

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

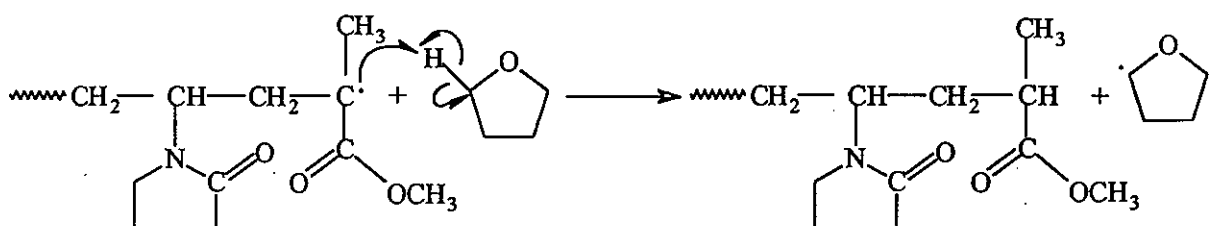
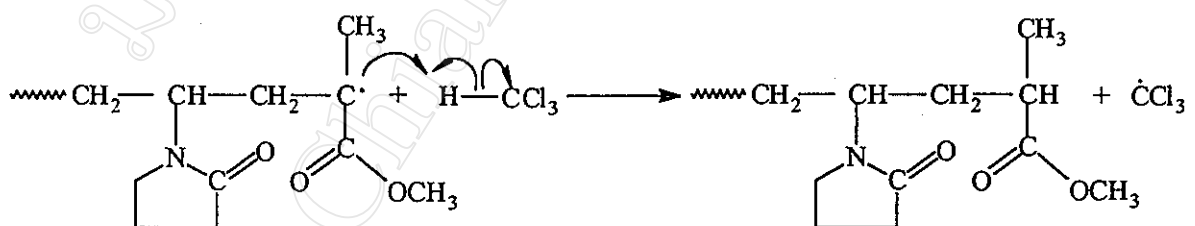
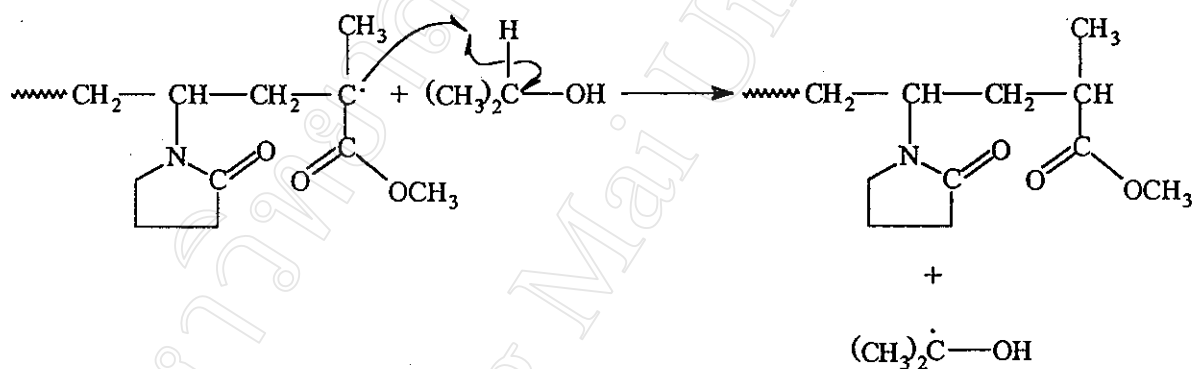
4.1 สภาวะโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลายของเมธิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน

จากผลการทดลองในการเตรียมโคพอลิเมอร์ของเมธิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน ที่อัตราส่วนโมโนเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยเทคนิคโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลายภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 70°C โดยใช้ไอโซโพรพานอล เติตระไฮโดรฟลูรอน และคลอโรฟอร์ม เป็นตัวทำละลายและใช้ปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.20 โมล% เปอร์เซนต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยา ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เปอร์เซนต์คอนเวอร์ชันเริ่มคงที่ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายต่างๆ กัน และความหนืดอินทรินซิกของสารละลายในคลอโรฟอร์มของโคพอลิเมอร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิ 25.0±0.1°C สรุปได้ดังตาราง 4.1

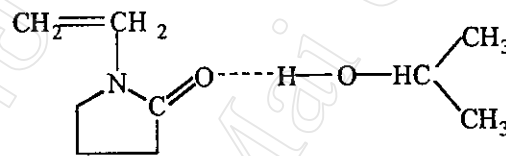
ตาราง 4.1 เปอร์เซนต์คอนเวอร์ชัน ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เปอร์เซนต์คอนเวอร์ชันเริ่มคงที่ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย ณ อุณหภูมิ 70°C โดยใช้ตัวทำละลายในการสังเคราะห์ต่างๆ กัน และความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ที่ได้ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ 25.0±0.1°C

ตัวทำละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์	ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ % คอนเวอร์ชันเริ่มคงที่ (ชั่วโมง)	% คอนเวอร์ชัน	ความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ (dl/g)
ไอโซโพรพานอล	20	73	0.488
เติตระไฮโดรฟลูรอน	18	90	0.542
คลอโรฟอร์ม	22	89	0.594

จากตาราง 4.1 จะเห็นว่าในระบบที่ใช้เตตระไฮโดรฟูรานและคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันและความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ในคลอโรฟอร์มที่อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนระบบที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายมีค่าทั้งสองต่ำที่สุด พิจารณาจากค่าคงที่การย้ายโซ่ (transfer constant) กับตัวทำละลายในระบบพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตที่อุณหภูมิ 60°C พบว่า ไอโซโพรพานอลมีค่าคงที่การย้ายโซ่ ($C_s = 5.83 \times 10^{-5}$) สูงกว่าคลอโรฟอร์ม ($C_s = 4.54 \times 10^{-5}$) [68] ดังนั้นในขบวนการโคพอลิเมอไรเซชันที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายเกิดการย้ายโซ่ไปยังตัวทำละลายสูงกว่าเมื่อใช้คลอโรฟอร์ม โคพอลิเมอร์ที่ได้จึงมีความหนืดอินทรินซิกต่ำกว่า ส่วนเตตระไฮโดรฟูรานไม่มีรายงานค่าคงที่การย้ายโซ่ จากผลการทดลองคาดว่าเกิดการย้ายโซ่ได้พอๆ กับคลอโรฟอร์ม ปฏิกิริยาการย้ายโซ่กับไอโซโพรพานอล คลอโรฟอร์มและเตตระไฮโดรฟูราน แสดงตามลำดับดังนี้



นอกจากผลของการย้ายโซ่แล้ว ตัวทำละลายที่ใช้ยังมีผลต่อการเกิดโคพอลิเมอร์เชนของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ โดยตัวทำละลายที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับมอนอเมอร์จะไปรบกวนการเกิดโคพอลิเมอร์เชน ทำให้อัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยา (reactivity ratio) ของมอนอเมอร์มีค่าลดลง [69] ในการทดลองนี้จะดอมออกซิเจนในหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ติดกับอะตอมไนโตรเจนของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับไอโซโพรพานอลได้ [70] ดังรูป 4.1 เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนจึงเกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์เชนได้ไม่ดี ส่วนแต่พันธะไฮโดรฟลูอิดและคลอโรฟอร์มไม่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้จึงมีผลต่ออัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนน้อย เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาและความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ จึงมีค่าสูงกว่าในระบบที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย



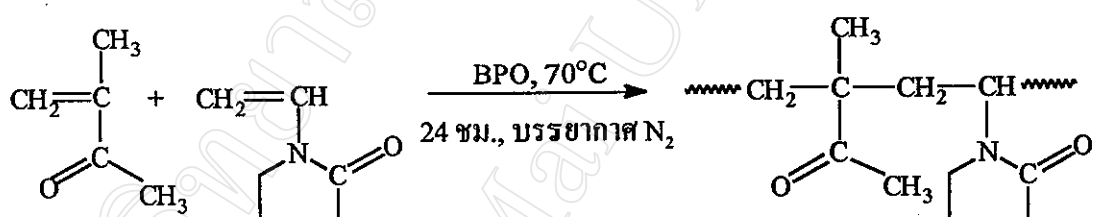
รูป 4.1 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนกับไอโซโพรพานอล

จากการทดลองเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.10-0.60 โมล% ในขบวนการโคพอลิเมอร์เชนของเมธิลเมทาคริเลตกับเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน ในระบบที่ใช้ความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.10 โมล% เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันและความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์มีค่าต่ำ เนื่องจากความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาน้อยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์เชนช้า ดังนั้นภายในเวลา 24 ชั่วโมงปฏิกิริยาจึงยังเกิดไม่สมบูรณ์ โคพอลิเมอร์ที่ได้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ส่วนในระบบที่ใช้ความเข้มข้นของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.20-0.60 โมล% เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นความหนืดอินทรินซิกของสารละลายในคลอโรฟอร์มของโคพอลิเมอร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์เชนแบบฟรีแรดิคัล คือ เมื่อความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาสูง ในระบบจะประกอบด้วยสายโซ่ที่กำลังโตเป็นจำนวนมากทำให้มีโอกาสเกิดเทอร์มินชันได้สูง พอลิเมอร์ที่ได้จึงมีขนาด

สายโซ่สั้น [71] น้ำหนักโมเลกุลจึงมีค่าต่ำ ที่ความเข้มข้นเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.20 โมล% โคพอลิเมอร์ที่ได้มีค่าความหนืดอินทรีนซิกสูงสุด และมีเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาสูง ดังนั้นความเข้มข้นของตัวริเริ่มที่เหมาะสมในปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายในเตตระไฮโดรฟูรานของเมทิลเมทาคริเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนที่ทำการศึกษานี้จึงเป็นเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.20 โมล%

4.2 การสังเคราะห์โพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน

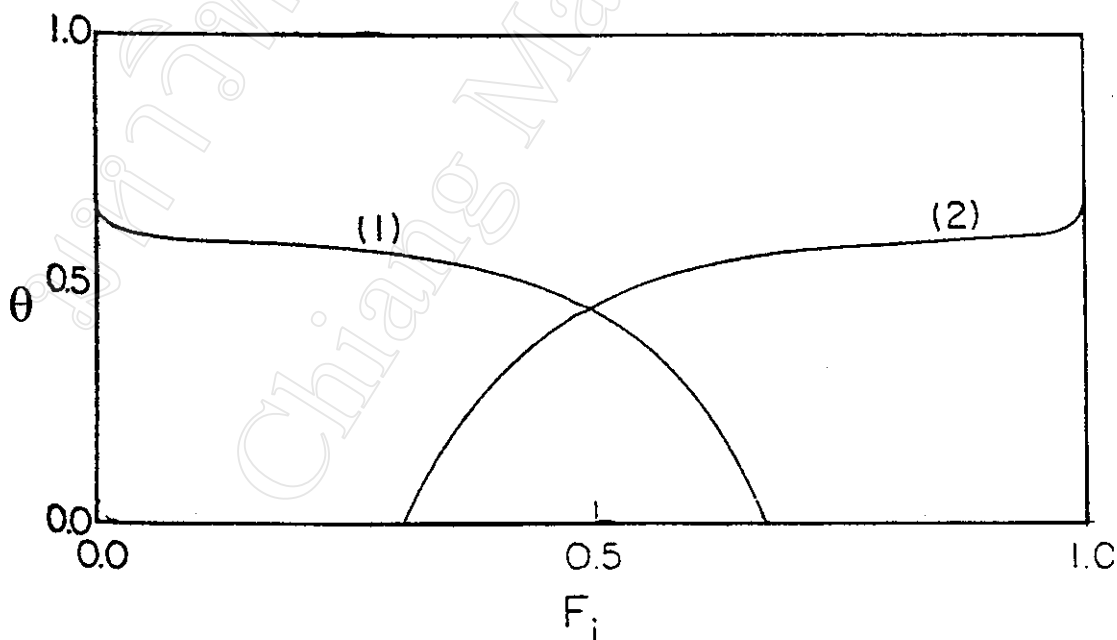
ปฏิกิริยาการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนแสดงได้ดังต่อไปนี้



สมบัติต่างๆ ของโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้สรุปในตาราง 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ VP เริ่มต้นมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันมีค่าลดลง อัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยา (reactivity ratio) ของ MMA และ VP มีค่าเท่ากับ 4.4 ± 1.2 และ 0.05 ± 0.02 ตามลำดับ [24] อัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาของ MMA มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า สายโซ่ที่มีปลายเป็นเมทิลเมทาคริเลตแรดิคอลลชอบทำปฏิกิริยากับ MMA มากกว่า VP ส่วนอัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาของ VP มีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่าสายโซ่ที่กำลังโตที่มีปลายเป็นเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนแรดิคอลลชอบจับกับ MMA มากกว่ามอนอเมอร์ของตัวเอง โคพอลิเมอร์ที่ได้จึงมีแนวโน้มที่จะประกอบด้วยบล็อกของ MMA ที่ยาวต่อกับหน่วยของ VP หรือบล็อกสั้นๆ ของ VP ในขบวนการโคพอลิเมอไรเซชัน MMA จะเข้าทำปฏิกิริยากับทั้งเมทิลเมทาคริเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนแรดิคอลลได้ดีกว่า VP ดังนั้น MMA ถูกใช้ไปเร็วกว่าเมื่อ MMA ในระบบหมดก็จะเหลือเฉพาะ VP และสายโซ่กำลังโตที่มีปลายเป็นเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนแรดิคอลล จากค่าอัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาชี้ว่าแรดิคอลลนี้ไม่ชอบจับกับมอนอเมอร์ของตัวเองนัก อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงน่าจะช้าลง ทำให้เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันจึงมีค่าลดลง

จากการศึกษาโคพอลิเมอร์เซชันระหว่าง MMA และ VP ของเดวิด (David) และคณะ [72] ความสัมพันธ์ระหว่างคอนเวอร์ชันแบบสัดส่วน (fractional conversion, θ) ของมอนอเมอร์กับเศษส่วนโมล (F_i) ของมอนอเมอร์ในโคพอลิเมอร์จากการคำนวณตามทฤษฎีที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 30 : 70% โดยน้ำหนัก แสดงดังรูป 4.2 จะเห็นว่าในช่วงแรกๆ ของการเกิดปฏิกิริยา MMA เข้าทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า VP และถูกใช้ไปหมดที่ $\theta = 0.63$ (เมื่อ θ คือ คอนเวอร์ชันแบบสัดส่วนของมอนอเมอร์) จากนั้นจึงเกิดโฮโมพอลิเมอร์ของ VP ดังนั้นที่ $\theta = 1$ ในระบบประกอบด้วยโคพอลิเมอร์ที่มีหน่วยของ MMA เป็นส่วนใหญ่และ PVP นอกจากนี้พบว่า เมื่อปริมาณ MMA ในตอนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น PVP ที่เกิดขึ้นในช่วงหลังๆ ของปฏิกิริยามีปริมาณน้อยลง

เนื่องจาก PVP ละลายน้ำได้ ในการทดลองจึงสามารถหาปริมาณ PVP ที่เกิดขึ้นได้จากสัดส่วนของส่วนที่ละลายน้ำ จากตาราง 4.2 จะเห็นว่า เปอร์เซ็นต์ของส่วนที่ละลายน้ำของ P(MMA-stat-VP) มีค่าลดลงตามปริมาณ MMA เริ่มต้นที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเดวิด และคณะ



รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคอนเวอร์ชันแบบสัดส่วน (fractional conversion, θ) ของมอนอเมอร์กับเศษส่วนโมล (F_i) ณ เวลาใดๆ ของ MMA ($i = 1$) และ VP ($i = 2$) ในโคพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 30 : 70% โดยน้ำหนัก [72]

ตาราง 4.2 สรุปผลการศึกษาสสมบัติต่างๆ ของ P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิไดโนในคอนเริ่มต้นต่างๆ กัน

สมบัติของโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	PMMA	P(MMA-stat-20%VP)	P(MMA-stat-30%VP)	P(MMA-stat-40%VP)	P(MMA-stat-50%VP)
% คอมพอสัน	98.8	98.6	90.8	89.6	98.4
% ส่วนที่ละลายน้ำ	*	4.90	6.61	14.09	26.35
% ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ	*	95.10	93.39	85.91	73.65
T _g (°C)	108±1	107±1	106±1	100±1	101±1
อุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก (°C)	191±5	299±5	297±5	319±5	336±5
อุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนัก 50% (°C)	435±5	424±5	400±5	428±5	440±5
พื้นที่ที่ยาตัวของแผ่นฟิล์ม (%)	*	5.4±1.0	7.1±2.5	9.0±2.6	29.9±3.9
ปริมาตรที่ขยายตัวของแผ่นฟิล์ม (%)	*	7±1	9±2	16±3	57±7
ปริมาณน้ำดูด (%)	*	7.3±0.6	10.4±0.9	15.4±0.5	39.1±0.9
ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล (%)	*	1.0±0.1	1.5±0.1	2.7±0.2	2.4±0.4
อัตราการผ่านของไอน้ำ โดยวิธีวอเตอร์คัพ (g/hr.m ²)	*	1.6±0.4	2.8±0.6	3.8±0.7	33.0±2.3
อัตราการผ่านของไอน้ำ โดยวิธีอินเวอร์ทเทคคัพ (g/hr.m ²)	*	2.8±0.9	8.3±1.7	7.6±1.7	88.0±4.4
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	*	*	*	18.2±4.1	6.6±0.6
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด	*	*	*	15.8±7.3	27.5±6.6
มอดูลัสแบบบีบอัด (MPa)	*	*	*	597±70	271±21

* ไม่สามารถทดสอบได้

ตาราง 4.2 (ต่อ)

สมบัติของไฮโม่และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	P(MMA-stat-60%VP)	P(MMA-stat-70%VP)	P(MMA-stat-80%VP)	P(MMA-stat-90%VP)	PVP
% คอนเวอร์ชัน	71.7	64.8	52.3	49.0	77.1
% ส่วนที่ละลายน้ำ	25.07	41.74	66.73	79.26	*
% ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ	74.93	58.26	33.27	20.74	*
T _g (°C)	83±1	101±1	110±1	83±1	69±1
อุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก (°C)	337±5	332±5	338±5	383±5	385±5
อุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนัก 50% (°C)	434±5	443±5	460±5	461±5	491±5
พื้นที่ที่ขยายตัวของแผ่นฟิล์ม (%)	25.3±2.4	37.1±7.5	*	*	*
ปริมาตรที่ขยายตัวของแผ่นฟิล์ม (%)	4±9	137±6	*	*	*
ปริมาณน้ำสมดุล (%)	42.0±1.0	63.2±0.6	*	*	*
ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล (%)	2.2±0.3	1.1±0.3	*	*	*
อัตราการผ่านของไอน้ำ โดยวิธีวอเตอร์คัพ (g/hr.m ²)	18.0±1.6	20.4±3.7	*	*	*
อัตราการผ่านของไอน้ำ โดยวิธีอินเวอเทคคัพ (g/hr.m ²)	54.4±10.9	79.8±23.9	*	*	*
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	4.6±1.3	0.8±0.1	*	*	*
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด	51.2±7.4	53.9±9.6	*	*	*
มอดุลัสแบบยืดหยุ่น (MPa)	243±83	68±8	*	*	*

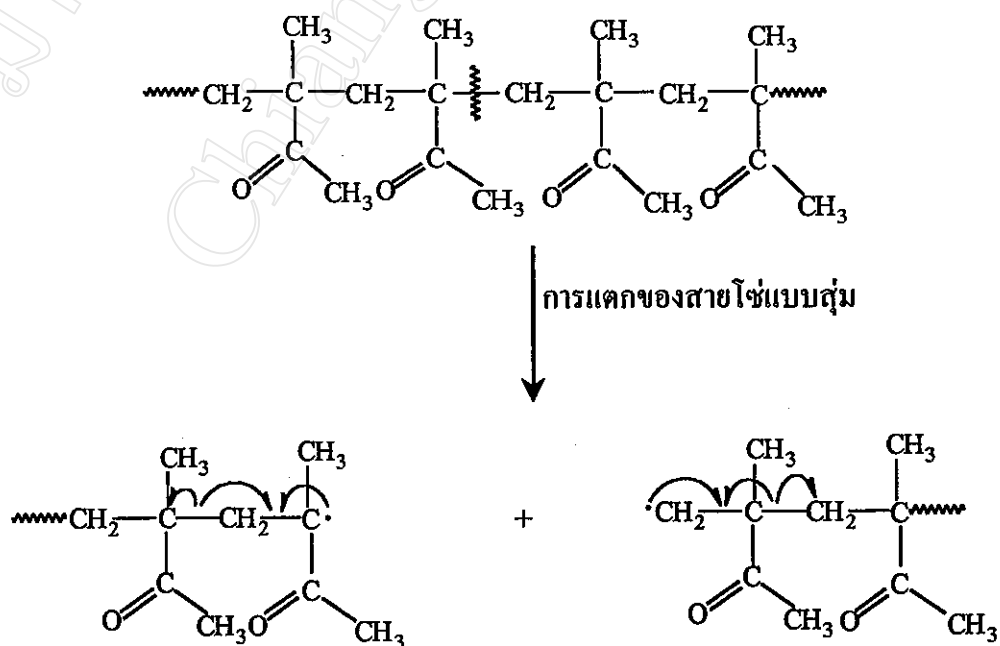
* ไม่สามารถทดสอบได้

4.3 การวิเคราะห์ทางความร้อนของโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

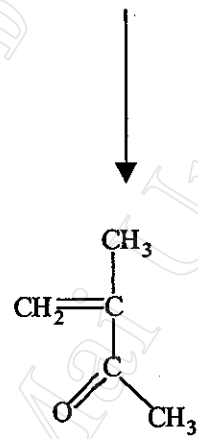
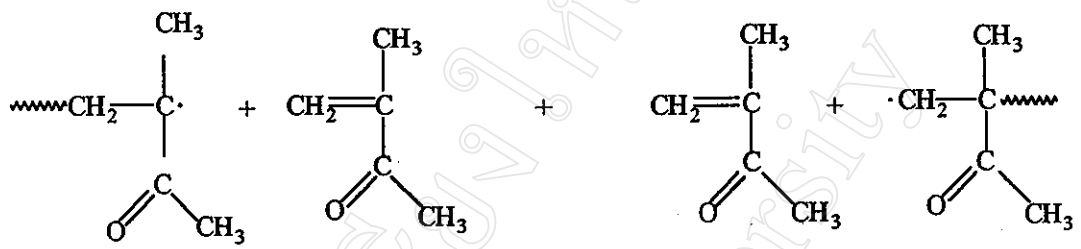
ผลของโครงสร้างและอัตราส่วนของมอนอเมอร์ในคอนเริ่มต้นต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้สรุปดังตาราง 4.2 ค่า T_g ของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ (108°C) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากหนังสืออ้างอิง คือ 105°C [68] ส่วน T_g ของ PVP ที่เตรียมได้ มีค่า 69°C ซึ่งอยู่ในช่วง T_g ที่รายงานโดย เทเนอร์ (Turner) [73] คือ $54-175^\circ\text{C}$ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ จากตาราง 4.2 จะเห็นว่า T_g ของโคพอลิเมอร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ T_g ของ PMMA ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่แตกต่างกันของ MMA และ VP ดังที่กล่าวมาแล้ว โคลิเมอร์ที่ได้มีปริมาณของ MMA มาก ค่า T_g ของโคพอลิเมอร์จึงใกล้เคียง PMMA มากกว่า PVP

จากผลการศึกษาความเสถียรต่อความร้อนของโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ในตาราง 4.2 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ VP ในคอนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก และอุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนักไป 50% ของ P(MMA-*stat*-VP) ที่เตรียมได้มีค่าสูงขึ้น จาก TG เทอร์โมแกรมในบทที่ 3 หน้า 89 จะเห็นว่า PVP มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่า PMMA ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ VP เท่ากับเป็นการเพิ่มความเสถียรต่อความร้อนให้กับโคพอลิเมอร์นั่นเอง

ปฏิกิริยาการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของ PMMA เกิดจากการแตกของสายโซ่หลักแบบสุ่มตามด้วยการหลุดออกของมอนอเมอร์จากปลายสายโซ่พอลิเมอร์ (depolymerisation) ได้เป็นมอนอเมอร์จำนวนมาก [74] ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

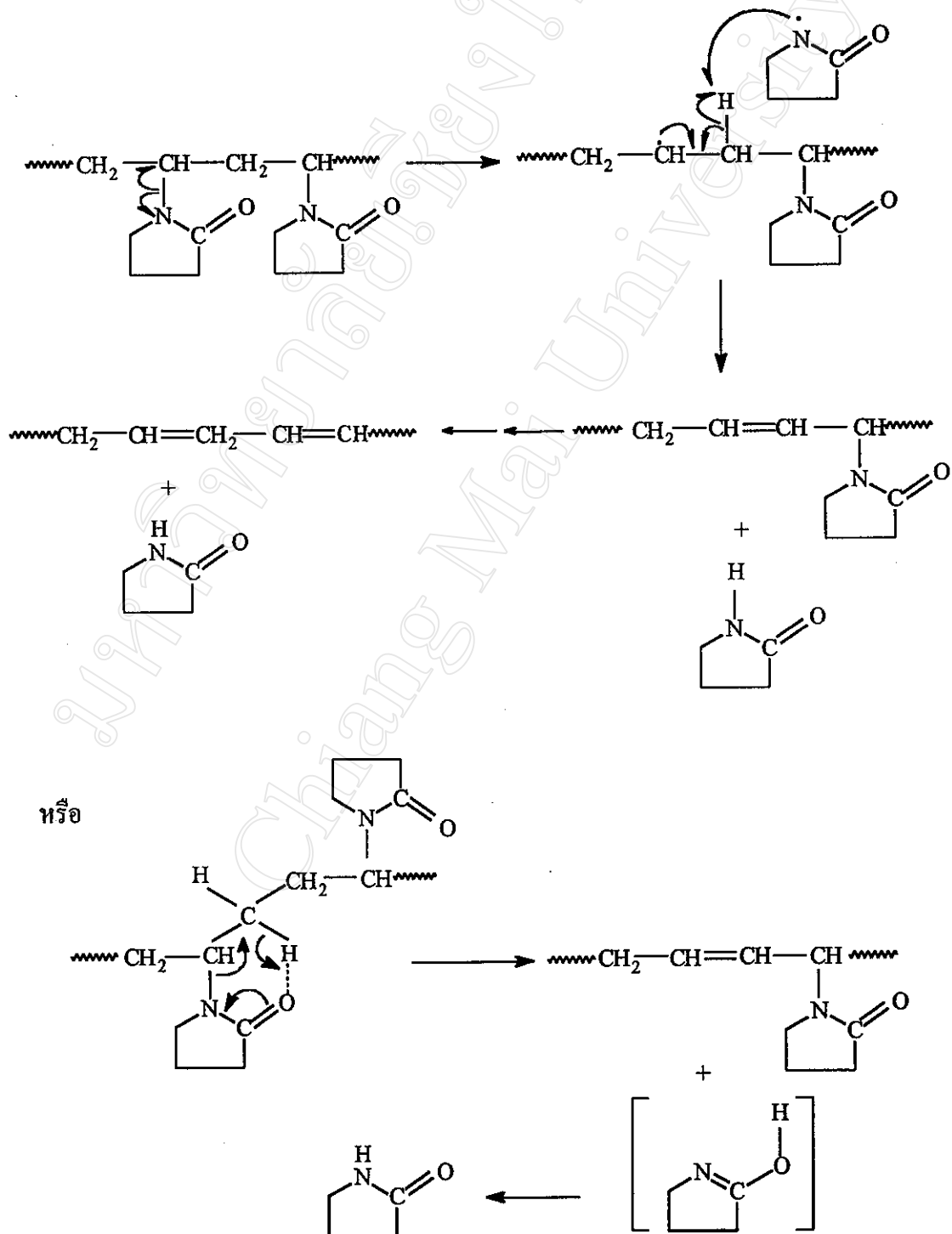


↓
ดิพอลิเมอร์ไรเซชัน



มอนอเมอร์ 100 %

จากการศึกษาการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของ PVP ของ เพนิเช (Peniche) และคณะ [75] ด้วยเทอร์โมกราวิเมตรี-อินฟราเรด (TG-FTIR) พบว่า ปฏิกิริยาเกิดผ่านการแตกของพันธะ C-N ได้ดีกว่าการแตกแบบสุมของพันธะ C-C ในสายโซ่หลัก เนื่องจาก พลังงานพันธะของพันธะ C-N (292 kJ/mol) มีค่าน้อยกว่าพันธะ C-C (348 kJ/mol) โดยเกิดไพโรลิโดนเป็นผลิตภัณฑ์หลักของการสลายตัว ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



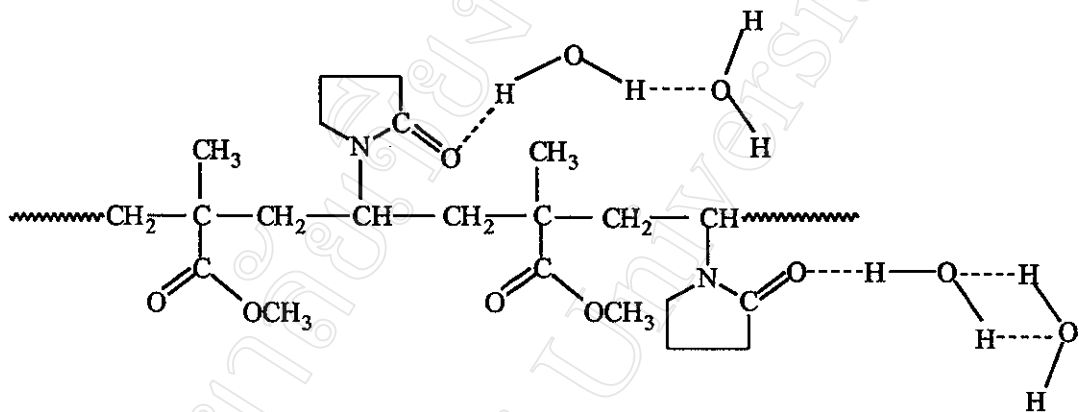
4.4 สมบัติทางกายภาพและการขยายตัวของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้

ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ VP เริ่มต้น แผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ในสถานะที่แห้งมีความเปราะมากขึ้น ที่ปริมาณ VP มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก แผ่นฟิล์มมีสีเหลืองอ่อนและเปราะมาก เมื่อนำไปแช่น้ำกลั่นแผ่นฟิล์มเปลี่ยนจากโปร่งใสเป็นสีขาวทึบ จากการศึกษาโครงสร้างของ P(MMA-co-VP) ในสถานะที่พองตัวของโยโคทา (Yokota) และคณะ [70] โดยใช้ ^{13}C -NMR พบว่าโครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วยส่วนที่มี MMA มาก (MMA-rich domain) และส่วนที่มี VP มาก (VP-rich domain) อยู่แยกกันทำให้สองบริเวณมีดัชนีหักเหแตกต่างกันจึงเห็นเป็นสีขาวทึบ นอกจากนี้โครงสร้างดังกล่าวยังมีผลต่อสมบัติเชิงกลของโคพอลิเมอร์ด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป แผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณ VP ในตอนเริ่มต้น 20-40% โดยน้ำหนัก มีลักษณะแข็ง เหนียว และไม่ยึดติดกับผิวหนัง ส่วนแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณ VP ตอนเริ่มต้นเท่ากับ 50-70% โดยน้ำหนัก มีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น และแนบติดผิวหนังดีขึ้น แต่ก็ยังไม่ดีนัก และมีความอ่อนนุ่มน้อย เนื่องจาก P(MMA-stat-VP) ที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วย MMA เป็นส่วนใหญ่ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2 ส่วนแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นมากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ในระหว่างการพองตัว จากการศึกษาการขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตรของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP ในตอนเริ่มต้นเท่ากับ 20-70% โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวทั้งตามพื้นที่และปริมาตรเพิ่มขึ้นตามปริมาณ VP ที่มากขึ้น เนื่องจาก VP มีหน่วยที่ชอบน้ำ การที่ปริมาณ VP เพิ่มขึ้นทำให้น้ำเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่ได้มากและดันให้สายโซ่โคพอลิเมอร์ขยายออก การขยายตัวจึงเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ VP ในตอนเริ่มต้นกับพื้นที่และปริมาตรที่ขยายตัวไม่มีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง โดยการขยายตัวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากที่ปริมาณ VP เริ่มต้นมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก

4.5 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

เมื่อนำแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ค่าปริมาณน้ำสมดุล (EWC) ของไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP เริ่มต้นต่างๆ กัน สรุปในตาราง 4.2 จะเห็นว่าแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-20%VP) มีปริมาณน้ำสมดุลต่ำกว่า 10% โดยน้ำหนัก จึงไม่ถือว่าโคพอลิเมอร์ที่สัดส่วนโคมอนอเมอร์นี้เป็นไฮโดรเจล เมื่อปริมาณ VP ในตอนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก VP ประกอบด้วยหมู่ที่ชอบน้ำ ได้แก่ หมู่ไพโรลิโดน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ VP เป็นการเพิ่มหมู่ที่ชอบน้ำให้กับโคพอลิเมอร์นั่นเอง

น้ำจึงสามารถเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โคพอลิเมอร์ได้มากขึ้น อันตรกิริยาระหว่างเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในโคพอลิเมอร์กับโมเลกุลของน้ำ แสดงดังรูป 4.3 จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ VP ในตอนเริ่มต้นกับปริมาณน้ำสมดุล พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง โดยที่ปริมาณ VP เริ่มต้นมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก ค่าปริมาณน้ำสมดุลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งสัมพันธ์กับผลการศึกษาการขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตรของแผ่นฟิล์ม



รูป 4.3 อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของน้ำกับหน่วยของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในโคพอลิเมอร์ [68]

เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่อิมมิดด้วยน้ำไปแขวนไว้ในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60% พบว่าปริมาณน้ำคงเหลือสมดุลของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนของโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากปริมาณน้ำคงเหลือสมดุลมีค่าต่ำมากแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์จึงมีลักษณะแข็ง

4.6 อัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้ 2 วิธีคือ วิธีวอเตอร์คัพ และวิธีอินเวทเทคคัพ วิธีวอเตอร์คัพเป็นการวัดค่าอัตราการผ่านของไอน้ำต่ำสุดของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ เนื่องจากแผ่นฟิล์มที่ทดสอบค่อนข้างแห้ง และในการทดสอบมีช่องว่างของอากาศระหว่างน้ำกับแผ่นฟิล์ม การระเหยของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มจึงช้ากว่าวิธีอินเวทเทคคัพที่แผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบอิมมิดด้วยน้ำและระหว่างการทดสอบแผ่นฟิล์มสัมผัสกับน้ำโดยตรง นอกจากนี้ยังมีแรงกดที่เกิดจากน้ำหนักของน้ำบนแผ่นฟิล์มทำให้วิธีนี้ให้ค่าอัตราการผ่านของไอน้ำสูงสุด ในการใช้งานของวัสดุทดแทนผิวหนังจริงแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

มีทั้งที่ส่วนที่สัมผัสและไม่สัมผัสกับของเหลวจากบาดแผล (exudate) ค่าอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มจะมีค่าอยู่ระหว่างอัตราการผ่านของไอน้ำที่ได้จากการทดสอบทั้งสองวิธี จากการเปรียบเทียบค่าอัตราการผ่านของไอน้ำของไฮโดรเจลที่ทำการศึกษากับรายงานการศึกษาอัตราการระเหยของไอน้ำผ่านผิวหนังปกติและแผลไหม้ระดับดีกรีต่างๆ โดยวิธีอีแวพอริเมตรี (Evaporimetry Technique) โดยแลมค์ (Lamke) [65] ในตาราง 4.3 พบว่าอัตราการผ่านของไอน้ำของไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP เริ่มต้นเท่ากับ 30-40% โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำกว่าอัตราการระเหยของไอน้ำของผิวหนังปกติ ส่วนไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP เริ่มต้น 50-70% โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราการระเหยอยู่ระหว่างอัตราการระเหยของไอน้ำของแผลไหม้ดีกรีที่หนึ่งและสอง

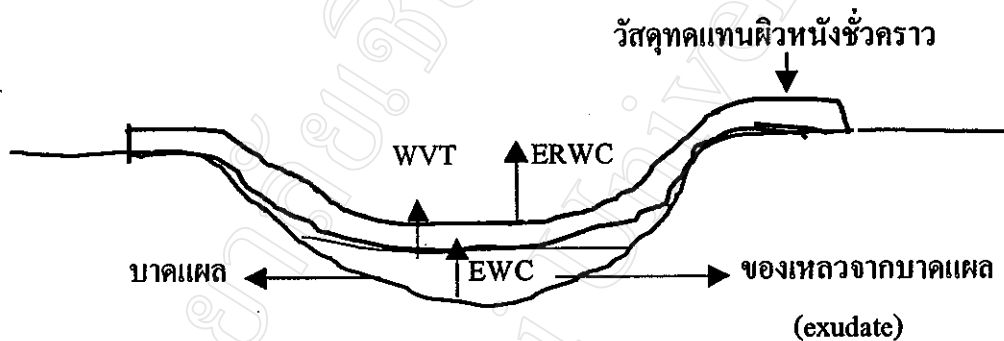
ตาราง 4.3 อัตราการระเหยของไอน้ำของผิวหนังปกติและแผลไหม้ที่ระดับดีกรีต่างๆ [65]

	จำนวนผู้ป่วยที่การศึกษา (คน)	อุณหภูมิของผิวหนัง (°C)	อัตราการระเหยของไอน้ำ (g/hr.m ²)
ผิวหนังปกติ	60	35.8±0.2	8.5±0.5
แผลไหม้ดีกรีที่หนึ่ง	12	35.5±0.1	11.6±1.1
แผลไหม้ดีกรีที่สอง	30	35.3±0.4	178.1±5.5
แผลไหม้ดีกรีที่สาม	20	34.5±0.4	143.2±4.5

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมมูล ปริมาณน้ำคงเหลือสมมูล และอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

ในการใช้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเป็นวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราว ค่าปริมาณน้ำสมมูล ปริมาณน้ำคงเหลือสมมูล และอัตราการผ่านของไอน้ำ จะต้องมีความสัมพันธ์กัน ปริมาณน้ำสมมูลเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในการดูดซับน้ำหรือของเหลวจากบาดแผล ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น โครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจล อุณหภูมิ และ pH ของของเหลว เป็นต้น [23] ส่วนค่าปริมาณน้ำคงเหลือสมมูลบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่แผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์สามารถเก็บไว้ในโครงสร้างได้เมื่อไม่ได้อยู่ในน้ำ เนื่องจากในการใช้งานผิวหนังด้านบนของวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราวต้องสัมผัสกับอากาศ ทำให้มีการระเหยไปของน้ำบางส่วน โดยปริมาณน้ำที่เหลืออยู่จะทำให้ไฮโดรเจลมีความนิ่ม ไม่แห้งติดแผล และไม่ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อของแผล ส่วนอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์บ่งบอกถึงอัตราการระเหยของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะต้อง

สมดุลกับการดูดซับของเหลว หากอัตราการผ่านของไอน้ำสูงเกินไปทำให้แผลแห้งซึ่งก่อให้เกิดความเจ็บปวดและเป็นแผลเป็น แต่ถ้าอัตราการผ่านของไอน้ำต่ำเกินไป จะทำให้มีของเหลวคั่งที่บาดแผลอาจทำให้เกิดการติดเชื้อ อักเสบและเน่าเปื่อยของแผลได้ ซึ่งอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลต่ำสุดและสูงสุดหาได้จากวิธีวอเตอร์คัพและอินเวทเทคคัพตามลำดับดังที่กล่าวมาแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำสมดุล ปริมาณน้ำคงเหลือ และอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ แสดงดังรูป 4.4

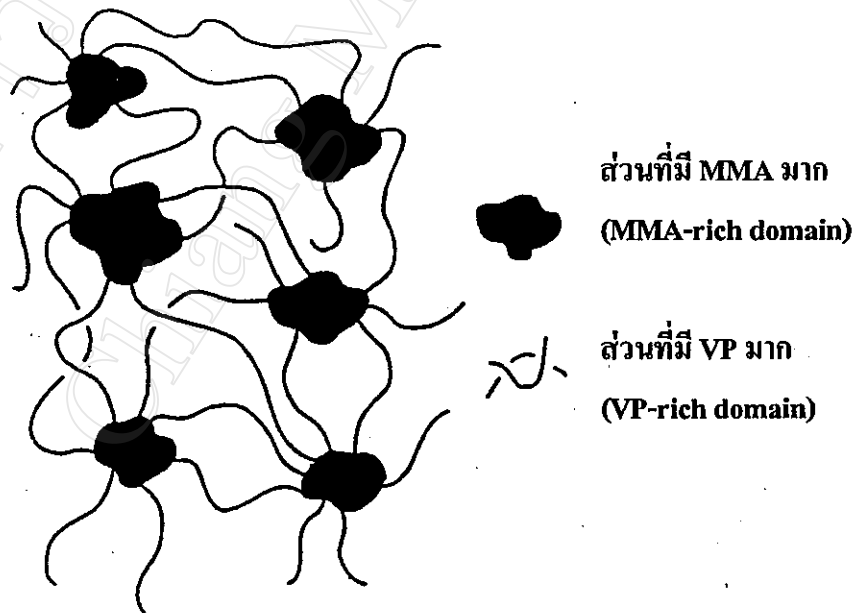


รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล (EWC) ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล (ERWC) และอัตราการผ่านของไอน้ำ (WVT) ของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราว

4.8 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้

สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่สำคัญอีกอันหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการนำวัสดุไปใช้งาน โดยไฮโดรเจลสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราวควรมีความแข็งแรง ยืดหยุ่นและอ่อนนุ่ม ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่สังเคราะห์ได้ ผลการทดสอบสรุปในตาราง 4.2 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ VP ตอนเริ่มต้นความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสแบบยืดหยุ่นของไฮโดรเจลมีค่าลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาดของไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ ไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มมากขึ้น แต่มีความแข็งแรงน้อยลง แสดงว่า MMA เป็นส่วนที่ทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรง เนื่องจากอัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาของ MMA สูงกว่า VP มากดังที่กล่าวมาแล้ว โคพอลิเมอร์จึงประกอบด้วยขดลวดของ MMA ที่ยาว โดยขดลวดของ MMA นี้จะเป็นส่วนที่ช่วยให้สมบัติเชิงกลของโคพอลิเมอร์

ดีขึ้น เนื่องจากเป็นส่วนที่มี T_g สูง มีความแข็งแรงและเกิดอันตรกิริยาของหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) ทำให้ในสภาวะที่พองตัวไฮโดรเจลจึงสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ และมีสมบัติคล้ายมีการเชื่อมต๋อด้วยพันธะเคมี [76] การเพิ่มปริมาณ VP ทำให้มีสัดส่วนของ MMA น้อยลง ความแข็งแรงของไฮโดรเจลก็จะน้อยลงด้วย แต่ทำให้ปริมาณน้ำสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.5 โดยน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เป็นผลให้ไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มมากขึ้น สมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างของ P(MMA-co-VP) ของ โยโคทา (Yokota) และคณะ [72] โดยใช้ ^{13}C -NMR พบว่า หน่วยของ MMA และ VP อยู่แยกกันเป็นกลุ่ม ดังรูป 4.5 โดยบริเวณที่มี MMA อยู่มาก (MMA-rich domain) จะมี VP กระจายอยู่บ้าง และในบริเวณที่มีหน่วยของ VP อยู่มาก (VP-rich domain) ก็ประกอบด้วยหน่วยของ MMA อยู่บ้าง เช่นเดียวกัน บริเวณที่มี MMA อยู่มากเป็นบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ มีลักษณะแข็งคล้ายแก้ว ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรง มีค่ามอดูลัสแบบยืดหยุ่นสูง และหมู่ที่ไม่ชอบน้ำเกิดอันตรกิริยากันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์หรือเรียกว่า พันธะไฮโดรโฟบิก (hydrophobic bond)



รูป 4.5 ลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่ที่มีความยืดหยุ่นและบริเวณที่มีการเชื่อมต๋อระหว่างสายโซ่ของ P(MMA-co-VP) ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง [77]

การเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ของ P(MMA-*stat*-VP) ในที่นี้เป็นการเชื่อมต่อกันทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างหมู่ที่ไม่มีขั้วและแรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole interaction) ระหว่างหมู่คาร์บอนิล [23] ในสถานะที่อิมิดด้วยน้ำไฮโดรเจลจึงมีลักษณะคล้ายมีการเชื่อมต่อดัวยพันธะโควาเลนต์คือสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ ไฮโดรเจลที่ได้นี้เรียกว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic hydrogel) อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของโคพอลิเมอร์ทำลายได้ด้วยความร้อนหรือตัวทำละลาย ทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายโดยอาศัยเทคนิคการหลอมเหลว (melt techniques) เช่น การอัดขึ้นรูป (compression moulding) การฉีดขึ้นรูป (injection moulding) และการอัดรีด (extrusion) เป็นต้น หรือเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มบางโดยวิธีคาสติง (casting) ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของไฮโดรเจลชนิดนี้ การที่โคพอลิเมอร์ที่ได้สามารถหลอมเหลวและละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ทำให้สามารถผสมวัสดุหรือสารอื่นลงในไฮโดรเจลได้ เช่น สารเติมแต่ง ตัวเสริมแรง ยา และสารต้านจุลินทรีย์ เป็นต้น โดยอาจทำการผสมในรูปที่เป็นผงแล้วนำไปขึ้นรูปโดยความร้อน หรือผสมในรูปสารละลาย [78] แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ของไฮโดรเจลนี้มีความแข็งแรงน้อยกว่าการเชื่อมต่อโดยพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP สูงและมีปริมาณน้ำสมดุลสูงมากๆ จะไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้เมื่ออยู่ในน้ำ ดังเช่นไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP ในตอนเริ่มต้น 80-90% โดยน้ำหนักในที่นี้

จากการศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราวของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP เริ่มต้น 50-70% โดยน้ำหนัก มีค่าความทนต่อแรงดึงสูง ชีดย่นและเหนียว อัตราการผ่านของไอน้ำมีค่าสูงกว่าผิวหนังปกติและอยู่ระหว่างอัตราการระเหยในแผลไหม้ครั้งที่หนึ่งและสอง ในไฮโดรเจลที่มีปริมาณ VP เริ่มต้น 70% โดยน้ำหนัก มีค่าปริมาณน้ำสมดุลสูงถึง 63% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ไฮโดรเจลที่ได้ยังสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดและหลอมเหลวได้ด้วยความร้อน เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่เป็นแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงไดโพล-ไดโพลเท่านั้น ทำให้มีทางเลือกในการขึ้นรูปได้หลายแบบ และสามารถผสมสารอื่นลงในไฮโดรเจลได้ ข้อดีอีกอย่างของการใช้ VP คือมีความเป็นพิษต่ำ เข้ากับเนื้อเยื่อได้ และมีสมบัติการยึดติดดี อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแผ่นฟิล์มที่ได้ยังมีความแข็งกระด้าง แนบติดกับผิวหนังไม่สนิท และปริมาณน้ำคงเหลือสมดุลมีค่าต่ำ ทั้งนี้เนื่องอัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ทั้งสองมีค่าต่างกันมากไฮโดรเจลที่ได้จึงประกอบด้วย MMA เป็นส่วนใหญ่ ในการนำแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ไปใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราวจะต้องมีการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวต่อไป

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ VP ในตอนเริ่มต้น แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้มีความยืดหยุ่น อ่อนนุ่ม และแนบติดกับผิวหนังดีขึ้น ดังนั้นในการสังเคราะห์หากสามารถทำให้ VP

เข้าไปในสายโซ่โคพอลิเมอร์ได้มากขึ้น สมบัติของแผ่นฟิล์มก็จะดีขึ้น วิธีการสังเคราะห์วิธีหนึ่งที่น่าสนใจ ได้แก่ โคพอลิเมอร์เซชันแบบสารละลายโดยวิธีการเติมมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างกันในปฏิกิริยาเป็นช่วงๆ ด้วยอัตราเร็วที่ไม่เท่ากัน (stepwise semi-continuous procedure) จากการศึกษาของ Liu และคณะ [24] พบว่าวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากอัตราส่วนความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่แตกต่างกันมากของโคมอนอเมอร์ได้ โคพอลิเมอร์ที่ได้มีอัตราส่วนของโคมอนอเมอร์ใกล้เคียงกับในตอนเริ่มต้น นอกจากนี้แล้วอาจเปลี่ยนไปใช้มอนอเมอร์ที่ชอบน้ำตัวอื่นแทน VP เช่น *N,N*-dimethacrylamide (DMA) และ Acryloylmorpholine [28] เป็นต้น

ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงงานต่อไป

จากงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่องนี้ต่อไป ดังนี้

- i. ในขั้นตอนการเตรียมโคพอลิเมอร์ควรมีการปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์เพื่อให้โคพอลิเมอร์ที่ได้มีอัตราส่วนของมอนอเมอร์ใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้นมากที่สุด วิธีการสังเคราะห์ที่น่าสนใจได้แก่ โคพอลิเมอร์เชชันโดยวิธีการเติมมอนอเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนต่างกันลงในปฏิกิริยาเป็นช่วงๆ ด้วยอัตราเร็วไม่เท่ากัน (stepwise semi-continuous procedure) [24] หรืออาจใช้มอนอเมอร์ชนิดอื่นแทนเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน เช่น *N,N*-dimethacrylamide (DMA), Acryloylmorpholine [28] เป็นต้น
- ii. ควรทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่แท้จริงในโคพอลิเมอร์ โดยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (^1H -Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) ที่มีความถี่สูง เช่น 300 เมกะเฮิร์ต เป็นต้น
- iii. ควรหาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ โดยใช้เทคนิคเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (Gel Permeation Chromatography)
- iv. ในการเตรียมแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ ความหนาของแผ่นฟิล์มควรมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด เนื่องจากความหนาของแผ่นฟิล์มมีผลต่อสมบัติต่างๆ ที่ทดสอบได้ เช่น ปริมาณน้ำดูด ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล อัตราการผ่านของไอน้ำ และสมบัติเชิงกล เป็นต้น
- v. ควรมีการศึกษาสมบัติวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราวทางการค้าเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ ของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ด้วย