วยึดโครงสร้างภายในให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะขึ้นรูปให้เป็นแผ่นไฮโดรเจลที่ดีได้

3.1.2 ความสามารถในการขยายตัวและดูดซับน้ำของไฮโดรเจลสังเคราะห์

ขนาดของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้เมื่อแห้งหลังจากที่แผ่นไฮโดรเจลถูกอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator) ณ อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแช่ในน้ำจนถึงจุดสมดุลอิมิตัว และค่าการคำนวณเปอร์เซ็นต์การขยายตัวตามพื้นที่ใน 2 มิติ (กว้าง x ยาว) และปริมาตรแสดงในตาราง 3.7 รวมถึงความสามารถในการดูดซับน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ และเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในแผ่นไฮโดรเจลหลังจากการสังเคราะห์ แสดงในตาราง 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

ตาราง 3.7 ขนาดของแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่างเมื่อแห้งและเมื่ออิมมัลชันด้วยน้ำและค่าการคำนวณเปอร์เซ็นต์การขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตร

ตัวอย่าง	ลำดับ	เมื่อแห้ง					เมื่ออิมมัลชันด้วยน้ำ					พื้นที่ ที่ขยายตัว (%)	ปริมาตรที่ ขยายตัว (%)	พื้นที่ที่ ขยายตัวเฉลี่ย (%)	ปริมาตรที่ ขยายตัวเฉลี่ย (%)
		กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	หนา (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	หนา (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)				
1.1	1	1.27	1.28	0.11	1.63	0.18	4.70	5.00	0.50	23.50	11.75	1346	6471	1553 ± 194	6898 ± 819
	2	1.16	1.22	0.13	1.42	0.18	4.80	5.40	0.46	25.92	11.92	1732	6381		
	3	1.30	1.25	0.11	1.63	0.18	5.20	5.25	0.52	27.30	14.20	1580	7842		
1.2	1	1.40	1.41	0.09	1.97	0.18	5.00	5.00	0.36	25.00	9.00	1166	4966	1402 ± 247	5858 ± 1148
	2	1.12	1.17	0.08	1.31	0.10	4.80	4.80	0.33	23.04	7.60	1658	7153		
	3	1.20	1.35	0.08	1.62	0.13	4.80	5.00	0.30	24.00	7.20	1381	5456		
1.3	1	1.25	1.28	0.07	1.60	0.11	4.62	4.64	0.36	21.44	7.72	1240	6790	1292 ± 137	5925 ± 959
	2	1.16	1.26	0.08	1.46	0.12	4.33	4.35	0.31	18.84	5.84	1189	4894		
	3	1.10	1.15	0.08	1.27	0.10	4.40	4.45	0.32	19.58	6.27	1448	6091		
2.1	1	1.34	1.36	0.04	1.82	0.07	5.40	5.70	0.27	30.78	8.31	1589	11301	2017 ± 391	12584 ± 1788
	2	1.10	1.10	0.05	1.21	0.06	5.50	5.40	0.30	29.70	8.91	2355	14627		
	3	1.15	1.20	0.05	1.38	0.07	5.30	5.75	0.27	30.48	8.23	2108	11825		
2.2	1	1.11	1.24	0.06	1.38	0.08	4.80	4.90	0.35	23.52	8.23	1609	9868	1709 ± 114	10798 ± 3051
	2	1.06	1.12	0.05	1.19	0.06	4.50	5.10	0.37	22.95	8.49	1833	14205		
	3	1.10	1.10	0.07	1.21	0.08	4.55	4.75	0.33	21.61	7.13	1686	8320		
2.3	1	1.17	1.25	0.07	1.46	0.10	4.35	4.40	0.35	19.14	6.70	1209	6444	1278 ± 75	5734 ± 710
	2	1.07	1.13	0.08	1.21	0.10	4.10	4.30	0.32	17.63	5.64	1358	5732		
	3	1.05	1.20	0.08	1.26	0.10	4.10	4.20	0.30	17.22	5.17	1267	5025		

ตาราง 3.7 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ลำดับ	เมื่อแห้ง					เมื่ออิมด้วค้ำยน้ำ					พื้นที่ ที่ขยายด้ว	ปริมาตรที่ ขยายด้ว	พื้นที่ที่ ขยายด้วเฉลี่ย	ปริมาตรที่ ขยายด้วเฉลี่ย
		กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	หนา (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	หนา (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	(%)	(%)	(%)	(%)
2.4	1	1.16	1.27	0.12	1.47	0.18	4.20	4.20	0.35	17.64	6.17	1097	3392	1118 ± 48	3971 ± 502
	2	1.17	1.18	0.09	1.38	0.12	4.18	4.20	0.31	17.56	5.44	1172	4280		
	3	1.15	1.25	0.09	1.44	0.13	4.10	4.15	0.33	17.02	5.61	1084	4240		
3.1	1	1.19	1.27	0.13	1.51	0.20	6.40	6.55	0.54	41.92	22.64	2674	11422	3099 ± 371	16694 ± 4626
	2	1.09	1.12	0.10	1.22	0.12	6.45	6.55	0.54	42.25	22.81	3361	18587		
	3	1.25	1.10	0.10	1.38	0.14	6.70	6.90	0.60	46.23	27.74	3262	20073		
3.2	1	1.31	1.32	0.08	1.73	0.14	5.40	5.50	0.40	29.70	11.88	1618	8488	1795 ± 155	9006 ± 449
	2	1.11	1.19	0.09	1.32	0.12	5.10	5.20	0.42	26.52	11.14	1908	9269		
	3	1.15	1.20	0.09	1.38	0.12	5.15	5.25	0.43	27.04	11.63	1859	9261		
3.3	1	1.10	1.15	0.08	1.27	0.10	4.40	4.45	0.32	19.58	6.27	1448	6091	1408 ± 49	5845 ± 690
	2	1.13	1.22	0.09	1.38	0.12	4.45	4.50	0.32	20.03	6.41	1353	5065		
	3	1.15	1.22	0.08	1.40	0.11	4.55	4.70	0.34	21.39	7.27	1424	6378		
3.4	1	1.28	1.29	0.06	1.65	0.10	4.12	4.37	0.29	18.00	5.22	990	5170	1184 ± 173	6630 ± 1310
	2	1.18	1.28	0.06	1.51	0.09	4.45	4.54	0.35	20.20	7.07	1238	7703		
	3	1.10	1.10	0.06	1.21	0.07	4.10	4.20	0.30	17.22	5.17	1323	7016		
3.5	1	1.20	1.22	0.07	1.46	0.10	4.10	4.20	0.33	17.22	5.68	1076	5445	1152 ± 66	4974 ± 408
	2	1.20	1.25	0.08	1.50	0.12	4.30	4.50	0.30	19.35	5.81	1190	4738		
	3	1.18	1.20	0.08	1.42	0.11	4.20	4.35	0.30	18.27	5.48	1190	4738		

ตาราง 3.7 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ลำดับ	เมื่อแห้ง					เมื่ออิมด้วยน้ำ					พื้นที่ ที่ขยายตัว (%)	ปริมาตรที่ ขยายตัว (%)	พื้นที่ที่ ขยายตัวเฉลี่ย (%)	ปริมาตรที่ ขยายตัวเฉลี่ย (%)
		กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	หนา (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	หนา (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)				
4.1	1	1.21	1.22	0.08	1.48	0.12	4.20	4.30	0.30	18.06	5.42	1123	4488	1230 ± 94	5117 ± 556
	2	1.15	1.19	0.08	1.37	0.11	4.35	4.40	0.31	19.14	5.93	1299	5320		
	3	1.10	1.20	0.08	1.32	0.11	4.20	4.30	0.33	18.06	5.96	1268	5544		
4.2	1	1.10	1.03	0.11	1.13	0.12	3.20	3.30	0.32	10.56	3.38	832	2611	824 ± 50	2802 ± 342
	2	1.10	1.20	0.10	1.32	0.13	3.33	3.45	0.31	11.49	3.56	770	2598		
	3	1.05	1.10	0.10	1.16	0.12	3.20	3.50	0.34	11.20	3.81	870	3197		
5.1	1	1.00	1.00	0.10	1.00	0.10	5.20	5.40	0.45	28.08	12.64	2708	12536	2393 ± 348	11827 ± 708
	2	1.00	1.10	0.10	1.10	0.11	5.10	5.50	0.44	28.05	12.34	2450	11120		
	3	1.00	1.20	0.08	1.20	0.10	4.80	5.30	0.45	25.44	11.45	2020	11825		
5.2	1	1.20	1.40	0.05	1.68	0.08	6.00	6.60	0.40	39.60	15.84	2257	18757	2601 ± 334	17421 ± 1730
	2	1.10	1.20	0.07	1.32	0.09	5.80	6.20	0.40	35.96	14.38	2624	15467		
	3	1.10	1.10	0.07	1.21	0.08	5.90	6.20	0.42	36.58	15.36	2923	18039		
6.1	1	1.00	1.10	0.08	1.10	0.09	4.40	4.50	0.35	19.80	6.93	1700	7775	1705 ± 172	8007 ± 1689
	2	1.00	1.00	0.08	1.00	0.08	4.40	4.50	0.40	19.80	7.92	1880	9800		
	3	1.10	1.10	0.08	1.21	0.10	4.40	4.50	0.32	19.80	6.34	1536	6445		
6.2	1	1.10	1.15	0.10	1.27	0.13	5.80	6.00	0.45	34.80	15.66	2651	12279	2800 ± 279	15356 ± 3014
	2	1.10	1.10	0.07	1.21	0.08	5.50	6.00	0.40	33.00	13.20	2627	15484		
	3	1.00	1.00	0.07	1.00	0.07	5.65	5.70	0.40	32.21	12.88	3121	18303		

หมายเหตุ: ไฮโดรเจลตัวอย่าง 5.3 และ 6.3 ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นเป็นแผ่นได้จึงไม่ได้ทำการรายงานไว้ใน ตาราง 3.7

ตาราง 3.8 ความสามารถในการดูดซับน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$

ตัวอย่าง	ลำดับ	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อสังเคราะห์เสร็จ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อแห้ง (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจลที่ดูดซับน้ำเต็มที่ เมื่อเทียบกับ น.น. แห้ง 1 g. (g)	เฉลี่ย (g)
1.1	1	0.3267	0.3713 ± 0.04	0.1522	0.1796 ± 0.02	11.3336	12.3551 ± 1.28	74.47	69.14 ± 5.87
	2	0.3782		0.1901		11.9460		62.84	
	3	0.4091		0.1966		13.7856		70.12	
1.2	1	0.2766	0.2879 ± 0.01	0.1364	0.1441 ± 0.01	8.7150	8.4264 ± 0.32	63.89	58.63 ± 4.97
	2	0.2888		0.1497		8.0865		54.02	
	3	0.2984		0.1462		8.4777		57.99	
1.3	1	0.2585	0.2779 ± 0.02	0.1313	0.1313 ± 0.00	6.7050	6.4586 ± 0.28	51.07	49.33 ± 2.87
	2	0.2786		0.1336		6.1483		46.02	
	3	0.2967		0.1281		6.5224		50.92	
2.1	1	0.2049	0.2141 ± 0.01	0.0617	0.0710 ± 0.01	7.5808	8.1844 ± 1.09	122.87	115.50 ± 8.60
	2	0.2103		0.0710		7.5299		106.05	
	3	0.2272		0.0803		9.4425		117.59	
2.2	1	0.2481	0.2771 ± 0.03	0.0928	0.1011 ± 0.01	8.2580	8.2097 ± 0.24	88.99	81.59 ± 6.87
	2	0.2900		0.1117		8.4242		75.42	
	3	0.2932		0.0989		7.9468		80.35	

ตาราง 3.8 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ลำดับ	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อสังเคราะห์เสร็จ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อแห้ง (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจลที่ดูดซับน้ำเต็มที่ เมื่อเทียบกับ น.น. แห้ง 1 g. (g)	เฉลี่ย (g)
2.3	1	0.2574	0.2787 ± 0.02	0.1169	0.1258 ± 0.01	6.1226	6.0125 ± 0.20	52.37	47.98 ± 4.58
	2	0.2924		0.1337		5.7813		43.24	
	3	0.2864		0.1269		6.1336		48.33	
2.4	1	0.2963	0.3144 ± 0.02	0.1540	0.1617 ± 0.01	5.7670	5.6853 ± 0.07	37.45	35.25 ± 2.28
	2	0.3199		0.1717		5.6483		32.90	
	3	0.3270		0.1593		5.6405		35.41	
3.1	1	0.3322	0.3580 ± 0.03	0.1305	0.1453 ± 0.01	26.0481	26.5867 ± 2.14	199.60	183.68 ± 17.07
	2	0.3520		0.1495		24.7670		165.67	
	3	0.3898		0.1558		28.9451		185.78	
3.2	1	0.2875	0.2977 ± 0.01	0.1411	0.1461 ± 0.00	12.7255	11.7968 ± 0.89	90.19	80.94 ± 8.82
	2	0.3003		0.1507		10.9440		72.62	
	3	0.3054		0.1465		11.7208		80.01	
3.3	1	0.2967	0.3117 ± 0.02	0.1281	0.1440 ± 0.01	6.5224	6.9142 ± 0.42	50.92	48.18 ± 2.97
	2	0.3055		0.1525		6.8658		45.02	
	3	0.3328		0.1513		7.3543		48.61	

ตาราง 3.8 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ลำดับ	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อสังเคราะห์เสร็จ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อแห้ง (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจลที่ดูดซับน้ำเต็มที่ เมื่อเทียบกับ น.น. แห้ง 1 g. (g)	เฉลี่ย (g)
3.4	1	0.2272	0.2296 ± 0.01	0.1081	0.1070 ± 0.01	5.1993	5.1382 ± 0.21	48.04	48.04 ± 0.55
	2	0.2384		0.1119		5.3105		47.46	
	3	0.2232		0.1010		4.9047		48.56	
3.5	1	0.2368	0.2693 ± 0.03	0.1121	0.1270 ± 0.01	5.4518	5.6584 ± 0.25	48.63	44.81 ± 3.47
	2	0.2989		0.1418		5.9380		41.88	
	3	0.2721		0.1272		5.5853		43.91	
4.1	1	0.2809	0.2844 ± 0.01	0.1291	0.1354 ± 0.01	6.4455	6.3931 ± 0.05	49.93	47.38 ± 3.41
	2	0.2948		0.1466		6.3773		43.50	
	3	0.2776		0.1305		6.3564		48.71	
4.2	1	0.3121	0.3423 ± 0.03	0.1298	0.1458 ± 0.01	3.2361	4.3163 ± 0.16	24.93	23.51 ± 1.26
	2	0.3615		0.1577		3.5526		22.53	
	3	0.3534		0.1500		3.4601		23.07	
5.1	1	0.2498	0.2428 ± 0.01	0.1230	0.1369 ± 0.01	13.0525	12.7509 ± 0.41	106.12	93.77 ± 11.12
	2	0.2523		0.1425		12.9144		90.63	
	3	0.2262		0.1453		12.2858		84.55	

ตาราง 3.8 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ลำดับ	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อสังเคราะห์เสร็จ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อแห้ง (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดรเจลที่ดูดซับน้ำเต็มที่ เมื่อเทียบกับ น.น. แห้ง 1 g. (g)	เฉลี่ย (g)
5.2	1	0.2770	0.2820 ± 0.01	0.0741	0.0834 ± 0.01	16.3696	16.4173 ± 0.14	220.91	200.01 ± 28.48
	2	0.2935		0.0771		16.3092		211.53	
	3	0.2756		0.0989		16.5730		167.57	
6.1	1	0.3105	0.3025 ± 0.01	0.0892	0.0958 ± 0.01	7.7600	7.5469 ± 0.19	87.00	79.09 ± 6.99
	2	0.3026		0.0979		7.4946		76.55	
	3	0.2945		0.1002		7.3862		73.71	
6.2	1	0.2896	0.3019 ± 0.01	0.0934	0.0943 ± 0.00	18.2812	16.2924 ± 1.72	195.73	173.10 ± 21.10
	2	0.3078		0.0907		15.3834		169.61	
	3	0.3083		0.0988		15.2126		153.97	

หมายเหตุ: ไฮโดรเจลตัวอย่าง 5.3 และ 6.3 ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นเป็นแผ่นได้จึงไม่ได้ทำการรายงานไว้ใน ตาราง 3.8

ตาราง 3.9 เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในแผ่นไฮโดรเจลหลังจากสังเคราะห์

ตัวอย่าง	ลำดับ	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อสังเคราะห์เสร็จ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดร เจลเมื่อแห้ง (g)	เฉลี่ย (g)	% ปริมาณน้ำในแผ่น ไฮโดรเจลหลังจาก สังเคราะห์ (%)	เฉลี่ย (%)
1.1	1	0.3267	0.3713 ± 0.04	0.1522	0.1796 ± 0.02	53.41	51.70
	2	0.3782		0.1901		49.74	±
	3	0.4091		0.1966		51.94	1.85
1.2	1	0.2766	0.2879 ± 0.01	0.1364	0.1441 ± 0.01	50.69	49.95
	2	0.2888		0.1497		48.16	±
	3	0.2984		0.1462		51.01	1.56
1.3	1	0.2585	0.2779 ± 0.02	0.1313	0.1313 ± 0.00	49.21	52.69
	2	0.2786		0.1336		52.05	±
	3	0.2967		0.1281		56.83	3.85
2.1	1	0.2049	0.2141 ± 0.01	0.0617	0.0710 ± 0.01	69.89	66.93
	2	0.2103		0.0710		66.24	±
	3	0.2272		0.0803		64.66	2.68
2.2	1	0.2481	0.2771 ± 0.03	0.0928	0.1011 ± 0.01	62.60	63.45
	2	0.2900		0.1117		61.48	±
	3	0.2932		0.0989		66.27	2.50
2.3	1	0.2585	0.2779 ± 0.02	0.1313	0.1313 ± 0.00	54.58	54.85
	2	0.2786		0.1336		54.27	±
	3	0.2967		0.1281		55.69	0.74
2.4	1	0.2049	0.2141 ± 0.01	0.0617	0.0710 ± 0.01	48.03	48.55
	2	0.2103		0.0710		46.33	±
	3	0.2272		0.0803		51.28	2.52
3.1	1	0.2481	0.2771 ± 0.03	0.0928	0.1011 ± 0.01	60.72	59.43
	2	0.2900		0.1117		57.53	±
	3	0.2932		0.0989		60.03	1.68
3.2	1	0.2481	0.2771 ± 0.03	0.0928	0.1011 ± 0.01	50.92	50.92
	2	0.2900		0.1117		49.82	±
	3	0.2932		0.0989		52.03	1.11
3.3	1	0.2481	0.2771 ± 0.03	0.0928	0.1011 ± 0.01	56.83	53.81
	2	0.2900		0.1117		50.08	±
	3	0.2932		0.0989		54.54	3.43

ตาราง 3.9 (ต่อ)

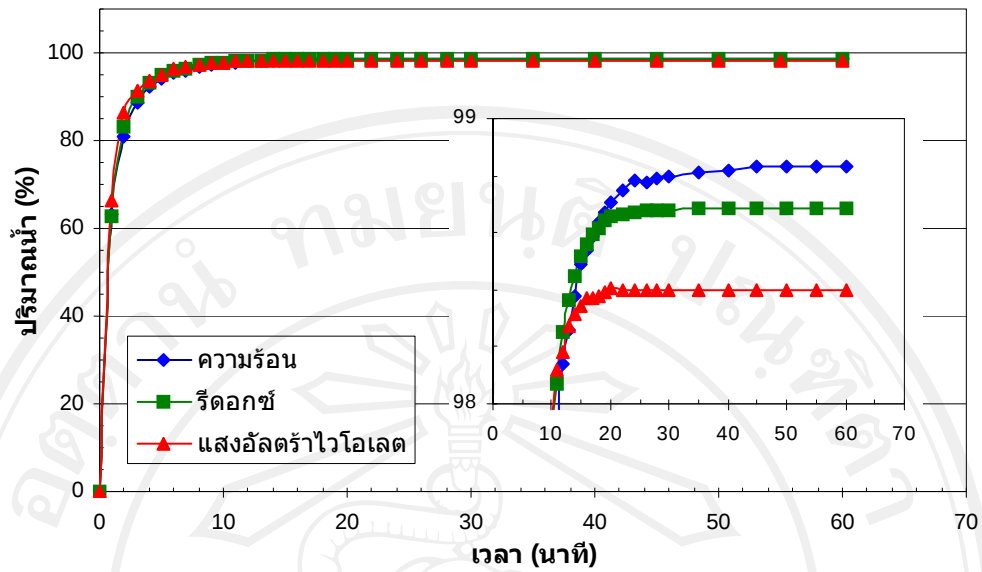
ตัวอย่าง	ลำดับ	น.น. ไฮโดรเจล เมื่อสังเคราะห์เสร็จ (g)	เฉลี่ย (g)	น.น. ไฮโดร เจลเมื่อแห้ง (g)	เฉลี่ย (g)	% ปริมาณน้ำในแผ่น ไฮโดรเจลหลังจาก สังเคราะห์ (%)	เฉลี่ย (%)
3.4	1	0.3267	0.3713 ± 0.04	0.1522	0.1796 ± 0.02	52.42	53.41
	2	0.3782		0.1901		53.06	±
	3	0.4091		0.1966		54.75	1.20
3.5	1	0.2766	0.2879 ± 0.01	0.1364	0.1441 ± 0.01	52.66	52.82
	2	0.2888		0.1497		52.56	±
	3	0.2984		0.1462		53.25	0.37
4.1	1	0.2585	0.2779 ± 0.02	0.1313	0.1313 ± 0.00	54.04	52.43
	2	0.2786		0.1336		50.27	±
	3	0.2967		0.1281		52.99	1.95
4.2	1	0.2049	0.2141 ± 0.01	0.0617	0.0710 ± 0.01	58.41	57.45
	2	0.2103		0.0710		56.38	±
	3	0.2272		0.0803		57.56	1.02
5.1	1	0.2481	0.2771 ± 0.03	0.0928	0.1011 ± 0.01	50.76	43.35
	2	0.2900		0.1117		43.52	±
	3	0.2932		0.0989		35.76	7.50
5.2	1	0.2585	0.2779 ± 0.02	0.1313	0.1313 ± 0.00	73.25	70.36
	2	0.2786		0.1336		73.73	±
	3	0.2967		0.1281		64.11	5.42
6.1	1	0.2049	0.2141 ± 0.01	0.0617	0.0710 ± 0.01	71.27	68.30
	2	0.2103		0.0710		67.65	±
	3	0.2272		0.0803		65.98	2.71
6.2	1	0.2481	0.2771 ± 0.03	0.0928	0.1011 ± 0.01	67.75	68.74
	2	0.2900		0.1117		70.53	±
	3	0.2932		0.0989		67.95	1.55

หมายเหตุ: ไฮโดรเจลตัวอย่าง 5.3 และ 6.3 ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นเป็นแผ่นได้จึงไม่ได้ทำการ
รายงานไว้ใน ตาราง 3.8

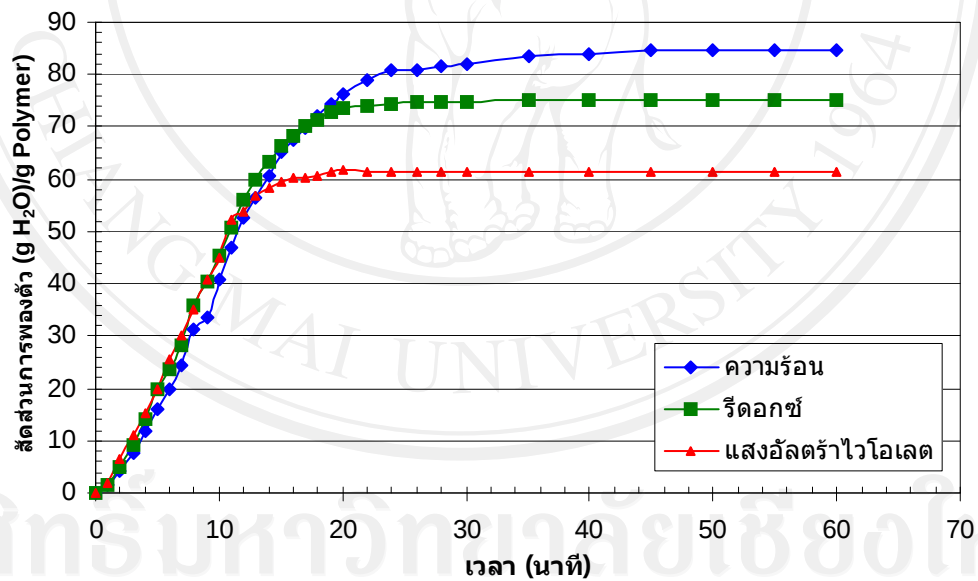
3.2 การหาปริมาณน้ำองค์ประกอบ (Water Content) สัดส่วนการพองตัว (Swelling Ratio) และปริมาณน้ำคงอยู่ (Water Retention)

3.2.1 การหาปริมาณน้ำองค์ประกอบ (Water Content) และสัดส่วนการพองตัว (Swelling Ratio)

ปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบและสัดส่วนการพองตัวที่คำนวณได้ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) จากการเปรียบเทียบในระบบที่แตกต่างกันได้แก่ (ก) ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน (ข) ความเข้มข้นมอนอเมอร์แตกต่างกัน (ค) ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน (ง) ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน (จ) ไฮโดรเจลชนิดเบสลดระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS และ (ฉ) ไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) ที่ทดสอบในสารละลายแตกต่างกัน รวมถึง (ช) วัสดุปิดแผลทางการค้า แสดงดังรูปที่ 3.7-3.14 และตารางสรุป 3.10-3.11 ตามลำดับ

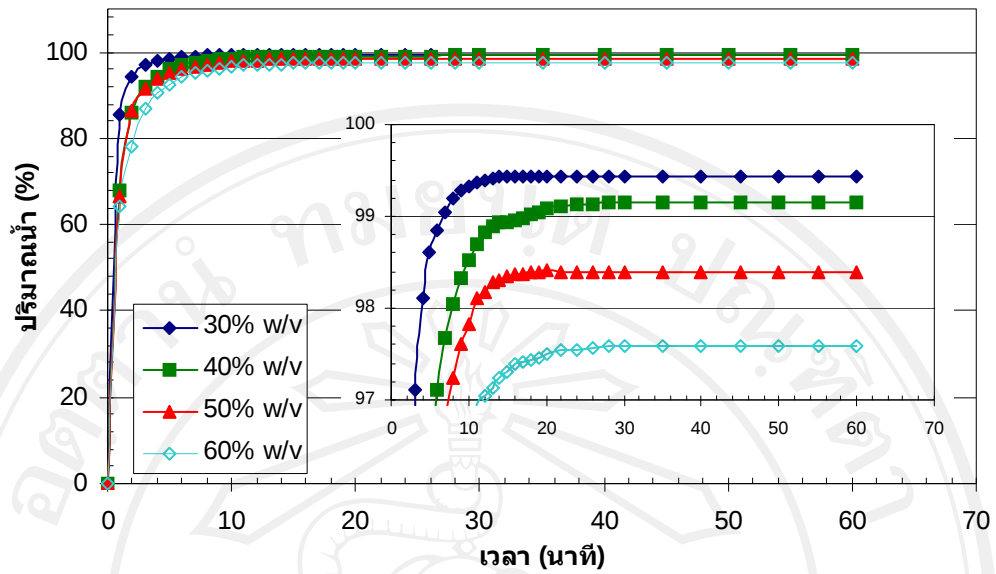


(ก)

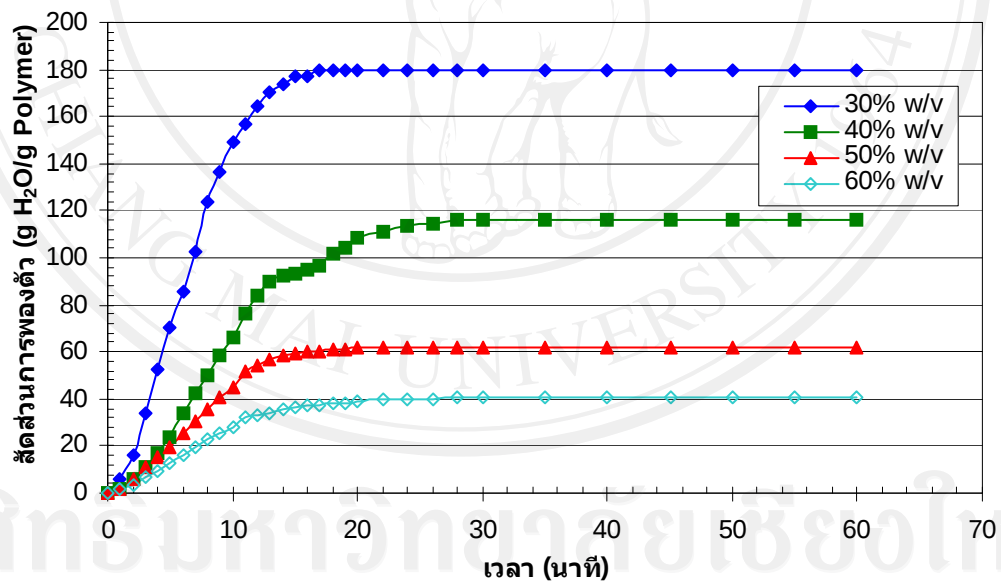


(ข)

รูป 3.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำ และ (ข) สัดส่วนการพองตัว กับเวลาของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน ได้แก่ ความร้อน รีดออกซ์ และแสงอัลตราไวโอเลต

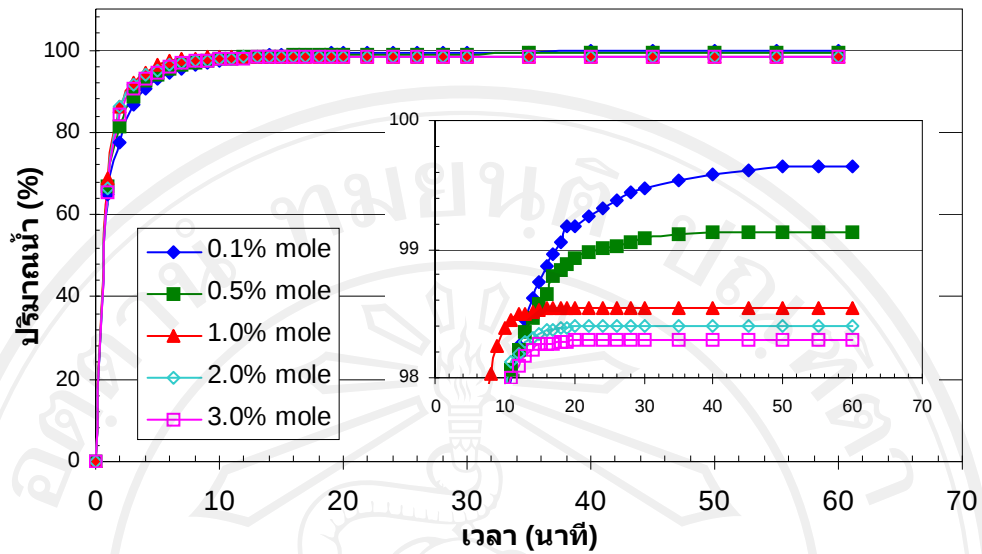


(ก)

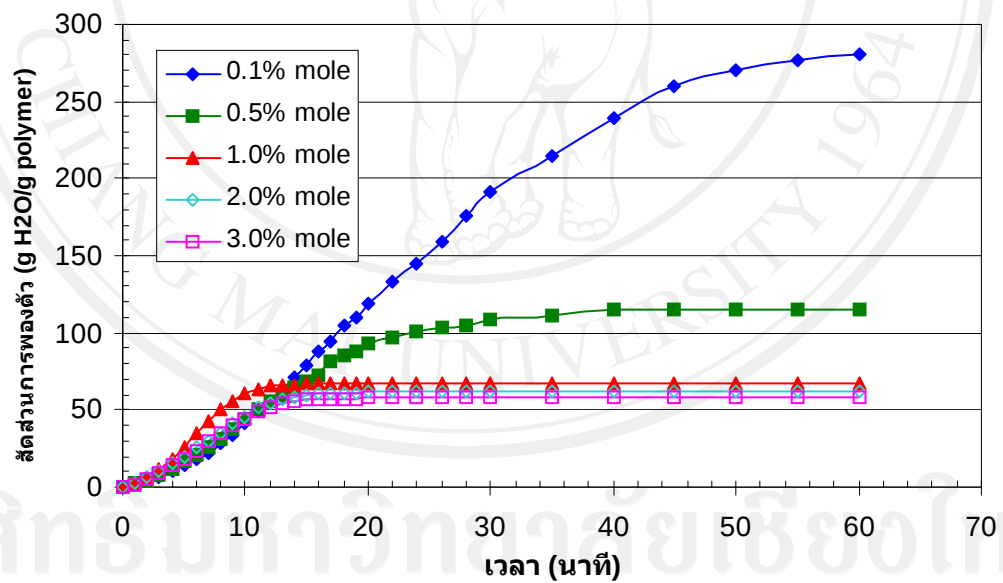


(ข)

รูป 3.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำ และ (ข) สัดส่วนการพองตัว กับเวลาของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ที่ใช้ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 30-60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

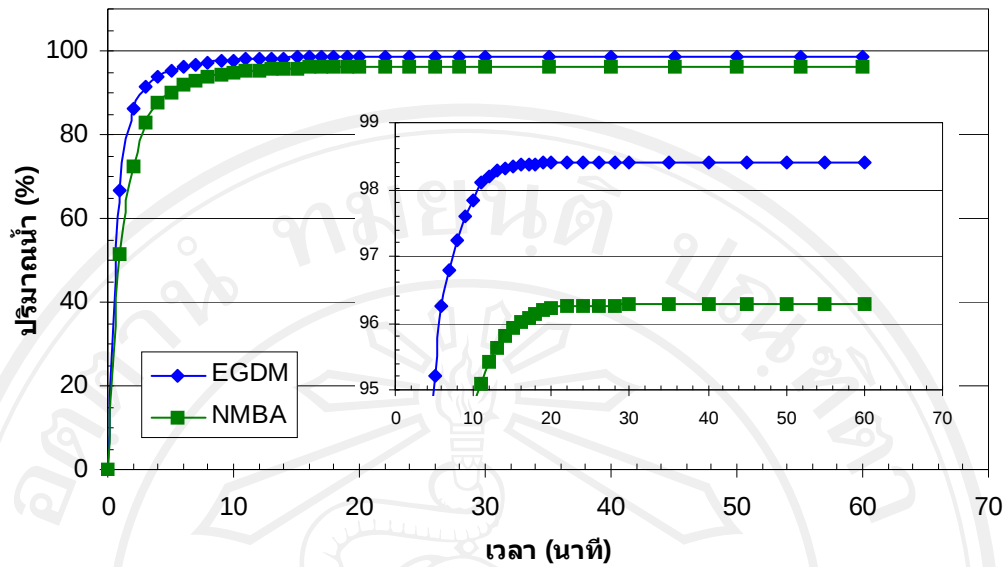


(ก)

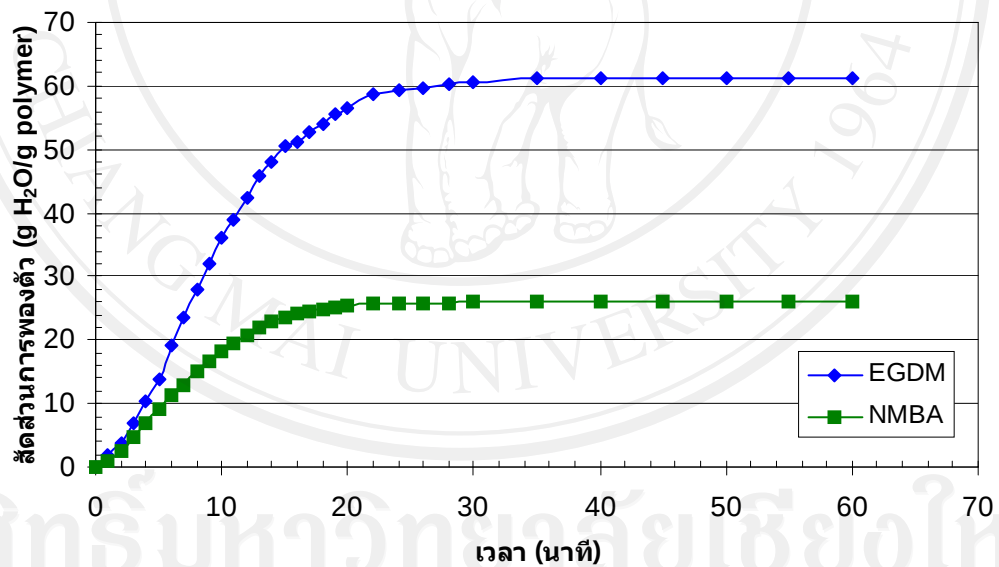


(ข)

รูป 3.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำ และ (ข) สัดส่วนการพองตัว กับเวลาของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ โดยใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM แตกต่างกันในช่วง 0.1-3.0% mole ที่ใช้ระบบ รีเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

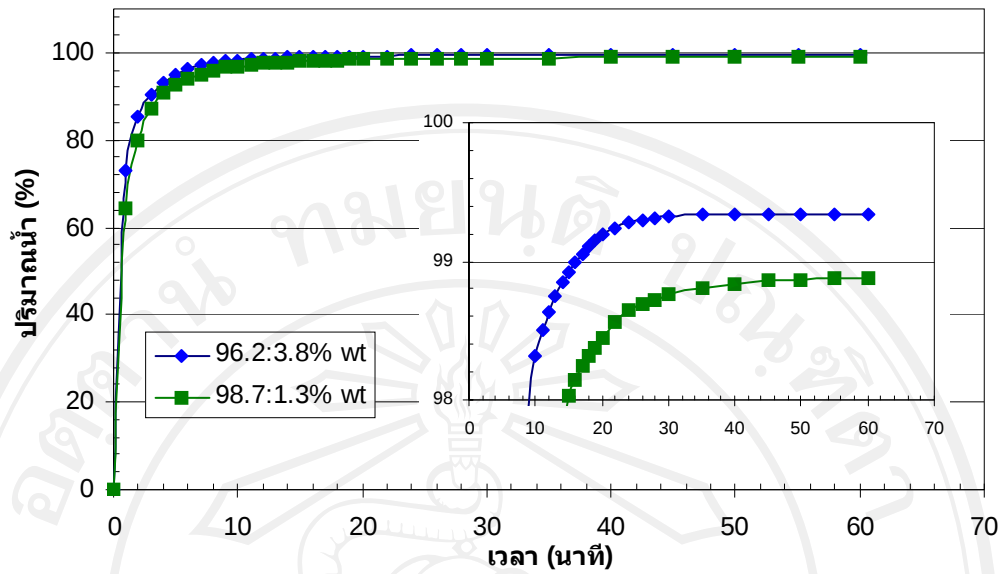


(ก)

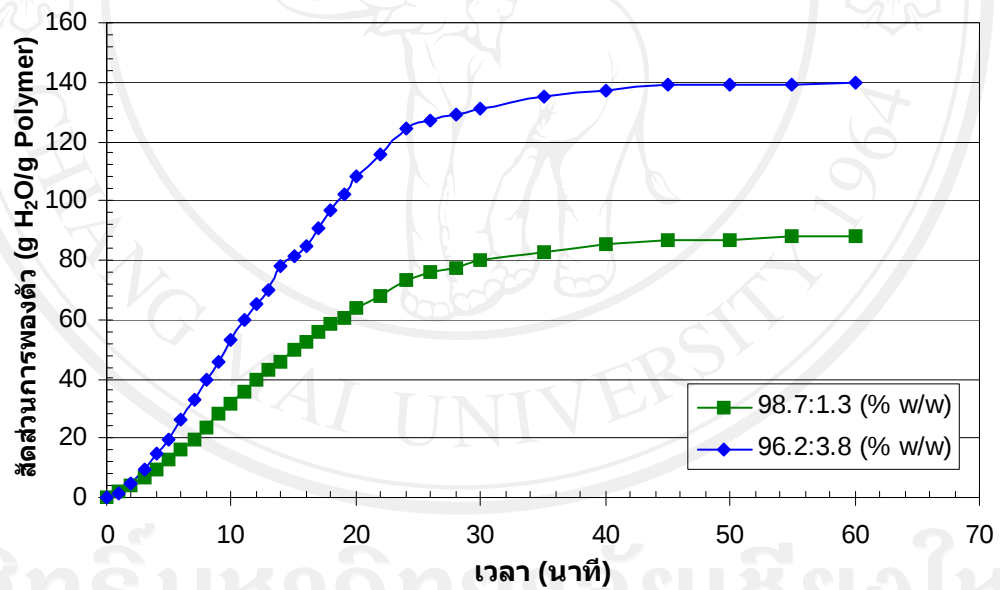


(ข)

รูป 3.10 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำ และ (ข) สัดส่วนการพองตัว กับเวลาของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ โดยใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM และ NMBA 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

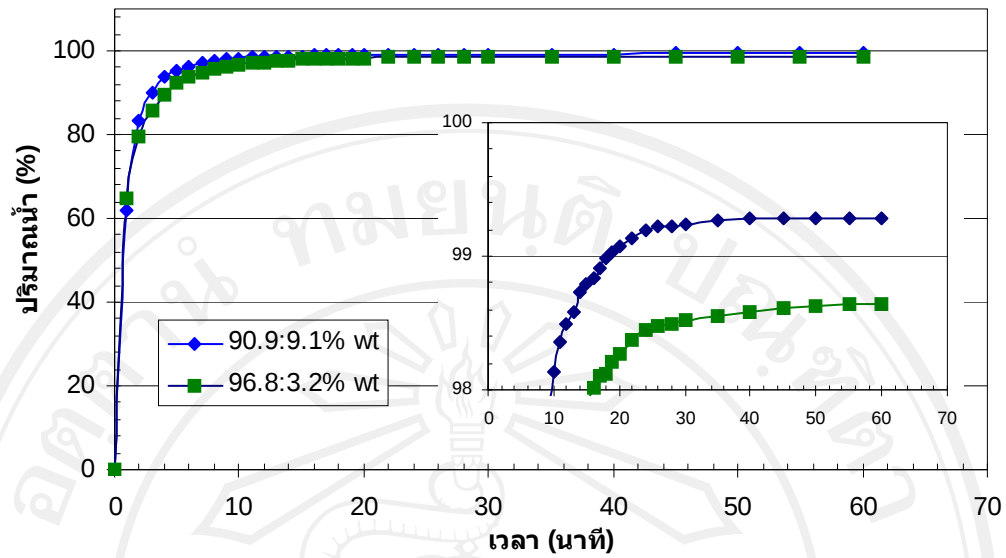


(ก)

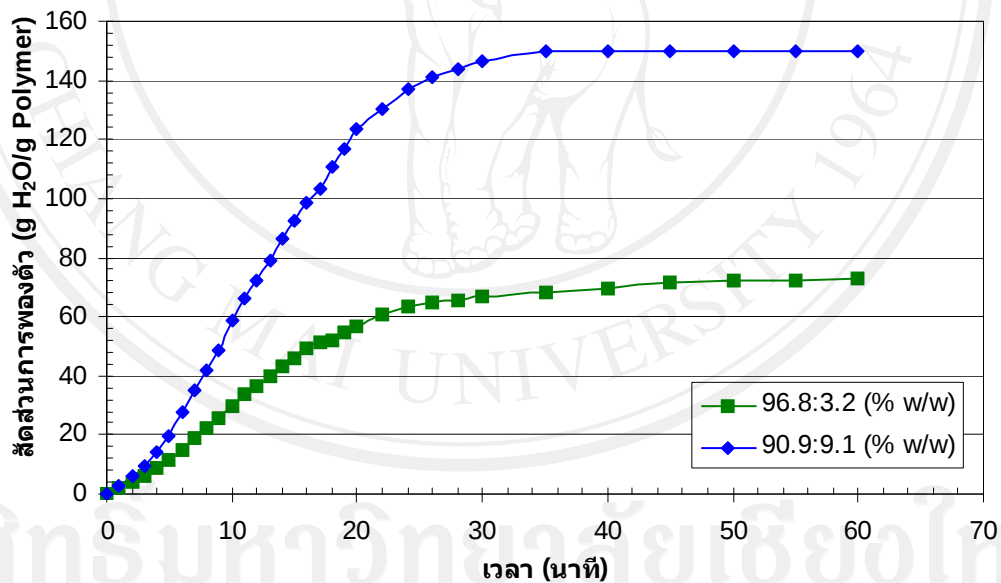


(ข)

รูป 3.11 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำและ (ข) สัดส่วนการพองตัวกับเวลาของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน 98.7:1.3 และ 96.2:3.8% wt ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ โดยใช้ตัวเชื่อมตอสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

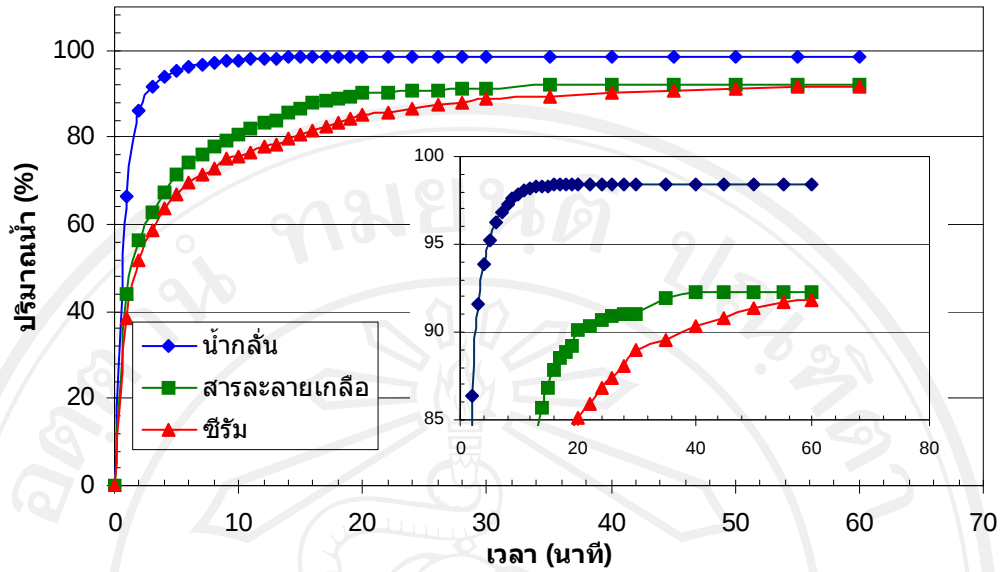


(ก)

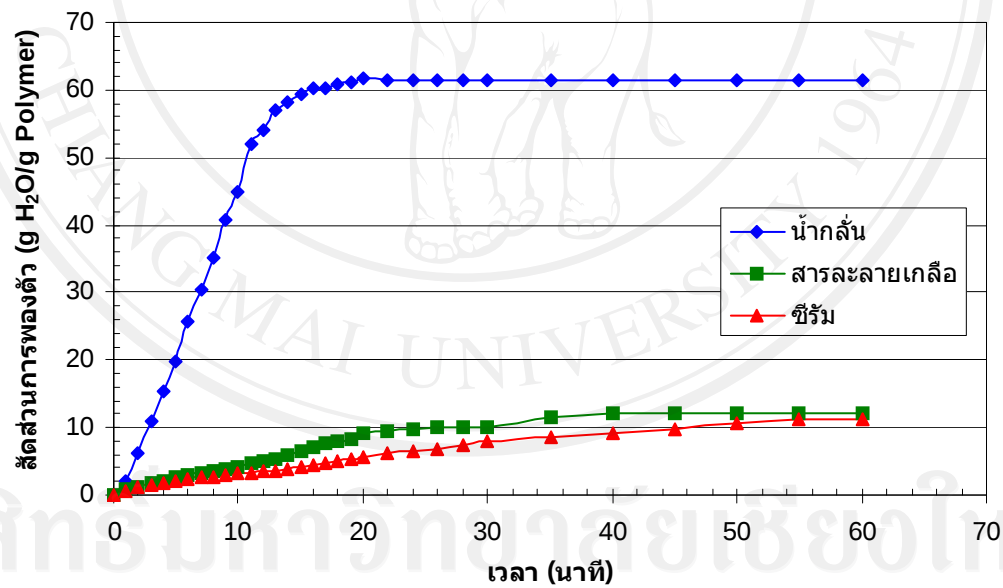


(ข)

รูป 3.12 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำ และ (ข) สัดส่วนการพองตัว กับเวลาของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน 96.8:3.2 และ 90.9:9.1% wt ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

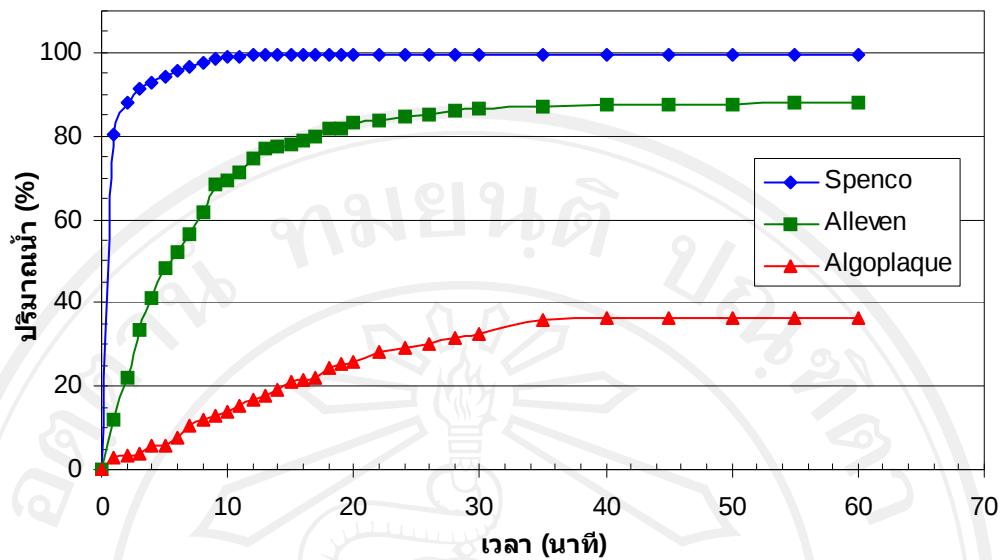


(ก)

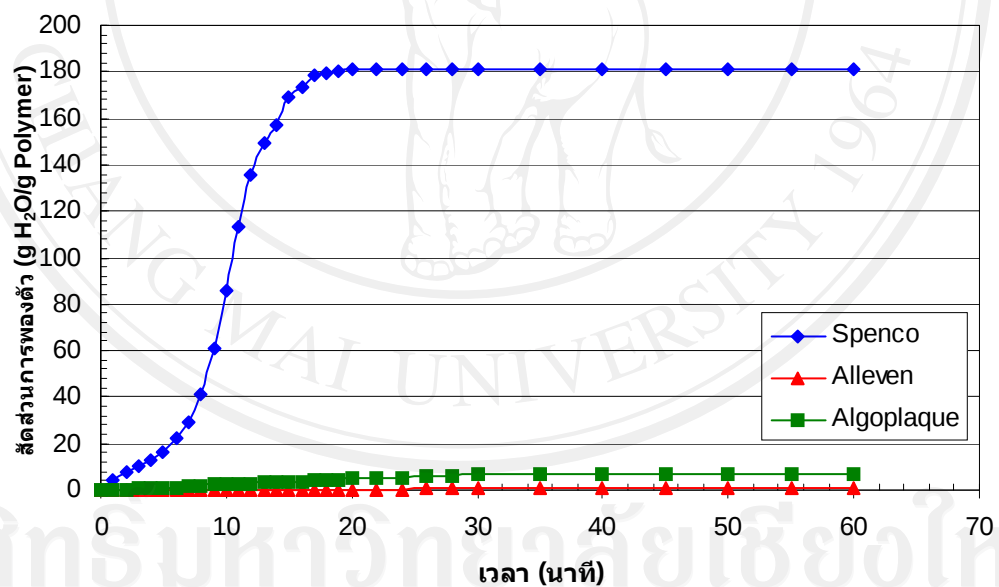


(ข)

รูป 3.13 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำ และ (ข) สัดส่วนการพองตัว กับเวลาของไฮโดรเจลชนิด poly(AMPS- Na^+) 50% w/v ในสารละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายเกลือ และซีรัม ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต



(ก)



(ข)

รูป 3.14 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณองค์ประกอบน้ำ และ (ข) สัดส่วนการพองตัว กับเวลาของวัสดุปิดแผลทางการค้า ได้แก่ Spenco[®] Allevin[®] และ Algoplaque[®] ในน้ำ กลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลประการแรกคือ ปริมาณและชนิดของหมู่ไฮโดรฟิลิกที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างไฮโดรเจล และลักษณะโครงสร้าง โดยเฉพาะความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย รวมถึงความแตกต่างของค่า pH, dielectric constants และอุณหภูมิของสารละลายที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะมีผลต่อความดันออสโมติกของน้ำระหว่างภายในและนอกโครงสร้างไฮโดรเจล [Liu (2004); Atta (1999)]

จากกราฟรูป 3.7 (ก) เป็นการแสดงความสามารถในการดูดซับน้ำในรูปปริมาณน้ำร้อยละ องค์ประกอบ (water content, WC) และ (ข) สัดส่วนการพองตัว (swelling, SR) พบว่าการตั้งเคราะห์ไฮโดรเจลที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความสามารถดูดซับน้ำทั้งในรูป WC และ SR ซึ่งอยู่ในช่วง 98.8-98.4 (%) และ 84.7-61.5 (g H₂O/ g polymer) ตามลำดับ ซึ่งค่า EWC ที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน SR มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตามค่า EWC ที่ได้ถือว่าเป็นค่าที่สูง [Ottenbrite (1996)] ซึ่งแนวโน้มของกราฟทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือไฮโดรเจลตัวอย่างที่ใช้ระบบริเริ่มแบบความร้อนมีปริมาณดูดซับน้ำและใช้เวลาเพื่อเข้าสู่สมดุลมากกว่ารีดอกซ์และแสงอัลตราไวโอเล็ต ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเล็ตจะส่งผลให้โครงสร้างมีโครงร่างตาข่ายสามมิติโดยรวมที่หนาแน่นมากกว่า ทำให้มีความยืดหยุ่นและพื้นที่ว่าง (free volume) ภายในโครงสร้างที่น้อยกว่า ดังนั้นโมเลกุลน้ำจึงสามารถแพร่ผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างได้ยากและน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันข้างต้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันที่ดีกว่า โดยเห็นได้จากการเกิดโครงร่างตาข่ายที่มากและใช้เวลาน้อยกว่า นอกจากนั้นการตั้งเคราะห์ในระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตยังมีความสะดวกและรวดเร็วอย่างมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นระบบที่น่าสนใจและสามารถพัฒนาให้เป็นการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้

จากกราฟรูป 3.8 และ 3.9 เป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ (AMPS-Na⁺ 30-60% w/v) และปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (EGDM 0.1-3.0% mole) ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ WC (ก) และ SR (ข) ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมอนอเมอร์หรือปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลตัวอย่างลดลงตามลำดับ กรณีอิทธิพลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอนอเมอร์จะส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมของไฮโดรเจลดังกล่าวมีปริมาณของการเชื่อมต่อภายในโครงร่างตาข่ายที่เพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือน้ำหนักโมเลกุล

ระหว่างตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (number average molecular weight between crosslinks, $\overline{M}_c$) ที่น้อยลง จึงทำให้โครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น มีความยืดหยุ่นและพื้นที่ว่างภายใน โครงสร้างน้อยลง ดังนั้นจึงส่งผลให้โมเลกุลน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างได้ยากและน้อยลง ตามลำดับ แต่จะสามารถดูดซับน้ำเพื่อเข้าสู่สมดุลที่เร็วกว่า โดยสังเกตจากความชันของกราฟในช่วงแรก กรณิธิ์ผลของปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ก็สามารถอธิบายในลักษณะเช่นเดียวกับข้างต้น คือเกี่ยวข้องกับปริมาณการเกิดจุดเชื่อมต่อสายโซ่ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อน [Atta (1999)] จากการทดลอง พบว่าความสามารถของการดูดซับน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการใช้ความเข้มข้นของตัวเชื่อมต่อสายโซ่ในช่วง 1.0-3.0% mole อาจเป็นการแสดงให้เห็นได้ว่าโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลที่ถูกสร้างขึ้นอาจจะที่มีขอบเขตจำกัดอยู่ โดยถ้าหากมีการใช้ปริมาณของตัวเชื่อมต่อสายโซ่มากกว่า 3.0% mole ก็ไม่อาจทำให้ความสามารถของการดูดซับน้ำเปลี่ยนแปลงไปมากกว่านี้

จากกราฟรูป 3.10 พบว่าไฮโดรเจลตัวอย่างที่ใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ชนิด EGDM มีความสามารถในการดูดซับน้ำทั้งในรูป WC (ก) และ SR (ข) มากกว่า NMBA แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนในกราฟความสัมพันธ์ SR มากกว่า ทั้งนี้ยังสามารถอธิบายได้ว่าความยาวโมเลกุลของ EGDM มีความยาวมากกว่า NMBA ดังนั้นเมื่อใช้ EGDM จะทำให้การเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่มีระยะห่างระหว่างสายพอลิเมอร์มากกว่า ส่งผลให้โครงร่างตาข่ายสามมิติโดยรวมมีความหนาแน่นน้อยกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็จะมีพื้นที่ว่างภายในโครงสร้างและความยืดหยุ่นมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ NMBA ที่ปริมาณเท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลน้ำแพร่เข้าไปภายในโครงร่างตาข่ายได้ง่ายและมีปริมาณมากกว่า

โครงสร้างไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็น semi-IPN ซึ่งจะประกอบด้วยสายโซ่ของ AMPS- Na^+ เชื่อมต่อกันด้วยตัวเชื่อมต่อสายโซ่ซึ่งในที่นี้คือ EGDM ทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายในลักษณะสามมิติ นอกจากนั้นจะมีสายโซ่พอลิเมอร์ของ CMC แทรกอยู่ภายในโครงร่างตาข่ายดังกล่าว จากกราฟรูป 3.11 เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำทั้งในรูป WC (ก) และ SR (ข) ของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC ที่อัตราส่วน 98.7:1.3 และ 96.2:3.8% wt พบว่าที่อัตราส่วน 96.2:3.8% wt มีปริมาณการดูดซับน้ำที่มากกว่า อาจเนื่องจากที่อัตราส่วนนี้มีปริมาณของ CMC มากกว่า ซึ่งสายโซ่โมเลกุลของ CMC มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิก (คาร์บอกซิเลต (COO^-) และ ไฮดรอกซิล (OH)) ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณของ CMC ที่เพิ่มมากขึ้นจึงเป็นการเพิ่มหมู่ที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกภายในโครงสร้างไฮโดรเจล จึงส่งผลให้ไฮโดรเจลดังกล่าวชักนำและดูดซับโมเลกุลน้ำได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ใช้ CMC น้อยกว่า [Wang (2007)] นอกจากนั้นที่อัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่ใช้ปริมาณของ AMPS-

Na^+ ที่น้อยกว่า ทำให้มีปริมาณของการเกิดจุดเชื่อมต่อของโครงร่างตาข่ายที่น้อยลง ส่งผลทำให้โครงสร้าโดยรวมของโครงร่างตาข่ายมีความหนาแน่นน้อยกว่า แสดงถึงการมีพื้นที่ว่างและความยืดหยุ่นภายในโครงสร้ามากกว่า ดังนั้นโมเลกุลน้ำจึงสามารถเข้าไปภายในโครงสร้าได้ง่ายและมากกว่า นอกจากนั้นการที่สายโซ่พอลิเมอร์เบลนด์ CMC แทรกตัวเข้าไปอยู่ภายในโครงร่างตาข่ายของ $\text{poly}(\text{AMPS}-\text{Na}^+)$ มีผลทำให้โครงร่างตาข่ายดังกล่าวขยายตัวออกมากขึ้น [Yang (2000)] ซึ่งถือว่าการเพิ่ม free volume ภายในโครงสร้า และจากกราฟรูป 3.12 เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำเช่นเดียวกับกราฟรูป 3.11 แต่เป็นของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง $\text{AMPS}-\text{Na}^+$ กับ CMCTS ที่อัตราส่วน 96.8:3.2 และ 90.9:9.1% wt พบว่ามีแนวโน้ม WC (ก) และ SR (ข) ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกับไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง $\text{AMPS}-\text{Na}^+$ กับ CMC กล่าวคืออัตราส่วนที่มีปริมาณของพอลิเมอร์เบลนด์มากกว่าจะสามารถดูดซับได้มากกว่า อาจเนื่องจากโครงสร้าทางเคมีของทั้ง CMC และ CMCTS มีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกที่คล้ายกัน ดังนั้นจึงส่งผลต่อความสามารถดูดซับน้ำดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น และอิทธิพลความแตกต่างของโครงร่างตาข่ายจากการใช้ปริมาณมอนอเมอร์และตัวเชื่อมต่อน้ำที่ต่างกัน รวมไปถึงการขยายออกของโครงร่างตาข่ายจากการแทรกตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ ซึ่งสามารถอธิบายในลักษณะเช่นเดียวกับกราฟรูป 3.11

จากกราฟรูป 3.13 เมื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลตัวอย่างในสารละลายน้ำกลั่นพบว่าปริมาณการดูดซับน้ำทั้งในรูป WC (ก) และ SR (ข) มากกว่าสารละลายเกลือ (normal saline) และซีรัม (ที่ได้จากการสกัดจากเลือดไก่) ตามลำดับ เพราะว่าภายในระบบสารละลายเกลือและซีรัมมีไอออนอื่นเป็นองค์ประกอบด้วยจึงเป็นสารละลายที่มี ionic strength ที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำกลั่น กล่าวคือเมื่อระบบมี ionic strength ที่เพิ่มมากขึ้นแสดงว่าในระบบมีไอออนที่เคลื่อนได้เพิ่มมากขึ้นตาม ซึ่งไอออนเหล่านี้จะไปลดความแตกต่างระหว่างความดันออสโมติกของน้ำภายในกับภายนอกโครงสร้าไฮโดรเจลเป็นผลให้ความแตกต่างของความดันออสโมติกดังกล่าวมีน้อยลง จึงทำให้โมเลกุลน้ำที่จะแพร่เข้าไปภายในโครงสร้ามีต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามสมดุลความดันออสโมติกของ Donnan (Donnan osmotic pressure equilibrium) [Kim (2004)]

จากกราฟรูป 3.14 พบว่าวัสดุปิดแผลทางการค้าชนิด Spenco[®] มีค่า WC (ก) และ SR (ข) มากกว่า Allevan[®] และ Algoplague[®] ตามลำดับ ซึ่งค่าดูดซับน้ำข้างต้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากสังเคราะห์จากสารเคมีเริ่มต้นและวิธีที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นในแผ่นปิดแผลแต่ละชนิดยังมีเป่าประสงค์หรือการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะหรือระดับความรุนแรงของแผลไหม้ที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามถือได้ว่าค่าความสามารถของการดูดซับน้ำของ

แผ่นปิดแผลทางการค้าดังกล่าวเป็นแนวทางหรือใช้เปรียบเทียบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการดูดซับของเหลวรวมถึงเป็นการประเมินเบื้องต้นของการที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในแผลไหม้ลักษณะใด เพื่อเป็นประโยชน์และทำให้การหายของแผลมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ตาราง 3.10 ค่าปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบที่สมดุลของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$

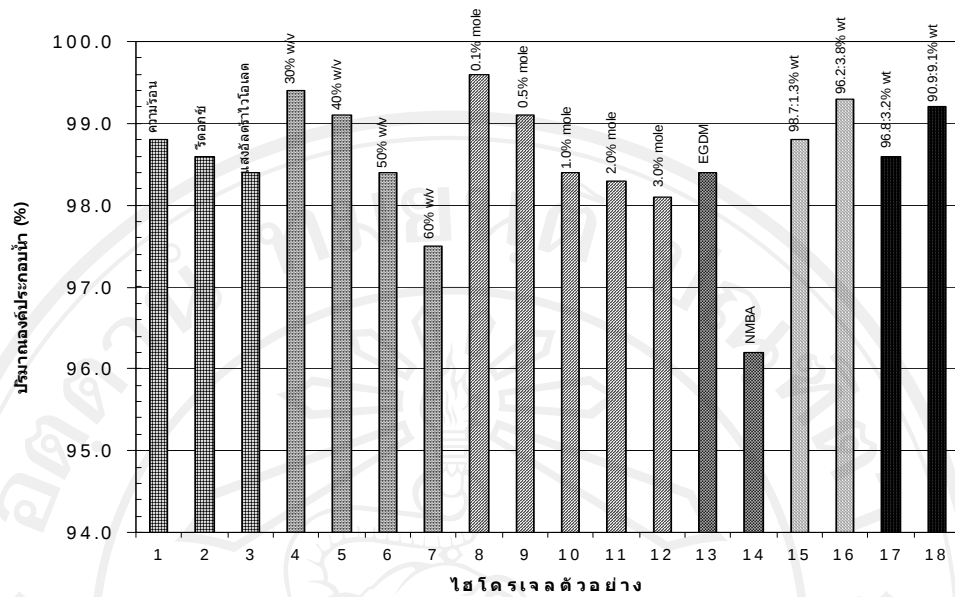
ตัวอย่าง	ค่าปริมาณน้ำสมดุล (%)	ตัวอย่าง	ค่าปริมาณน้ำสมดุล (%)
1.1	98.8 ± 0.2	3.3	98.4 ± 0.2
1.2	98.6 ± 0.1	3.4	98.3 ± 0.1
1.3	98.4 ± 0.1	3.5	98.1 ± 0.2
2.1	99.4 ± 0.3	4.1	98.4 ± 0.2
2.2	99.1 ± 0.4	4.2	96.2 ± 0.2
2.3	98.4 ± 0.2	5.1	98.8 ± 0.3
2.4	97.5 ± 0.2	5.2	99.3 ± 0.2
3.1	99.6 ± 0.7	6.1	98.6 ± 0.2
3.2	99.1 ± 0.5	6.2	99.2 ± 0.3

(หมายเหตุ: ไฮโดรเจลตัวอย่าง 5.3 และ 6.3 ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นเป็นแผ่นได้จึงไม่สามารถทดสอบได้)

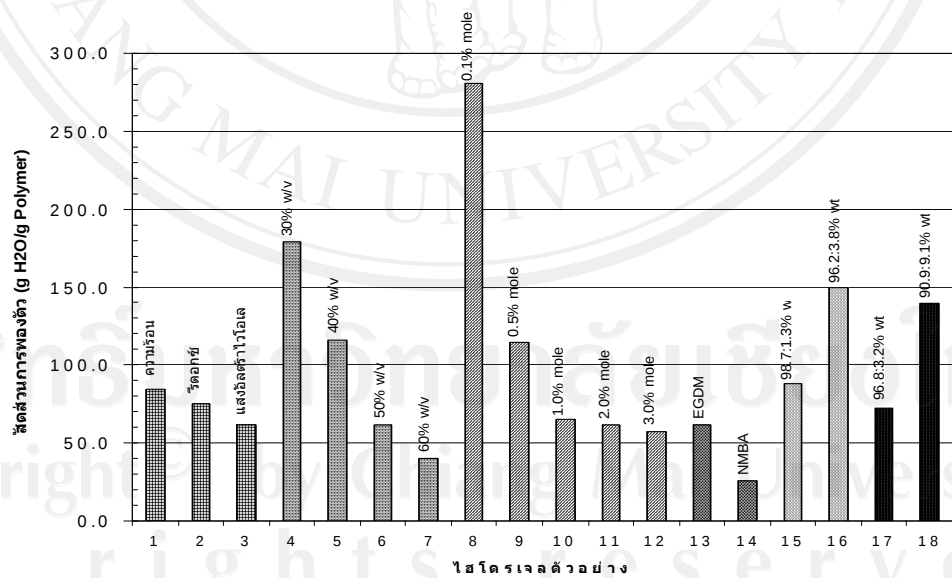
ตาราง 3.11 ค่าสัดส่วนการพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$

ตัวอย่าง	SR (g H ₂ O/ g polymer)	ตัวอย่าง	SR (g H ₂ O/ g polymer)
1.1	84.7 ± 1.1	3.3	64.8 ± 1.0
1.2	75.2 ± 0.8	3.4	61.4 ± 0.7
1.3	61.5 ± 0.7	3.5	57.5 ± 1.1
2.1	179.3 ± 1.3	4.1	61.5 ± 1.0
2.2	116.3 ± 1.7	4.2	25.9 ± 1.1
2.3	61.5 ± 1.0	5.1	87.8 ± 1.4
2.4	40.2 ± 1.1	5.2	150.0 ± 0.9
3.1	280.8 ± 2.7	6.1	72.6 ± 1.0
3.2	114.6 ± 1.4	6.2	139.6 ± 1.5

(หมายเหตุ: ไฮโดรเจลตัวอย่าง 5.3 และ 6.3 ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นเป็นแผ่นได้จึงไม่สามารถทดสอบได้)



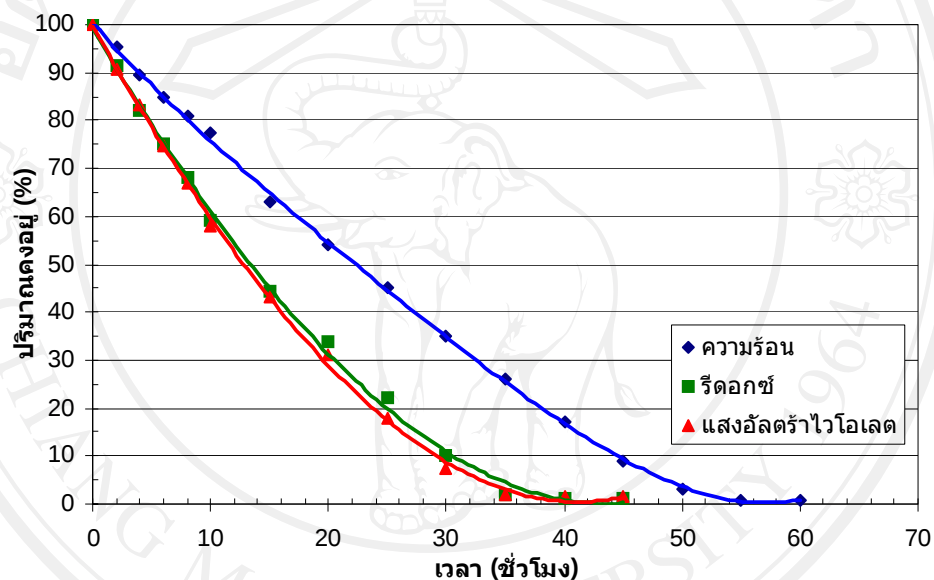
รูป 3.15 กราฟแสดงปริมาณองค์ประกอบน้ำ (%) ของไฮโดรเจลสังเคราะห์
(หมายเหตุ: ไฮโดรเจลสังเคราะห์ลำดับ 1-14 คือ poly(AMPS- Na^+) ลำดับ 15-18 คือไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS ตามลำดับ)



รูป 3.16 กราฟแสดงสัดส่วนการพองตัว (g H_2O /g polymer) ของไฮโดรเจลสังเคราะห์
(หมายเหตุ: ไฮโดรเจลสังเคราะห์ลำดับ 1-14 คือ poly(AMPS- Na^+) ลำดับ 15-18 คือไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS ตามลำดับ)

3.2.2 ปริมาณน้ำคงอยู่ (Water Retention)

ปริมาณน้ำคงอยู่ที่ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) จากการเปรียบเทียบในระบบที่แตกต่างกันได้แก่ (ก) ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน (ข) ความเข้มข้นมอนอเมอร์แตกต่างกัน (ค) ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน (ง) ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน รวมถึง (จ) ไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS แสดงดังรูป 3.17-3.22

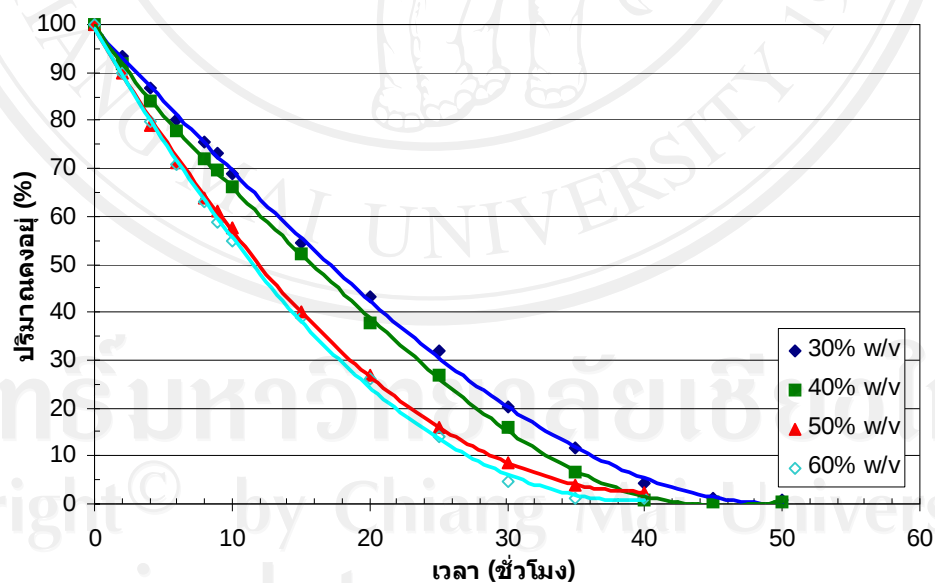


รูป 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลา ของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความร้อน รีดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

โดยทั่วไปการระเหยออกของโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในแผ่นไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักคือสภาวะภายในและภายนอกแผ่นไฮโดรเจล กล่าวคือสภาวะภายในแผ่นคือลักษณะโครงสร้างของไฮโดรเจลโดยเฉพาะปริมาณและชนิดความเป็นไฮโดรฟิลิก ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับปริมาณและชนิดของโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือโมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ (free water) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ ระเหยได้ง่าย และโมเลกุลน้ำที่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ (bound water) ซึ่งเคลื่อนที่ได้ยากภายในโครงสร้าง

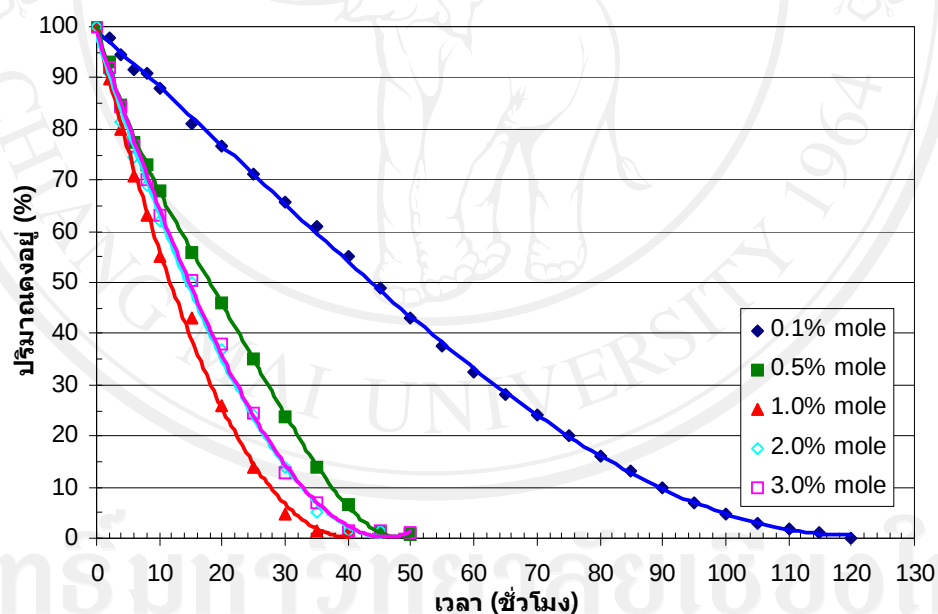
และต้องใช้ความร้อนในการระเหยที่มากกว่าโมเลกุลน้ำชนิด free water หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อาจใช้เวลานานกว่า [Williams (1987)] ส่วนสภาวะภายนอกแผ่นไฮโดรเจล คือสภาพบรรยากาศ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น นอกจากนั้นยังรวมไปถึงความหนาและพื้นที่ของแผ่นไฮโดรเจล

ก่อนการทดสอบไฮโดรเจลตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำไปแช่ในน้ำกลั่นให้อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นขณะเริ่มต้นไฮโดรเจลตัวอย่างจึงมีปริมาณน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างที่แตกต่างกันตามความสามารถดูดซับน้ำในแต่ละตัวอย่าง แต่จะเท่ากันในลักษณะของความสามารถที่มากที่สุดในการดูดซับน้ำ จากกราฟรูป 3.17 แสดงแนวโน้มการลดลงของโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออยู่ในอินคิวเบเตอร์ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการแสดงค่าปริมาณน้ำคงอยู่ที่เวลาต่างๆ พบว่าปริมาณน้ำคงอยู่ของไฮโดรเจลตัวอย่างที่สังเคราะห์จากระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ความร้อนมีมากกว่า ริดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเลต ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะของโครงสร้างแบบร่างตาข่ายที่มีลักษณะแตกต่างกันจากระบบของการสังเคราะห์ ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการระเหยออกไปของโมเลกุลน้ำ



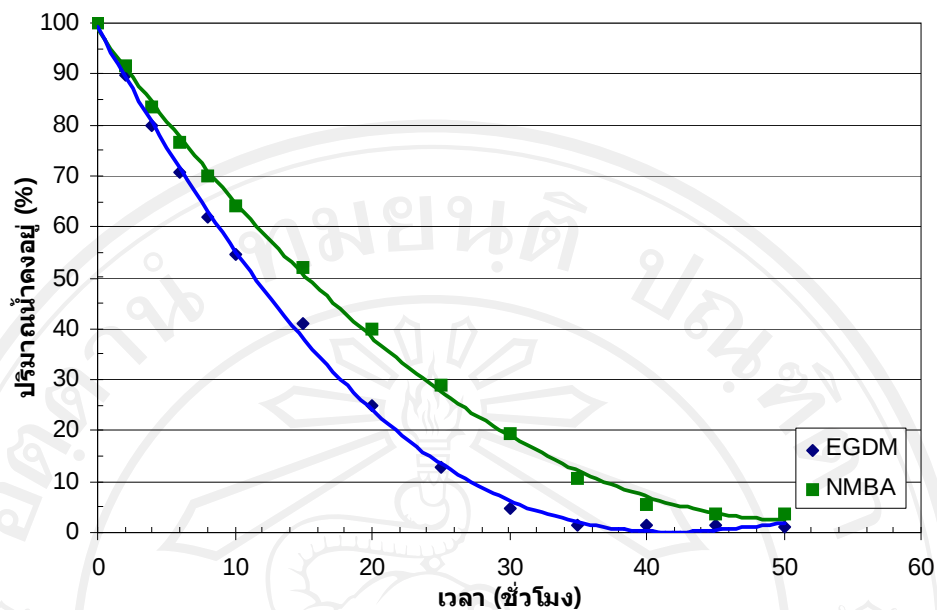
รูป 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลา ของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) ที่ใช้ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 30-60 % w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

จากกราฟรูป 3.18 พบว่า ณ เวลาเดียวกันไฮโดรเจลตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นมอนอเมอร์เพิ่มมากขึ้นจะมีค่าปริมาณน้ำคงอยู่ที่ลดลงตามลำดับ เนื่องจากเมื่อมีการใช้ปริมาณมอนอเมอร์ที่ต่ำก็เป็นไปได้ว่าโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลอยู่กันอย่างหลวมๆ ไม่หนาแน่น ทำให้มีพื้นที่ว่างภายในโครงสร้างมากกว่าจึงสามารถดูดซับปริมาณน้ำได้มากกว่า ซึ่งโมเลกุลน้ำที่เข้าไปก็สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากการใช้มอนอเมอร์ปริมาณที่มากกว่าความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายมากกว่าก็ทำให้การดูดซับน้ำลดลงและมีปริมาณน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อปล่อยให้เกิดการระเหยออกไปไฮโดรเจลที่มีการดูดซับน้ำได้มากกว่าจึงยังคงเหลือโมเลกุลน้ำภายในโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ในปริมาณที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตได้ว่าอัตราการระเหยออกไปของโมเลกุลน้ำเกิดได้เร็วเมื่อไฮโดรเจลถูกสังเคราะห์ด้วยปริมาณมอนอเมอร์ที่มากกว่า ซึ่งมีความหนาแน่นของการเกิดโครงร่างตาข่ายที่สูงกว่า



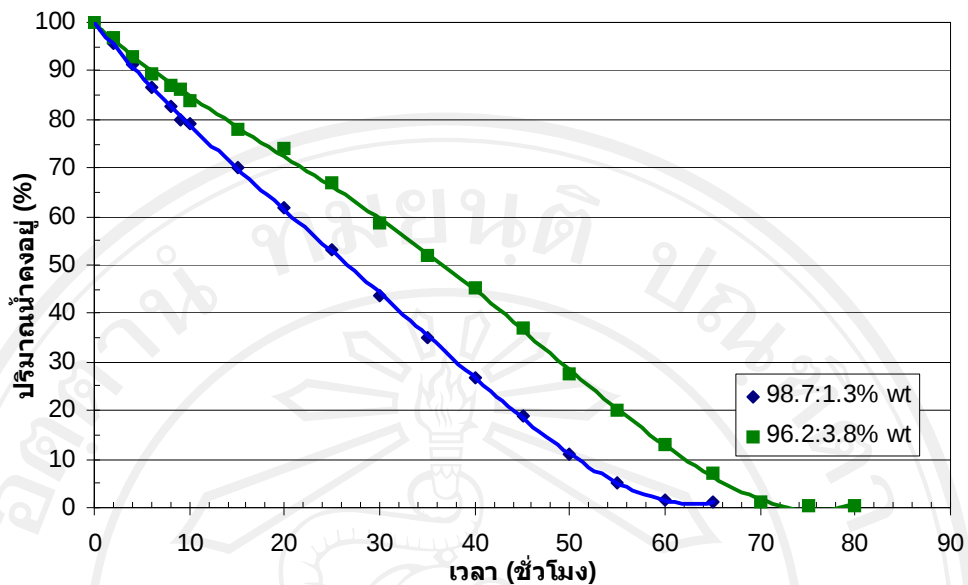
รูป 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลา ของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM แตกต่างกันในช่วง 0.1-3.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

จากกราฟรูป 3.19 แสดงปริมาณน้ำคงอยู่ของไฮโดรเจลตัวอย่างที่ใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่แตกต่างกัน กล่าวได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง 0.1-0.5% mole พบว่า ณ เวลาเดียวกันไฮโดรเจลตัวอย่างที่มีการใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่มากกว่ามีปริมาณน้ำคงอยู่เหลือน้อยกว่าตามลำดับ หรือมีอัตราการระเหยออกไปของน้ำที่เร็วกว่า ซึ่งการทดลองอิทธิพลของความเข้มข้นตัวเชื่อมต่อสายโซ่ค่อนข้างเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอิทธิพลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการสร้างโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ที่ต่างกันซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถดูดซับน้ำเข้ามาไว้ในโครงสร้างของไฮโดรเจล ทั้งนี้อาจกล่าวโดยรวมว่าเมื่อไฮโดรเจลตัวอย่างใดดูดซับน้ำไว้ได้มากกว่าก็ย่อมมีปริมาณน้ำคงเหลือ ณ เวลาต่างๆ ด้วยระดับที่สูงกว่าจากการทดลองนี้อาจสรุปได้ว่าปริมาณน้ำคงอยู่นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลจนถึงสมดุลมากกว่าอิทธิพลจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำและสายโซ่พอลิเมอร์ ส่วนกรณีที่ใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง 1.0-3.0% mole พบว่า ณ เวลาเดียวกันมีปริมาณน้ำคงอยู่ที่มากกว่าตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับไฮโดรเจลที่ใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่น้อยกว่าในข้างต้น อาจเนื่องจากการใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่มากขึ้นจะไปส่งผลต่อโครงสร้างโดยเฉพาะความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย ซึ่งจะเพิ่มปริมาณของการเกิดจุดเชื่อมต่อของโครงร่างตาข่ายทำให้โครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ แสดงว่าสายโซ่พอลิเมอร์อยู่ใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นเมื่อไฮโดรเจลดังกล่าวดูดซับโมเลกุลน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างจะทำให้โอกาสที่โมเลกุลน้ำจะอยู่ใกล้สายโซ่พอลิเมอร์มีมากขึ้น เมื่อโมเลกุลน้ำอยู่ใกล้สายโซ่พอลิเมอร์จะส่งผลให้โมเลกุลน้ำดังกล่าวสามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีกับสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งถือว่าเป็นโมเลกุลน้ำชนิด bound water ทำให้การระเหยของโมเลกุลน้ำจึงเป็นไปได้ยากและใช้เวลานานกว่า



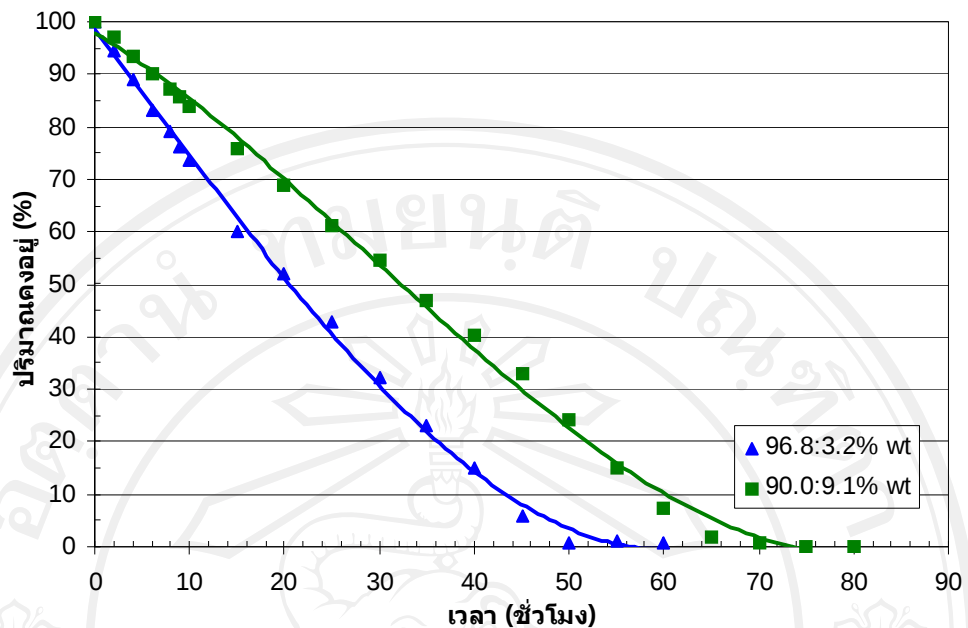
รูป 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลา ของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM และ NMBA 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

จากกราฟรูป 3.20 จะเห็นได้ว่าชนิดของตัวเชื่อมต่อสายโซ่สามารถส่งผลกระทบอย่างมากต่อการระเหยออกของน้ำ การทดลองนี้พบว่าไฮโดรเจลตัวอย่างที่ใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ชนิด NMBA จะมีปริมาณน้ำคงอยู่ที่ยาวนานกว่า EGDM ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้าง กล่าวคือ EGDM มีความยาวโมเลกุลมากกว่า NMBA ดังนั้นเมื่อนำ NMBA ไปใช้เป็นตัวเชื่อมต่อสายโซ่จะทำให้มีความยาวของการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่สั้นกว่า EGDM ทำให้โครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นมากกว่า ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปภายในโครงสร้างสามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีกับสายโซ่พอลิเมอร์ที่แรงและปริมาณมากกว่า



รูป 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลา ของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน 98.7:1.3 และ 96.2:3.8% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริมาตรปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

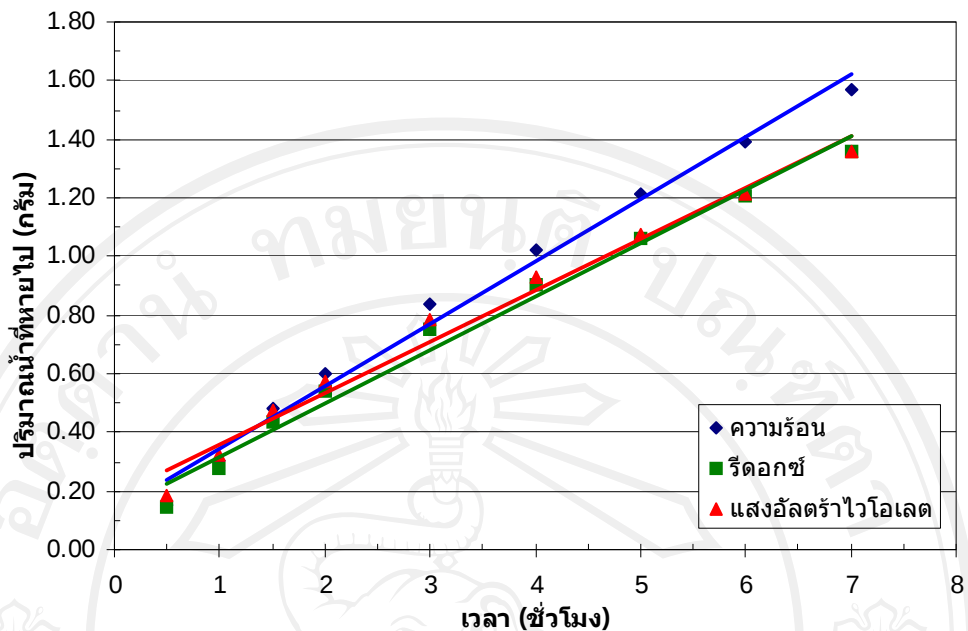
จากกราฟรูป 3.21 และ 3.22 แสดงปริมาณน้ำคงอยู่ที่เวลาต่างๆ ของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC ที่อัตราส่วน 98.7:1.3 และ 96.2:3.8% wt และ AMPS- Na^+ กับ CMCTS ที่อัตราส่วน 96.8:3.2 และ 90.0:9.1% wt ตามลำดับ พบว่าไฮโดรเจลเบลนด์ทั้งสองชนิดแสดงแนวโน้มปริมาณน้ำคงอยู่ที่เวลาต่างๆ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ณ เวลาเดียวกันไฮโดรเจลเบลนด์ตัวอย่างที่มีสัดส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ (CMC หรือ CMCTS) มากกว่าจะมีปริมาณน้ำคงอยู่มากกว่าหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระเหยโมเลกุลน้ำออกไปได้ช้ากว่า อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนดังกล่าวมีสายโซ่ CMC หรือ CMCTS แทรกอยู่ภายในโครงร่างตาข่ายสามมิติของ poly(AMPS- Na^+) ซึ่งการแทรกของสายโซ่พอลิเมอร์เบลนด์ดังกล่าวจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่สำหรับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้สายโซ่พอลิเมอร์เบลนด์ดังกล่าวมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกได้แก่ COO^- และ $-\text{OH}$ ซึ่งทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำ ซึ่งพันธะไฮโดรเจนถือได้ว่าเป็นอันตรกิริยาที่ค่อนข้างแรง จึงส่งผลให้มีปริมาณน้ำคงอยู่และใช้เวลาระเหยโมเลกุลน้ำที่นานกว่า



รูป 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลาของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน 96.8:3.2 และ 90.9:9.1% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

3.3 อัตราการผ่านของไอน้ำ

การหาอัตราการผ่านของไอน้ำจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาโดยวิธีวอเตอร์คัพ ของแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) จากการเปรียบเทียบในระบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน (ข) ความเข้มข้นมอนอเมอร์แตกต่างกัน (ค) ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน (ง) ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน รวมถึง (จ) ไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS แสดงดังรูป 3.23-3.28 และตารางสรุป

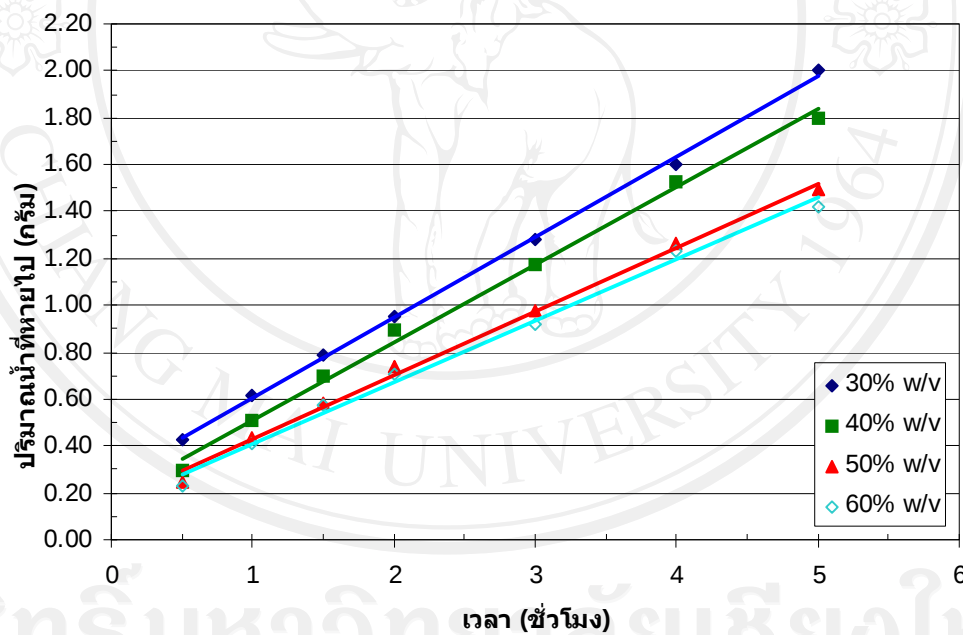


รูป 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลา ของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อนายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน ได้แก่ ความร้อน รีดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

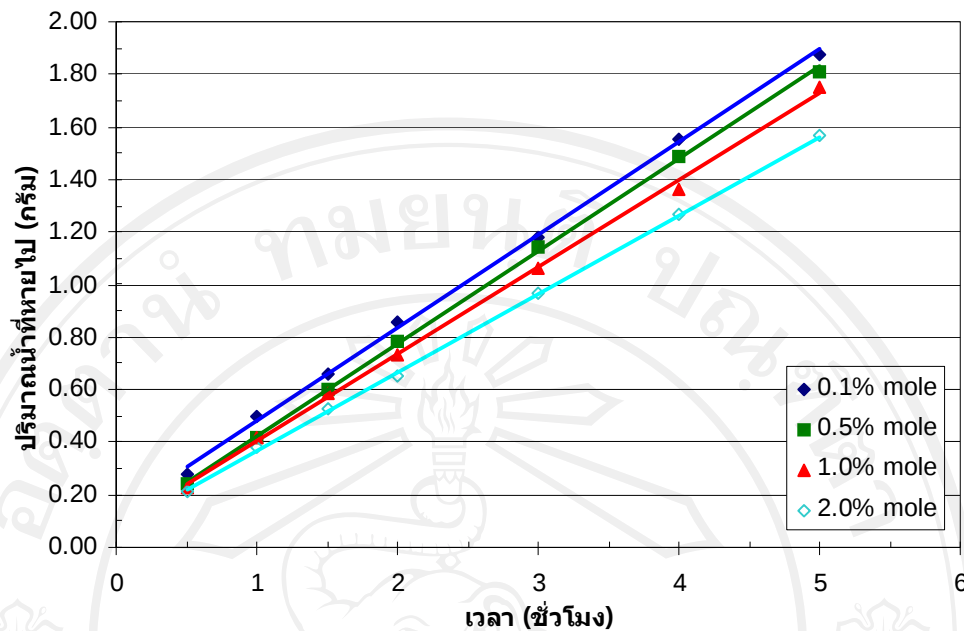
การผ่านของไอน้ำภายในแผ่นไฮโดรเจลประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน เริ่มจากการดูดซับโมเลกุลน้ำเข้ามาทางด้านหนึ่ง ต่อจากนั้นโมเลกุลน้ำก็จะแพร่กระจายไปอีกด้านหนึ่งจนทั่วแผ่น และสุดท้ายคือการระเหยโมเลกุลน้ำออกไป ซึ่งขั้นตอนทั้ง 3 จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ สภาพภายในและภายนอกแผ่นไฮโดรเจล ดังที่ได้กล่าวไว้ในผลการทดลองปริมาณคงอยู่ [Yang (2000)]

จากกราฟรูป 3.23 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำที่หายไปของไฮโดรเจลตัวอย่างที่สังเคราะห์จากระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ความร้อนมีค่ามากกว่า รีดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเล็ต ตามลำดับ จากกราฟดังกล่าวทำให้ทราบถึงความชื้นและค่าอัตราการระเหยของไอน้ำ (water vapour transmission rate, WVTR) ซึ่งได้มาจากการนำค่าความชื้นข้างต้นคำนวณตามสมการที่ 2.4 ซึ่งค่า WVTR ที่ได้อยู่ในช่วง 110-99 (g/hr.m^2) สาเหตุที่ทำให้ไฮโดรเจลทั้งสามตัวอย่างมีค่า WVTR ที่แตกต่างกัน อาจเนื่องจากโครงสร้างที่แตกต่างกันดังที่ได้สรุปไว้ในผลการทดสอบความสามารถดูดซับน้ำ ซึ่งพบว่าไฮโดรเจลตัวอย่างจากระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ความร้อนมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายน้อยกว่า รีดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเล็ต ตามลำดับ เมื่อ

โครงสร้างมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายน้อยกว่าแสดงว่ามีพื้นที่ว่างภายในโครงสร้างและมีความยืดหยุ่นของสายโซ่มากกว่า จึงทำให้โมเลกุลน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างได้ง่ายและมากกว่า หลังจากการดูดซับโมเลกุลน้ำเข้าไปก็จะเกิดการแพร่กระจายโมเลกุลน้ำดังกล่าวออกไปทั่วโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างที่มีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายที่น้อยกว่าจะสามารถแพร่กระจายโมเลกุลน้ำได้เร็วกว่าเนื่องจากโครงสร้างอยู่กันอย่างหลวมๆ และโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างส่วนใหญ่มักจะเป็นชนิด free water เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่ห่างกันและจะสามารถขยายโครงร่างตาข่ายได้มากกว่า ทำให้โอกาสที่โมเลกุลน้ำจะอยู่ห่างจากสายโซ่พอลิเมอร์มีมากขึ้นส่งผลให้โมเลกุลน้ำดังกล่าวสามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีกับสายโซ่พอลิเมอร์ได้ในระดับที่ต่ำหรือไม่สามารถเกิดได้เลย จึงทำให้โมเลกุลน้ำข้างต้นง่ายต่อการถูกระเหย ดังนั้นแผ่นไฮโดรเจลดังกล่าวจึงมีอัตราการผ่านของไอน้ำที่สูงกว่า

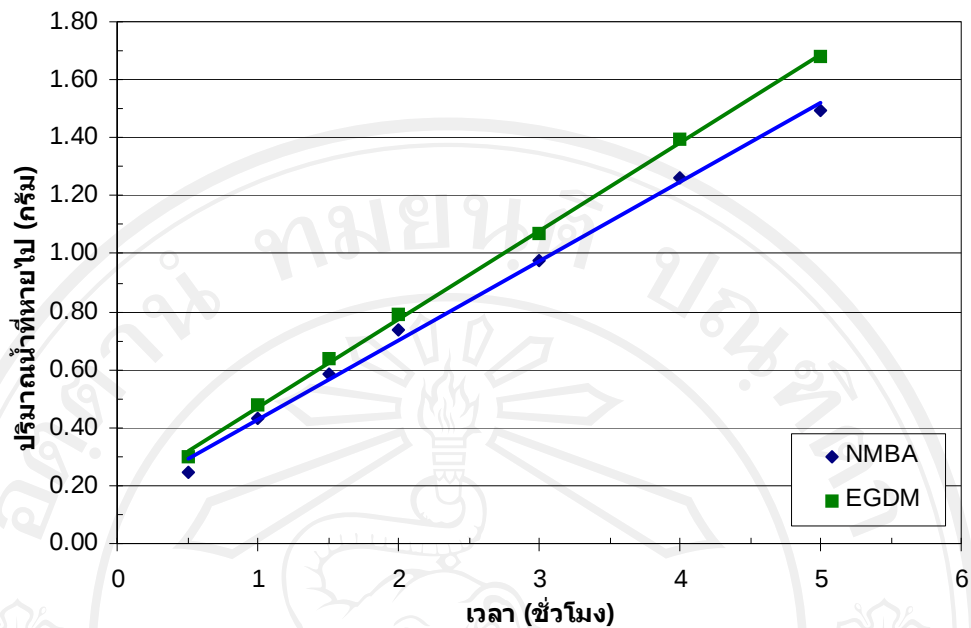


รูป 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลา ของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) ที่ใช้ความเข้มข้นแตกต่างในช่วง 30-60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมตอสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต โดยวิธีวอเตอร์กัฟ ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$



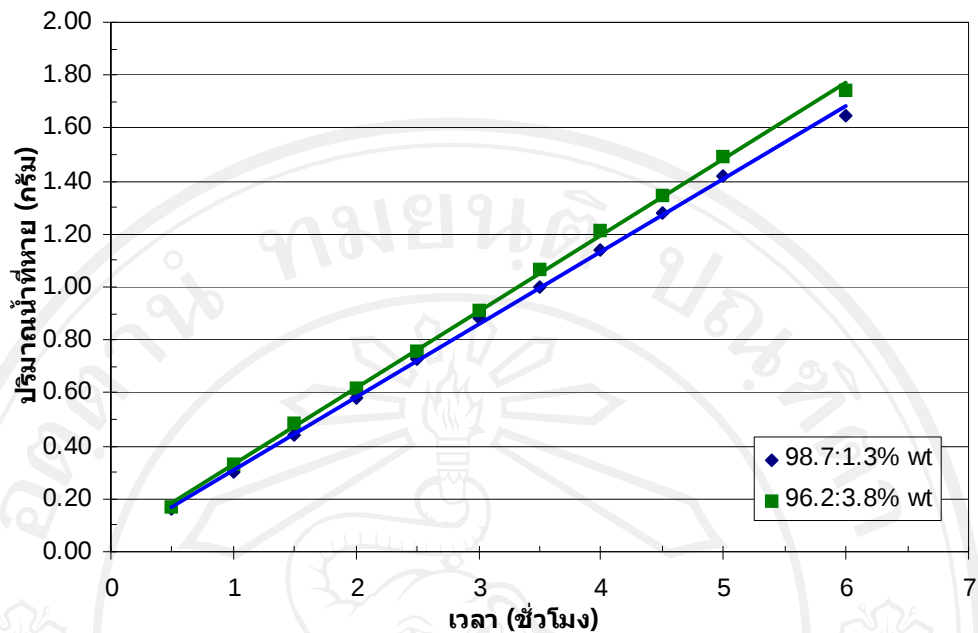
รูป 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลา ของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM แตกต่างกันในช่วง 0.1-2.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

จากกราฟรูป 3.24 และ 3.25 เป็นกราฟที่แสดงปริมาณน้ำที่หายไปเมื่อนำมาคำนวณ WVTR ของไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) ที่สังเคราะห์จากความเข้มข้นมอนอเมอร์ (30-60% w/v) และปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (EGDM 0.1-3.0% mole) ที่แตกต่างกัน พบว่ามีแนวโน้มของปริมาณน้ำที่หายเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมอนอเมอร์หรือปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่จะทำให้ค่า WVTR ลดลงตามลำดับ เนื่องจากการมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน (ดังที่ได้สรุปไว้ในผลการทดสอบความสามารถดูดซับน้ำ) โดยมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการมีปริมาณจุดเชื่อมต่อของโครงร่างตาข่ายที่เพิ่มขึ้น ทำให้โครงร่างตาข่ายมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่ลดลง ($\bar{M}_c$) จึงสรุปได้ว่าโครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะนำไปเพิ่มปริมาณน้ำชนิด bound water และความยากในการแพร่กระจายของโมเลกุลน้ำภายในโครงสร้างรวมไปถึงการลดความสามารถดูดซับน้ำ



รูป 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลา ของไฮโดรเจล $\text{poly(AMPS-Na}^+)$ 50% w/v โดยใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM และ NMBA 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริเริ่ม ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

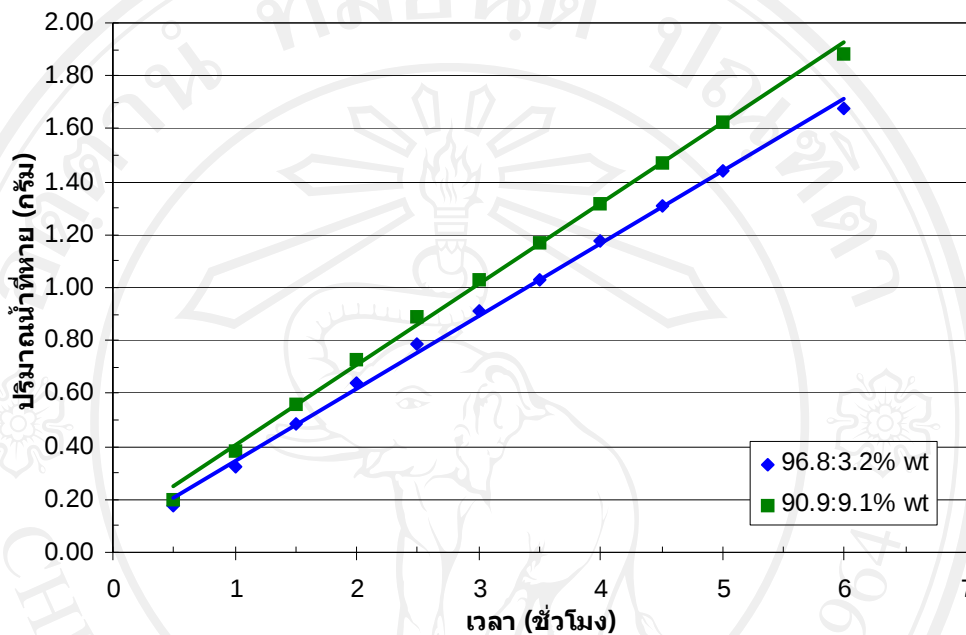
กรณีกราฟรูป 3.26 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่หายไปและ WVTR ของแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่าง $\text{poly(AMPS-Na}^+)$ ที่สังเคราะห์โดยใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่แตกต่างกัน ซึ่งในที่นี้คือ EGDM และ NMBA พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่ใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM มีค่า WVTR มากกว่า NMBA อาจเนื่องจากความแตกต่างโครงสร้างของตัวเชื่อมต่อสายโซ่ ซึ่งโมเลกุลของ EGDM มีความยาวกว่า NMBA ดังนั้นเมื่อนำ EGDM ไปเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่จะทำให้มีการเชื่อมต่อสายโซ่ที่ยาวกว่า ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นน้อยกว่า สายโซ่พอลิเมอร์อยู่ห่างกันมากขึ้นทำให้ภายในโครงสร้างมีโมเลกุลน้ำชนิด free water มากขึ้นตามลำดับซึ่งง่ายต่อการระเหย ดังนั้นจึงทำให้มีค่า WVTR ที่มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวเชื่อมต่อสายโซ่ NMBA



รูป 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลา ของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน 98.7:1.3 และ 96.2:3.8% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

จากกราฟรูป 3.27 และ 3.28 แสดงปริมาณน้ำที่หายไปของแผ่นไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน 96.2:3.8 และ 98.7:1.3% wt และไฮโดรเจลเบลนด์ชนิดระหว่าง AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน 90.9:9.1 และ 96.8:3.2% wt ตามลำดับ พบว่าไฮโดรเจลเบลนด์ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มของค่า WVTR ที่ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ (CMC หรือ CMCTS) พบว่าค่า WVTR เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนที่ใช้พอลิเมอร์เบลนด์ในปริมาณที่มากกว่าจะทำให้โครงสร้างมีจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกเพิ่มมากขึ้น (CMC และ CMCTS มีหมู่ OH และ COO^- อยู่ภายในโครงสร้าง) จึงทำให้สามารถชักนำโมเลกุลน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างได้มากกว่า และยังพบว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่แทรกอยู่ภายในโครงร่างตาข่ายของ poly(AMPS- Na^+) สามารถขยายโครงร่างตาข่ายดังกล่าวได้ จึงทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลน้ำได้ง่ายและมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ก็จะไปลดปริมาณการใช้นอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) และตัวเชื่อมต่อสายโซ่ ซึ่งจะส่งผลต่อโครงร่างตาข่ายของ

poly(AMPS- Na^+) โดยจะไปลดปริมาณของการเกิดจุดเชื่อมต่อกภายในโครงร่างตาข่าย ทำให้โครงร่างตาข่ายมีความหนาแน่นน้อยลง ดังนั้นจึงไปมีผลต่อปริมาณของน้ำชนิด free water และค่า WVTR ให้มากขึ้น



รูป 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลา ของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน 96.8:3.2 และ 90.9:9.1% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5\%$

ตาราง 3.12 แสดงอัตราการผ่านของไอน้ำในผิวหนังปกติและแผลไหม้ที่ระดับต่างๆ

	จำนวนผู้ป่วยที่ ทำการศึกษา (คน)	อุณหภูมิ ของผิวหนัง	อัตราการระเหยของไอน้ำ (g/hr.m ²)
ผิวหนังปกติ	60	$35.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$	8.5 ± 0.5
แผลไหม้ครั้งที่ 1	12	$35.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$	11.6 ± 1.1
แผลไหม้ครั้งที่ 2	30	$35.3 \pm 0.4^\circ\text{C}$	178.1 ± 5.5
แผลไหม้ครั้งที่ 3	20	$34.5 \pm 0.4^\circ\text{C}$	143.2 ± 4.5

ตาราง 3.13 ความชื้นและอัตราการผ่านของไอน้ำของไฮโดรเจลตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นได้ โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5 \%$

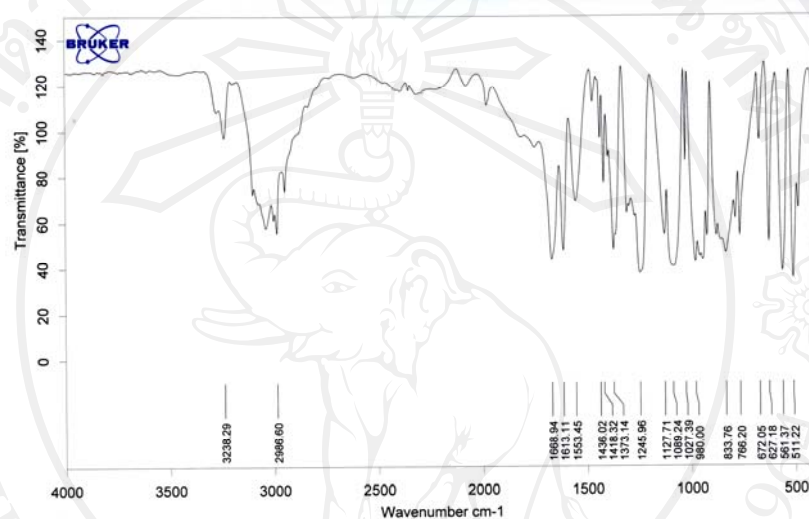
ตัวอย่าง	ความชื้น (g/hr)	WVTR (g/hr.m ²)	ตัวอย่าง	ความชื้น (g/hr)	WVTR (g/hr.m ²)
1.1	0.311 ± 0.010	110 ± 4	3.3	0.330 ± 0.016	116 ± 5
1.2	0.286 ± 0.008	101 ± 3	3.4	0.298 ± 0.009	105 ± 4
1.3	0.280 ± 0.012	099 ± 5	4.1	0.304 ± 0.007	107 ± 3
2.1	0.342 ± 0.019	121 ± 6	4.2	0.273 ± 0.005	096 ± 2
2.2	0.330 ± 0.007	116 ± 3	5.1	0.274 ± 0.017	097 ± 5
2.3	0.273 ± 0.020	096 ± 7	5.2	0.288 ± 0.017	101 ± 5
2.4	0.261 ± 0.014	092 ± 5	6.1	0.273 ± 0.010	096 ± 4
3.1	0.352 ± 0.023	124 ± 8	6.2	0.304 ± 0.009	107 ± 4
3.2	0.350 ± 0.006	123 ± 2			

(หมายเหตุ: ไฮโดรเจลตัวอย่าง 3.5, 5.3 และ 6.3 ไม่สามารถตัดเป็นแผ่นเพื่อทำการทดลองได้จึงไม่ได้ทำการรายงานใน ตาราง 3.13)

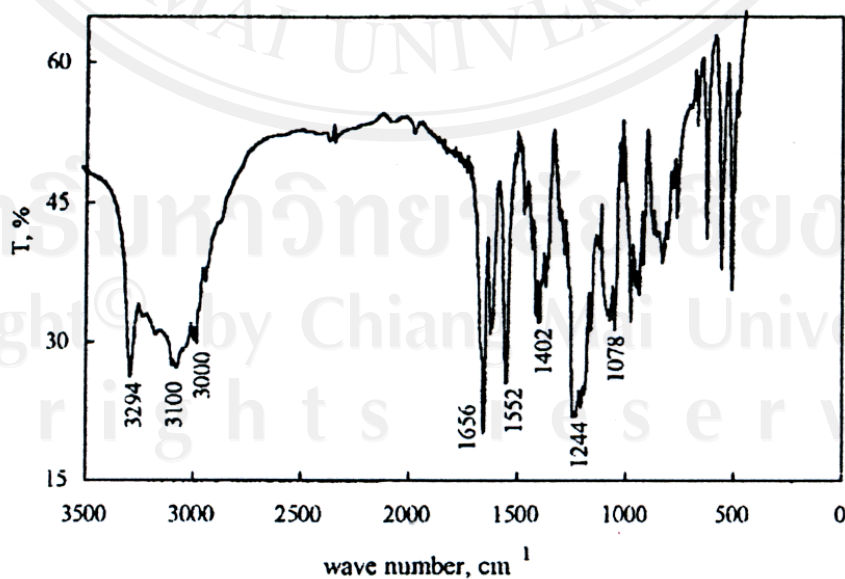
จากรายงานการศึกษาอัตราการผ่านของไอน้ำจากผิวหนังปกติและแผลไหม้ที่ระดับต่างๆ โดยใช้เทคนิคอีแวพอริมิเตอร์ (evaporimeter technique) ของ Nilsson (1977) แสดงดังตาราง 3.12 พบว่าแผลไหม้ดีกรีที่ 2 และ 3 มีการผ่านของไอน้ำในระดับที่สูงจึงเป็นการเสี่ยงของผู้ป่วยที่จะเกิดภาวะขาดน้ำซึ่งจะนำมาสู่การเสียชีวิต เมื่อนำค่าอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มาทำการเปรียบเทียบพบว่ามีค่าอัตราการผ่านของไอน้ำที่ต่ำกว่าแผลไหม้ดีกรีที่ 2 และ 3 ดังนั้นเมื่อนำแผ่นไฮโดรเจลข้างต้นไปปิดแผลไหม้ดังกล่าวคาดว่าจะช่วยลดการสูญเสียน้ำออกจากบริเวณบาดแผลได้ในระดับหนึ่ง

3.4 อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy)

อินฟราเรดสเปกตรัมของมอนอเมอร์ AMPS- H^+ ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (EGDM และ NMBA) CMC และ CMCTS รวมถึงตัวอย่างของไฮโดรเจลหลังจากผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแสดงได้ดังรูป 3.29-3.41



รูป 3.29 อินฟราเรดสเปกตรัมของมอนอเมอร์ AMPS- H^+



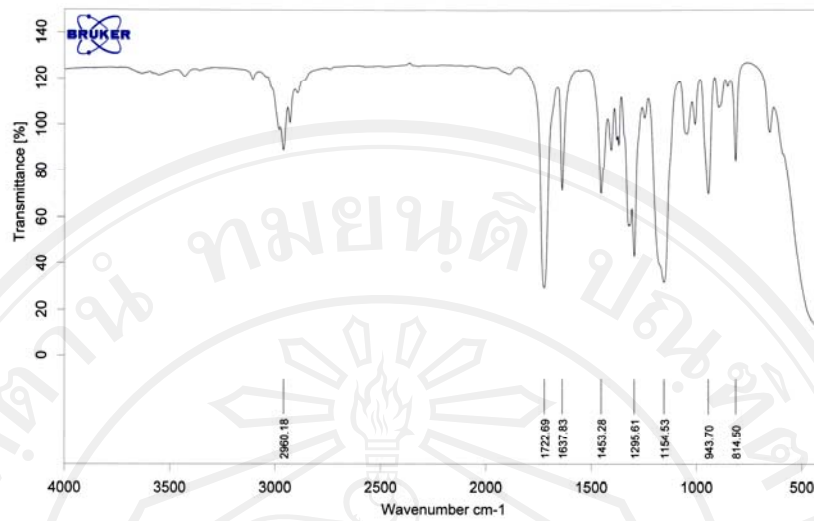
รูป 3.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของมอนอเมอร์ AMPS- H^+ [Rosa (2003)]

ตาราง 3.14 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัมของมอนอเมอร์ AMPS-H⁺

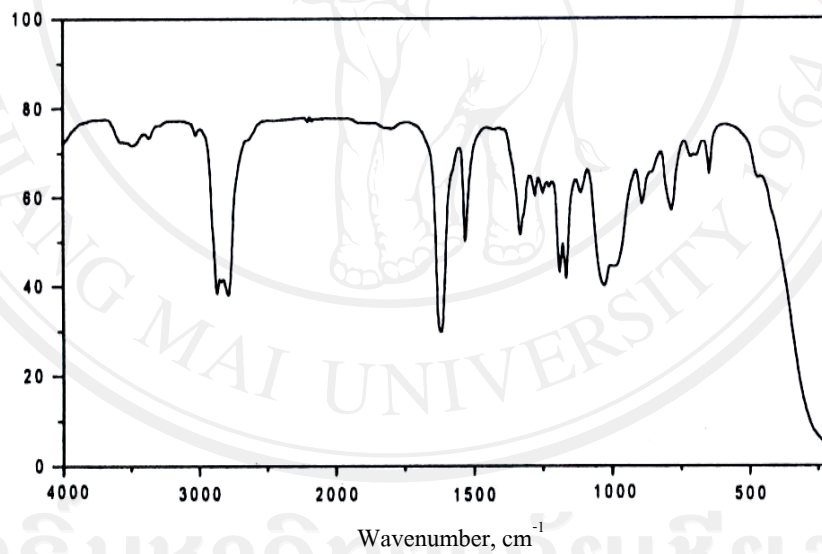
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm ⁻¹)	ความเข้มและลักษณะ ของสเปกตรัม
S=O stretching	-SO ₃	1373	s
		1245	
C=C bending	CH ₂ =CH	980	s
C=O stretching	-CONH-	1668	s
N-H stretching	-NH-	~3300	m
		3238	
N-H bending	-NH-	1613	s
C-H stretching	-CH ₂ -, -CH ₃	~3000-2800	s-m
C-H bending	-CH ₂ -, -CH ₃	~1450-1375	s, v
S-O stretching	-SO ₃	650	s
C-N stretching	-C-N-	1127	s
O-H stretching	-O-H	~3400-2800	b

*ความหมายของสัญลักษณ์ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม

s = strong, m = medium, w = weak, v = variable, b = broad และ sh = sharp



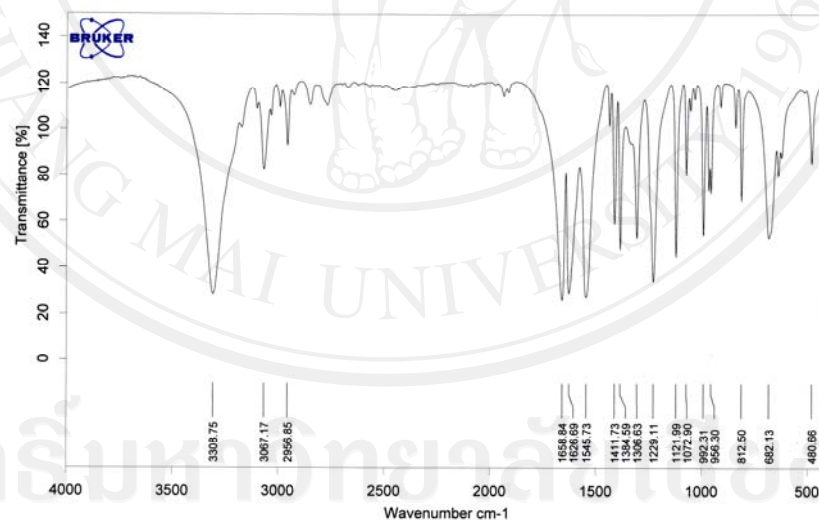
รูป 3.31 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต



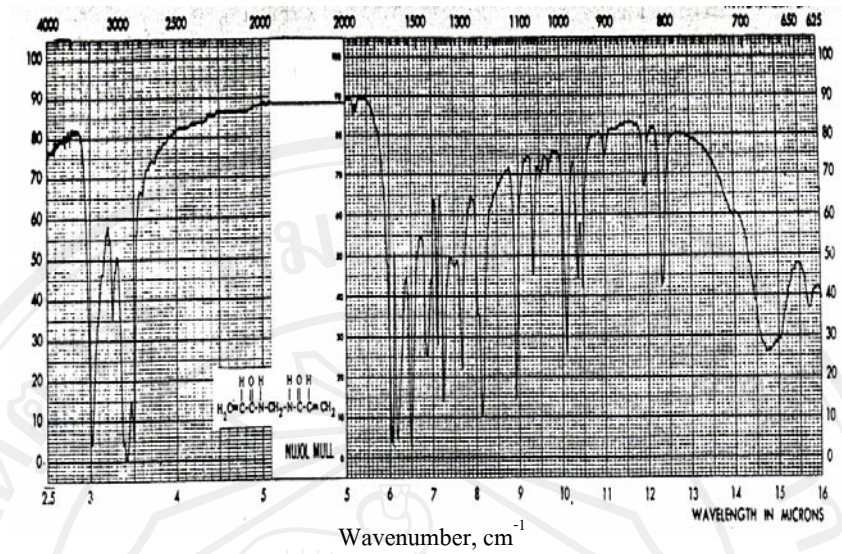
รูป 3.32 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [Jelisavac (2000)]

ตาราง 3.15 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัมของเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะ ของสเปกตรัม
C=O stretching	=CH-CO-O-R	1722	s
C=C bending	$\text{CH}_2=\text{CH}$	943	s
C-O stretching	-CO-O	1295	s
C-O bending	$-\text{CH}_2-\text{O}$	1154	s
C-H stretching	$-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$	3000-2800	m-s
C-H bending	$-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$	1450-1375	s, v



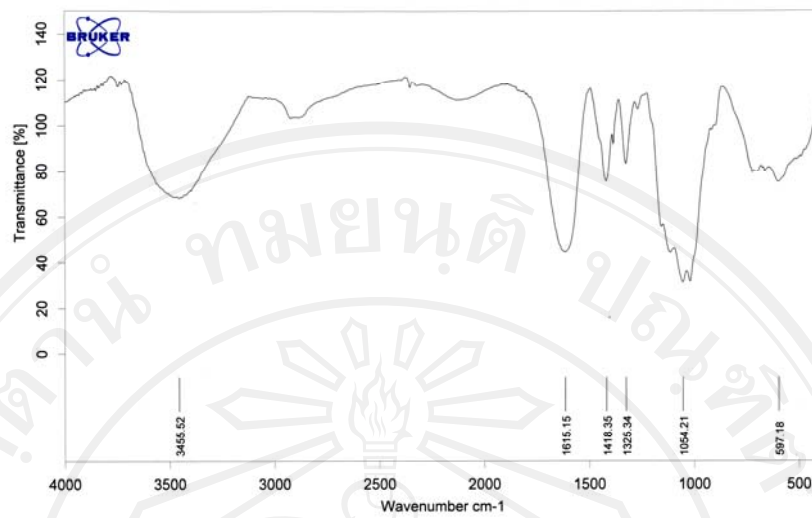
รูป 3.33 อินฟราเรดสเปกตรัมของ เอ็น,เอ็น'-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์



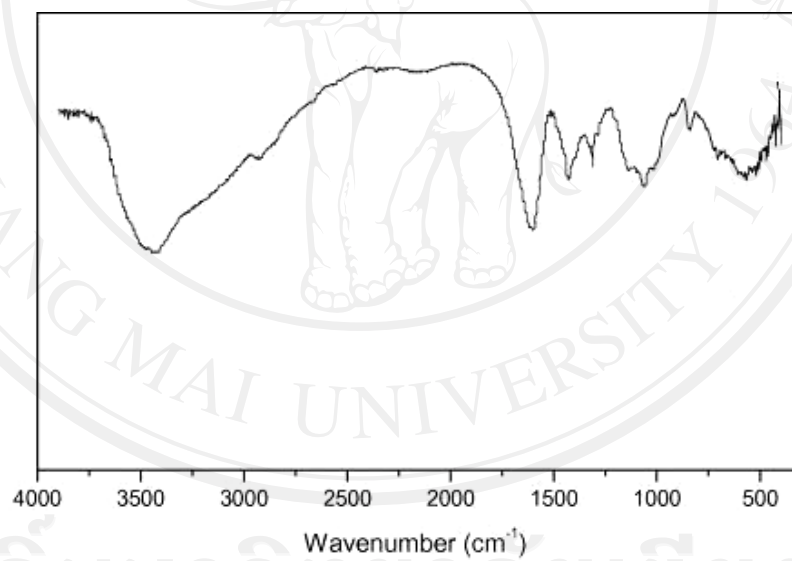
รูป 3.34 อินฟราเรดสเปกตรัมของ เอ็น,เอ็น'-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ [Hummel (1984)]

ตาราง 3.16 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัมของเอ็น,เอ็น'-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm ⁻¹)	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
N-H stretching	-CONH-	3308	b, s
C=C bending	CH ₂ =CH	992	s
C=O stretching	-CONH-	1658	s
C-H stretching	-CH ₂ -	3570-3450	m-s
C-H bending	-CH ₂ -	1450-1375	s, v
C-N stretching	-C-N-	1112	s
N-H stretching	-NH-	~3300	m



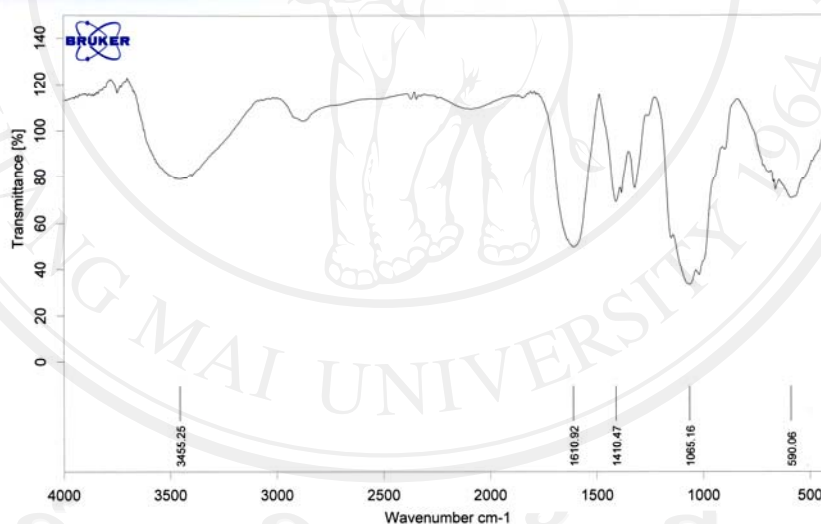
รูป 3.35 อินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์บอนไดออกไซด์



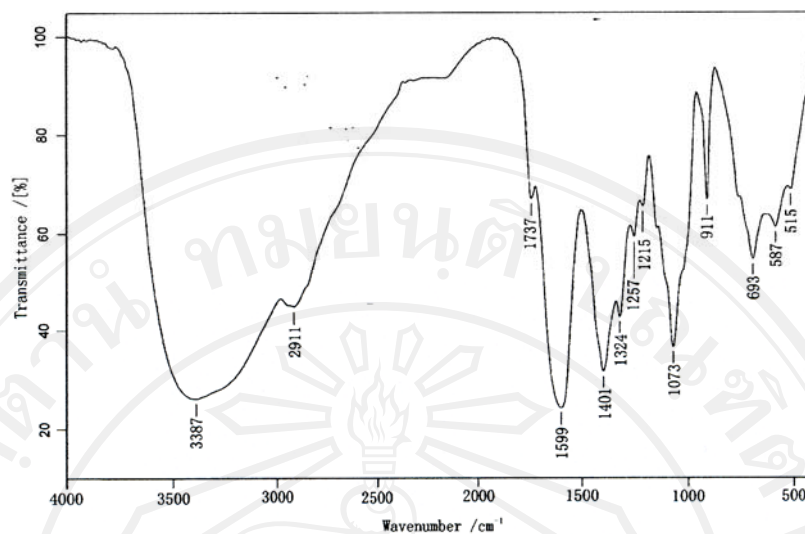
รูป 3.36 อินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ [Yu (2009)]

ตาราง 3.17 การแปลผลอินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะ ของสเปกตรัม
O-H stretching	-OH	3455	b
O-H bending	-OH	1325	w
C-O stretching	C-O-C	1300-1000	s
C=O stretching	-COO	1615	s
C-H stretching	$-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$	3570-3450	m-s
C-H bending	$-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$	1450-1375	s, v



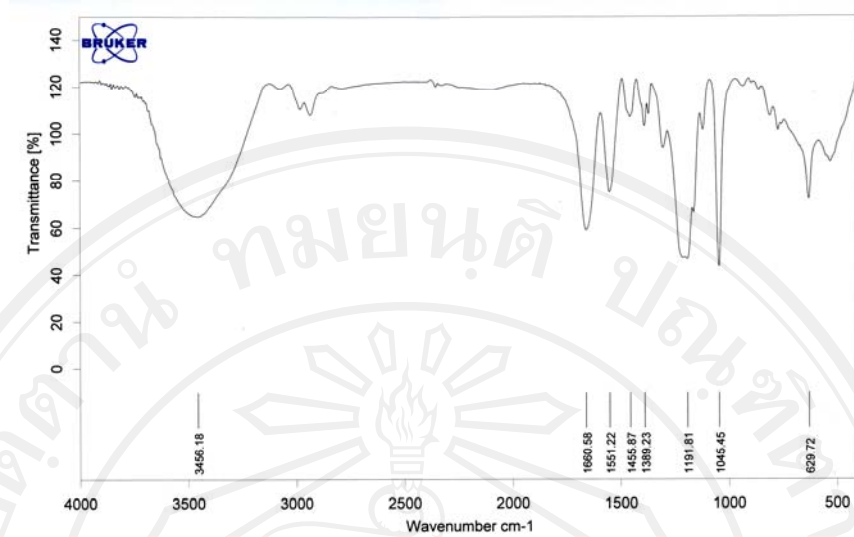
รูป 3.37 อินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน



รูป 3.38 อินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์บอนิลเมทิลไคโดซาน [Ge (2005)]

ตาราง 3.18 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์บอนิลเมทิลไคโดซาน

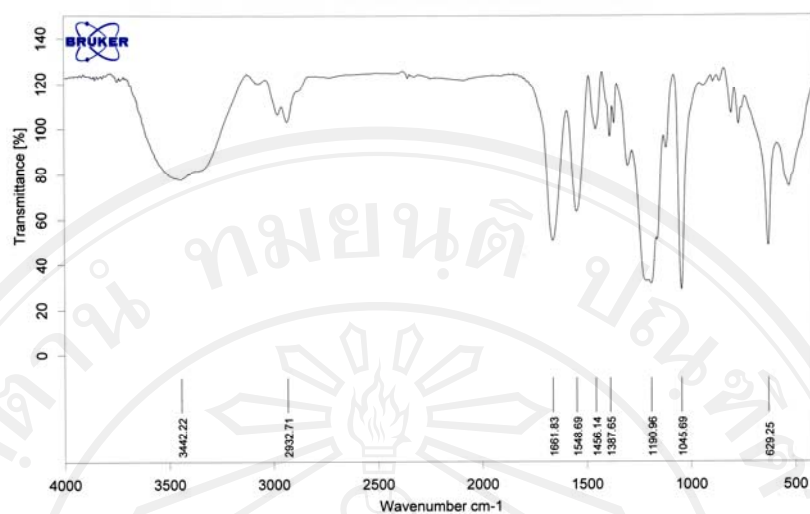
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะ ของสเปกตรัม
N-H stretching	$-\text{NH}_2$	3500	b, w
		3300	
N-H bending	$-\text{NH}_2$	~ 1596	m-s
C=O stretching	$-\text{CONH}-$	1610	s
C=O stretching	$-\text{COO}$	~ 1650	s
C-O stretching	C-O-C	1170-1114	w
O-H stretching	$-\text{OH}$	3455	b
C-H stretching	$-\text{CH}_2$	3570-3450	m-s
C-H bending	$-\text{CH}_2$	1450-1375	s, v
C-N stretching	$-\text{C-NH}_2$	1065	s



รูป 3.39 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจล poly(AMPS-Na⁺)

ตาราง 3.19 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจล poly(AMPS-Na⁺)

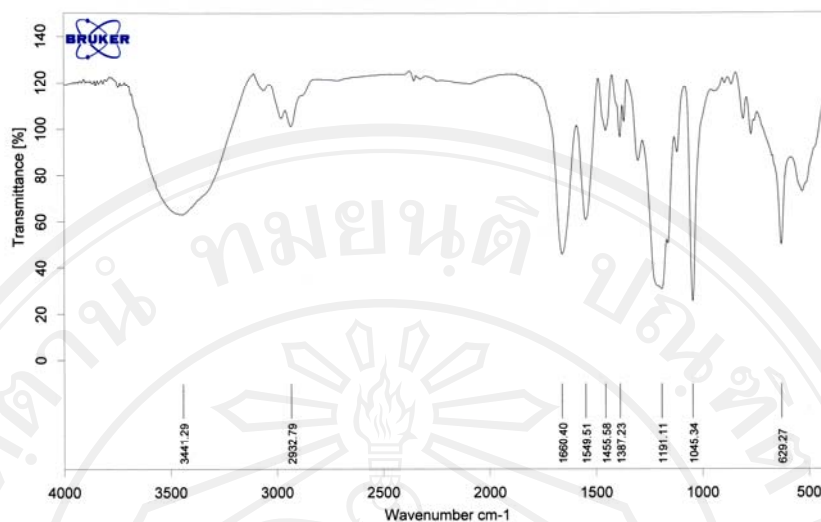
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm ⁻¹)	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
S=O stretching	-SO ₃	~1300	s
		1191	
C=O stretching	-CONH-	1660	s
N-H stretching	-NH-	3456	m
N-H bending	-NH-	1551	m, s
C-H stretching	-CH ₂ -, -CH ₃	~3000-2800	s-m
C-H bending	-CH ₂ -, -CH ₃	~1450-1375	s, v
S-O stretching	-SO ₃	629	s
C-N stretching	-C-N-	1045	s



รูป 3.40 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจลชนิดเบลนระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC

ตาราง 3.20 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจลชนิดเบลนระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
S=O stretching	- SO_3	~ 1300	s
		1190	
C=O stretching	-CONH-	1661	s
N-H stretching	-NH-	~ 3500	m
		~ 3100	
N-H bending	-NH-	1548	m
C-H stretching	- CH_2 -, - CH_3	~ 3000 -2800	s-m
S-O stretching	- SO_3	629	s
C-N stretching	-C-N-	1045	m
O-H stretching	-O-H	3442	b
C=O stretching	-COO	1661	s
C-O stretching	C-O-C	~ 1170 -1114	s



รูป 3.41 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจลชนิดเบลนระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMCTS

ตาราง 3.21 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจลชนิดเบลนระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMCTS

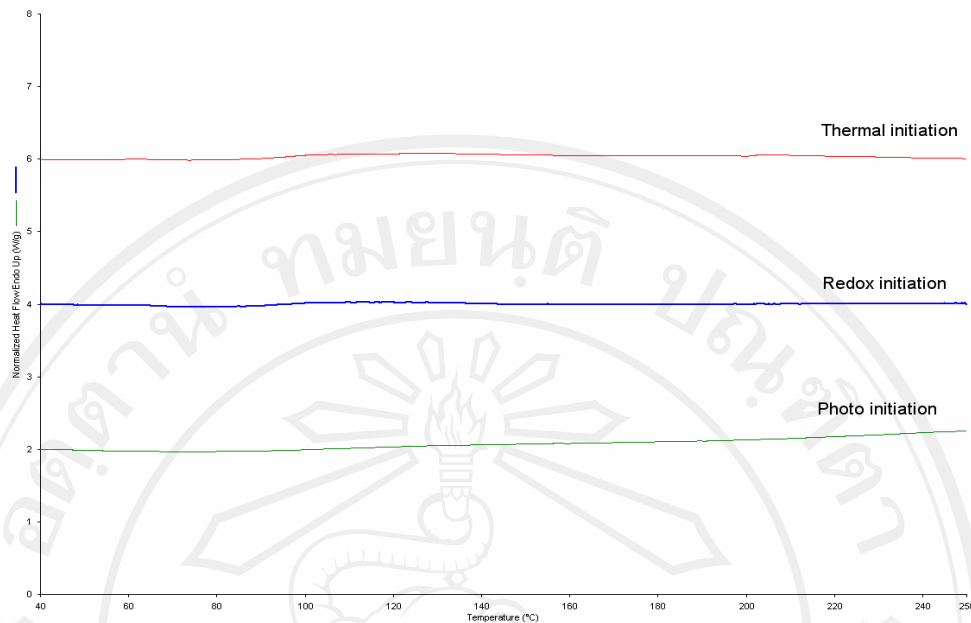
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
S=O stretching	- SO_3	~1300	s
		1191	
C=O stretching	-CONH-	1660	s
N-H stretching	-NH-	~3500	m
		~3100	
N-H bending	-NH-	1549	m
S-O stretching	- SO_3	629	s
C-N stretching	-C-N-	1045	m
O-H stretching	-O-H	3441	b
C=O stretching	-COO	1660	s
C-O stretching	C-O-C	1045	s

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของมอนอเมอร์ AMPS- H^+ และ poly(AMPS- Na^+) รวมไปถึงไฮโดรเจลเบลนด์ทั้งสองชนิด แสดงได้ดังรูป 3.29-3.41 ในการทดสอบนี้วัตถุประสงค์หลักเพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์และตัวเชื่อมต่อสายโซ่ผ่านทางพันธะคู่ของคาร์บอน ($C=C$) ของโมเลกุลทั้งสองซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและเชื่อมต่อกันจนมีโครงสร้างแบบโครงร่างตาข่าย โดยตำแหน่งของพีค $C=C$ ที่สังเกตได้อย่างชัดเจนบริเวณ $1000-950\text{ cm}^{-1}$ ในรูป 3.39-3.41 ได้ลดลงและหายไปเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของมอนอเมอร์ AMPS- H^+ รูป 3.29 เมื่อเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นอินฟราเรดสเปกตรานี้จึงเป็นหลักฐานที่ใช้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเบื้องต้นได้เป็นอย่างดีและเป็นวิธีที่สะดวก สามารถเตรียมตัวอย่างรวมถึงการวิเคราะห์ได้ค่อนข้างง่าย แต่สิ่งที่ต้องระมัดระวังคือต้องเตรียมตัวอย่างด้วยความรวดเร็ว เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างค่อนข้างมีลักษณะเป็นไฮโดรฟิลิกซึ่งสามารถดูดความชื้นได้ดี ผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องและให้ผลการทดลองที่คล้ายกันกับงานวิจัยที่มีมาก่อน [Rosa (2003)]

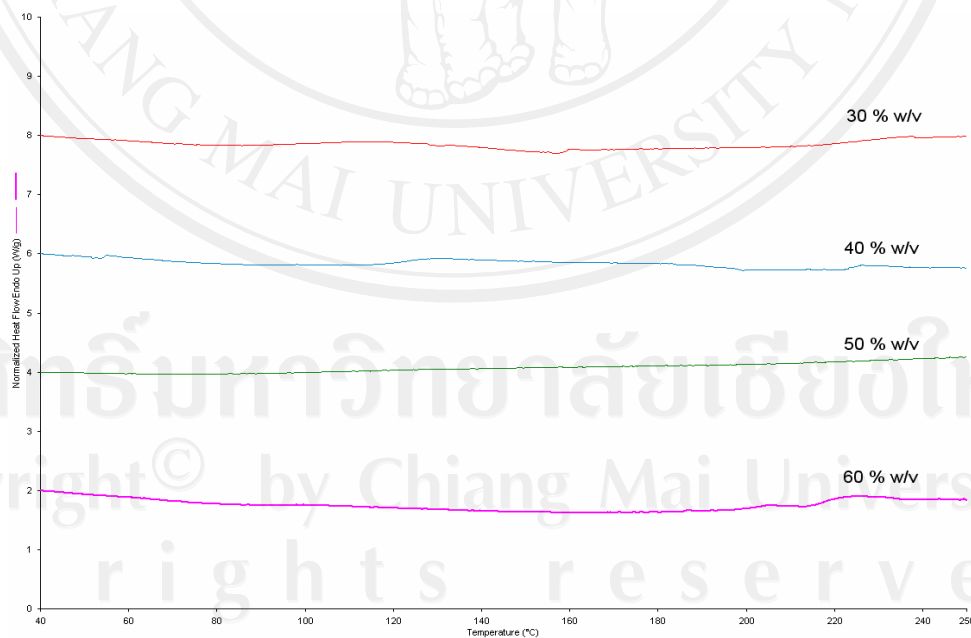
3.5 การวิเคราะห์ทางความร้อน

3.5.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริเมตรี

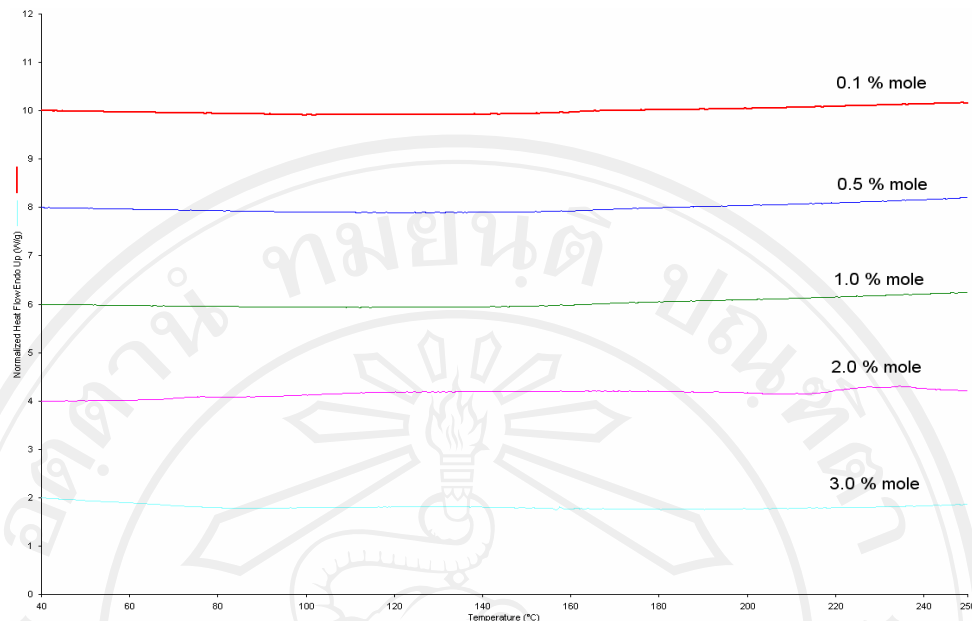
ลักษณะ DSC เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) จากการเปรียบเทียบในระบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน (ข) ความเข้มข้นมอนอเมอร์แตกต่างกัน (ค) ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน (ง) ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน รวมถึง (จ) ไฮโดรเจลตัวอย่างชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS แสดงได้ดังรูป 3.42-3.47



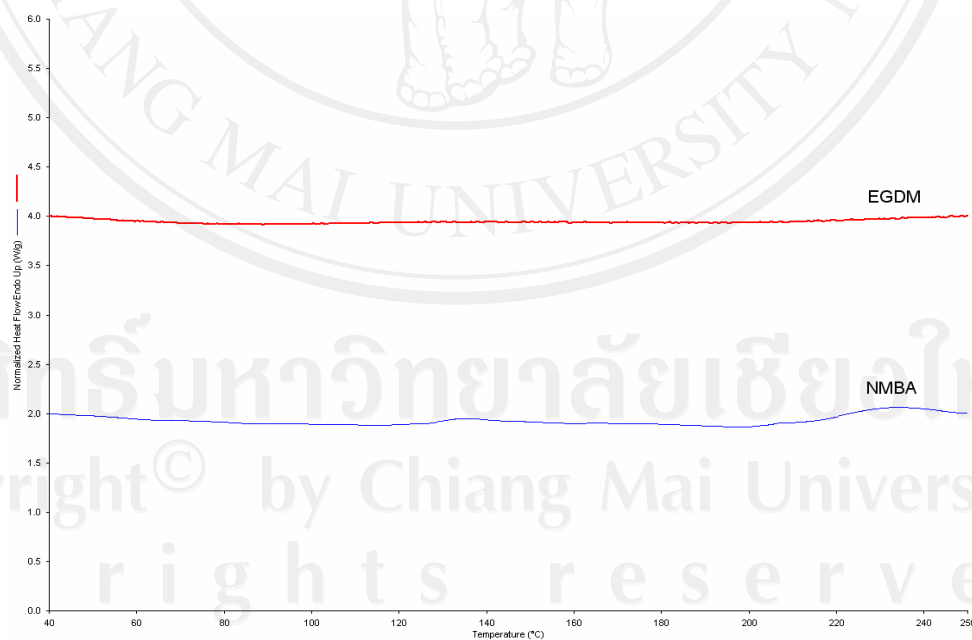
รูป 3.42 DSC เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน ได้แก่ ความร้อน รีดอกซ์ และแสงอัลตราไวโอเลต



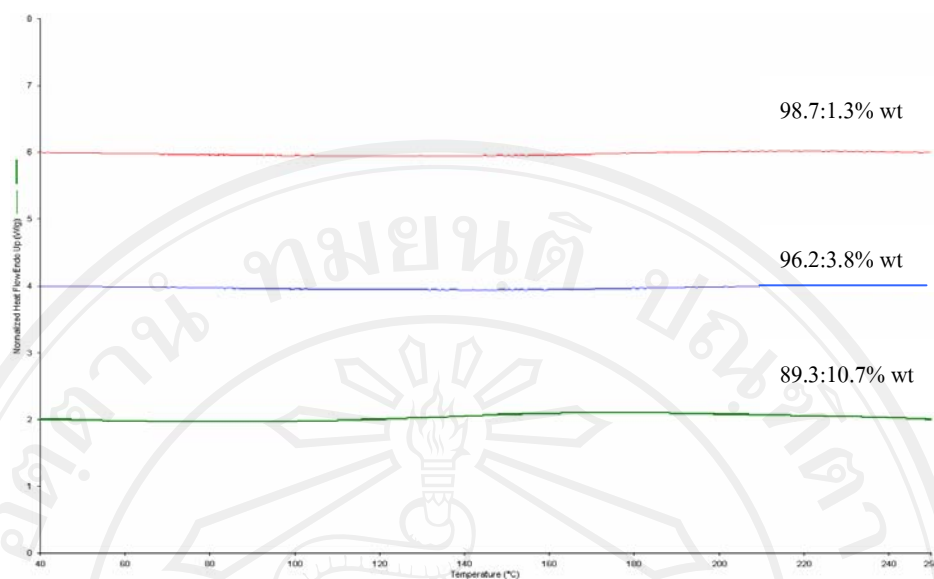
รูป 3.43 DSC เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) ที่ใช้ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 30-60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต



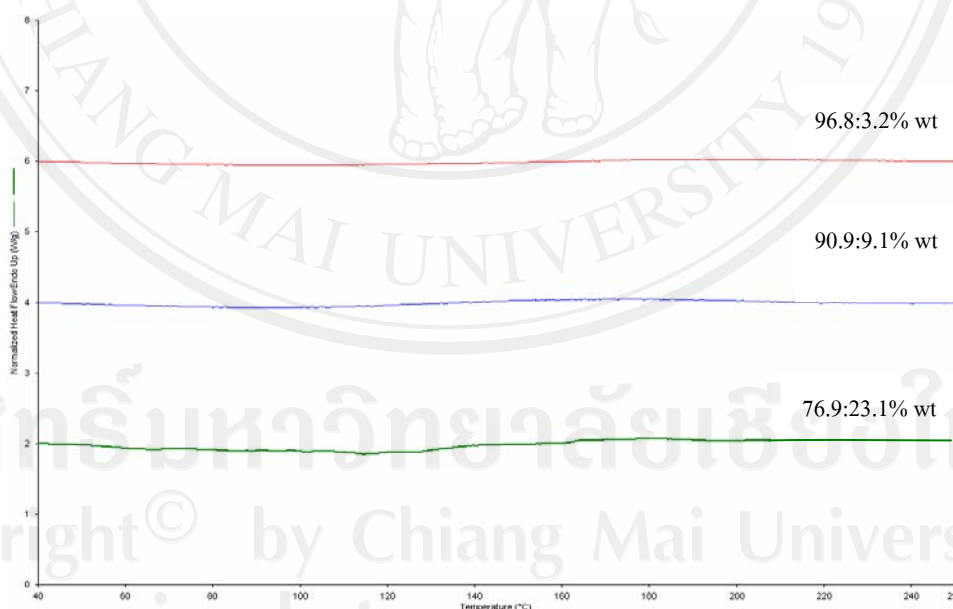
รูป 3.44 DSC เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) 50% w/v ที่ใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM แตกต่างกันในช่วง 0.1-3.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต



รูป 3.45 DSC เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) 50% w/v ที่ใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM และ NMBA 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต



รูป 3.46 DSC เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS-Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน 98.7:1.3, 96.2:3.8 และ 89.3:10.7% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริเริ่มพอลิเมอร์เซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

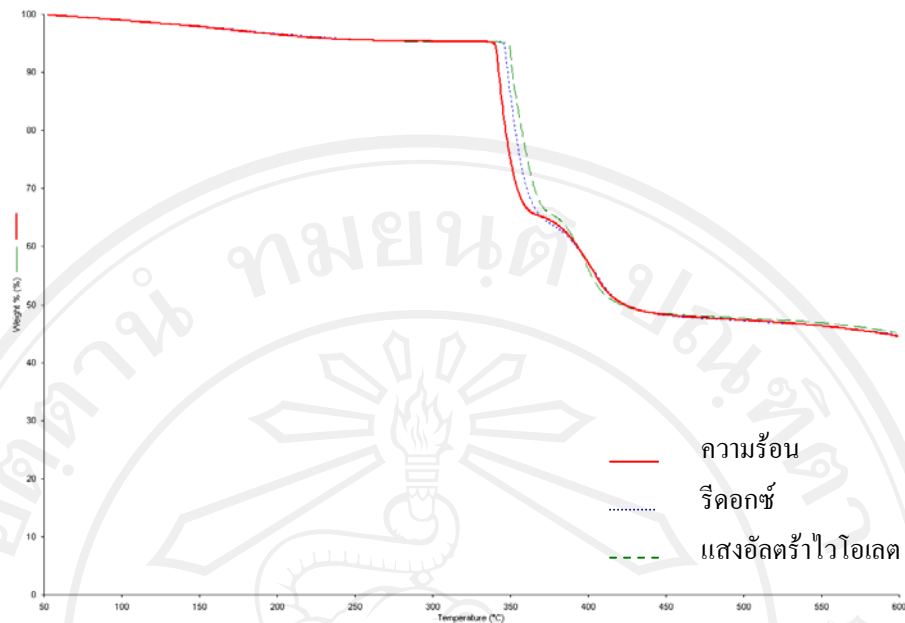


รูป 3.47 DSC เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS-Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน 96.8:3.2, 90.9:9.1 และ 76.9:23.1% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบปริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

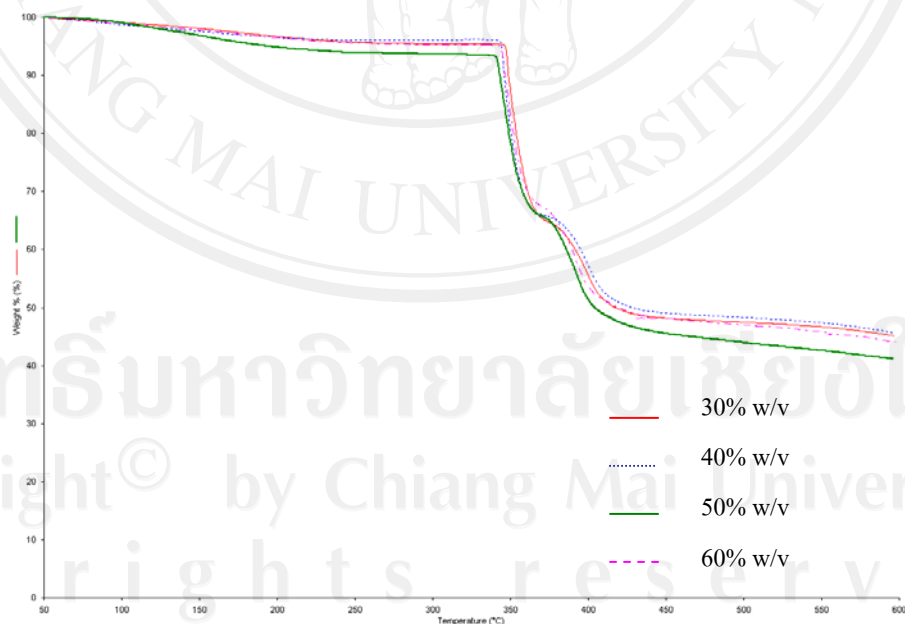
วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบทางความร้อนโดยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตริกเพื่อประเมินถึงความสำเร็จของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าหากการพอลิเมอไรเซชันยังคงมีมอนอเมอร์หลงเหลืออยู่ (residual monomers) ภายในโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ก็สามารถเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ในภายหลัง เนื่องจากการทดสอบได้มีการให้อุณหภูมิอย่างต่อเนื่องและคงที่กับไฮโดรเจลตัวอย่างตั้งแต่ 40-250°C ด้วยอัตรา 10°C/นาที่ ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นหากภายในไฮโดรเจลตัวอย่างยังคงมีมอนอเมอร์หลงเหลืออยู่ก็สามารถทำให้มีพลังงานมากพอที่จะเกิดการเคลื่อนที่และเข้าไปเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ในภายหลัง ระหว่าง C=C ของมอนอเมอร์กับบริเวณที่ยังคงมีความว่องไว (active center) หรือยังคงมีฟรีแรดิคัลอยู่ซึ่งควรจะมีการแสดงลักษณะพีคของการคายความร้อนออกมา จากผลการทดลองในทุกๆ ระบบแสดงในรูป 3.42-3.47 จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า DSC เทอร์โมแกรมมีสัญญาณค่อนข้างเรียบและไม่แสดงลักษณะของพีคการคายความร้อนออกมา ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ในเบื้องต้นว่าระบบของการพอลิเมอไรเซชันในทุกๆ ระบบของไฮโดรเจลตัวอย่างค่อนข้างที่จะเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ค่อนข้างสมบูรณ์หรือหากจะมีการเหลือมอนอเมอร์อยู่ภายในก็คงจะมีอยู่ในระดับที่ต่ำมากๆ จนไม่สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงโดยสมบัติทางความร้อนได้ ซึ่งข้อดีของการประยุกต์ใช้เทคนิค DSC ในแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสำหรับการตรวจสอบนี้ค่อนข้างทำได้อย่างง่าย สะดวก ใช้เวลาไม่นาน และเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ ซึ่งมักเป็นเทคนิคที่แพร่หลายทางอุตสาหกรรมทั่วไป

3.5.2 เทอร์โมกราวิเมตรี

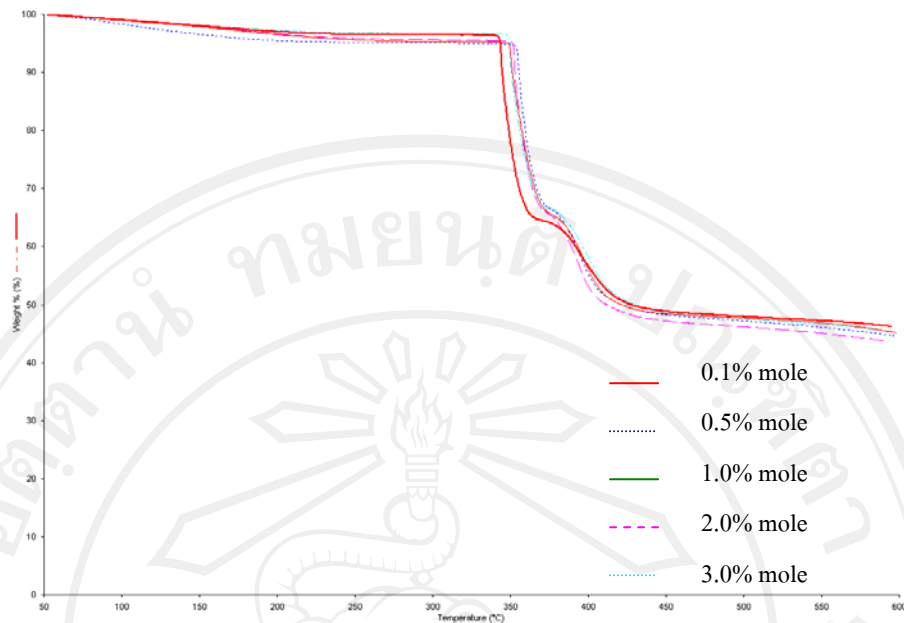
ลักษณะเทอร์โมกราวิเมตรีของไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) จากการเปรียบเทียบในระบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแตกต่างกัน (ข) ความเข้มข้นมอนอเมอร์แตกต่างกัน (ค) ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน (ง) ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่แตกต่างกัน และ (จ) ไฮโดรเจลตัวอย่างชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS รวมถึง (ฉ) CMC และ CMCTS แสดงดังรูป 3.48-3.54



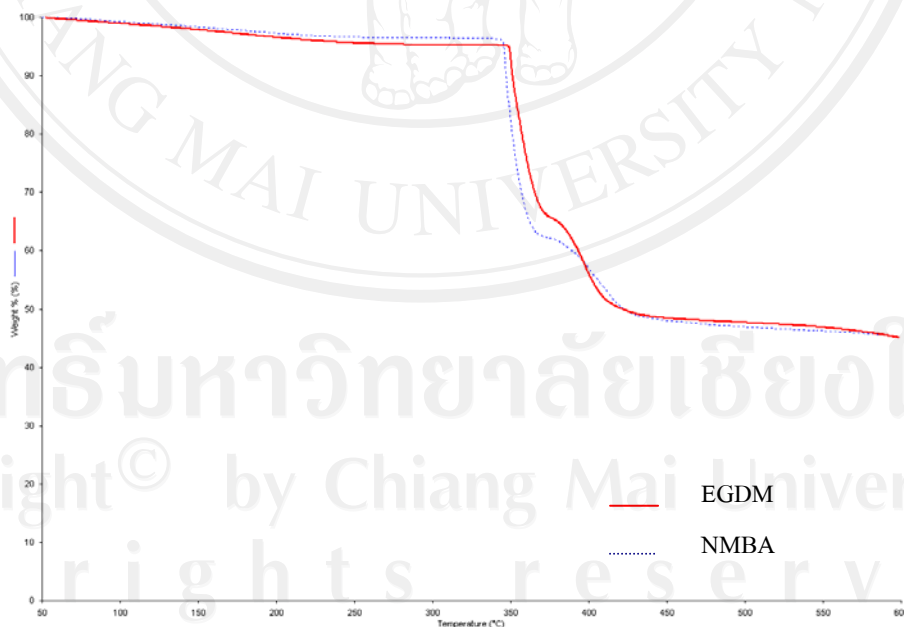
รูป 3.48 เทอร์โมกราวิเมตรีเทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบวิธีปฏิบัติปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันแตกต่างกัน ได้แก่ ความร้อน ไรต์ด็อกซ์ และแสงอัลตราไวโอเลต



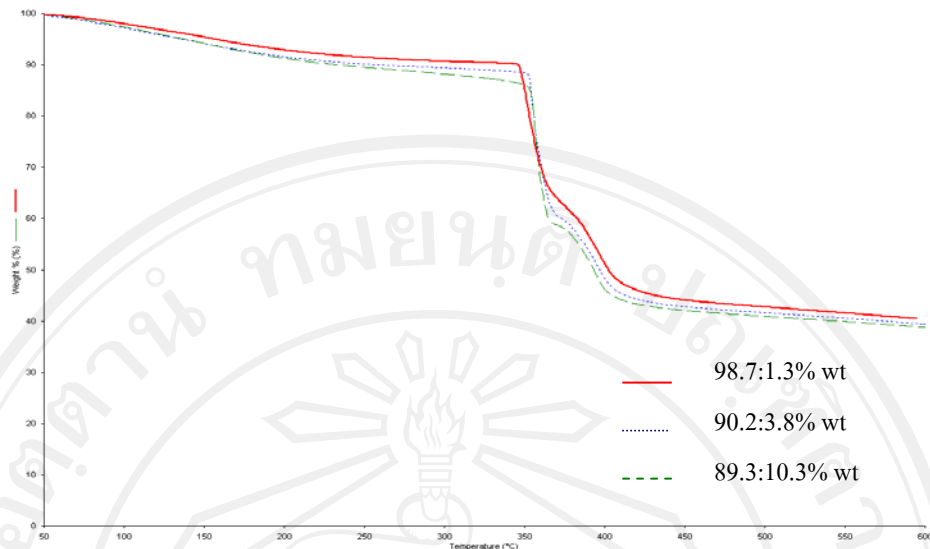
รูป 3.49 เทอร์โมกราวิเมตรีเทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) ที่ใช้ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 30-60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบวิธีปฏิบัติปฏิกิริยาพอลิเมอร์แบบแสงอัลตราไวโอเลต



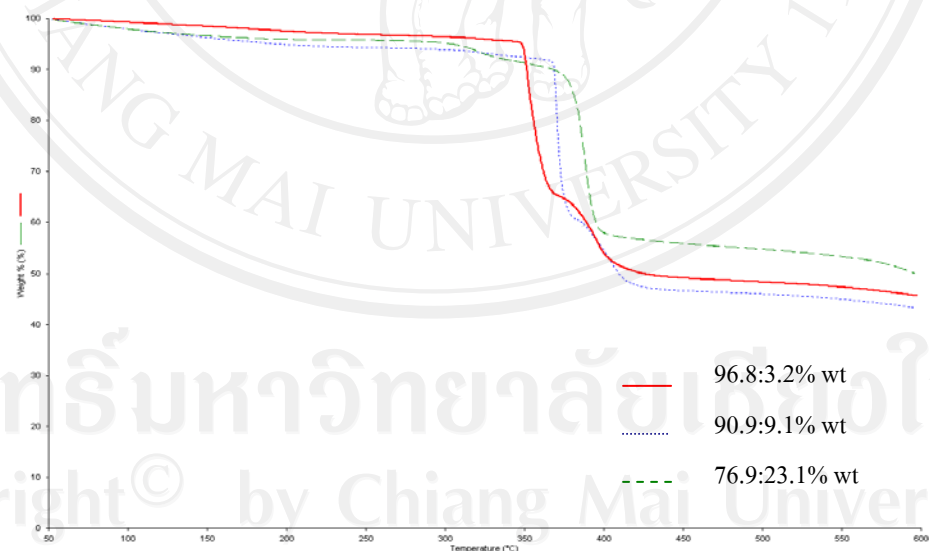
รูป 3.50 เทอร์โมกราวิเมตรีเทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v โดยใช้ ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM แตกต่างกันในช่วง 0.1-3.0% mole ที่ใช้ริเริ่มปฏิกิริยา พอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต



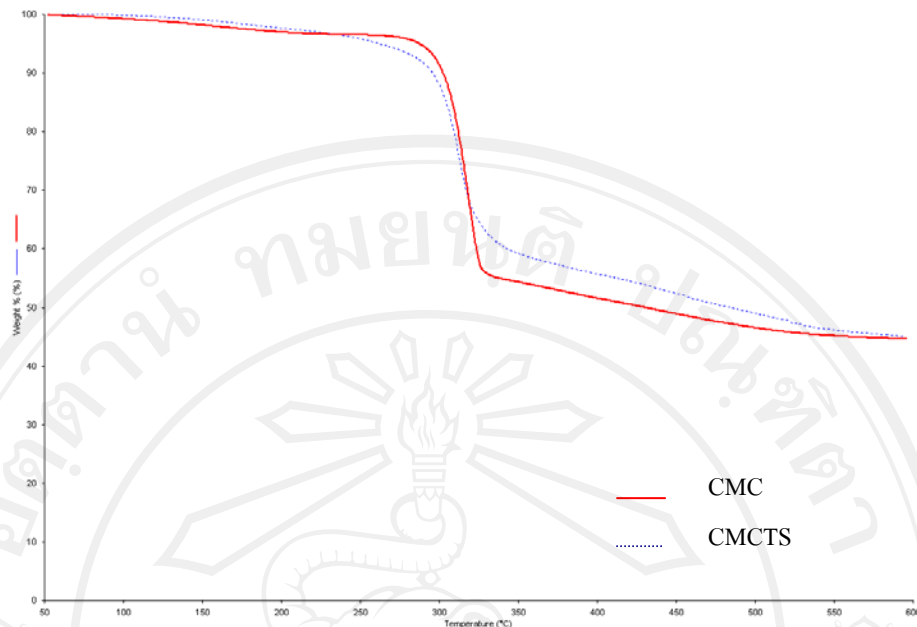
รูป 3.51 เทอร์โมกราวิเมตรีเทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) โดยใช้ชนิดตัว เชื่อมต่อสายโซ่ EGDM และ NMBA 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต



รูป 3.52 เทอร์โมกราวิเมตรีเทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS-Na⁺ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) ที่อัตราส่วน 98.7:1.3, 90.2:3.8 และ 89.3:10.3% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต



รูป 3.53 เทอร์โมกราวิเมตรีเทอร์โมแกรมของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ที่ระหว่าง AMPS-Na⁺ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) ที่อัตราส่วน 96.8:3.2, 90.9:9.1 และ 76.9:23.1% wt โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต

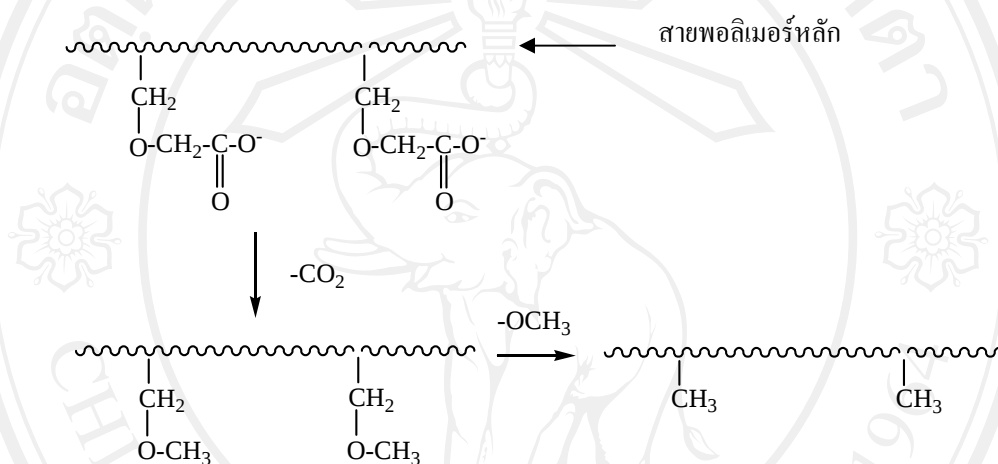


รูป 3.54 เทอร์โมกราวิเมตรีเทอร์โมแกรมเปรียบเทียบระหว่าง CMC และ CMCTS

จากการทดสอบการสลายตัวด้วยความร้อนของไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) ที่สังเคราะห์จากระบบปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่แตกต่างกัน การใช้ความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวเชื่อมตอสายโซ่ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงการใช้ชนิดตัวเชื่อมตอสายโซ่ที่แตกต่างกัน แสดงในรูป 3.48-3.54 ตามลำดับ พบว่าพอลิเมอร์จะเริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 350°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อน [Aggour (1994)] อย่างไรก็ตามจากเทคนิคนี้ก็สามารถแสดงถึงความแตกต่างของโครงสร้างไฮโดรเจลซึ่งจะเห็นได้ในกรณีการใช้ความเข้มข้นตัวเชื่อมตอสายโซ่เช่นการใช้ความเข้มข้นที่น้อยที่สุดคือ 0.1% mole เป็นไปได้ว่าจะส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นน้อยที่สุด หรือกล่าวได้ว่าโครงร่างตาข่ายจะอยู่กันอย่างหลวมๆ ทำให้สายโซ่ต่างๆ สามารถเกิดอันตรกิริยากันได้น้อยเนื่องจากอยู่ห่างกัน ดังนั้นจึงไม่เสถียรทางความร้อนเท่ากับกรณีที่ใช้ความเข้มข้นมากกว่า ซึ่งจะเห็นได้จากการลดลงของน้ำหนักที่มีมากกว่า ณ เวลาเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของตัวเชื่อมตอสายโซ่เพิ่มขึ้นจาก 0.5-3.0% mole ก็ไม่ได้ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากนักและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อาจกล่าวได้ว่าไฮโดรเจลสังเคราะห์นี้มีการสลายประมาณร้อยละ 50 ในช่วงอุณหภูมิ 50-600 $^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิประมาณ 350°C จะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วและมากที่สุด

จากลักษณะของเทอร์โมแกรมเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) และ CMC/CMCTS พบว่าไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าโดย

พิจารณาจากอุณหภูมิที่สูงกว่าเมื่อมีการเริ่มมีการสูญเสียน้ำหนัก นอกจากนั้นลักษณะโดยทั่วไปของเทอร์โมแกรมพบว่าในกรณีของ poly(AMPS- Na^+) มีการลดลงของน้ำหนักใน 3 ขั้นตอน คือในช่วงแรกที่ 50-250°C เป็นการสูญเสียของโมเลกุลน้ำในช่วงสองที่อุณหภูมิ 340-370°C และช่วงที่สามที่ 370-440°C แต่ก็ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าการเปลี่ยนแปลงใน 2 ขั้นตอนหลังนี้เกิดจากสาเหตุใด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่ามีการสูญเสียทั้ง $-\text{SO}_3^-$ ที่เป็น pendant group จากสายพอลิเมอร์หลัก และหมู่อื่นๆ ส่วนในกรณีของ CMC และ CMCTS เป็นการสูญเสีย น้ำ และ CO_2 ที่อุณหภูมิ 50-240°C และที่อุณหภูมิ 250-370°C เป็นการสูญเสีย $-\text{OCH}_3$ [Tripathy (2009)]

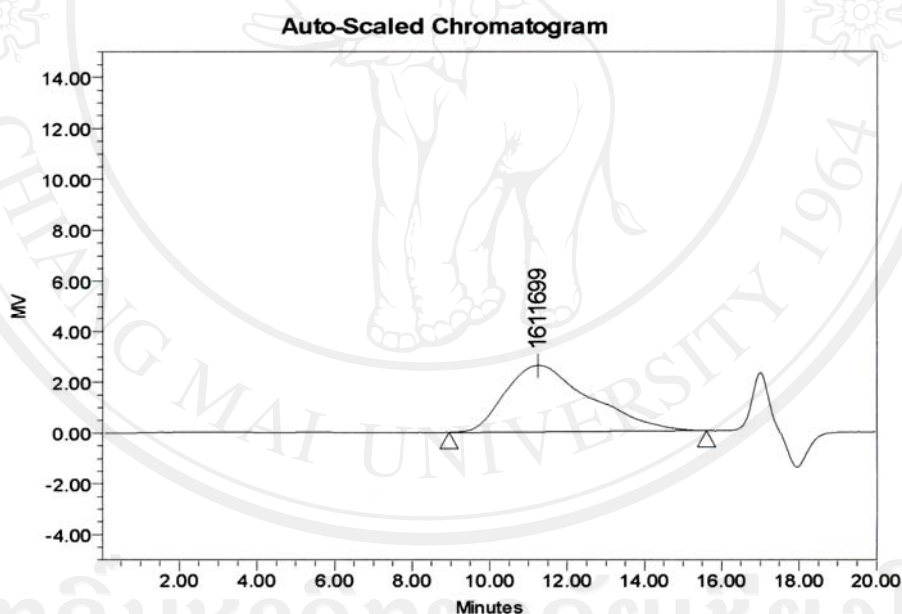


จากกราฟ 3.52 ซึ่งเป็นเทอร์โมแกรมกราฟิเมตรของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC พบว่าที่อัตราส่วน 89.3:10.3% wt มีการสลายตัวด้วยความร้อน (ในช่วง 50-350°C) มากกว่า 90.2:3.8% wt และ 98.7:1.3% wt ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนข้างต้นมีปริมาณของ CMC น้อยลงตามลำดับ และจากการทดสอบการสลายตัวด้วยความร้อนของ CMC ในรูป 3.54 พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 50-350°C CMC จะถูกสลายตัวได้ประมาณร้อยละ 50 ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการสลายตัวที่แตกต่างกันของอัตราส่วนต่างๆ ในไฮโดรเจลเบลนด์ข้างต้นเกิดมาจากการมีสัดส่วนหรือปริมาณของ CMC ที่แตกต่างกัน จึงเป็นการยืนยันอย่างหนึ่งได้ว่าการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ข้างต้นมีสัดส่วนที่สอดคล้องกับปริมาณของ CMC ที่ใส่เข้าไป กล่าวอีกนัยหนึ่งคือแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีองค์ประกอบของ CMC แทรกอยู่ในโครงสร้างจริง ส่วนการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 350-600°C พบว่าทุกอัตราส่วนจะสลายตัวอย่างรวดเร็วจนเหลือน้ำหนักประมาณร้อยละ 50 กรณีการสลายตัวด้วยความร้อนของไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMCTS พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายกับไฮโดรเจลชนิดเบลนด์ข้างต้น กล่าวคือการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 50-350°C ของอัตราส่วนที่มีสัดส่วนของ CMCTS ในพอลิเมอร์เบลนด์มากกว่าจะมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิ 350-600°C พบว่าสัดส่วน (76.9:23.1%

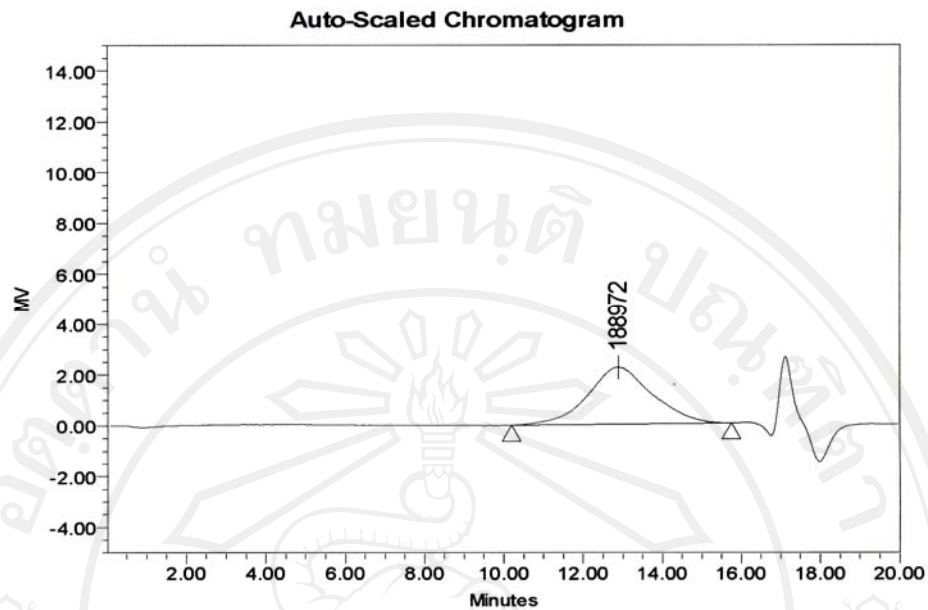
wt) ที่มีพอลิเมอร์เบลดมากที่สุดยังคงเหลือน้ำหนักมากที่สุดซึ่งตรงข้ามกับไฮโดรเจลเบลดชนิดข้างต้น อาจเนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าวมีสัดส่วนของ CMCTS มากกว่าอัตราส่วนอื่นเป็นอย่างมาก ซึ่งสายโซ่ของ CMCTS มีหมู่ $-OH$ และ $-NH_2$ ดังนั้นจึงทำให้โอกาสที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของ CMCTS ด้วยกันเองมีสูงมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้มีความเสถียรทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น [Zhou (2009)]

3.6 เจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี (Gel Permeation Chromatography, GPC)

ผลการทดลองหาน้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน จากเทคนิค GPC แสดงดังรูป 3.55 และ 3.56 ตามลำดับ และตาราง 3.21



รูป 3.55 โครมาโทแกรม GPC ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



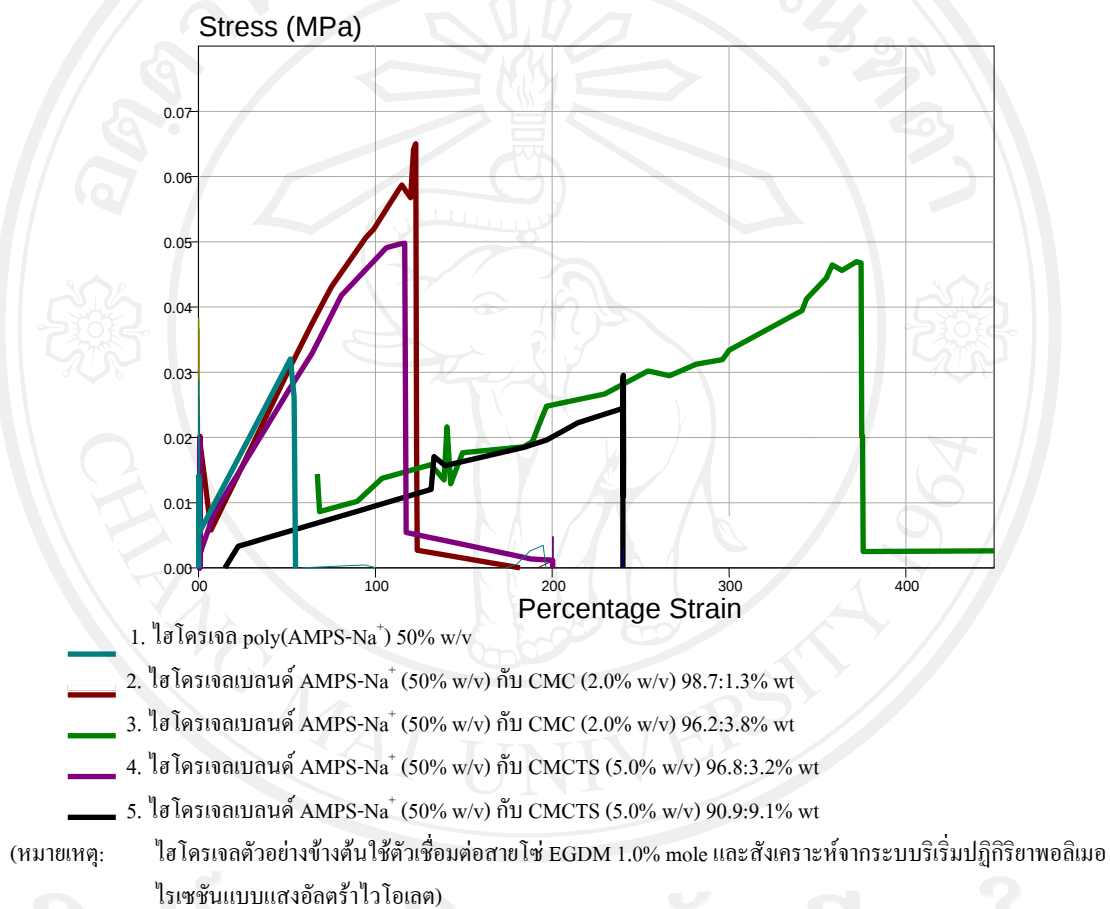
รูป 3.56 โครมาโทแกรม GPC ของคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน

ตาราง 3.22 น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน
วิเคราะห์โดยเทคนิค GPC

	$\overline{M}_n$	$\overline{M}_w$	polydispersity
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	273,711	1,889,428	6.90
คาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน	96,547	307,197	3.18

3.7 การศึกษาสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบความสามารถต่อแรงดึงชี้ให้เห็นได้กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟความเค้น และเปอร์เซ็นต์การยืด ของไฮโดรเจลตัวอย่าง ดังรูป 3.57 รวมถึงค่าความเค้น เปอร์เซ็นต์การยืด และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของไฮโดรเจลตัวอย่าง แสดงดังตาราง 3.23



รูป 3.57 เส้นกราฟความเค้น และเปอร์เซ็นต์การยืด ของไฮโดรเจลตัวอย่าง

ตาราง 3.23 ค่าความเค้น เปอร์เซ็นต์การยืด และค่ามอดูลัสของ Young's ของไฮโดรเจลสังเคราะห์

ตัวอย่าง	ค่าความเค้น (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	ค่ามอดูลัสของยัง (MPa)
1	0.032	55.6	7.2×10^{-4}
2	0.065	122.9	6.6×10^{-4}
3	0.047	372.2	1.2×10^{-4}
4	0.049	116.6	5.9×10^{-4}
5	0.029	240.0	1.0×10^{-4}

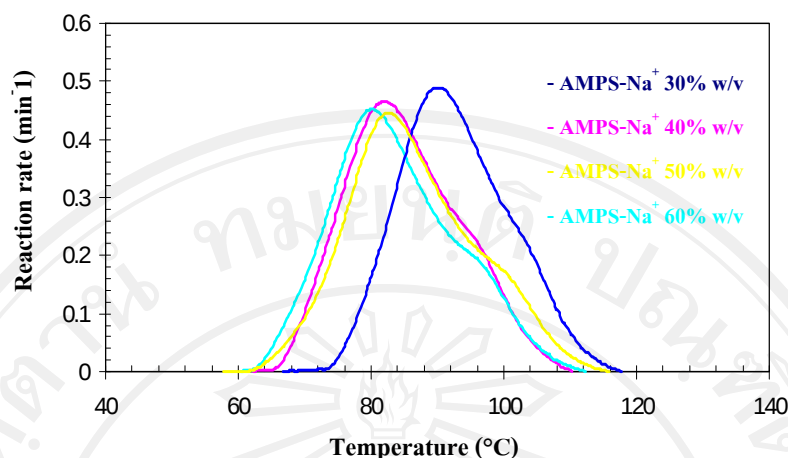
(* ค่าต่างๆ ที่แสดงมาจากตัวอย่างที่มีค่ามากที่สุดจากการทดสอบซ้ำ 20 ครั้ง)

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลแบบทนแรงดึงของไฮโดรเจลตัวอย่างข้างต้น พบว่าเส้นกราฟความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืดมีลักษณะที่ไม่เรียบ ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่เหมาะสมระหว่างตัววัดแรง (load cell) กับความทนแรงดึงของแผ่นไฮโดรเจล ซึ่งทนแรงดึงในระดับที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามอาจสรุปได้ว่าไฮโดรเจลเบลนด์ทั้งสองชนิดมีความยืดหยุ่นที่มากกว่าไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) กรณีไฮโดรเจลเบลนด์ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนที่มีปริมาณของพอลิเมอร์เบลนด์ (CMC หรือ CMCTS) มากกว่าสามารถดึงยืดได้มากกว่า ซึ่งดูได้จากเปอร์เซ็นต์การยืดที่มีค่ามากกว่า

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลข้างต้นแสดงถึงลักษณะสำคัญซึ่งเป็นข้อเสียประการหนึ่งของแผ่นไฮโดรเจลที่มีความสามารถทนแรงดึงได้น้อย ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยการใส่แผ่นตาข่ายเพื่อเป็นโครงยึดเข้าไปอยู่ภายในแผ่นไฮโดรเจล ซึ่งจะการแสดงรูปภาพแผ่นไฮโดรเจลที่ใส่ตาข่ายพลาสติกในหัวข้อ 3.10

3.8 การศึกษาจลนศาสตร์

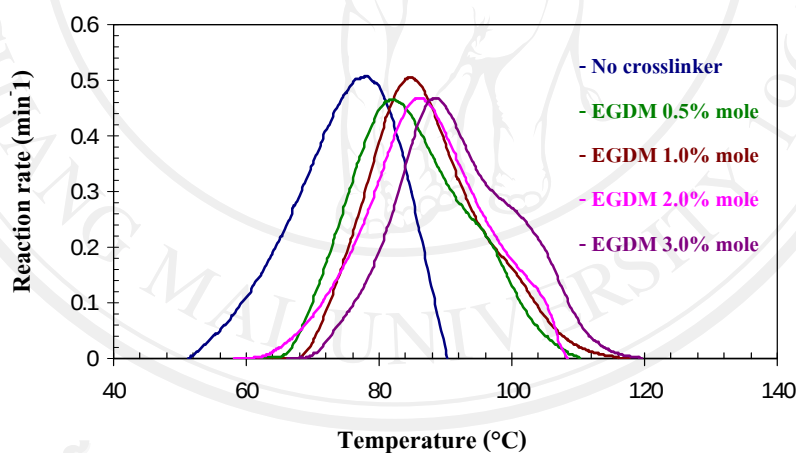
วัตถุประสงค์ของการทดลองจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบกันในระบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) ความเข้มข้นของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) ที่แตกต่างกันในช่วง 30-60% w/v (ข) ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่แตกต่างกันในช่วง 0.5-3.0% mole รวมถึง (ค) ได้ทำการศึกษาผลของชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ระหว่าง NMBA และ EGDM ซึ่งอาจมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.58-3.63 ตามลำดับ



รูป 3.58 เปรียบเทียบอัตราการพอลิเมอไรเซชันของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 30-60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมตอสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบความร้อน

จากรูป 3.58 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) เพิ่มขึ้น จะทำให้การพอลิเมอไรเซชันเกิดได้ง่ายมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้จากจุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาที่เริ่มต้นในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ลักษณะโดยทั่วไปที่เห็นได้จากทุกๆ เส้นกราฟที่แสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยามีลักษณะคล้ายกัน ได้ปรากฏพีคที่เด่นชัด 1 พีค และพีคเล็ก (shoulder peak) ที่ตำแหน่งของอุณหภูมิประมาณ 90-110°C จากลักษณะของเส้นกราฟดังกล่าว อาจสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (มากกว่า 60°C) จนทำให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเกิดการแตกตัวและให้เรดิคอล (radicals) ขึ้นภายในระบบ และจะเป็นตัวริเริ่มในการเข้าทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการฟรีเรดิคอลพอลิเมอไรเซชัน สมมุติฐานของการเกิดปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นระหว่างเรดิคอลที่มีความว่องไวสูงกับพันธะคู่ $\text{C}=\text{C}$ ของโมเลกุลของทั้งมอนอเมอร์ และตัวเชื่อมตอสายโซ่ซึ่งจะมีการคายความร้อนออกมาทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณความร้อน ณ เวลา และอุณหภูมิต่างๆ สามารถนำมาศึกษาทางจลนศาสตร์ได้ โดยสามารถติดตามในลักษณะของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงเป็นพอลิเมอร์ (conversion) ผลจากการทดลองสังเกตเห็นได้ว่าปฏิกิริยาเกิดได้เร็วมาก (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย AMPS- Na^+ และชนิดของตัวเชื่อมตอสายโซ่) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วที่สุดซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 75-90°C ซึ่งทำให้พอลิเมอร์มีการสร้างโครงสร้างโดยรวมเริ่มมีลักษณะเป็นแบบโครงร่างตาข่าย (crosslink network structure) ส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมในลักษณะที่เป็นแบบ diffusion control ซึ่งปฏิกิริยาดำเนินนี้อาจกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาในขั้นตอนของการแผ่

ขยาย (propagation) จะเกิดได้มากกว่าขั้นตอนการยับยั้ง (termination) เป็นอย่างมาก ในขณะเดียวกันจำนวนของมอนอเมอร์ก็ลดลงไปเรื่อยๆ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในตอนท้ายของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันลดลง ประกอบกับในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไปนั้นความหนืดก็เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลมอนอเมอร์หรือตัวเชื่อมต่อสายโซ่ทำได้ยากขึ้นและจะมีมอนอเมอร์บางส่วนที่ไม่สามารถจะเคลื่อนที่เข้าไปสู่ตำแหน่งของแรดิคอลที่มีความว่องไว (reactive site) เพื่อเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันได้ โดยมอนอเมอร์เหล่านี้บางส่วนจะยังคงติดค้างอยู่ในโครงสร้างตาข่ายซึ่งเรียกว่า “residual monomers” แต่อย่างไรก็ตามขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ($> 90^{\circ}\text{C}$) ก็ทำให้มอนอเมอร์เหล่านี้มีพลังงานมากเพียงพอต่อการที่จะเคลื่อนที่เพื่อเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเข้าไปในสายโซ่พอลิเมอร์ได้อีกครั้ง ประกอบกับการที่พอลิเมอร์ภายใต้อุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ทำให้พอลิเมอร์อยู่ในสถานะยาง (rubbery state) และทำให้โมเลกุลที่อยู่ในโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้น และนำมาสู่การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้ในช่วงท้ายของปฏิกิริยา

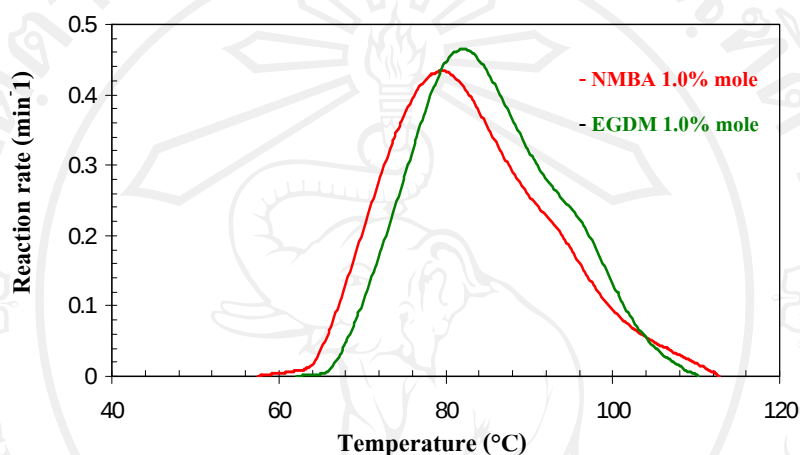


รูป 3.59 เปรียบเทียบอัตราการพอลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+ 40% w/v) โดยใช้ปริมาณตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM ที่แตกต่างกันในช่วง 0.5-3.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบความร้อน

รูป 3.59 เป็นการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการพอลิเมอร์ไรเซชันเมื่อระบบมีปริมาณของตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM ในช่วง 0.5-3.0% mole โดยการใช้สารละลาย AMPS- Na^+ คงที่ 40% w/v จากผลการทดลองแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าปริมาณของตัวเชื่อมต่อสายโซ่จะส่งผลต่อทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยา และพฤติกรรมของการพอลิเมอร์ไรเซชันของไฮโดรเจลอันเนื่องจากการมีความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายที่ต่างกัน ซึ่งผลการทดลองให้กราฟที่คล้ายกันกับ

ผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ดังรูป 3.58 ทัวไปแล้วอาจกล่าวได้ว่าเมื่อมีการใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้โครงร่างตาข่าย (crosslink network structure) ที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรเจลมีความหนาแน่น (crosslink density) มากขึ้นตามลำดับ

จากเส้นกราฟที่แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสังเกตได้ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเมื่อระบบไม่มีตัวเชื่อมต่อสายโซ่ และปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้าลง (สังเกตจากอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยา) เมื่อระบบมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายที่มากขึ้น



รูป 3.60 เปรียบเทียบอัตราการพอลิเมอไรเซชันของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+ 40% w/v) โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ NMBA และ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบความร้อน

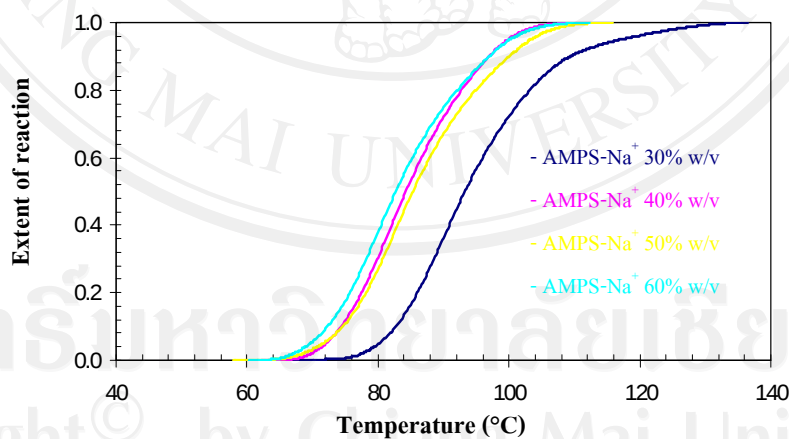
ผลของการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ชนิดตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 3.60 กล่าวคือ ในกรณีของ NMBA จะทำให้การพอลิเมอไรเซชันเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ง่ายและเร็วกว่า สามารถสังเกตได้จากตำแหน่งของเส้นกราฟที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดของระบบที่ใช้ NMBA จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ EGDM จากผลการทดลองนี้อาจกล่าวได้ว่าความว่องไวของ NMBA มากกว่า EGDM ซึ่งอาจเนื่องจากขนาดโมเลกุลของ NMBA ที่เล็กกว่าจึงทำให้โมเลกุลเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ดีกว่า (เคลื่อนที่ภายในระบบได้ดีกว่า) แต่สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญที่แสดงให้เห็นจากการทดลองนี้คือ แม้ว่าจะมีการใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเพียง 1.0% mole ก็มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม ซึ่งน่าจะส่งผลโดยรวมต่อรูปแบบหรือลักษณะการสร้างโครงร่างตาข่าย (uniformity of crosslink distribution) ในเมทริกซ์ของไฮโดรเจล นอกจากนั้นอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อมีการใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่มีความว่องไวแตกต่างกันอาจส่งผลต่อการกระจายตัวโมเลกุลของตัวเชื่อมต่อสายโซ่ดังกล่าว ซึ่งแน่นอนว่ามีผลโดยตรง

ต่อการสร้างโครงร่างตาข่ายในลักษณะที่แตกต่างกันซึ่งไม่เพียงแต่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่ยังส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของเหลวด้วย

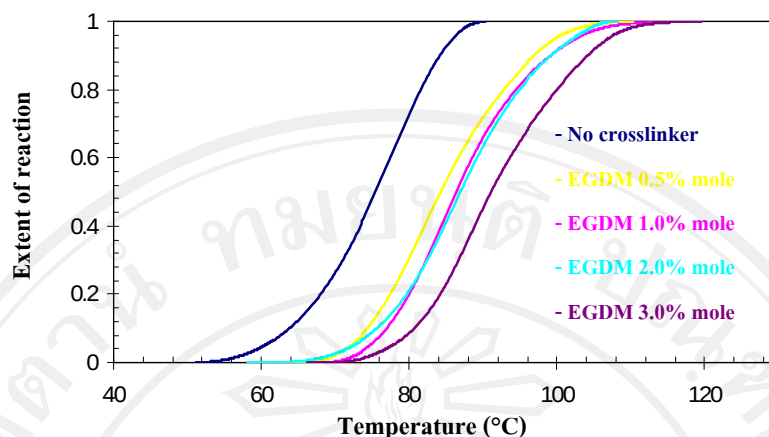
จากการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสังเคราะห์ไฮโดรเจลในระบบที่ต่างกันในรูปแบบ 3.58-3.60 ไปแล้วนั้น อาจสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในอีกรูปแบบที่เป็นการเปรียบเทียบถึงความสมบูรณ์ของการดำเนินไปของปฏิกิริยา (extent of reaction) คือการดำเนินไปของปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ในระบบ โดยทำการประเมินได้จากปริมาณของพันธะคู่ C=C ที่ลดลงไปหรือถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างที่เกิดการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาแสดงได้ดังสมการ (3.1) [Van Krevlan (1972)] และผลการทดลองแสดงในรูป 3.61-3.63 ตามลำดับ

$$\alpha = \frac{1}{\Delta H_{total}} \int_0^t \frac{d\Delta H_t}{dt} dt \quad (3.1)$$

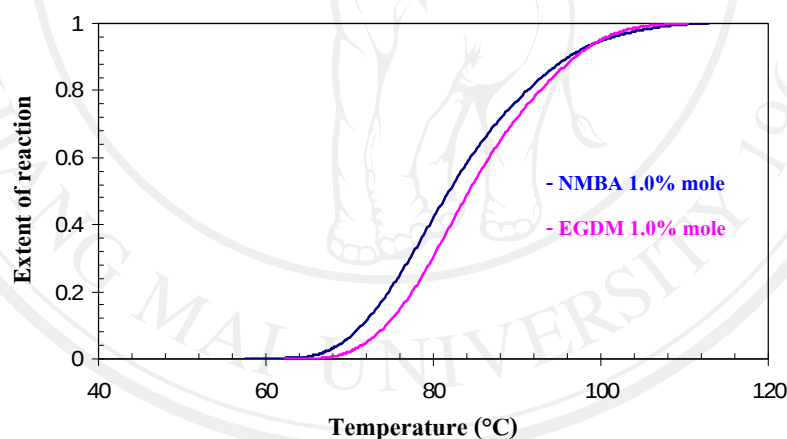
โดยที่ α คือ extent of reaction หรือ conversion; ΔH_{total} คือ heat of reaction ของปฏิกิริยาทั้งหมด และ ΔH_t คือ heat of reaction ของปฏิกิริยา ณ เวลาใดๆ



รูป 3.61 เปรียบเทียบการดำเนินไปของปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS-Na⁺) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 30-60% w/v โดยใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบความร้อน



รูป 3.62 เปรียบเทียบการดำเนินไปของปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+ 40% w/v) โดยใช้ปริมาณตัวเชื่อมตอสายโซ่ EGDM แตกต่างกันในช่วง 0.5-3.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบความร้อน



รูป 3.63 เปรียบเทียบการดำเนินไปของปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+ 40% w/v) โดยใช้ตัวเชื่อมตอสายโซ่ NMBA และ EGDM 1.0% mole ที่ใช้ระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบความร้อน

จากรูป 3.61 แสดงผลการทดลองได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) สูงขึ้นจาก 30% w/v เป็น 40-60% w/v จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้นหรือเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า และมี conversion ที่สูงกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบ ณ อุณหภูมิเดียวกัน สำหรับรูป 3.62 แสดงอย่างชัดเจนว่าการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ เมื่อระบบไม่มีตัวเชื่อมตอสายโซ่สามารถเกิดได้ง่ายและเร็วกว่า ซึ่งเป็นการแสดงว่าปฏิกิริยาระหว่าง

พันธะ C=C ในโมเลกุลของมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) เกิดได้เร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพันธะ C=C ในมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) กับตัวเชื่อมตอสายโซ่ (NMBA หรือ EGDM) สำหรับรูป 3.63 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายมอนอเมอร์ (AMPS- Na^+) ที่มีตัวเชื่อมตอสายโซ่ชนิด NMBA สามารถเกิดได้ง่ายกว่าระบบที่มีตัวเชื่อมตอสายโซ่ชนิด EGDM ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการพอลิเมอไรเซชันวาระหว่างพันธะ C=C ในโมเลกุลของมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ กับตัวเชื่อมตอสายโซ่ NMBA เกิดได้เร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยากับ EGDM

3.9 การศึกษาความเป็นพิษของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์

3.9.1 การปลดเชื้อด้วยรังสีแกมมาและลักษณะบรรจุภัณฑ์

หลังจากที่แผ่นไฮโดรเจลถูกสังเคราะห์ขึ้นมาแล้วก่อนจะนำไปทดสอบความเป็นพิษจะถูกนำไปทำการปลดเชื้อด้วยรังสีแกมมาและการบรรจุภัณฑ์ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท 3M ลักษณะบรรจุภัณฑ์จะเป็นซองอะลูมิเนียมขนาด 7 x 12 cm ปิดสนิทแสดงดังรูป 3.64



รูป 3.64 การบรรจุภัณฑ์ไฮโดรเจลตัวอย่างด้วยแผ่นอะลูมิเนียมหลังจากทำการปลดเชื้อด้วยรังสีแกมมา

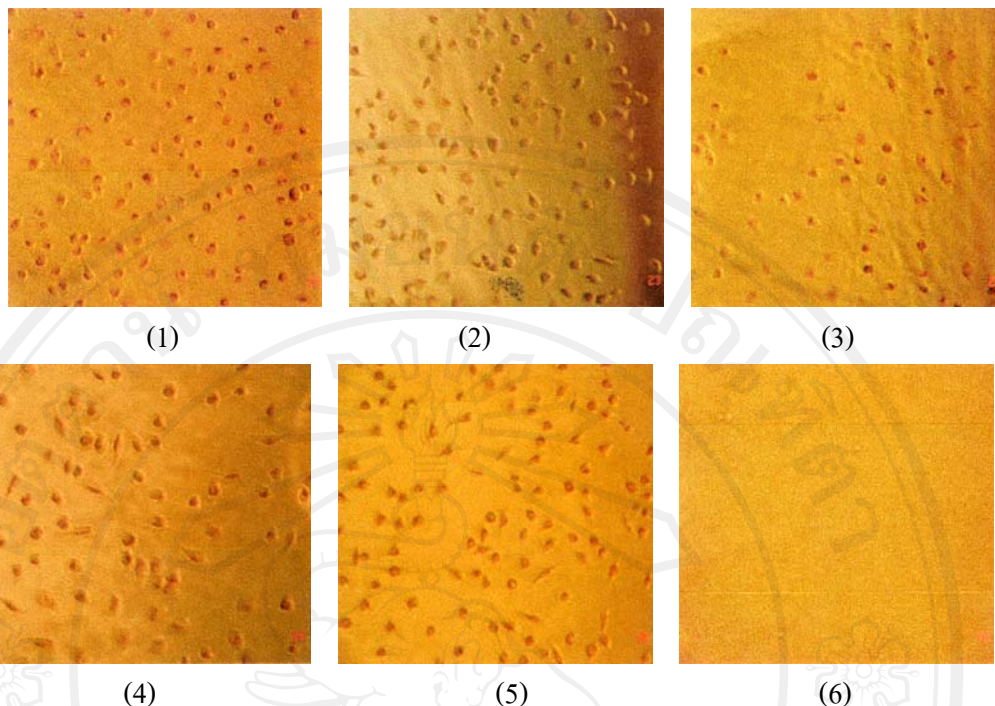
3.9.2 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ L929 ด้วยวิธีสัมผัสโดยตรง (Ditect contact)

วัตถุประสงค์ของการทดลองความเป็นพิษนี้เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อประเมินถึงผลของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ซึ่งอาจได้รับการปฏิเสธจากเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหากนำไปทดสอบกับสิ่งมีชีวิตจริงๆ โดยจากผลการทดสอบพบว่าลักษณะไฮโดรเจลตัวอย่างหลังจากการเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าทุกตัวอย่างมีลักษณะใส และเมื่อทำการข้อมสีเซลล์ที่สัมผัสโดยตรงกับไฮโดรเจลตัวอย่างลำดับที่

- 1) ไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v
 - 2) ไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) 50% w/v ที่มีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C หลังจากพอลิเมอร์เซชันในขั้นแรกแล้ว
 - 3) ไฮโดรเจลเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMC (2.0% w/v) 96.2:3.8% wt
 - 4) ไฮโดรเจลเบลนด์ AMPS- Na^+ (50% w/v) กับ CMCTS (5.0% w/v) 90.9:9.1% wt
- (หมายเหตุ: ไฮโดรเจลตัวอย่างข้างต้นใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ EGDM 1.0% mole และสังเคราะห์จากระบบริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันแบบแสงอัลตราไวโอเลต)

จากการทดลองพบว่าเซลล์ติดสีส้มแดงของ neutral red และมีรูปร่างคล้ายกระสวยและแผ่ตัวได้ เห็นนิวเคลียสชัดเจนเช่นเดียวกับเซลล์ที่สัมผัสโดยตรงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งไม่มีความเป็นพิษ (negative control) แสดงดังรูปที่ 3.65

ดังนั้นจากผลการทดสอบวัสดุตัวอย่างไฮโดรเจลสังเคราะห์สำหรับใช้ในทางการแพทย์เพื่อเป็นวัสดุปิดแผลด้วยวิธีสัมผัสโดยตรงพบว่าทุกไฮโดรเจลตัวอย่างข้างต้นไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ L929 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ที่สัมผัสโดยตรงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (negative control) และเซลล์ที่สัมผัสโดยตรงกับยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็ค (carbon black) ซึ่งมีความเป็นพิษ (positive control)



รูป 3.65 แสดงลักษณะรูปร่างและการติดสี neutral red ของเซลล์ L929 หลังจากสัมผัสกับไฮโดรเจลตัวอย่างลำดับที่ 1-4 และ (5) ตัวควบคุมพอลิเอทธีลีนความหนาแน่นสูง (negative control) และ (6) ขางธรรมชาติ (positive control) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่กำลังขยายเดิม 300 เท่า

จากผลการทดสอบความเป็นพิษของแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่างต่อเซลล์ L929 โดยวิธีสัมผัสโดยตรง กล่าวได้ว่าแผ่นไฮโดรเจล poly(AMPS- Na^+) และไฮโดรเจลแบบเบนด์ทั้งสองชนิดที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ ผสมกับ CMC หรือ CMCTS ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัลโดยใช้ระบบริเริ่มแบบแสงอัลตราไวโอเลต พบว่าไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ L929 การทดลองหรือทดสอบนี้เป็นเพียงการประเมินในเบื้องต้นเท่านั้นว่าไฮโดรเจลสังเคราะห์ไม่ก่ออันตรายต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตแต่ไม่ได้หมายถึงไฮโดรเจลสังเคราะห์จะมีความสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) กับร่างกายของสิ่งมีชีวิต ซึ่งความเข้ากันได้ทางชีวภาพยังคงมีปัจจัยที่ยังคงต้องศึกษาและทำการวิจัยต่อไปเพื่อให้มีความมั่นใจและแน่ใจต่อการนำไปใช้กับสิ่งมีชีวิตจริงๆ และไม่เกิดผลเสียหรืออันตรายต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตด้วย

3.10 การใส่ตาข่ายพลาสติกเพื่อเป็นโครงยึดและแผ่นปิด (Backing sheet)

การใส่ตาข่ายพลาสติกเพื่อเป็นโครงยึดให้กับแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) และแผ่นไฮโดรเจลเบลนด์ทั้งสองชนิดระหว่าง AMPS- Na^+ กับ CMC หรือ CMCTS เนื่องจากไฮโดรเจลสังเคราะห์มีข้อด้อยคือฉีกขาดง่ายซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของไฮโดรเจลชนิดนี้ ดังนั้นจึงมีการออกแบบใหม่โดยการใช้แผ่นตาข่ายพลาสติกเพื่อเป็นโครงยึดที่แตกต่างกัน 2 แบบได้แก่ ชนิดที่ถักขึ้นด้วยความห่างและถักี่ รวมถึงการใส่แผ่นพลาสติกชนิดบางบริเวณด้านที่ไม่สัมผัสกับบาดแผล (backing sheet) เพื่อป้องกันเชื้อโรคจากภายนอกเข้าสู่บาดแผลแต่ยอมให้ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านได้ ซึ่งมี 2 ชนิดได้แก่ใยฝ้าย (non-woven) และแผ่นฟิล์มพอลิยูรีเทน แสดงตามรูป 3.66-3.68



(ก)



(ข)

รูป 3.66 การใส่ตาข่ายพลาสติกในไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+) ชนิดตาข่าย (ก) ห่าง และ (ข) ถักี่



(ก)



(ข)

รูป 3.67 การใส่ตาข่ายพลาสติกชนิดห่างในไฮโดรเจลตัวอย่างเบลนด์ทั้งสองชนิดระหว่าง AMPS- Na^+ กับ (ก) CMC หรือ (ข) CMCTS



(ก)



(ข)

รูป 3.68 การใส่แผ่นปิด (ก) ชนิดใยฝ้าย และ (ข) ชนิดแผ่นฟิล์มพอลิยูรีเทนในไฮโดรเจลตัวอย่าง poly(AMPS- Na^+)

จากการทดสอบในเบื้องต้นโดยการทดลองดึงแผ่นไฮโดรเจลด้วยผู้ทดลองพบว่าแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ที่มีการสอดแทรกตาข่ายพลาสติกทั้งชนิดที่มีความหยาบและถี่สามารถช่วยเป็นโครงยึดได้เป็นอย่างดีและไม่ทำให้ส่วนที่เป็นไฮโดรเจลฉีกขาดออกจากกันได้โดยง่าย สำหรับแผ่นที่ใช้ปิดด้านบนของแผ่นไฮโดรเจล (backing sheet) ที่มีลักษณะเป็น non-woven ดังรูป 3.68 (ก) ทางผู้ทดลองออกแบบโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจะให้ backing sheet นี้สามารถเป็นตัวกักเก็บของเหลวที่ออกจากแผล ซึ่งอาจจะเป็นส่วนเกินที่ไฮโดรเจลจะสามารถดูดซับเอาไว้ได้ ทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับให้มากขึ้น ส่วนในกรณีของการใช้แผ่นบางๆ พอลิยูรีเทน ดังรูป 3.68 (ข) เพื่อเป็นการป้องกันผ่านเข้าของน้ำสู่แผล แต่สามารถยอมให้อิออนบางส่วนรวมถึงก๊าซ CO_2 หรือ O_2 สามารถเข้าออกได้ ซึ่งจะทำให้แผลไม่เกิดความชื้นแฉะมากเกินไปซึ่งจะส่งผลในการสมานแผลและเป็นไปตามกระบวนการของร่างกายได้ดีขึ้น