

บทที่ 3

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1 สารเคมี

สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ความบริสุทธิ์ ลักษณะการใช้งานและบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	การใช้งาน	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต
เมทิลเมทาครีเลต (Methyl methacrylate)	มอนอเมอร์	~99%	Fluka AG
เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน (N-vinyl-2-pyrrolidone)	มอนอเมอร์	~97%	Fluka AG
เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide)	ตัวริเริ่มปฏิกิริยา	97%	Fluka AG
คอปเปอร์(I)คลอไรด์ (Copper(I) chloride)	ตัวยับยั้งปฏิกิริยา	97%	E. Merck
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ตัวทำละลาย	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	E. Merck
เตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran)	ตัวทำละลาย	เกรดสำหรับการวิเคราะห์	LAB-SCAN
ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)	ตัวทำละลาย	เกรดสำหรับการวิเคราะห์	LAB-SCAN
เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate)	ตัวทำละลาย	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	E. Merck

ตาราง 3.1 (ต่อ)

สารเคมี	การใช้งาน	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต
เอธานอล (Ethanol)	ตัวทำละลาย	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	E. Merck
อะซีโตน (Acetone)	ตัวทำละลาย	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	E. Merck
นอร์มอล-เฮกเซน (n-Hexane)	ตัวตกตะกอน	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	Fluka AG
แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)	สารดูดความชื้น	90%	BDH England
เม็ดดูดความชื้น (Molecular sieve 4 °A)	สารดูดความชื้น	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	Fluka AG
ซิลิกาเจล (Silica gel)	สารดูดความชื้น	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	-
น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)	สารให้ความร้อน	เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ	Fluka AG

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตาราง 3.2

ตาราง 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือ	รุ่น	บริษัทผู้ผลิต
ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum Oven)	VOS-300SD	EYELA, Tokyo Rikakai Co. Ltd
อินคิวเบเตอร์ (Incubator)	BM 400	Memmert
ตู้อบสารดูดความชื้น (Drying agent Oven)	FCO-100	Whatman
อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrometer)	510	Nicolet
เทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer)	TGA 7	Perkin-Elmer
ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter)	DSC 7	Perkin-Elmer
เครื่องวัดสมบัติเชิงกล (Mechanical Testing)	LRX	LLOYD instrument
แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate) film)	-	3M
เครื่องวัดความหนา (Micrometer)	ID-C112BS	Mitutoyo
ชุดอุปกรณ์การหาอัตราการผ่านของไอน้ำ (Water Vapour Transmission test set)	-	Yasuda
เครื่องคนและให้ความร้อน (Stirring heater)	MR 3001	Heidolph

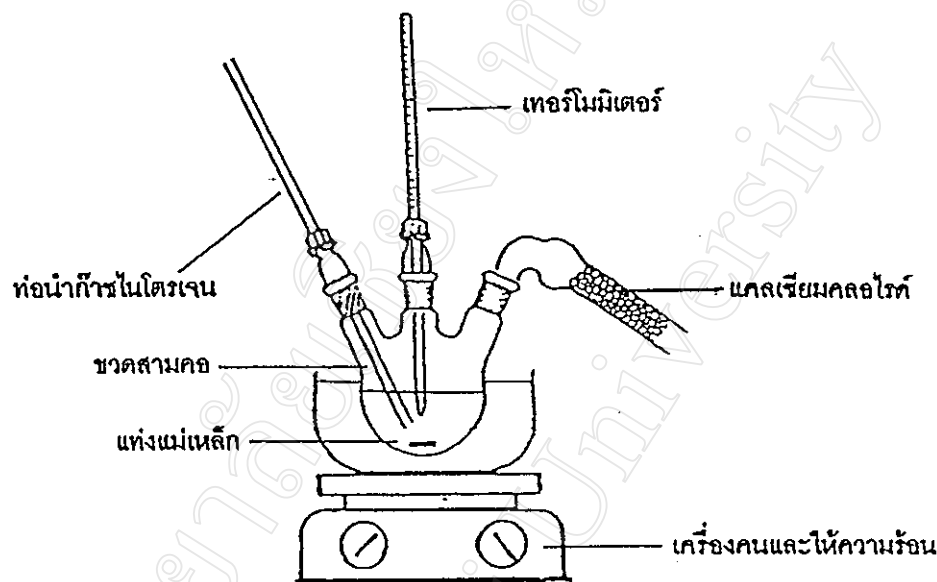
ตาราง 3.2 (ต่อ)

อุปกรณ์และเครื่องมือ	รุ่น	บริษัทผู้ผลิต
ยูเบลโลห์ วิตโคมิเตอร์ (Ubbelohde Viscometer)	532 00 Size 00	Schott-Gerate
เครื่องวัดความหนืดระบบ อัตโนมัติพร้อมเครื่องพิมพ์ข้อมูล	AVS 300	Schott-Gerate
(Automatic Viscosity Measuring System and Measuring System Data Printer)		
เครื่องชั่ง (Electric balance)	BS 210S	Sartorius Basic

3.2 การทำตัวริเริ่มปฏิกิริยาและมอนอเมอร์ให้บริสุทธิ์

3.2.1 เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) [47]

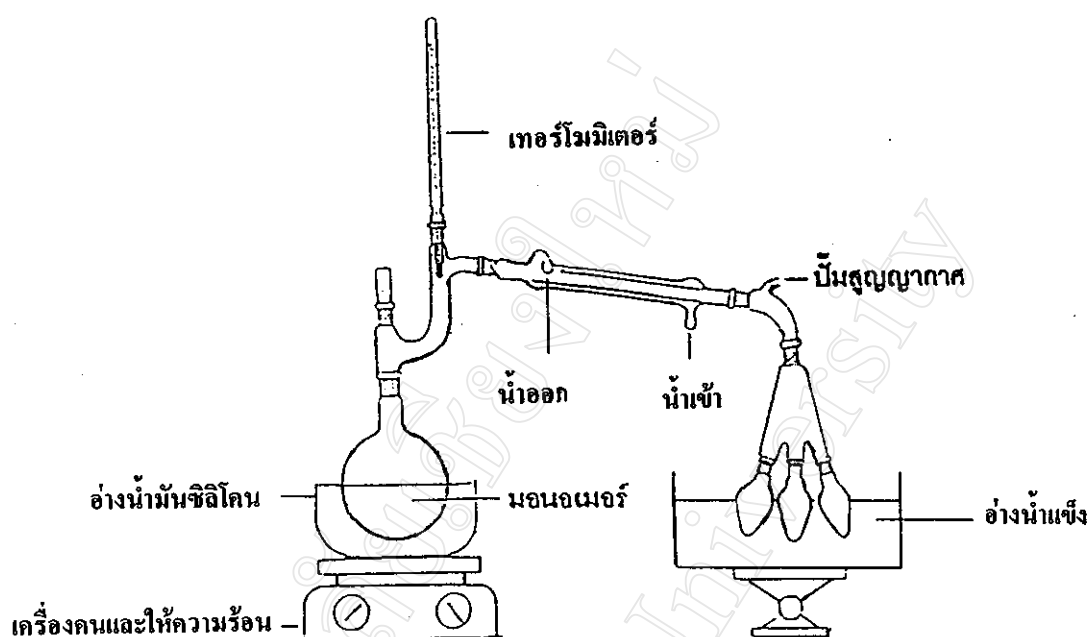
เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ทำให้บริสุทธิ์โดยการตกผลึกในเมธานอล วิธีการทำได้ดังนี้ ละลายเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 10 g ในคลอโรฟอร์ม 25 ml จากนั้นแยกน้ำออกแล้วนำชั้นคลอโรฟอร์มไปอุ่นที่ 40°C ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ดังรูป 3.1 แล้วเติมเมธานอลประมาณ 75 ml ลงไป ปล่อยให้ตกผลึก กรองผลึกที่ได้ ล้างด้วยเมธานอล จากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิห้อง จนน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์สุญญากาศจนกว่าจะใช้งาน



รูป 3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการตกผลึกใหม่ของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

3.2.2 เมทิลเมทาครีเลต (Methyl methacrylate, MMA) และเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน (N-Vinyl-2-pyrrolidone, VP) [48, 49]

เมทิลเมทาครีเลต เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย ส่วนเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อนๆ สารทั้งสองทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นแบบลดความดัน โดยในขั้นตอนแรกเติมแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (anhydrous sodium sulphate) ลงในมอนอเมอร์ ทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองเอาแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟตออก ใส่มอนอเมอร์ประมาณ 150 ml ลงในขวดก้นกลม แล้วเติมคอปเปอร์(I)คลอไรด์ 0.15 g (1 g/l) เพื่อป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างกลั่น นำไปกลั่นภายใต้ความดันต่ำ โดยจัดอุปกรณ์ดังรูป 3.2 เก็บเมทิลเมทาครีเลตที่อุณหภูมิคงที่ที่ 32°C (54 °C ที่ความดัน 35 mmHg [50]) ภายใต้ความดัน 10 mmHg ส่วนเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเก็บเมื่อจุดเดือดคงที่ที่ 71°C ภายใต้ความดัน 3-4 mmHg (68°C ที่ความดัน 2 mmHg [51]) มอนอเมอร์ที่กลั่นแล้วเก็บในขวดสีชาที่มีเม็ดดูดความชื้น และทำการผ่านก๊าซไนโตรเจนประมาณ 15 นาทีก่อนเก็บไว้ในตู้เย็นจนกว่าจะใช้งาน



รูป 3.2 การจัดตั้งอุปกรณ์การกลั่นมอนอเมอร์แบบลดความดัน

3.3 การหาสภาวะโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย

3.3.1 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและตัวทำละลายที่เหมาะสม

การหาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและตัวทำละลายที่เหมาะสมในการเตรียม พอลิ(เมธิล-เมทาครีเลต-สแตต-เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) (P(MMA-*stat*-VP)) นั้น ใช้อัตราส่วนของโคมอนอเมอร์ MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนักในการทดลอง ตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิดด้วยกันคือ ไอโซโพรพานอล เติตระไฮโดรฟูราน คลอโรฟอร์ม และไซโคลเฮกเซน

3.3.1.1 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์เพื่อหาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและตัวทำละลายที่เหมาะสม

3.3.1.1.1 การทดลอง

ผสม MMA และ VP ในอัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ (BPO)) 0.20 โมล% และตัวทำละลายในขวดก้นกลม ขนาด 250 ml ปริมาตรและน้ำหนักของสารผสมที่ใช้ทำปฏิกิริยาแสดงดังตาราง 3.3 จัดตั้งอุปกรณ์ ดังรูป 3.3 ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลายเป็นเวลา 20 นาที แล้วยกท่อก๊าซไนโตรเจนขึ้นเหนือ

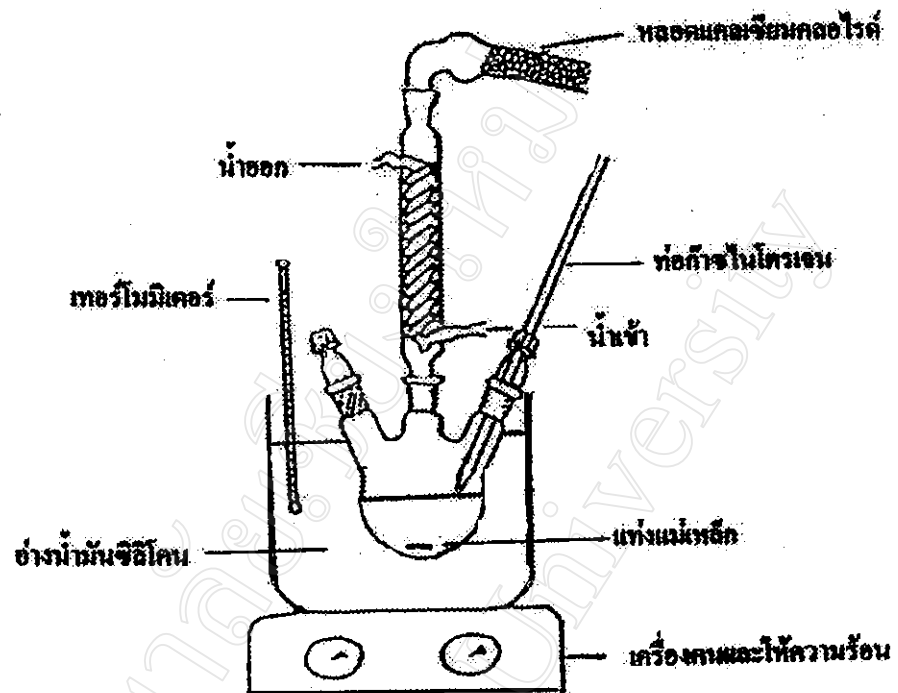
ระดับสารละลายเพื่อป้องกันการอุดตันของท่อที่กระหว่างเกิดปฏิกิริยา จากนั้นจุ่มขวดก้นกลมลงในอ่างน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 70°C เริ่มจับเวลาของการเกิดปฏิกิริยา เปิดสารละลายออกมาจากขวดปฏิกิริยา 2.00 ml (ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในสารละลาย = 0.499 g/ml) ทุกๆ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปตกตะกอนในนอร์มอล-เฮกเซนเย็น กรองตะกอนที่ได้ด้วยซินเตอร์กลาส (sintered glass) ที่ซังน้ำหนักแล้ว จากนั้นนำไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ แล้วนำมาชั่งหาน้ำหนักของโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ

การทดลองที่ใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลาย หลังชั่วโมงที่ 10 สารละลายหนืดมากจึงเติมเตตระไฮโดรฟูรานลงไปอีก 10 ml ทำให้ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในสารละลายเท่ากับ 0.420 g/ml และในระบบที่ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป 14 ชั่วโมง สารละลายหนืดมากจึงเติมคลอโรฟอร์มลงไปอีก 20 ml ทำให้ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในสารละลายเท่ากับ 0.343 g/ml

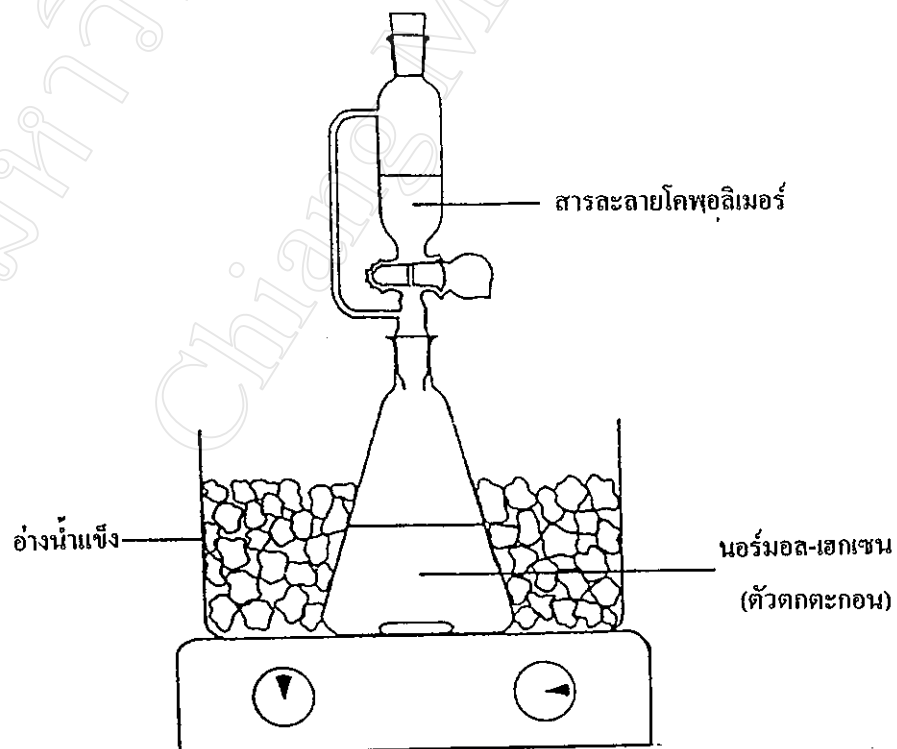
หลังจากสิ้นสุดการทดลองนำสารละลายโคพอลิเมอร์ที่เหลือไปตกตะกอนในนอร์มอล-เฮกเซนเย็น จัดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.4 แล้วกรองพอลิเมอร์ที่ได้ นำไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ เพื่อนำไปหาความหนืดอินทรีนซิกต่อไป

ตาราง 3.3 ปริมาณของสารผสมที่ใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์เพื่อหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาและตัวทำละลายที่เหมาะสม

ปริมาณสารเคมี	ตัวทำละลายที่ใช้ในปฏิกิริยา			
	ไอโซโพรพานอล	เตตระไฮโดรฟูราน	คลอโรฟอร์ม	ไซโคลเฮกเซน
ปริมาตรของตัวทำละลาย (ml)	50.0	50.0	50.0	50.0
ปริมาตรของ MMA (ml)	26.5	27.0	26.5	27.0
คิดเป็นน้ำหนัก (g)	25.0	25.4	25.0	25.4
ปริมาตรของ VP (ml)	24.0	24.5	24.0	24.5
คิดเป็นน้ำหนัก (g)	25.1	25.6	25.1	25.6
น้ำหนักของ BPO (g)	0.2302	0.2336	0.2302	0.2336
คิดเป็น โมล%	0.20	0.20	0.20	0.20



รูป 3.3 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย



รูป 3.4 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับตกตะกอนโคพอลิเมอร์

3.3.1.1.2 ผลการทดลอง

จากน้ำหนักของโคพอลิเมอร์ที่ได้คำนวณเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน (% conversion) ของขบวนการโคพอลิเมอไรเซชัน ณ เวลาต่าง ๆ ได้ดังสมการ (3.1)

$$\text{เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน} = \frac{\text{น้ำหนักโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{น้ำหนักมอนอเมอร์เริ่มต้น}} \quad (3.1)$$

ในการทดลองที่ใช้ไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลายไม่สามารถหาเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันได้ เนื่องจากโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นตกตะกอนแยกออกมาจากสารละลายและแข็งติดขวดไซโคลเฮกเซนจึงเป็นตัวทำละลายที่ไม่เหมาะสมสำหรับขบวนการโคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายของ MMA และ VP

เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันที่เวลาต่างๆ ของขบวนการโคพอลิเมอไรเซชันโดยใช้ไอโซโพรพานอล เตตระไฮโดรฟูราน และคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย และกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาแสดงในตาราง 3.4-3.6 และรูป 3.5-3.7 ตามลำดับ

ตาราง 3.4 น้ำหนักโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นและเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน ณ เวลาต่าง ๆ ของปฏิกิริยา
การสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้
ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย

เวลาในการเกิด ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักมอนอเมอร์เริ่มต้น (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น (g)	% คอนเวอร์ชัน
0	0.000	0.0000	0.0
1	0.998	0.0976	9.8
2	0.998	0.1583	15.9
3	0.998	0.2189	21.9
4	0.998	0.3349	33.5
5	0.998	0.3560	35.7
6	0.998	0.4737	47.5
7	0.998	0.5184	51.9
8	0.998	0.5546	55.6
9	0.998	0.6330	63.4
10	0.998	0.6470	64.8
12	0.998	0.7015	70.3
14	0.998	0.7006	70.2
16	0.998	0.7100	71.1
18	0.998	0.7213	72.3
20	0.998	0.7324	73.4
22	0.998	0.7395	74.1
24	0.998	0.7077	70.9
26	0.998	0.7096	71.1

ตาราง 3.5 น้ำหนักโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นและเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน ณ เวลาต่าง ๆ ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลาย

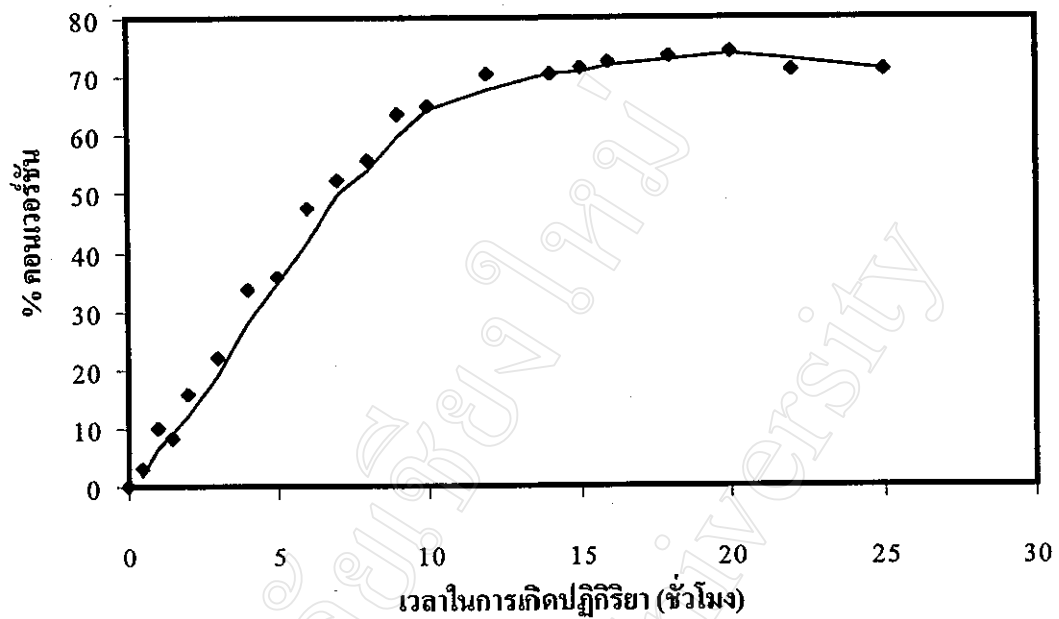
เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักมอนอเมอร์เริ่มต้น (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น (g)	% คอนเวอร์ชัน
0	0.00	0.0000	0.0
1	1.004	0.0356	3.5
2	1.004	0.0815	8.1
3	1.004	0.2531	25.2
4	1.004	0.3698	36.8
5	1.004	0.4623	46.0
6	1.004	0.4904	48.8
7	1.004	0.5582	55.6
8	1.004	0.6489	64.6
9	1.004	0.6618	66.0
10*	1.004	0.7187	71.6
12	0.841	0.7064	84.0
13	0.841	0.6980	83.0
14	0.841	0.7059	83.9
15	0.841	0.7485	89.0
16	0.841	0.7481	89.0
18	0.841	0.7744	92.1
20	0.841	0.7653	91.0
22	0.841	0.7495	89.1
24	0.841	0.7479	88.9
26	0.841	0.7571	90.0

* เติมเตตระไฮโดรฟูรานลงไปอีก 10.0 มิลลิลิตร

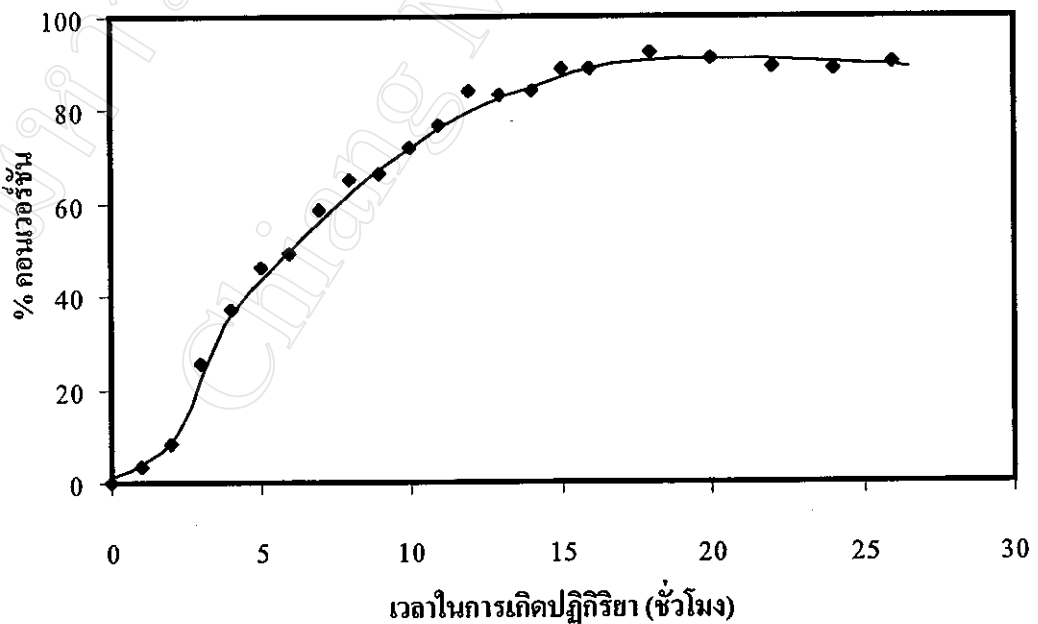
ตาราง 3.6 น้ำหนักโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นและเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน ณ เวลาต่าง ๆ ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-stat-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย

เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักมอนอเมอร์เริ่มต้น (g)	น้ำหนักพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น (g)	% คอนเวอร์ชัน
0	0.000	0.0000	0.0
1	0.998	0.0898	9.0
2	0.998	0.1726	17.3
3	0.998	0.2765	27.7
4	0.998	0.3828	38.4
5	0.998	0.5837	58.5
6	0.998	0.6777	67.9
7	0.998	0.6965	69.8
8	0.998	0.7089	71.0
9	0.998	0.7187	72.0
10	0.998	0.7787	60.0
11	0.998	0.7986	77.6
12	0.998	0.8187	79.9
13	0.998	0.8486	82.1
14 **	0.998	0.8885	84.5
16	0.686	0.6110	87.8
18	0.686	0.6420	89.6
20	0.686	0.6384	90.9
22	0.686	0.6316	93.0
24	0.686	0.6391	92.0
26	0.686	0.6522	89.4

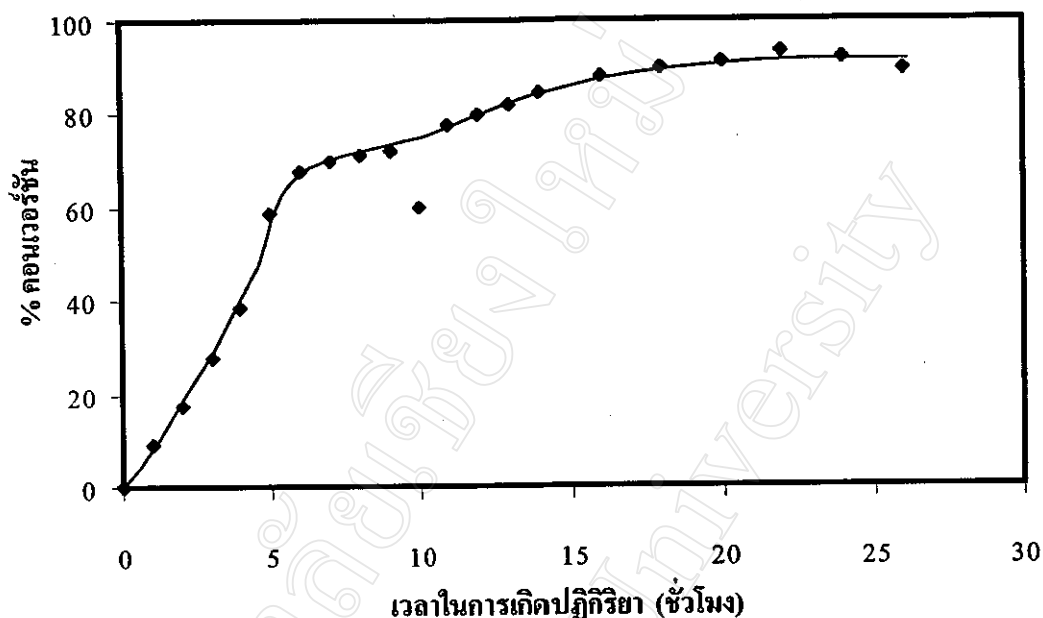
** เติมคลอโรฟอร์มลงไปอีก 20.0 มิลลิลิตร



รูป 3.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนักร โดยใช้อิโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย



รูป 3.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนักร โดยใช้นิโคตโรนเป็นตัวทำละลาย



รูป 3.7 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-stat-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยใช้น้ำหนักโดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย

รูป 3.5-3.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ ไอโซโพรพานอล เติระไฮโดรฟลูรอน และคลอโรฟอร์ม เป็นตัวทำละลาย ค่าเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาเริ่มมีค่าคงที่ที่เวลา 20, 18 และ 22 ชั่วโมง ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้ ไอโซโพรพานอล เติระไฮโดรฟลูรอน และคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย จึงควรใช้มากกว่า 20, 18 และ 22 ชั่วโมง ตามลำดับ

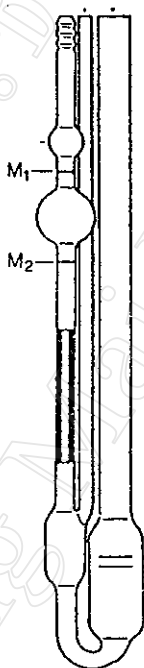
3.3.1.2 การหาความหนืดอินทรีนซิก

การวัดความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ เป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมในการหาข้อมูลเกี่ยวกับน้ำหนักโมเลกุล ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย ธรรมชาติของตัวทำละลาย ชนิดและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนืดมีค่ามากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิเพิ่มจะทำให้ความหนืดมีค่าลดลง [52]

วิสโคมิเตอร์แบบคาปิลลารีสำหรับหาความหนืดที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ วิสโคมิเตอร์แบบออสวาลด์ (Oswald viscometer) และวิสโคมิเตอร์แบบยูเบลโลด์ (Ubbelohde

viscometer) วิสโคมิเตอร์ทั้งสองมีหลักการคล้ายคลึงกัน แต่ต่างกันตรงที่วิสโคมิเตอร์แบบยูเบโลคค์สามารถเจือจางความเข้มข้นของสารละลายได้ภายในวิสโคมิเตอร์

เทคนิคที่ใช้ในการหาความหนืดที่จะกล่าวถึงในที่นี้ คือ เทคนิควิสโคเมตรีแบบสารละลายเจือจาง (Dilute-Solution Viscometry) ในการทดลองใช้สารละลายพอลิเมอร์อย่างน้อย 4 ความเข้มข้น โดยความเข้มข้นของสารละลายควรมีค่าน้อยๆ เพื่อลดผลของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลและการพันกันของสายโซ่ [53] วัดเวลาการไหลของตัวทำละลายและสารละลายพอลิเมอร์จากระดับ M_1 ถึง M_2 ดังรูป 3.8 เวลาในการไหลที่ได้ต้องมีค่าใกล้เคียงกันอย่างน้อย 3 ครั้ง จากค่าเวลาของการไหลที่ได้สามารถนำไปคำนวณความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ๆ ได้ดังนี้



รูป 3.8 วิสโคมิเตอร์แบบยูเบโลคค์ (Ubbelohde Viscometer) [54]

การคำนวณความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์

ความหนืดของตัวทำละลาย (η_0) [55] ได้จาก

$$\begin{aligned}\eta_0 &= A\rho_0 t_0 - B\rho_0/t_0 \\ &= A\rho_0 t_0 (1 - B/At_0^2)\end{aligned}\quad (3.2)$$

ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ (η) [55] ได้จาก

$$\begin{aligned}\eta &= A\rho t - B\rho/t \\ &= A\rho t (1 - B/At^2)\end{aligned}\quad (3.3)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่ของวิสโคมิเตอร์แต่ละอัน

ρ_0 และ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลายบริสุทธิ์และสารละลายพอลิเมอร์ ตามลำดับ

t_0 และ t คือ เวลาของการไหลของตัวทำละลายบริสุทธิ์และสารละลายพอลิเมอร์ ตามลำดับ

ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity, η_r) หาได้จากการเปรียบเทียบ ค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์กับความหนืดของตัวทำละลาย [55] ดังสมการ (3.4)

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{A\rho t(1 - B/At^2)}{A\rho_0 t_0(1 - B/At_0^2)} \quad (3.4)$$

ในสารละลายพอลิเมอร์ที่เจือจางมากๆ ($\leq 1 \text{ g/100 ml}$) ความหนาแน่นของสารละลายพอลิเมอร์ และตัวทำละลายมีค่าใกล้เคียงกัน ($\rho_0 \approx \rho$) และที่เวลาของการไหล (t_0 และ t) มากกว่า 100 วินาที ทำให้เทอม $B\rho/t_0^2$ และ $B\rho/t^2$ มีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ η_r จึงมีค่าดังนี้

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t}{t_0} \quad (3.5)$$

หากพิจารณาในเทอมการเพิ่มความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เทียบกับความหนืดของตัวทำละลายบริสุทธิ์ ความหนืดที่ได้เรียกว่า ความหนืดจำเพาะ (specific viscosity, η_{sp}) [55]

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{t - t_0}{t_0} = \eta_r - 1 \quad (3.6)$$

η_r และ η_{sp} เป็นความหนืดที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ เมื่อหารค่าความหนืดจำเพาะด้วยความเข้มข้น ความหนืดที่ได้เรียกว่า ความหนืดรีดิวซ์ (reduced viscosity, η_{red}) [56] ดังสมการ (3.7)

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} = \frac{\eta_r - 1}{c} \quad (3.7)$$

และค่าลอการิทึมของความหนืดสัมพัทธ์ต่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ เรียกว่า ความหนืดอินเฮริเอนท์ (inherent viscosity, η_{inh}) [55] ดังสมการ (3.8)

$$\eta_{inh} = \frac{\ln \eta_r}{c} \quad (3.8)$$

เมื่อ c คือ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ (g/dl)

แต่อย่างไรก็ตาม η_{red} และ η_{inh} ก็ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ดังสมการของฮักกินส์ (Huggins equation) [56]

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta] + k' [\eta]^2 c \quad (3.9)$$

และสมการของเครเมอร์ (Kraemer equation) [56]

$$\eta_{inh} = \frac{\ln \eta_r}{c} = [\eta] + k'' [\eta]^2 c \quad (3.10)$$

เมื่อ $[\eta]$ คือ ความหนืดอินทรีนซิก (Intrinsic viscosity)

k' คือ ค่าคงที่ของฮักกินส์ (Huggins constant)

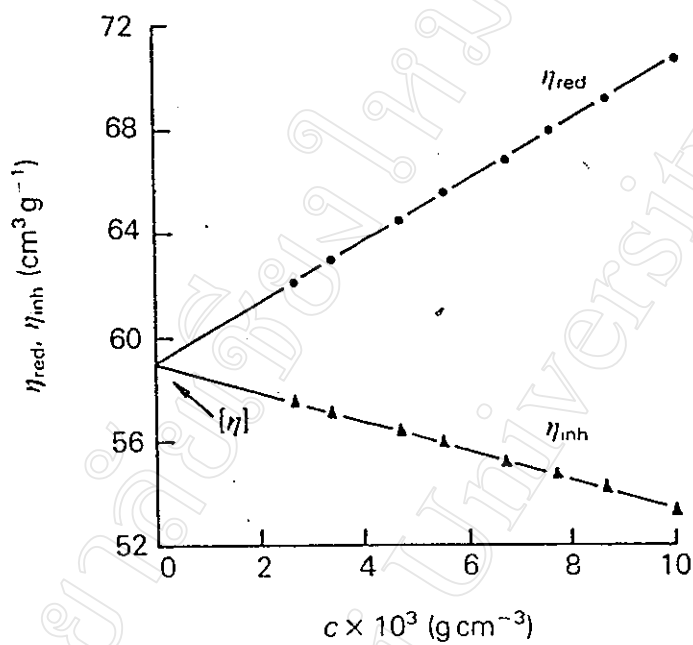
k'' คือ ค่าคงที่ของเครเมอร์ (Kraemer constant)

ค่า $k' - k'' = 0.50$ โดยทั่วไป $0.3 < k' < 0.5$ [53] และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความแรงของตัวทำละลายลดลง

จากสมการ 3.9 และ 3.10 ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำมากๆ เทอมสุดท้ายสามารถตัดทิ้งได้ [56] จะได้ว่า

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} (\eta_{sp} / c) = \lim_{c \rightarrow 0} [(\ln \eta_r) / c] \quad (3.11)$$

ค่าความหนืดอินทรีนซิกสามารถหาได้จากจุดตัดของกราฟที่พล็อตระหว่าง η_{sp} / c กับ c และ $(\ln \eta_r) / c$ กับ c ดังตัวอย่างรูป 3.9



รูป 3.9 การหาค่า $[\eta]$ ของสารละลายของพอลิ(บิวทิลอะคริเลต) ในโทลูอีน ที่อุณหภูมิ 25°C โดยใช้การพลอตแบบฮักกินส์-เครเมอร์ [57]

จากสมการ 3.2-3.11 พารามิเตอร์ทางความหนืดทั้งหมดสรุป ดังตาราง 3.7

ตาราง 3.7 ปริมาณและเทอมต่างๆ ที่ใช้ในเทคนิควิสโคเมตรีแบบสารละลายเจือจาง [53,57]

ชื่อสามัญ (Common name)	ชื่อที่กำหนดโดย IUPAC (Name proposed by IUPAC)	สัญลักษณ์และความหมาย (Symbol and definition)
ความหนืดสัมพัทธ์ (Relative viscosity)	อัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio)	$\eta_r = \eta / \eta_0 = t/t_0$
ความหนืดจำเพาะ (Specific viscosity)	-	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$
ความหนืดรีดิวซ์ (Reduced viscosity)	เลขความหนืด (Viscosity number)	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$
ความหนืดอินเฮียเรนท์ (Inherent viscosity)	เลขความหนืดลอการิทึม (Logarithmic viscosity number)	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
ความหนืดอินทรินซิก (Intrinsic viscosity)	เลขความหนืดจำกัด (Limiting viscosity number)	$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} (\eta_{sp}/c)$ $= \lim_{c \rightarrow 0} [(\ln \eta_r)/c]$

3.3.1.2.1 การทดลอง

โคพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในตัวทำละลายต่างๆ หลังจากเปลี่ยนตัวคอนเวอร์ชันคองที่ นำไปหาความหนืดอินทรินซิก โดยใช้เทคนิควิสโคเมตรีแบบสารละลายเจือจาง (Dilute-Solution Viscometry) วิสโคมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบยูเบโลดส์ (Ubbelohde Viscometer) ดังรูป 3.8

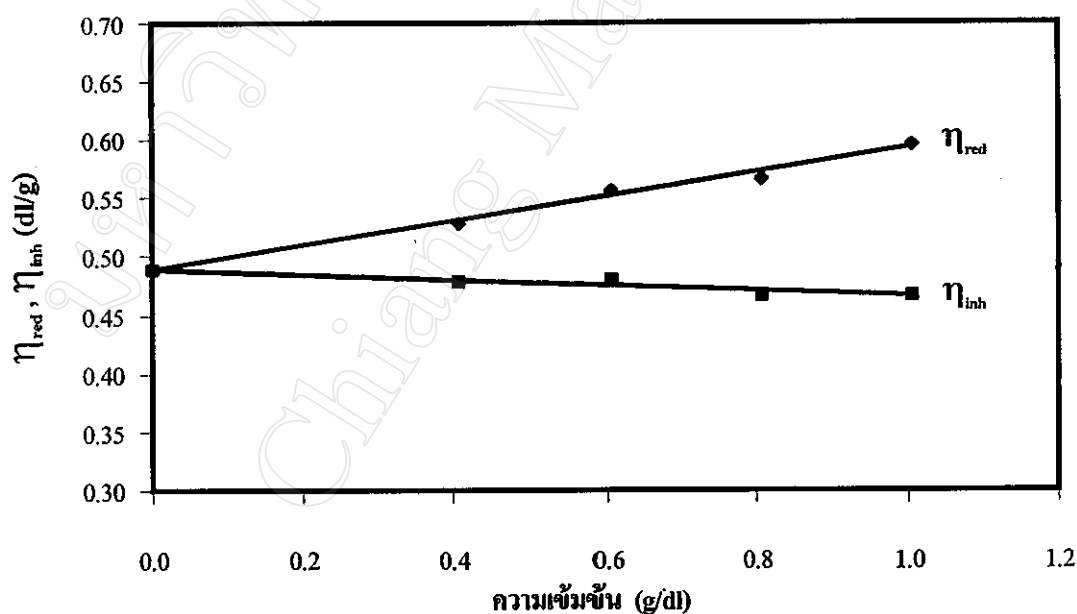
การหาค่าความหนืดอินทรินซิกของโคพอลิเมอร์ทำโดยเตรียมสารละลายโคพอลิเมอร์ 4 ความเข้มข้นในหน่วย g/dl โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย จากนั้นหาเวลาของการไหล (flow time) ของตัวทำละลายและสารละลายโคพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$

3.3.1.2.2 ผลการทดลอง

เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืดต่างๆ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่ตั้งเครื่อง โดยใช้ไอโซโพรพานอล เติตระไฮโดรฟลูอีน และคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย และความเข้มข้นระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้นในหน่วย g/dl แสดงดังตาราง 3.8-3.10 และ รูป 3.10-3.12 ตามลำดับ ความหนืดอินทรีนซิกของโคพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้ตัวทำละลายต่างๆ กัน แสดงดัง ตาราง 3.11

ตาราง 3.8 เวลาของการไหลและพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนของโคมอนอเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่สังเคราะห์โดยใช้ไอโซโพรพานอล เป็นตัวทำละลาย

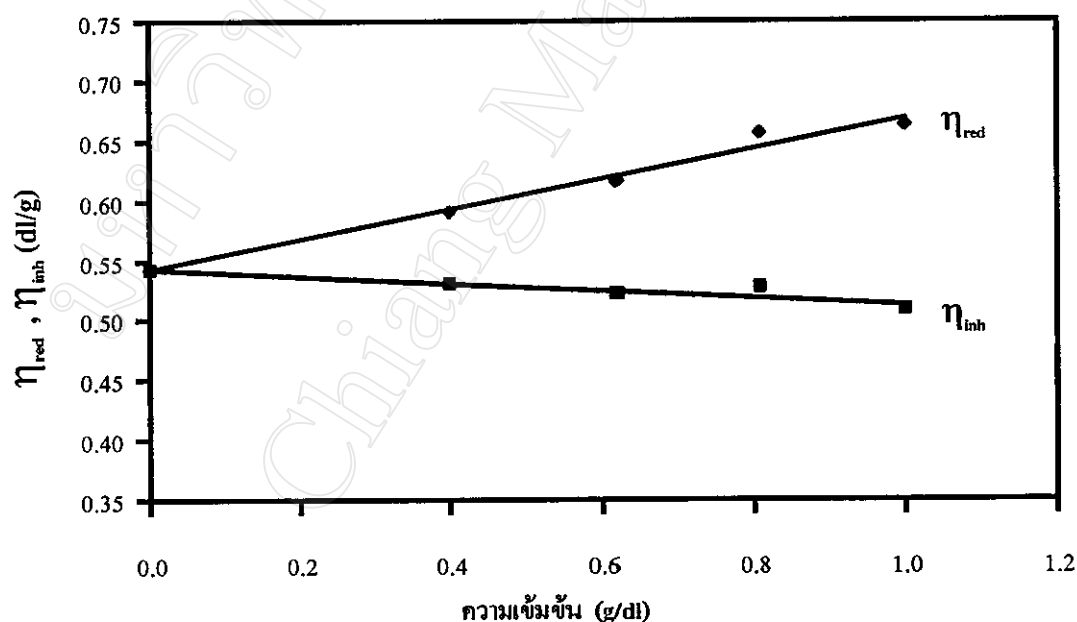
ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = t/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.4084	442.2	1.216	0.216	0.529	0.479
0.6060	486.4	1.337	0.337	0.556	0.480
0.8084	530.0	1.457	0.457	0.566	0.466
1.0076	585.2	1.600	0.600	0.596	0.467
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 363.7$	-	-	-	-



รูป 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้น ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่สังเคราะห์โดยใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย

ตาราง 3.9 เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่สังเคราะห์โดยใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลาย

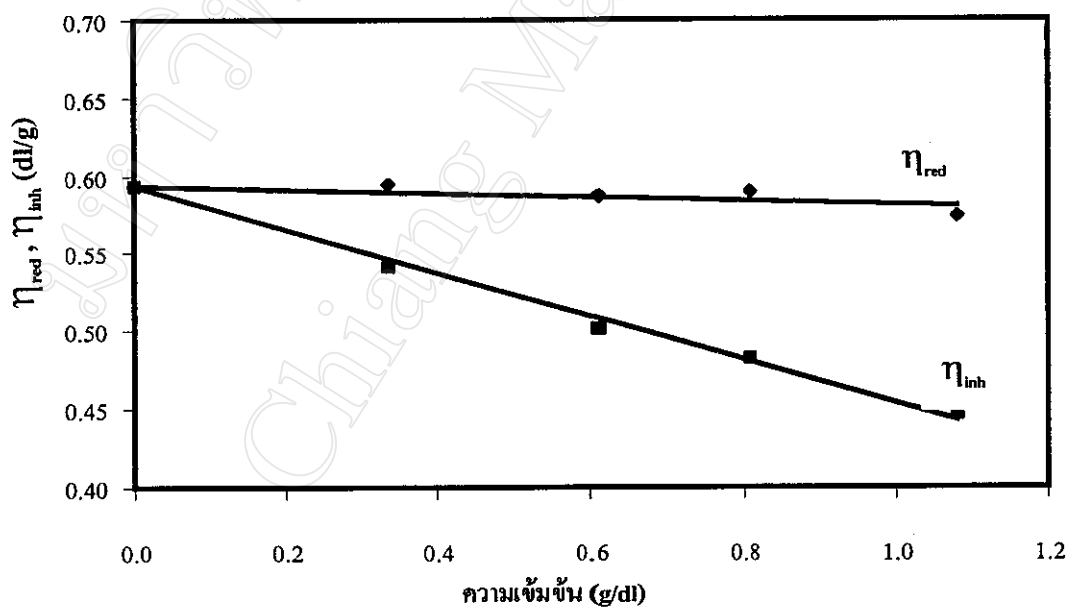
ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = v/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.4000	450.4	1.236	0.236	0.591	0.530
0.6190	502.3	1.381	0.3841	0.616	0.522
0.8080	556.6	1.530	0.530	0.656	0.527
1.0010	604.8	1.663	0.663	0.662	0.508
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 363.7$	-	-	-	-



รูป 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้น ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่สังเคราะห์โดยใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลาย

ตาราง 3.10 เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-stat-VP) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่สังเคราะห์โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย

ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = v/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.3360	438.1	1.200	0.200	0.594	0.542
0.6100	496.4	1.358	0.358	0.587	0.502
0.8096	540.2	1.477	0.477	0.590	0.482
1.0796	592.4	1.619	0.619	0.574	0.446
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 364.7$	-	-	-	-



รูป 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้น ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-stat-VP) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่สังเคราะห์โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย

ตาราง 3.11 ความหนืดอินทรีนซิก ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกัน

ตัวทำละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์	ความหนืดอินทรีนซิกของสารละลาย P(MMA- <i>stat</i> -VP) ที่สังเคราะห์ได้ (dl/g)
ไอโซโพรพานอล	0.488
เตตระไฮโดรฟูราน	0.542
คลอโรฟอร์ม	0.594

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดอินทรีนซิกกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ แสดงได้ตามสมการของ มาร์ค-เฮาวิง-ซากูราดา (Mark –Houwink-Sakurada Equation) [57]

$$[\eta] = K\bar{M}_v^a \quad (3.12)$$

เมื่อ K และ a คือ ค่าคงที่สำหรับพอลิเมอร์ที่ขึ้นกับชนิดของตัวทำละลายและอุณหภูมิหนึ่งๆ

$\bar{M}_v$ คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด

$[\eta]$ คือ ความหนืดอินทรีนซิก

จากความสัมพันธ์ในสมการ (3.12) แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนืดอินทรีนซิก ดังนั้นจึงสามารถเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้จากค่าความหนืดอินทรีนซิกโดยตรง ในการทดลองนี้จึงทำการเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ตัวทำละลายต่าง ๆ จากค่าความหนืดอินทรีนซิก พอลิเมอร์ที่มีค่าความหนืดอินทรีนซิกสูง แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลสูงด้วย

เมื่อเปรียบเทียบค่า $[\eta]$ ของโคพอลิเมอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา โดยใช้ไอโซโพรพานอล เตตระไฮโดรฟูราน และ คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย จะเห็นได้ว่า โคพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายมีค่า $[\eta]$ ต่ำสุด ส่วนเตตระไฮโดรฟูรานและคลอโรฟอร์มให้โคพอลิเมอร์ที่มีค่า $[\eta]$ ใกล้เคียงกัน แต่คลอโรฟอร์มมีค่าความเป็นพิษสูงกว่า [58, 59] ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลาย สำหรับขบวนการโคพอลิเมอไรเซชัน

ของ MMA และ VP เวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้น 1 : 1 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลายที่ได้ทำการทดลองมาแล้วข้างต้น จากรูป 3.6 คือ มากกว่า 18 ชั่วโมง การทดลองต่อไปจึงเลือกใช้เวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง

3.3.2 ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสม

การหาปริมาณตัวริเริ่มที่เหมาะสมในการเตรียม P(MMA-*stat*-VP) ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้ความเข้มข้นของเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 5 ความเข้มข้น คือ 0.10, 0.20, 0.30, 0.50 และ 0.60 โมล% ตามลำดับ

3.3.2.1 การทดลอง

ทำการทดลองทั้งหมด 5 การทดลอง โดยผสม MMA และ VP ในอัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในเตตระไฮโดรฟูราน (THF) 50.0 ml จากนั้นเติมเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ตามน้ำหนักที่แสดงในตาราง 3.12 ทำการโคพอลิเมอไรซ์โคมอนอเมอร์นี้ที่อุณหภูมิ 70°C ในบรรยากาศของไนโตรเจน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตักตะกอนโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในนอร์มอล-เฮกเซนเย็น กรองโคพอลิเมอร์ที่ได้ แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 60°C จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักโคพอลิเมอร์ที่ได้ หาเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน แล้วนำโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปหาความหนืดอินทรินซิกตามวิธีในหัวข้อ 3.3.1.2

ตาราง 3.12 ปริมาณสารผสมที่ใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์เพื่อหาปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

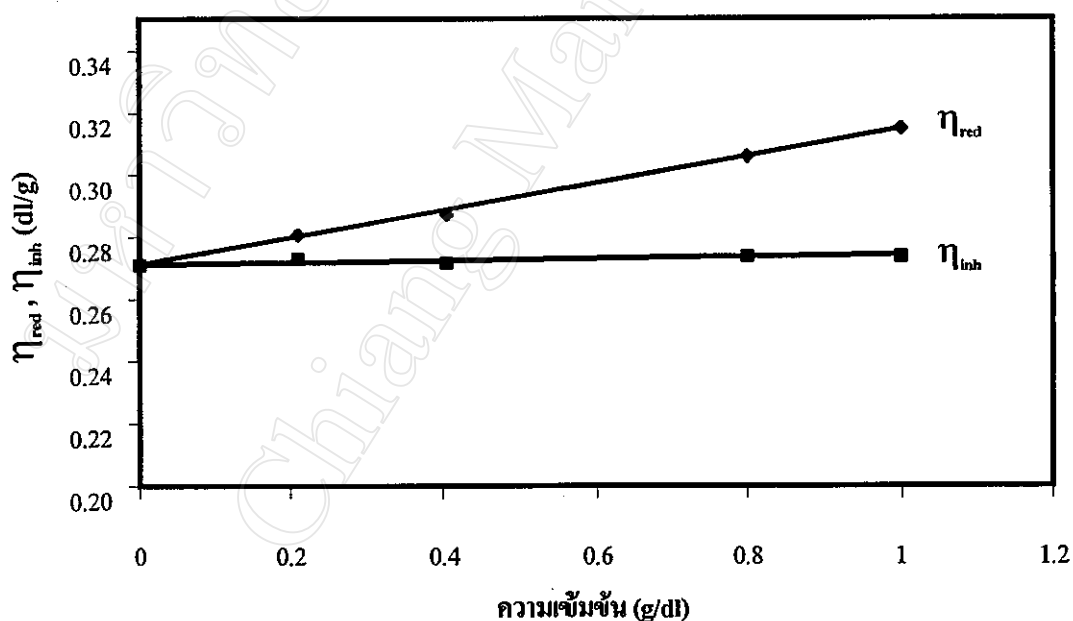
ปริมาณสารเคมี	การทดลองที่				
	1	2	3	4	5
ปริมาตรของ THF (ml)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
ปริมาตรของ MMA (ml)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5
คิดเป็น โมล (mol)	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
ปริมาตรของ VP (ml)	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
คิดเป็น โมล (mol)	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225
น้ำหนักของ BPO (ml)	0.1152	0.2301	0.3465	0.5765	0.6902
คิดเป็น โมล (mol)	4.76×10^{-4}	9.50×10^{-4}	1.43×10^{-3}	2.38×10^{-3}	2.85×10^{-3}
ความเข้มข้นของ BPO (โมล%)	0.10	0.20	0.30	0.50	0.60

3.3.2.2 ผลการทดลอง

เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืดต่างๆ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม โดยใช้ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน แสดงดังตาราง 3.13-3.17 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้นของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วนโมโนเมอร์เริ่มต้น 1 : 1 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน ในคลอโรฟอร์ม แสดงในรูป 3.13-3.17 ตามลำดับ

ตาราง 3.13 เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.10 โมล%

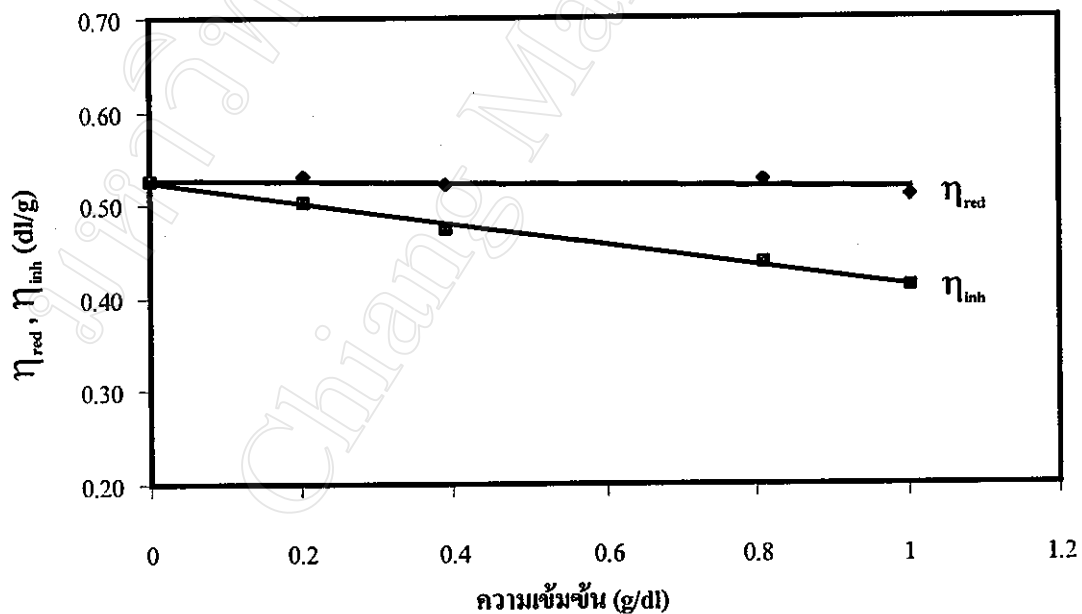
ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = t/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.2088	388.8	1.059	0.089	0.281	0.273
0.4056	410.0	1.116	0.116	0.287	0.272
0.8000	457.1	1.245	0.245	0.306	0.276
1.0000	482.9	1.315	0.315	0.315	0.262
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 367.2$	-	-	-	-



รูป 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้นของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.10 โมล%

ตาราง 3.14 เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.20 โมล%

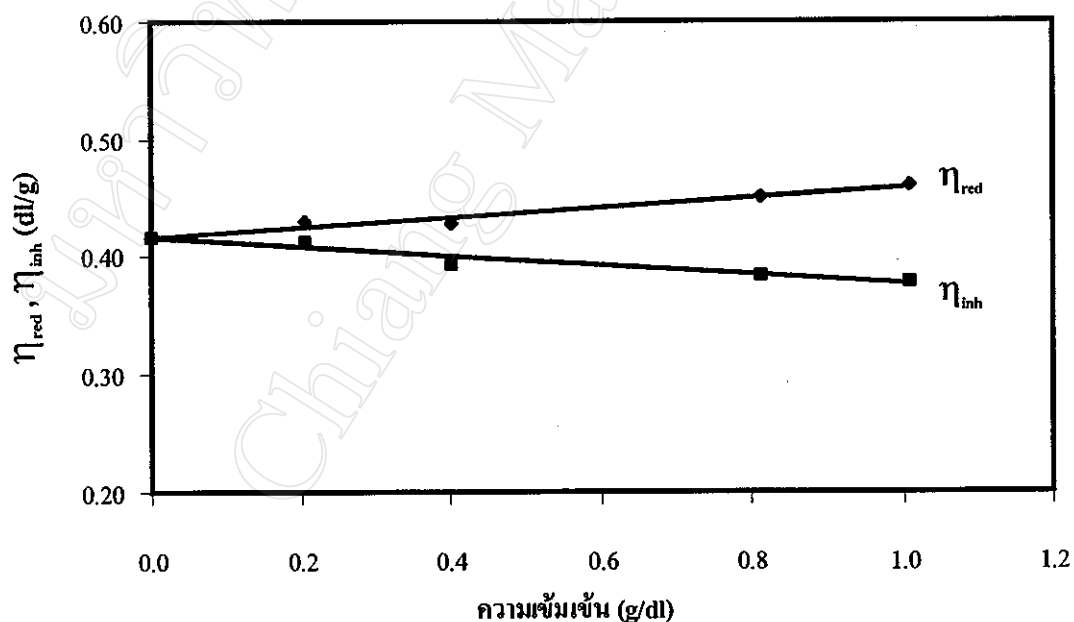
ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = t/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.2060	407.6	1.109	0.109	0.530	0.503
0.3924	442.8	1.205	0.205	0.522	0.475
0.8108	524.5	1.427	0.427	0.527	0.439
1.0012	555.1	1.511	0.511	0.510	0.412
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 367.5$	-	-	-	-



รูป 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้นของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.20 โมล%

ตาราง 3.15 เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.30 โมล%

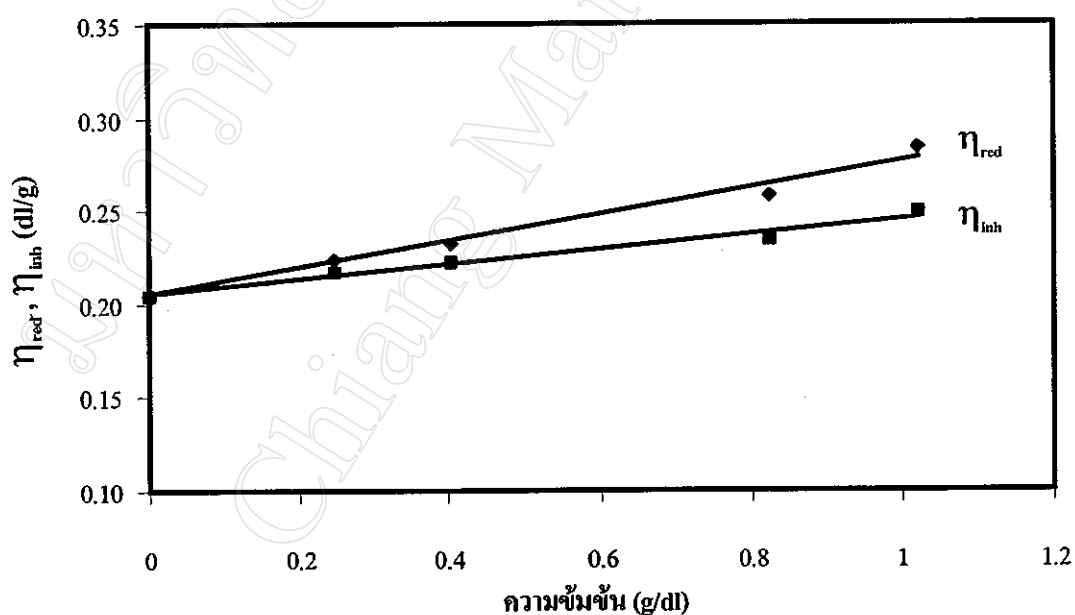
ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = t/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.2072	400.4	1.089	0.089	0.430	0.412
0.4028	430.9	1.172	0.172	0.428	0.395
0.8132	502.1	1.366	0.366	0.450	0.383
1.0092	538.7	1.465	0.465	0.461	0.379
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 367.6$	-	-	-	-



รูป 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้นของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.30 โมล%

ตาราง 3.16 เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.50 โมล%

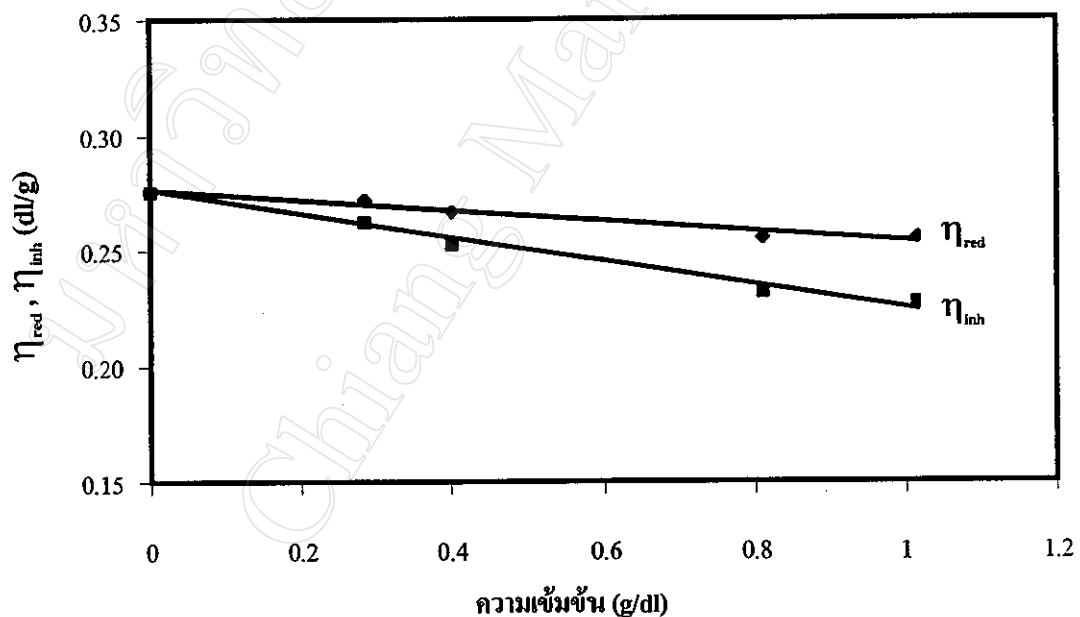
ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = t/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.2860	396.2	1.078	0.078	0.272	0.262
0.4024	407.0	1.107	0.107	0.267	0.253
0.8104	443.6	1.207	0.207	0.255	0.232
1.0148	463.1	1.260	0.260	0.256	0.228
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 367.6$	-	-	-	-



รูป 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้นของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.50 โมล%

ตาราง 3.17 เวลาของการไหลและค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.60 โมล%

ความเข้มข้น, c (g/dl)	เวลาของการไหล เฉลี่ย, t (วินาที)	$\eta_r = t/t_0$	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	$\eta_{red} = \eta_{sp}/c$	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$
0.2488	387.9	1.056	0.056	0.223	0.217
0.4048	401.1	1.094	0.094	0.232	0.222
0.8256	445.7	1.213	0.213	0.258	0.234
1.0192	473.7	1.289	0.289	0.284	0.249
คลอโรฟอร์ม	$t_0 = 367.5$	-	-	-	-

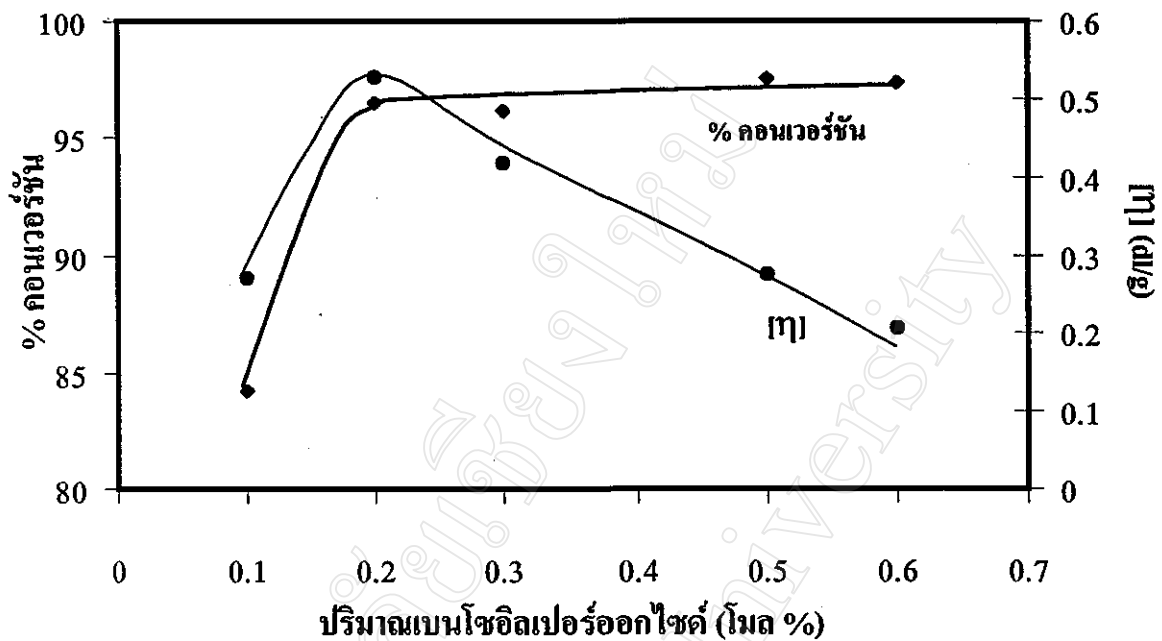


รูป 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} และ η_{inh} กับความเข้มข้นของสารละลาย P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เริ่มต้นเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.60 โมล%

เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน และค่าความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ในคลอโรฟอร์ม แสดงดังตาราง 3.18 และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์กับเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันและความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ในคลอโรฟอร์ม แสดงดังรูป 3.18

ตาราง 3.18 เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน และค่าความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$

ความเข้มข้นของ BPO ที่ใช้ในการสังเคราะห์ (โมล%)	% คอนเวอร์ชัน	ความหนืดอินทรินซิกของสารละลาย P(MMA- <i>stat</i> -VP) ที่สังเคราะห์ได้ (dl/g)
0.10	84.2	0.272
0.20	96.5	0.527
0.30	96.1	0.416
0.50	97.5	0.276
0.60	97.3	0.205



รูป 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์กับเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วน MMA : VP เท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก และความหนืดอินทรินซิกของสารละลายโคพอลิเมอร์ในคลอโรฟอร์ม ณ อุณหภูมิ $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$

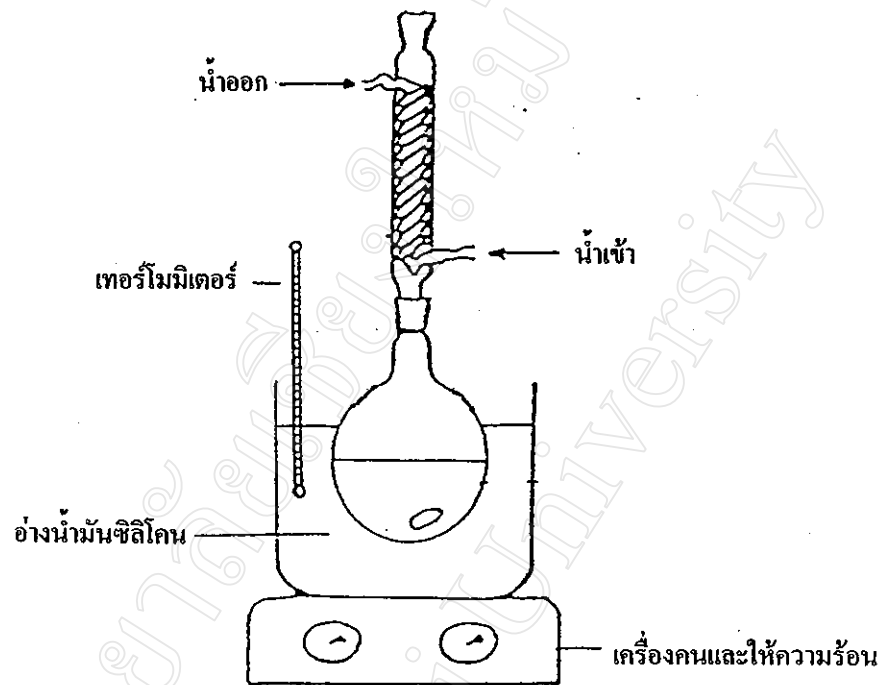
จากรูป 3.18 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 โมล% เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยามีค่าต่ำ แสดงว่าภายในเวลา 24 ชั่วโมง ปฏิกิริยายังเกิดไม่สมบูรณ์ โคพอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ค่าความหนืดอินทรินซิกของโคพอลิเมอร์ที่ได้จึงมีค่าต่ำ ที่ความเข้มข้นของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.20-0.60 โมล% เมื่อเพิ่มปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความหนืดอินทรินซิกของโคพอลิเมอร์ที่ได้มีแนวโน้มลดลง ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ให้โคพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนืดอินทรินซิกสูงสุดคือ ที่ความเข้มข้น 0.20 โมล% ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับ ขบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน ในการทดลองนี้ คือ ทำปฏิกิริยาที่ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลายและใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.20 โมล% เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

3.4 การสังเคราะห์ไฮโมและโคพอลิเมอร์ของเมธิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน

ไฮโมและโคพอลิเมอร์ของเมธิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนที่มีอัตราส่วนของโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ สังเคราะห์ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายในเตตระไฮโดรฟูรานที่อุณหภูมิ 70°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

3.4.1 การทดลอง

ผสม MMA VP และ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.20 โมล% ในเตตระไฮโดรฟูราน น้ำหนักและปริมาตรของสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาแสดงในตาราง 3.19 ทำการพอลิเมอไรซ์ที่ 70°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตกตะกอนไฮโมและโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในนอร์มอล-เฮกเซนเย็น กรองตะกอนที่ได้ แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักไฮโมและโคพอลิเมอร์ที่ได้ นำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยา แบ่งโคพอลิเมอร์มา 30 g เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของโคพอลิเมอร์บันทึกเป็นน้ำหนักก่อนการสกัด จากนั้นใส่โคพอลิเมอร์ลงในน้ำกลั่น 150 ml จัดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.19 รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองโคพอลิเมอร์ส่วนที่เหลือ ล้างด้วยน้ำร้อน แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ บันทึกน้ำหนักโคพอลิเมอร์ที่เหลืออยู่เพื่อนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำต่อไป



รูป 3.19 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับสกัดส่วนที่ละลายน้ำได้ในโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

ตาราง 3.19 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในขบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายของเมทิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน ที่อุณหภูมิ 70°C โดยใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลาย

ปริมาณสารเคมี	ไฮโมหรือโคพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์				
	PMMA	P(MMA-stat-20%VP)	P(MMA-stat-30%VP)	P(MMA-stat-40%VP)	P(MMA-stat-50%VP)
ปริมาตรของ THF (ml)	100	150	150	150	100
ปริมาตรของ MMA (ml)	53.0	84.5	74.0	64.0	26.5
คิดเป็นน้ำหนัก (g)	50.0	79.8	69.8	60.4	25.0
ปริมาตรของ VP (ml)	-	19.0	29.0	39.0	24.0
คิดเป็นน้ำหนัก (g)	-	20.1	30.3	40.8	25.0
น้ำหนักของ BPO (g)	0.2480	0.4952	0.4696	0.4654	0.2306

ตาราง 3.19 (ต่อ)

ปริมาณสารเคมี	โซโม่หรือโคพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์			
	P(MMA-stat-60%VP)	P(MMA-stat-70%VP)	P(MMA-stat-80%VP)	P(MMA-stat-90%VP)
ปริมาตรของ THF (ml)	100	100	150	150
ปริมาตรของ MMA (ml)	24.0	16.0	21.0	10.5
คิดเป็นน้ำหนัก (g)	22.6	15.1	19.8	9.9
ปริมาตรของ VP (ml)	32.0	33.5	76.5	86.0
คิดเป็นน้ำหนัก (g)	33.4	35.0	79.9	89.9
น้ำหนักของ BPO (g)	0.2570	0.2268	0.4483	0.4427
				0.1358

3.4.2 ผลการทดลอง

เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโมและโคพอลิเมอร์ของเมธิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนที่อัตราส่วนของโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน และลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของพอลิเมธิลเมทาครีเลต (PMMA) พอลิ(เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคน) (PVP) และพอลิ(เมธิลเมทาครีเลต-สแตต-เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคน) (P(MMA-*stat*-VP)) ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังตาราง 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำของ P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน แสดงในตาราง 3.22

ตาราง 3.20 เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของขบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายของเมธิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคน ที่อุณหภูมิ 70°C โดยใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลาย

ไฮโมหรือโคพอลิเมอร์ ที่สังเคราะห์ได้	น้ำหนักมอนอเมอร์ เริ่มต้น (g)	น้ำหนักไฮโมหรือโค- พอลิเมอร์ที่ได้ (g)	% คอนเวอร์ชัน
PMMA	50.0	49.4174	98.8
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	99.9	98.4613	98.6
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	100.1	90.8660	90.8
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	101.2	90.6275	89.6
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	50.0	49.2012	98.4
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	56.0	40.1612	71.7
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	50.1	32.4770	64.8
P(MMA- <i>stat</i> -80%VP)	99.7	52.1216	52.3
P(MMA- <i>stat</i> -90%VP)	99.8	48.9294	49.0
PVP	30.3	23.3479	77.1

ตาราง 3.21 ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของ PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วน โคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันที่สังเคราะห์ได้

โพลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ ที่สังเคราะห์ได้	ลักษณะทางกายภาพ
PMMA	เป็นเม็ดแข็ง ใส
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	เป็นเม็ดสีขาว แข็ง
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	เป็นเม็ดสีขาว แข็ง
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	เป็นเม็ดสีขาว แข็ง
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	เป็นเม็ดสีขาว แข็ง
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	เป็นเม็ดสีขาว เปราะ ในระหว่างตกตะกอนเหนียวติด ภาชนะเล็กน้อย เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจับกันเป็นก้อน
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	เป็นเม็ดสีขาว เปราะ ในระหว่างตกตะกอนเหนียวติดภาชนะ เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเหนียวมากและจับกันเป็นก้อน
P(MMA- <i>stat</i> -80%VP)	เป็นผงสีขาว ในระหว่างตกตะกอนเหนียวติดภาชนะ เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเหนียวขึ้น
P(MMA- <i>stat</i> -90%VP)	เป็นผงสีขาวละเอียด ในระหว่างตกตะกอนเหนียวติด ภาชนะ เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเหนียวขึ้น
PVP	เป็นผงสีเหลืองอ่อน ในระหว่างตกตะกอนเหนียวติด ภาชนะ เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเหนียวขึ้น

ตาราง 3.22 เปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำของ P(MMA-*stat*-VP) ที่เตรียมได้ในอัตราส่วนมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน

โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	น้ำหนักโคพอลิเมอร์ (g)			% ส่วนที่ละลายน้ำ	% ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ
	ก่อนสกัด	หลังสกัด	ส่วนที่ละลายน้ำ		
(PMMA- <i>stat</i> -20%VP)	30.0235	28.5512	1.4723	4.90	95.10
(PMMA- <i>stat</i> -30%VP)	30.0233	28.0388	1.9845	6.61	93.39
(PMMA- <i>stat</i> -40%VP)	30.0562	25.8213	4.2349	14.09	85.91
(PMMA- <i>stat</i> -50%VP)	30.0148	22.1059	7.9089	26.35	73.65
(PMMA- <i>stat</i> -60%VP)	30.0286	22.5007	7.5282	25.07	74.93
(PMMA- <i>stat</i> -70%VP)	20.0738	11.6950	8.3788	41.74	58.26
(PMMA- <i>stat</i> -80%VP)	30.0956	10.0124	20.0832	66.73	33.27
(PMMA- <i>stat</i> -90%VP)	30.1106	6.2456	23.8650	79.26	20.74

3.5 การหาลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

3.5.1 ความสามารถในการละลาย

3.5.1.1 การทดลอง

ทดสอบการละลายของไฮโมและโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ในตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ อะซิโตน คลอโรฟอร์ม เอทานอล เมทานอล ไอโซโพรพานอล เอทิลอะซิเตต และน้ำ ใส่ PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน ประมาณ 0.05 g ลงในตัวทำละลายประมาณ 5 ml ทิ้งไว้ 1 คืน ที่อุณหภูมิห้อง แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลง

3.5.1.2 ผลการทดลอง

ความสามารถในการละลายของพอลิเมธิลเมทาครีเลต (PMMA) พอลิ(เอีน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) (PVP) และ พอลิ(เมธิลเมทาครีเลต-สแตต-เอีน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) (P(MMA-*stat*-VP)) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิห้อง สรุปได้ดังตาราง 3.23

ตาราง 3.23 ความสามารถในการละลายของ PMMA PVP และ P(MMA-star-VP) ที่เตรียมได้ในอัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิห้อง

ตัวทำละลาย โพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	อะซิโตน	คลอโรฟอร์ม	เอทานอล	เมทานอล	ไอโซโพรพานอล	เอทิลอะซิเตต	น้ำ
PMMA	ละลาย	ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย	ไม่ละลาย
P(MMA-star-20%VP)	ละลาย	ละลาย	พองตัว	พองตัว	ไม่ละลาย	ละลาย	พองตัว
P(MMA-star-30%VP)	ละลาย	ละลาย	ละลายบางส่วน	ละลายบางส่วน	พองตัว	ละลายบางส่วน	พองตัว
P(MMA-star-40%VP)	ละลาย	ละลาย	ละลายบางส่วน	ละลายบางส่วน	ละลายบางส่วน	ละลายบางส่วน	พองตัว
P(MMA-star-50%VP)	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	พองตัว	พองตัว
P(MMA-star-60%VP)	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	พองตัว	พองตัว
P(MMA-star-70%VP)	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	พองตัว	ละลายบางส่วน
P(MMA-star-80%VP)	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	พองตัว	ละลาย
P(MMA-star-90%VP)	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	พองตัว	ละลาย
PVP	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	พองตัว	ละลาย

3.5.2 อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy) [60]

อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการพิสูจน์เกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หมู่ฟังก์ชันต่างๆ เป็นต้น โดยอาศัยสมบัติการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลของสารที่ความถี่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะและมวลอะตอมระหว่างพันธะ การดูดกลืนรังสีทำให้เกิดการยืดหด (stretching) หรือการงอ (bending) ของพันธะภายในโมเลกุล สเปกตรัมการดูดกลืนของรังสีอินฟราเรดแสดงในรูปของเลขคลื่น (wave number, cm^{-1}) หรือความยาวคลื่น เทคนิคนี้สามารถใช้วิเคราะห์สารได้ทั้งในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรดที่สนใจเพื่อใช้ในการหาโครงสร้างของสารอยู่ในช่วง $650\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ (15.0-2.5 ไมโครเมตร) โดยแบ่งย่อยออกเป็น 3 ย่านคือ

i) ย่านหมู่ฟังก์ชัน (Functional group region) เป็นช่วงรังสีที่มีเลขคลื่น $4000\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนที่เกิดจากโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เช่น การดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ -OH , -NH และ $\text{-C}\equiv\text{C-H}$ เป็นต้น

ii) ย่านรอยนิ้วมือ (Finger print region) เป็นช่วงรังสีที่มีเลขคลื่น $1300\text{--}910\text{ cm}^{-1}$ รูปแบบการดูดกลืนในช่วงนี้จะมีลักษณะซับซ้อน ประกอบด้วยแถบจำนวนมากและใหญ่ (shoulders) ซึ่งเป็นแถบขนาดเล็กที่ยื่นออกมาจากแถบขนาดใหญ่ การดูดกลืนรังสีในช่วงนี้จะเกิดจากโครงสร้างที่สมบูรณ์ โดยโมเลกุลแต่ละชนิดจะให้แถบการดูดกลืนที่เป็นเอกลักษณ์

iii) ย่านอะโรมาติก (Aromatic region) เป็นช่วงรังสีที่มีเลขคลื่น $910\text{--}650\text{ cm}^{-1}$

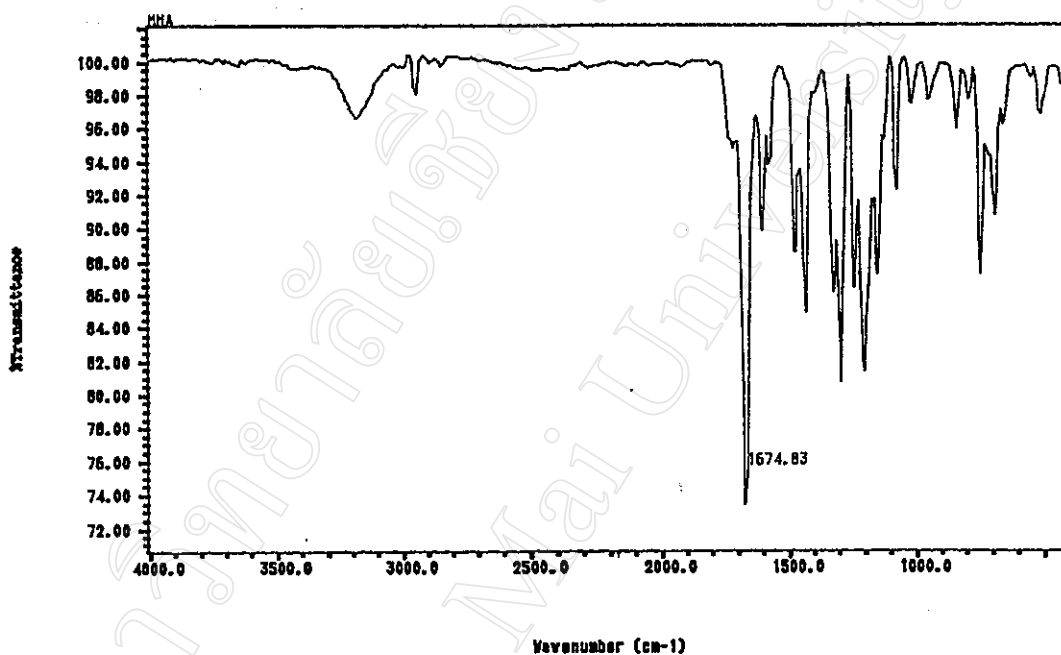
3.5.2.1 การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ของ Nicolet รุ่น 510 ในการศึกษาโครงสร้างของสาร โดยเตรียมตัวอย่าง 3 วิธีคือ มอนอเมอร์ ซึ่งเป็นของเหลวใช้วิธีป้ายลงบนเซลล์โซเดียมคลอไรด์โดยตรงแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนรังสี ส่วนโพลิเมอร์นำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 60°C จนน้ำหนักคงที่ แล้วนำมาละลายในคลอโรฟอร์ม จากนั้นนำไปแตะบนเซลล์โซเดียมคลอไรด์ เมื่อคลอโรฟอร์มระเหยไปจะเหลือเป็นฟิล์มบางๆ ของโพลิเมอร์ แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนรังสี สำหรับเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เตรียมเป็นแบบแผ่นกลมบางโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr discs) โดยนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำมาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้ว โดยใช้อัตราส่วนสารตัวอย่างต่อโพแทสเซียมโบรไมด์เท่ากับ 1 : 10 โดยน้ำหนัก นำไปอัดให้เป็นแผ่นโดยใช้ความดันประมาณ 10 ตัน เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนรังสี

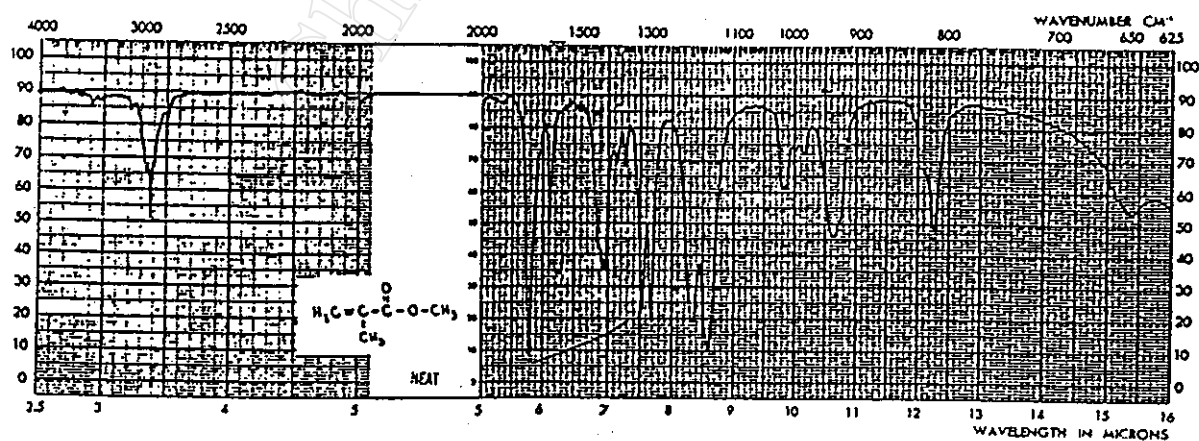
3.5.2.2 ผลการทดลอง

3.5.2.2.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตั้งต้น

อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตั้งต้นต่างๆ ที่ได้จากการทดลองและจากหนังสืออ้างอิง พร้อมทั้งความหมายของอินฟราเรดสเปกตรัมแสดงในรูป 3.20–3.25 และตาราง 3.24–3.26 ตามลำดับ



รูป 3.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของเมทิลเมทาครีเลตที่ทดลองได้



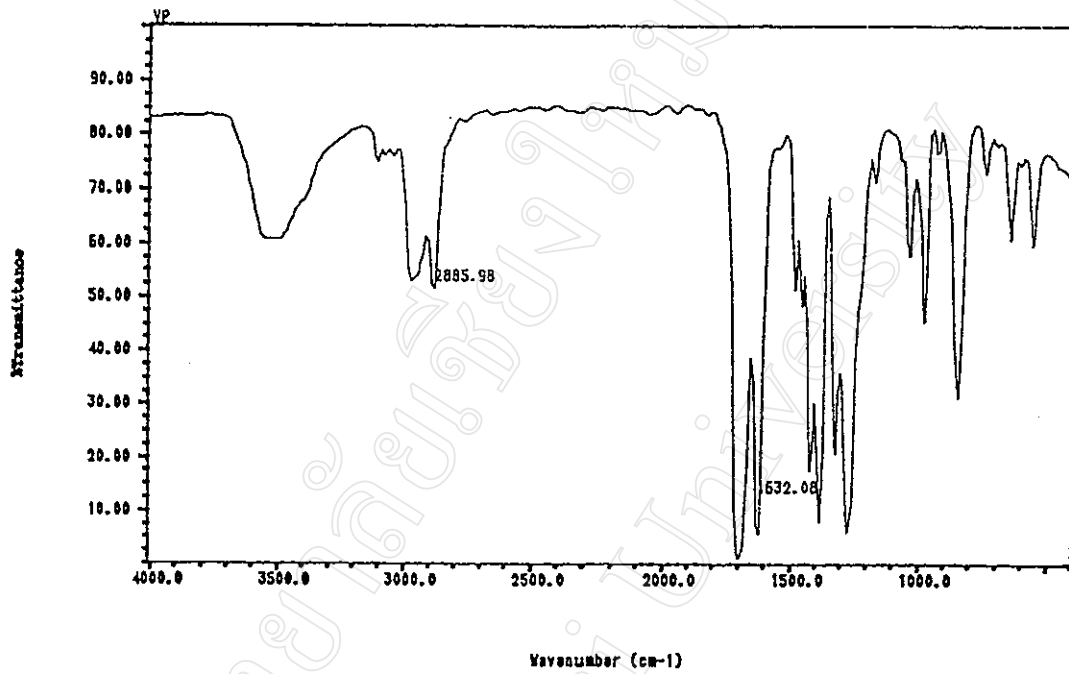
รูป 3.21 อินฟราเรดสเปกตรัมของเมทิลเมทาครีเลตจากหนังสืออ้างอิง [61]

ตาราง 3.24 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของเมธิลเมทาครีเลต

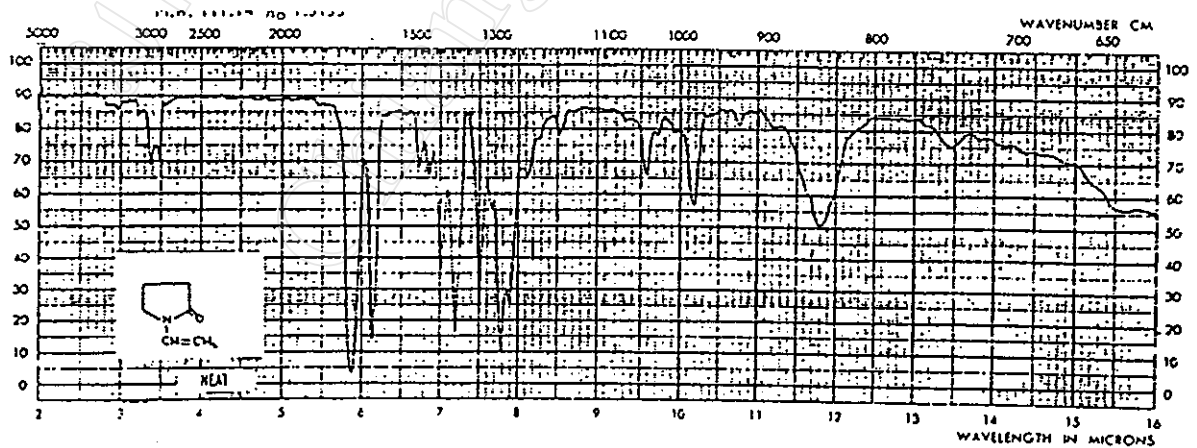
ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})	ชนิดของการสั่น
3150	การยืดหดของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$ และ $-\text{CH}_3$
1674	การยืดหดของพันธะ C = O ใน $-\text{CO}_2\text{CH}_3$
1600	การยืดหดของพันธะ C = C ใน $-\text{C}=\text{CH}_2$
1490-1300	การงอของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$ และ $-\text{CH}_3$
1200	การยืดหดของพันธะ C - O ใน $-\text{OCH}_3$
780	การงอนอกระนาบของพันธะ C-H ใน $-\text{C}=\text{CH}_2$

ตาราง 3.25 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน

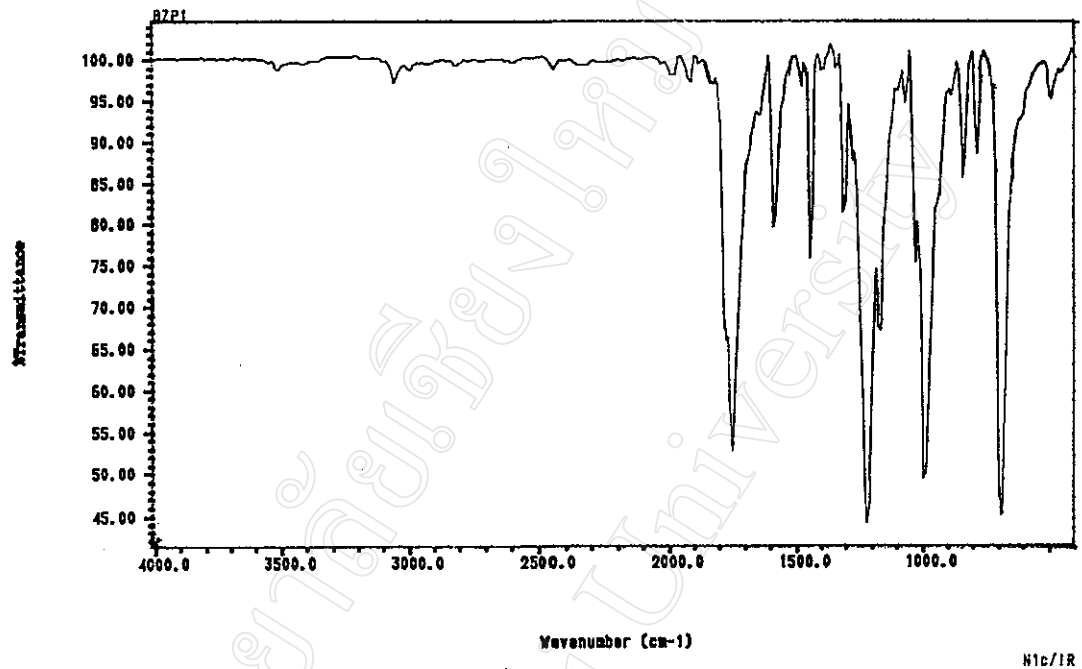
ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})	ชนิดของการสั่น
3550	การยืดหดของพันธะ O-H จากน้ำ
2885	การยืดหดของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$
1700	การยืดหดของพันธะ C = O ใน หมู่เอไมด์
1632	การยืดหดของพันธะ C = C ใน $-\text{CH}=\text{CH}_2$
1420-1400	การงอของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$
1300-1250	การยืดหดของพันธะ C - N
1020-990	การงอแบบสมมาตรของพันธะ C-H ใน $-\text{CH}_2$
820	การงอนอกระนาบของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$



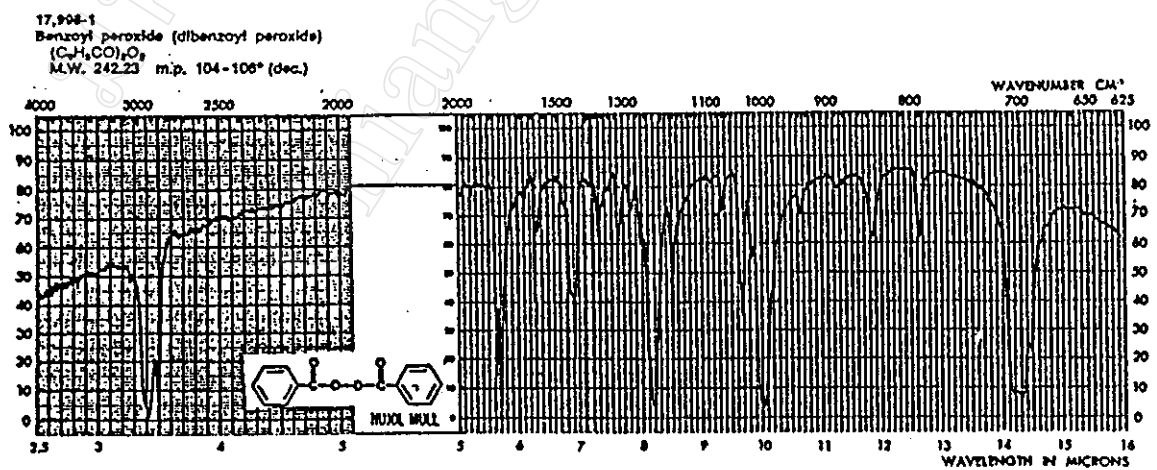
รูป 3.22 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนที่ทดลองได้



รูป 3.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนจากหนังสืออ้างอิง [61]



รูป 3.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ทดลองได้



รูป 3.25 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์จากหนังสืออ้างอิง [61]

ตาราง 3.26 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโซิลเปอร์ออกไซด์

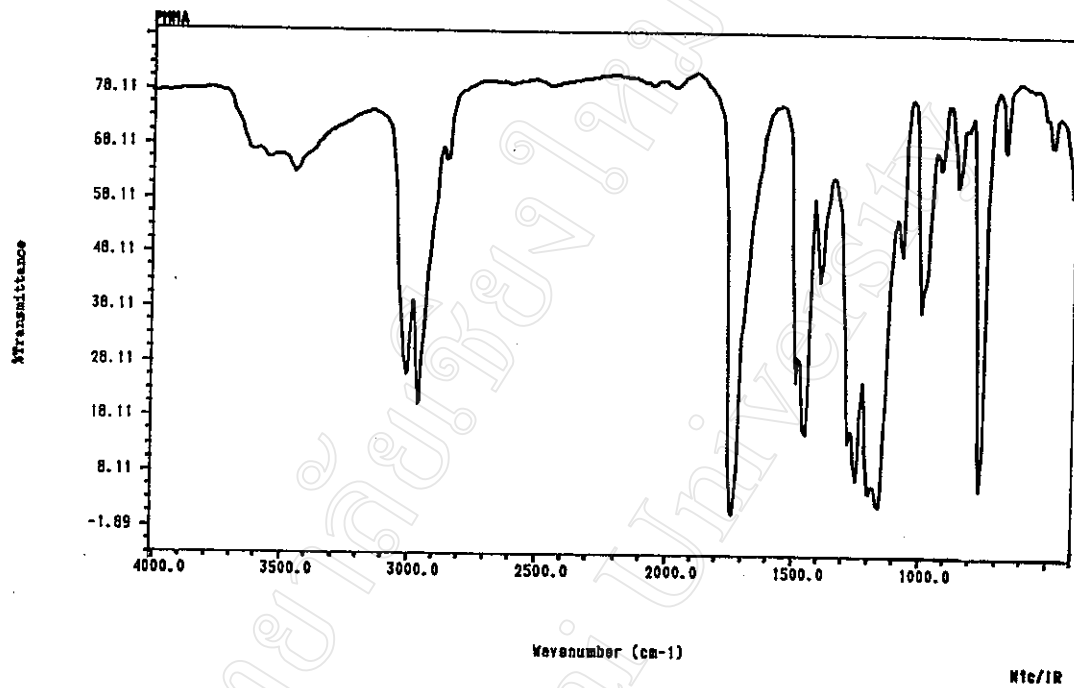
ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})	ชนิดของการสั่น
3020	การยืดหดของพันธะ C - H ในวงแหวนเบนซีน
1750	การยืดหดของพันธะ C = O
1600-1400	การยืดหดของพันธะ C = C ใน วงแหวนเบนซีน
1200	การยืดหดของพันธะ C - O
700	การงอของพันธะของพันธะ C - H ในวงแหวนเบนซีน

3.5.2.2.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโปคลอไรต์

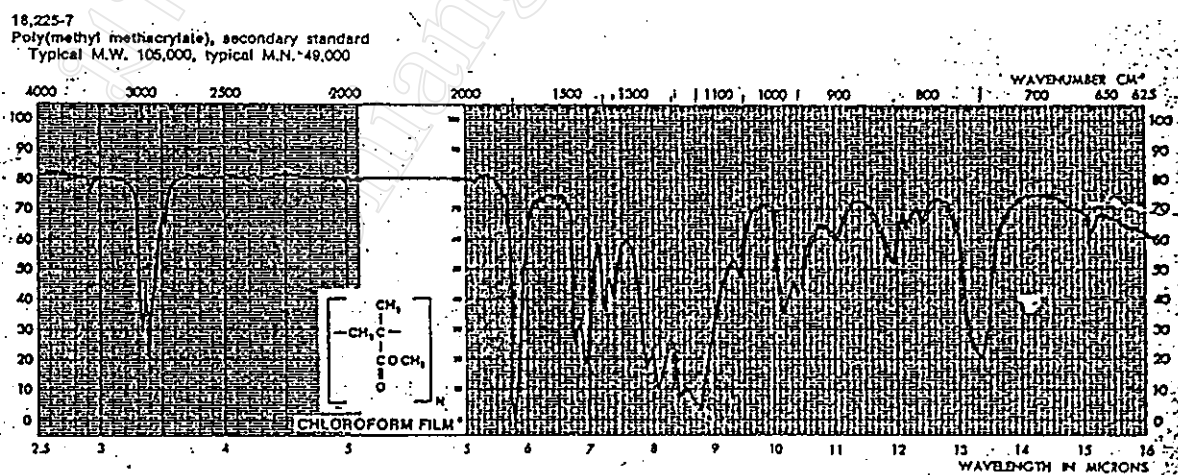
อินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโปคลอไรต์ที่สังเคราะห์ได้และที่ได้จากหนังสืออ้างอิงพร้อมทั้งความหมายของอินฟราเรดสเปกตรัมแสดงดังรูป 3.26-3.37 และตาราง 3.27-3.28 ตามลำดับ

ตาราง 3.27 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอไรเซชัน

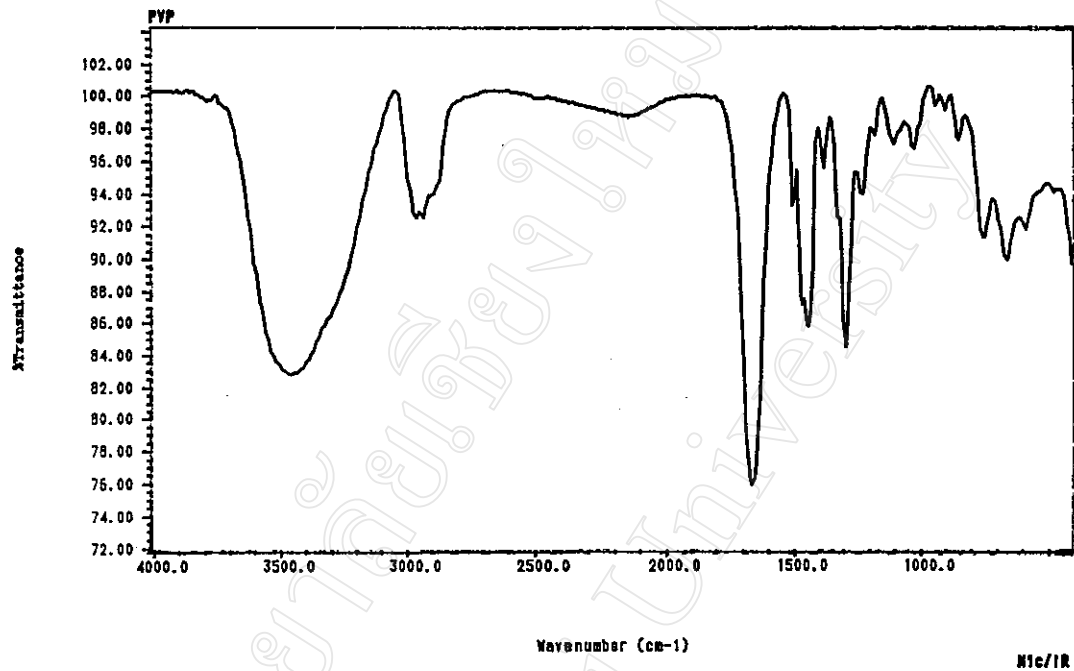
ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})	ชนิดของการสั่น
2950-3000	การยืดหดของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$ และ $-\text{CH}_3$
1720	การยืดหดของพันธะ C = O ในหมู่เอสเทอร์
1450	การงอของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$
1280-1000	การยืดหดของพันธะ C - O ใน $-\text{OCH}_3$
750	การงอของพันธะของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2$ และ $-\text{CH}_3$



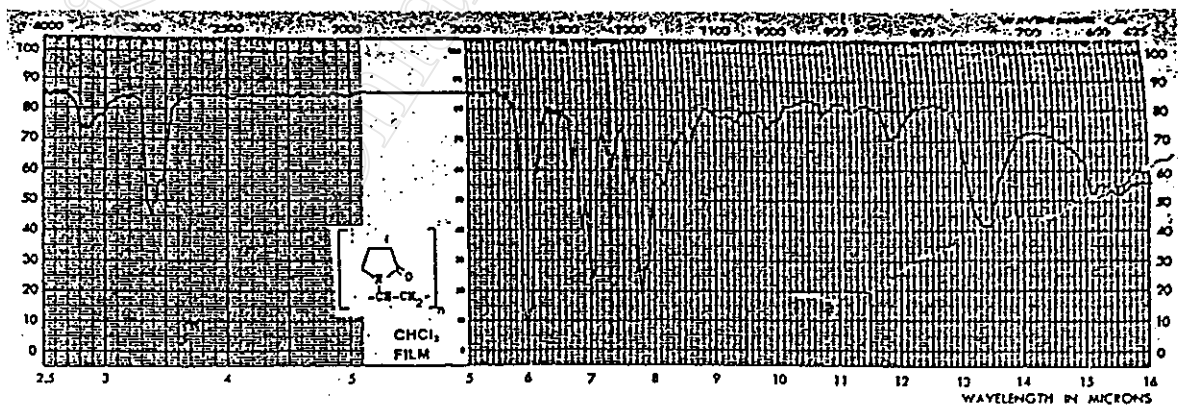
รูป 3.26 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้



รูป 3.27 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PMMA จากหนังสืออ้างอิง [61]



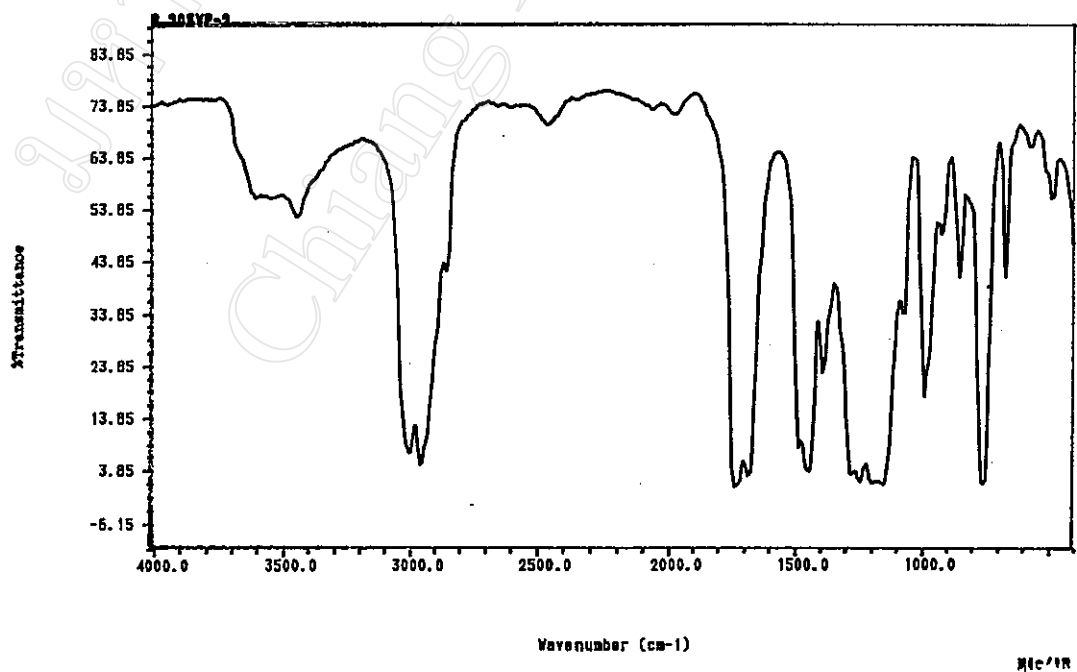
รูป 3.28 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PVP ที่สังเคราะห์ได้

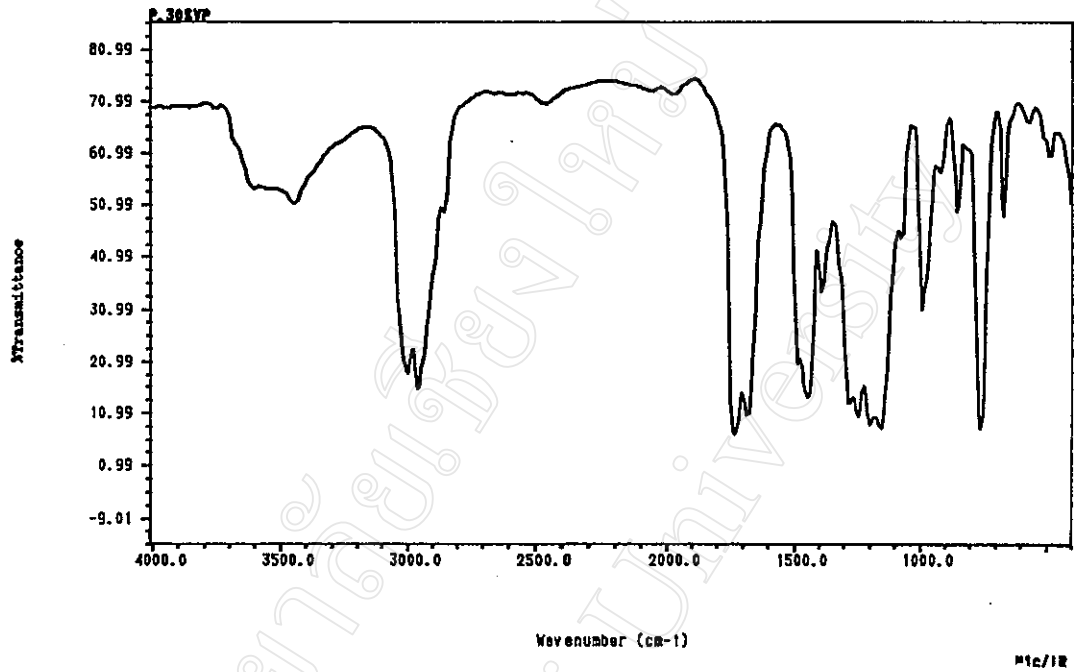


รูป 3.29 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PVP จากหนังสืออ้างอิง [61]

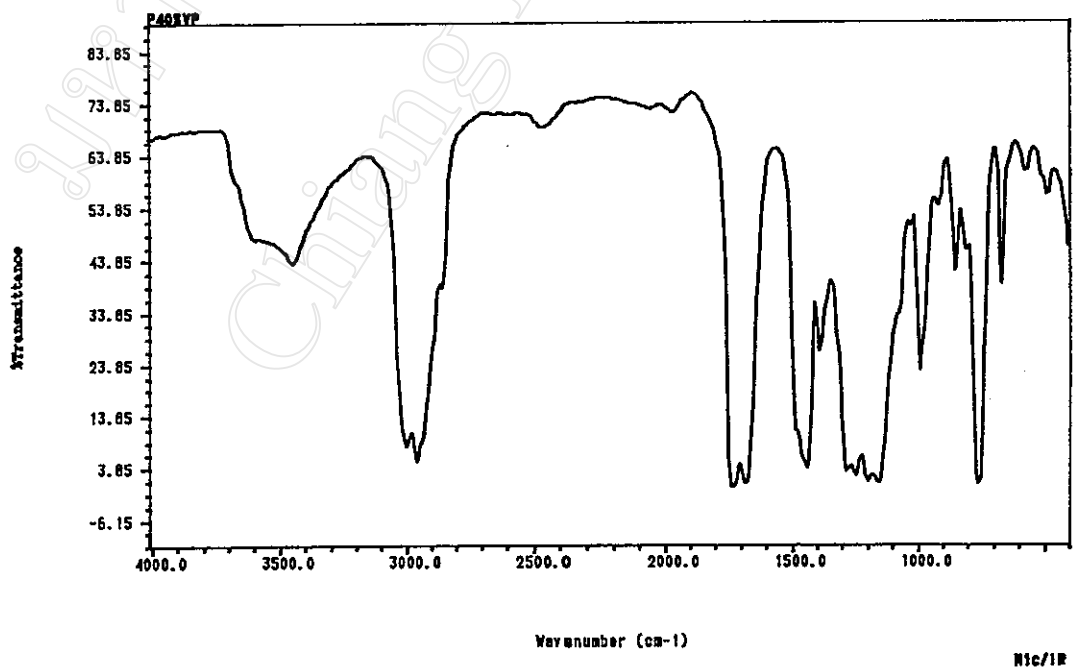
ตาราง 3.28 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน)

ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})	ชนิดของการสั่น
3500	การยืดหดของพันธะ O-H จากน้ำ
2950	การยืดหดของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2-$
1680	การยืดหดของพันธะ C = O ใน $-\text{NCO}-$
1450	การงอของพันธะ C - H ใน $-\text{CH}_2-$
1290	การยืดหดของพันธะ C - N

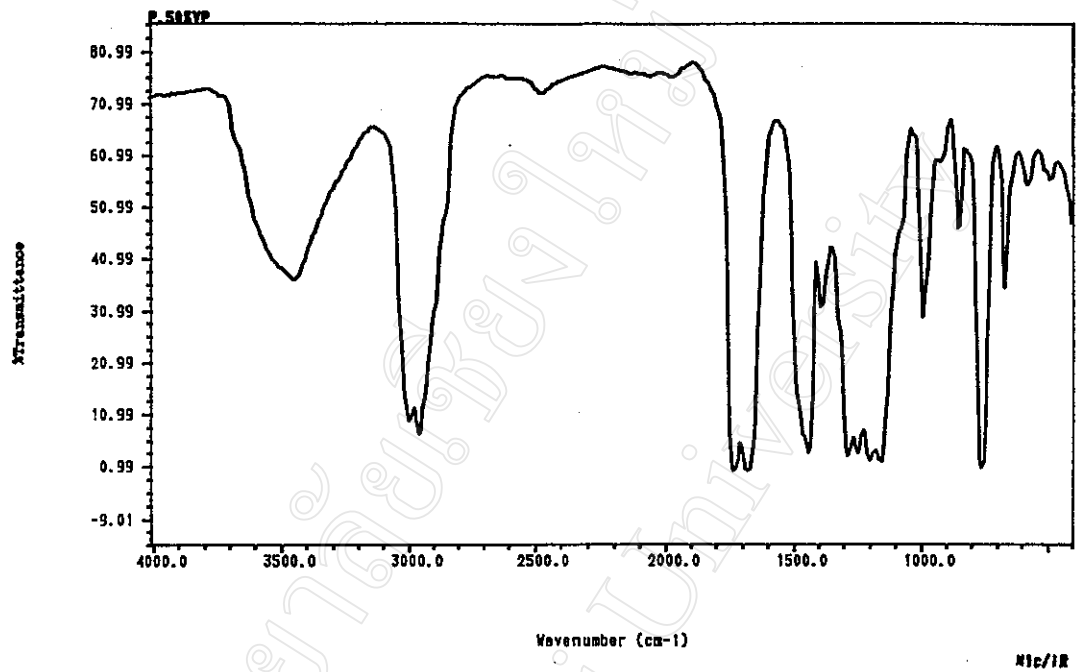
รูป 3.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-*stat*-20%VP)



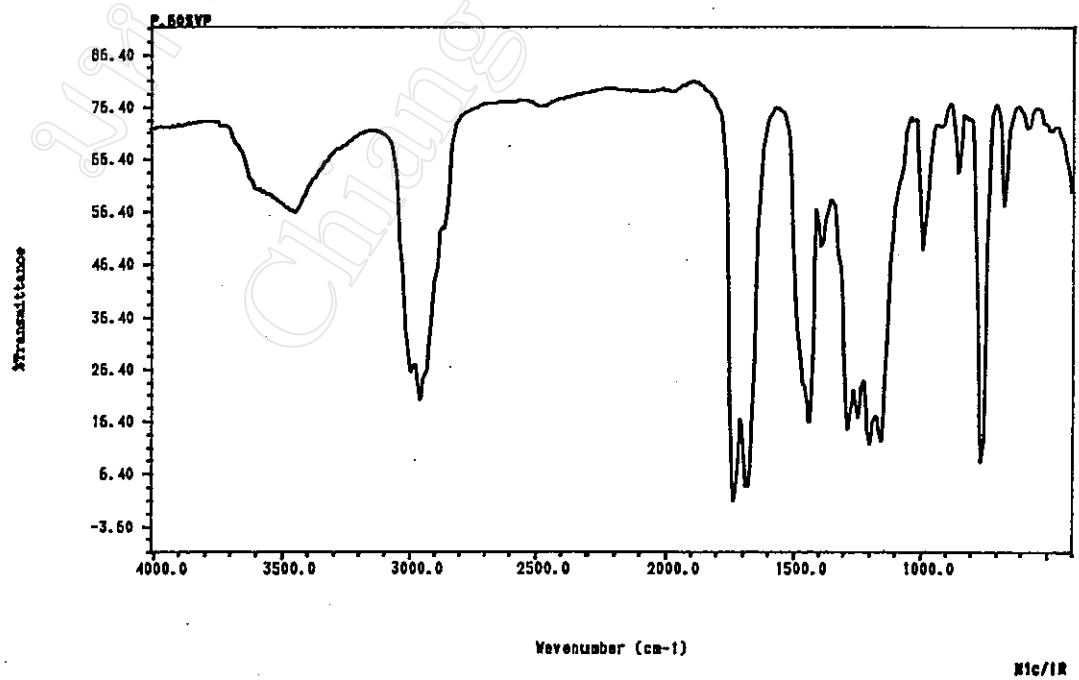
รูป 3.31 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-stat-30%VP)



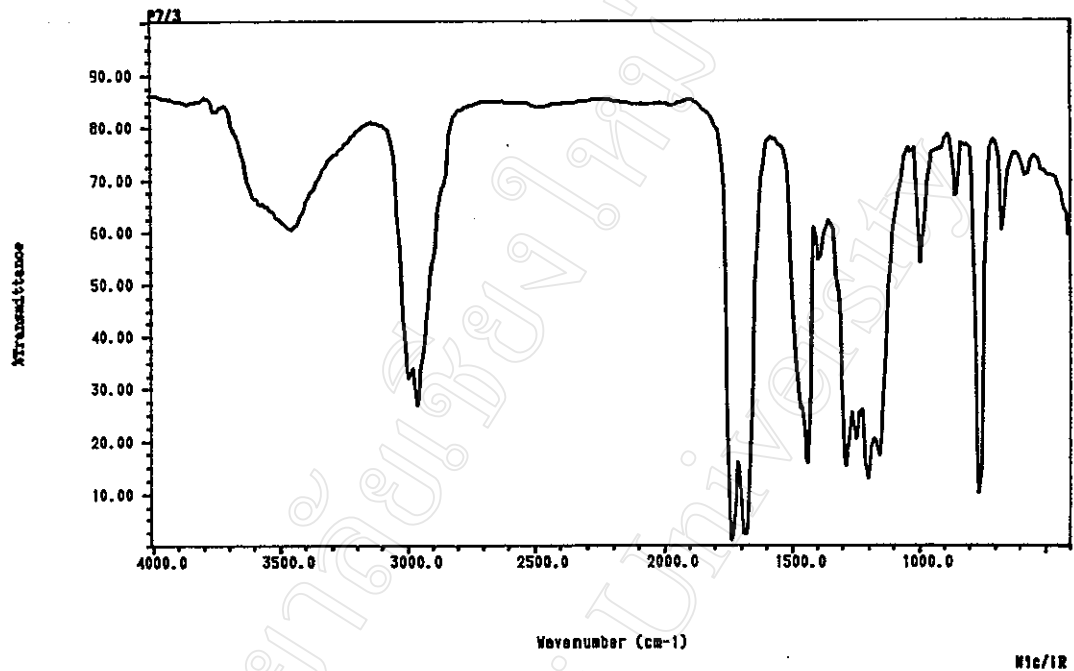
รูป 3.32 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-stat-40%VP)



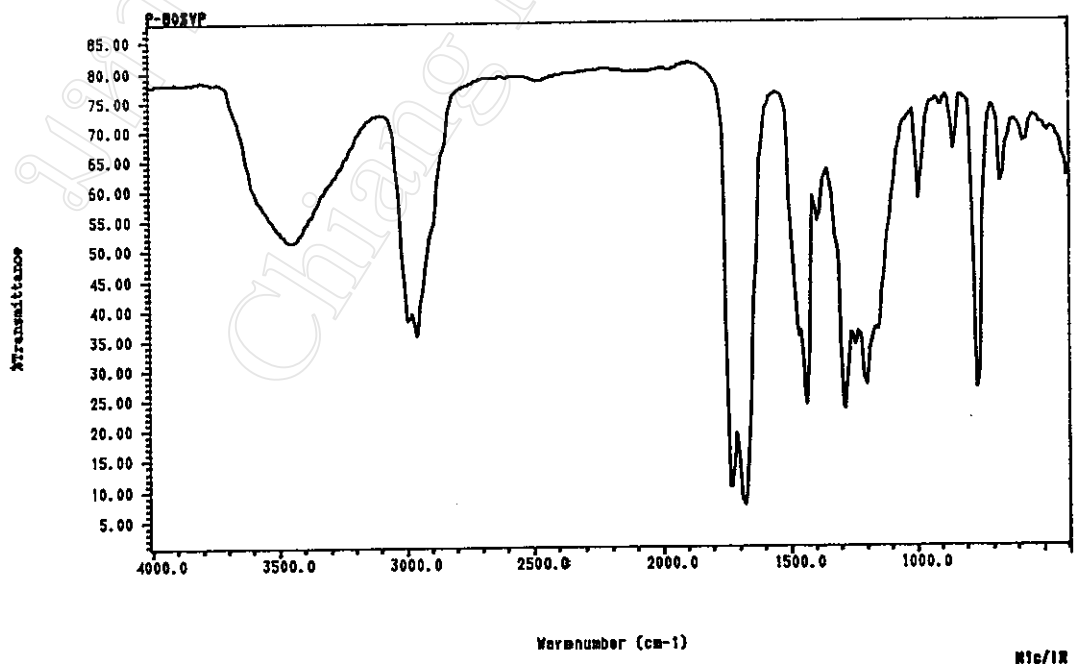
รูป 3.33 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-stat-50%VP)



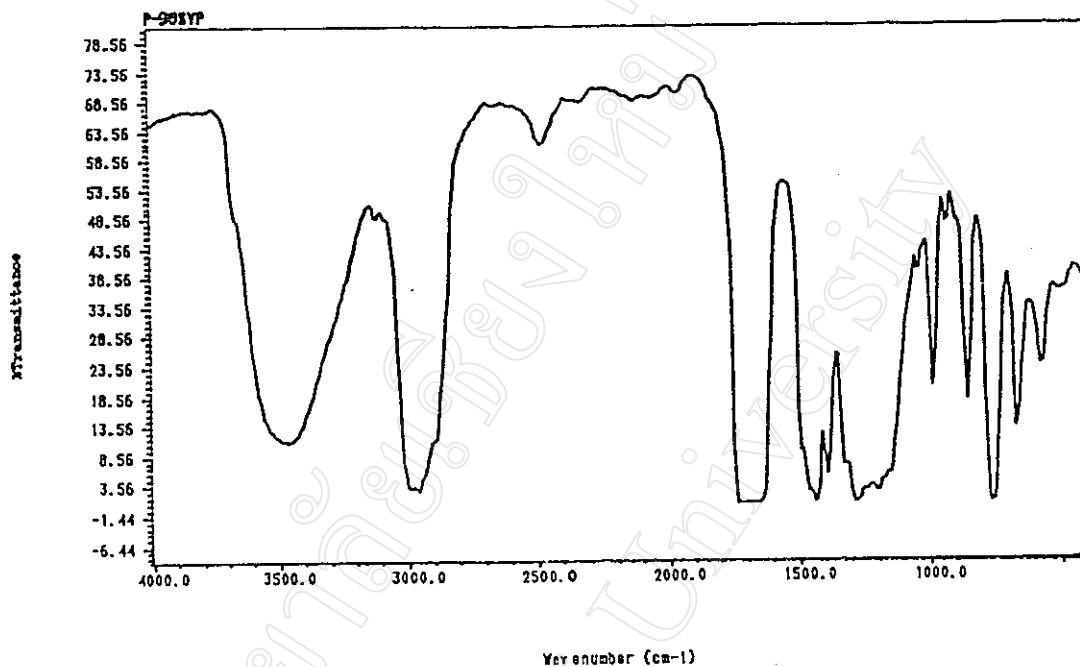
รูป 3.34 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-stat-60%VP)



รูป 3.35 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-stat-70%VP)



รูป 3.36 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-stat-80%VP)



รูป 3.37 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P(MMA-*stat*-90%VP)

เมื่อเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของสารตั้งต้นที่ใช้และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้กับอินฟราเรดสเปกตรัมจากหนังสืออ้างอิงพบว่า มีแถบการดูดกลืนเหมือนกัน แสดงว่าสารตั้งต้นที่ใช้มีความบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ที่ได้ก็เป็นพอลิเมอร์ชนิดนั้นจริง จากอินฟราเรดสเปกตรัมของโคพอลิเมอร์พบว่า มีสเปกตรัมการยืดหดของพันธะ C=O ที่ 1720 และ 1680 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่เอสเตอร์และเอไมด์ ตามลำดับ

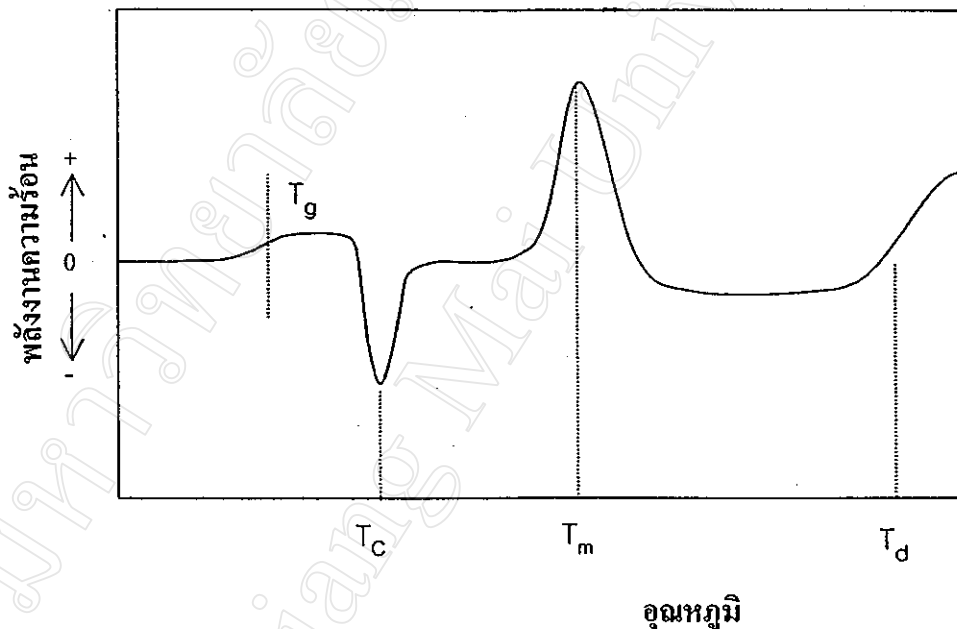
3.5.3 การวิเคราะห์ทางความร้อน

การวิเคราะห์ทางความร้อนเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฉพาะของสารเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่นิยมใช้มี 2 เทคนิค คือ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรีและเทอร์โมกราวิเมตรี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.3.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี เป็นเทคนิคที่วัดค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (heat flow) ที่ให้กับสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางดูดความร้อน (endothermic) หรือวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ออกจากสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางคายความร้อน (exothermic) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดและคายความร้อนสามารถศึกษาได้โดยเทคนิคนี้ เช่น อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิของการเกิดผลึก (crystallisation temperature, T_c) อุณหภูมิของการหลอมตัวของผลึก (crystalline melting temperature, T_m) และอุณหภูมิของการสลายตัว (decomposition temperature, T_d) ผลการเปลี่ยนแปลงพลังงานทางความร้อนแสดงเทียบกับอุณหภูมิ เรียกว่า เทอร์โมแกรม (Thermogram) [62] ดังรูป 3.38 ค่า T_g เป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากแข็งคล้ายแก้วเป็นนิ่มคล้ายยาง โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g พอลิเมอร์จะอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) เมื่อได้รับความร้อนจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง T_g โมเลกุลเริ่มมีพลังงานมากพอที่สายโซ่บางส่วนเกิดการหมุนได้ ทำให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น มีสถานะนิ่มคล้ายยาง (rubbery state) และเมื่อให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ไปเรื่อยๆ ถ้าพอลิเมอร์นั้นเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (semi-crystalline polymer) โมเลกุลจะมีโอกาสเกิดการจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจนได้โครงสร้างที่เป็นผลึกและปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเรียกว่า ความร้อนของการเกิดผลึก (heat of crystallisation, ΔH_c) อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิของการเกิดผลึก (crystallisation temperature, T_c) โดย ΔH_c เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ใต้พีค T_c เมื่อให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ไปเรื่อยๆ ผลึกจะเกิดการหลอมตัว ที่อุณหภูมิที่เรียกว่า อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (crystalline melting temperature, T_m) พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวหนืด (melt state) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้เป็นแบบดูดความร้อน ความร้อนที่ใช้เรียกว่า ความร้อนของการหลอมเหลว (heat of melting, ΔH_m) โดย ΔH_m แปรผันโดยตรงกับพื้นที่ใต้พีค T_m เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (% crystallinity) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ΔH_m ถ้าให้ความร้อนต่อไปอีกเรื่อยๆ พอลิเมอร์จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิของการสลายตัว (decomposition

temperature, T_g) [63] แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์บางชนิดจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงครบทุกช่วงของอุณหภูมิ ขึ้นอยู่กับที่มาทางความร้อน (thermal history) และโครงสร้างของพอลิเมอร์นั้น เช่น พอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกถ้าถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โมเลกุลไม่มีเวลาจัดเรียงตัวทำให้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) เมื่อนำมาวัด DSC จะเห็นการเปลี่ยนแปลงในทุกช่วง แต่ถ้าพอลิเมอร์ถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า โมเลกุลมีเวลาจัดเรียงตัวทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) เมื่อนำมาวัด DSC จะเห็นเฉพาะ T_g และ T_m ส่วนพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้ หรือพอลิเมอร์อสัณฐาน จะปรากฏเฉพาะ T_g



รูป 3.38 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ [63]

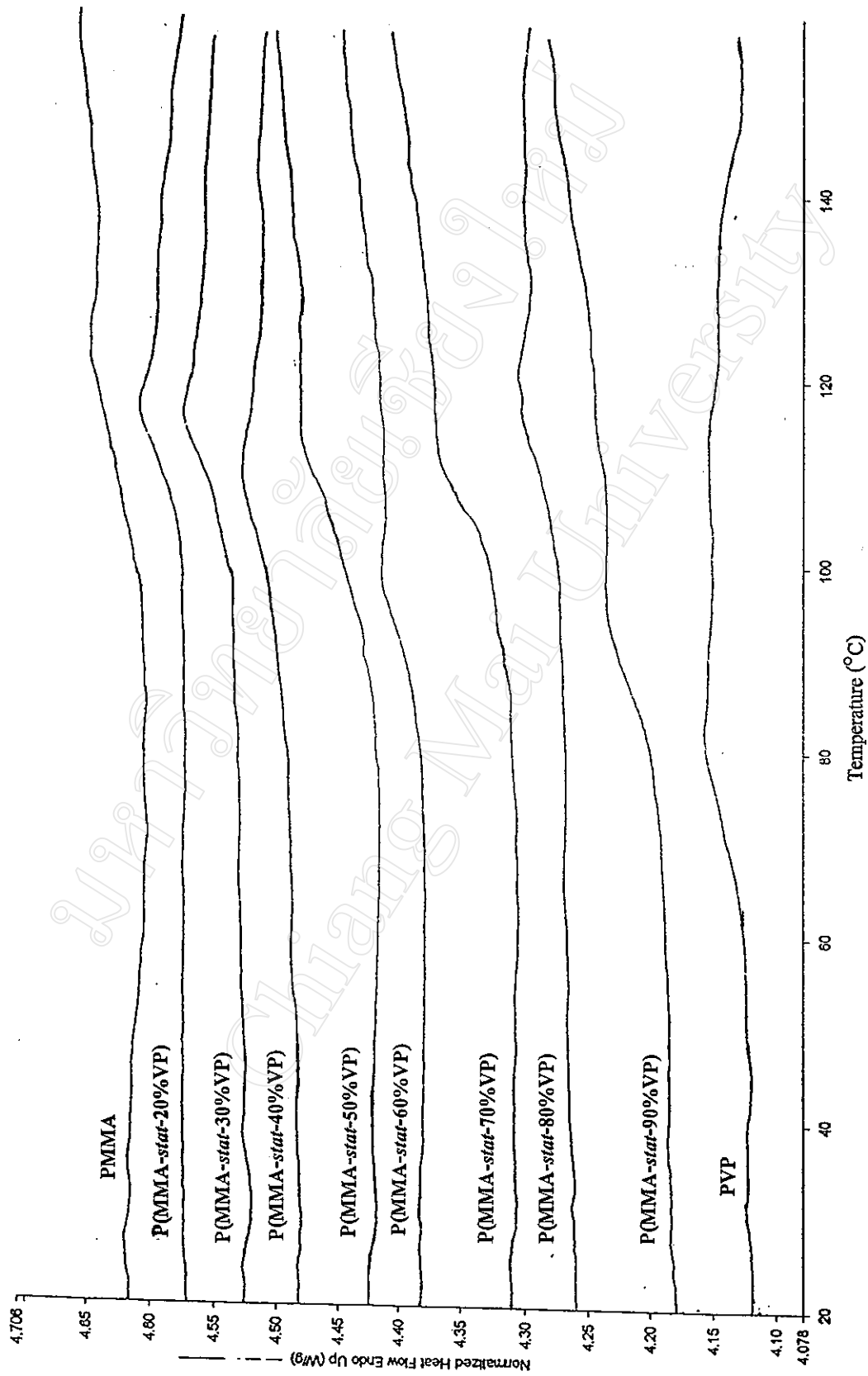
- T_g คือ อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature)
- T_c คือ อุณหภูมิของการเกิดผลึก (crystallisation temperature)
- T_m คือ อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (crystalline melting temperature)
- T_d คือ อุณหภูมิของการสลายตัว (decomposition temperature)

3.5.3.1.1 การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้ DSC 7 Differential Scanning Calorimeter ของบริษัท Perkin-Elmer เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของโฮโมและโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ก่อนการวิเคราะห์นำสารตัวอย่างไปบดจนละเอียดและอบในตู้อบสุญญากาศที่ 60°C จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นใส่สารตัวอย่างประมาณ 3-5 mg ในภาชนะอะลูมิเนียม ปิดผนึก แล้วนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ $25-200^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3.5.3.1.2 ผลการทดลอง

เทอร์โมแกรมและค่า T_g ของ PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในคอนเริ่มต้นต่างๆ กัน แสดงในรูป 3.39 และตาราง 3.29 ตามลำดับ

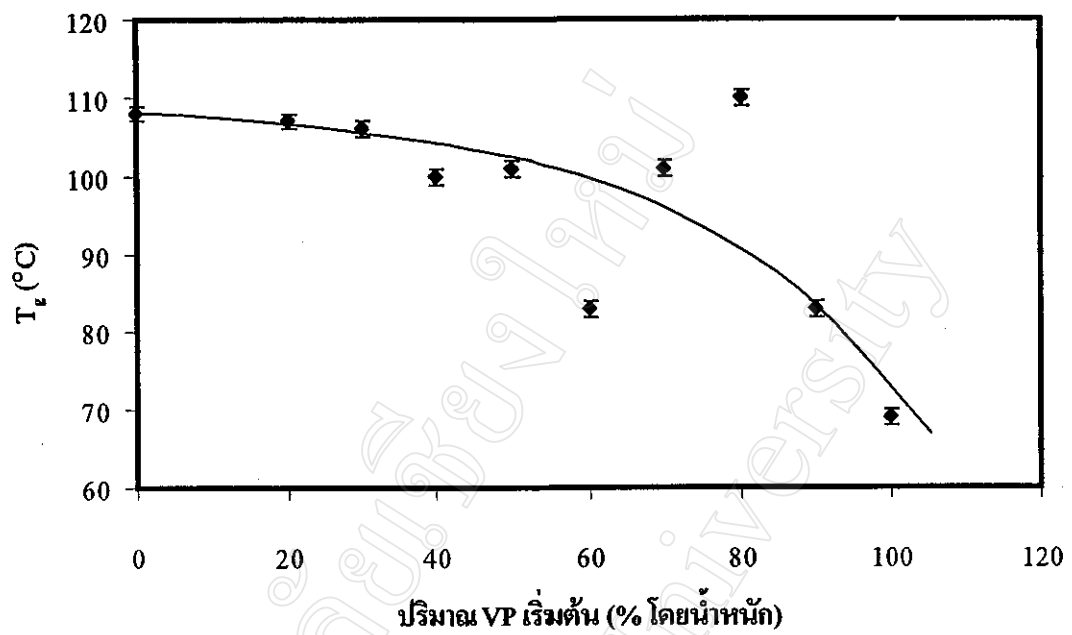


รูป 3.39 DSC เทอร์โมแกรมของ PMMA PVP และ P(MMA-stat-VP) ที่มีอัตราส่วน โคมอนเมอร์ในคอมพอลิเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันที่สังเคราะห์ได้

ตาราง 3.29 ค่า T_g ที่ได้จากการทดลองของ PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในคอนเริ่มต้นต่าง ๆ กัน ที่สังเคราะห์ได้

โพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	$T_g (\pm 10^\circ\text{C})$
PMMA	108
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	107
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	106
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	100
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	101
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	83
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	101
P(MMA- <i>stat</i> -80%VP)	110
P(MMA- <i>stat</i> -90%VP)	83
PVP	69

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในคอนเริ่มต้น กับ T_g ที่หาได้จากการทดลองของ P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังรูป 3.40



รูป 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในตอนเริ่มต้นกับค่า T_g ที่ได้จากการทดลองของ P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้

3.5.3.2 เทอร์โมกราวิเมตรี (Thermogravimetry, TG)

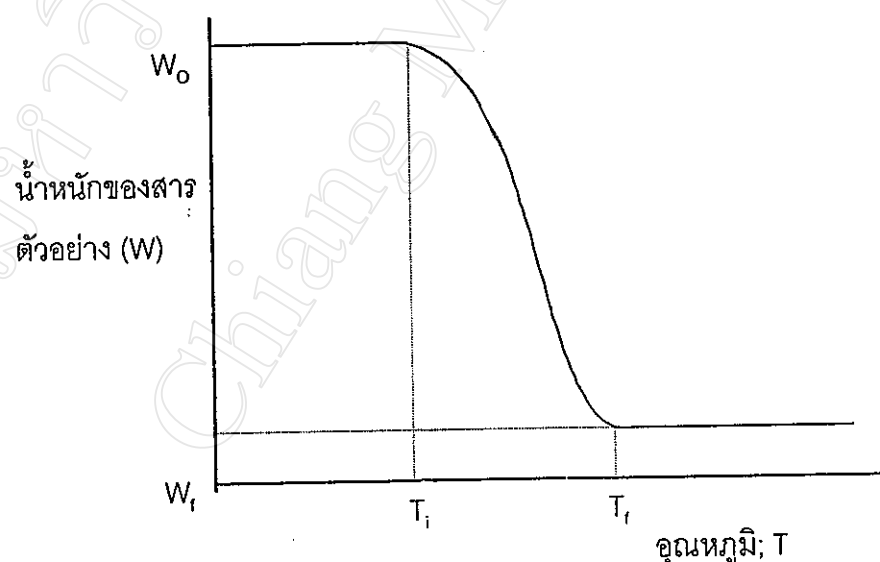
เทอร์โมกราวิเมตรีเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของสารตัวอย่าง (thermal stability) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน เป็นต้น เพื่อกำจัดไอของสารและสารที่เกิดจากการสลายตัวออกจากระบบ

โดยทั่วไปเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตรีแบ่งได้เป็น 2 แบบ [62] คือ

i) ไอโซเทอร์มอลเทอร์โมกราวิเมตรี (Isothermal Thermogravimetry) วิธีการนี้ ใช้ศึกษาสมบัติความเสถียรต่อความร้อนของสาร โดยดูการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่

ii) นอน-ไอโซเทอร์มอลเทอร์โมกราวิเมตรี (Non-isothermal Thermogravimetry) หรือเรียกว่า ไดนามิกเทอร์โมกราวิเมตรี (Dynamic Thermogravimetry) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ผลของการวิเคราะห์จะบันทึกในรูปของเทอร์โมแกรมของน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเป็น ฟังก์ชันของอุณหภูมิ หรือเวลา ดังรูป 3.41



รูป 3.41 TG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์

W_0 และ W_r คือ น้ำหนักเริ่มต้น และ น้ำหนักสุดท้ายหลังการสลายตัว ตามลำดับ

T_i คือ อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เริ่มสูญเสียน้ำหนัก

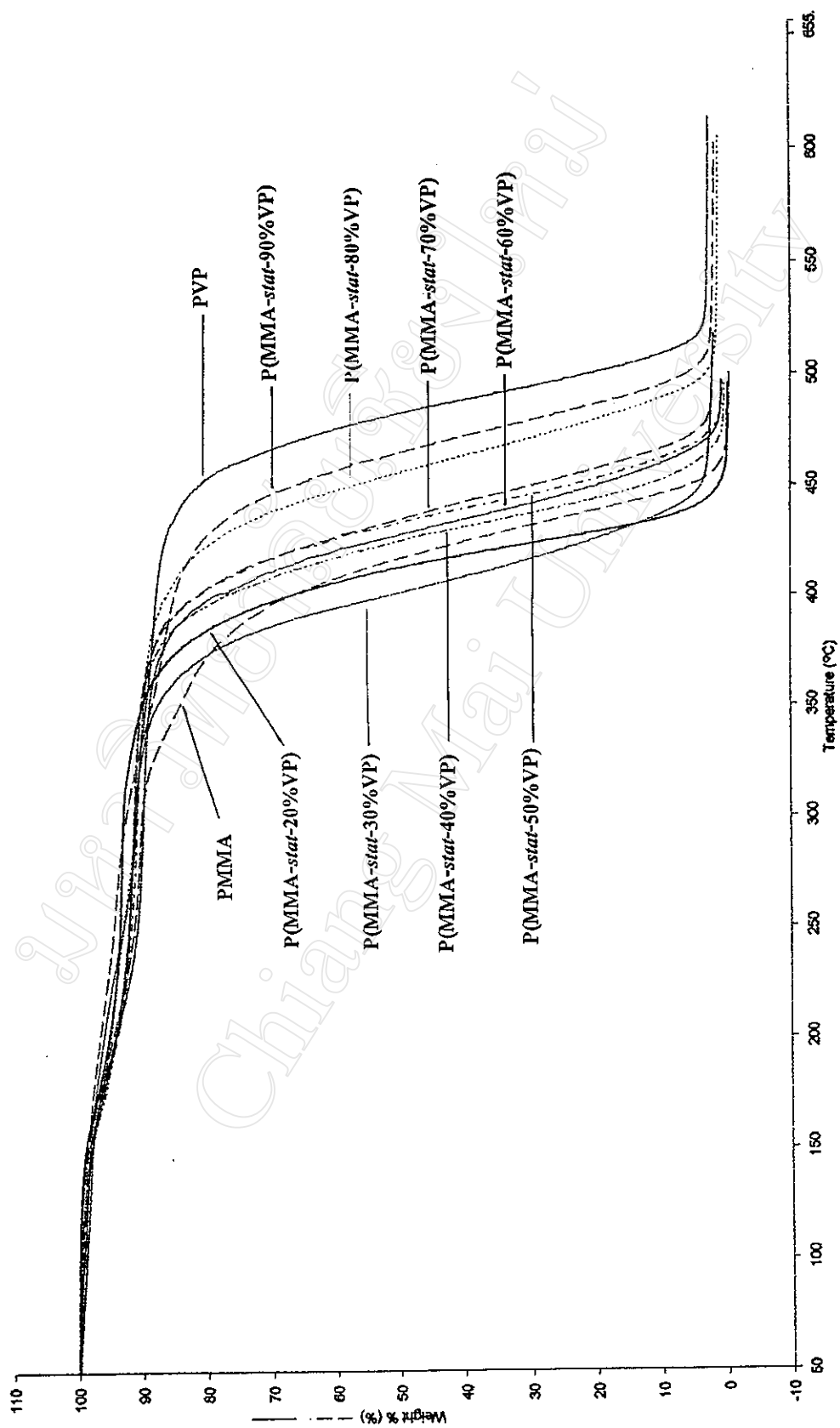
T_f คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่พอลิเมอร์สูญเสียน้ำหนัก

3.5.3.2.1 การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้ TGA7 Thermogravimetric Analyzer ของบริษัท Perkin-Elmer ในการศึกษาสมบัติความเสถียรต่อความร้อนของโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์เช่นเดียวกับ DSC แต่เทคนิคนี้ใช้ตัวอย่าง 5-10 mg ทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 50-600°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20°C/นาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3.5.3.2.2 ผลการทดลอง

TG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอริซึมเรซอร์บิต พอลิ(เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) และพอลิ(เมธิลเมธาครีเลต-สแตต-เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) ที่มีปริมาณเอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในตอนเริ่มต้นต่างๆ กัน แสดงในรูป 3.42



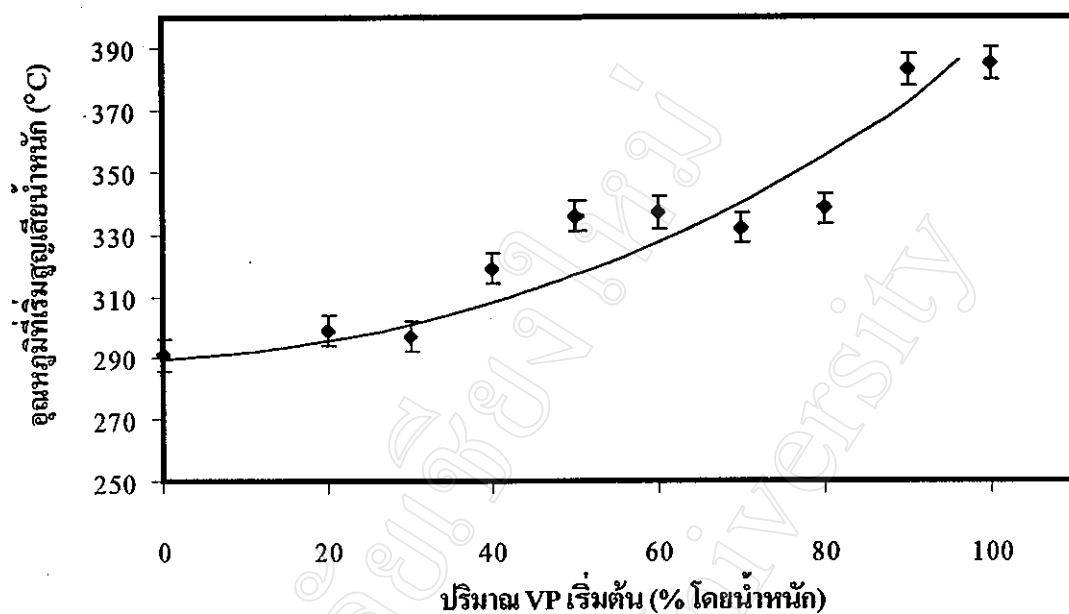
รูป 3.42 TG เทอร์โมแกรมของ PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์ในตอนเริ่มต้นต่างๆ กัน ที่สังเคราะห์ได้

ช่วงอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก และอุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนัก 50% ของ พอลิเมธิลเมทาครีเลต พอลิ(เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโคน) และพอลิ(เมธิลเมทาครีเลต-สแตต-เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโคน) ที่มีปริมาณโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันแสดงดังตาราง 3.30

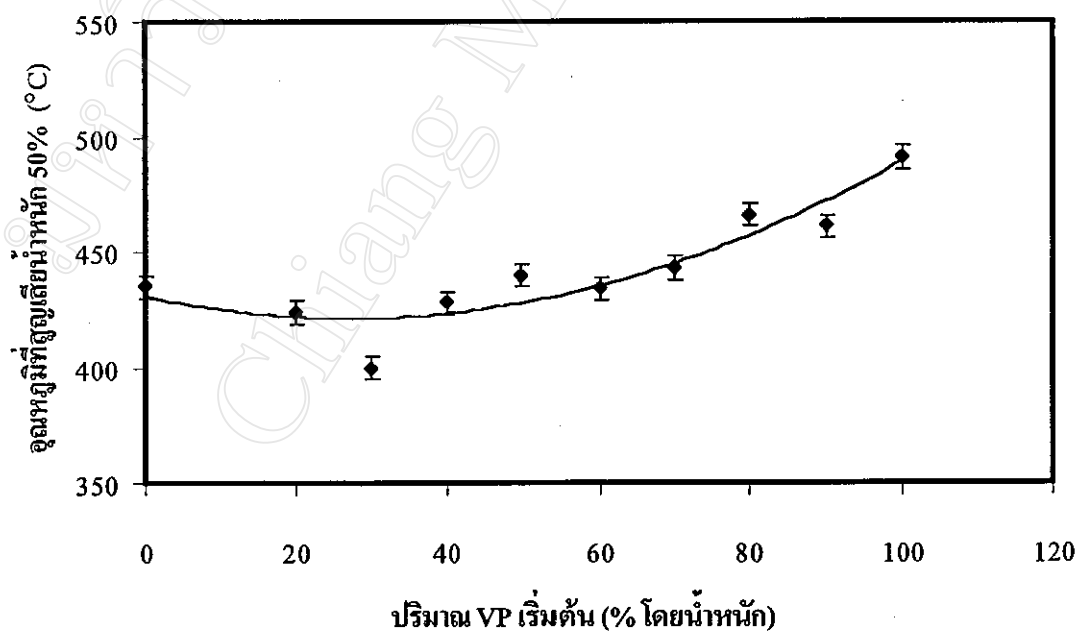
ตาราง 3.30 ช่วงอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ของ PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นต่างๆ กัน ที่สังเคราะห์ได้

โพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ ที่สังเคราะห์ได้	อุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิสุดท้ายที่สูญเสียน้ำหนัก ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่การสูญเสียน้ำหนัก 50% ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)
PMMA	191	484	435
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	299	476	424
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	297	485	400
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	319	489	428
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	336	494	440
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	337	495	434
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	332	495	443
P(MMA- <i>stat</i> -80%VP)	338	502	460
P(MMA- <i>stat</i> -90%VP)	383	532	461
PVP	385	550	491

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนในตอนเริ่มต้นกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ของ P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังรูป 3.43 และ 3.44 ตามลำดับ



รูป 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในตอนเริ่มต้นกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักของ P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้



รูป 3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในตอนเริ่มต้นกับอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ของ P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้

3.5.4 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

3.5.4.1 การทดลอง

แผ่นฟิล์มโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาครีเลตและเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเตรียมโดยวิธีคาสติง (casting) โดยมีวิธีการดังนี้ ชั่งน้ำหนักของโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่ทำการสกัดเอาส่วนที่ละลายน้ำออกแล้ว 3 g นำไปละลายในคลอโรฟอร์มจนได้สารละลายเนื้อเดียว แล้วเทสารละลายโพลิเมอร์ลงในจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.65 เซนติเมตร ที่รองด้วยแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นฟิล์มติดกับจานเพาะเชื้อ วางทิ้งไว้ในตู้ควันทิ้งให้คลอโรฟอร์มระเหยไปจนแผ่นฟิล์มแข็งตัว จากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 60°C จนน้ำหนักคงที่ สังเกตลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มเมื่อแห้งและเมื่อนำไปแช่น้ำจนอิ่มตัว

3.5.4.2 ผลการทดลอง

ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นฟิล์ม PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันที่สังเคราะห์ได้เมื่อแห้งและเมื่ออิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงในตาราง 3.31

ตาราง 3.31 ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นฟิล์ม PMMA PVP และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันที่สังเคราะห์ได้

โพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	เมื่อแห้ง	เมื่ออมน้ำด้วยน้ำ
PMMA	ใส ไม่มีสี แข็ง เหนียว	ใส ไม่มีสี แข็ง เหนียว
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	ใส ไม่มีสี แข็ง เหนียว	สีขาวขุ่น แข็ง เหนียว แนบติดกับผิวหนังไม่ดี
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	ใส ไม่มีสี แข็ง เหนียว	สีขาวขุ่น แข็ง เหนียว แนบติดกับผิวหนังไม่ดี
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	ใส ไม่มีสี แข็ง เหนียว	สีขาวขุ่น แข็ง เหนียว แนบติดกับผิวหนังไม่ดี
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	ใส ไม่มีสี แข็ง	สีขาวขุ่น นิ่มขึ้น เหนียว แนบติดกับผิวหนังไม่ดี
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะ	สีขาวขุ่น นิ่ม แนบติดกับผิวหนังได้ดีขึ้น
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะ	สีขาวขุ่น นิ่ม แนบติดกับผิวหนังได้ดีขึ้น
P(MMA- <i>stat</i> -80%VP)	ใส สีเหลืองอ่อนๆ เปราะ	ไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้
P(MMA- <i>stat</i> -90%VP)	ใส สีเหลืองอ่อน เปราะ	ไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้
PVP	ใส สีเหลืองอ่อน เปราะ	ละลายน้ำ

3.5.5 การขยายตัวของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเมื่ออิมมิดด้วยน้ำ

3.5.5.1 การทดลอง

นำแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันที่เตรียมได้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ตัวอย่างละ 3 ชิ้น วัดขนาดที่แน่นอนของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์เมื่อแห้ง จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 วัน แล้วนำมาวัดขนาดอีกครั้ง บันทึกเป็นขนาดเมื่ออิมมิดด้วยน้ำ

แผ่นฟิล์มไฮโมและโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นเท่ากับ 80 และ 90% โดยน้ำหนัก ไม่ได้ทดสอบในที่นี้ เนื่องจาก PMMA ดูดซับน้ำได้น้อยมาก ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแช่ในน้ำ ส่วน PVP ละลายน้ำได้และ P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนตอนเริ่มต้น 80 และ 90% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้เมื่ออยู่ในน้ำ

3.5.5.2 ผลการทดลอง

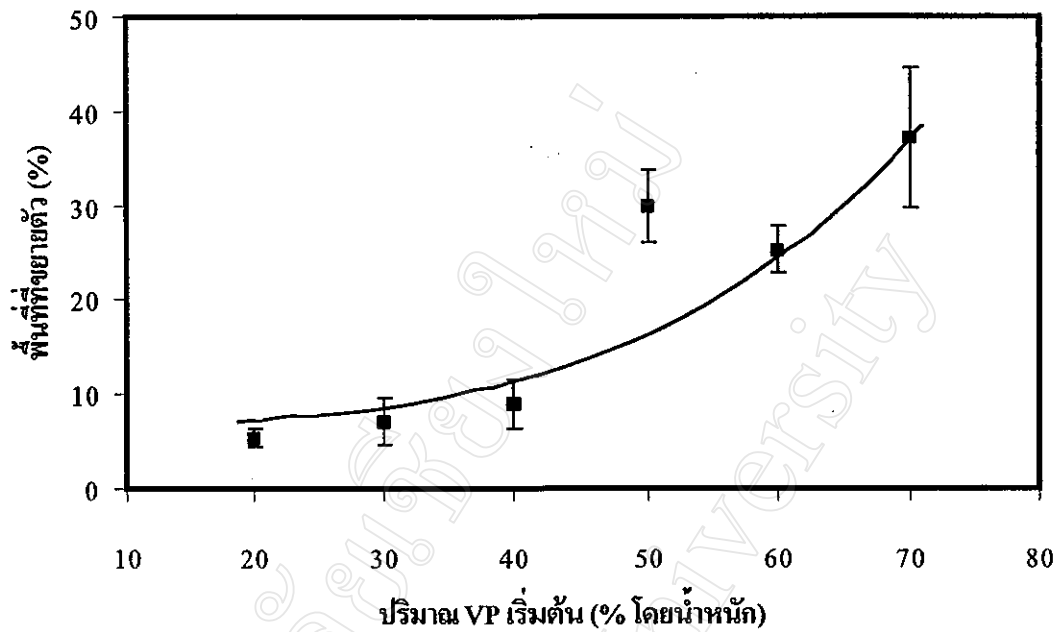
ขนาดของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์เมื่อแห้งและเมื่ออิมมิดด้วยน้ำและเปอร์เซ็นต์การขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตร แสดงดังตาราง 3.32 และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในตอนเริ่มต้นกับพื้นที่และปริมาตรที่ขยายตัวเมื่ออิมมิดด้วยน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่สังเคราะห์ได้ แสดงในรูป 3.45 และ 3.46 ตามลำดับ

ตาราง 3.32 ขนาดของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์เมื่อแห้งและเมื่ออิมิตัวด้วยน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตร

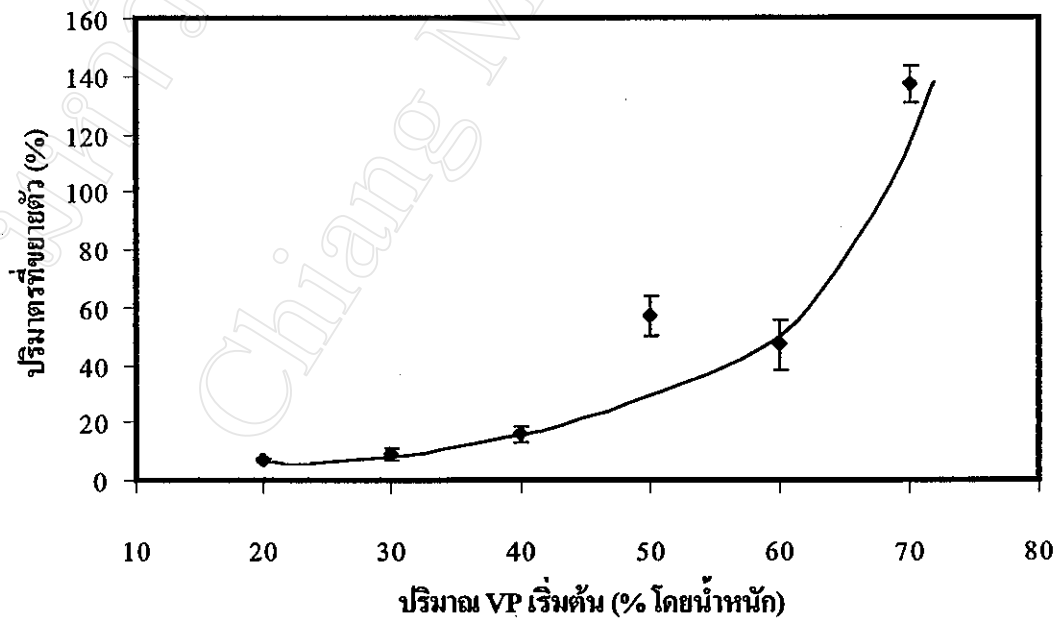
โคพอลิเมอร์ที่ สังเคราะห์ได้	ตัวอย่าง ที่	เมื่อแห้ง				เมื่ออิมิตัวด้วยน้ำ				พื้นที่ ที่ขยายตัว (%)	ปริมาตร ที่ขยายตัว (%)	พื้นที่ ที่ขยายตัว เฉลี่ย (%)	ปริมาตร ที่ขยายตัว เฉลี่ย (%)
		กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาตร (ลบ.มม.)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาตร (ลบ.มม.)		
P(MMA-stat-20%VP)	1	16.0	30.5	0.331	488	162	16.5	31.0	0.335	512	171	4.8	6
	2	16.0	30.0	0.388	480	186	16.5	31.0	0.395	512	202	6.6	8
	3	16.5	30.0	0.341	495	169	17.0	30.5	0.343	519	178	4.7	5
P(MMA-stat-30%VP)	1	16.0	30.0	0.333	480	160	16.5	31.0	0.339	512	173	6.6	8
	2	16.0	29.5	0.341	472	161	16.5	30.0	0.350	495	173	4.9	8
	3	16.0	30.0	0.371	480	178	17.0	31.0	0.374	527	197	9.8	11
P(MMA-stat-40%VP)	1	16.0	29.0	0.351	464	163	16.0	31.0	0.380	496	188	6.9	16
	2	15.5	28.8	0.363	446	162	16.0	30.2	0.380	483	184	8.2	13
	3	15.5	29.0	0.370	450	166	16.5	30.5	0.396	503	199	12.0	20
P(MMA-stat-50%VP)	1	13.5	25.5	0.337	344	116	15.5	29.5	0.417	457	191	32.8	64
	2	13.7	25.0	0.425	343	146	15.5	29.0	0.500	450	225	31.2	54
	3	14.5	25.5	0.455	370	168	16.0	29.0	0.549	464	255	25.5	51

ตาราง 3.32 (ต่อ)

โคพอลิเมอร์ที่ สังเคราะห์ได้	ตัวอย่าง ที่	เนื้อแห้ง				เมื่อฉีดด้วยน้ำ						พื้นที่ ที่ขยายตัว (%)	ปริมาตร ที่ขยายตัว (%)	พื้นที่ ที่ขยายตัว เฉลี่ย (%)	ปริมาตร ที่ขยายตัว เฉลี่ย (%)
		กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาตร (ลบ.มม.)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาตร (ลบ.มม.)				
P(MMA-stat-60%VP)	1	14.0	27.0	0.373	378	141	16.0	30.0	0.429	480	206	27.0	46		
	2	14.5	27.0	0.367	392	144	16.0	30.0	0.414	480	199	22.6	38	25.3±2.4	47±9
	3	14.5	27.0	0.366	392	143	16.5	30.0	0.450	495	223	26.4	55		
P(MMA-stat-70%VP)	1	14.5	25.5	0.272	370	101	17.0	30.5	0.472	519	245	40.2	143		
	2	14.0	26.0	0.301	364	110	17.0	30.5	0.499	519	259	42.4	136	37.1±7.5	137±6
	3	14.5	27.0	0.205	392	80.3	16.5	30.5	0.368	503	185	28.5	131		



รูป 3.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวไนล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นกับพื้นที่ที่ยาวตัวของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.349 ± 0.054 มม.



รูป 3.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวไนล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นกับปริมาณที่ขยายตัวของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.349 ± 0.054 มม.

รูป 3.45-3.46 แสดงให้เห็นว่า การขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตรของแผ่นฟิล์ม โคพอลิเมอร์เมื่ออิมิดด้วยน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนที่เพิ่มขึ้น โดยการขยายตัวเพิ่มขึ้นมาก ในโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนคอนเริ่มต้นมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก

3.5.6 สมบัติการดูดซับน้ำของโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (Water Absorption properties)

สมบัติการดูดซับน้ำของโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้ศึกษาในสองรูปแบบ คือ ปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium Water Content, EWC) และปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล (Equilibrium Remaining Water Content, ERWC) ปริมาณน้ำสมดุล คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่พอลิเมอร์นั้นดูดซับไว้ได้ในโครงสร้างเมื่อแช่อยู่ในน้ำ ส่วนปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่พอลิเมอร์นั้นสามารถเก็บไว้ได้ในโครงสร้างเมื่อไม่ได้แช่อยู่ในน้ำ ซึ่งสมบัติทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับสมบัติอื่นๆ ได้แก่ การแพร่ผ่านของน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติพื้นผิว และความเข้ากันได้ทางชีวภาพของไฮโดรเจล [23, 30]

3.5.6.1 ปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium Water Content)

3.5.6.1.1 การทดลอง

นำแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่เตรียมได้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 1.6×3.0 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น นำไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ บันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์แห้ง จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ นำแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ออกมาชั่งน้ำหนักด้วยกระดาษกรองและชั่งน้ำหนักที่ระยะเวลาต่างๆ จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปริมาณน้ำ (water content) ของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่ดูดซับได้ ณ เวลาต่างๆ คำนวณตามสมการ (2.1) [22]

$$\text{ปริมาณน้ำ} = \frac{(\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักพอลิเมอร์แห้ง})}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ}} \times 100\% \quad (2.1)$$

ปริมาณน้ำที่แผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์มีน้ำหนักคงที่หรือที่สมดุลเรียกว่า ปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium Water Content) ซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.5.6.1.2 ผลการทดลอง

น้ำหนักของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์เมื่อดูดซับน้ำและปริมาณน้ำ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีอัตราส่วนของโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กัน แสดงในตาราง 3.33-3.38 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ดูดซับของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์กับเวลาแสดงในรูป 3.47 และค่าปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นต่างๆ กัน แสดงในตาราง 3.39 ปริมาณน้ำที่ดูดซับโดย PMMA PVP และ P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนมากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ไม่ได้แสดงในที่นี้ เนื่องจาก PMMA ดูดซับน้ำได้น้อยมาก ส่วน PVP และ P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนตอนเริ่มต้นมากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้เมื่ออยู่ในน้ำ

ตาราง 3.33 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-20%VP) ความหนา 0.353 ± 0.030 มม. เมื่อแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$

เวลา (นาท)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-20%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.2114	0.1854	0.1883	0	0	0	0
20	0.2125	0.1866	0.1897	0.5	0.6	0.7	0.6 ± 0.1
40	0.2133	0.1877	0.1906	0.9	1.2	1.2	1.1 ± 0.2
60	0.2140	0.1884	0.1913	1.2	1.6	1.5	1.5 ± 0.2
80	0.2147	0.1889	0.1919	1.5	1.8	1.9	1.8 ± 0.2
100	0.2152	0.1895	0.1924	1.8	2.2	2.1	2.0 ± 0.2
120	0.2160	0.1901	0.1932	2.1	2.5	2.5	2.4 ± 0.2
150	0.2167	0.1909	0.1938	2.4	2.9	2.8	2.7 ± 0.2
180	0.2175	0.1916	0.1946	2.8	3.2	3.2	3.1 ± 0.2
210	0.2180	0.1924	0.1953	3.0	3.6	3.6	3.4 ± 0.3
240	0.2186	0.1927	0.1962	3.3	3.8	4.0	3.7 ± 0.4

ตาราง 3.33 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 20%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
270	0.2183	0.1924	0.1954	3.2	3.6	3.6	3.5±0.3
330	0.2187	0.1928	0.1959	3.3	3.8	3.9	3.7±0.3
390	0.2195	0.1938	0.1988	3.7	4.3	5.3	4.4±0.8
450	0.2203	0.1948	0.1979	4.0	4.8	4.8	4.6±0.5
510	0.2210	0.1949	0.1981	4.3	4.9	5.0	4.7±0.3
570	0.2216	0.1956	0.1989	4.6	5.2	5.3	5.1±0.4
630	0.2221	0.1959	0.1995	4.8	5.4	5.6	5.3±0.4
690	0.2227	0.1962	0.1995	5.1	5.5	5.6	5.4±0.3
810	0.2232	0.1971	0.2005	5.3	5.9	6.1	5.8±0.4
930	0.2243	0.1977	0.2011	5.8	6.2	6.4	6.1±0.3
1050	0.2249	0.1982	0.2016	6.0	6.5	6.6	6.4±0.3
1410	0.2262	0.1992	0.2025	6.5	6.9	7.0	6.8±0.2
1590	0.2269	0.1997	0.2030	6.8	7.2	7.2	7.1±0.2
1770	0.2272	0.1998	0.2032	7.0	7.2	7.3	7.2±0.2
1950	0.2278	0.2002	0.2035	7.2	7.3	7.4	7.3±0.2

ตาราง 3.34 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-30%VP) ความหนา 0.348 ± 0.020 มม. เมื่อแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 30%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.1652	0.1687	0.1876	0	0	0	0
20	0.1676	0.1708	0.1896	1.4	1.2	1.1	1.2 ± 0.2
40	0.1695	0.1720	0.1909	2.5	1.9	1.7	2.1 ± 0.4
60	0.1701	0.1728	0.1919	2.9	2.4	2.2	2.5 ± 0.3
80	0.1709	0.1739	0.1929	3.3	3.0	2.8	3.0 ± 0.3
100	0.1719	0.1744	0.1936	3.9	3.3	3.1	3.4 ± 0.4
120	0.1728	0.1753	0.1945	4.4	3.8	3.6	3.9 ± 0.4
150	0.1737	0.1764	0.1957	4.9	4.4	4.1	4.5 ± 0.4
180	0.1750	0.1802	0.1969	5.6	6.4	4.7	5.6 ± 0.8
210	0.176	0.1785	0.1979	6.1	5.5	5.2	5.6 ± 0.5
240	0.1767	0.1792	0.1985	6.5	5.9	5.5	6.0 ± 0.5
270	0.1766	0.1791	0.1986	6.5	5.8	5.5	5.9 ± 0.5
330	0.1774	0.1798	0.1993	6.9	6.2	5.9	6.3 ± 0.5
390	0.1790	0.1812	0.2007	7.7	6.9	6.5	7.0 ± 0.6
450	0.1796	0.182	0.2019	8.0	7.3	7.1	7.5 ± 0.5
510	0.1825	0.1828	0.2027	9.5	7.7	7.4	8.2 ± 1.1
570	0.1806	0.1828	0.2033	8.5	7.7	7.7	8.0 ± 0.5
630	0.1813	0.1836	0.2038	8.9	8.1	8.0	8.3 ± 0.5
690	0.1814	0.1838	0.2042	8.9	8.2	8.1	8.4 ± 0.4
810	0.1822	0.1849	0.2050	9.3	8.8	8.5	8.9 ± 0.4
930	0.1827	0.1853	0.2054	9.6	9.0	8.7	9.1 ± 0.5
1050	0.1853	0.1859	0.2058	10.8	9.2	8.8	9.6 ± 1.1

ตาราง 3.34 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-30%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
1410	0.1834	0.1863	0.2100	9.9	9.4	10.7	10.0±0.6
1590	0.1836	0.1866	0.2073	10.0	9.6	9.5	9.7±0.3
1770	0.1838	0.1869	0.2075	10.1	9.7	9.6	9.8±0.3
1950	0.1839	0.1872	0.2111	10.2	9.9	11.1	10.4±0.6

ตาราง 3.35 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-40%VP) ความหนา 0.361±0.009 มม. เมื่อแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35±1°C

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-40%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.1883	0.1802	0.1959	0	0	0	0
20	0.1925	0.1839	0.2009	2.2	2.0	2.5	2.2±0.2
40	0.1950	0.1860	0.2027	3.4	3.1	3.4	3.3±0.2
60	0.1966	0.1880	0.2050	4.2	4.2	4.4	4.3 ± 0.2
80	0.1993	0.1902	0.2068	5.5	5.3	5.3	5.3 ± 0.2
100	0.2001	0.1917	0.2079	5.9	6.0	5.8	5.9±0.1
120	0.2021	0.1933	0.2099	6.8	6.8	6.7	6.8±0.1
150	0.2051	0.1961	0.2119	8.2	8.1	7.6	8.0±0.4
180	0.2079	0.1986	0.2144	9.4	9.3	8.6	9.1±0.4

ตาราง 3.35 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 40%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
210	0.2092	0.2007	0.2167	10.0	10.2	9.6	9.9±0.3
240	0.2111	0.2025	0.2183	10.8	11.0	10.3	10.7±0.4
270	0.2118	-	0.2193	11.1	-	10.7	10.9±0.3
330	0.2140	0.2056	0.2222	12.0	12.4	11.9	12.1±0.3
390	0.2159	0.2071	0.2241	12.8	13.0	12.6	12.8±0.2
450	0.2172	0.2081	0.2252	13.3	13.4	13.0	13.2±0.2
510	0.2182	0.209	0.2267	13.7	13.8	13.6	13.7±0.1
570	0.2192	0.2098	0.2287	14.1	14.1	14.3	14.2±0.1
630	0.2195	0.2101	0.2278	14.2	14.2	14.0	14.2±0.1
690	0.2197	0.2106	0.2286	14.3	14.4	14.3	14.3±0.1
810	0.2202	0.2100	0.2283	14.5	14.2	14.2	14.3±0.2
930	0.2205	0.2107	0.2294	14.6	14.5	14.6	14.6±0.1
1050	0.2205	0.2104	0.2292	14.6	14.4	14.5	14.5±0.1
1410	0.2217	0.2114	0.2304	15.1	14.8	15.0	14.9±0.2
1590	0.2224	0.2127	0.2311	15.3	15.3	15.2	15.3±0.1
1770	0.2222	0.2124	0.2310	15.3	15.2	15.2	15.2±0.1
1950	0.2224	0.2130	0.2316	15.3	15.4	15.4	15.4±0.1

ตาราง 3.36 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-50%VP) ความหนา 0.406 ± 0.061 มม. เมื่อแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$

เวลา (นาท)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 50%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.1300	0.1507	0.1721	0	0	0	0
20	0.1546	0.1742	0.1990	15.9	13.5	13.5	14.3 ± 1.4
40	0.1749	0.1922	0.2193	25.7	21.6	21.5	22.9 ± 2.4
60	0.1865	0.2086	0.2365	30.3	27.8	27.2	28.4 ± 1.6
80	0.1929	0.2184	0.2470	32.6	31.0	30.3	31.3 ± 1.2
100	0.1949	0.2228	0.2529	33.3	32.4	32.0	32.5 ± 0.7
120	0.1979	0.2266	0.2568	34.3	33.5	33.0	33.6 ± 0.7
150	0.1998	0.2289	0.2603	34.9	34.2	33.9	34.3 ± 0.5
180	0.2027	0.2315	0.2619	35.9	34.9	34.3	35.0 ± 0.8
210	0.2031	0.2330	0.2651	36.0	35.3	35.0	35.5 ± 0.5
240	0.2049	0.2334	0.2670	36.6	35.4	35.5	35.8 ± 0.6
270	0.2034	0.2345	0.2667	36.1	35.7	35.5	35.8 ± 0.3
330	0.2050	0.2356	0.2671	36.6	36.0	35.6	36.1 ± 0.5
390	0.2051	0.2368	0.2696	36.6	36.4	36.2	36.4 ± 0.2
450	0.2066	0.2377	0.2699	37.1	36.6	36.2	36.6 ± 0.4
510	0.2077	0.2389	0.2719	37.4	36.9	36.7	37.0 ± 0.4
570	0.2089	0.2396	0.2726	37.8	37.1	37.0	37.2 ± 0.5
630	0.2082	0.2401	0.2724	37.6	37.2	36.8	37.2 ± 0.3
690	0.2083	0.2399	0.2743	37.6	37.2	37.3	37.3 ± 0.2
810	0.2098	0.2419	0.2752	38.0	37.7	37.5	37.7 ± 0.3
930	0.2114	0.2422	0.2766	38.5	37.8	37.8	38.0 ± 0.4
1050	0.2123	0.2424	0.2763	38.8	37.8	37.7	38.1 ± 0.6

ตาราง 3.36 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 50%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
1410	0.2140	0.2445	0.2794	39.3	38.4	38.4	38.7±0.5
1590	0.2148	0.2455	0.2797	39.5	38.6	38.5	38.8±0.5
1770	0.2150	0.2456	0.2804	39.5	38.6	38.6	38.9±0.5
1950	0.2156	0.2460	0.2813	39.7	38.7	38.8	39.1±0.5

ตาราง 3.37 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-60%VP) ความหนา 0.369±0.004 มม. เมื่อแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35±1°C

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 60%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.1531	0.1191	0.1445	0	0	0	0
20	0.1732	0.1357	0.1641	11.6	12.2	11.9	11.9±0.3
40	0.1904	0.1525	0.1813	19.6	21.9	20.3	20.6±1.2
60	0.1978	0.1596	0.1909	22.6	25.4	24.3	24.1±1.4
80	0.2074	0.1676	0.1989	26.2	28.9	27.4	27.5±1.4
100	0.2149	0.1745	0.2063	28.8	31.8	30.0	30.2±1.5
120	0.2227	0.1797	0.2140	31.3	33.7	32.5	32.5±1.2
150	0.2306	0.1833	0.2176	33.6	35.0	33.6	34.1±0.8
180	0.2363	0.1876	0.2238	35.2	36.5	35.4	35.7±0.7

ตาราง 3.37 (ต่อ)

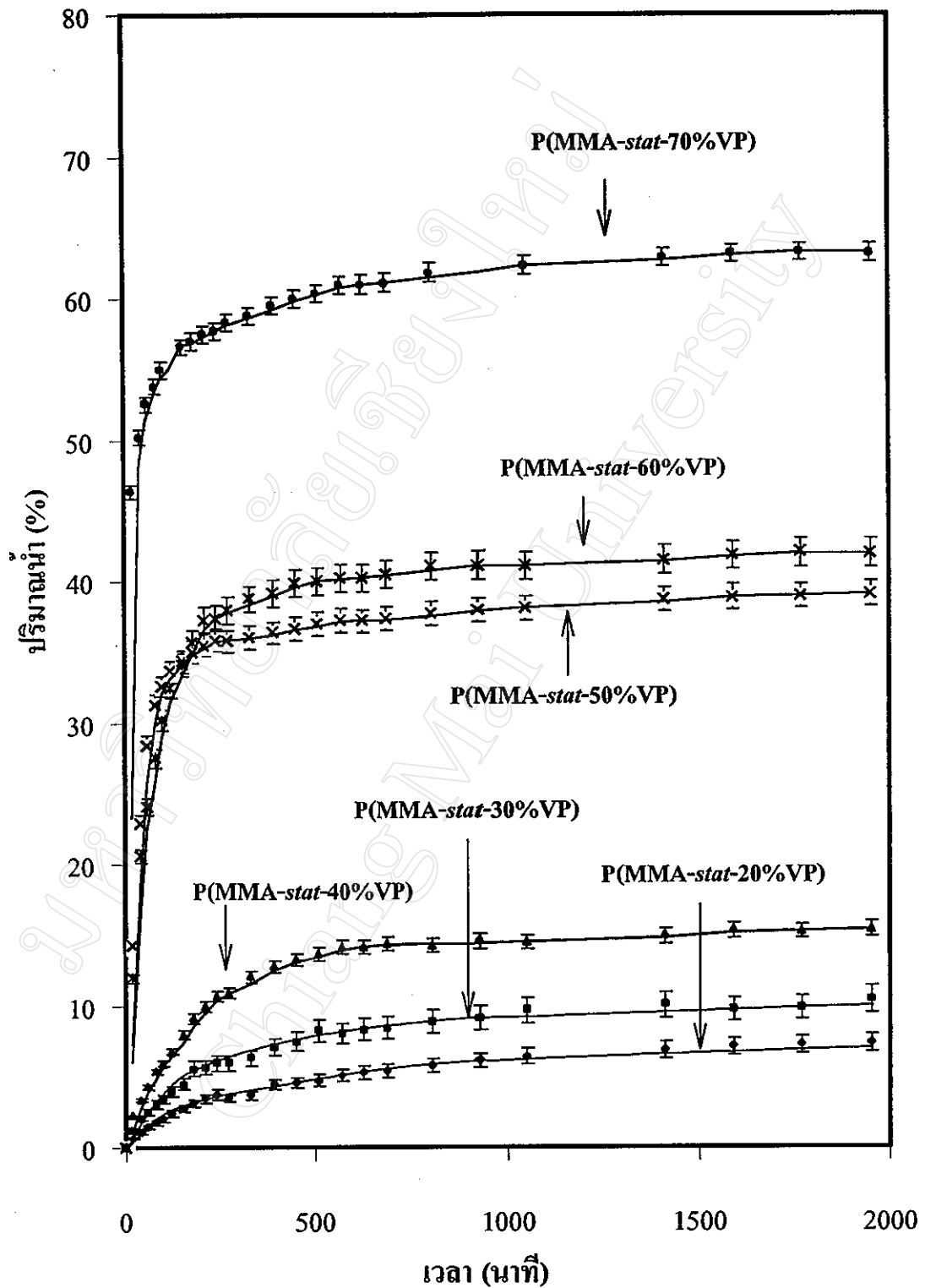
เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 60%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
210	0.2437	0.1931	0.2272	37.2	38.3	36.4	37.3±1.0
240	0.2438	0.1920	0.2296	37.2	38.0	37.1	37.4±0.5
270	0.2460	0.1937	0.2317	37.8	38.5	37.6	38.0±0.5
330	0.2502	0.1945	0.2357	38.8	38.8	38.7	38.8±0.1
390	0.2546	0.1930	0.2382	39.9	38.3	39.3	39.2±0.8
450	0.2566	0.1956	0.2419	40.3	39.1	40.3	39.9±0.7
510	0.2579	0.1966	0.2408	40.6	39.4	40.0	40.0±0.6
570	0.2586	0.1975	0.2411	40.8	39.7	40.1	40.2±0.6
630	0.2594	0.1962	0.2428	41.0	39.3	40.5	40.2±0.9
690	0.2601	0.1973	0.2430	41.1	39.6	40.5	40.4±0.7
810	0.2613	0.2005	0.2455	41.4	40.6	41.2	41.1±0.4
930	0.2629	0.2001	0.2456	41.8	40.5	41.2	41.1±0.7
1050	0.2632	0.1994	0.2458	41.8	40.3	41.2	41.1±0.8
1410	0.2651	0.2002	0.2479	42.2	40.5	41.7	41.5±0.9
1590	0.2658	0.2021	0.2489	42.4	41.1	41.9	41.8±0.7
1770	0.2665	0.2024	0.2502	42.6	41.2	42.2	42.0±0.7
1950	0.2674	0.2014	0.2503	42.7	40.9	42.3	42.0±1.0

ตาราง 3.38 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-70%VP) ความหนา 0.259 ± 0.049 มม. เมื่อแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$

เวลา (นาท)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 70%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0962	0.1021	0.0768	0	0	0	0.0
20	0.1749	0.1861	0.1505	45.0	45.1	49.0	46.4 ± 2.2
40	0.1941	0.2018	0.1562	50.4	49.4	50.8	50.2 ± 0.7
60	0.2027	0.2140	0.1628	52.5	52.3	52.8	52.6 ± 0.3
80	0.2075	0.2204	0.1675	53.6	53.7	54.2	53.8 ± 0.3
100	0.2132	0.2275	0.1703	54.9	55.1	54.9	55.0 ± 0.1
150	0.2205	0.2358	0.1774	56.4	56.7	56.7	56.6 ± 0.2
180	0.2241	0.2392	0.1774	57.1	57.3	56.7	57.0 ± 0.3
210	0.2252	0.2411	0.1804	57.3	57.6	57.4	57.4 ± 0.2
240	0.2262	0.2450	0.1806	57.5	58.3	57.5	57.8 ± 0.5
270	0.2313	0.2478	0.1819	58.4	58.8	57.8	58.3 ± 0.5
330	0.2332	0.2501	0.1852	58.8	59.2	58.5	58.8 ± 0.3
390	0.2377	0.2550	0.1869	59.5	60.0	58.9	59.5 ± 0.5
450	0.2412	0.2580	0.1892	60.1	60.4	59.4	60.0 ± 0.5
510	0.2439	0.2587	0.1926	60.6	60.5	60.1	60.4 ± 0.2
570	0.2454	0.2646	0.1946	60.8	61.4	60.5	60.9 ± 0.4
630	0.2481	0.2647	0.1939	61.2	61.4	60.4	61.0 ± 0.6
690	0.2484	0.2667	0.1940	61.3	61.7	60.4	61.1 ± 0.7
810	0.2536	0.2703	0.1981	62.0	62.2	61.2	61.8 ± 0.5
930	0.2552	0.2807	0.2075	62.3	63.6	63.0	63.0 ± 0.7
1050	0.2564	0.2747	0.2004	62.5	62.8	61.7	62.3 ± 0.6
1410	0.2604	0.2792	0.2025	63.1	63.4	62.1	62.8 ± 0.7

ตาราง 3.38 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 70%VP) (g)			ปริมาณน้ำ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
1590	0.2617	0.2809	0.2046	63.2	63.6	62.5	63.1±0.6
1770	0.2624	0.2823	0.2050	63.3	63.8	62.5	63.2±0.6
1950	0.2645	0.2832	0.2013	63.6	64.0	61.8	63.1±1.1

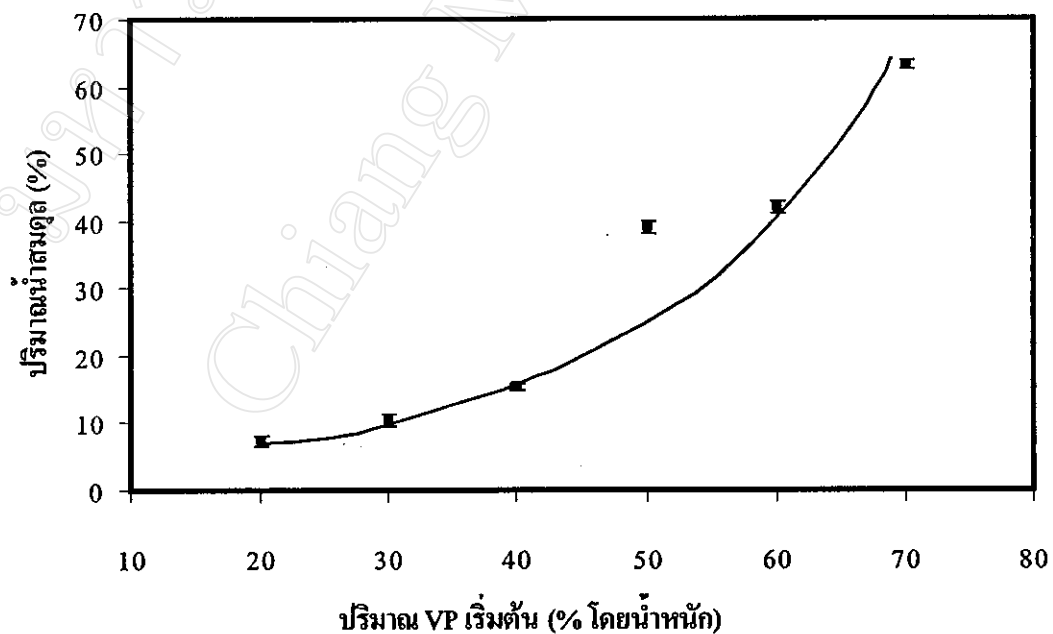


รูป 3.47 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ดูดซับกับเวลา ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนในคอนเริ่มต้นต่างๆ กัน ความหนา 0.349 ± 0.029 มม. เมื่อแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$

ตาราง 3.39 ค่าปริมาณน้ำสมดุลที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันที่สังเคราะห์ได้

โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	ความหนา (มม.)	ปริมาณน้ำสมดุล (%)
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	0.353 ± 0.030	7.3 ± 0.6
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	0.348 ± 0.020	10.4 ± 0.9
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	0.361 ± 0.009	15.4 ± 0.5
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	0.406 ± 0.061	39.1 ± 0.9
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	0.369 ± 0.004	42.0 ± 1.0
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	0.259 ± 0.049	63.2 ± 0.6

ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นกับปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) แสดงในรูป 3.48



รูป 3.48 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นกับปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.349 ± 0.029 มม. ที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$

3.5.6.2 ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล (Equilibrium Remaining Water Content)

3.5.6.2.1 การทดลอง

นำแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์จากการทดลองในหัวข้อ 3.5.6.1 ที่พองตัวถึงจุดสมดุลแล้วมาชั่งน้ำหนักด้วยกระดาษกรองนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นน้ำหนักแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่จุดสมดุล จากนั้นนำไปแขวนไว้ในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60% นำแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ออกมาชั่งน้ำหนักที่ระยะเวลาต่างๆ จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ แสดงในรูปปริมาณน้ำคงเหลือ (remaining water content) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3.13)

$$\text{ปริมาณน้ำคงเหลือ} = \frac{(\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ ณ เวลาใด ๆ} - \text{น้ำหนักพอลิเมอร์แห้ง}) \times 100\%}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ ณ เวลาใด ๆ}} \quad (3.13)$$

ปริมาณน้ำคงเหลือของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักคงที่ เรียกว่า ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล โดยน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.5.6.2.2 ผลการทดลอง

น้ำหนักที่ลดลงและปริมาณน้ำคงเหลือของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นต่างๆ กัน และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงเหลือกับเวลาแสดงในตาราง 3.40-3.45 และรูป 3.49-3.54 ตามลำดับ ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุลของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโคมอนอเมอร์ตอนเริ่มต้นต่างๆ กัน ที่สังเคราะห์ได้แสดงในตาราง 3.46

ตาราง 3.40 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-20%VP) ความหนา 0.353 ± 0.030 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และ ความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (นาท)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 20%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.2302	0.2017	0.2053	8.2	8.1	8.3	8.2 ± 0.1
10	0.2275	0.1996	0.2027	7.1	7.1	7.1	7.1 ± 0.1
20	0.2265	0.1984	0.2016	6.7	6.5	6.6	6.6 ± 0.6
30	0.2258	0.1978	0.2008	6.4	6.3	6.2	6.3 ± 0.1
40	0.2246	0.1965	0.1996	5.9	5.7	5.7	5.7 ± 0.1
50	0.2241	0.1959	0.1991	5.8	5.4	5.4	5.5 ± 0.2
60	0.2228	0.1946	0.1978	5.1	4.7	4.8	4.9 ± 0.2
70	0.2220	0.1940	0.1973	4.8	4.4	4.6	4.6 ± 0.2
80	0.2210	0.1930	0.1962	4.3	3.9	4.0	4.1 ± 0.2
90	0.2202	0.1923	0.1954	4.0	3.6	3.6	3.7 ± 0.2
100	0.2196	0.1918	0.1949	3.7	3.3	3.4	3.5 ± 0.2
110	0.2188	0.1912	0.1944	3.4	3.0	3.1	3.2 ± 0.2
120	0.2180	0.1902	0.1933	3.0	2.5	2.6	2.7 ± 0.3
140	0.2170	0.1896	0.1927	2.6	2.2	2.3	2.4 ± 0.2
160	0.2165	0.1890	0.1921	2.4	1.9	2.0	2.1 ± 0.2
180	0.2159	0.1886	0.1916	2.1	1.7	1.7	1.8 ± 0.2
210	0.2150	0.1879	-	1.7	1.3	-	1.5 ± 0.2
240	0.2144	0.1880	0.1910	1.4	1.4	1.4	1.4 ± 0.1
270	0.2140	0.1877	0.1907	1.2	1.2	1.3	1.2 ± 0.1
300	0.2136	0.1874	0.1904	1.0	1.1	1.1	1.1 ± 0.1
360	0.2136	0.1874	0.1904	1.0	1.1	1.1	1.1 ± 0.1
420	0.2137	0.1877	0.1907	1.1	1.2	1.3	1.2 ± 0.1

ตาราง 3.40 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 20%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
480	0.2134	0.1876	0.1906	1.0	1.2	1.2	1.1±0.1
540	0.2133	0.1876	0.1906	0.9	1.2	1.2	1.1±0.2
600	0.2132	0.1876	0.1905	0.8	1.2	1.2	1.1±0.2
660	0.2133	0.1874	0.1903	0.9	1.1	1.1	1.0±0.1

ตาราง 3.41 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-30%VP)
ความหนา 0.348 ± 0.020 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 30%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.1855	0.1891	0.2099	10.9	10.8	10.6	10.8±0.2
10	0.1818	0.1855	0.2065	9.1	9.1	9.2	9.1±0.1
20	0.1800	0.1837	0.2044	8.2	8.2	8.2	8.2±0.1
30	0.1791	0.1827	0.2036	7.8	7.7	7.9	7.8±0.1
40	0.1777	0.1813	0.2019	7.0	7.0	7.1	7.0±0.1
50	0.1771	0.1807	0.2011	6.7	6.6	6.7	6.7±0.1
60	0.1757	0.1794	0.1997	6.0	5.60	6.1	6.0±0.1
70	0.1748	0.1784	0.1985	5.5	5.4	5.5	5.5±0.1
80	0.1736	0.1772	0.1972	4.8	4.8	4.9	4.8±0.4

ตาราง 3.41 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 30%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
90	0.1730	0.1766	0.1965	4.5	4.5	4.5	4.5±0.1
100	0.1722	0.1757	0.1956	4.1	4.0	4.1	4.1±0.1
110	0.1716	0.1751	0.1948	3.7	3.7	3.7	3.7±0.1
120	0.1706	0.1741	0.1936	3.2	3.1	3.1	3.1±0.1
140	0.1701	0.1735	0.193	2.9	2.8	2.8	2.8±0.1
160	0.1696	0.1732	0.1924	2.6	2.6	2.5	2.6±0.2
180	0.1691	0.1724	0.1916	2.3	2.2	2.1	2.2±0.1
210	0.1689	0.1720	0.1911	2.2	1.9	1.8	1.2±0.2
240	0.1687	0.1717	0.1907	2.1	1.8	1.6	1.8±0.2
270	0.1683	0.1714	0.1903	1.8	1.6	1.4	1.6±0.2
300	0.1679	0.1709	0.1898	1.6	1.3	1.2	1.4±0.2
360	0.1680	0.1710	0.1899	1.7	1.4	1.2	1.4±0.2
420	0.1683	0.1714	0.1902	1.8	1.6	1.4	1.6±0.2
480	0.1682	0.1712	0.1898	1.8	1.5	1.2	1.5±0.3
540	0.1683	0.1712	0.1900	1.8	1.5	1.3	1.5±0.3
600	0.1683	0.1712	0.1900	1.8	1.5	1.3	1.5±0.3
660	0.1683	0.1713	0.1901	1.8	1.5	1.3	1.6±0.3

ตาราง 3.42 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-40%VP) ความหนา 0.361 ± 0.009 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (นาที)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 40%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.2241	0.2146	0.2352	16.0	16.0	16.7	16.2 ± 0.4
10	0.2168	0.2073	0.2272	13.2	13.1	13.8	13.4 ± 0.4
20	0.2128	0.2030	0.2225	11.5	11.2	12.0	11.6 ± 0.4
30	0.2110	0.2009	0.2204	10.8	10.3	11.1	10.7 ± 0.4
40	0.2086	0.1986	0.2179	9.7	9.3	10.1	9.7 ± 0.4
50	0.2074	0.1973	0.2164	9.2	8.7	9.5	9.1 ± 0.4
60	0.2051	0.1950	0.2139	8.2	7.6	8.4	8.1 ± 0.4
70	0.2034	0.1933	0.2122	7.4	6.8	7.7	7.3 ± 0.5
80	0.2020	0.1920	0.2108	6.8	6.2	7.1	6.7 ± 0.5
90	0.2007	0.1908	0.2094	6.2	5.6	6.4	6.1 ± 0.4
100	0.1998	0.1899	0.2083	5.8	5.1	5.9	5.8 ± 0.1
110	0.1990	0.1892	0.2075	5.4	4.8	5.6	5.2 ± 0.4
120	0.1976	0.1879	0.2060	4.7	4.1	4.9	4.6 ± 0.4
140	0.1970	0.1873	0.2053	4.4	3.8	4.6	4.3 ± 0.4
160	0.1963	0.1869	0.2047	4.1	3.6	4.3	4.0 ± 0.4
180	0.1957	0.1861	0.2038	3.8	3.2	3.9	3.6 ± 0.4
210	0.1952	0.1857	0.2033	3.5	3.0	3.6	3.4 ± 0.4
240	0.1946	0.1853	0.2027	3.2	2.8	3.4	3.1 ± 0.3
270	0.1944	0.1850	0.2022	3.1	2.6	3.1	2.9 ± 0.4
300	0.1938	0.1846	0.2017	2.8	2.4	2.9	2.7 ± 0.3
360	0.1939	0.1846	0.2018	2.9	2.4	2.9	2.7 ± 0.3
420	0.1943	0.1851	0.2021	3.1	2.6	3.1	2.9 ± 0.2

ตาราง 3.42 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 40%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
480	0.1939	0.1846	0.2017	2.9	2.4	2.9	2.7 ± 0.3
540	0.1940	0.1847	0.2018	2.9	2.4	2.9	2.8 ± 0.3
600	0.1938	0.1847	0.2016	2.8	2.4	2.8	2.7 ± 0.3
660	0.1938	0.1848	0.2017	2.8	2.5	2.9	2.7 ± 0.2

ตาราง 3.43 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-50%VP)
ความหนา 0.406 ± 0.061 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 50%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.2091	0.2392	0.2725	37.8	37.0	36.8	37.2 ± 0.5
10	0.1798	0.2101	0.2438	27.7	28.3	29.4	28.5 ± 0.9
20	0.1648	0.1974	0.2290	21.1	23.7	24.8	23.2 ± 1.9
30	0.1557	0.1877	0.2178	16.5	19.7	21.0	19.1 ± 2.3
40	0.1495	0.1798	0.2084	13.0	16.2	17.4	15.6 ± 2.2
50	0.1448	0.1729	0.2003	10.2	12.8	14.1	12.4 ± 2.0
60	0.1417	0.1682	0.1943	8.3	10.4	11.4	10.0 ± 1.6
70	0.1401	0.1658	0.1913	7.2	9.1	10.0	8.8 ± 1.4
80	0.1391	0.1642	0.1892	6.5	8.2	9.0	7.9 ± 1.3

ตาราง 3.43 (ต่อ)

เวลา (นาท)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 50%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
90	0.1386	0.1632	0.1878	6.2	7.7	8.4	7.4±1.1
100	0.1378	0.1623	0.1867	5.7	7.2	7.8	6.9±1.1
110	0.1374	0.1614	0.1855	5.4	6.6	7.2	6.4±0.9
120	0.1367	0.1604	0.1843	4.9	6.1	6.6	5.9±0.9
140	0.1357	0.1593	0.1829	4.2	5.4	5.9	5.2±0.9
160	0.1350	0.1584	0.1819	3.7	4.9	5.4	4.6±0.9
180	0.1344	0.1575	0.1805	3.3	4.3	4.6	4.1±0.7
210	0.1342	0.1570	0.1805	3.1	4.0	4.6	3.9±0.8
240	0.1338	0.1565	0.1800	2.8	3.7	4.4	3.6±0.8
270	0.1335	0.1559	0.1793	2.6	3.3	4.0	3.3±0.7
300	0.1334	0.1557	0.1787	2.6	3.2	3.7	3.2±0.6
360	0.1334	0.1555	0.1783	2.6	3.1	3.5	3.0±0.5
420	0.1328	0.1550	0.1781	2.1	2.8	3.4	2.8±.6
480	0.1331	0.1553	0.1775	2.3	3.0	3.0	2.8±0.4
540	0.1333	0.1553	0.1776	2.5	3.0	3.1	2.8±0.3
600	0.1325	0.1546	0.1768	1.9	2.5	2.7	2.4±0.4
660	0.1327	0.1545	0.1768	2.0	2.5	2.7	2.4±0.3

ตาราง 3.44 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-60%VP) ความหนา 0.369 ± 0.004 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> -60%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.2638	0.2021	0.2516	42.0	41.1	42.6	41.9 ± 0.7
10	0.2355	0.1765	0.2253	35.0	32.5	35.9	34.5 ± 1.7
20	0.2178	0.1608	0.2077	29.7	25.9	30.4	28.7 ± 2.4
30	0.2041	0.1493	0.1944	25.0	20.2	25.7	23.6 ± 3.0
40	0.1916	0.1405	0.1823	20.1	15.2	20.7	18.7 ± 3.0
50	0.1804	0.1342	0.1711	15.1	11.2	15.6	14.0 ± 2.4
60	0.1723	0.1304	0.1633	11.1	8.7	11.5	10.4 ± 1.5
70	0.1690	0.1290	0.1604	9.4	7.7	9.9	9.0 ± 1.2
80	0.1665	0.1276	0.1579	8.0	6.7	2.3	5.7 ± 3.0
90	0.1648	0.1269	0.1563	7.1	6.2	7.6	6.9 ± 0.7
100	0.1635	0.1263	0.1551	6.4	5.7	6.8	6.3 ± 0.6
110	0.1624	0.1257	0.1540	5.7	5.2	6.2	5.7 ± 0.5
120	0.1614	0.1252	0.1530	5.1	4.9	5.6	5.2 ± 0.3
140	0.1598	0.1244	0.1516	4.2	4.3	4.7	4.4 ± 0.3
160	0.1586	0.1240	0.1508	3.5	4.0	4.2	3.9 ± 0.4
180	0.1581	0.1238	0.1501	3.2	3.8	3.7	3.6 ± 0.3
210	0.1574	0.1235	0.1496	2.7	3.6	3.4	3.2 ± 0.4
240	0.1571	0.1234	0.1492	2.6	3.5	3.2	3.1 ± 0.5
270	0.1566	0.1231	0.1486	2.2	3.2	2.8	2.8 ± 0.5
300	0.1562	0.1229	0.1484	2.0	3.1	2.6	2.7 ± 0.6
360	0.1563	0.1232	0.1485	2.0	3.3	2.7	2.7 ± 0.6
420	0.1557	0.1227	0.1479	1.7	2.9	2.3	2.3 ± 0.6

ตาราง 3.44 (ต่อ)

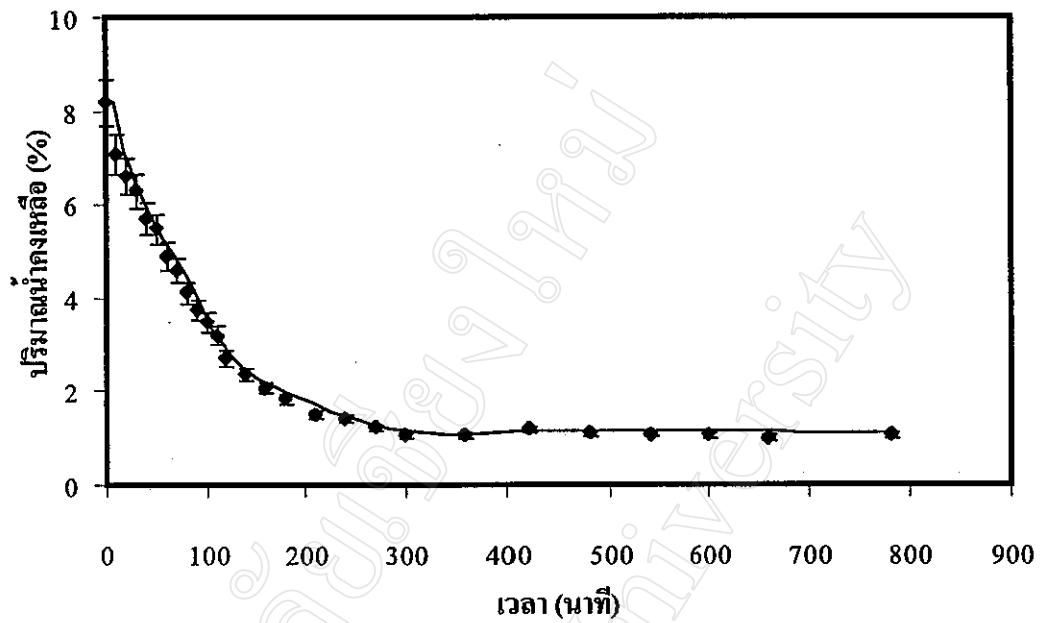
เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 60%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
480	0.1563	0.1232	0.1484	2.0	3.3	2.6	2.7±0.6
540	0.1563	0.1233	0.1484	2.0	3.4	2.6	2.7±0.7
600	0.1555	0.1226	0.1477	1.6	2.8	2.2	2.2±0.6
660	0.1559	0.1228	0.1479	1.8	3.0	2.3	2.4±0.6

ตาราง 3.45 น้ำหนักและปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-70%VP) ความหนา 0.259±0.049 มม. ณ อุณหภูมิ 35±1°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

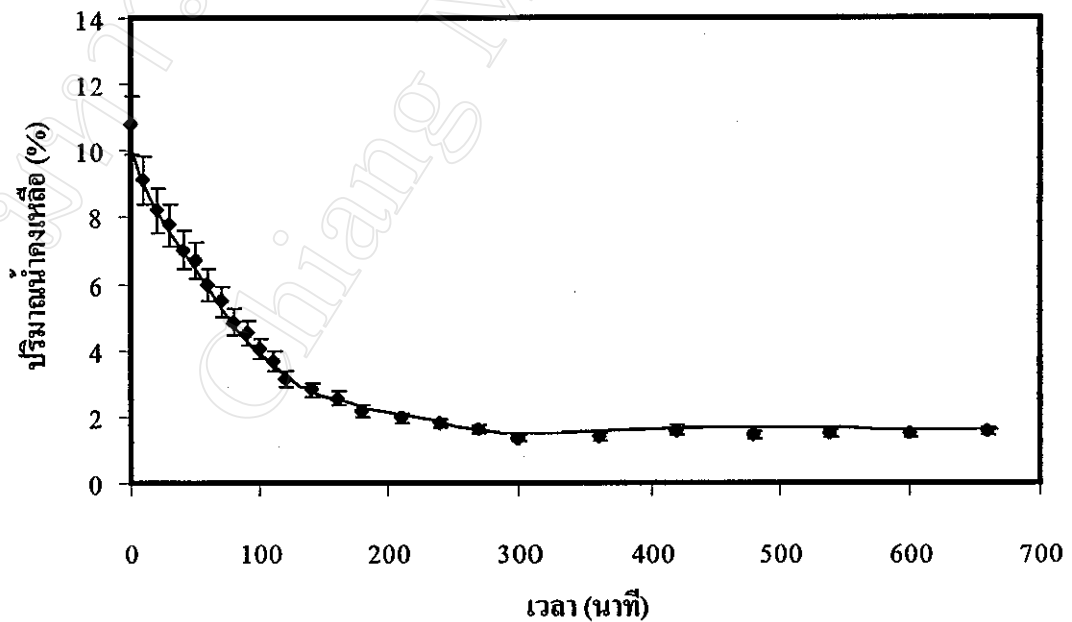
เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA- <i>stat</i> - 70%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
0	0.2527	0.2747	0.1984	61.9	62.8	61.3	62.0±0.8
10	0.2225	0.2482	0.1746	56.7	58.9	56.01	57.2±1.5
20	0.2002	0.2251	0.1544	51.9	54.6	50.3	52.3±2.2
30	0.1838	0.2073	0.1388	47.7	50.7	44.7	47.7±3.0
40	0.1682	0.1908	0.1238	42.8	46.5	38.0	42.4±4.3
50	0.1494	0.1700	0.1066	35.6	39.9	28.0	34.5±6.1
60	0.1315	0.1492	0.0918	26.8	31.6	16.3	24.9±7.8
70	0.1200	0.1358	0.0848	19.8	24.8	9.4	18.0±7.8
80	0.1105	0.1242	0.0815	12.9	17.8	5.8	12.2±6.1

ตาราง 3.45 (ต่อ)

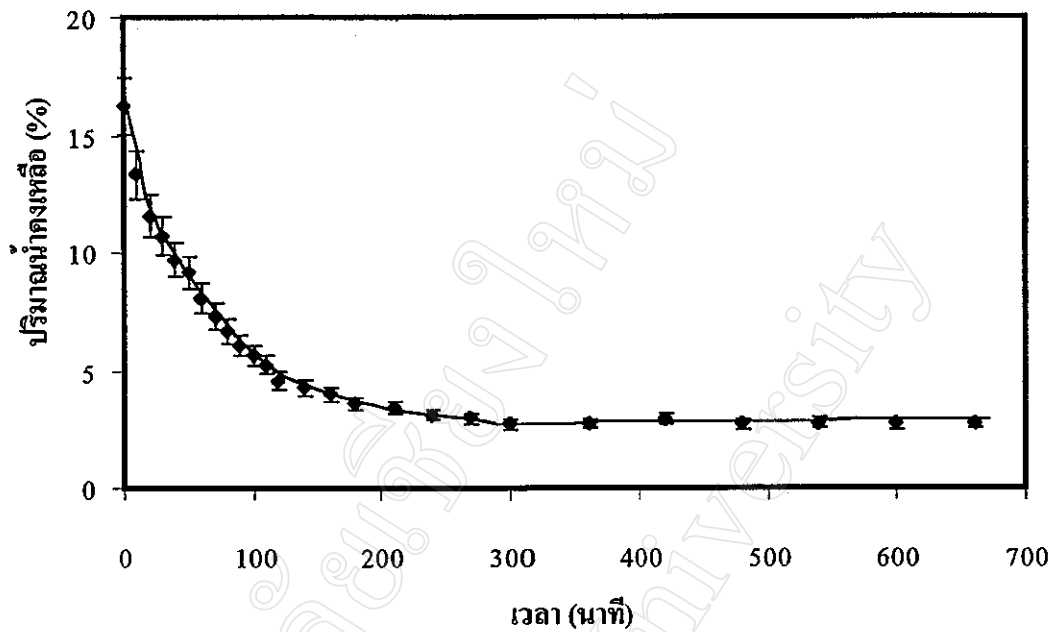
เวลา (นาทีก)	น้ำหนักแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat- 70%VP) (g)			ปริมาณน้ำคงเหลือ (%)			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย
90	0.1052	0.1163	0.0803	8.6	12.2	4.4	8.4±3.9
100	0.1027	0.1119	0.0798	6.3	8.8	3.8	6.3±2.5
110	0.1012	0.1092	0.0795	4.9	6.5	3.4	5.0±1.5
120	0.1003	0.1079	0.0789	4.1	5.4	2.7	4.0±1.4
140	0.0992	0.1065	0.0785	3.0	4.1	2.2	3.1±1.0
160	0.0985	0.1056	0.0781	2.3	3.3	1.7	2.4±0.8
180	0.0984	0.1053	0.078	2.2	3.0	1.5	2.3±0.8
210	0.098	0.1048	0.0779	1.8	2.6	1.4	1.9±0.6
240	0.0978	0.1046	0.0778	1.6	2.4	1.3	1.8±0.6
270	0.0976	0.1043	0.0776	1.4	2.1	1.0	1.5±0.5
300	0.0972	0.1040	0.0777	1.0	1.8	1.2	1.3±0.4
360	0.0974	0.1042	0.0776	1.2	2.0	1.0	1.4±0.5
420	0.0972	0.1040	0.0775	1.0	1.8	0.9	1.2±0.5
480	0.0975	0.1042	0.0777	1.3	2.0	1.2	1.5±0.4
540	0.0973	0.1041	0.0776	1.1	1.9	1.0	1.4±0.5
600	0.0969	0.1035	0.0775	0.7	1.3	0.5	0.9±0.4
660	0.0969	0.1037	0.0775	0.7	1.5	0.9	1.1±0.4



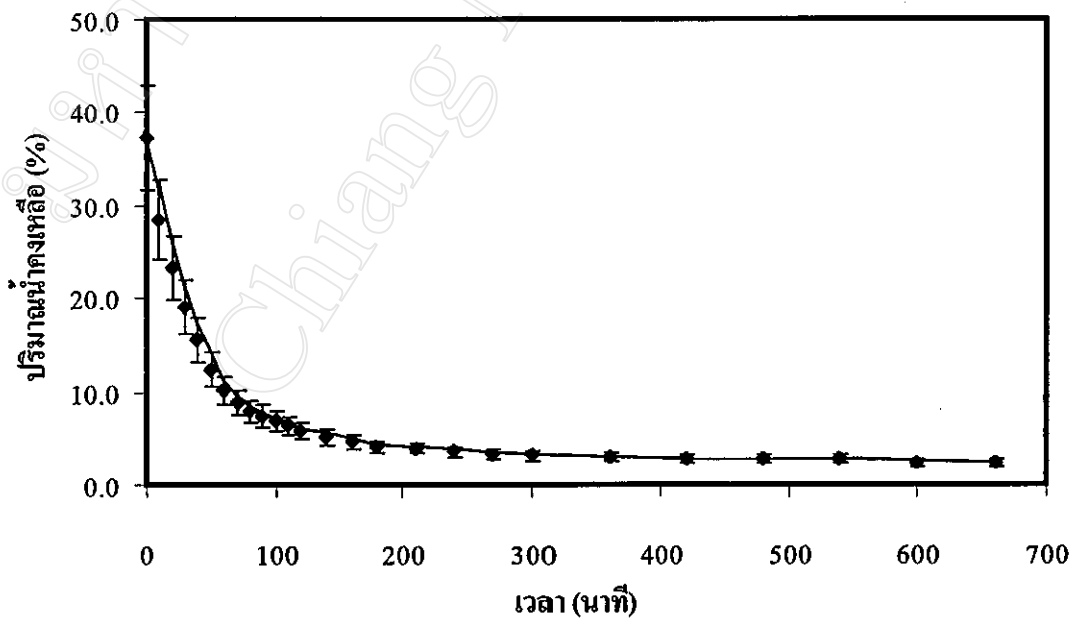
รูป 3.49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงเหลือกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-20%VP) ความหนา 0.353 ± 0.030 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%



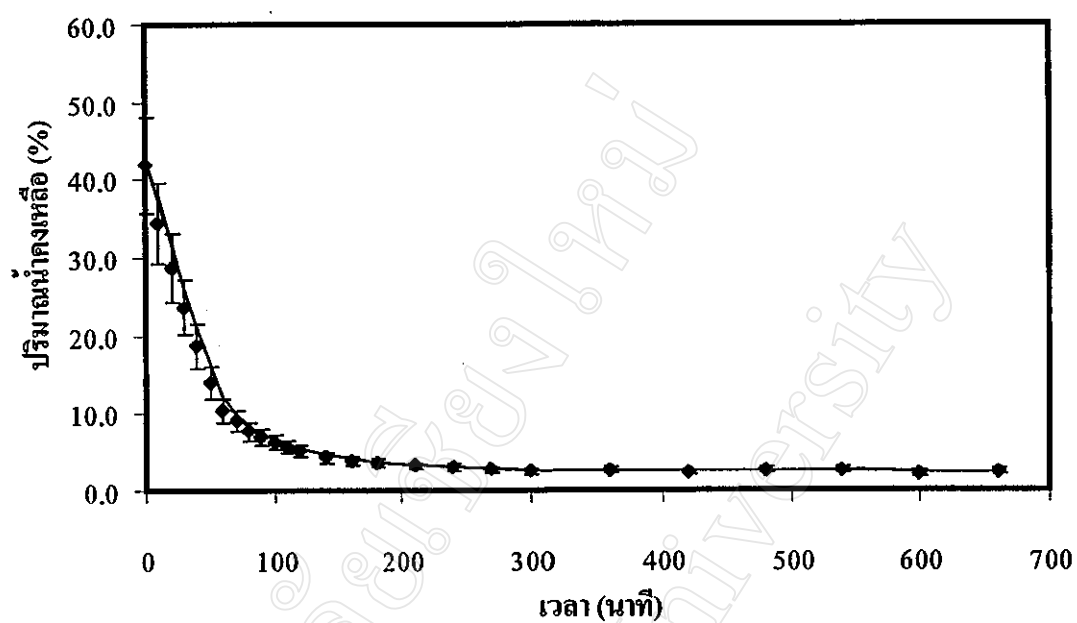
รูป 3.50 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงเหลือกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-30%VP) ความหนา 0.348 ± 0.020 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%



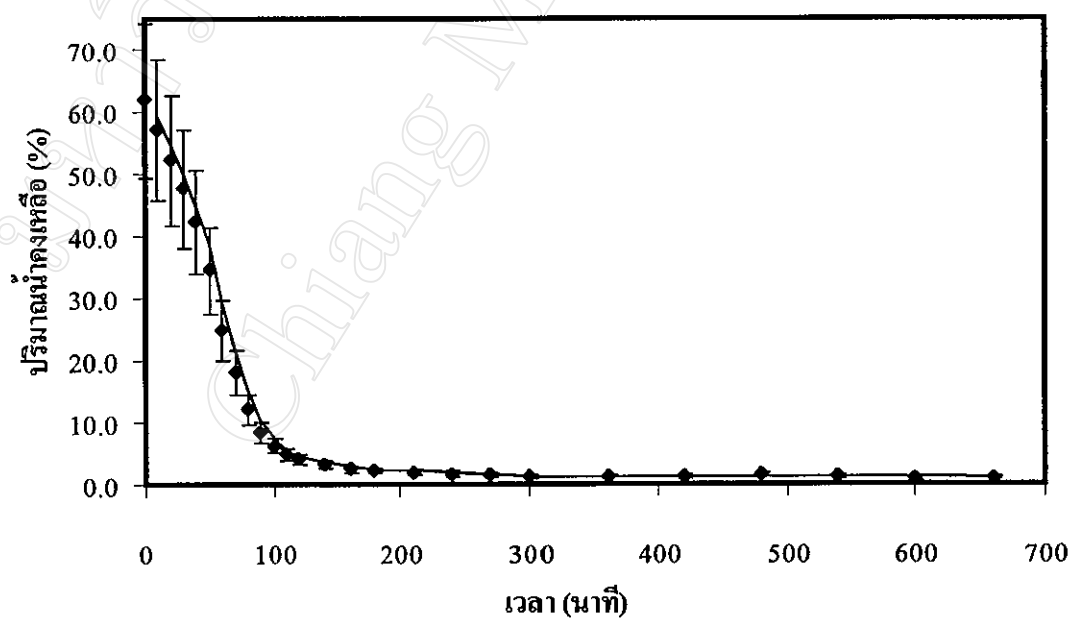
รูป 3.51 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคั่งเหลือกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-40%VP) ความหนา 0.361 ± 0.009 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%



รูป 3.52 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคั่งเหลือกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-50%VP) ความหนา 0.406 ± 0.061 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%



รูป 3.53 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงเหลือกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-60%VP)
ความหนา 0.369 ± 0.004 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

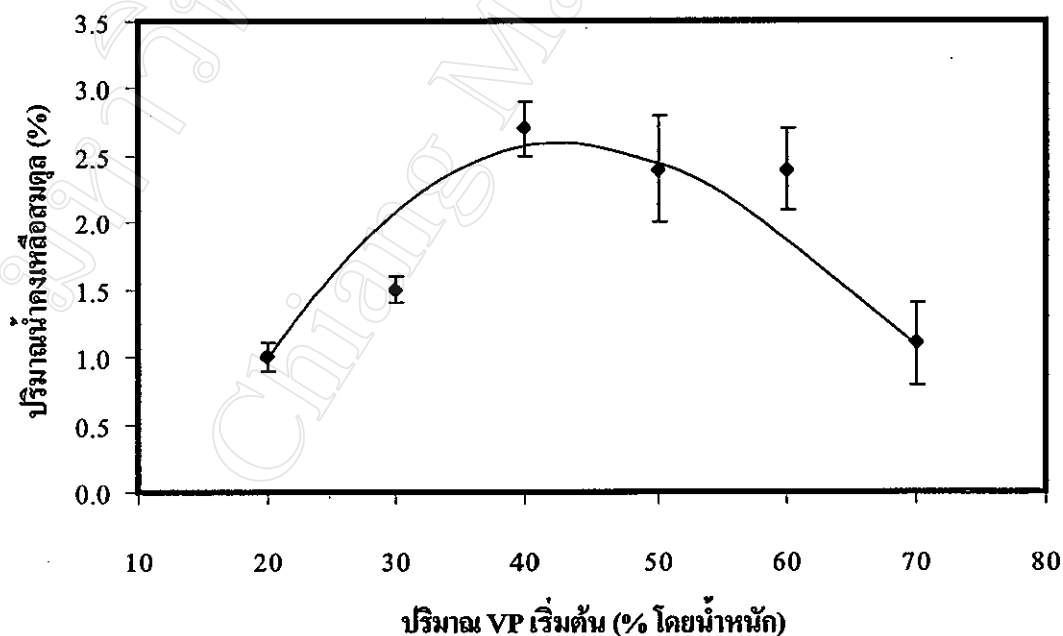


รูป 3.54 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงเหลือกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-70%VP)
ความหนา 0.259 ± 0.049 มม. ณ อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตาราง 3.46 ค่าปริมาณน้ำคงเหลือสมดุลของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่อัตราส่วนโคมอนอเมอร์เริ่มต้นต่างๆ กันที่สังเคราะห์ได้ ณ อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	ความหนา (มม.)	ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล (%)
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	0.353 ± 0.030	1.0 ± 0.1
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	0.348 ± 0.020	1.5 ± 0.1
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	0.361 ± 0.009	2.7 ± 0.2
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	0.406 ± 0.061	2.4 ± 0.4
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	0.369 ± 0.004	2.2 ± 0.3
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	0.259 ± 0.049	1.1 ± 0.3

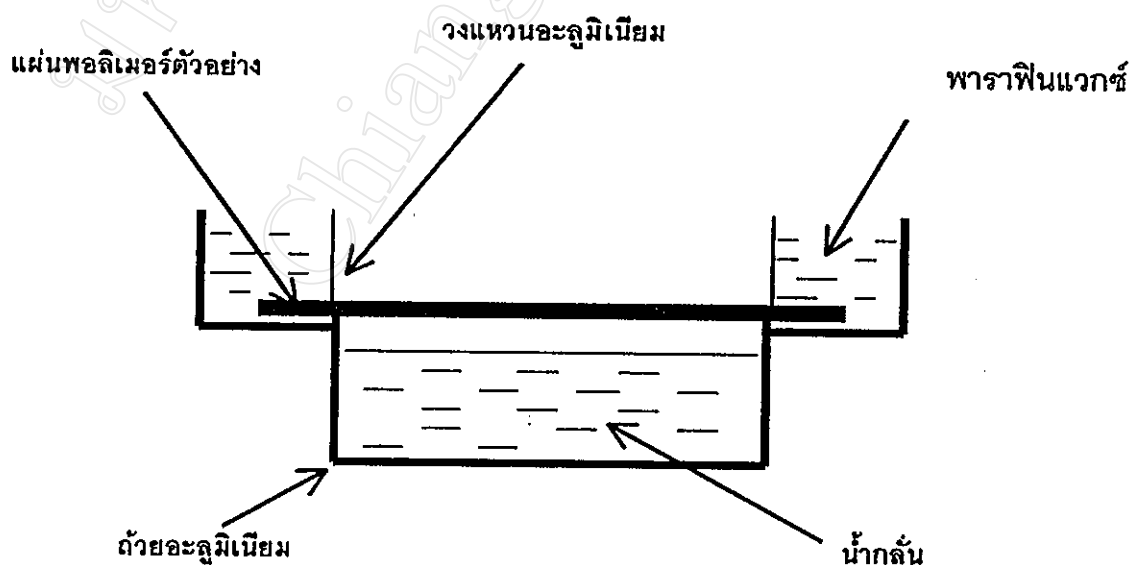
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนในคอนเริ่มต้นกับปริมาณน้ำคงเหลือสมดุลของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) แสดงในรูป 3.55



รูป 3.55 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นกับปริมาณน้ำคงเหลือสมดุลของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.349 ± 0.029 มม. ที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

3.5.7 อัตราการผ่านของไอน้ำของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

อัตราการผ่านของไอน้ำ (Water Vapour Transmission, WVT) หาได้จากน้ำหนักของน้ำที่ระเหยผ่านวัสดุตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ วิธีการที่ใช้หาอัตราการผ่านของไอน้ำของวัสดุในที่นี่ ซึ่งกำหนดโดย American Society for Testing and Materials (ASTM E 96-94) [64] มี 2 วิธี คือ วิธีวอเตอร์คัพ (Water Cup Method) และ วิธีอินเวอร์ตคัพ (Inverted Cup Method) แผ่นวัสดุที่ทดสอบจะถูกปิดลงบนปากถ้วยอะลูมิเนียมที่มีน้ำอยู่ แล้วปิดผนึกด้วยพาราฟินแวกซ์ ดังรูป 3.56 นำถ้วยอะลูมิเนียมไปวางในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งน้ำหนักของถ้วยเป็นระยะๆ แล้วพลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา เพื่อหาความชันของกราฟและคำนวณหาอัตราการผ่านของไอน้ำของวัสดุ ดังสมการ (3.14) ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ หายชื้นทำให้มีช่องว่างที่เป็นอากาศระหว่างน้ำกับวัสดุที่ทดสอบ เรียกว่า วิธีวอเตอร์คัพ หรือถ้าถ้วยวางในลักษณะกลับหัวทำให้น้ำสัมผัสกับวัสดุที่ทดสอบ เรียกว่า วิธีอินเวอร์ตคัพ



รูป 3.56 การจัดอุปกรณ์สำหรับหาอัตราการผ่านของไอน้ำ [65]

อัตราการผ่านของไอน้ำ (WVT) คำนวณได้ดังสมการ (3.14) [64]

$$WVT = G/tA = (G/t)/A \quad (3.14)$$

เมื่อ G/t คือ อัตราน้ำหนักของน้ำที่หายไป (g/hr)

A คือ พื้นที่สัมผัสของแผ่นตัวอย่าง $= 2.83 \times 10^{-3}$ ตารางเมตร (m^2)

WVT คือ อัตราการผ่านของไอน้ำ (g/hr. m^2)

3.5.7.1 วิธีวอเตอร์คัพ (Water Cup Method)

3.5.7.1.1 การทดลอง

นำแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนต่างๆ กันมาตัดเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น นำมาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ C$ เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำไปแขวนในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ $35 \pm 1^\circ C$ ความชื้นสัมพัทธ์ 55-60% เป็นเวลา 1 คืน แล้วนำแผ่นโคพอลิเมอร์มาปิดบนถ้วยอะลูมิเนียมที่มีน้ำอยู่ 20 ml ปิดผนึกด้วยพาราฟินแวกซ์ นำไปวางหงายไว้ในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ C$ ความชื้นสัมพัทธ์ 55-60% จากนั้นนำถ้วยอะลูมิเนียมมาชั่งน้ำหนักตามระยะเวลาที่เหมาะสม พลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา หาความชัน แล้วนำมาคำนวณอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ตามสมการ (3.14)

3.5.7.1.2 ผลการทดลอง

น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ โดยวิธีวอเตอร์คัพของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนต่างๆ กัน แสดงในตาราง 3.47-3.52 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปกับเวลาของโคพอลิเมอร์แสดงดังรูป 3.57 และ 3.58 และค่าความชันของกราฟและอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนต่างๆ กัน แสดงในตาราง 3.53

ตาราง 3.47 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-20%VP) ความหนา 0.400 ± 0.025 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	0.0062	0.0078	0.0063	0.0068 ± 0.0009
4	0.0149	0.0182	0.0197	0.0176 ± 0.0025
6	0.0229	0.0266	0.0344	0.0280 ± 0.0059
8	0.0292	0.0328	0.0451	0.0357 ± 0.0083
10	0.0387	0.0430	0.0522	0.0446 ± 0.0069
12	0.0474	0.0503	0.0734	0.0570 ± 0.0142
14	0.0534	0.0566	0.0829	0.0643 ± 0.0162
16	0.0612	0.0651	0.0903	0.0722 ± 0.0158
18	0.0688	0.0731	0.1084	0.0834 ± 0.0217
20	0.0762	0.0813	0.1166	0.0914 ± 0.0220

ตาราง 3.48 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-30%VP) ความหนา 0.380 ± 0.018 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัท ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	0.0143	0.0119	0.0119	0.0127 ± 0.0014
4	0.0340	0.0270	0.0238	0.0283 ± 0.0052
6	0.0576	0.0423	0.0396	0.0465 ± 0.0097
8	0.7800	0.0531	0.0520	0.0610 ± 0.0147
10	0.1085	0.0690	0.0679	0.0818 ± 0.0231
12	0.1342	0.0836	0.0807	0.0995 ± 0.0301
14	0.1457	0.0955	0.0911	0.1108 ± 0.0303
16	0.1568	0.1096	0.1033	0.1232 ± 0.0292
18	0.1703	0.1246	0.1332	0.1427 ± 0.0243
20	0.1831	0.1403	0.1538	0.1591 ± 0.0219

ตาราง 3.49 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-40%VP) ความหนา 0.365 ± 0.030 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	0.0158	0.0211	0.0146	0.0172 ± 0.0035
4	0.0338	0.0451	0.0314	0.0368 ± 0.0073
6	0.0528	0.0696	0.0494	0.0573 ± 0.0108
8	0.0742	0.0964	0.0682	0.0796 ± 0.0149
12	0.1182	0.1508	0.1049	0.1246 ± 0.0236
14	0.1415	0.1786	0.1229	0.1477 ± 0.0284
16	0.1649	0.2061	0.1414	0.1708 ± 0.0328
18	0.1895	0.2343	0.1594	0.1944 ± 0.0377
20	0.2169	0.2656	0.1803	0.2209 ± 0.0428

ตาราง 3.50 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-50%VP) ความหนา 0.445 ± 0.020 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

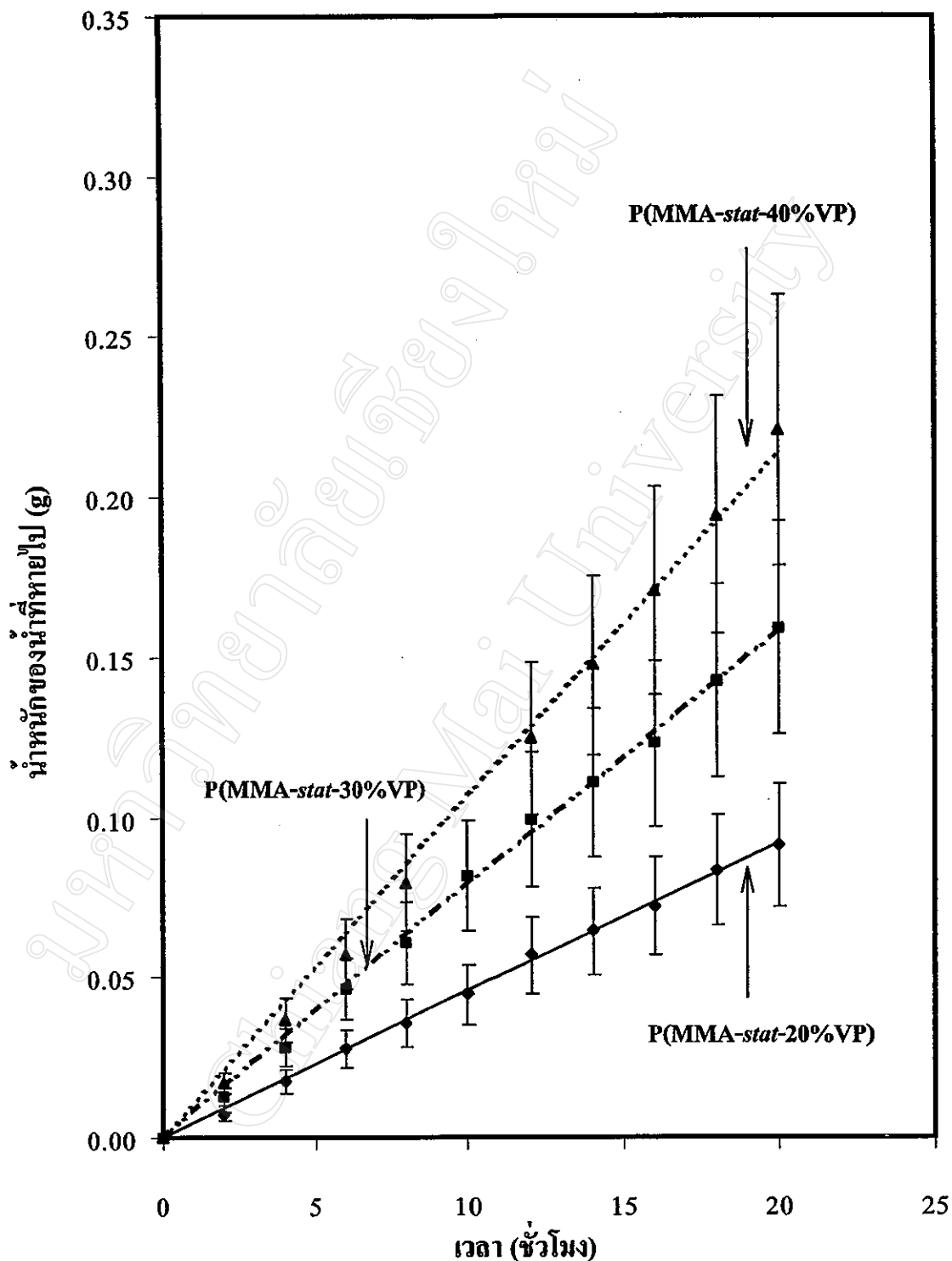
เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	0.1738	0.1577	0.1864	0.1726 ± 0.0144
4	0.3770	0.3339	0.3836	0.3648 ± 0.0270
6	0.5687	0.5020	0.5763	0.5490 ± 0.0409
8	0.7634	0.6762	0.7771	0.7389 ± 0.0547
10	0.9640	0.8504	0.9657	0.9267 ± 0.0661
12	1.1688	1.0307	1.1553	1.1184 ± 0.0761
16	1.5490	1.3792	1.5357	1.4880 ± 0.0944
18	1.7722	1.5598	1.7127	1.6816 ± 0.1096
20	1.9717	1.7281	1.9062	1.8687 ± 0.1261
22	2.1762	1.8969	2.0894	2.0542 ± 0.1429
24	2.3954	2.0819	2.3021	2.2598 ± 0.1610
26	2.5643	2.2298	2.4612	2.4184 ± 0.1713

ตาราง 3.51 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-60%VP) ความหนา 0.304 ± 0.014 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

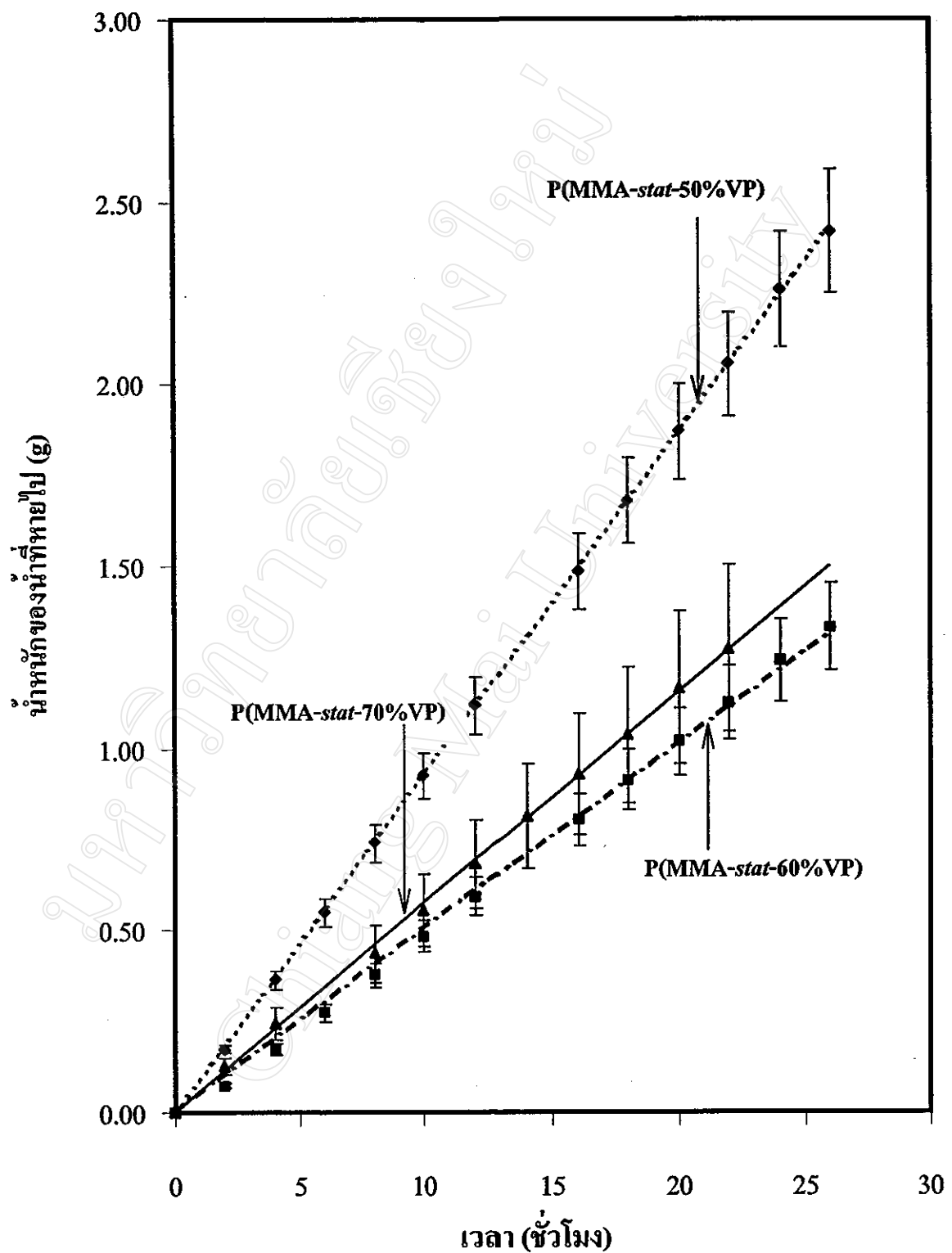
เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	0.0734	0.0682	0.0813	0.0742 ± 0.0066
4	0.1713	0.1602	0.1866	0.1727 ± 0.0133
6	0.2697	0.2583	0.2959	0.2746 ± 0.0193
8	0.366	0.3598	0.4106	0.3788 ± 0.0277
10	0.4641	0.4628	0.5298	0.4856 ± 0.0383
12	0.5668	0.5626	0.6529	0.5941 ± 0.0510
16	0.7612	0.7602	0.8962	0.8059 ± 0.0782
18	0.8608	0.8636	1.0189	0.9144 ± 0.0905
20	0.9566	0.9629	1.1398	1.0198 ± 0.1040
22	1.0541	1.0586	1.2655	1.1261 ± 0.1208
24	1.1626	1.1610	1.4027	1.2421 ± 0.1391
26	1.2459	1.2443	1.5096	1.3333 ± 0.1527

ตาราง 3.52 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-70%VP) ความหนา 0.304 ± 0.014 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	0.1494	0.1085	0.1165	0.1248 ± 0.0217
4	0.2533	0.2124	0.2659	0.2439 ± 0.028
8	0.5346	0.3618	0.4153	0.4372 ± 0.0885
10	0.6688	0.4703	0.5238	0.5543 ± 0.1027
12	0.8423	0.5657	0.6403	0.6828 ± 0.1431
14	0.9960	0.6657	0.7783	0.8133 ± 0.1679
16	1.1277	0.7809	0.8810	0.9299 ± 0.1785
18	1.2401	0.8939	0.9806	1.0382 ± 0.1801
20	1.3893	1.0189	1.0946	1.1676 ± 0.1957
22	1.5105	1.1091	1.2084	1.2760 ± 0.2091



รูป 3.57 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณ VP เริ่มต้นเท่ากับ 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ความหนา 0.395 ± 0.027 มม. โดยวิธีอ-เทอร์คัพที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

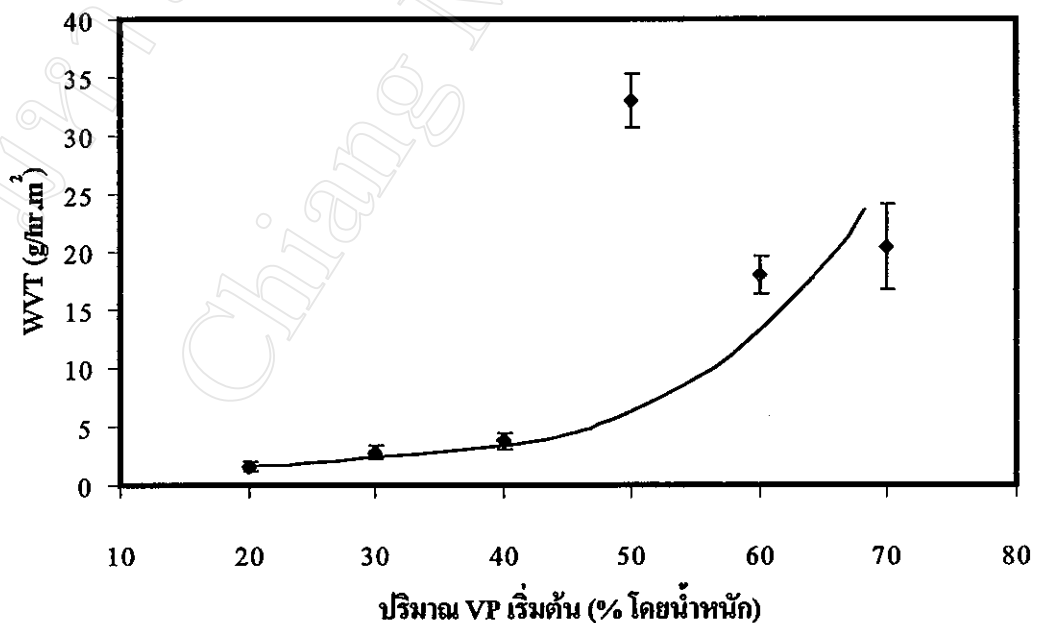


รูป 3.58 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณ VP เริ่มต้นเท่ากับ 50, 60 และ 70% โดยน้ำหนัก ความหนา 0.359 ± 0.024 มม. โดยวิธีวอเทอร์คัทที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตาราง 3.53 ความชื้นและอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนต่างกัน โดยวิธีวอเตอร์คัพที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	ความหนา (มม.)	ความชื้น (g/hr)	WVT (g/hr.m ²)
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	0.403 ± 0.018	0.0046 ± 0.0012	1.6 ± 0.4
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	0.393 ± 0.028	0.0079 ± 0.0016	2.8 ± 0.6
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	0.389 ± 0.036	0.0107 ± 0.0020	3.8 ± 0.7
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	0.445 ± 0.020	0.0933 ± 0.0065	33.0 ± 2.3
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	0.327 ± 0.039	0.0508 ± 0.0046	18.0 ± 1.6
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	0.304 ± 0.014	0.0578 ± 0.0104	20.4 ± 3.7

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นกับอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) แสดงดังรูป 3.59



รูป 3.59 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นกับอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.377 ± 0.026 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

3.5.7.2 วิธีอินเวอร์ตเทคัพ (Inverted Cup Method)

3.5.7.1.1 การทดลอง

ตัดแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ตัวอย่างที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนต่างๆ กันเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 2 วัน นำแผ่นพอลิเมอร์ออกมาแช่น้ำที่ผิวด้วยกระดาษกรอง แล้วประกอบเข้ากับถ้วยอะลูมิเนียมที่มีน้ำอยู่ 40 ml และปิดผนึกด้วยพาราฟินแวกซ์ ดังรูป 3.56 นำถ้วยอะลูมิเนียมไปวางคว่ำในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60% จากนั้นนำถ้วยอะลูมิเนียมออกมาแช่ตามระยะเวลาที่เหมาะสม พลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา หาความชัน และนำไปคำนวณอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ตามสมการ (3.14)

3.5.7.1.2 ผลการทดลอง

น้ำหนักของน้ำที่หายไปตามเวลา โดยวิธีอินเวอร์ตเทคัพของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นต่างกันที่ทดลองได้ แสดงในตาราง 3.54-3.59 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) แสดงในรูป 3.55 และ 3.56 ค่าความชันของกราฟและอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นต่างกันแสดงดังตาราง 3.60

ตาราง 3.54 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-20%VP) ความหนา 0.400 ± 0.025 มม. โดยวิธีอินเวทเทคคัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
1	0.0082	0.0061	0.0100	0.0081 ± 0.0020
2	0.0153	0.0105	0.0220	0.0159 ± 0.0058
3	0.0252	0.0170	0.0350	0.0257 ± 0.0090
4	0.0335	0.0216	0.0444	0.0332 ± 0.0114
5	0.0397	0.0269	0.0552	0.0406 ± 0.0142
6	0.0470	0.0317	0.0669	0.0485 ± 0.0176
7	0.0536	0.0364	0.0756	0.0552 ± 0.0196
8	0.0611	0.0433	0.0846	0.0630 ± 0.0207
9	0.0691	0.0515	0.0986	0.0731 ± 0.0238
10	0.0746	0.0593	0.1084	0.0807 ± 0.0251
11	0.0792	0.0667	0.1188	0.0882 ± 0.0272
12	0.0820	0.0744	0.1277	0.0947 ± 0.0289

ตาราง 3.55 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-30%VP) ความหนา 0.380 ± 0.018 มม. โดยวิธีอินเวทเทคคัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
1	0.0227	0.0246	0.0322	0.0265 ± 0.0005
2	0.0439	0.0598	0.0406	0.0481 ± 0.0103
3	0.0673	0.0884	0.0674	0.0744 ± 0.0122
4	0.0863	0.1105	0.0849	0.0939 ± 0.0144
5	0.1029	0.1442	0.1065	0.1179 ± 0.0229
6	0.1195	0.1768	0.1383	0.1449 ± 0.0292
7	0.1353	0.2044	0.1562	0.1653 ± 0.0354
8	0.1527	0.2359	0.1774	0.1887 ± 0.0427
9	0.1712	0.2699	0.2019	0.2143 ± 0.0505
10	0.1869	0.3029	0.2234	0.2377 ± 0.0593
11	0.1996	0.3296	0.2433	0.2575 ± 0.0662
12	0.2110	0.3543	0.2633	0.2762 ± 0.0725

ตาราง 3.56 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-40%VP) ความหนา 0.365 ± 0.030 มม. โดยวิธีอินเวทเทคัลที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
1	0.0198	0.0161	0.0162	0.0174 ± 0.0021
2	0.0407	0.0349	0.0480	0.0412 ± 0.0066
3	0.0593	0.0523	0.0786	0.0634 ± 0.0136
4	0.0811	0.0696	0.1081	0.0863 ± 0.0198
5	0.1004	0.0868	0.1355	0.1076 ± 0.0251
6	0.1184	0.1030	0.1617	0.1277 ± 0.0304
7	0.1383	0.1200	0.1881	0.1488 ± 0.0352
8	0.1624	0.1367	0.2152	0.1714 ± 0.0400
9	0.1824	0.1529	0.2418	0.1924 ± 0.0453
10	0.2022	0.1716	0.2727	0.2155 ± 0.0518
11	0.2242	0.1846	0.2940	0.2343 ± 0.0554
12	0.2434	0.2013	0.3211	0.2523 ± 0.0608

ตาราง 3.57 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-50%VP) ความหนา 0.501 ± 0.030 มม. โดยวิธีอินเวทเทคคัล ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

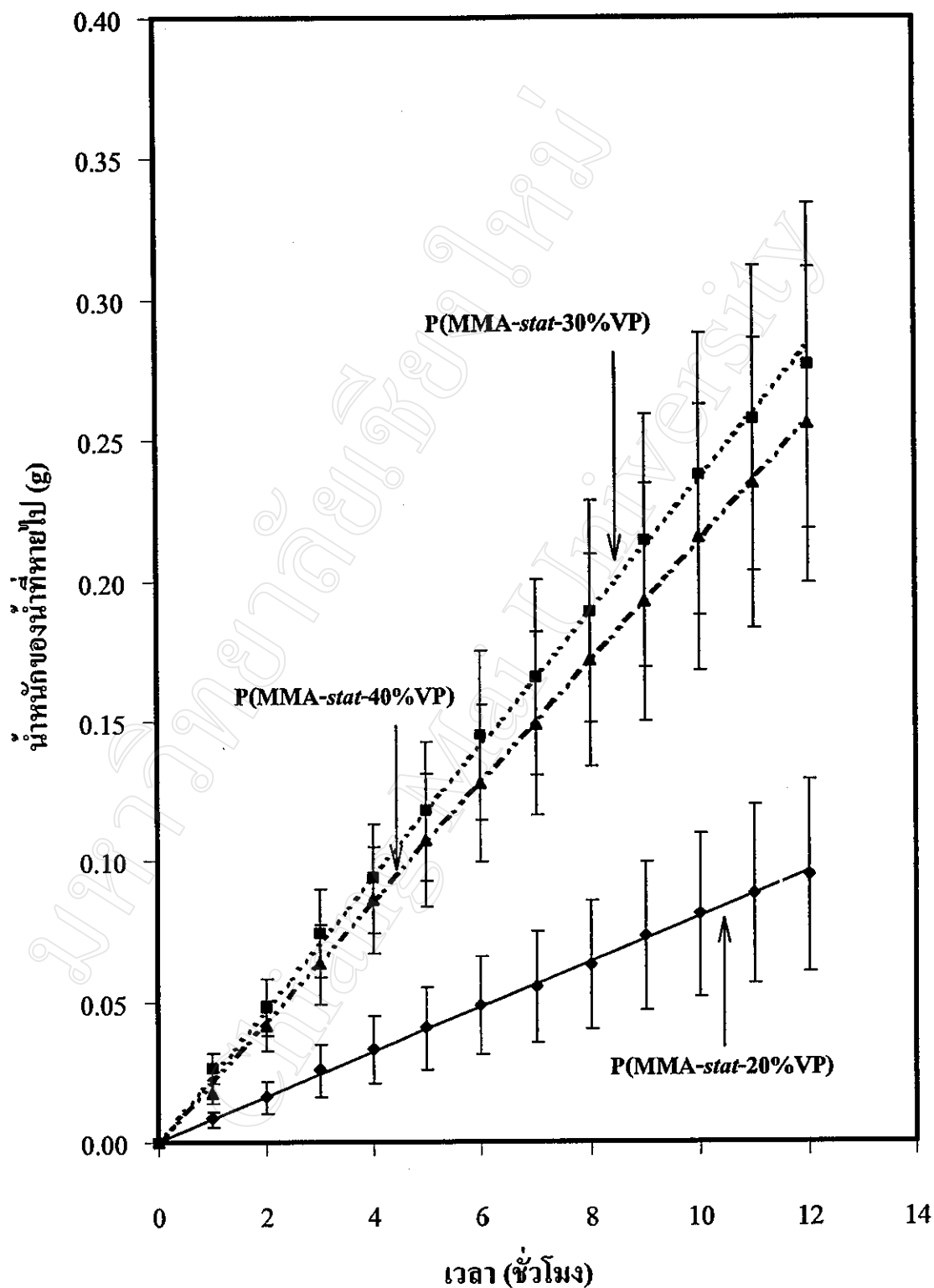
เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
1	0.3151	0.2917	0.3112	0.3060 ± 0.0125
2	0.5631	0.5230	0.5520	0.5460 ± 0.0207
3	0.8304	0.7569	0.8035	0.7969 ± 0.0372
4	1.0287	0.9545	1.0087	0.9973 ± 0.0384
5	1.2727	1.1949	1.2659	1.2445 ± 0.0431
6	1.5214	1.4385	1.5137	1.4912 ± 0.0458
7	1.7631	1.6646	1.7540	1.7272 ± 0.0544
8	2.0147	1.9061	2.0042	1.9750 ± 0.0600
9	2.2750	2.1500	2.2712	2.2321 ± 0.0711
10	2.5316	2.4003	2.5289	2.4869 ± 0.0750
11	2.8180	2.6784	2.8151	2.7705 ± 0.0798
12	3.0211	2.8831	3.0298	2.9780 ± 0.0823
13	3.2577	3.1330	3.2970	3.2292 ± 0.0856
14	3.5240	3.3877	3.5652	3.4923 ± 0.0929

ตาราง 3.58 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-60%VP) ความหนา 0.326 ± 0.034 มม. โดยวิธีอินเวทเทคคัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

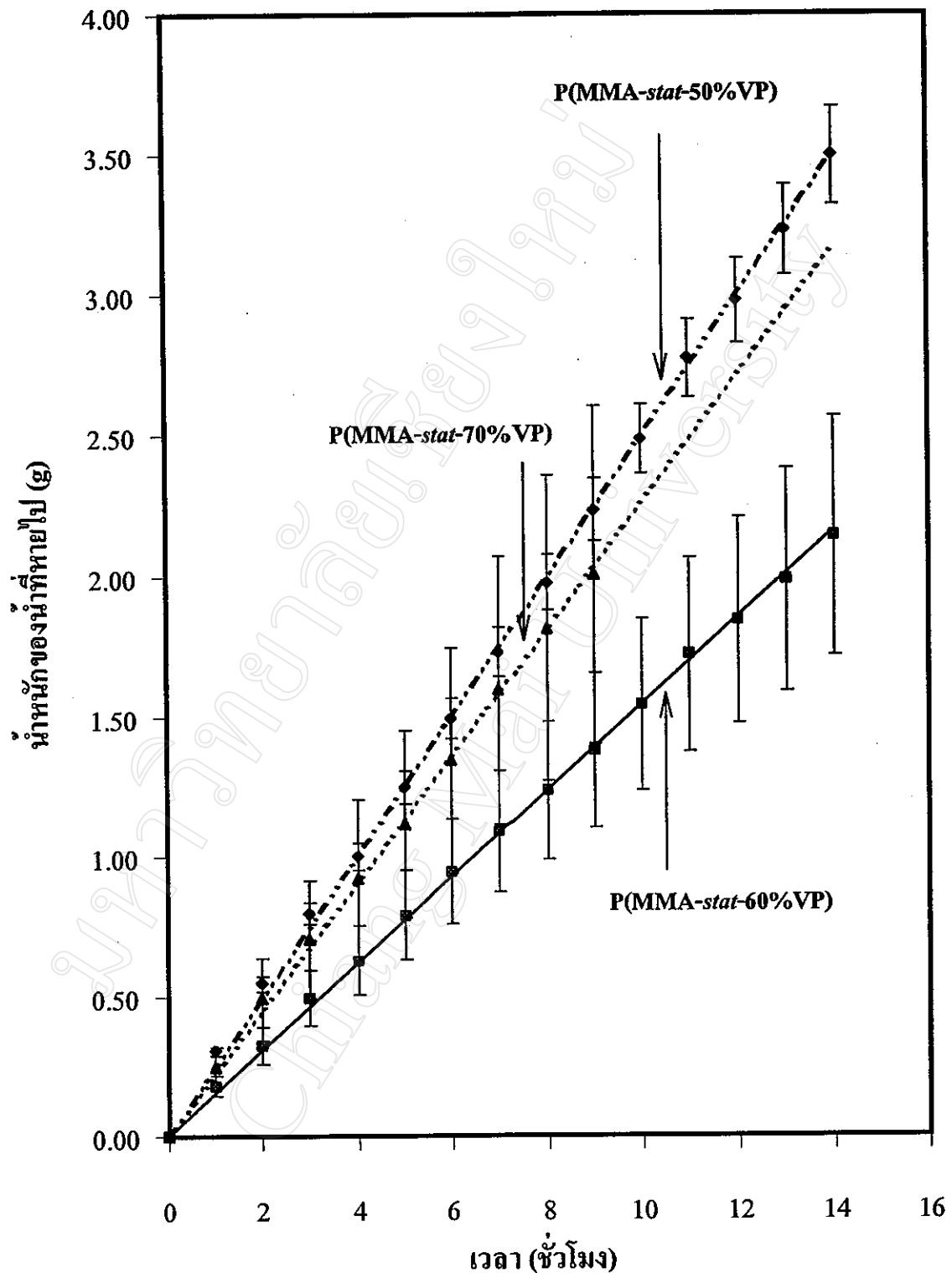
เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
1	0.2446	0.1406	0.1559	0.1805 ± 0.0561
2	0.4402	0.2543	0.2809	0.3251 ± 0.1005
3	0.6673	0.3835	0.4322	0.4943 ± 0.1005
4	0.8402	0.4909	0.5524	0.6278 ± 0.1865
5	1.0638	0.6169	0.6905	0.7904 ± 0.2396
6	1.2755	0.7375	0.8211	0.944 ± 0.2895
7	1.4698	0.8495	0.9435	1.0876 ± 0.3343
8	1.6666	0.9630	1.0669	1.2322 ± 0.3798
9	1.8676	1.0788	1.1918	1.3794 ± 0.4266
10	2.0723	1.1947	1.3462	1.5377 ± 0.4691
11	2.2983	1.3224	1.5334	1.7180 ± 0.5135
12	2.4543	1.4084	1.6569	1.8399 ± 0.5464
13	2.6399	1.5167	1.8022	1.9863 ± 0.5838
14	2.8462	1.6351	1.9437	2.1417 ± 0.6294

ตาราง 3.59 น้ำหนักของน้ำที่หายไป ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-70%VP) ความหนา 0.488 ± 0.040 มม. โดยวิธีอินเวทเทคคัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (g)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0
1	0.3821	0.1640	0.1902	0.2454 ± 0.1191
2	0.7435	0.3108	0.4224	0.4922 ± 0.2246
3	1.0418	0.4690	0.6049	0.7052 ± 0.2993
4	1.3335	0.6484	0.7874	0.9231 ± 0.3621
5	1.5873	0.8058	0.9479	1.1137 ± 0.4163
6	1.8806	0.9640	1.1801	1.3416 ± 0.4792
7	2.2421	1.1434	1.3923	1.5926 ± 0.5761
8	2.5604	1.3016	1.5748	1.8123 ± 0.6621
9	2.8142	1.4593	1.7389	2.0041 ± 0.7153



รูป 3.60 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณ VP เริ่มต้นเท่ากับ 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ความหนา 0.382 ± 0.024 มม. โดยวิธีอิน-เวทเทคคัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

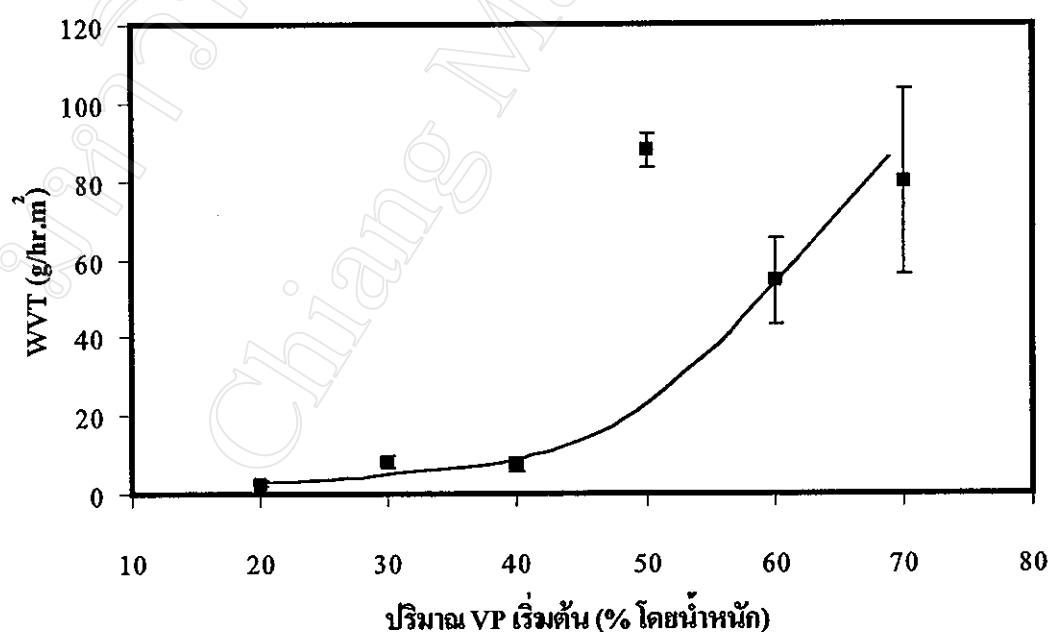


รูป 3.56 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลาของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณ VP เริ่มต้นเท่ากับ 50, 60 และ 70% โดยน้ำหนัก ความหนา 0.438 ± 0.035 มม. โดยวิธีอิน-เวทเทคคัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตาราง 3.60 ค่าความชื้นและอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนต่างๆ กัน โดยวิธีอินเวทเทคต์ ที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้	ความหนา (มม.)	ความชื้น (g/hr)	WVT (g/hr.m ²)
P(MMA- <i>stat</i> -20%VP)	0.400 ± 0.025	0.0080 ± 0.0026	2.8 ± 0.9
P(MMA- <i>stat</i> -30%VP)	0.380 ± 0.018	0.0247 ± 0.0049	8.3 ± 1.7
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	0.365 ± 0.030	0.0214 ± 0.0047	7.6 ± 1.7
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	0.501 ± 0.030	0.2491 ± 0.0124	88.0 ± 4.4
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	0.326 ± 0.034	0.1542 ± 0.0308	54.4 ± 10.9
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	0.488 ± 0.040	0.2258 ± 0.0677	79.8 ± 23.9

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นกับอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) แสดงดังรูป 3.62



รูป 3.62 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโคนเริ่มต้นกับอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.410 ± 0.029 มม. โดยวิธีอินเวทเทคต์ ที่อุณหภูมิ $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

3.5.8 การศึกษาสมบัติเชิงกล

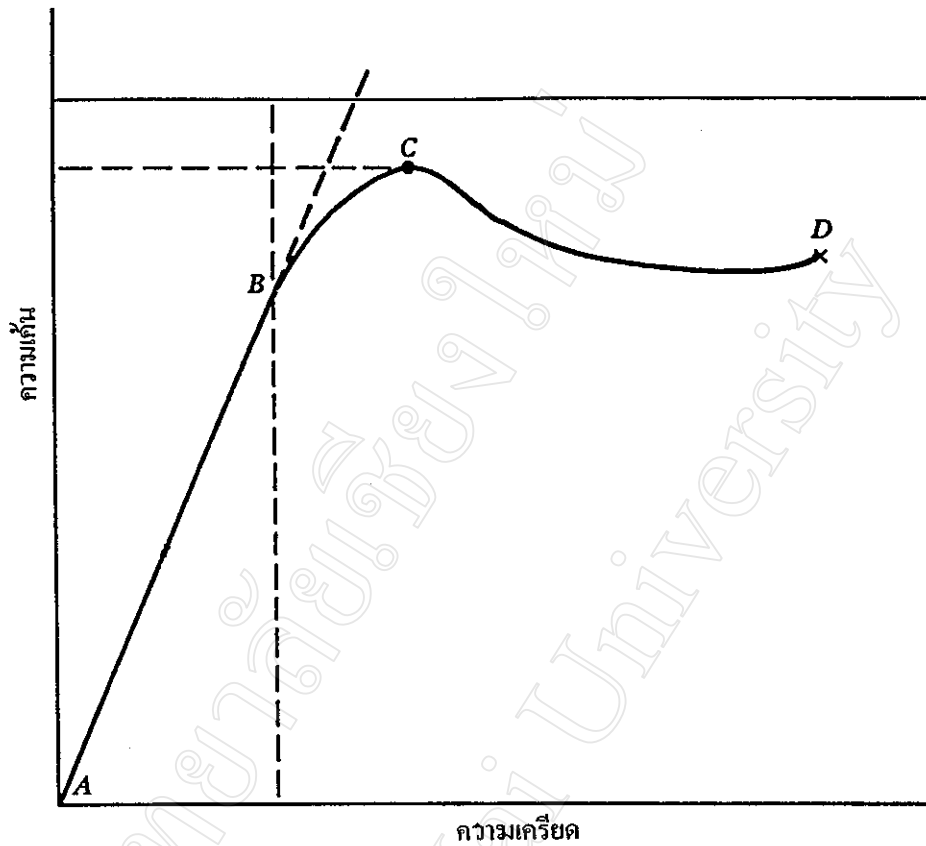
สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งของพอลิเมอร์ เพราะเป็นสมบัติที่แสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุในการตอบสนองต่อแรงภายนอกที่มากระทำ ไม่ว่าจะเป็นแรงดึง แรงกด หรือแรงกระแทก เป็นต้น เมื่อได้รับแรงกระทำวัสดุจะพยายามปรับตัวเพื่อผ่อนคลายความกดดันโดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนถึงขีดหนึ่งที่ไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป วัสดุนั้นก็จะขาดหรือแตกออก เนื่องจากการใช้งานของวัสดุมักจะเกี่ยวข้องกับแรง ดังนั้นในการเลือกวัสดุสำหรับใช้งานต่างๆ มักจะพิจารณาถึงสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึง มอดูลัสแบบยืดหยุ่น การยืด และความทนต่อแรงกระแทก เป็นต้น [66]

ไฮโดรเจลสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราวควรมีสมบัติดังต่อไปนี้คือ มีความเหนียวเพื่อให้คงรูปอยู่ได้ในการใช้งาน มีความทนต่อแรงดึง ยืดหยุ่น อ่อนนุ่ม และสามารถโค้งงอตามการเคลื่อนไหวของร่างกายได้ [18, 19] ดังนั้นสมบัติเชิงกลที่สำคัญที่พิจารณาได้แก่ ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ระยะยืดที่จุดขาด (elongation at break) และมอดูลัสแบบยืดหยุ่น (elastic modulus) เป็นต้น

3.5.8.1 การทดสอบแบบดึงยืด (Tensile tests) [66-67]

การทดสอบแบบดึงยืดเป็นการวัดความสามารถของวัสดุที่จะทนต่อแรงที่ดึงวัสดุออกและระยะที่วัสดุนั้นยืดออกได้ก่อนขาด ความทนต่อแรงดึง ระยะยืด รวมทั้งมอดูลัสที่เกิดจากแรงดึงเป็นสิ่งสำคัญที่ชี้ถึงความแข็งแรงของวัสดุ และใช้ในการระบุสมบัติของพอลิเมอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (stress) และความสามารถในการยืดของวัสดุ (strain) ใดๆ แสดงในรูปกราฟที่เรียกว่า เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ดังรูป 3.63



รูป 3.63 ลักษณะเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุทั่วไป [66]

- A คือ จุดเริ่มต้นของการทดสอบ
- B คือ จุดจำกัดความเป็นสัดส่วน โดยตรง (proportional limit point)
- C คือ จุดคราก (yield point)
- D คือ จุดขาด (break point)

เทอมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดึงยึดและเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด มีความหมายดังนี้ [66-67]

i) ความเค้น (stress, σ) คือ แรงดึงภายนอกที่มากกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุชิ้นหนึ่ง หรือแรงที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่น ในรูป 3.64 ความเค้นคำนวณได้จากค่าแรง (F) หารด้วยพื้นที่หน้าตัด (A) ของวัสดุที่ตั้งฉากกับทิศของแรงกระทำ ดังสมการ 3.15 [67]

$$\sigma = F/A \quad (3.15)$$

ความเค้นมีหน่วยเป็น MPa โดย $\text{MPa} = \text{MN/m}^2 = \text{N/mm}^2$

ในการทดสอบแบบดึงเรียกว่า ความเค้นแรงดึง (tensile stress) และความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้น ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ เรียกว่า ความเค้นแรงดึง ณ จุดขาด (tensile stress at break)

ii) ความเครียด (strain, ϵ) คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ [67]

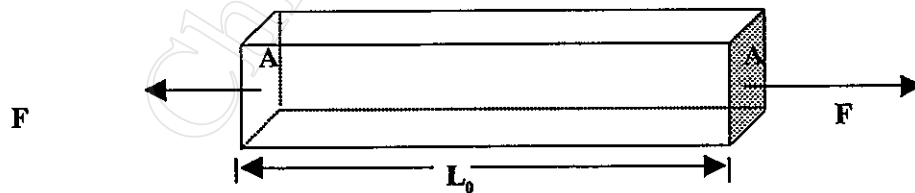
$$\epsilon = (L - L_0) / L_0 \quad (3.16)$$

เมื่อ L และ L_0 คือ ความยาวของวัสดุก่อนและหลังได้รับแรงกระทำ ความเครียดอาจจะเขียนในรูปของเปอร์เซ็นต์ความเครียด หรือเปอร์เซ็นต์การยืด (% elongation) [67] ดังสมการ (3.17)

$$\% \text{ ความเครียด} = \Delta L / L_0 \times 100\% \quad (3.17)$$

$$\text{เมื่อ } \Delta L = L - L_0$$

เปอร์เซ็นต์การยืดสูงสุดของวัสดุก่อนขาดหรือแตกออก เรียกว่า เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (elongation at break)



รูป 3.64 วัสดุภายใต้แรงดึง

F คือ แรงกระทำภายนอก

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

L_0 คือ ความยาวของวัสดุก่อนได้รับแรงกระทำ

iii) จุดคราก (Yield point) คือ จุดแรกในเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่มีการเพิ่มความเครียด โดยที่ความเค้นคงที่ ความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) และระยะยืดของตัวอย่างที่จุดนี้ เรียกว่า ระยะยืด ณ จุดคราก (elongation at yield)

iv) จุดจำกัดความเป็นสัดส่วนโดยตรง (Proportional limit) คือความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้โดยที่ความเค้นยังคงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดตามกฎของฮุก (Hooke's law) แสดงในรูปแรงต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น MPa

v) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) หรือ ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) คือ ความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ตัวอย่างได้รับในระหว่างการดึง หากที่จุดคราก (yield point) มีค่าความเค้นสูงสุด จะเรียกว่า ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) แต่หากที่จุดขาดมีค่าความเค้นสูงสุด จะเรียกว่า ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)

vi) โมดูลัสแบบยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) หรือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus) หรือ โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elastic) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงที่ความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงของความเค้น [66]

$$E = \sigma / \epsilon \quad (3.18)$$

เมื่อ E = โมดูลัสแบบยืดหยุ่น

σ = ความเค้น

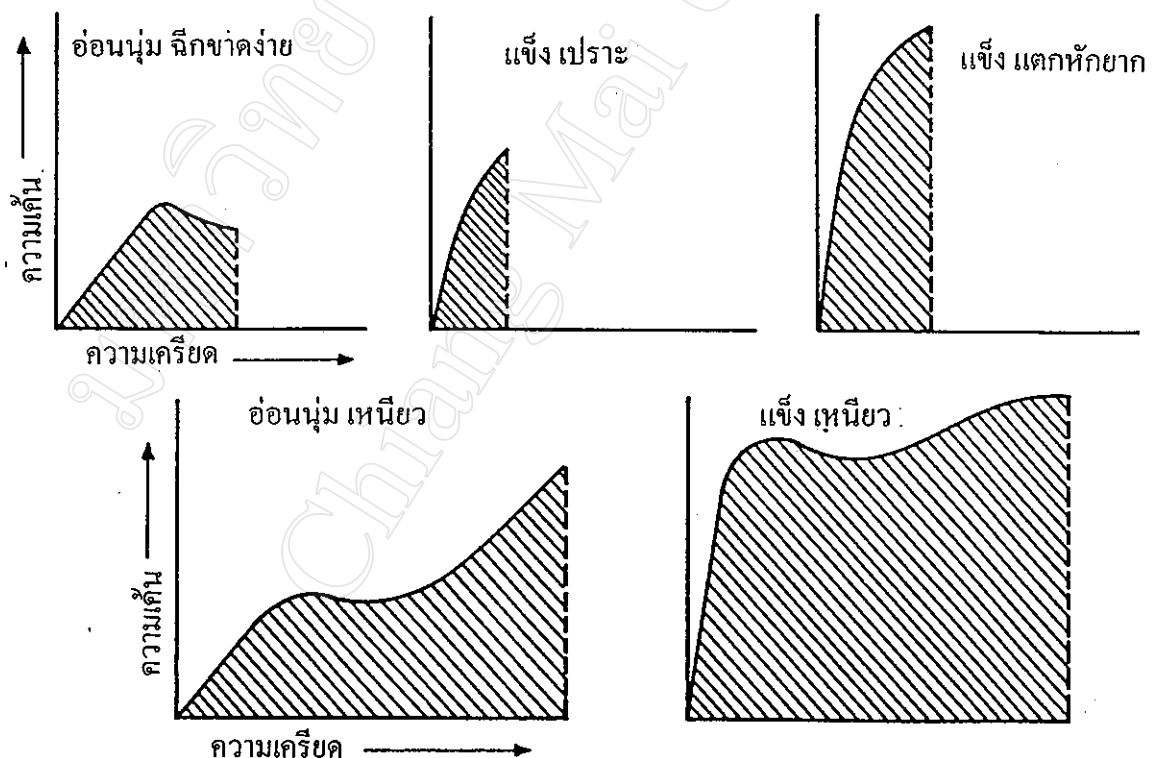
ϵ = ความเครียด

โมดูลัสแบบยืดหยุ่นแสดงในรูปของแรงต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น MPa หาได้จากความชันของเส้นสัมผัสกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงแรก

จากรูป 3.63 ในช่วงแรกของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด จากจุด A-B กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงเป็นไปตามกฎของฮุก คือ ความเค้นแปรผันโดยตรงกับความเครียด ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุแบบยืดหยุ่น (elastic material) ที่เหนือจุด B กราฟเริ่มเบี่ยงเบนจากความเป็นเส้นตรง เรียกจุด B นี้ว่า จุดจำกัดความเป็นสัดส่วนโดยตรง ความเค้นจะแปรผันโดยตรงกับความเครียดถึงจุดนี้เท่านั้น พฤติกรรมของพลาสติกที่ต่ำกว่าจุดจำกัดความเป็นสัดส่วนโดยตรงนี้มีลักษณะเป็น

อีลาสติก การเสียรูปที่เกิดขึ้นเป็นการยืดของพันธะระหว่างโมเลกุลและอะตอมของโมเลกุล โดยไม่มีการเลื่อนออกจากกันของโมเลกุล สามารถคืนรูปได้เหมือนเดิมทันทีเมื่อไม่มีแรงกระทำ ส่วนตั้งแต่จุด B ถึงจุดคราก (yield point) การเสียรูปเกิดจากการยืดของสายโซ่ที่ขดอยู่ แต่ไม่มีการเลื่อนของโมเลกุล ทำให้การเสียรูปในช่วงนี้สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้แต่ต้องอาศัยเวลา การยืดของวัสดุที่เกินจุดครากหรือจุดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) จะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร เนื่องจากมีการเลื่อนของโมเลกุล [66]

วัสดุทางพอลิเมอร์สามารถแบ่งตามสมบัติเชิงกล โดยอาศัยความแตกต่างของลักษณะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดเป็นหลัก ได้เป็น 5 ชนิด [67] ดังรูป 3.65 และค่าต่าง ๆ จากกราฟสรุปได้ ดังตาราง 3.61



รูป 3.65 ลักษณะเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของพลาสติกชนิดต่างๆ [67]

ตาราง 3.61 ลักษณะเฉพาะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่สัมพันธ์กับสมบัติของพอลิเมอร์ [66]

สมบัติของพอลิเมอร์	ลักษณะเฉพาะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด			
	มอดูลัสแบบยืดหยุ่น	ความเค้น ณ จุดคราก	แรงดึงสูงสุด	ค่าการยืด ณ จุดขาด
อ่อนนุ่มและฉีกขาดง่าย (soft and weak)	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
อ่อนนุ่มและเหนียว (soft and tough)	ต่ำ	ต่ำ	เท่ากับความเค้น ณ จุดคราก	สูง
แข็งและเปราะ (hard and tough)	สูง	ไม่มี	ปานกลาง	ต่ำ
แข็งและแตกหักยาก (hard and strong)	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง
แข็งและเหนียว (Hard and tough)	สูง	สูง	สูง	สูง

3.5.8.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

3.5.8.2.1 การทดลอง

นำแผ่นฟิล์มโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นตัดแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้ให้มีขนาด 1.00×8.00 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 20 ชิ้น วัดความหนาที่แน่นอน แล้วนำไปทดสอบความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลของบริษัท LLOYD รุ่น LRX โดยมีสภาวะในการทดสอบดังตาราง 3.62

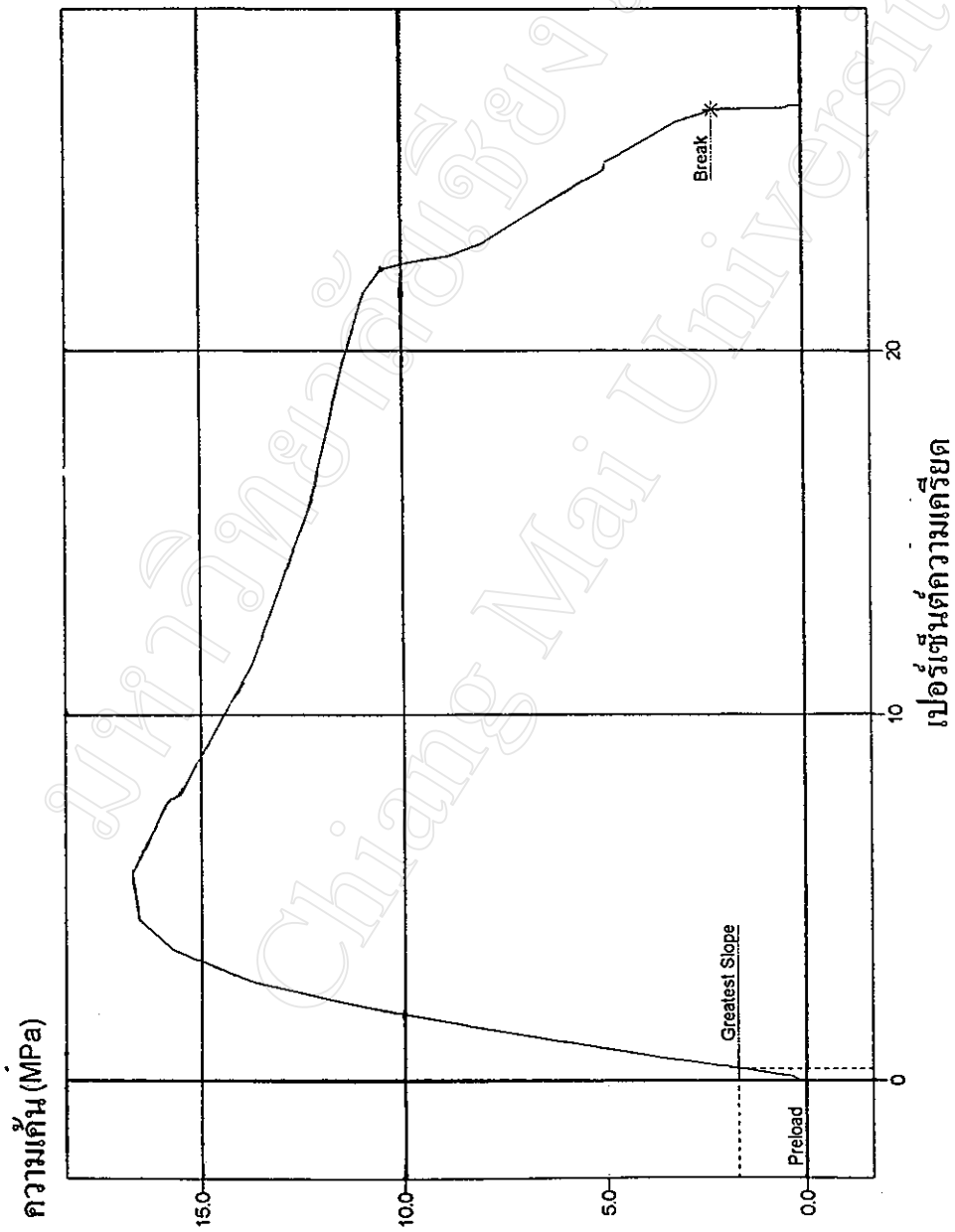
ตาราง 3.62 สภาวะในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในคอนกรีตเริ่มต้นเท่ากับ 40, 50, 60 และ 70% โดยน้ำหนัก

สภาวะการทดสอบ	ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้			
	P(MMA-stat-40%VP)	P(MMA-stat-50%VP)	P(MMA-stat-60%VP)	P(MMA-stat-70%VP)
ระยะห่างของตัวรองรับตัวอย่าง (gauge length) (มม.)	40	40	40	40
ตัวรองรับแรง (load cell) (นิวตัน)	5000	100	100	100
ความเร็วของคานสำหรับยึดตัวรับแรง (head speed) (มม./นาที)	10	10	10	10
อุณหภูมิ (°C)	27	27	27	27
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	55-60	55-60	55-60	55-60

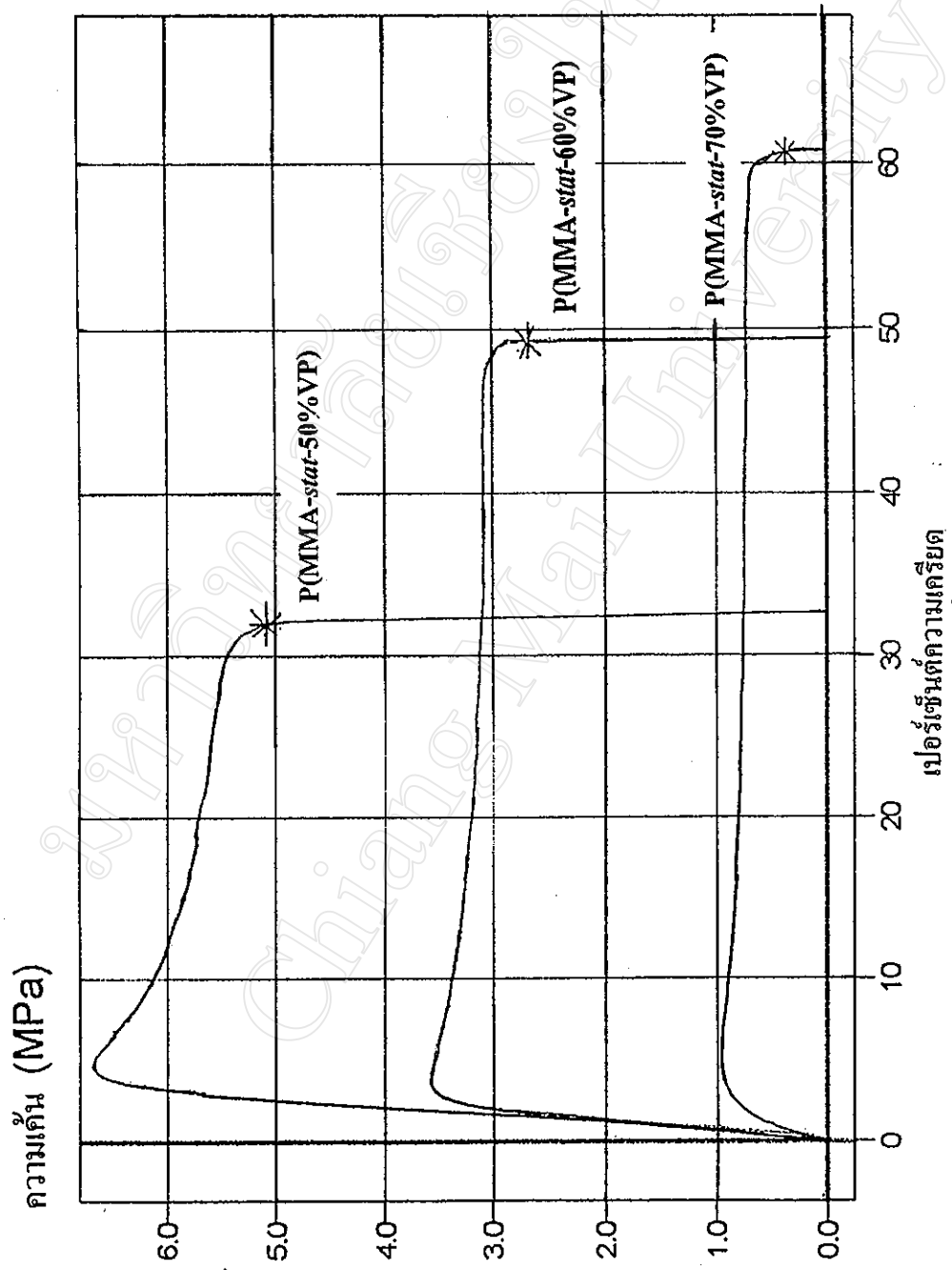
แผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเท่ากับ 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากแผ่นฟิล์มแข็งแรงมาก แรงที่ใช้ในการดึงจึงมีค่าเกินขีดสูงสุดของตัวรับแรง (load cell) 100 นิวตัน

3.5.8.2.2 ผลการทดลอง

เส้นโค้งความเค้น-เปอร์เซ็นต์ความเครียดจากการทดลองครั้งแรกของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเท่ากับ 40% โดยน้ำหนัก แสดงในรูป 3.66 และที่มีปริมาณ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน เท่ากับ 50, 60 และ 70% โดยน้ำหนัก แสดงในรูป 3.67 ค่าความเค้นสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดูลัสแบบยืดหยุ่นของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังตาราง 3.63-3.66 ตามลำดับ



รูป 3.66 เส้นโค้งความเค้น-เปอร์เซ็นต์ความเครียดของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-40%VP) ความหนา 0.425±0.018 มม. ณ อุณหภูมิ 27°C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%



รูป 3.67 เส้นโค้งความเค้น-เปอร์เซ็นต์ความเครียดของแผ่นฟิล์ม P(MMA-stat-50%VP) P(MMA-stat-60%VP) และ P(MMA-stat-70%VP) ความหนา 0.381 ± 0.023 มม. ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตาราง 3.63 ค่าความเค้นสูงสุด เปรอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดูลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-40%VP) ที่สังเคราะห์ได้ ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตัวอย่าง ที่	ความหนา (มม.)	ความเค้นสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด	มอดูลัสแบบยืดหยุ่น (MPa)
1	0.414±0.026	16.7	26.6	681
2	0.479±0.005	14.1	11.2	521
3	0.408±0.016	23.9	11.1	562
4	0.400±0.023	17.9	14.3	625
เฉลี่ย	0.425±0.018	18.2±4.1	15.8±7.3	597±70

ตาราง 3.64 ค่าความเค้นสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดูลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-50%VP) ที่สังเคราะห์ได้ ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตัวอย่าง ที่	ความหนา (มม.)	ความเค้นสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด	มอดูลัสแบบยืดหยุ่น (MPa)
1	0.449±0.031	6.69	32.6	269
2	0.399±0.013	6.70	38.5	253
3	0.390±0.004	6.47	31.5	301
4	0.382±0.005	7.32	22.4	303
5	0.410±0.009	6.63	16.1	261
6	0.389±0.081	5.43	26.6	248
7	0.392±0.016	6.59	31.8	256
8	0.445±0.013	6.87	28.6	260
9	0.455±0.022	6.25	20.2	261
10	0.327±0.004	7.43	26.6	295
เฉลี่ย	0.404±0.020	6.64±0.56	27.5±6.6	271±21

ตาราง 3.65 ค่าความเค้นสูงสุด เปรอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดุลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-60%VP) ที่สังเคราะห์ได้ ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตัวอย่าง ที่	ความหนา (มม.)	ความเค้นสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด	มอดุลัสแบบยืดหยุ่น (MPa)
1	0.420±0.044	3.59	49.3	215
2	0.454±0.036	3.19	60.0	242
3	0.408±0.028	3.45	60.6	302
4	0.424±0.039	3.50	50.1	202
5	0.391±0.036	3.56	61.6	224
6	0.348±0.013	3.64	43.9	282
7	0.373±0.011	5.88	48.8	304
8	0.377±0.016	5.90	41.3	269
9	0.386±0.019	6.62	44.9	228
10	0.397±0.069	5.89	45.1	298
11	0.378±0.020	6.46	58.0	315
เฉลี่ย	0.396±0.030	4.66±1.37	51.2±7.4	243±83

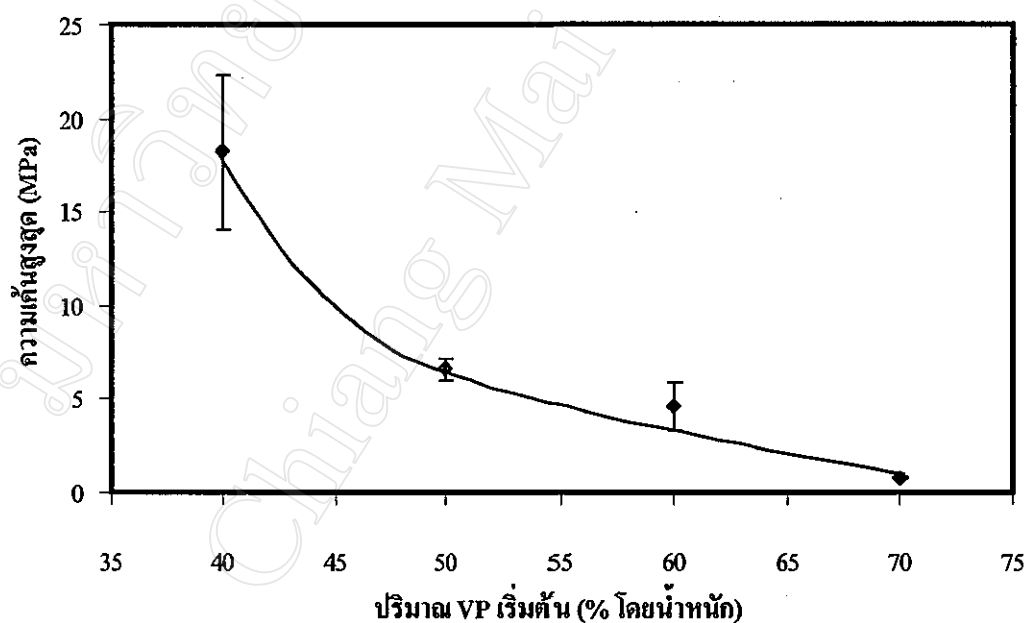
ตาราง 3.66 ค่าความเค้นสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดูลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-70%VP) ที่สังเคราะห์ได้ ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

ตัวอย่าง ที่	ความหนา (มม.)	ความเค้นสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด	มอดูลัสแบบยืดหยุ่น (MPa)
1	0.305±0.046	0.807	60.9	70.2
2	0.338±0.019	0.873	65.0	76.8
3	0.339±0.009	0.899	43.9	73.6
4	0.303±0.021	0.754	56.5	65.5
5	0.373±0.025	0.911	45.9	79.8
6	0.313±0.018	0.790	40.4	62.9
7	0.339±0.009	0.964	60.7	62.2
8	0.003±0.021	0.940	53.7	65.4
9	0.360±0.014	0.898	56.6	68.8
10	0.389±0.019	0.859	54.6	79.6
11	0.373±0.005	0.953	69.2	62.1
12	0.369±0.010	0.893	39.8	53.5
เฉลี่ย	0.345±0.018	0.878±0.066	53.9±9.6	68.4±8.0

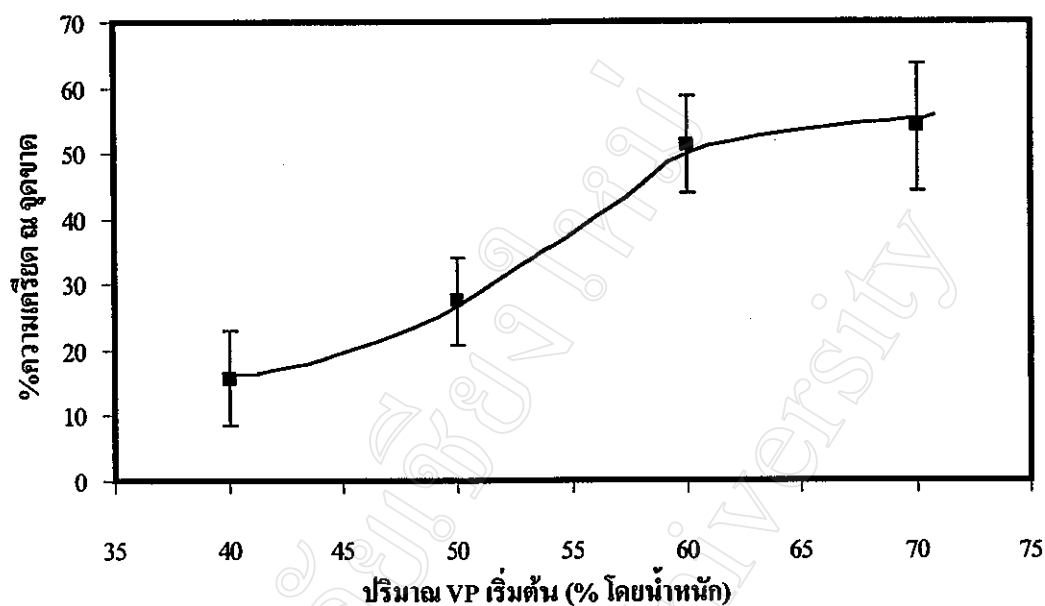
ค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดูลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน 40, 50, 60 และ 70% โดยน้ำหนักสรุปได้ดังตาราง 3.67 และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นกับความเค้นสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดูลัสแบบยืดหยุ่น แสดงดังรูป 3.68-3.70 ตามลำดับ

ตาราง 3.67 ความเค้นสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด และมอดุลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไฟโรลิโคนต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%

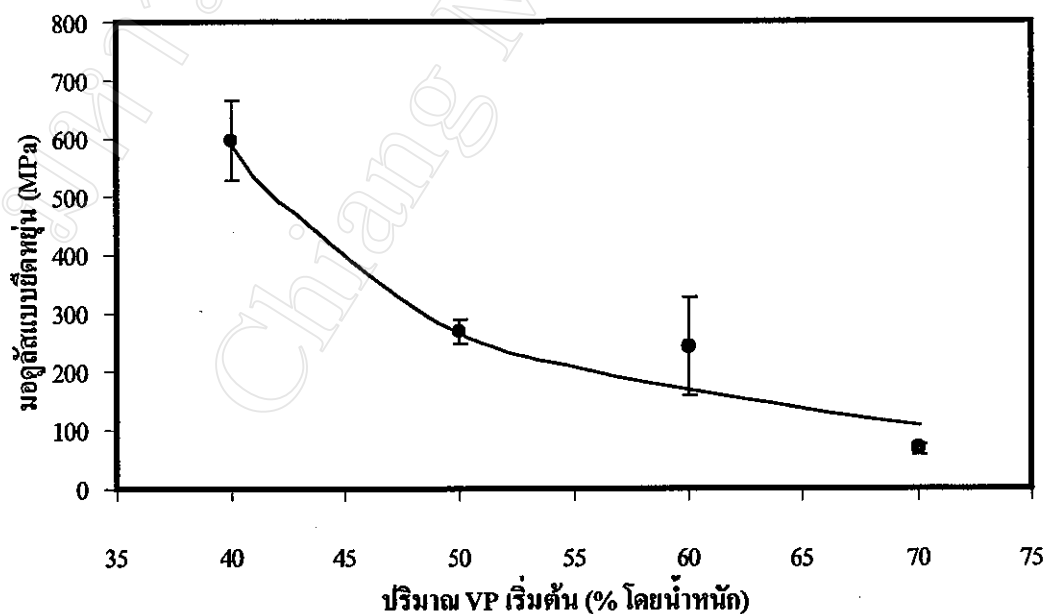
ไฮโดรเจลที่ สังเคราะห์ได้	ความหนา (มม.)	ความเค้นสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด	มอดุลัสแบบ ยืดหยุ่น (MPa)
P(MMA- <i>stat</i> -40%VP)	0.425±0.018	18.2±4.1	15.8±7.3	597±70
P(MMA- <i>stat</i> -50%VP)	0.404±0.020	6.6±0.6	27.5±6.6	271±21
P(MMA- <i>stat</i> -60%VP)	0.396±0.030	4.6±1.3	51.2±7.4	243±83
P(MMA- <i>stat</i> -70%VP)	0.345±0.018	0.8±0.1	53.9±9.6	68±8



รูป 3.68 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไฟโรลิโคนเริ่มต้นกับค่าความเค้นสูงสุดของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.392±0.022 มม. ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%



รูป 3.69 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไฟโรลิโคนเริ่มต้นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความเคียด ฆ จุขขาดของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.392 ± 0.022 มม. ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%



รูป 3.70 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไฟโรลิโคนเริ่มต้นกับค่ามอดูลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม P(MMA-*stat*-VP) ความหนา 0.392 ± 0.022 มม. ณ อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-60%