

บทที่ 3

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	หน้าที่	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต
โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate)	ตัวริเริ่ม (Initiator)	98%	BDH, England
เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO)	ตัวริเริ่ม (Initiator)	97%	Fluka, AG Switzerland
อะคริลาไมด์ (Acrylamide, AM)	มอนอเมอร์ (Monomer)	99%	Fluka, AG Switzerland
2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต, ฮีมา (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA)	มอนอเมอร์ (Monomer)	95%	Fluka, AG Switzerland
อะคริลิกแอซิด (Acrylic acid, AA)	มอนอเมอร์ (Monomer)	98%	Fluka, AG Switzerland
เอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลต (Ethylene glycol dimethacrylate)	ตัวเชื่อมต้อ (Crosslinking agent)	97%	Fluka, AG Switzerland
เอ็น,เอ็น'-เมทิลีน-บิส-อะคริลาไมด์ (N',N'-methylene-bis-acrylamide, MBA)	ตัวเชื่อมต้อ (Crosslinking agent)	98%	Fluka, AG Switzerland
คอปเปอร์(I) คลอไรด์ (Copper(I) chloride)	ตัวยับยั้ง (Inhibitor)	97%	Fluka, AG Switzerland
แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)	สารดูดความชื้น (Drying agent)	90%	Merck
เม็ดดูดความชื้น (Molecular sieve)	สารดูดความชื้น (Drying agent)	เกรดสำหรับ ห้องปฏิบัติการ	Fluka, AG Switzerland
ซิลิกาเจล (Silica gel)	สารดูดความชื้น (Drying agent)	เกรดสำหรับ ห้องปฏิบัติการ	BDH, England

ตาราง 3.1 (ต่อ)

สารเคมี	หน้าที่	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ตัวทำละลาย (Solvent)	เกรดสำหรับ ห้องปฏิบัติการ	Merck
เมทานอล (Methanol)	ตัวทำละลาย (Solvent)	เกรดสำหรับ ห้องปฏิบัติการ	J.T.Baker, Inc. USA

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแสดงในตาราง 3.2

ตาราง 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือ	รุ่น	บริษัทผู้ผลิต
ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum oven)	VOS - 300SD	EYELA, Tokyo Rikakai Co Ltd.
อินคิวเบเตอร์ (Incubator)	BM 400	Memmert
ตู้อบ (Drying oven)	FCO - 100	Whatman
อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrometer)	510	Nicolet
เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Elemental Analyzer)	PE - 2400 Series II	Perkin - Elmer
เทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer)	TGA7	Perkin - Elmer
ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter)	DSC7	Perkin - Elmer
เครื่องวัดสมบัติเชิงกล (Mechanical Tester)	LRX	LLOYD instruments
แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีน เทอแรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate) film)	-	3M
เทปพันเกลียว (Polytetrafluoroethylene tape)	-	บริษัทอุตสาหกรรมท่อน้ำไทยจำกัด

3.2 การเตรียมตัวริเริ่ม ตัวเชื่อมต่อ และมอนอเมอร์ให้บริสุทธิ์

3.2.1 การทำตัวริเริ่มให้บริสุทธิ์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวริเริ่ม 2 ตัว คือ โฟแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต สำหรับใช้สังเคราะห์พอลิอะคริลาไมด์ และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์สำหรับใช้สังเคราะห์พอลิฮีมา พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) พอลิอะคริลิกเอซิด และ พอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ซึ่งก่อนที่จะนำมาพอลิเมอไรซ์ได้นำมาทำให้บริสุทธิ์ดังนี้

3.2.1.1 การตกผลึกโฟแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต [40]

ละลายโฟแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 10 กรัม ในน้ำปราศจากอิออน 50 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 45 – 50 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ดังรูป 3.1 คนตลอดเวลาจนกระทั่งโฟแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตละลายหมด กรองสารละลายที่ได้แล้วนำส่วนที่เป็นของเหลวแช่ในตู้เย็นเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นกรองผลึกที่ได้แล้วนำไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 45 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บผลึกในที่เก็บสารแบบสูญญากาศ

3.2.1.2 การตกผลึกเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ [41]

ละลายเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 10 กรัม ในคลอโรฟอร์ม 25 มิลลิลิตร แล้วแยกชั้นน้ำทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นคลอโรฟอร์มมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ดังรูป 3.1 จนกระทั่งเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ละลายหมด จากนั้นเติมเมทานอล 75 มิลลิลิตรลงไป ปล่อยให้เย็น แล้วจึงกรองผลึกเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ได้ ล้างผลึกด้วยเมทานอล นำผลึกที่ได้ไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บผลึกในที่เก็บสารแบบสูญญากาศ

3.2.2 การทำมอนอเมอร์ให้บริสุทธิ์

3.2.2.1 การตกผลึกอะคริลาไมด์ [42]

ละลายอะคริลาไมด์ 35 กรัม ในเมทานอล 50 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 45 – 50 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน คนตลอดเวลาจนกระทั่งอะคริลาไมด์ละลายหมด กรองสารละลายที่ได้แล้วนำส่วนที่เป็นของเหลวแช่ในตู้เย็นเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นกรองผลึกที่ได้แล้วนำไปอบในตู้อบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 40 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บผลึกในที่เก็บสารแบบสูญญากาศ

3.2.2.2 การกลั่นฮีมา [43]

ดวงฮีมาประมาณ 120 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีเม็ดดูดความชื้นอยู่ ทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นดวงฮีมานี้มาประมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดกันกลม เติมคอปเปอร์ (I) คลอไรด์ 0.05 กรัม (ประมาณ 1 กรัม/ลิตร) เพื่อป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ขณะทำการกลั่น และกลั่นภายใต้ความดันต่ำ โดยใช้เครื่องมือแสดงดังรูป 3.2 เก็บฮีมาที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 71 °C ที่ความดันประมาณ 4 - 5 มม.ของปรอท (ฮีมามีจุดเดือด 67 °C ที่ความดันประมาณ 3.5 มม.ของปรอท [44]) เก็บฮีมาที่กลั่นได้ในภาชนะที่ปิดสนิทแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น

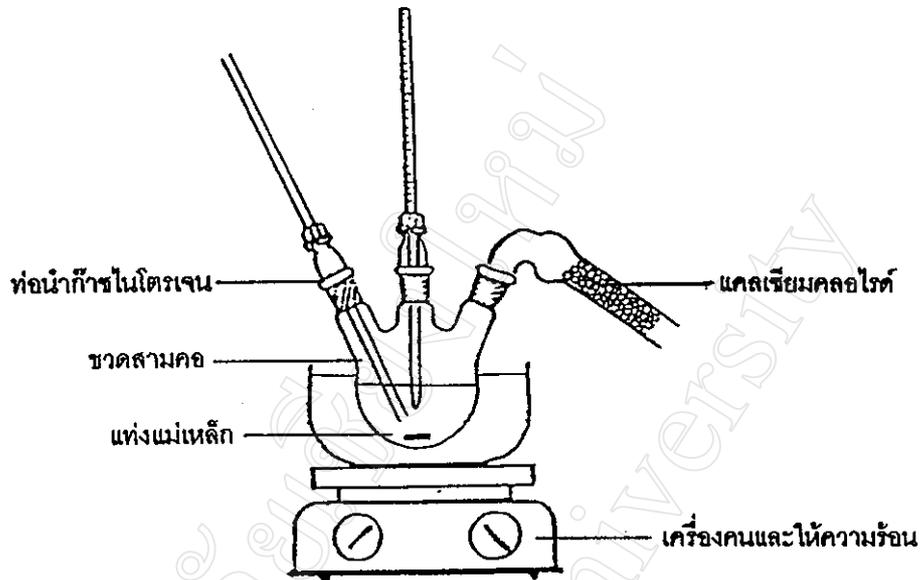
3.2.3 การทำตัวเชื่อมต่อไปให้บริสุทธิ์

3.2.3.1 การกลั่นเอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลต [41]

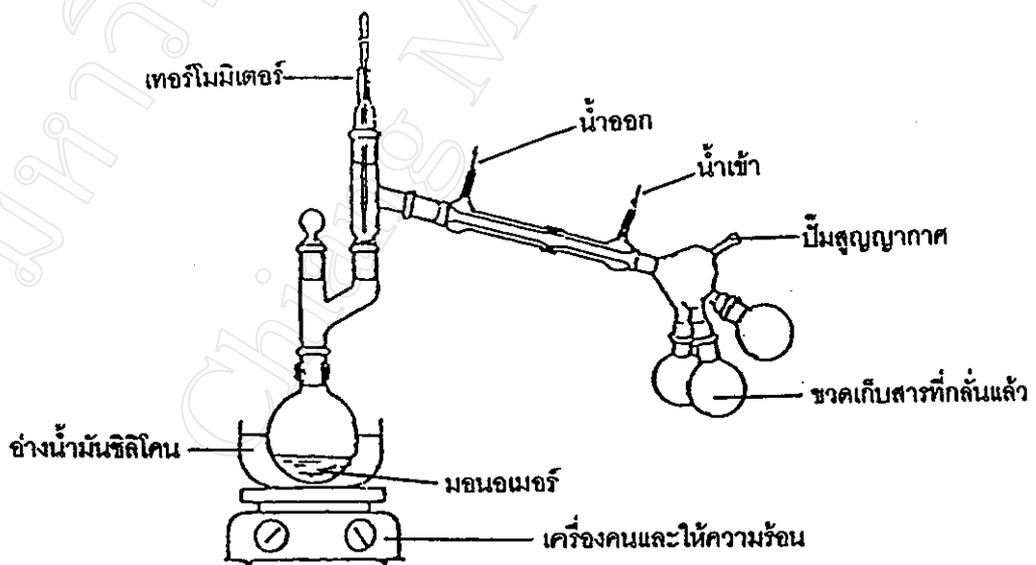
การกลั่นเอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลต ใช้วิธีเดียวกันกับฮีมาทุกประการ แต่ต่างกันที่เก็บเอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลต ที่อุณหภูมิประมาณ 92 - 94 °C ที่ความดันประมาณ 3 - 5 มม.ของปรอท (เอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลตมีจุดเดือดประมาณ 98 - 100 °C ที่ความดัน 5 มม.ของปรอท [44]) เก็บเอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลตในภาชนะที่ปิดสนิทแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น

3.2.3.2 การตกผลึกเอ็น',เอ็น'-เมทิลีน-บิส-อะคริลาไมด์ [45]

ละลายเอ็น',เอ็น'-เมทิลีน-บิส-อะคริลาไมด์ (N',N'-methylene-bis-acrylamide, MBA) 10 กรัม ในอะซีโตน 30 มิลลิลิตร คนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน กรองสารละลายที่ได้แล้วนำส่วนที่เป็นของเหลวในตู้เย็นเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นกรองผลึกที่ได้แล้วนำไปอบในตู้อบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 40 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บผลึกในที่เก็บสารแบบสูญญากาศ



รูป 3.1 อุปกรณ์การตกผลึกใหม่ตัววิเริ่มและมอนอเมอร์

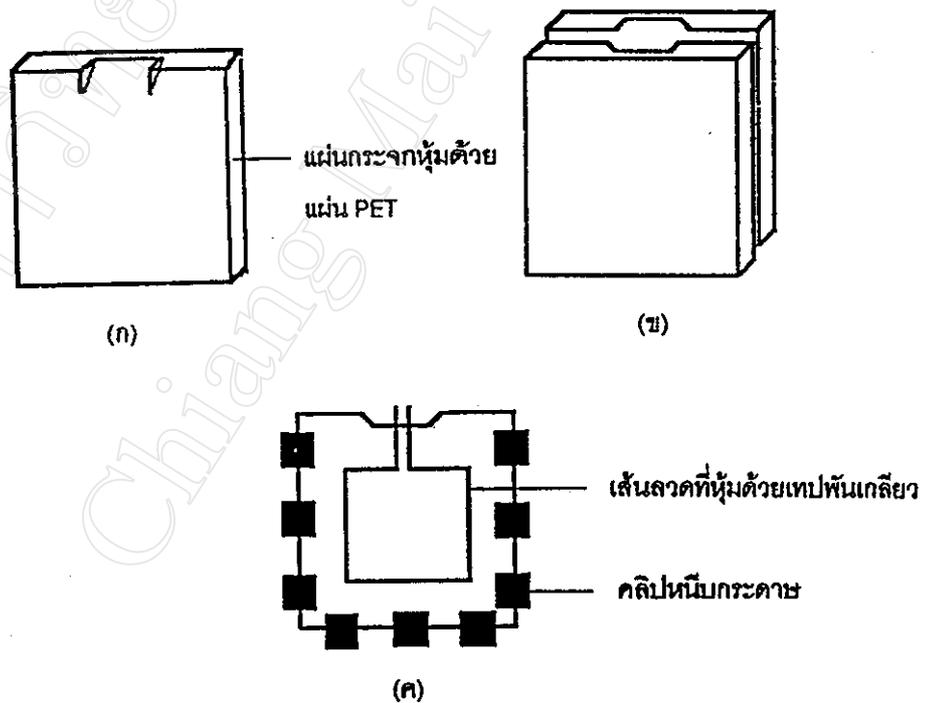


รูป 3.2 อุปกรณ์การกลั่นมอนอเมอร์และตัวเชื่อมต่อไป

3.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์

3.3.1 การออกแบบแบบพิมพ์

แบบพิมพ์ที่ใช้ประกอบด้วยแผ่นกระจกใส 2 แผ่น ขนาดประมาณ 15 x 15 เซนติเมตร ที่มีร่องลาดลงกว้างประมาณ 1.5 นิ้ว ดังรูป 3.3(ก) นำกรีส (grease) มาทาบางๆ แล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทอแรพธาเลต (PET) เพื่อป้องกันไม่ให้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ติดแผ่นกระจกและกรีสช่วยให้แผ่นพลาสติกแนบติดกับกระจกได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นตัดลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 35 มม. ยาวประมาณ 35 ซม. มาพันด้วยเทปพันเกลียว แล้วนำมาขดเป็นรูปตัว U บนแผ่นกระจกที่เตรียมไว้ จากนั้นนำแผ่นกระจกอีกแผ่นหนึ่งมาประกบเข้าด้วยกัน โดยให้ร่องที่เจาะไว้อยู่ด้านใน ดังรูป 3.3(ข) ช่วยให้การบรรจุสารละลายลงไปในแม่พิมพ์ทำได้ง่ายยิ่งขึ้น แล้วใช้คลิปหนีบกระดาษหนีบให้แน่น ดังรูป 3.3(ค) จากนั้นนำแบบพิมพ์ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เทปพันเกลียวแนบติดกับแบบพิมพ์



รูป 3.3 การประกอบแบบพิมพ์

3.3.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์

3.3.2.1 การสังเคราะห์พอลิอะคริลาไมด์ [40, 46]

การสังเคราะห์ใช้เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย ในแบบพิมพ์ที่ได้เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.3.1 โดยการนำอะคริลาไมด์ที่ทำการตกผลึกใหม่แล้ว 25.0 กรัม ละลายในน้ำ 50 มิลลิลิตร ในขวดสามคอ (สารละลายควรมีความเข้มข้นประมาณ 10 – 30 % ของมอนอเมอร์ [46]) คนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน จากนั้นลดอุณหภูมิของสารละลายให้มีอุณหภูมิประมาณ 5 °C แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นประมาณ 0.22%w/w 30 มิลลิลิตร (ประมาณ 0.1 %โดยโมลของมอนอเมอร์) และ MBA ลงไปประมาณ 2.5 กรัม (ประมาณ 10% โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์) กวนสารละลายให้เข้ากัน นำไปฉีดในแบบพิมพ์แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นนำออกมาจากตู้อบ แล้วนำมาแช่น้ำไว้ 1 สัปดาห์ เพื่อกำจัดมอนอเมอร์ที่เหลือให้หมดไป พอลิอะคริลาไมด์ที่เตรียมได้ไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มแห้งได้ เพราะจะเกิดรอยร้าวแตกทั่วทั้งแผ่น

3.3.2.1 การสังเคราะห์พอลิฮีมา (HEMA) พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) (P(HEMA-co-AM)) พอลิ(อะคริลิกเอซิด) (PAA) และ พอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) (P(AA-co-AM)) [37]

การสังเคราะห์ใช้เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ ในแบบพิมพ์ที่ได้เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.3. โดยการนำมอนอเมอร์มาผสมกับตัวริเริ่มคือ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide, BPO) ประมาณ 0.1% โดยโมลของมอนอเมอร์ และตัวเชื่อมต่อก็คือ เอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลต (Ethylene glycol dimethacrylate, EGDM) ประมาณ 1% โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ คนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำสารละลายนี้ฉีดลงในแบบพิมพ์ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 วัน แล้วทำการกำจัดมอนอเมอร์ที่เหลือโดยอบต่อที่อุณหภูมิ 110 °C จนน้ำหนักคงที่ และนำไปแช่น้ำประมาณ 1 สัปดาห์

อัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับพอลิอะคริลิกเอซิดและพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตาราง 3.3 อัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิฮีมา และพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์)

พอลิเมอร์	อัตราส่วนของมอนอเมอร์	
	ฮีมา (% โดยน้ำหนัก)	อะคริลาไมด์ (% โดยน้ำหนัก)
PHEMA	100	0
P(HEMA-co-1%AM)	99	1
P(HEMA-co-5%AM)	95	5
P(HEMA-co-10%AM)	90	10
P(HEMA-co-15%AM)	85	15
P(HEMA-co-20%AM)	80	20

ตาราง 3.4 อัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิอะคริลิกเอสิด และพอลิ(อะคริลิกเอสิด-โค-อะคริลาไมด์)

พอลิเมอร์	อัตราส่วนของมอนอเมอร์	
	อะคริลิกเอสิด (% โดยน้ำหนัก)	อะคริลาไมด์ (% โดยน้ำหนัก)
PAA	100	0
P(AA-co-25%AM)	75	25
P(AA-co-30%AM)	70	30
P(AA-co-35%AM)	65	35
P(AA-co-40%AM)	60	40
P(AA-co-45%AM)	55	45
P(AA-co-50%AM)	50	50

3.4 การหาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

3.4.1 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ พอลิฮีมา และพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่เตรียมได้แสดงในตาราง 3.5

ตาราง 3.5 ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ พอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่เตรียมได้

พอลิเมอร์	เมื่อแห้ง	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
PHEMA	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะ แตกหักง่าย	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นดี แนบกับผิวหนังได้ดี
P(HEMA-co-1%AM)	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะ แตกหักง่าย	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นดี แนบกับผิวหนังได้ดี
P(HEMA-co-5%AM)	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะ แตกหักง่าย	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นดี แนบกับผิวหนังได้ดี
P(HEMA-co-10%AM)	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะ แตกหักง่ายขึ้น	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นดี แนบกับผิวหนังได้ดีฉีกขาดง่าย
P(HEMA-co-15%AM)	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะ แตกหักง่ายขึ้น	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นดี แนบกับ ผิวหนังได้ไม่ค่อยดี ฉีกขาดง่ายขึ้น
P(HEMA-co-20%AM)	ใส ไม่มีสี แข็ง เปราะมาก แตกหักง่ายมาก	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นดี แนบกับ ผิวหนังได้ไม่ค่อยดี ฉีกขาดง่ายมาก
PAM	ใส ไม่มีสี แข็ง แตกหักง่าย ไม่สามารถทำให้อยู่ในรูป ของแผ่นฟิล์มได้ เนื่องจาก เกิดรอยแตกร้าว ทั่วทั้งแผ่น	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่น แนบติดกับ ผิวหนังได้ไม่ค่อยดี ฉีกขาดง่ายมาก

ส่วนลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ พอลิอะคริลิกเอซิด และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่เตรียมได้แสดงในตาราง 3.6

ตาราง 3.6 ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ พอลิอะคริลิกเอซิด และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่เตรียมได้

พอลิเมอร์	เมื่อแห้ง	เมื่อดูดซับน้ำเต็มที่
PAA	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส แข็ง เปราะ แตกหักง่าย	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส มีความยืดหยุ่นเหนียว ดูดแนบกับผิวหนังได้ดี
P(AA-co-25%AM)	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส แข็ง เปราะ แตกหักง่าย	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส มีความยืดหยุ่นเหนียว ดูดแนบกับผิวหนังได้ดี
P(AA-co-30%AM)	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส แข็ง เปราะ แตกหักง่าย	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส มีความยืดหยุ่นเหนียว ดูดแนบกับผิวหนังได้
P(AA-co-35%AM)	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส แข็ง เปราะ แตกหักง่าย	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส มีความยืดหยุ่นเหนียว ดูดแนบกับผิวหนังได้
P(AA-co-40%AM)	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส แข็ง เปราะ แตกหักง่ายขึ้น	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส มีความยืดหยุ่นเหนียว ดูดแนบกับผิวหนังได้เล็กน้อย ฉีกขาดง่าย
P(AA-co-45%AM)	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส แข็ง เปราะ แตกหักง่ายขึ้น	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส มีความยืดหยุ่นเหนียว ดูดแนบกับผิวหนังไม่ดี ฉีกขาดง่ายขึ้น
P(AA-co-50%AM)	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส แข็งและเปราะมากแตกหักง่ายขึ้น	มีสีน้ำตาลอ่อน ใส มีความยืดหยุ่นเหนียว ดูดแนบกับผิวหนังได้ไม่ดี ฉีกขาดง่ายมาก
PAM	ใส ไม่มีสี แข็ง แตกหักง่าย ไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มได้ เนื่องจากเกิดรอยแตกร้าว ทั่วทั้งแผ่น	ใส ไม่มีสี มีความยืดหยุ่น แนบติดกับผิวหนังได้ไม่ค่อยดี ฉีกขาดง่ายมาก

3.4.2 การขยายตัวของเมืออิมตัวด้วยน้ำ

นำแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้ววัดขนาดความกว้าง ความยาวและความหนาของแผ่นตัวอย่างเมือแห้ง จากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 1 คืน แล้วนำเอามาวัดขนาดซ้ำอีกครั้ง ขนาดของแผ่นพอลิเมอร์เมือแห้งและเมืออิมตัวด้วยน้ำและค่าการคำนวณเปอร์เซ็นต์การขยายตัวตามพื้นที่ ใน 2 มิติ (กว้าง x ยาว) และปริมาตร แสดงในตาราง 3.7

ตาราง 3.7 ขนาดของแผ่นพอลิเมอร์เนื้อแห้งและเนื้ออิมิตัวด้วยน้ำและค่าการขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตร

พอลิเมอร์	ตัวอย่าง ที่	เนื้อแห้ง				เนื้ออิมิตัวด้วยน้ำ				พื้นที่ ที่ขยายตัว (%)	ปริมาตรที่ ขยายตัว (%)	พื้นที่ ที่ขยายตัว (%)	ปริมาตรที่ ขยายตัว (%)		
		กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาตร (ลบ.มม.)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)					พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาตร (ลบ.มม.)
PAM	1	6.0	39.0	0.772	234	181	10.0	50.0	1.626	500	813	114	350		
	2	5.5	37.0	0.751	204	153	9.0	57.5	1.628	518	842	154	451	141±24	413±55
	3	5.5	62.0	0.757	341	258	9.5	92.0	1.587	874	1387	156	437		
PHEMA	1	8.5	26.0	0.465	221	103	10.0	30.0	0.570	300	171	36	66		
	2	8.5	26.0	0.428	221	95	10.0	30.0	0.532	300	160	36	69	37±1	68±2
	3	8.5	25.5	0.400	217	87	10.0	30.0	0.492	300	148	38	70		
P(HEMA-co-1%AM)	1	8.0	25.5	0.310	204	63	10.0	30.0	0.367	300	110	47	74		
	2	13.0	21.0	0.410	273	112	15.0	25.0	0.515	375	193	37	73	41±6	71±5
	3	8.5	25.5	0.403	217	87	10.0	30.0	0.479	300	144	38	65		
P(HEMA-co-5%AM)	1	18.0	43.0	0.384	774	297	20.0	51.5	0.475	1030	489	33	65		
	2	16.0	24.5	0.336	392	132	19.0	28.0	0.416	532	221	36	68	42±13	76±16
	3	12.0	20.0	0.314	240	75	15.0	25.0	0.389	375	146	56	94		
P(HEMA-co-10%AM)	1	10.0	20.0	0.434	200	87	12.0	25.0	0.465	300	140	50	61		
	2	10.0	20.0	0.422	200	84	13.0	25.5	0.464	332	154	66	82	60±9	73±11
	3	10.0	20.0	0.428	200	86	13.0	25.0	0.464	325	151	63	76		

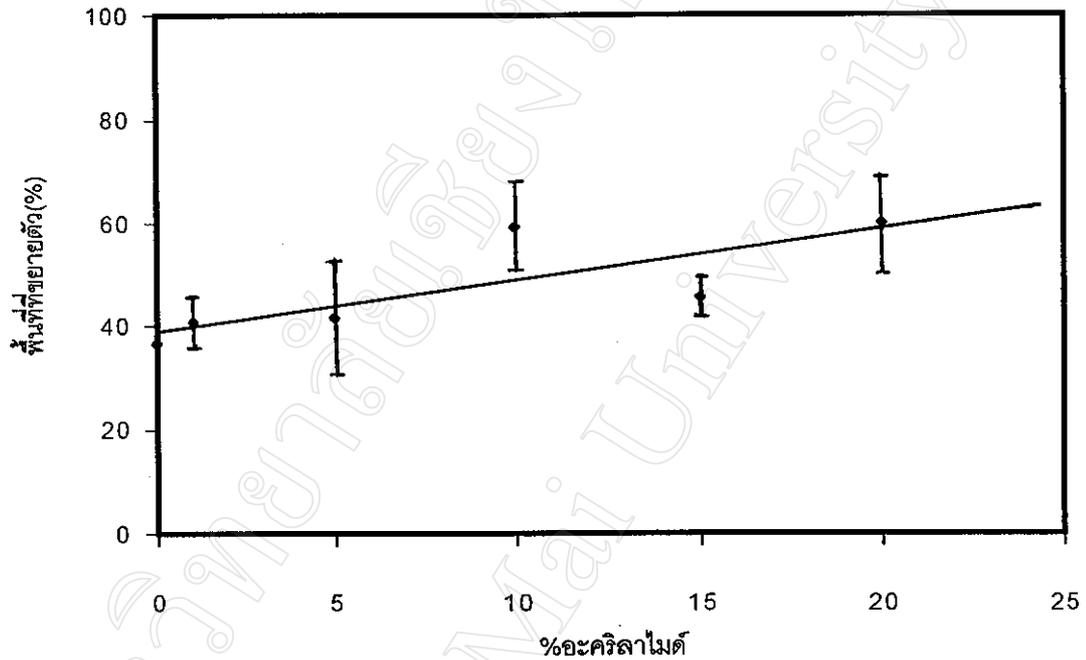
ตาราง 3.7 (ต่อ)

พอลิเมอร์	ตัวอย่างที่	เนื้อแห้ง				เมื่อต้มด้วยน้ำ						พื้นที่ที่ขยายตัว (%)	พื้นที่ที่ขยายตัวเฉลี่ย (%)	ปริมาตรที่ขยายตัวเฉลี่ย (%)	
		กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาตร (ลบ.มม.)					
P(HEMA-co-15%AM)	1	21.0	38.0	0.370	798	295	24.0	48.0	0.430	1152	495	44	68		
	2	14.0	43.0	0.563	602	339	17.0	50.5	0.599	859	514	43	52	46±4	63±10
	3	14.0	43.0	0.535	602	322	18.0	50.0	0.603	900	543	50	69		
P(HEMA-co-20%AM)	1	15.0	20.0	0.481	300	144	18.0	25.0	0.534	450	240	50	67		
	2	22.0	33.0	0.451	726	327	27.0	43.0	0.478	1161	555	60	69	60±10	70±4
	3	19.0	32.5	0.436	618	269	25.0	42.0	0.446	1050	468	70	74		
PAA	1	10.0	30.0	0.366	300	110	14.5	43.5	0.457	631	288	110	163		
	2	10.0	22.0	0.389	220	86	15.5	30.0	0.474	465	220	111	158	108±4	152±14
	3	10.0	20.0	0.347	200	69	14.0	29.0	0.404	406	164	103	136		
P(AA-co-25%AM)	1	10.0	20.0	0.453	200	91	15.0	30.0	0.536	450	241	125	166		
	2	10.0	20.0	0.430	200	86	15.5	30.0	0.551	465	256	133	198	137±16	191±22
	3	10.0	20.0	0.476	200	95	16.5	30.5	0.583	503	293	152	208		
P(AA-co-30%AM)	1	10.0	20.0	0.456	200	91	15.5	30.0	0.566	465	263	133	189		
	2	10.0	20.0	0.469	200	94	15.0	29.5	0.574	443	254	121	171	131±10	192±22
	3	10.0	20.0	0.397	200	79	15.5	31.0	0.521	481	250	140	215		

ตาราง 3.7 (ต่อ)

พอลิเมอร์	ตัวอย่างที่	เนื้อแห้ง					เนื้ออิมัลชัน					พื้นที่ที่ขยายตัว (%)	ปริมาณตัวขยายตัว (%)	ปริมาณตัวขยายตัวเฉลี่ย (%)	
		กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาณ (ลบ.มม.)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ปริมาณ (ลบ.มม.)				
															พื้นที่ที่ขยายตัว (%)
P(AA-co-35%AM)	1	10.0	20.0	0.531	200	106	15.5	30.5	0.649	473	307	136	189	178±18	
	2	10.0	20.0	0.590	200	118	15.5	29.5	0.664	457	304	129	157		131±4
	3	10.0	20.0	0.453	200	91	15.0	30.5	0.572	458	262	129	189		
P(AA-co-40%AM)	1	10.0	20.0	0.437	200	87	16.1	29.5	0.546	475	259	137	197	185±16	
	2	10.0	20.0	0.516	200	103	15.2	30.5	0.650	464	301	132	192		131±7
	3	10.0	20.0	0.437	200	87	15.3	29.3	0.519	448	233	124	166		
P(AA-co-45%AM)	1	10.0	20.0	0.544	200	109	18.0	37.0	0.786	666	523	233	381	359±19	
	2	10.0	20.0	0.585	200	117	19.5	35.0	0.766	683	523	241	347		233±9
	3	10.0	20.0	0.557	200	111	18.0	36.0	0.771	648	500	224	348		
P(AA-co-50%AM)	1	10.0	20.0	0.512	200	102	18.5	35.5	0.760	657	499	228	387	357±31	
	2	10.0	20.0	0.531	200	106	19.0	35.0	0.730	665	485	233	357		222±14
	3	10.0	20.0	0.565	200	113	17.5	35.0	0.786	613	481	206	326		

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ตอนเริ่มต้น (monomer feed) กับพื้นที่และปริมาตรที่ขยายตัวเมื่อนำไปแช่น้ำ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 คืน แสดงดังรูป 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูป 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.42 ± 0.07 มม. กับพื้นที่ที่ขยายตัว

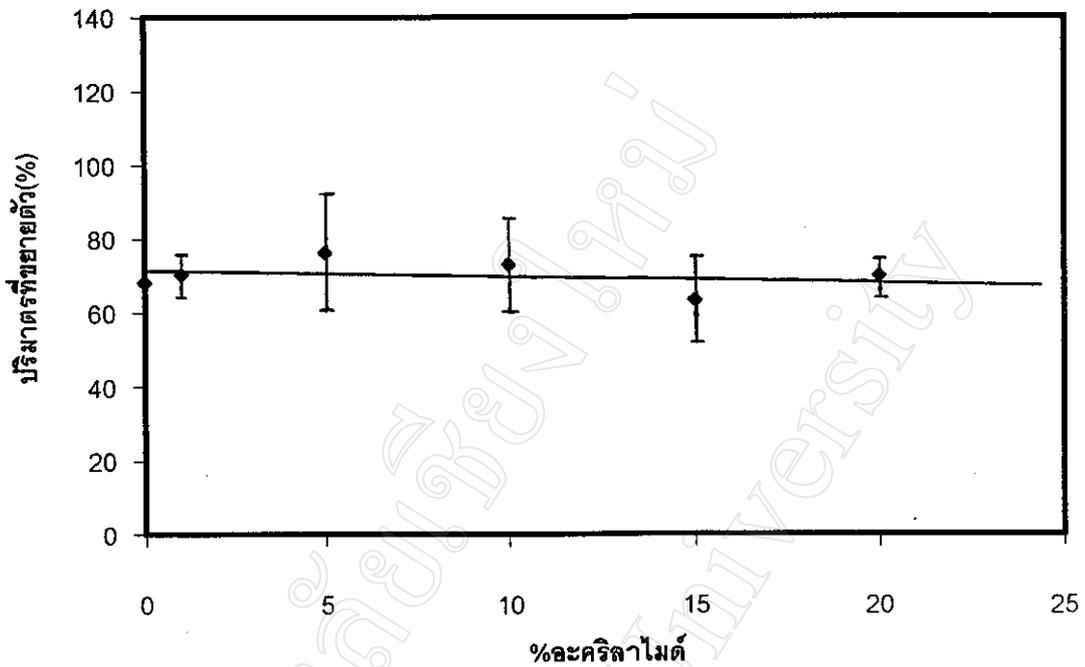
จากรูป 3.4 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (2)

$$A_H = (1.0 \pm 0.4)A_m + (37 \pm 7) \quad (2)$$

เมื่อ

$$A_H = \text{พื้นที่ที่ขยายตัว (\%)}$$

$$A_m = \text{เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก}$$



รูป 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะครีลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะครีลาไมด์) ความหนา 0.42 ± 0.07 มม. กับปริมาณที่ขยายตัว

จากรูป 3.5 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (3)

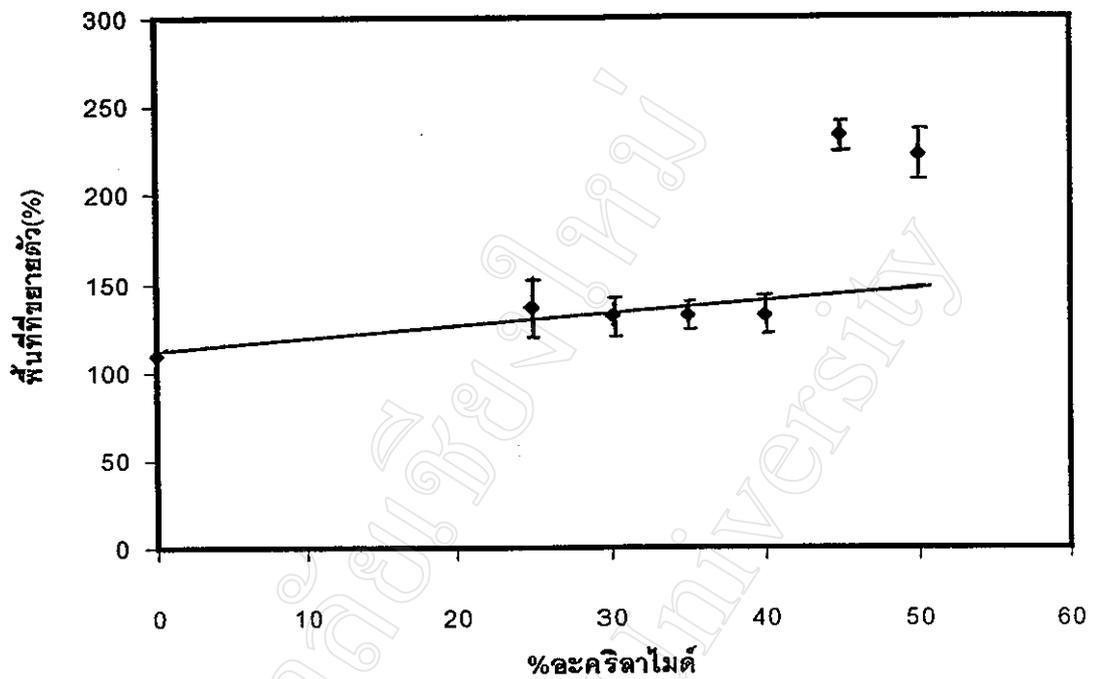
$$V_H = -(0.15 \pm 0.45)A_m + (71 \pm 9) \quad (3)$$

เมื่อ

$$V_H = \text{ปริมาณที่ขยายตัว (\%)}$$

$$A_m = \text{เปอร์เซ็นต์ของอะครีลาไมด์ โดยน้ำหนัก}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะครีลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิคเอไซด์-โค-อะครีลาไมด์) ตอนเริ่มต้น (monomer feed) กับพื้นที่และปริมาณที่ขยายตัว เมื่อนำไปแช่น้ำ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ \text{C}$ เป็นเวลา 1 คืน แสดงในรูป 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



รูป 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.50 ± 0.06 มม. กับพื้นที่ที่ขยายตัว

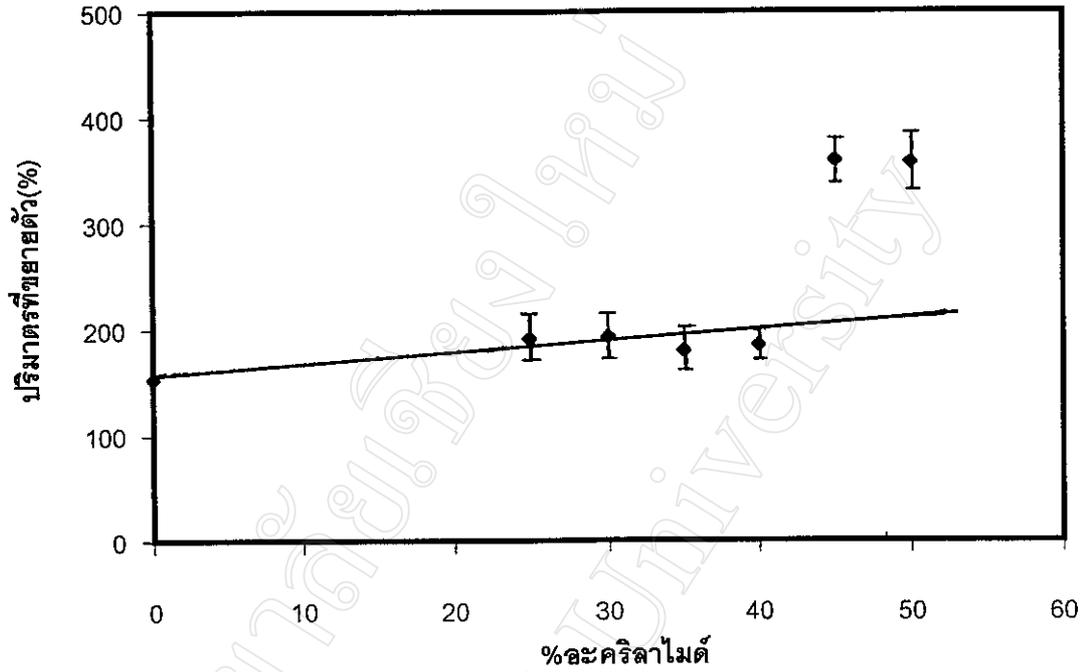
จากรูป 3.6 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในช่วง 0 – 40 % อะคริลาไมด์ ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (4)

$$A_A = (0.609 \pm 0.182)A_m + (113 \pm 9) \quad (4)$$

เมื่อ

$$A_A = \text{พื้นที่ที่ขยายตัว (\%)}$$

$$A_m = \text{เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก}$$



รูป 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.50 ± 0.06 มม. กับปริมาณที่ขยายตัว

จากรูป 3.7 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (5)

$$V_A = (0.840 \pm 0.406)A_m + (158 \pm 20) \quad (5)$$

เมื่อ

$$V_A = \text{ปริมาณที่ขยายตัว (\%)}$$

$$A_m = \text{เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก}$$

3.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Elemental Analysis) [47]

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน หรือออกซิเจน เป็นวิธีหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างมากในการหาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เพราะสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของมอนอเมอร์ที่มีอยู่ในโคพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้

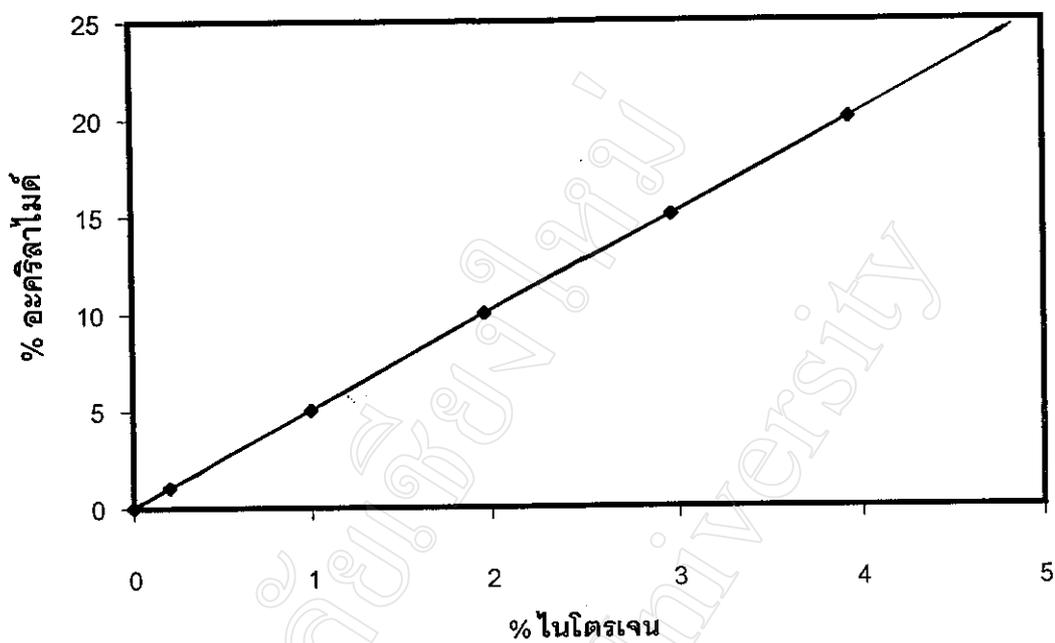
ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ผลิตโดยบริษัทเพอร์คิน-เอลเมอร์ (Perkin-Elmer) รุ่น พีอี-2400 ซีรีส์ที่สอง (PE-2400 Series II CHNS/O Analyser) ซึ่งเครื่องนี้สามารถทำการวิเคราะห์ได้สามแบบ คือ การวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (Option 1, CHN) การวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน (Option 2, CHNS) และการวิเคราะห์หาปริมาณของออกซิเจน (Option 3, .O) โดยสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็ง ใช้ปริมาณสารตัวอย่างประมาณ 1-2 มิลลิกรัม ใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 8 นาที และมีความถูกต้องถึง $\pm 0.3\%$

ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนนั้น สารตัวอย่างจะถูกเผาไหม้ หรือถูกออกซิไดซ์ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน แล้วถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และไนโตรเจน ส่วนธาตุอื่นๆ เช่น ฮาโลเจน และกำมะถัน จะถูกกำจัดออกไป ก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันและถูกควบคุมให้มีความดัน อุณหภูมิ และปริมาตร ที่แน่นอน จากนั้นก๊าซจะถูกลดความดันผ่านคอลัมน์ ทำให้ก๊าซต่างๆ เหล่านี้ถูกแยกออกจากกันและตรวจวัดได้ โดยอาศัยความแตกต่างของค่าการนำความร้อน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของก๊าซแต่ละชนิด

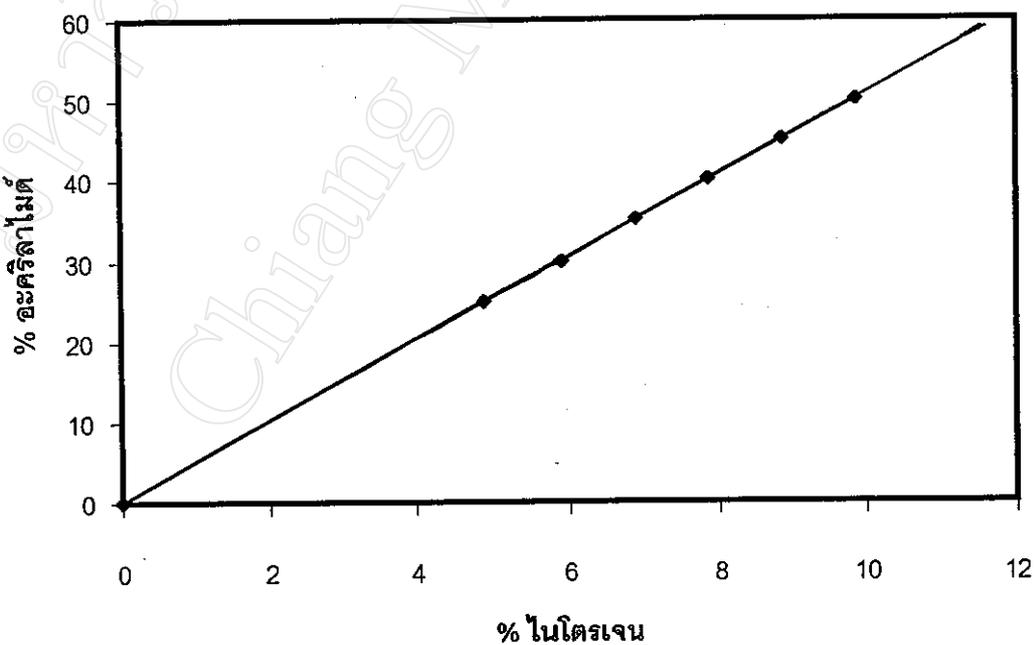
การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการทดลอง 3 ครั้งกับที่คำนวณทางทฤษฎี แสดงในตาราง 3.8 และจากปริมาณของไนโตรเจนที่มีอยู่ในโคพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่วิเคราะห์ได้นั้น สามารถนำไปหาเปอร์เซ็นต์ของมอนอเมอร์ที่มีอยู่จริงในโคพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้จากกราฟมาตรฐานที่คำนวณได้จากทฤษฎี กราฟมาตรฐานของพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิคเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดังรูป 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ และปริมาณของอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิคเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่หาได้จากกราฟมาตรฐานแสดงได้ดังตาราง 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

ตาราง 3.8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้กับที่คำนวณทางทฤษฎี

พอลิเมอร์	%โดยน้ำหนักของคาร์บอน						%โดยน้ำหนักของไฮโดรเจน						%โดยน้ำหนักของไนโตรเจน							
	จากการทดลอง			จากทฤษฎี			จากการทดลอง			จากทฤษฎี			จากการทดลอง			จากทฤษฎี				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
PAM	45.1	44.3	44.6	44.70.4	50.69	7.5	7.3	7.4	7.4±0.1	7.09	17.5	17.3	17.2	17.4±0.14	19.71	0	0	0	0	0
PHEMA	53.7	54.6	54.0	54.1±0.5	55.36	7.5	7.6	7.4	7.5±0.1	7.76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P(HEMA-co-1%AM)	54.6	54.1	54.3	54.3±0.3	55.32	7.1	7.8	7.6	7.5±0.4	7.74	0.2	0.2	0.1	0.1±0.01	0.20	0.8	0.8	0.5	0.7±0.04	0.99
P(HEMA-co-5%AM)	52.1	54.2	53.6	53.3±1.1	55.14	7.5	7.4	7.3	7.4±0.1	7.71	1.7	1.6	1.7	1.7±0.1	1.97	1.7	1.6	1.7	1.7±0.1	1.97
P(HEMA-co-10%AM)	54.1	54.2	53.2	53.8±0.6	54.90	7.9	7.6	7.8	7.8±0.1	7.68	2.4	2.3	2.0	2.2±0.1	2.96	3.2	3.0	2.8	3.0±0.1	3.94
P(HEMA-co-15%AM)	53.1	52.1	52.1	52.4±0.6	54.67	8.0	7.6	7.9	7.8±0.2	7.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P(HEMA-co-20%AM)	52.3	53.1	49.9	51.7±1.7	54.43	7.7	7.2	7.3	7.4±0.2	7.62	4.5	4.2	3.9	4.2±0.3	4.93	5.0	4.7	5.0	4.9±0.2	5.91
PAA	47.8	48.6	46.3	47.6±1.2	50.00	5.3	6.0	6.7	6.0±0.7	5.60	6.8	6.8	6.8	6.8±0.8	6.05	6.3	6.0	6.5	6.3±0.3	6.90
P(AA-co-25%AM)	46.1	49.3	48.1	47.8±1.6	50.17	6.1	6.2	5.9	6.1±0.2	5.97	6.8	6.1	6.0	6.1±0.2	6.20	6.8	6.9	6.4	6.7±0.1	7.88
P(AA-co-30%AM)	49.5	49.6	47.5	48.9±1.2	50.21	5.9	6.8	5.2	6.0±0.8	6.05	6.3	6.2	6.2	6.1±0.2	6.27	8.4	8.0	7.7	8.1±0.3	8.87
P(AA-co-35%AM)	49.2	46.2	45.3	46.9±2.0	50.24	6.3	6.0	6.5	6.3±0.3	6.12	6.5	6.2	6.0	6.1±0.2	6.34	9.2	8.8	9.0	9.0±0.3	9.85
P(AA-co-40%AM)	49.2	47.6	47.0	48.0±1.1	50.28	5.9	6.2	6.2	6.1±0.2	6.20	6.5	6.2	6.2	6.1±0.2	6.27	6.5	6.3	6.3	6.3±0.1	6.34
P(AA-co-45%AM)	47.7	50.2	48.2	48.7±1.3	50.31	6.3	6.1	6.0	6.1±0.2	6.27	6.3	6.1	6.0	6.1±0.2	6.34	6.5	6.3	6.3	6.3±0.1	6.34
P(AA-co-50%AM)	49.5	46.0	49.1	48.2±1.9	50.34	6.5	6.3	6.3	6.3±0.1	6.34	6.5	6.3	6.3	6.3±0.1	6.34	6.5	6.3	6.3	6.3±0.1	6.34



รูป 3.8 กราฟมาตรฐาน ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนกับเปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์
โดยน้ำหนัก ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์)



รูป 3.9 กราฟมาตรฐาน ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนกับเปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์
โดยน้ำหนัก ในพอลิ(อะคริลิคเอไซด์-โค-อะคริลาไมด์)

ตาราง 3.9 ปริมาณของอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่หาได้จากกราฟมาตรฐาน (รูป 3.8)

พอลิเมอร์	%ไนโตรเจน	%โดยน้ำหนัก ของอะคริลาไมด์
P(HEMA-co-1%AM)	0.1±0.01	1±0.04
P(HEMA-co-5%AM)	0.7±0.04	3±0.2
P(HEMA-co-10%AM)	1.7±0.1	8±1
P(HEMA-co-15%AM)	2.2±0.1	11±1
P(HEMA-co-20%AM)	3.0±0.1	15±1

ตาราง 3.10 ปริมาณของอะคริลาไมด์ในพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่หาได้จากกราฟมาตรฐาน (รูป 3.9)

พอลิเมอร์	%ไนโตรเจน	%โดยน้ำหนัก ของอะคริลาไมด์
P(AA-co-25%AM)	4.2±0.3	21±2
P(AA-co-30%AM)	4.9±0.2	25±1
P(AA-co-35%AM)	5.8±0.2	29±1
P(AA-co-40%AM)	6.7±0.1	34±1
P(AA-co-45%AM)	8.1±0.3	41±2
P(AA-co-50%AM)	9.0±0.3	46±2

3.4.4 อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy) [48-52]

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบพิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยเป็น เรื่องที่เกี่ยวกับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร แล้วทำให้เกิดการสั่นและหมุนของโมเลกุล

อินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นจาก 0.78 ถึง 100 μm หรือมีเลขคลื่น (wave number) อยู่ในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10 cm^{-1} อินฟราเรดสเปกตรัม แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงใกล้อินฟราเรด (near IR region) ซึ่งเป็นช่วงที่ใกล้กับช่วงวิสิเบิล (visible region) หรือช่วงที่ต่ำกว่า 2.5 μm

2. ช่วงกลางอินฟราเรด (middle IR region) แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

2.1 ช่วงกรุปฟริควเอนซี (group-frequency region) เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง 4000 – 1300 cm^{-1} หรือ 2.5 – 8 μm

2.2 ช่วงฟิงเกอร์พริ้นท์ (finger print region) เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง 1300 – 650 cm^{-1} สเปกตรัมในช่วงนี้ส่วนใหญ่จะเกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์

3. ช่วงไกลอินฟราเรด (far IR region) ในช่วงนี้ไม่ค่อยจะได้อใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมนี้มักเกิดจากการสั่นของโครงสร้าง หรือเกิดจากการหมุนของโมเลกุล

ในการวิเคราะห์สารต่างๆ นั้น จะใช้ช่วงกลางอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ คือ จาก 4000 ถึง 200 cm^{-1} หรือ 2.5 ถึง 25 μm โดยทั่วไปนิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาหรือพิสูจน์เกี่ยวกับโครงสร้างของสาร กล่าวคือ เมื่อเกิดการดูดกลืนแสง หมู่ฟังก์ชัน (functional group) ต่างๆ ในโมเลกุล ของสาร จะแสดงสเปกตรัมออกมาที่ความถี่ต่างๆ กัน ความถี่ที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันที่ดูดกลืน แสงอินฟราเรด แสดงดังตาราง 3.11

ตาราง 3.11 ความถี่และประเภทของการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรด [52]

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม *
O - H stretching	- CH ₂ OH	2.80-2.90	3570-3450	v, sh
N - H stretching	- CONH ₂	~2.99	~3350	m
		~3.15	~3180	m
C - H stretching	- CH ₃ , - CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
Hydroxy stretching	- COOH	3.70-4.00	2700-2500	w
C = O stretching	= CH - CO - O - R	5.17-5.76	1750-1735	s
C = O stretching	- COOH	5.80-5.88	1725-1700	s
C = O stretching	- CONH ₂ (สารละลาย)	~5.92	~1690	s
C = O stretching	- CONH ₂ (ของแข็ง)	~6.06	~1650	s
C = C stretching	Alkene	5.95-6.17	1680-1620	v
C = C stretching	Aromatics	~6.25	~1600	v
		~6.33	~1580	v
		~6.67	~1500	m
		~6.90	~1450	m

ตาราง 3.11 (ต่อ)

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม *
C-H bending	-CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
C-H bending	C-H	~7.46	~1340	w
O-H bending และ C-O stretching	-C-OH ใน Alcohol และ Phenol	7.4-7.9 และ 9.30-9.90	1350-1260 และ 1075-1010	s และ s
O-H bending และ C-O stretching	C-OH stretching ใน Carboxylic Acids	7.58-8.28	1320-1210	s
O-H bending และ C-O stretching	-OH bending ใน Carboxylic Acids	6.95-7.17	1440-1395	w
Aromatic out of plane bending	monosubstituted	~14.3	~700	v, s

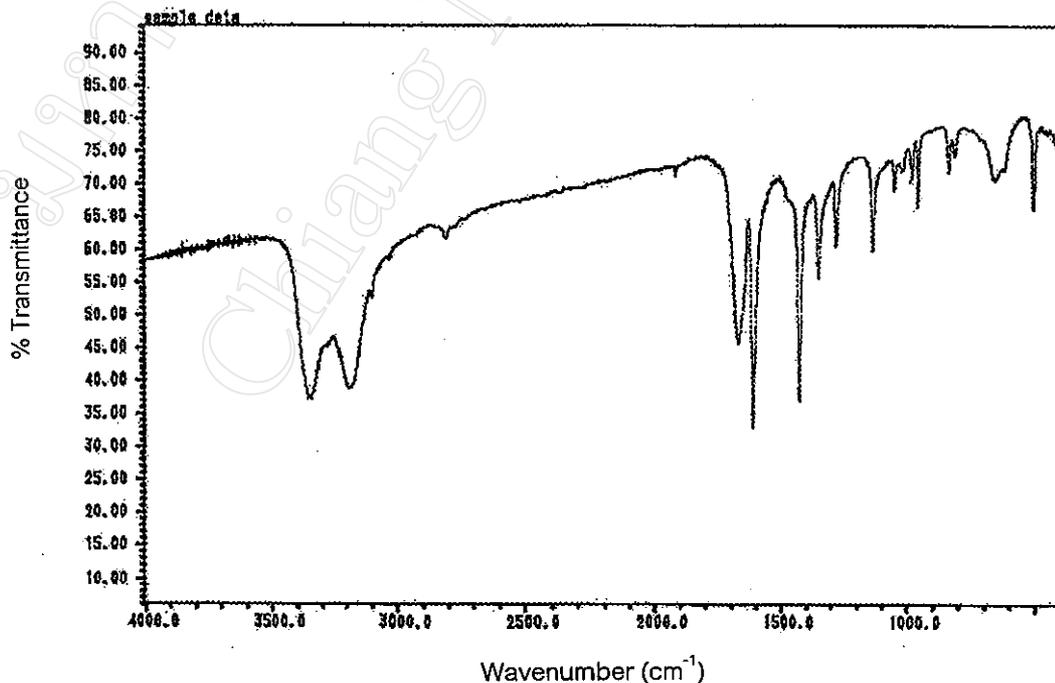
* ความหมายของสัญลักษณ์ของความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม

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

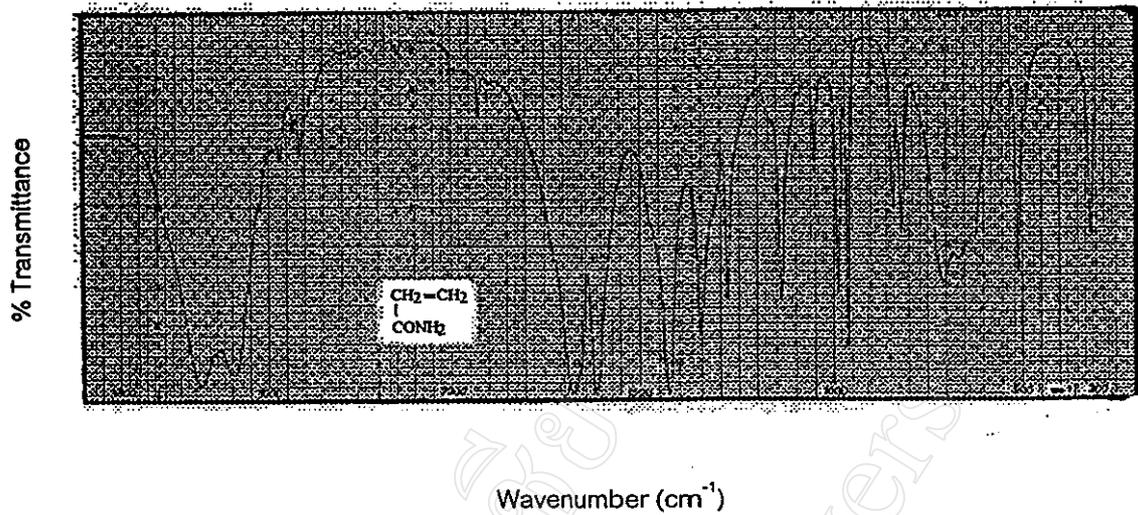
ในงานวิจัยนี้ใช้ Nicolet FT-IR 510 Infrared Spectrometer ในการวิเคราะห์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่าง กล่าวคือ สารตัวอย่างที่เป็นของเหลว ใช้วิธีป้ายบนเคลือบโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ส่วนสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งได้ใช้การเตรียมแบบแผ่น (pellete) โดยใช้เกลือโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ซึ่งมีลักษณะโปร่งแสงและไม่มีการดูดกลืนแสงในช่วงที่วิเคราะห์ สารตัวอย่างจะถูกบดให้เป็นผงละเอียด แล้วอบในตู้อบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 100 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำสารตัวอย่างมาผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้ว ใช้อัตราส่วนของสารตัวอย่างต่อโพแทสเซียมโบรไมด์ ประมาณ 1 : 10 โดยน้ำหนัก แล้วนำของผสมที่ได้ไปอัดให้เป็นแผ่น โดยใช้เครื่องอัดแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ด้วยความดันประมาณ 10 ตัน ประมาณ 1 นาที ได้แผ่นบางสีขาวขุ่นแล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.4.4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตั้งต้น

สารตั้งต้นที่ใช้คือมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มและตัวเชื่อมต่อ ที่ถูกทำให้บริสุทธิ์แล้ว ได้นำมาวิเคราะห์คุณภาพโดยใช้อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี เพื่อศึกษาโครงสร้างและยืนยันความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตั้งต้นต่างๆ ที่ทดลองได้และที่ได้มาจากหนังสืออ้างอิงกับความหมายของอินฟราเรดสเปกตรัม แสดงดังรูป 3.10 – 3.21 และตาราง 3.12 – 3.17 ตามลำดับ



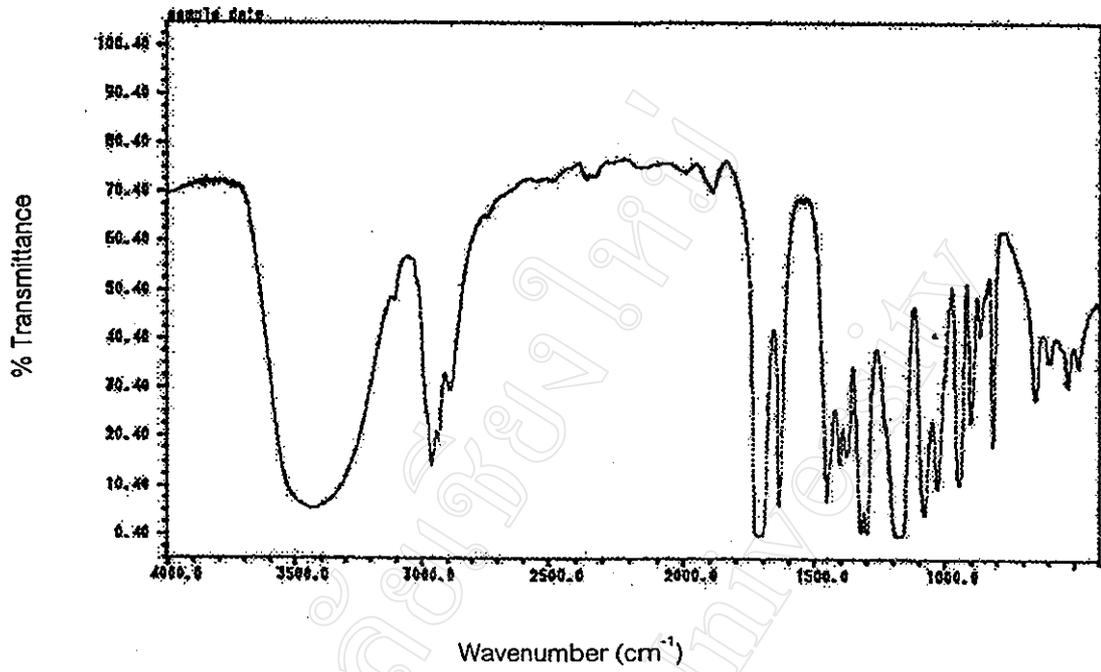
รูป 3.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของอะครีลาไมด์ที่ตกผลึกใหม่



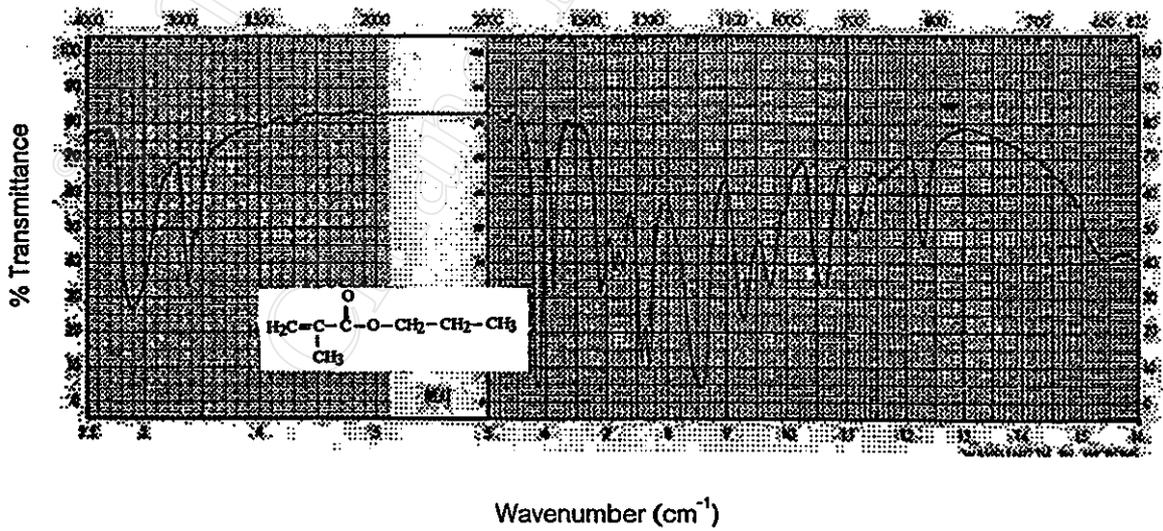
รูป 3.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของอะคริลาไมด์จากหนังสืออ้างอิง [53]

ตาราง 3.12 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของอะคริลาไมด์

ประเภทของกาารสัน	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm ⁻¹)	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
N-H stretching	-CONH ₂	~2.99	~3350	m
		~3.15	~3180	m
C-H stretching	-CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
C=C	Alkane	5.95-6.17	1680-1620	v
C=O stretching	-CONH ₂ (ของแข็ง)	~6.06	~1650	s
C-H bending	-CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
C-H bending	C-H	~7.46	~1340	w



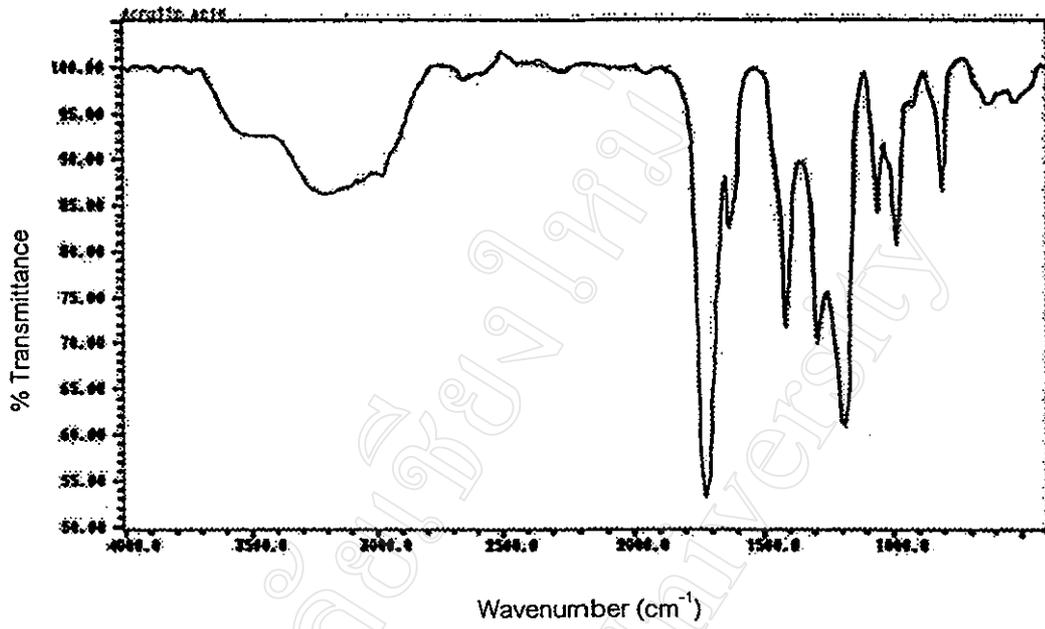
รูป 3.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของฮีมาที่กลั่นได้



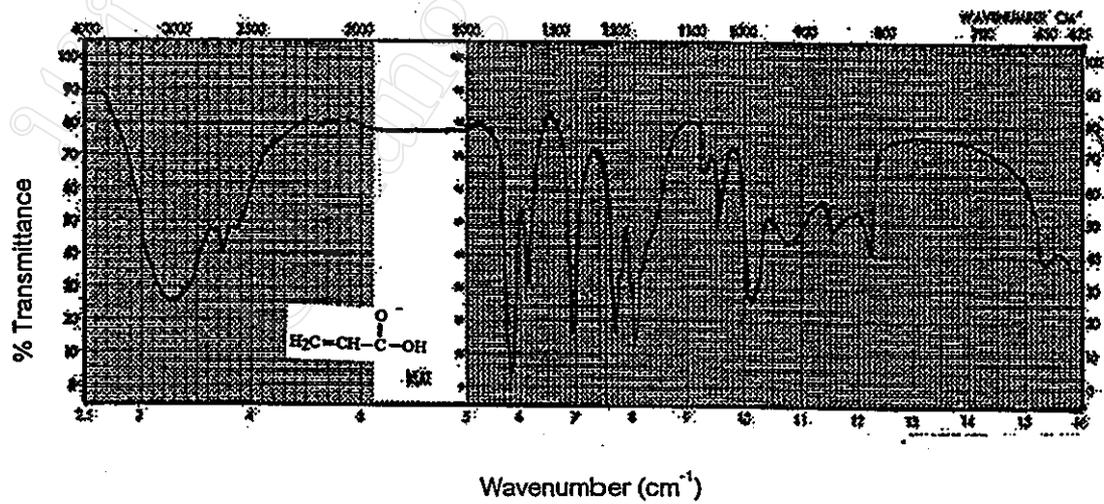
รูป 3.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของฮีมาจากหนังสืออ้างอิง [54]

ตาราง 3.13 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของอีมา

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
O-H stretching	-CH ₂ OH	2.80-2.90	3570-3450	v, sh
C-H stretching	-CH ₃ , -CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
C=O stretching	=CH-CO-O-R	5.17-5.76	1750-1735	s
C=C	Alkane	5.95-6.17	1680-1620	v
C-H bending	-CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
C-H bending	C-H	7.46	~1340	w



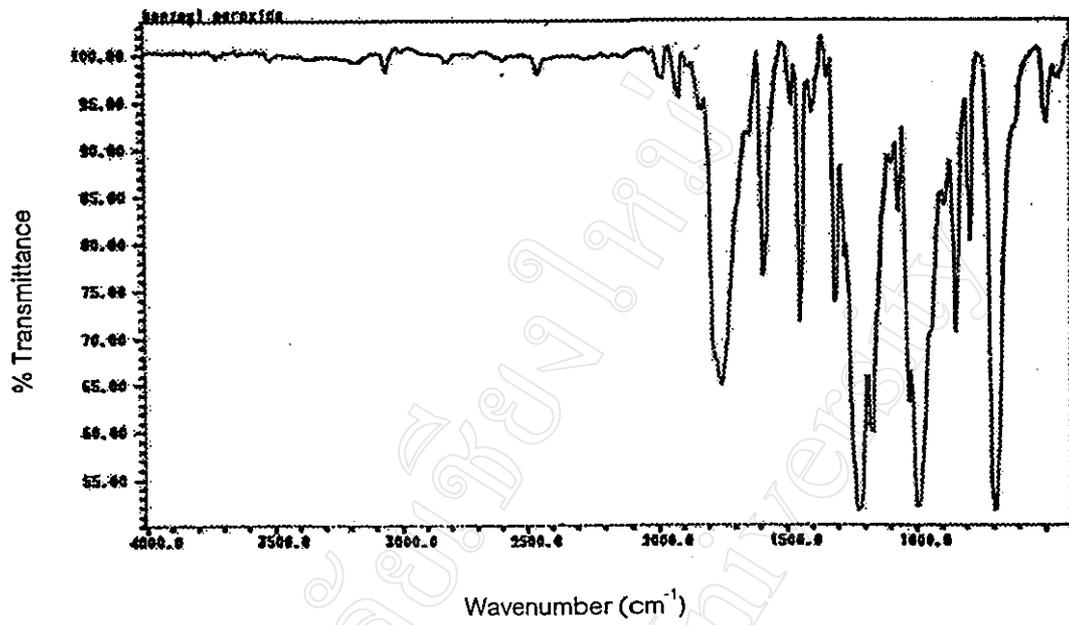
รูป 3.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของอะคริลิกเอซิด



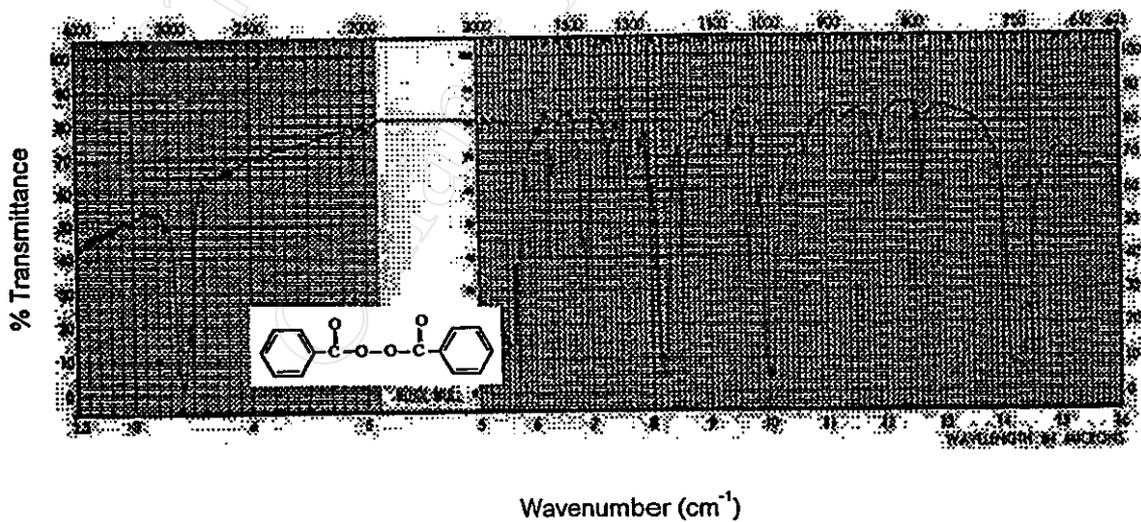
รูป 3.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของอะคริลิกเอซิดจากหนังสืออ้างอิง [54]

ตาราง 3.14 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของอะคริลิกเอไซด์

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
O – H stretching	- COOH	2.80-2.90	3570-3450	v, sh
C – H stretching	- CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
Hydroxyl stretching	- COOH	3.70-4.00	2700-2500	w
C = O stretching	- COOH	5.80-5.88	1725-1700	s
C = C	Alkane	~6.08	~1645	m
C – H bending	- CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
O – H bending และ C – O stretching	- OH bending ใน Carboxylic Acids	6.95-7.17	1440-1395	w
C – H bending	C – H	7.46	~1340	w
O – H bending และ C – O stretching	C – OH stretching ใน Carboxylic Acids	7.58-8.28	1320-1210	s



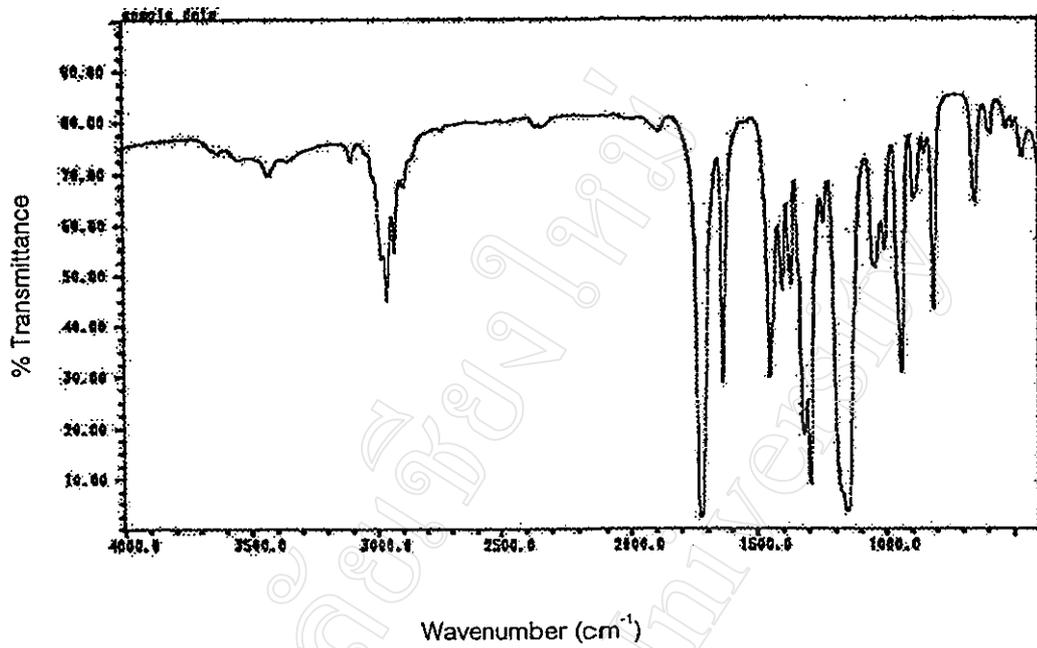
รูป 3.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ตกผลึกใหม่



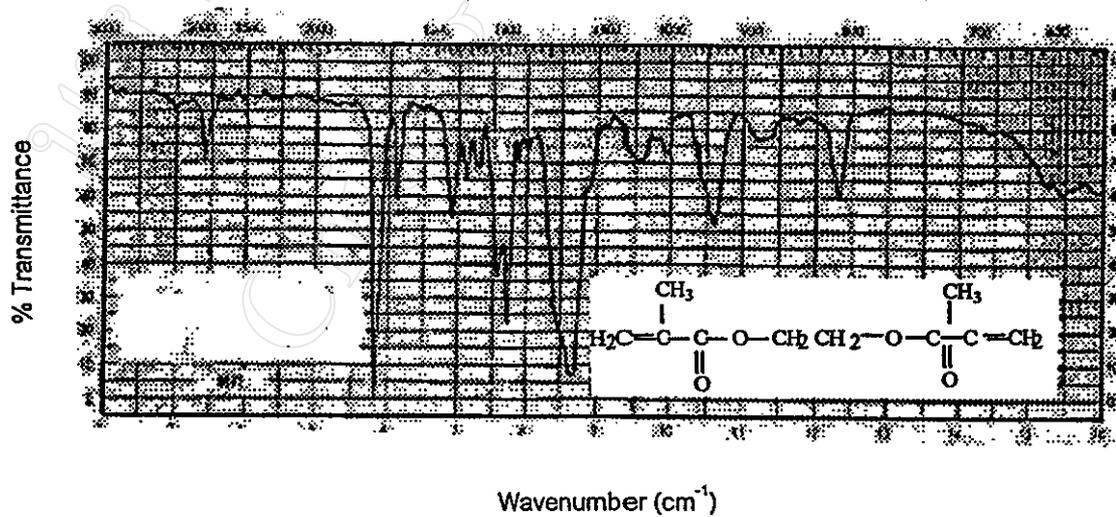
รูป 3.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์จากหนังสืออ้างอิง [54]

ตาราง 3.15 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
C = H stretching	Aromatic	~3.30	~3030	v
C = O stretching	Aromatic	~5.17	~1751	m
C = C stretching	Aromatics	~6.25	~1600	v
		~6.33	~1580	v
		~6.67	~1500	m
		~6.90	~1450	m
C - O stretching		7.4-7.19	1320-1250	v
C - H out of plane bending	Aromatics	~14.3	~700	v,s



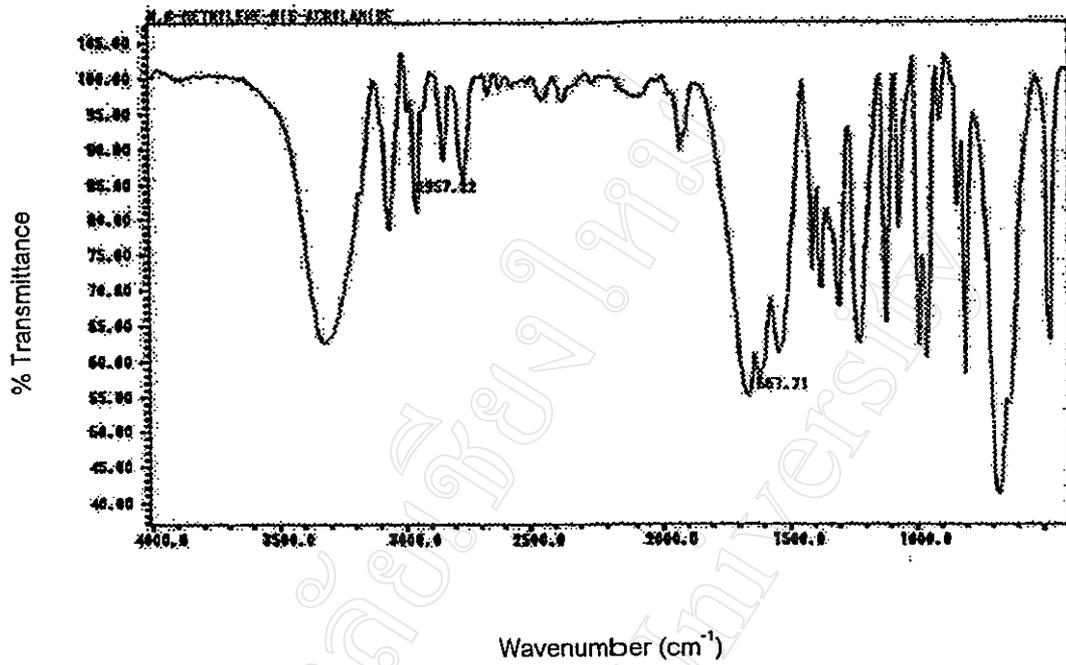
รูป 3.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตที่กลั่นได้



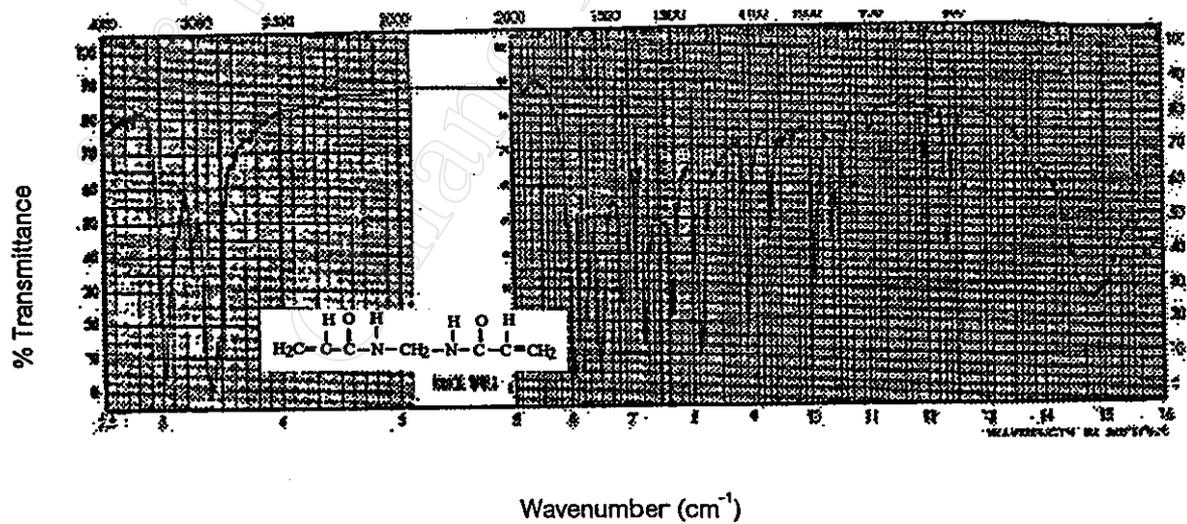
รูป 3.19 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตจากหนังสืออ้างอิง [54]

ตาราง 3.16 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของเอทิลีนไกลคอลไดเมททาคริเลต

ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
C - H stretching	$-\text{CH}_3, -\text{CH}_2$	2.80-2.90	3570-3450	m-s
C = O stretching	$=\text{CH}-\text{CO}-\text{O}-\text{R}$	5.17-5.76	1750-1735	s
C = C stretching	alkane	5.95-6.17	1620-1680	v
C - H bending	$-\text{CH}_2$	6.47-6.92	1485-1445	m
C - O stretching	$-\text{CO}-\text{O}$	~ 7.6	1300	w
C - O stretching	$-\text{CH}_2-\text{O}$	9.1	1150	s



รูป 3.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอ็น,เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ที่ตกผลึกใหม่



รูป 3.21 อินฟราเรดสเปกตรัมของเอ็น,เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์จากหนังสืออ้างอิง [54]

ตาราง 3.17 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของเอ็น,เอ็น-เมทิลีน-บิส-อะคริลาไมด์

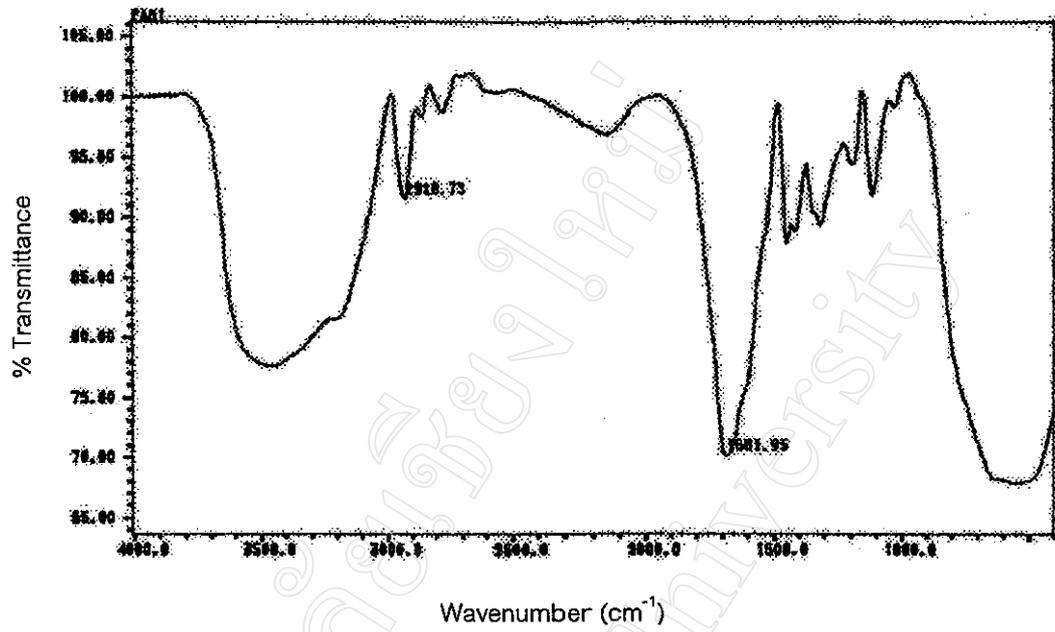
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
N - H stretching	Amide	~2.92	~3430	m
C - H stretching	Alkane	3.23-3.25	3095-3075	m
C - H stretching	vinyl	3.29-3.32	3040-3010	m
C - H stretching	-CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
C = O stretching	Amide	5.80-5.87	1725-1705	s
C = C stretching	Alkene	~6.08	~1645	m
C - H bending	-CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
C - H bending	-CH-	~7.46	~1340	w

3.4.4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

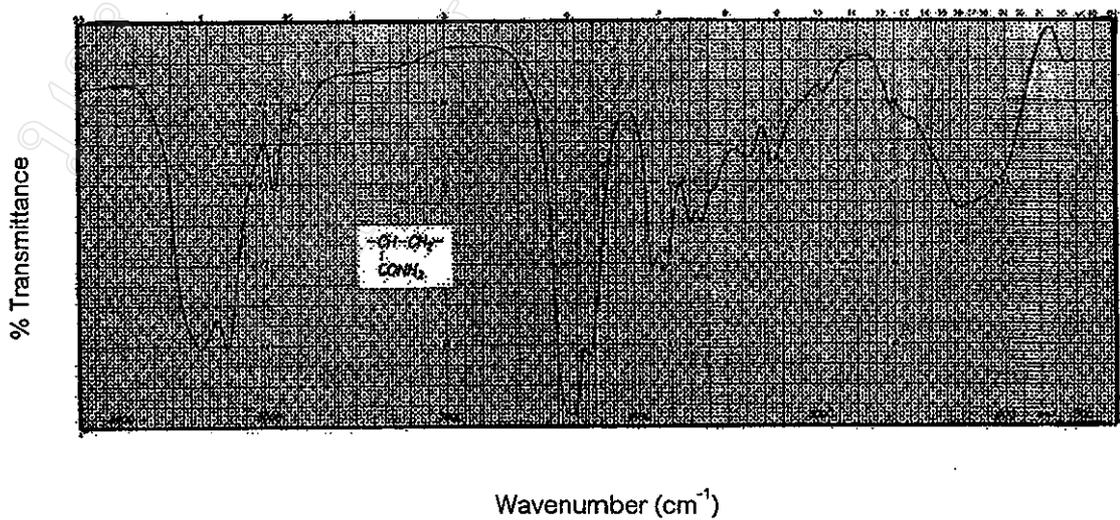
อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และที่ได้จากหนังสืออ้างอิงกับความหมายของอินฟราเรดสเปกตรัม แสดงดังรูป 3.22 – 3.38 และตาราง 3.18 – 3.20 ตามลำดับ

ตาราง 3.18 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิอะคริลาไมด์

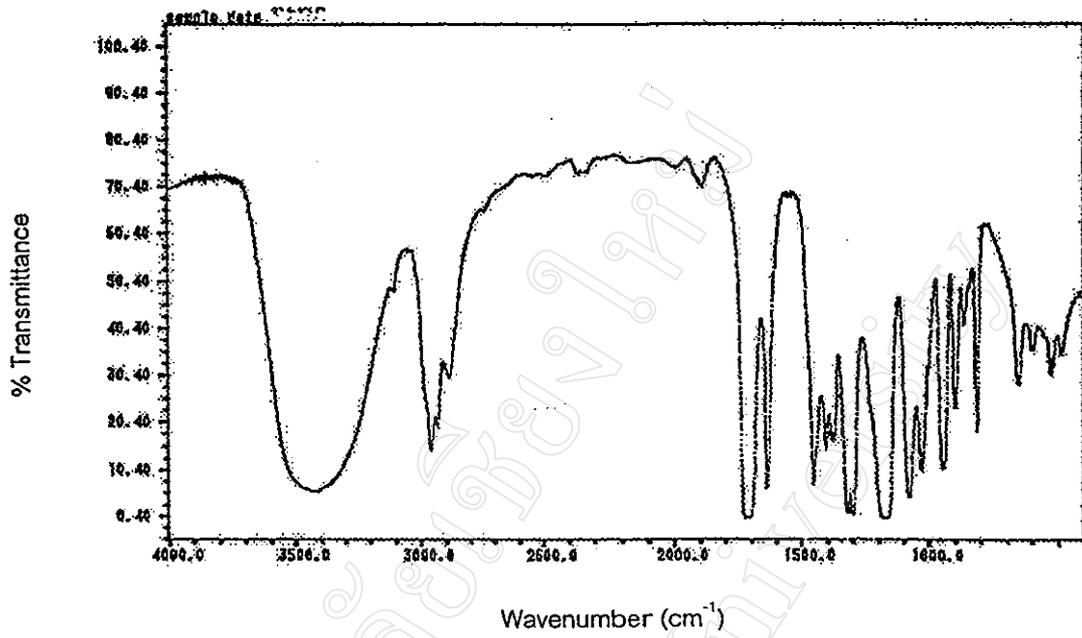
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
N – H stretching	-CONH ₂	~2.99	~3350	m
		~3.15	~3180	m
C – H stretching	-CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
C = O stretching	-CONH ₂ (ของแข็ง)	~6.06	~1650	s
C – H bending	-CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
C – H bending	C - H	7.46	~1340	w



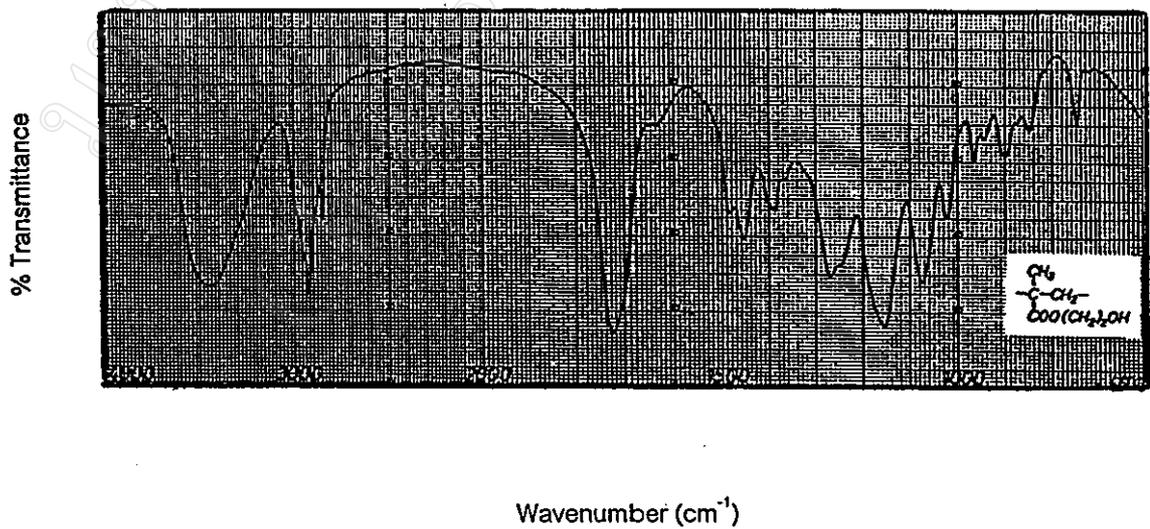
รูป 3.22 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิอะคริลาไมด์ที่สังเคราะห์ได้



รูป 3.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิอะคริลาไมด์จากหนังสืออ้างอิง [53]



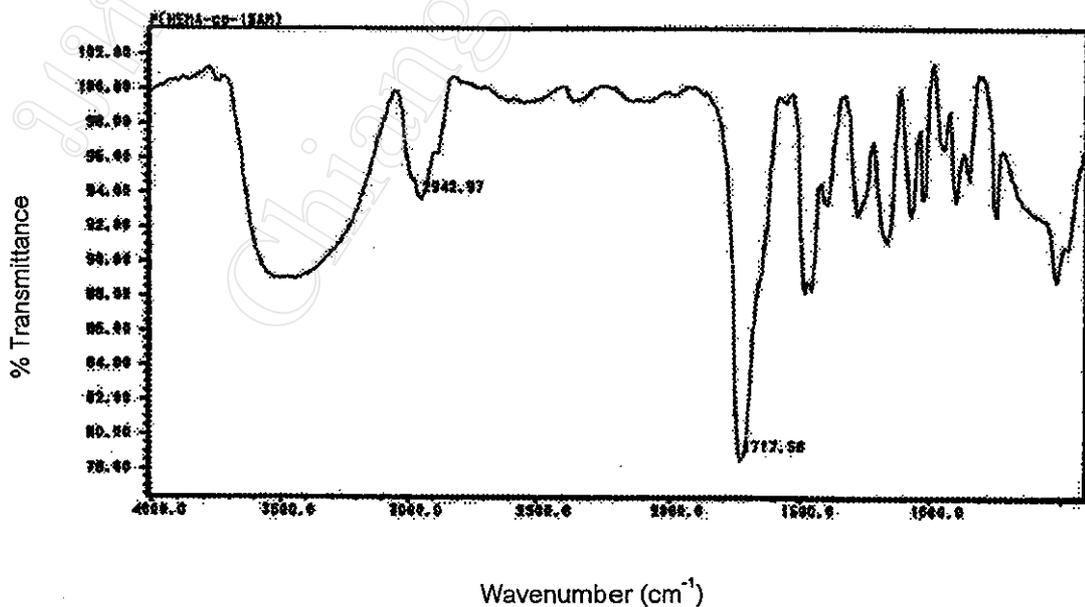
รูป 3.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนที่สังเคราะห์ได้



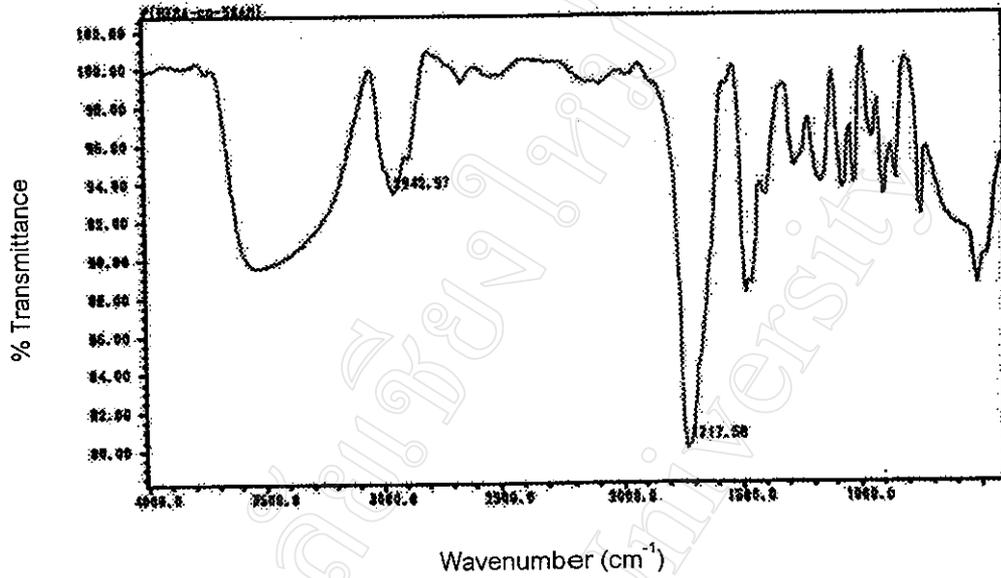
รูป 3.25 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนจากหนังสืออ้างอิง [55]

ตาราง 3.19 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิฮีมา

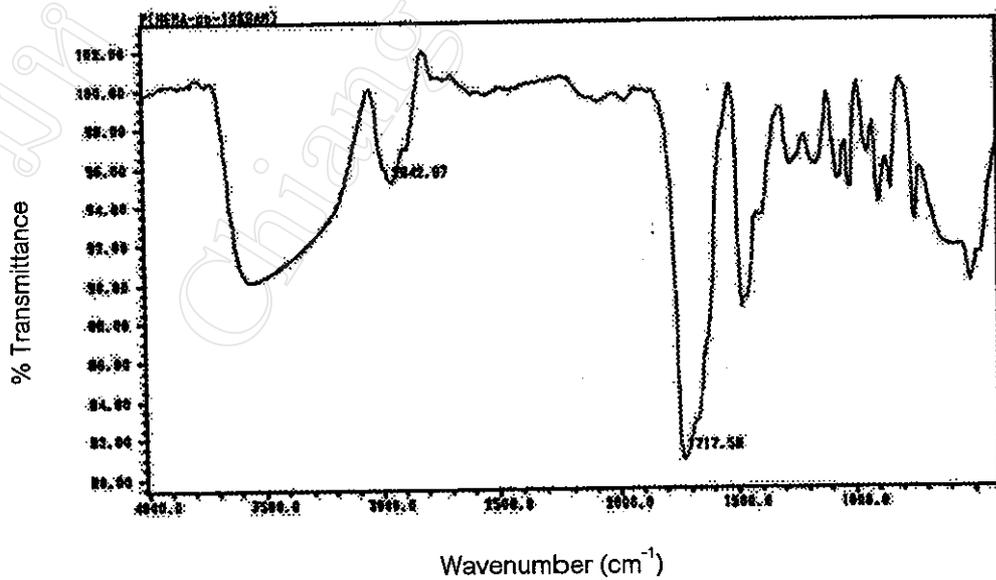
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
O-H stretching	-CH ₂ OH	2.80-2.90	3570-3450	v, sh
C-H stretching	-CH ₃ , -CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
C=O stretching	=CH-CO-O-R	5.17-5.76	1750-1735	s
C-H bending	-CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
C-H bending	C-H	7.46	~1340	w



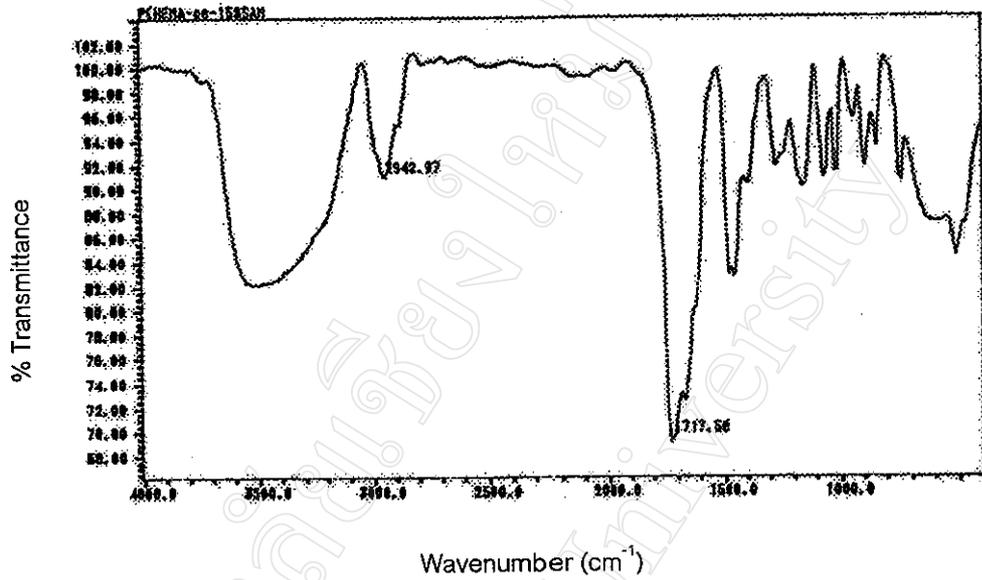
รูป 3.26 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(ฮีมา-โค-1%อะคริลไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



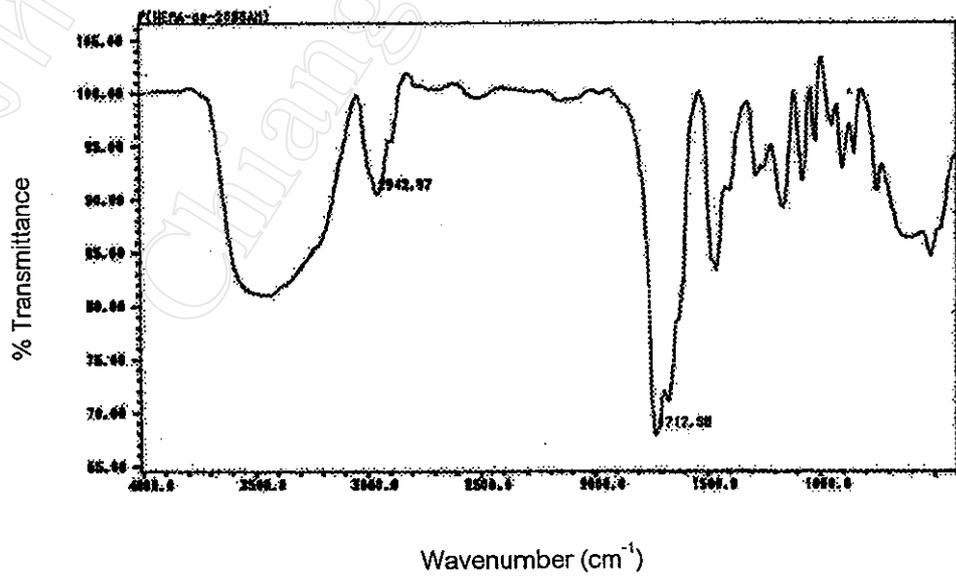
รูป 3.27 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(สตีมา-โค-5%อะครีลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



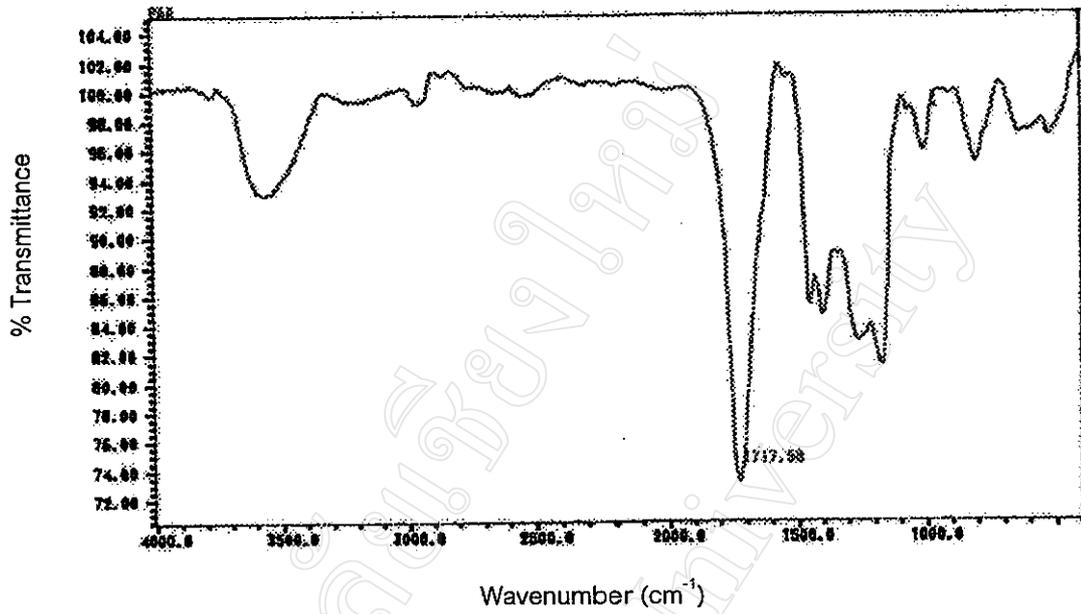
รูป 3.28 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(สตีมา-โค-10%อะครีลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



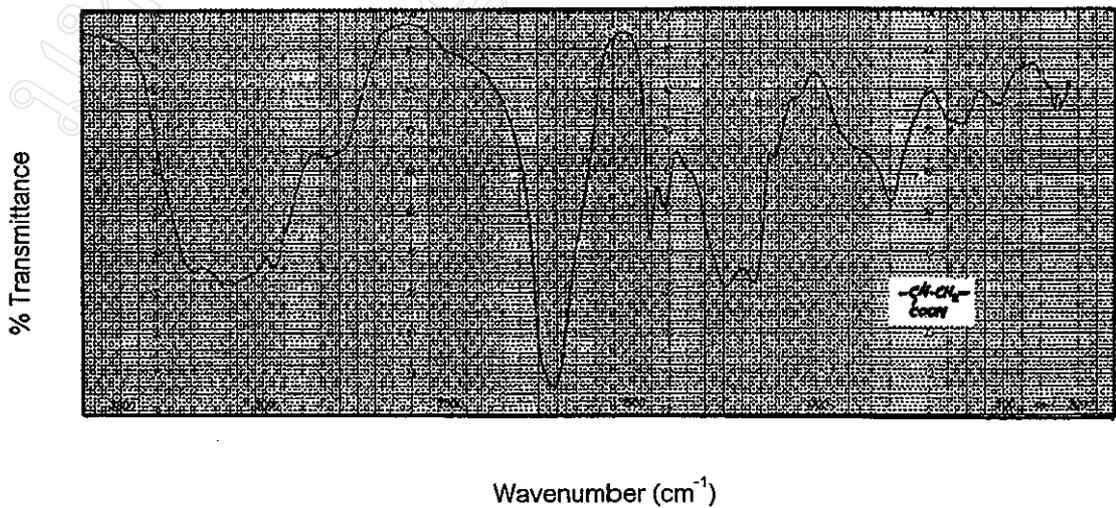
รูป 3.29 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(ีสีมา-โค-15%อะครีลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



รูป 3.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(ีสีมา-โค-20%อะครีลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



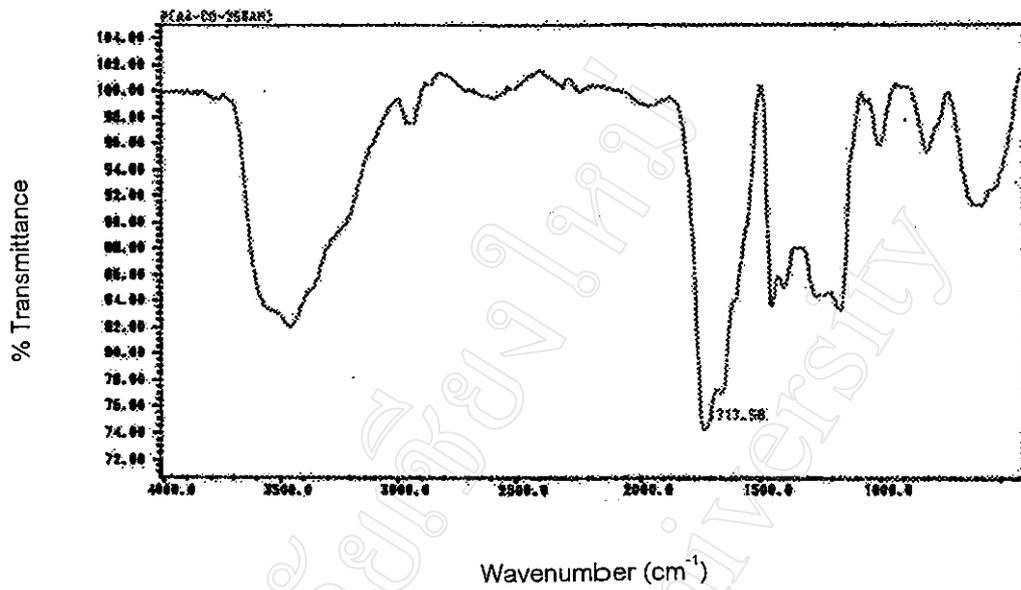
รูป 3.31 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิอะคริลิกเอซิดที่สังเคราะห์ได้



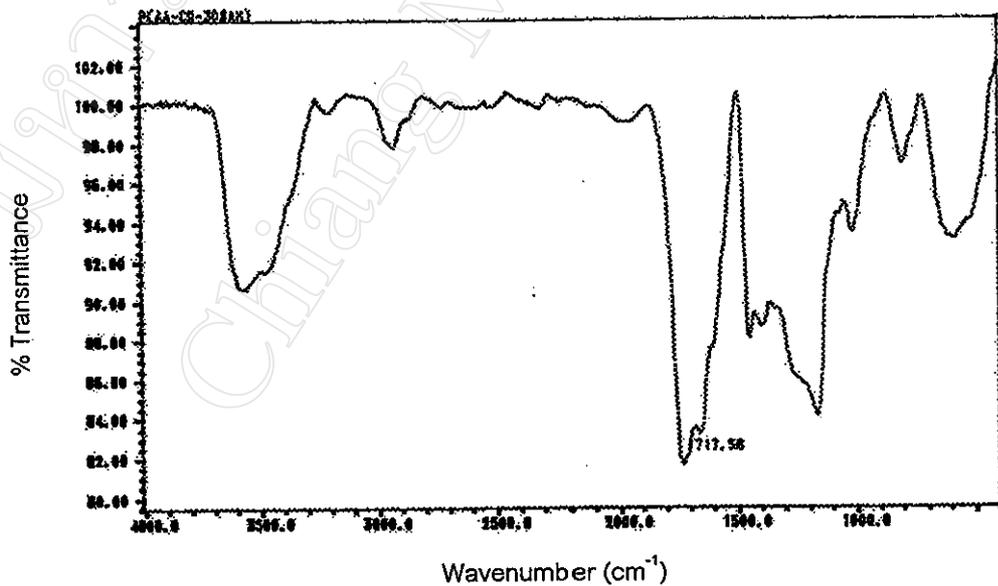
รูป 3.32 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิอะคริลิกเอซิดจากหนังสืออ้างอิง [55]

ตาราง 3.20 ความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิอะคริลิกเอซิด

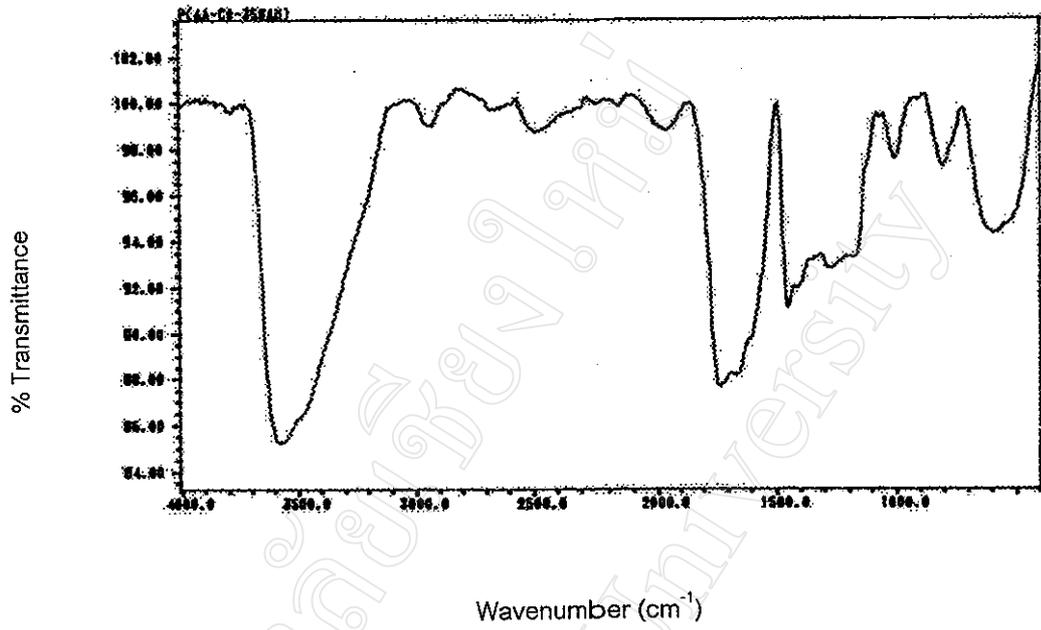
ประเภทของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่น (μm)	ความถี่ (cm^{-1})	ความเข้มและลักษณะของสเปกตรัม
O-H stretching	-COOH	2.80-2.90	3570-3450	v, sh
C-H stretching	-CH ₂ -	3.38-3.51	2962-2853	m-s
Hydroxy stretching	-COOH	3.70-4.00	2700-2500	w
C=O stretching	-COOH	5.80-5.88	1725-1700	s
C-H bending	-CH ₂ -	6.47-6.92	1485-1445	m
O-H bending และ C-O stretching	-OH bending ใน Carboxylic Acids	6.95-7.17	1440-1395	w
C-H bending	C-H	7.46	~1340	w
O-H bending และ C-O stretching	C-OH stretching ใน Carboxylic Acids	7.58-8.28	1320-1210	s



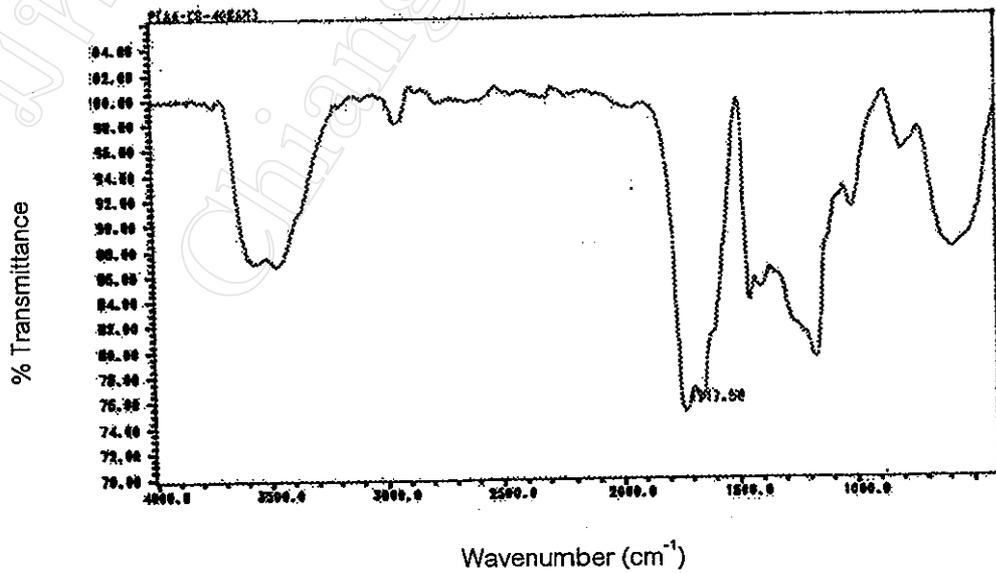
รูป 3.33 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-25%อะคริลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



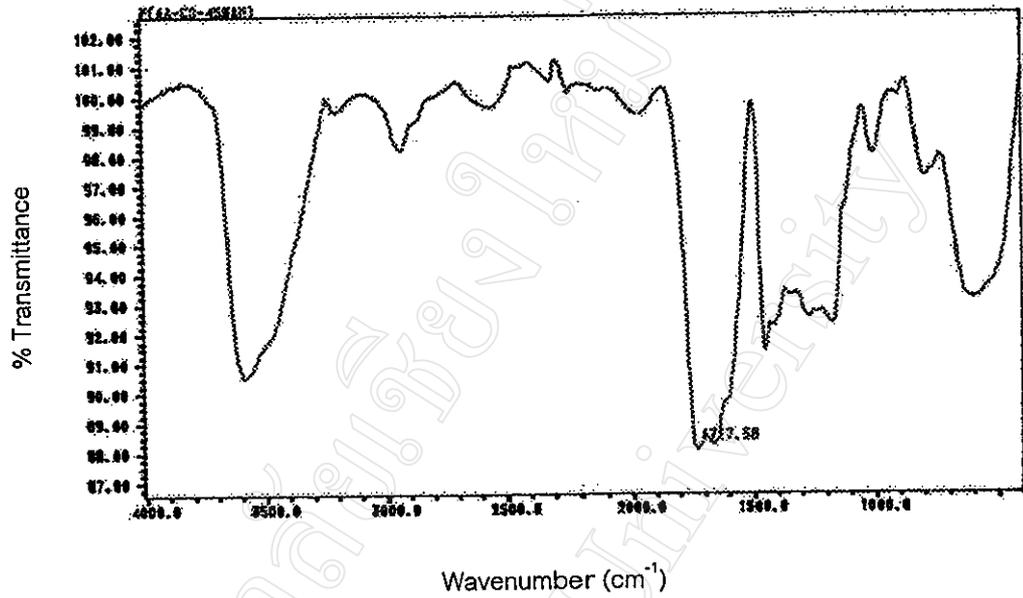
รูป 3.34 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-30%อะคริลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



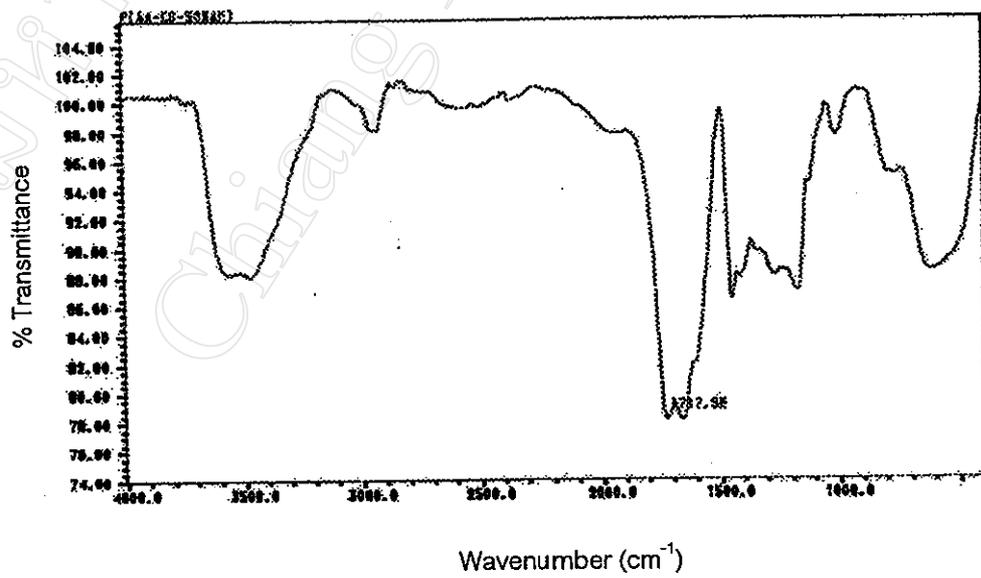
รูป 3.35 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-35%อะคริลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



รูป 3.36 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-40%อะคริลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



รูป 3.37 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(อะคริลิกเอไซด์-โค-45%อะคริลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้



รูป 3.38 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิ(อะคริลิกเอไซด์-โค-50%อะคริลาไมด์)ที่สังเคราะห์ได้

เมื่อเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของสารตั้งต้นที่ใช้ในการพอลิเมอไรซ์ และพอลิเมอร์ต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้ กับอินฟราเรดสเปกตรัมจากหนังสืออ้างอิง พบว่ามีสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ เหมือนกัน จึงสรุปได้ว่า สารตั้งต้นที่ใช้มีความบริสุทธิ์ ปราศจากสิ่งเจือปน และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ เป็นพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ จริง และเมื่อเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิอะคริลาไมด์ กับพอลิฮีมาและพอลิอะคริลิคเอซิด ในรูป 3.22 3.25 และ 3.31 จะเห็นว่า มีสัญญาณที่คล้ายกัน ยกเว้น -NH – stretching ที่ตำแหน่ง 3350 และ 3180 cm^{-1} ที่พบในพอลิอะคริลาไมด์ และ -OH stretching ที่ตำแหน่ง 3570 – 3450 cm^{-1} ที่พบในพอลิฮีมาและพอลิอะคริลิคเอซิด เท่านั้น

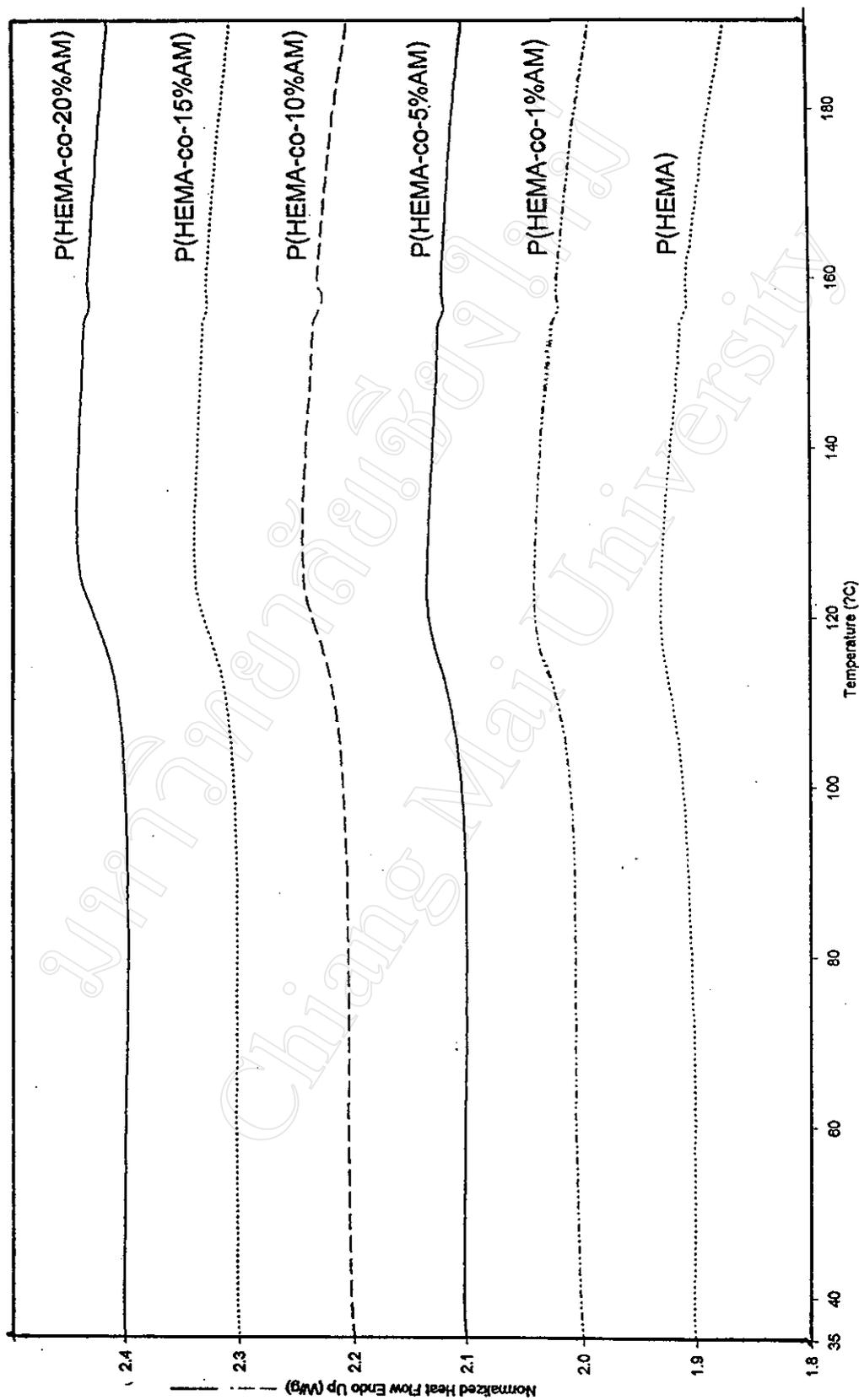
3.4.5 การวิเคราะห์ทางความร้อน [55-57]

ICTA (The International Confederation for Thermal Analysis) ได้ให้คำจำกัดความของการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ไว้ว่าเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสาร และ/หรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสารต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารมีหลายเทคนิค เช่น ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอะนาไลซิส (Differential Thermal Analysis, DTA) และเทอร์มอลกราวิเมตรี (Thermalgravimetry, TG) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค DSC และ TG ในการหาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่เตรียมได้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

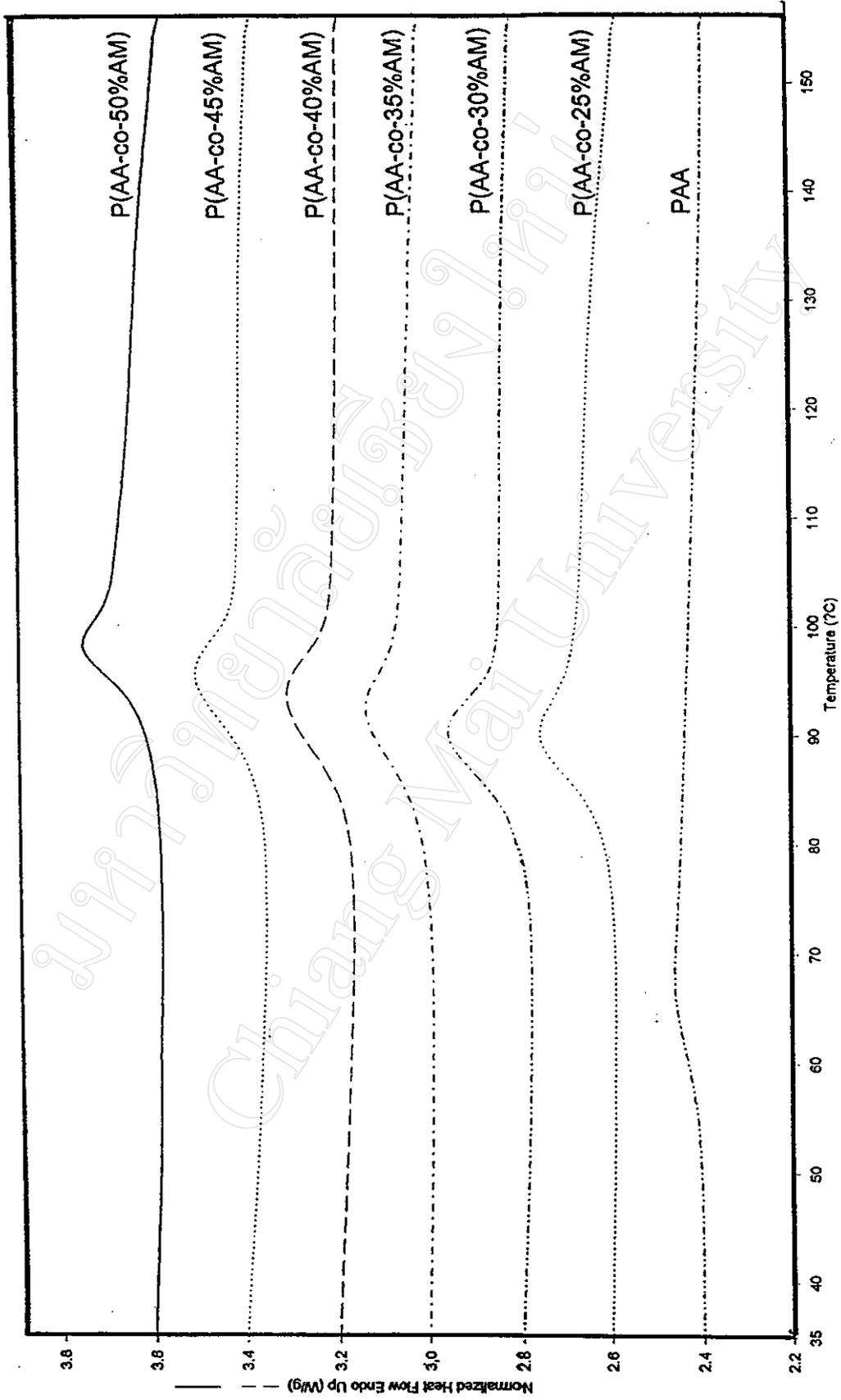
3.4.5.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี

DSC เป็นเทคนิคที่ใช้วัดปริมาณพลังงานความร้อนที่สารได้รับหรือปลดปล่อยออกมา เปรียบเทียบกับสารอ้างอิงที่เฉื่อยต่อความร้อน เมื่อให้หรือดึงความร้อนออกจากระบบ หรือคงไว้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ DSC มีประโยชน์มากในการใช้ศึกษาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) จุดหลอมเหลวและความร้อนของการหลอมเหลว ดัชนีของผลึก จลนศาสตร์ของการเกิดผลึก จลนศาสตร์ของการเกิดร่างแห ความบริสุทธิ์ของมอนอเมอร์ การสลายตัวโดยความร้อน สัดส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ อัดแน่นและความร้อนของการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ เป็นต้น

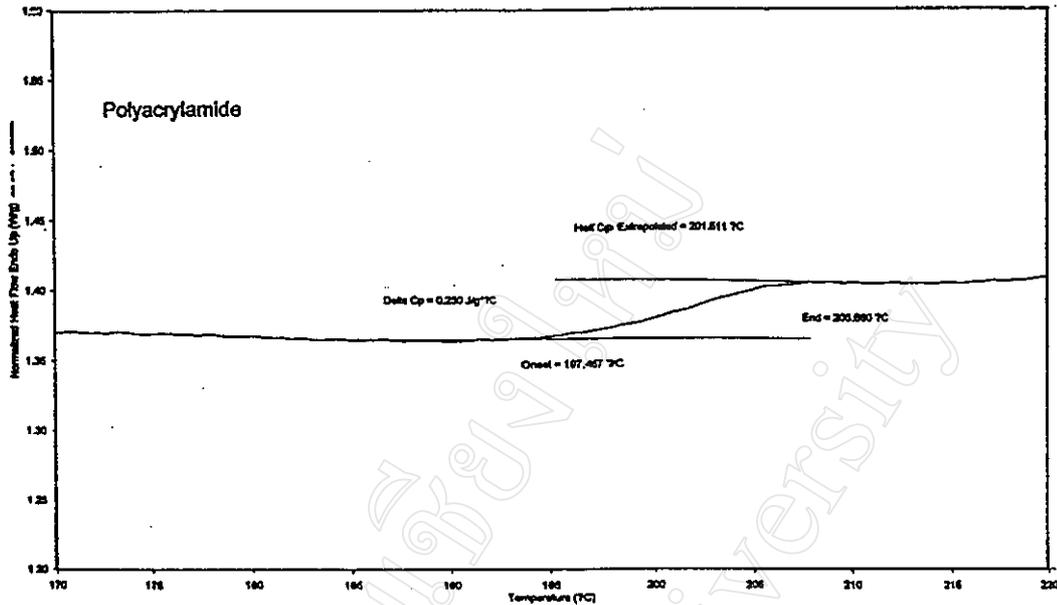
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Perkin-Elmer DSC7 Differential Scanning Calorimeter ในการวิเคราะห์ ซึ่งก่อนที่จะวิเคราะห์ ได้นำพอลิเมอร์ตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 110°C ในตู้อบสูญญากาศ แล้วนำมาบดให้เป็นผงละเอียด จากนั้นนำไปอบอีกครั้งหนึ่ง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ นำสารตัวอย่างที่แห้งแล้วนี้ ประมาณ 3 - 5 มิลลิกรัม ใส่ลงในภาชนะที่เป็นอะลูมิเนียม ทำการปิดผนึก แล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ในช่วงอุณหภูมิ 30– 250°C ลักษณะของ DSC เทอร์โมแกรมของพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) พอลิ(อะคริลิกเอไซด์-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิอะคริลาไมด์ ที่เตรียมได้แสดงดังรูป 3.39 - 3.41 ตามลำดับ



รูป 3.39 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน



รูป 3.40 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิอะคริลิควะคริลิคเอซิดและพอลิ(อะคริลิควะคริลิคเอซิด-โค-อะคริลิควะคริลิคเอซิด) ที่มีปริมาณอะคริลิควะคริลิคเอซิดต่างกัน



รูป 3.41 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิอะคริลาไมด์ที่เตรียมได้

ฟอกซ์ (Fox) ได้แสดงสมการการหาค่า T_g ของโคพอลิเมอร์จากค่า T_g ของโฮโมพอลิเมอร์ และสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ ที่เป็นส่วนประกอบดังสมการ (6) [58]

$$\frac{1}{T_{gP}} = \frac{W_A}{T_{gA}} + \frac{W_B}{T_{gB}} \quad (6)$$

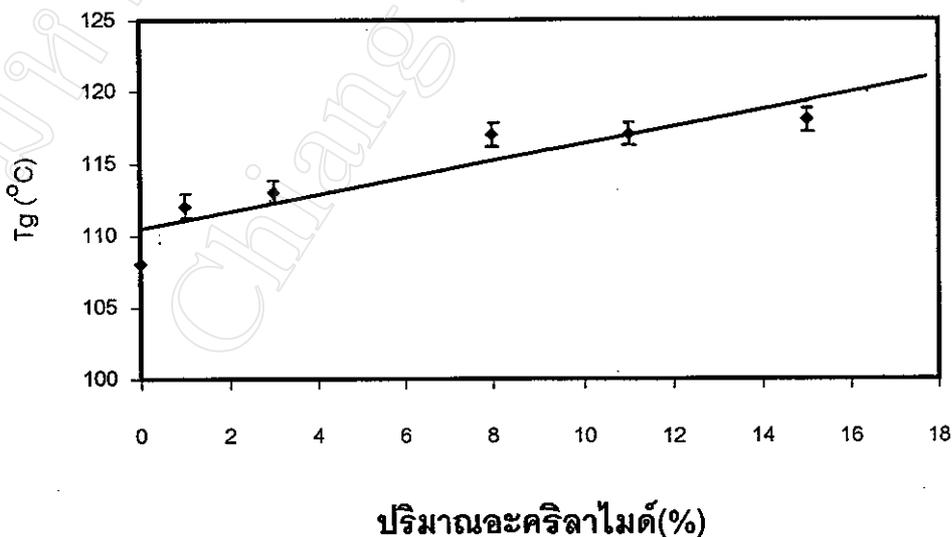
- เมื่อ T_{gP} = อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของโคพอลิเมอร์
 W_A และ W_B = สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของมอนอเมอร์ A และ B ตามลำดับ
 T_{gA} และ T_{gB} = อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของโฮโมพอลิเมอร์ A และ B ตามลำดับ

ค่า T_g ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้สมการของฟอกซ์ของพอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับพอลิอะคริลิกเอซิดและพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างกัน โดยอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ แสดงดังตาราง 3.21 และ 3.22 ตามลำดับ

ตาราง 3.21 ค่า T_g ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้สมการของฟอกซ์ของพอลิ-ฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณของอะคริลาไมด์ที่แตกต่างกัน

พอลิเมอร์	ค่า T_g ($^{\circ}\text{C}$)	
	จากการทดลอง	จากการคำนวณ
PHEMA	108 ± 1	108 ± 1
P(HEMA-co-1%AM)	112 ± 1	109 ± 0.2
P(HEMA-co-5%AM)	113 ± 1	110 ± 0.4
P(HEMA-co-10%AM)	117 ± 1	114 ± 0.9
P(HEMA-co-15%AM)	117 ± 1	116 ± 1
P(HEMA-co-20%AM)	118 ± 1	120 ± 0.4
PAM	201 ± 1	201 ± 1

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ กับค่า T_g ที่หาได้จากการทดลอง แสดงดังรูป 3.42



รูป 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับค่า T_g ที่หาได้จากการทดลอง

จากรูป 3.42 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาณอะคริลาไมด์ ในพอลิ(ซีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับค่า T_g ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (7)

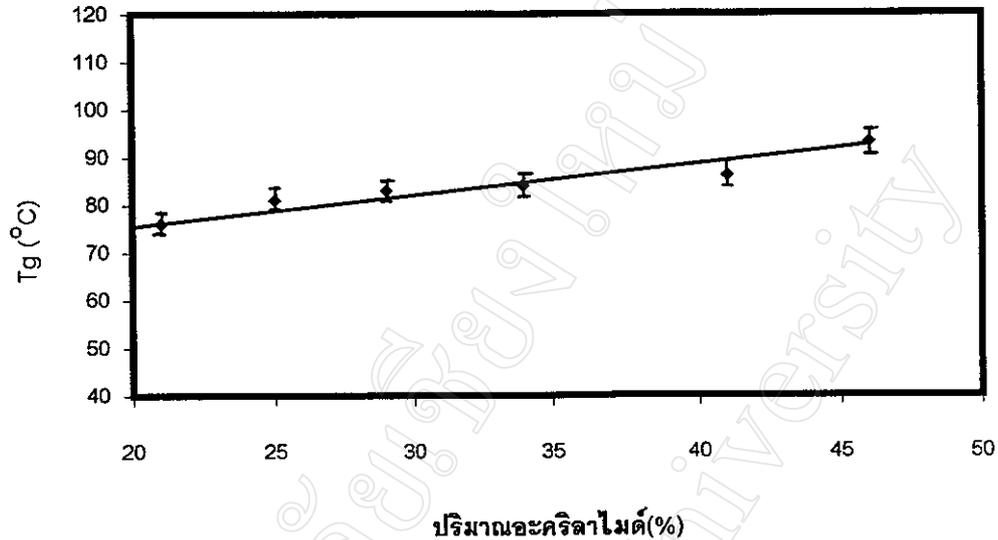
$$T_g = (0.55 \pm 0.18)Am + (110 \pm 1) \quad (7)$$

เมื่อ T_g = อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ($^{\circ}\text{C}$)
 Am = เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

ตาราง 3.22 ค่า T_g ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยสมการของฟอกซ์ของพอลิ-อะคริลิกเอซิดและพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณของอะคริลาไมด์ที่แตกต่างกัน

พอลิเมอร์	ค่า T_g ($^{\circ}\text{C}$)	
	จากการทดลอง	จากการคำนวณ
PAA	61 ± 1	61 ± 1
P(AA-co-25%AM)	76 ± 1	83 ± 2
P(AA-co-30%AM)	81 ± 1	88 ± 1
P(AA-co-35%AM)	83 ± 1	92 ± 1
P(AA-co-40%AM)	84 ± 1	98 ± 2
P(AA-co-45%AM)	86 ± 1	107 ± 3
P(AA-co-50%AM)	93 ± 1	114 ± 2
PAM	201 ± 1	201 ± 1

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ กับค่า T_g ที่หาได้จากการทดลอง แสดงดังรูป 3.43



รูป 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะครีลาไมด์ในพอลิ(อะครีลิกเอไซด์-โค-อะครีลาไมด์) กับค่า T_g ที่หาได้จากการทดลอง

จากรูป 3.43 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะครีลาไมด์ ในพอลิ(อะครีลิกเอไซด์-โค-อะครีลาไมด์) กับค่า T_g ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (8)

$$T_g = (0.65 \pm 0.04)A_m + (62 \pm 2) \quad (8)$$

เมื่อ T_g = อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ($^{\circ}\text{C}$)
 A_m = เปอร์เซ็นต์ของอะครีลาไมด์ โดยน้ำหนัก

จาก DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ต่างๆ ที่เตรียมได้ ดังรูป 3.39 – 3.41 จะเห็นว่า ค่า T_g ของพอลิอะครีลาไมด์ และพอลิฮีมาที่หาได้ สูงกว่าค่าที่ได้จากหนังสืออ้างอิง เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์ มีการเติมตัวเชื่อมต่อไป เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่พอลิเมอร์ ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ เกิดการเคลื่อนที่ ส่งผลให้ค่า T_g ที่ทดลองได้สูงกว่าค่าที่ได้

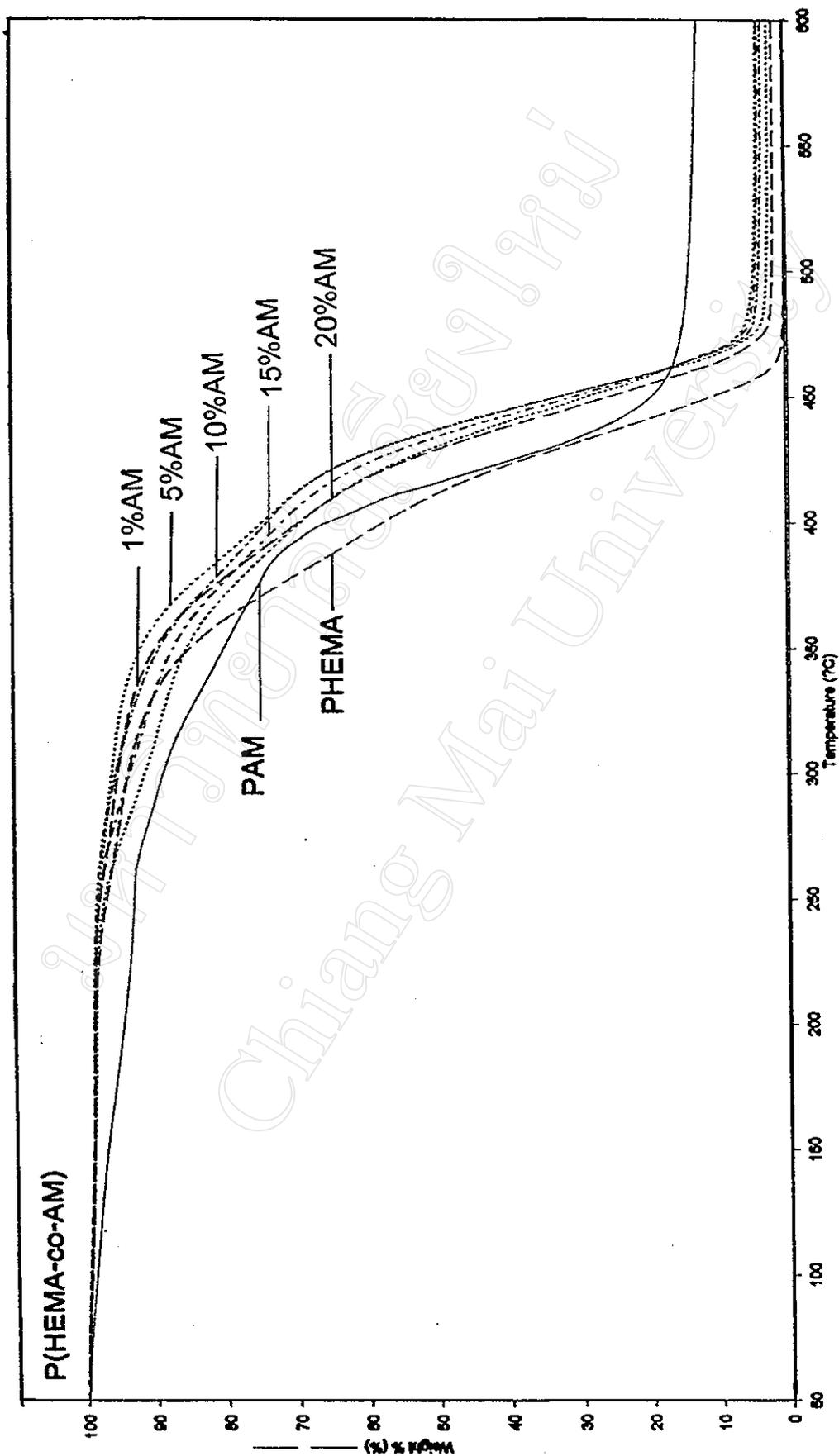
จากหนังสืออ้างอิง ส่วนพอลิอะคริลิกเอสติด มีค่า T_g ที่ได้จากทดลองต่ำกว่าค่าในหนังสืออ้างอิงมาก เนื่องจากในกระบวนการพอลิเมอไรซ์ ไม่มีการแยกเอาตัวยับยั้งปฏิกิริยาออก อาจทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ส่งผลให้ ค่า T_g ที่ได้ ต่ำกว่าค่าที่ได้จากหนังสืออ้างอิง

เมื่อเพิ่มปริมาณอะคริลาไมด์ ทั้งในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และในพอลิ(อะคริลิกเอสติด-โค-อะคริลาไมด์) พบว่าจะทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่า T_g ที่คำนวณได้จากสมการของฟอกซ์ ที่ได้แสดงค่าการคำนวณไว้ในตาราง 3.21 และ 3.22

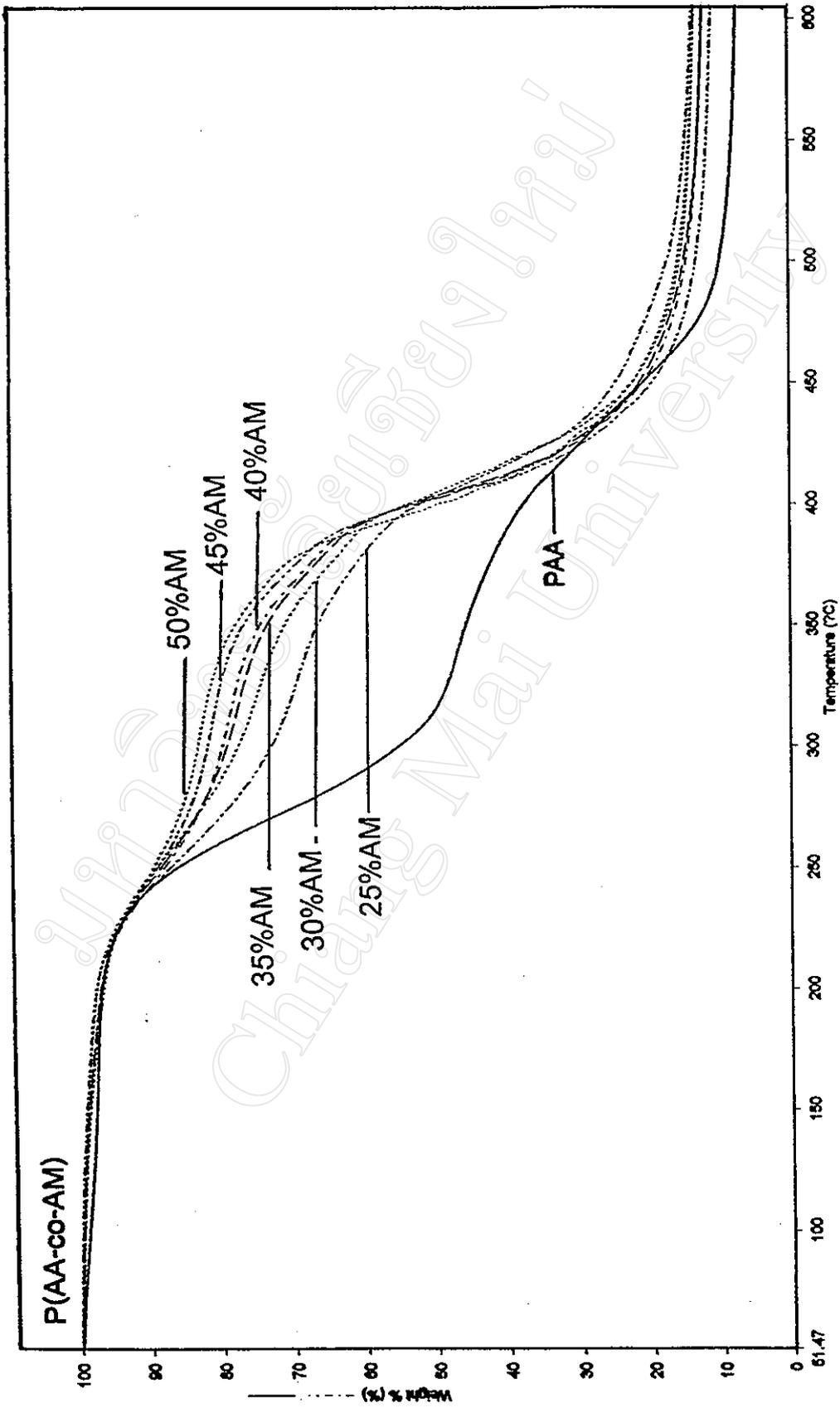
3.4.5.2 เทอร์โมกราวิเมตรี

TG เป็นเทคนิคที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของสารตัวอย่าง เมื่อทำการให้หรือดึงความร้อนออกจากระบบ หรือคงไว้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ สามารถนำมาใช้ศึกษาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ต่างๆได้ เช่น ปริมาณน้ำหรือปริมาณสารต่างๆที่ระเหยออกมาจากพอลิเมอร์ ปริมาณของสารต่างๆที่ถูกเติมลงไป (filler หรือ additive) สัดส่วนของพอลิเมอร์โบลนด์ อุณหภูมิ การสลายตัว และจลนศาสตร์ของการสลายตัว เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ใช้ Perkin-Elmer TGA7 Thermogravimetric Analyzer ในการวิเคราะห์โดยทำการเตรียมตัวอย่างเหมือนกับการวิเคราะห์ DSC แต่ใช้สารตัวอย่าง 3-10 มิลลิกรัม อัตราการให้ความร้อน $20^{\circ}\text{C} / \text{นาที}$ ในช่วงอุณหภูมิ $50-600^{\circ}\text{C}$ ลักษณะของ TG เทอร์โมแกรมของพอลิ (ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอสติด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ตอนเริ่มต้น (monomer feed) ต่างๆ กัน แสดงดัง รูป 3.44 และ 3.45 ตามลำดับ



รูป 3.44 TG เทอร์โมแกรมของพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน



รูป 3.45 TG เทอร์โมแกรมของพอลิ(อะคริลิคเอทิลด-โค-อะคริลไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลไมด์ต่างๆ กัน

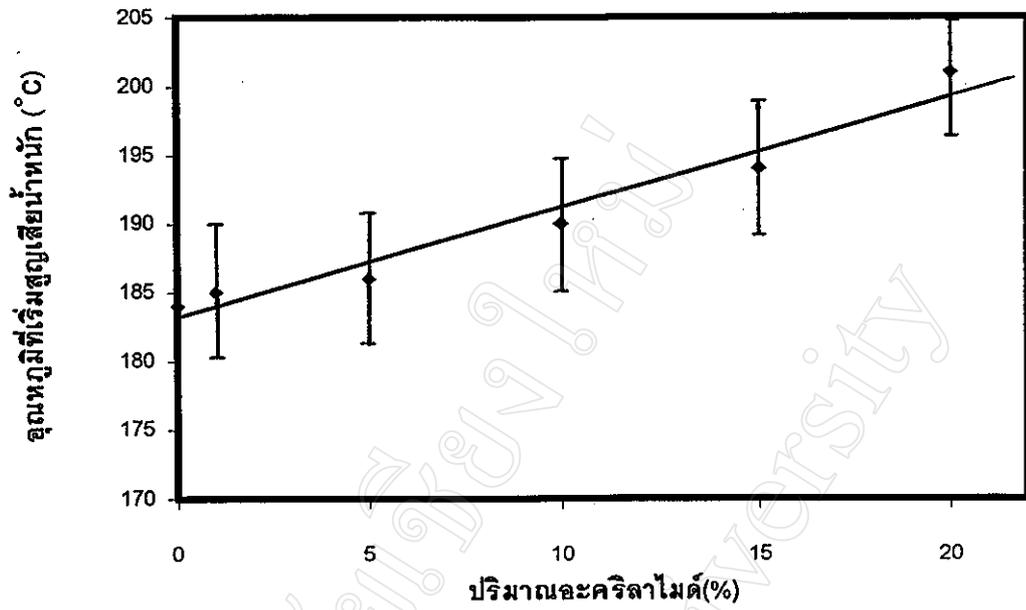
สำหรับช่วงอุณหภูมิที่พอลิเมอร์มีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ของพอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดัง ตาราง 3.23 และอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ของกับพอลิอะคริลิคเอซิดและพอลิ(อะคริลิคเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดัง ตาราง 3.24

ตาราง 3.23 ช่วงอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ของพอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์)

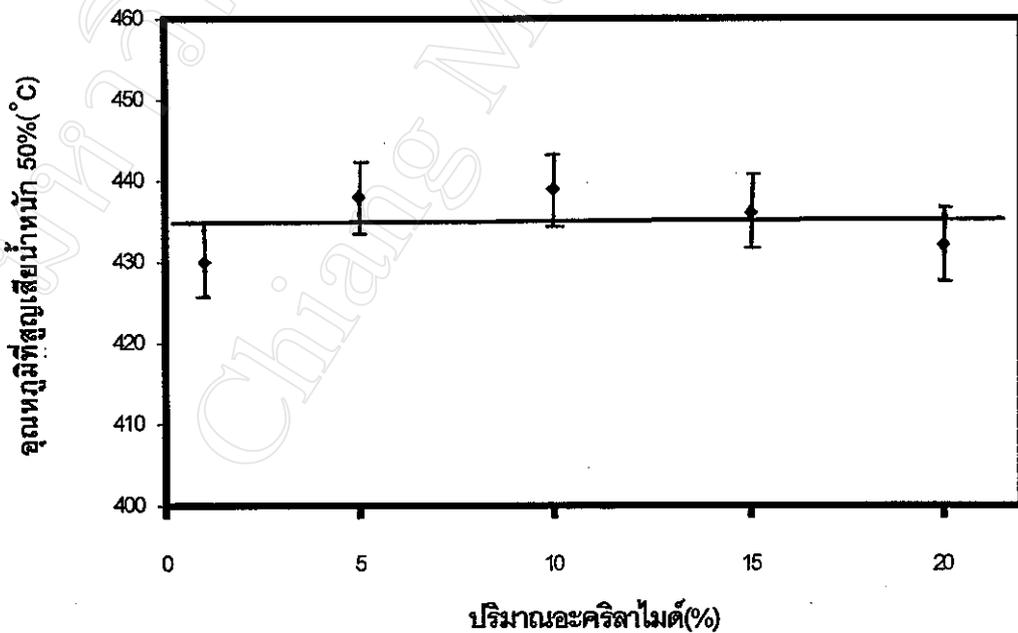
พอลิเมอร์	ช่วงอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)
PHEMA	184 – 511	413
P(HEMA-co-1%AM)	185 – 517	430
P(HEMA-co-5%AM)	186 – 518	438
P(HEMA-co-10%AM)	190 – 528	439
P(HEMA-co-15%AM)	194 – 532	436
P(HEMA-co-20%AM)	201 – 545	432
PAM	253 – 600	417

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ตอนเริ่มต้น (monomer feed) กับอุณหภูมิเริ่มต้นที่มีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% แสดงดังรูป 3.46 และ 3.47 ตามลำดับ

และจากรูป 3.46 และ 3.47 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับอุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนัก 50% ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ



รูป 3.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(สตีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับอุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก



รูป 3.47 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(สตีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50%

$$T_i = (0.80 \pm 0.3)A_m + (183 \pm 5) \quad (9)$$

เมื่อ $T_i =$ อุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก ($^{\circ}\text{C}$)
 $A_m =$ ปริมาณอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

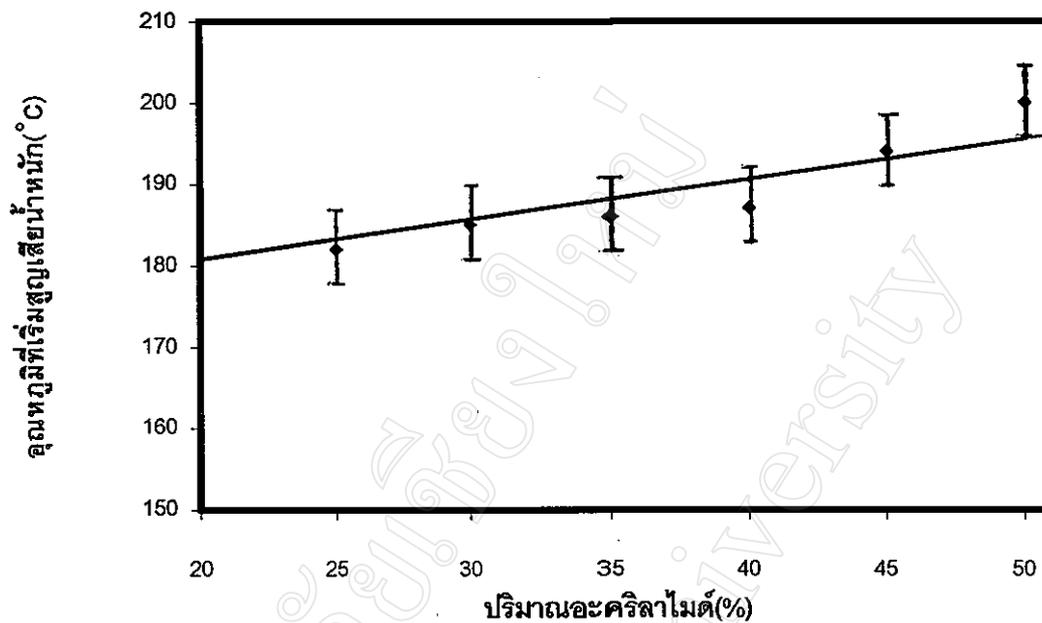
และ $T_{50\%} = (0.02 \pm 0.25)A_m + (435 \pm 5) \quad (10)$

เมื่อ $T_{50\%} =$ อุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ($^{\circ}\text{C}$)
 $A_m =$ ปริมาณอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

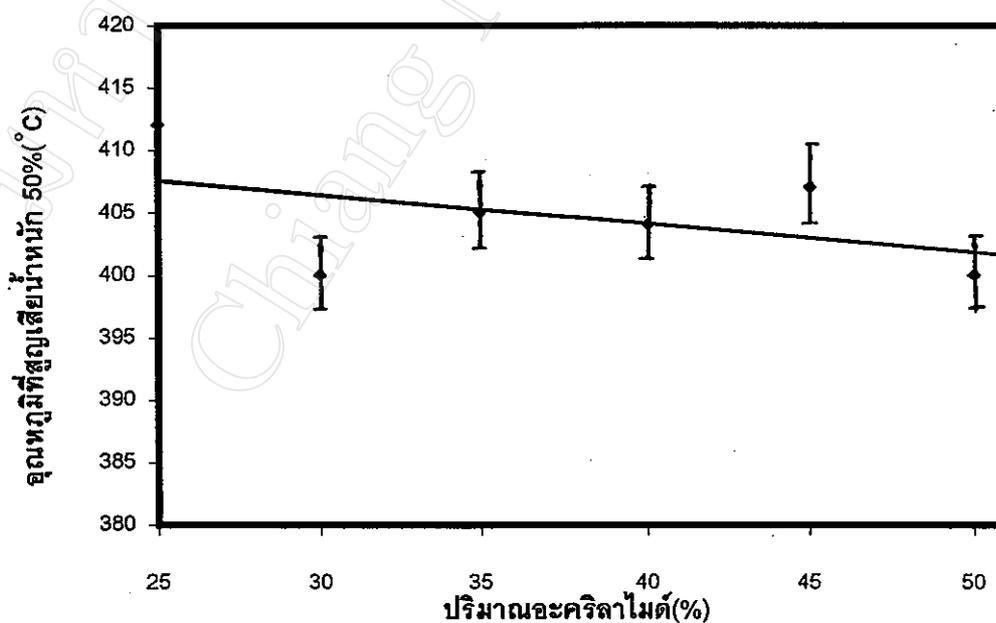
ตาราง 3.24 อุณหภูมิที่เริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ของพอลิอะคริลิกเอซิดและพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์)

พอลิเมอร์	อุณหภูมิที่เริ่มมีการสูญเสียน้ำหนัก ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)
PAA	173	271
P(AA-co-25%AM)	182	403
P(AA-co-30%AM)	185	405
P(AA-co-35%AM)	186	404
P(AA-co-40%AM)	187	403
P(AA-co-45%AM)	194	403
P(AA-co-50%AM)	200	399
PAM	253	417

จากตาราง 3.24 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ตอนเริ่มต้น (monomer feed) กับอุณหภูมิเริ่มต้นที่มีการสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ได้ดังรูป 3.48 และ 3.49 ตามลำดับ



รูป 3.48 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(อะคริลิกแอซิด-ไลซีน-อะคริลาไมด์) กับอุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก



รูป 3.49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(อะคริลิกแอซิด-ไลซีน-อะคริลาไมด์) กับอุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนัก 50%

จากรูป 3.48 และ 3.49 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาณอะคริลาไมด์ ในพอลิ (อะคริลิคเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) กับอุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนัก 50% ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

$$T_i = (0.5 \pm 0.1)A_m + (171 \pm 5) \quad (11)$$

เมื่อ T_i = อุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนัก ($^{\circ}\text{C}$)
 A_m = ปริมาณอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

และ $T_{50\%} = -(0.2 \pm 0.1)A_m + (413 \pm 5) \quad (12)$

เมื่อ $T_{50\%}$ = อุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนัก 50% ($^{\circ}\text{C}$)
 A_m = ปริมาณอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

3.4.6 การหาปริมาณน้ำสมดุลและปริมาณน้ำคงอยู่สมดุล

ปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium water content, EWC) และ ปริมาณน้ำคงอยู่สมดุล (Equilibrium water retention, EWR) เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของไฮโดรเจลที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ อีกทั้งยังแสดงถึงความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำ สมบัติเชิงกล และพื้นผิวของไฮโดรเจลอีกด้วย [37]

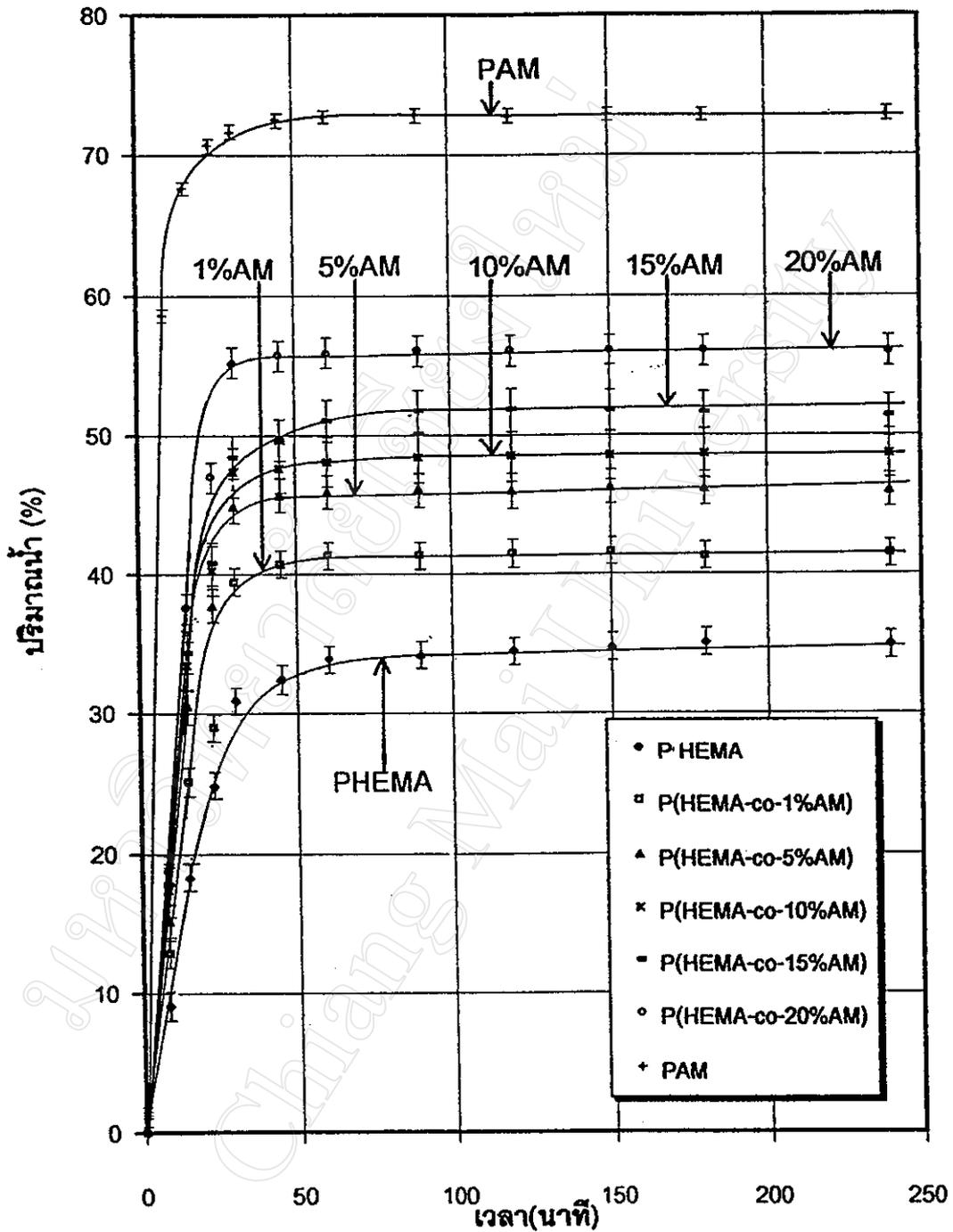
3.4.6.1 การหาปริมาณน้ำสมดุล

นำแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่างมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดประมาณ 2 x 4 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 แผ่น แล้วนำไปอบในตู้อบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิประมาณ 110 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักแผ่นพอลิเมอร์แห้ง จากนั้นนำแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่างไปแช่ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักตามระยะเวลาที่เหมาะสม จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง จากนั้นคำนวณหา ปริมาณน้ำ (water content) ที่พอลิเมอร์ดูดซับไว้ ณ เวลาต่างๆ ดังสมการ (13)

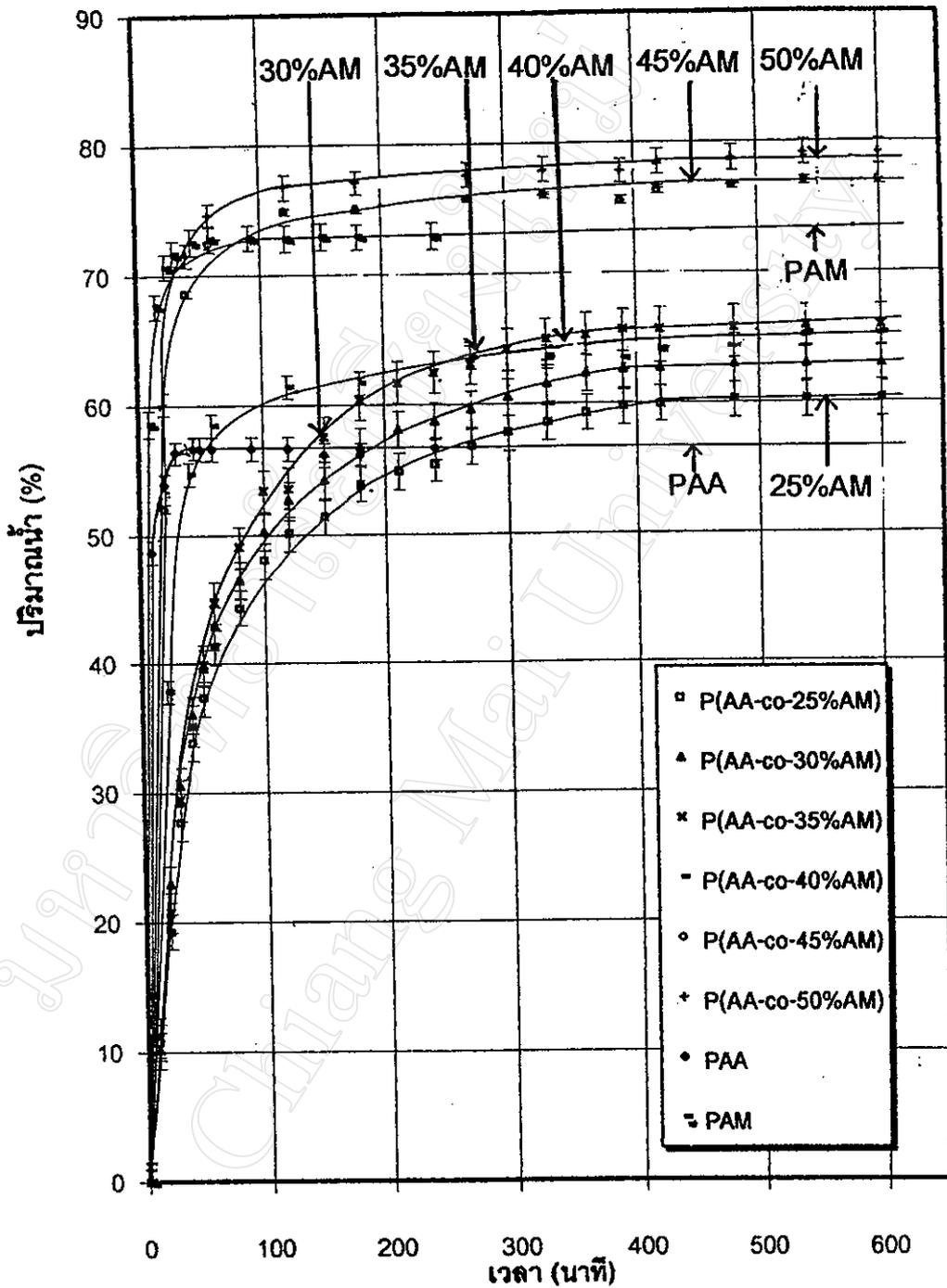
$$\text{ปริมาณน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ}} \times 100 \% \quad (13)$$

ส่วนปริมาณน้ำของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือที่สมดุลนั้น เรียกว่า ปริมาณน้ำสมดุล

ปริมาณน้ำที่พอลิอะคริลาไมด์กับพอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) กับพอลิอะคริลิกเอซิดและพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ดูดซับ ที่คำนวณได้ ณ เวลาต่างๆ แสดงดังรูป 3.50 และ 3.51 ตามลำดับ และค่าปริมาณน้ำสมดุลของพอลิเมอร์ต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังตาราง 3.25 และจากตาราง 3.25 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำสมดุลและปริมาณของอะคริลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ตอนเริ่มต้น (monomer feed) แสดงดังรูป 3.52 และ 3.53 ตามลำดับ



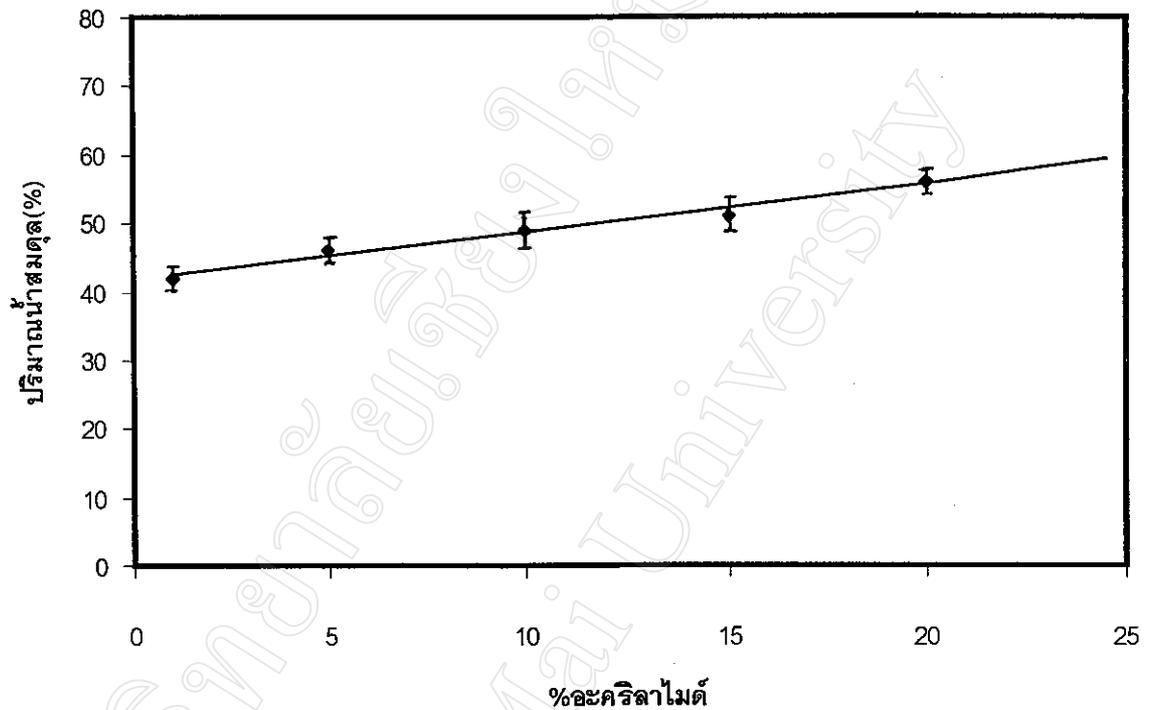
รูป 3.50 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับเวลาของพอลิอะคริลาไมด์ ความหนา 0.62 ± 0.01 มม. พอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆกัน ความหนา 0.47 ± 0.03 มม. ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C



รูป 3.51 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับเวลาของพอลิอะคริลาไมด์ ความหนา 0.62 ± 0.01 มม. พอลิอะคริลิกเอซิดและพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆกัน ความหนา 0.43 ± 0.03 มม. ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C

ตาราง 3.25 ค่าปริมาณน้ำสมดุลที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C ของแผ่นพอลิเมอร์ต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้

พอลิเมอร์	ความหนา (มม.)	ค่าปริมาณ น้ำสมดุล (%)
PAM	0.62 ± 0.01	73 ± 1
PHEMA	0.48 ± 0.03	35 ± 1
P(HEMA-co-1%AM)	0.49 ± 0.02	42 ± 1
P(HEMA-co-5%AM)	0.47 ± 0.05	46 ± 1
P(HEMA-co-10%AM)	0.45 ± 0.05	49 ± 2
P(HEMA-co-15%AM)	0.49 ± 0.01	51 ± 2
P(HEMA-co-20%AM)	0.46 ± 0.03	56 ± 1
PAA	0.41 ± 0.01	57 ± 1
P(AA-co-25%AM)	0.42 ± 0.02	60 ± 1
P(AA-co-30%AM)	0.42 ± 0.02	63 ± 1
P(AA-co-35%AM)	0.47 ± 0.05	66 ± 2
P(AA-co-40%AM)	0.49 ± 0.03	65 ± 1
P(AA-co-45%AM)	0.39 ± 0.02	77 ± 1
P(AA-co-50%AM)	0.41 ± 0.06	79 ± 1



รูป 3.52 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.47 ± 0.03 มม. และค่าปริมาณน้ำสมมูล ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C

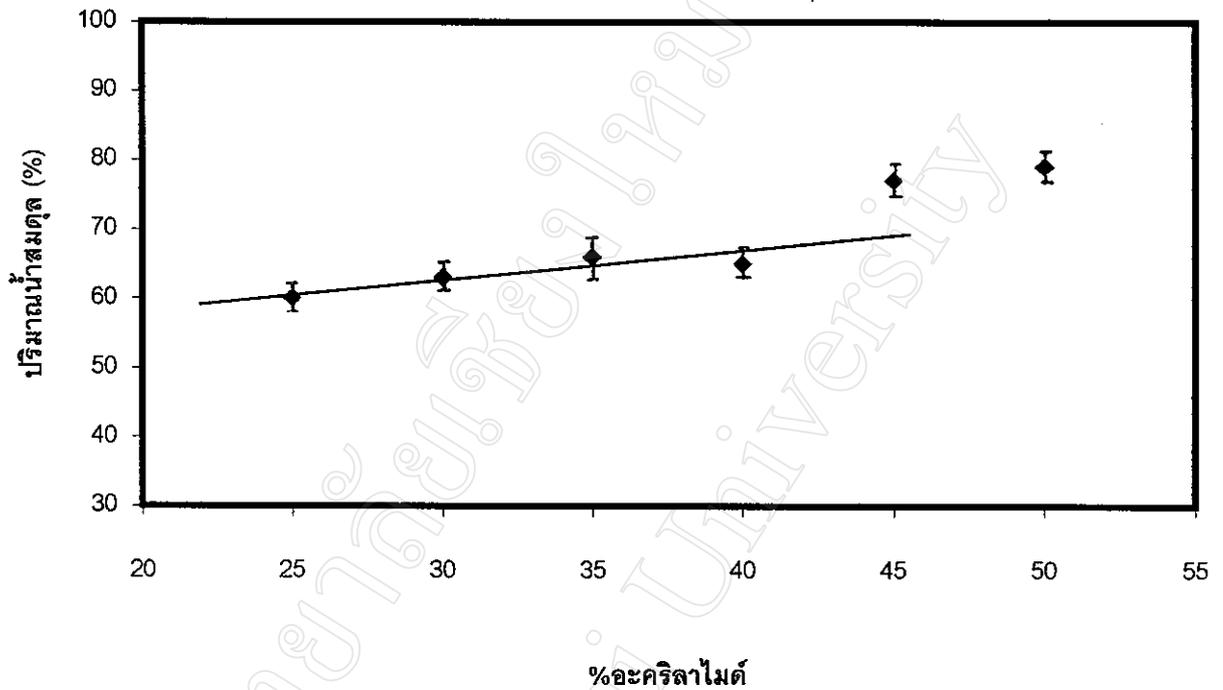
จากรูป 3.52 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำสมมูลและปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (14)

$$EWC = (0.74 \pm 0.07)A_m + (41 \pm 1) \quad (14)$$

เมื่อ

EWC = ปริมาณน้ำสมมูล (%)

A_m = เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก



รูป 3.53 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.50 ± 0.04 มม. กับค่าปริมาณน้ำดูด ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C

จากรูป 3.53 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำดูดและปริมาณอะคริลาไมด์ ในช่วง 25 – 40 % ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (15)

$$EWC = (0.36 \pm 0.06)A_m + (52 \pm 1) \quad (15)$$

เมื่อ

EWC = ปริมาณน้ำดูด (%)

A_m = เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

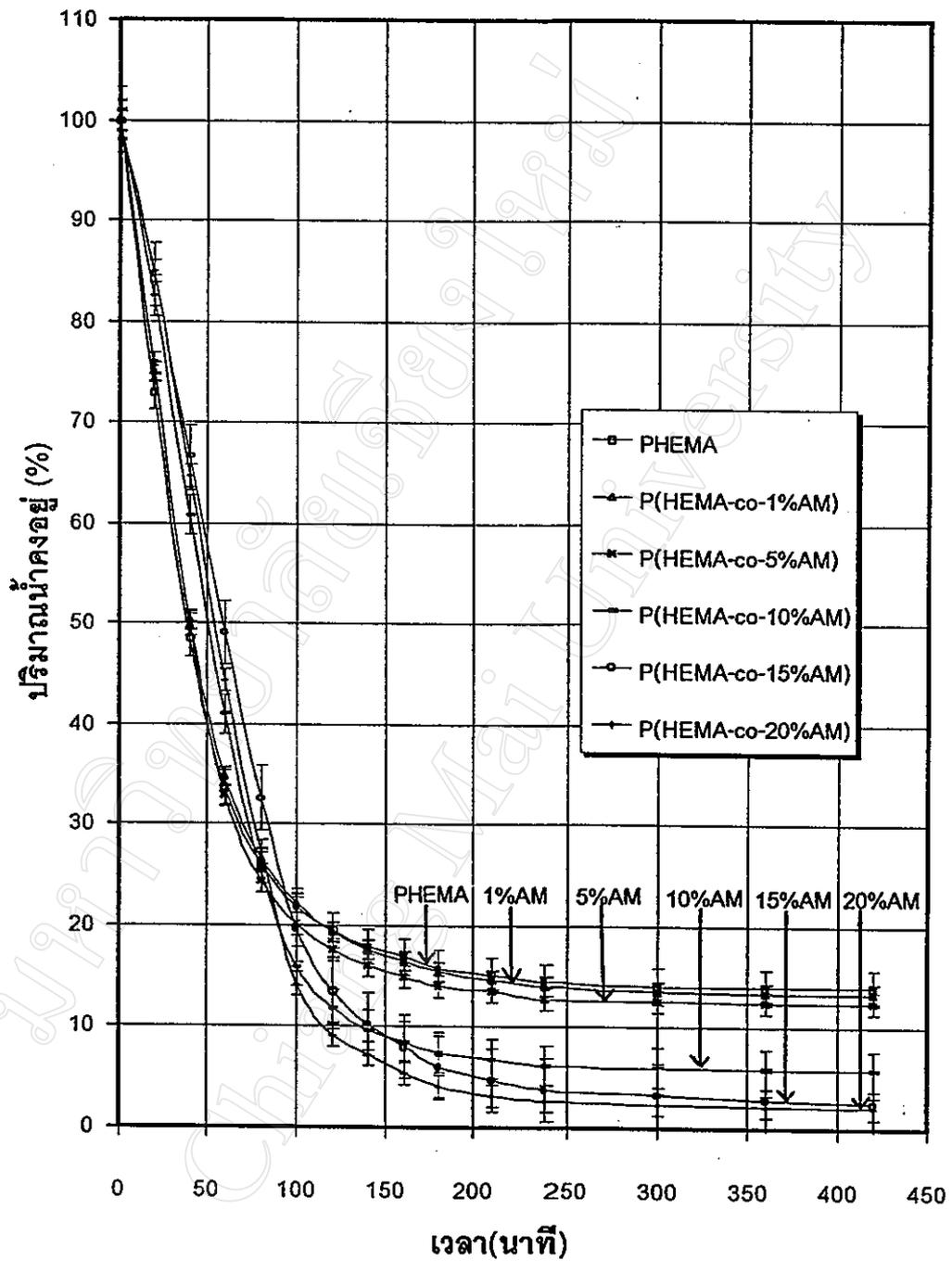
3.4.6.2 การหาปริมาณน้ำคงอยู่สมดุล

นำแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่มีขนาดประมาณ 2 x 4 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 แผ่น ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 1 คืน แล้วนำเอาออกมาซับด้วยกระดาษกรอง นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเป็นน้ำหนักพอลิเมอร์ที่สมดุล จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างไปไว้ใน อินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 % แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักตามระยะเวลาที่เหมาะสม จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าปริมาณน้ำคงอยู่ (water retention) ของแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ จากสมการ (16)

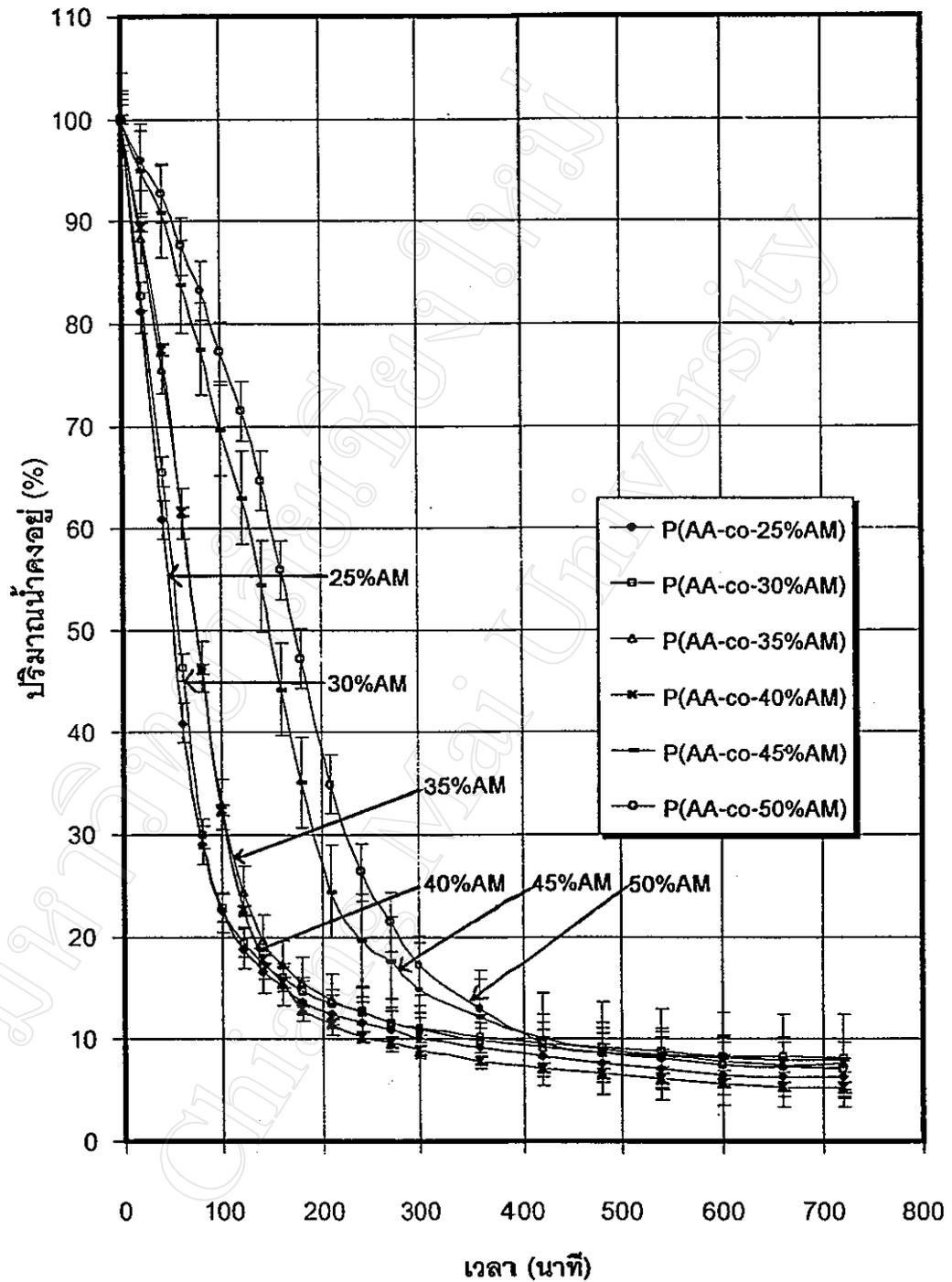
$$\text{ปริมาณน้ำคงอยู่} = \frac{\text{ปริมาณน้ำ ณ เวลานั้น}}{\text{ปริมาณน้ำสมดุล}} \times 100 \% \quad (16)$$

สำหรับปริมาณน้ำคงอยู่ของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่มีน้ำหนักคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือที่สมดุลนั้น เรียกว่า ปริมาณน้ำคงอยู่สมดุล

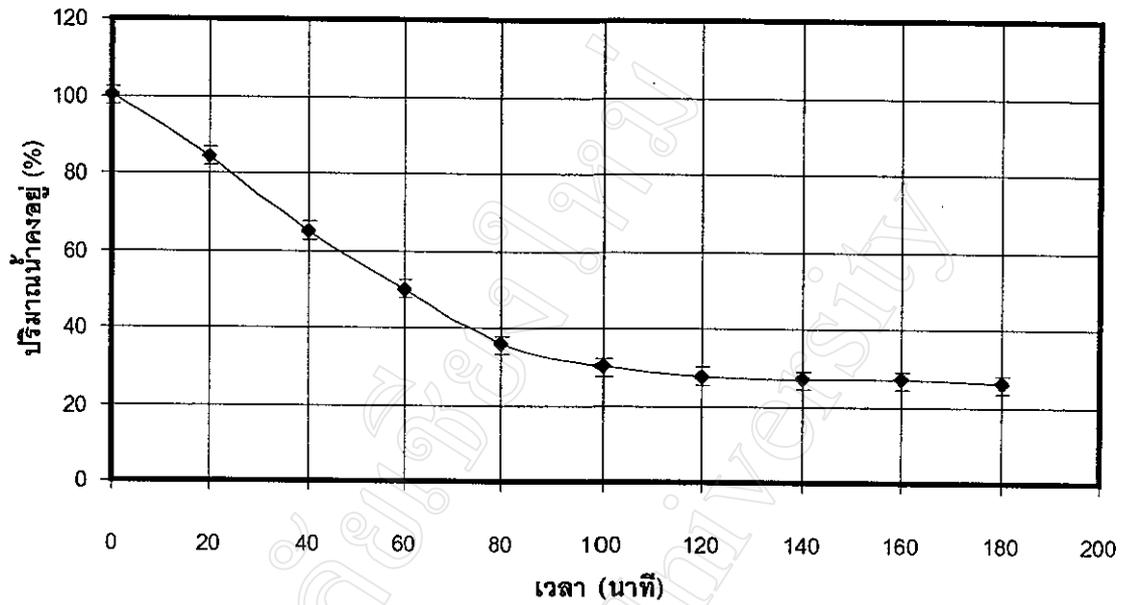
ปริมาณน้ำคงอยู่ของพอลิฮีมา กับพอลิ(ฮีมา-โค-อะครีลาไมด์) พอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะครีลาไมด์) พอลิอะคริลิกเอซิด และพอลิอะครีลาไมด์ ที่คำนวณได้ ณ เวลาต่างๆ แสดงดังรูป 3.54 - 3.57 ตามลำดับ และค่าปริมาณน้ำคงอยู่สมดุลของพอลิเมอร์ต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังตาราง 3.26 และจากตาราง 3.26 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำคงอยู่สมดุลและปริมาณของอะครีลาไมด์ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะครีลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะครีลาไมด์) ตอนเริ่มต้น (monomer feed) ได้ดังรูป 3.58 และ 3.59 ตามลำดับ



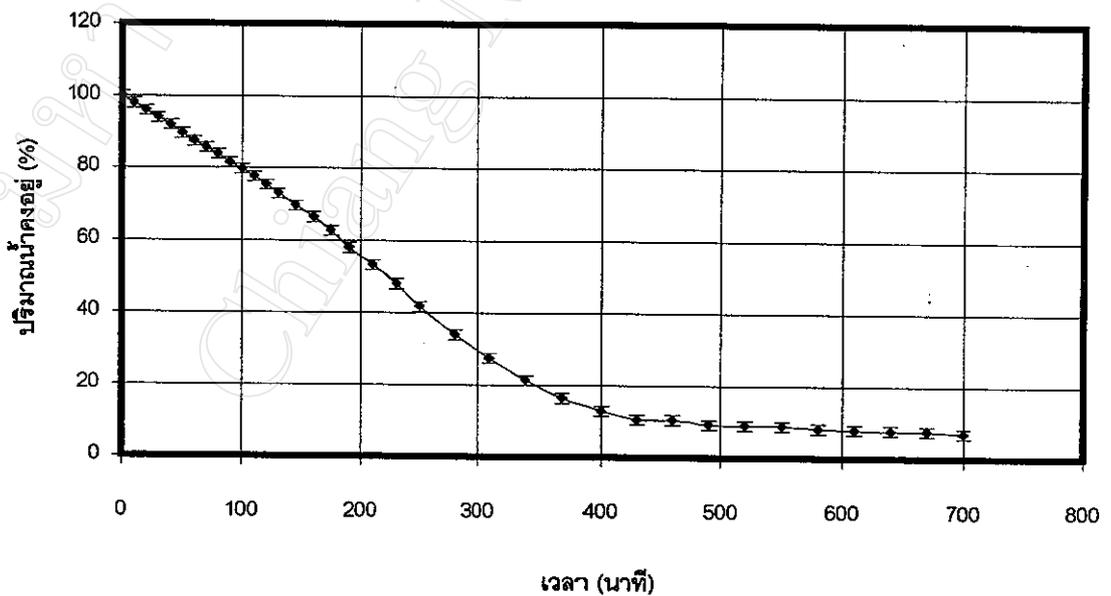
รูป 3.54 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลาของพอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆกัน ความหนา 0.46 ± 0.03 มม. ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %



รูป 3.55 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลาของพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน ความหนา 0.48 ± 0.06 มม. ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 55 - 60%



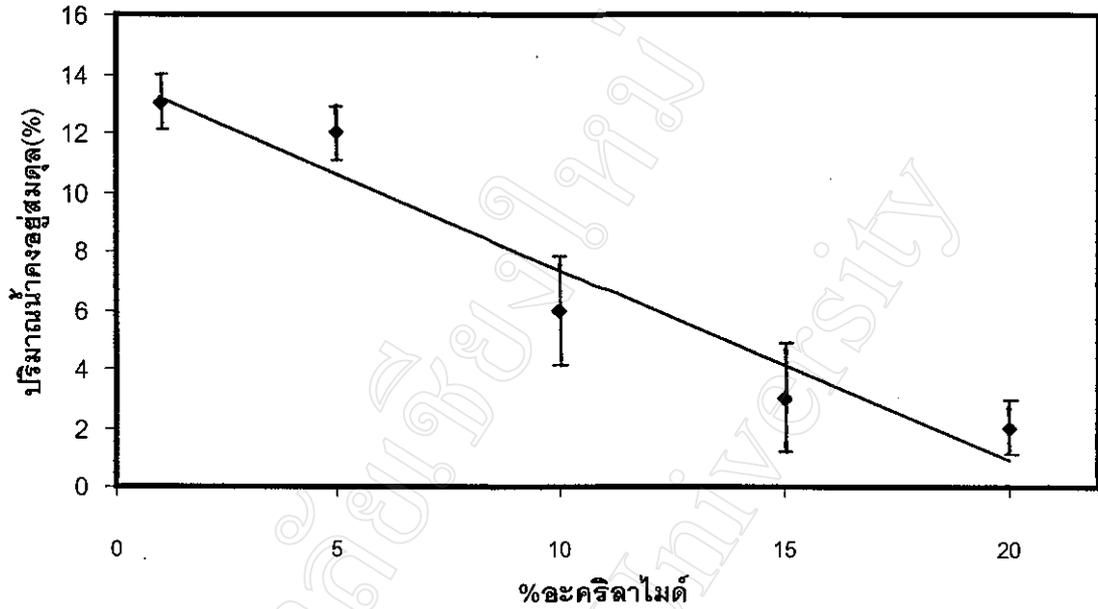
รูป 3.56 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลาของพอลิอะคริลิกเอไซด์ ความหนา 0.41 ± 0.02 มม. ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %



รูป 3.57 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำคงอยู่กับเวลาของพอลิอะคริลลาไมด์ ความหนา 0.65 ± 0.04 มม. ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

ตาราง 3.26 ค่าปริมาณน้ำคงอยู่สมดุล ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 % ของแผ่นพอลิเมอร์ต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้

พอลิเมอร์	ความหนา (มม.)	ปริมาณน้ำ คงอยู่สมดุล(%)	คิดเป็น ปริมาณน้ำ (%)
PAM	0.69 ± 0.01	7 ± 1	5 ± 0.7
PHEMA	0.51 ± 0.02	14 ± 1	5 ± 0.4
P(HEMA-co-1%AM)	0.42 ± 0.03	13 ± 1	5 ± 0.4
P(HEMA-co-5%AM)	0.47 ± 0.03	12 ± 1	6 ± 0.5
P(HEMA-co-10%AM)	0.49 ± 0.07	6 ± 2	3 ± 1
P(HEMA-co-15%AM)	0.39 ± 0.02	3 ± 2	2 ± 1
P(HEMA-co-20%AM)	0.46 ± 0.03	2 ± 1	1 ± 0.6
PAA	0.43 ± 0.03	25 ± 1	14 ± 0.6
P(AA-co-25%AM)	0.41 ± 0.02	6 ± 1	4 ± 0.6
P(AA-co-30%AM)	0.43 ± 0.04	8 ± 1	5 ± 0.6
P(AA-co-35%AM)	0.44 ± 0.04	8 ± 2	5 ± 1
P(AA-co-40%AM)	0.44 ± 0.03	5 ± 1	3 ± 0.7
P(AA-co-45%AM)	0.40 ± 0.04	8 ± 1	6 ± 0.8
P(AA-co-50%AM)	0.45 ± 0.04	7 ± 1	6 ± 0.8



รูป 3.58 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.46 ± 0.03 มม. กับค่าปริมาณน้ำคงอยู่สมดุล ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

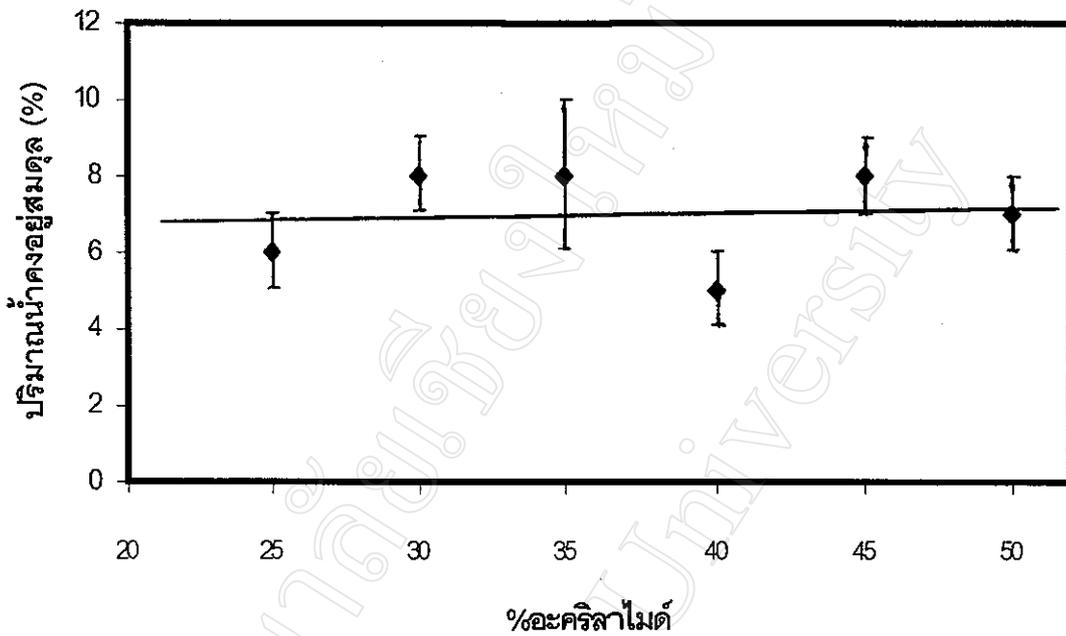
จากรูป 3.58 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำคงอยู่สมดุลและปริมาณอะคริลาไมด์ ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (17)

$$EWR = -(0.65 \pm 0.07)A_m + (14 \pm 1) \quad (17)$$

เมื่อ

EWR = ปริมาณน้ำคงอยู่สมดุล (%)

A_m = เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก



รูป 3.59 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะคริลาไมด์ ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.43 ± 0.03 มม. กับค่าปริมาณน้ำค้างอยู่สมดุล ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

จากรูป 3.59 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำค้างอยู่สมดุลและปริมาณอะคริลาไมด์ ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (18)

$$EWR = (0.01 \pm 0.02)A_m + (7 \pm 1) \quad (18)$$

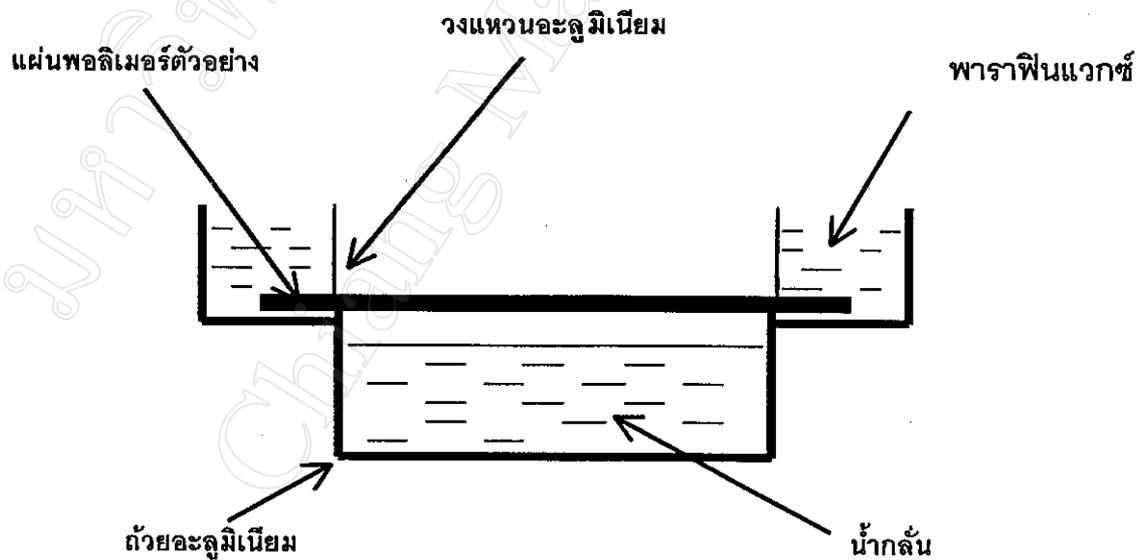
เมื่อ

$$EWR = \text{ปริมาณน้ำสมดุล (\%)}$$

$$A_m = \text{เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก}$$

3.4.7 การหาอัตราการผ่านของไอน้ำ

อัตราการผ่านของไอน้ำ (Water Vapour Transmission, WVT) หาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยผ่านวัสดุตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จากวิธีของ The American Society for Testing and Materials (ASTM E 96 - 93) [59] ทำได้ 2 วิธี คือ วิธีอินเวทเทคัพ (Inverted cup method) และวิธีวอเตอร์คัพ (Water cup) โดยการประกอบวัสดุตัวอย่างกับถ้วยอะลูมิเนียมที่มีน้ำบรรจุอยู่ภายใน โดยมีพาราฟินแวกซ์ (parafin wax) เป็นตัวปิดผนึก (sealant) ดังรูป 3.60 แล้วนำไปไว้ในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ จากนั้นนำเอาถ้วยอะลูมิเนียมออกมาชั่งน้ำหนักตามระยะเวลาที่เหมาะสม แล้วพลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา เพื่อหาค่าความชัน (slope) ของกราฟแล้วนำมาคำนวณหาอัตราการผ่านของไอน้ำจากสมการ (19)



รูป 3.60 ถ้วยอะลูมิเนียมที่ใช้ในการหาอัตราการผ่านของไอน้ำ

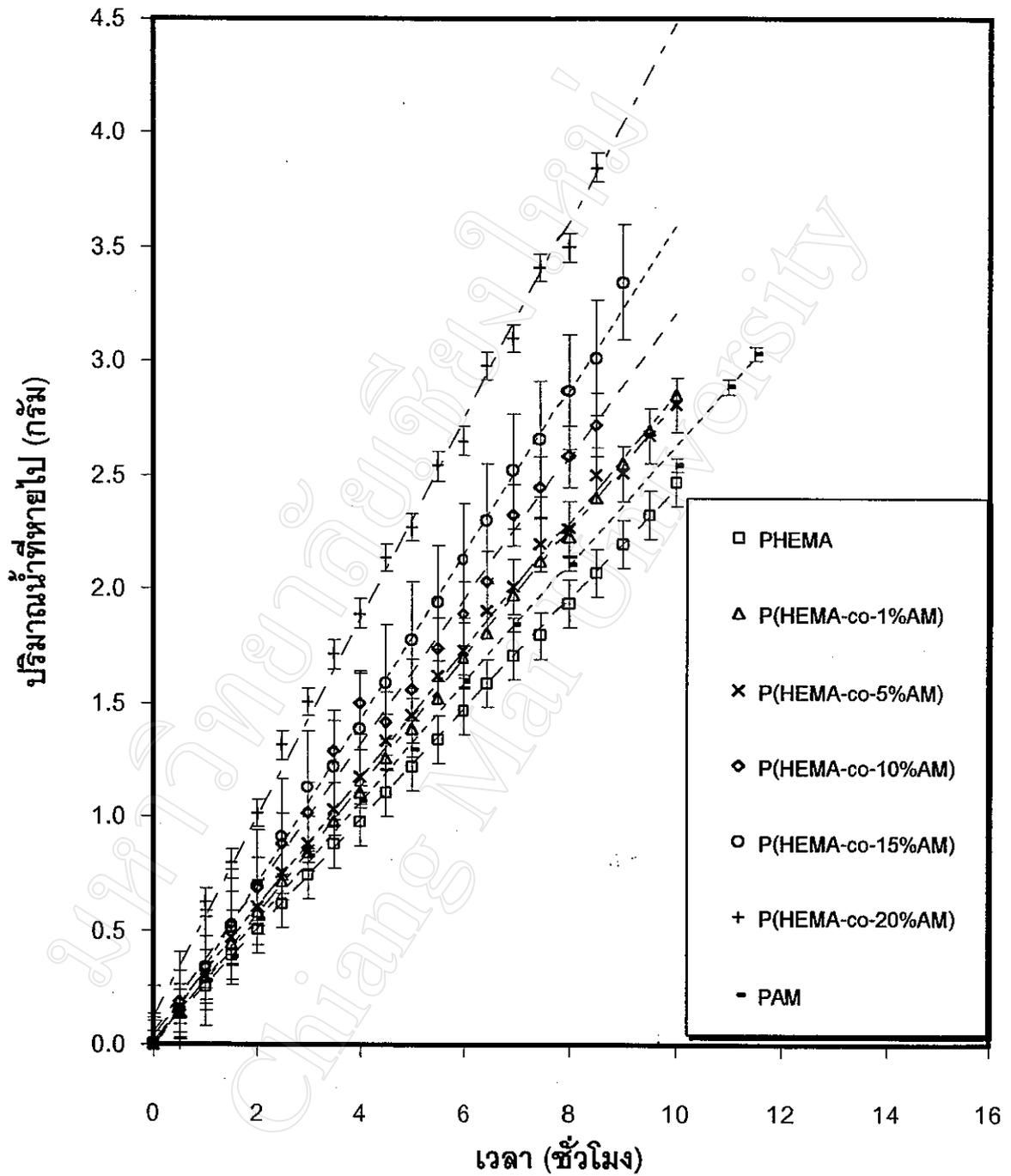
$$WVT = G / tA = (G/t) / A \quad (19)$$

เมื่อ	WVT	=	อัตราการผ่านของไอน้ำ (กรัม / ชั่วโมง.ตารางเมตร)
	G	=	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (กรัม)
	t	=	เวลา (ชั่วโมง)
	G/t	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือความชันของกราฟ (กรัม/ชั่วโมง)
	A	=	พื้นที่ของการระเหยผ่านหรือพื้นที่ของปากถ้วยอะลูมิเนียม
		=	2.83×10^{-3} ตารางเมตร

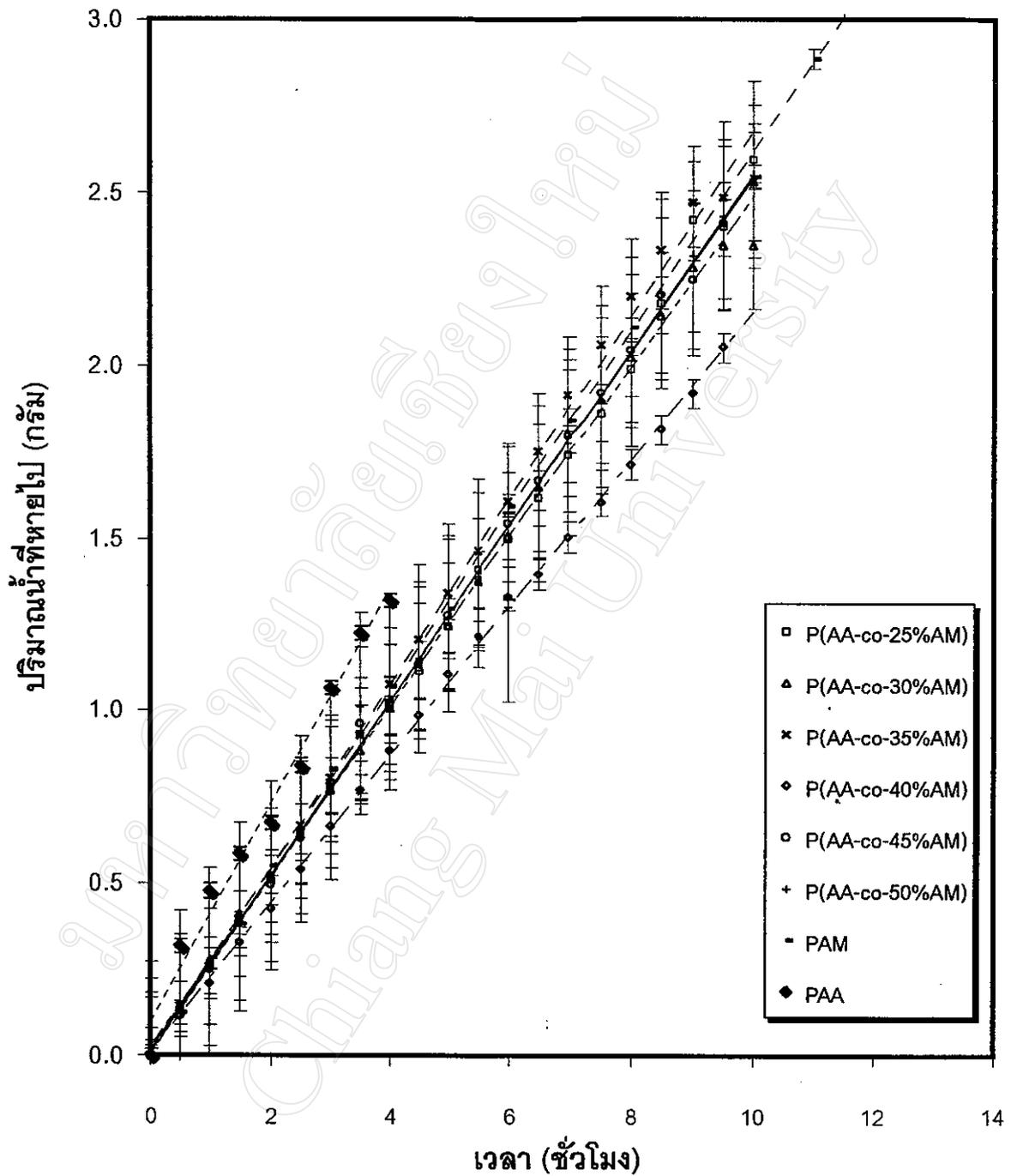
3.4.7.1 วิธีอินเวทเทคัพ (Inverted Cup Method)

ตัดแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่างเป็นรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C จนกระทั่งถึงจุดสมดุล เหาออกมาซับด้วยกระดาษกรอง แล้วประกอบเข้ากับถ้วยอะลูมิเนียมที่มีน้ำอยู่ 40 มิลลิลิตร ใช้พาราฟินแว็กซ์ปิดผนึก ซึ่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมที่ประกอบเสร็จเป็นน้ำหนักที่เวลาเท่ากับศูนย์ จากนั้นนำไปวางคว่ำไว้ในอินคิวเบเตอร์ เพื่อให้ น้ำในถ้วยอะลูมิเนียมสัมผัสกับแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่าง ควบคุมที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 % นำถ้วยอะลูมิเนียมออกมาชั่งน้ำหนักตามเวลาที่เหมาะสม พลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา เพื่อหาค่าความชัน แล้วนำไปคำนวณหาอัตราการผ่านของไอน้ำจากสมการ (19)

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไป โดยวิธีอินเวทเทคัพ กับเวลาของพอลิอะคริลาไมด์ พอลิฮีมา พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) พอลิอะคริลิกเอซิด และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดังรูป 3.61 และ 3.62 ตามลำดับ และจากรูป 3.61 และ 3.62 ค่าความชันของกราฟและอัตราการผ่านของไอน้ำของพอลิอะคริลาไมด์ พอลิฮีมา พอลิอะคริลิกเอซิด พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน ตอนเริ่มต้น (monomer feed) แสดงดังตาราง 3.27 และกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์)และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดังรูป 3.63 และ 3.64 ตามลำดับ



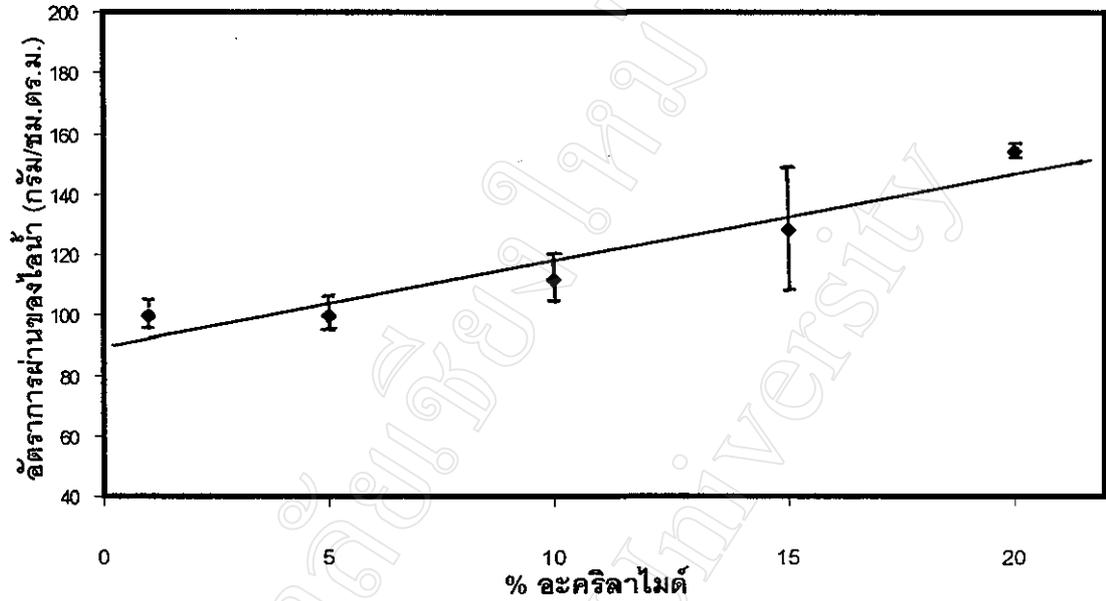
รูป 3.61 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่หายไปกับเวลาของพอลิอะคริลาไมด์ ความหนา 0.69 ± 0.04 มม. พอลิฮีมาและพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มี ปริมาณอะคริลาไมด์ต่างกัน ความหนา 0.43 ± 0.02 มม. โดยวิธี อินเวทเทคค์พที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %



รูป 3.62 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่หายไปกับเวลาของพอลิอะคริลาไมด์ ความหนา 0.69 ± 0.04 มม. พอลิอะคริลิกเอซิดและพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างกัน ความหนา 0.47 ± 0.03 มม. โดยวิธี อินเวทเทคคัพ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

ตาราง 3.27 ความชื้นและอัตราการผ่านของไอน้ำของพอลิอะคริลาไมด์ พอลิฮีมา พอลิอะคริลิก
 เอสิต พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอสิต-โค-อะคริลาไมด์) ที่มี
 ปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆกัน โดยวิธีอินเวทเทคัพ ที่อุณหภูมิ $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และ
 ความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

พอลิเมอร์	ความหนา (มม.)	ความชื้น (g/hr)	WVT (g/hr.m ²)
PAM	0.69 ± 0.04	0.260 ± 0.003	92 ± 1
PHEMA	0.45 ± 0.03	0.242 ± 0.017	86 ± 6
P(HEMA-co-1%AM)	0.45 ± 0.02	0.282 ± 0.011	100 ± 4
P(HEMA-co-5%AM)	0.42 ± 0.01	0.282 ± 0.014	100 ± 5
P(HEMA-co-10%AM)	0.39 ± 0.03	0.315 ± 0.025	111 ± 9
P(HEMA-co-15%AM)	0.41 ± 0.01	0.362 ± 0.062	128 ± 22
P(HEMA-co-20%AM)	0.45 ± 0.04	0.435 ± 0.006	154 ± 2
PAA	0.48 ± 0.02	0.314 ± 0.002	111 ± 1
P(AA-co-25%AM)	0.49 ± 0.03	0.255 ± 0.008	90 ± 3
P(AA-co-30%AM)	0.47 ± 0.04	0.246 ± 0.018	87 ± 6
P(AA-co-35%AM)	0.45 ± 0.03	0.267 ± 0.017	94 ± 6
P(AA-co-40%AM)	0.49 ± 0.04	0.214 ± 0.049	76 ± 17
P(AA-co-45%AM)	0.46 ± 0.04	0.254 ± 0.022	89 ± 8
P(AA-co-50%AM)	0.46 ± 0.02	0.252 ± 0.027	89 ± 10



รูป 3.63 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะครีลาไมด์ในพอลิ (ฮีมา-โค-อะครีลาไมด์) ความหนา 0.43 ± 0.02 มม. โดยวิธีอินเวทเทดคัพ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

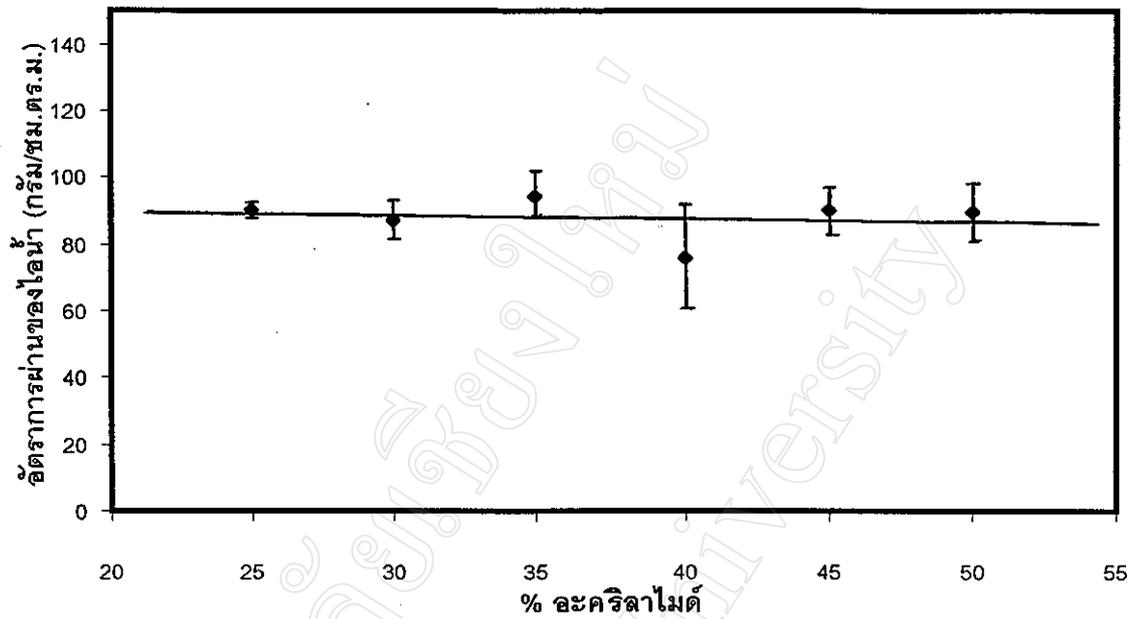
จากรูป 3.63 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะครีลาไมด์ ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะครีลาไมด์) ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (20)

$$WVT = (2.9 \pm 0.4)A_m + (89 \pm 8) \quad (20)$$

เมื่อ

WVT = อัตราการผ่านของไอน้ำ (กรัม/ชม.ตร.ม.)

A_m = เปอร์เซ็นต์ของอะครีลาไมด์ โดยน้ำหนัก



รูป 3.64 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(อะคริลิคเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.46 ± 0.03 มม. โดยวิธีอินเวทเทคัพ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

จากรูป 3.64 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะคริลาไมด์ ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิคเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (21)

$$WVT = (0.3 \pm 0.2)Am + (74 \pm 8) \quad (21)$$

เมื่อ

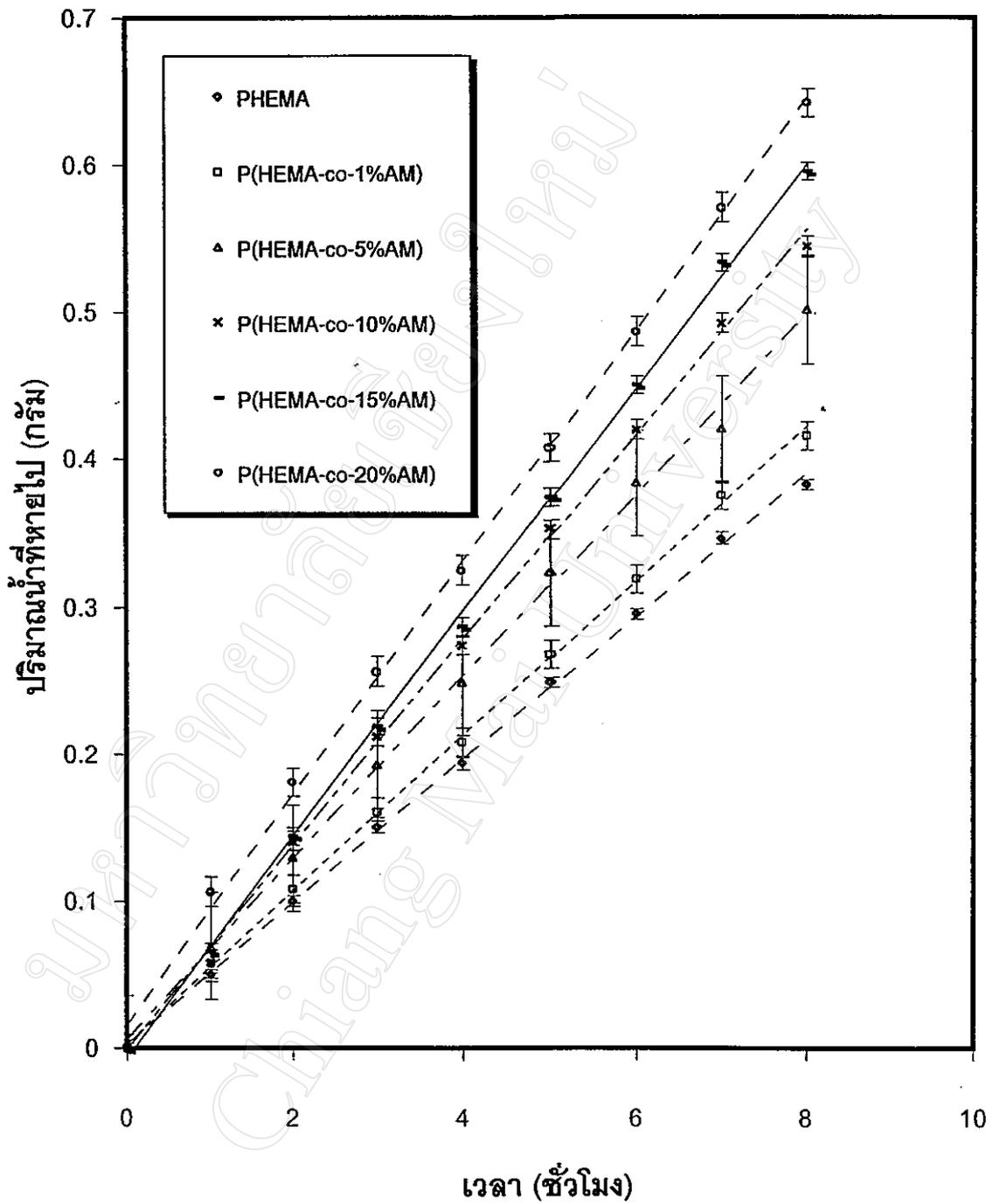
WVT = อัตราการผ่านของไอน้ำ (กรัม/ชม.ตร.ม.)

Am = เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

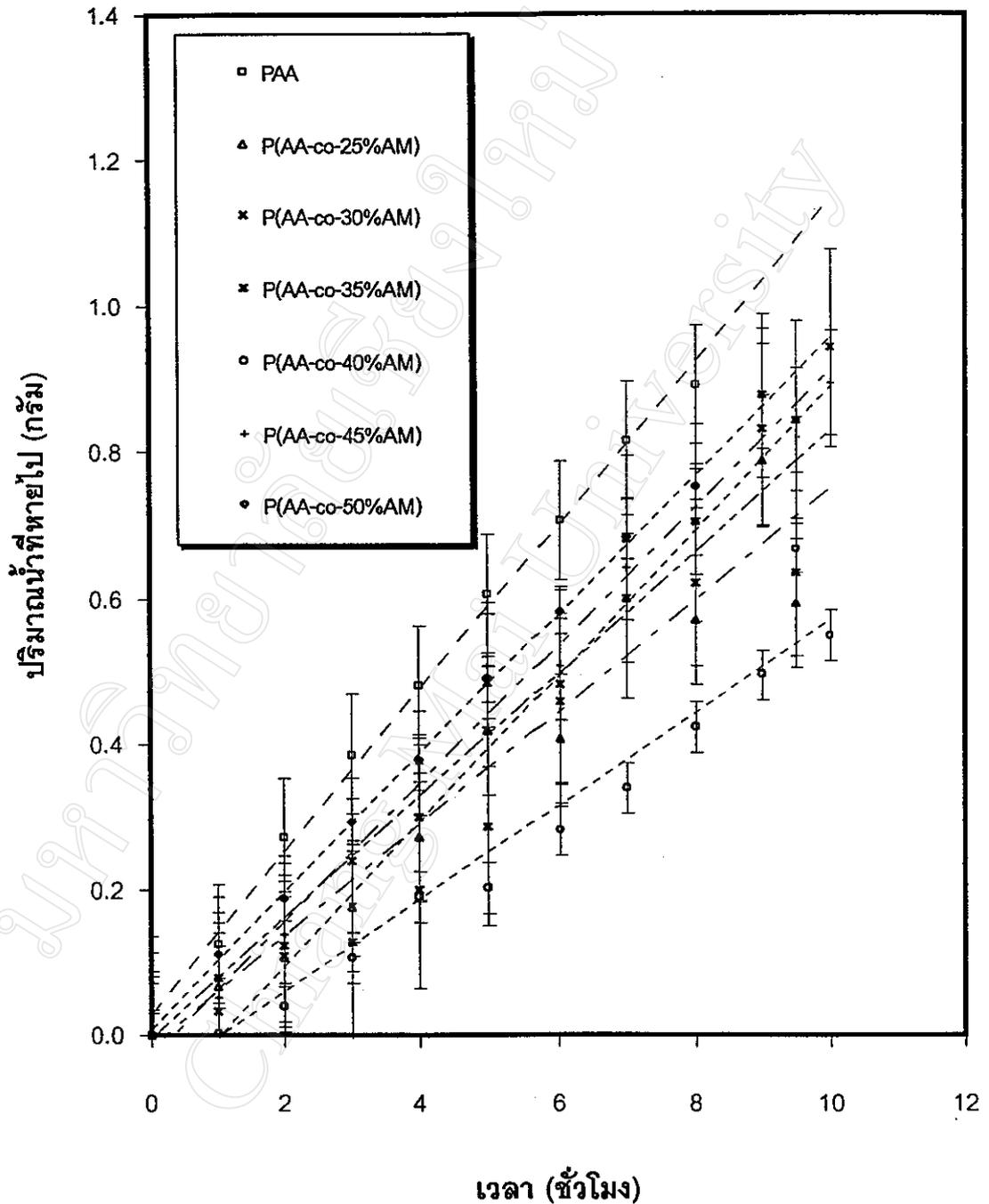
3.4.7.2 วิธีวอเตอร์คัพ (Water Cup Method)

ตัดแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่างเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C จนกระทั่งถึงจุดสมดุล แล้วนำไปตากในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมอุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 % จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วประกอบเข้ากับถ้วยอะลูมิเนียมที่มีน้ำอยู่ 20 มิลลิลิตร ใช้พาราฟินปิดผนึก ชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมที่ประกอบเสร็จเป็นน้ำหนักที่เวลาเท่ากับศูนย์ จากนั้นนำไปวางแห้งไว้ในอินคิวเบเตอร์ เพื่อมิให้น้ำในถ้วยอะลูมิเนียมสัมผัสกับแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่าง ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 % นำถ้วยอะลูมิเนียมออกมาชั่งน้ำหนักตามเวลาที่เหมาะสม พลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา เพื่อหาค่าความชัน แล้วนำไปคำนวณหาอัตราการผ่านของไอน้ำจากสมการ (19)

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไป โดยวิธีวอเตอร์คัพ กับเวลาของพอลิฮีมา กับ พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิอะคริลิกเอสติดกับพอลิ(อะคริลิกเอสติด-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดังรูป 3.67 และ 3.68 ตามลำดับ จากรูป 3.67 และ 3.68 ค่าความชันของกราฟและอัตราการผ่านของไอน้ำของพอลิฮีมา พอลิอะคริลิกเอสติด พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอสติด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ตอนเริ่มต้น (monomer feed) ต่างๆ กัน แสดงดังตาราง 3.27 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และ พอลิ(อะคริลิกเอสติด-โค-อะคริลาไมด์) แสดงดังรูป 3.67 และ 3.68 ตามลำดับ



รูป 3.65 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่หายไปกับเวลาของพอลิฮีมา และพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน ความหนา 0.46 ± 0.03 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 - 60 %

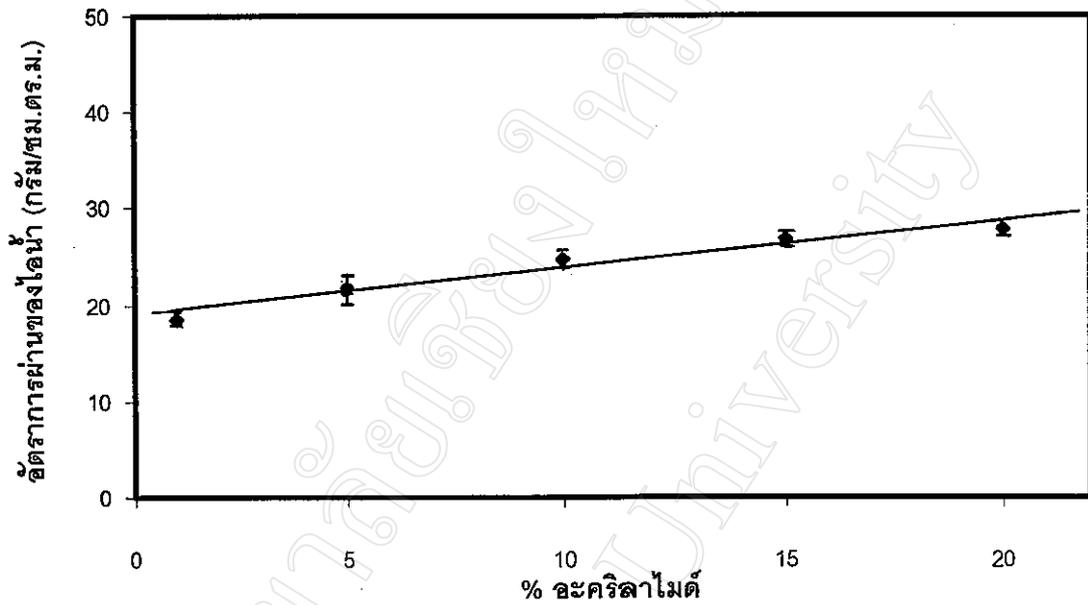


รูป 3.66 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่หายไปกับเวลาของพอลิอะคริลิกแอซิด และพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน ความหนา 0.47 ± 0.03 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

ตาราง 3.28 ความชันและอัตราการผ่านของไอน้ำของพอลิฮีมา พอลิอะคริลิกเอซิด พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลลาไมด์ ต่างๆกัน โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

พอลิเมอร์	ความหนา (มม.)	ความชัน (g/hr)	WVT (g/hr.m ²)
PAM	*	*	*
PHEMA	0.46±0.02	0.0485±0.0004	17.2±0.1
P(HEMA-co-1%AM)	0.43±0.03	0.0525±0.0009	18.6±0.3
P(HEMA-co-5%AM)	0.47±0.03	0.0616±0.0036	21.8±1.3
P(HEMA-co-10%AM)	0.43±0.04	0.0697±0.0006	24.6±0.2
P(HEMA-co-15%AM)	0.49±0.04	0.0759±0.0006	26.8±0.2
P(HEMA-co-20%AM)	0.43±0.04	0.0815±0.0010	27.8±0.4
PAA	0.49±0.02	0.112±0.008	39.6±2.8
P(AA-co-25%AM)	0.43±0.02	0.0768±0.0088	27.2±3.1
P(AA-co-30%AM)	0.52±0.03	0.0993±0.0136	35.1±4.8
P(AA-co-35%AM)	0.47±0.04	0.0834±0.0113	29.5±4.0
P(AA-co-40%AM)	0.44±0.02	0.0635±0.0035	22.5±1.2
P(AA-co-45%AM)	0.45±0.03	0.0946±0.0072	33.5±2.5
P(AA-co-50%AM)	0.45±0.04	0.0950±0.0031	33.6±1.1

หมายเหตุ : * ไม่ได้ทำการทดลอง เนื่องจากไม่สามารถทำให้ PAM อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 % ได้



รูป 3.67 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ (ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.45 ± 0.03 มม. โดยวิธีวอเตอร์คัพ ที่ อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

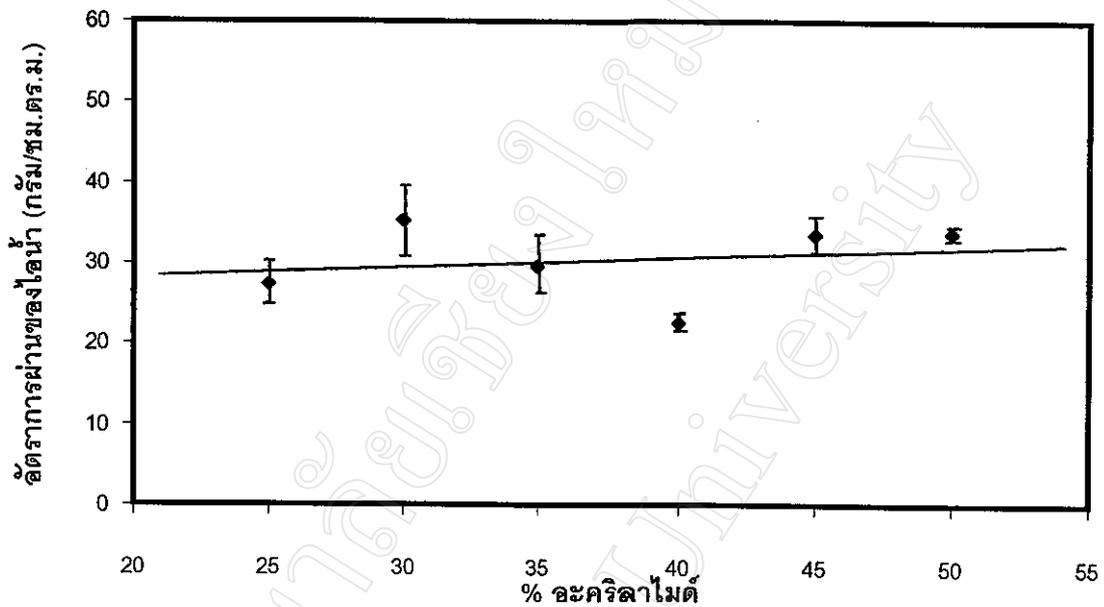
จากรูป 3.67 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณ อะคริลาไมด์ ที่มีอยู่ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (22)

$$WVT = (0.49 \pm 0.02)A_m + (19 \pm 0.4) \quad (22)$$

เมื่อ

WVT = อัตราการผ่านของไอน้ำ (กรัม/ชม.ตร.ม.)

A_m = เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก



รูป 3.68 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(อะคริลิคเอสติด-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.47±0.03 มม. โดยวิธีวอเทอร์คัพ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 – 60 %

จากรูป 3.68 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอัตราการผ่านของไอน้ำและปริมาณอะคริลาไมด์ ในช่วง 25 – 50 % ที่มีอยู่ในพอลิ(อะคริลิคเอสติด-โค-อะคริลาไมด์) ในรูปสมการได้ดังสมการที่ (23)

$$WVT = (0.11 \pm 0.05)A_m + (26 \pm 3) \quad (23)$$

เมื่อ

WVT = อัตราการผ่านของไอน้ำ (กรัม/ซม.ตร.ม.)

A_m = เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ โดยน้ำหนัก

3.4.8 การศึกษาสมบัติเชิงกล

สมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราวคือมีความยืดหยุ่น อ่อนนุ่ม ไม่ระคายเคืองต่อเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ อีกทั้งมีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงดึง ไม่ฉีกขาดเมื่อดึงออกจากบาดแผล [35] ดังนั้นจึงมีการศึกษาสมบัติเชิงกลและทดสอบความแข็งแรงของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาว่า มีความแข็งแรงและมีความปลอดภัยที่จะพัฒนาเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราวได้หรือไม่

3.4.8.1 สมบัติเชิงกล [61-63]

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุต่างๆ มีหลายอย่าง [61] เช่น การทดสอบความทนต่อแรงดึง(tensile strength) ความทนต่อแรงอัด(compressive strength) ความทนต่อแรงโค้ง(flexural strength) ความทนต่อแรงกระทบ (impact strength) การคืบ(creep) การคลายความเค้น(stress relaxation) การทดสอบความล้า (fatigue test) และความแข็ง (hardness) ของวัสดุ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความทนต่อแรงดึงของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ ทำให้ทราบถึงความแข็งแรงและการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจลเมื่อมีแรงดึงจากภายนอกมากกระทำ

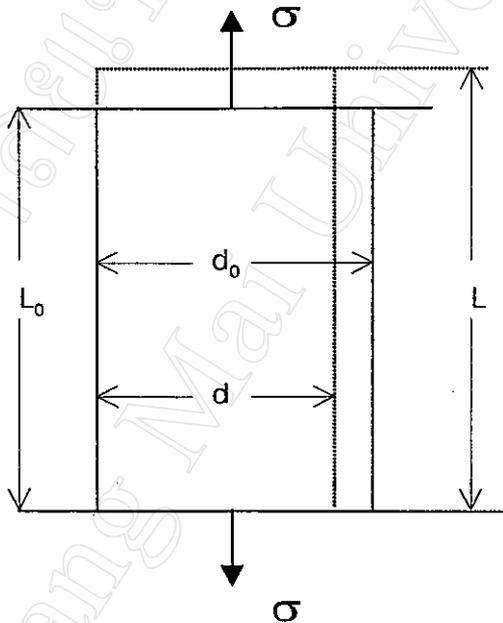
สมบัติเชิงกลหรือพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุต่างๆ เมื่อถูกแรงภายนอกมากกระทำ จะเกิดแรงภายในซึ่งเป็นแรงต้าน เพื่อที่จะให้ตัวของวัสดุเองอยู่ในสภาพที่สมดุล ผลของแรงภายนอกที่มากกระทำจะเท่ากับแรงที่ต่อต้านจากภายในวัสดุนั้น ซึ่งขณะที่มีแรงมากกระทำและเกิดการต่อต้านจะส่งผลให้เกิดความเค้นและความเครียดภายในวัสดุ

3.4.8.1.1 ความเค้นแรงดึง

ความเค้นแรงดึง (tensile stress) คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการดึงโดยแรงภายนอกมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ ขั้นตอนการเกิดความเค้นภายในวัสดุจากการดึง แสดงดังรูป 3.69

3.4.8.1.2 ความเครียด

ความเครียด (strain) เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอะตอมที่เคลื่อนที่ไปขณะถูกแรงมากกระทำ ค่านี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับค่าความเค้น มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร หรือนิวตันต่อนิวตัน บางครั้งอาจใช้เป็นหน่วยของเปอร์เซ็นต์ก็ได้ สำหรับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่ถูกยืดออกโดยการดึง แสดงดังรูป 3.70 จะเห็นได้ว่า แนวเส้นประคือรูปร่างใหม่ของวัสดุที่เปลี่ยนไปจากเดิม แสดงว่าได้เกิดความเครียดขึ้น 2 แนว คือ ความเครียดตามยาว (longitudinal strain) และความเครียดด้านข้าง (lateral strain) ซึ่งหมายถึงความเครียดตามแนวแรงที่มากระทำ และด้านที่ตั้งฉากกับแรงดึง ตามลำดับ



รูป 3.70 การหาค่าความเครียดเมื่อได้รับแรงดึง [62]

- เมื่อ L คือ ความยาวหลังจากที่ดึงวัสดุ d คือ ความยาวด้านที่ตั้งฉากกับแรงดึง
 L_0 คือ ความยาวเดิม d_0 คือ ความยาวเดิมด้านที่ตั้งฉากกับแรงดึง
 σ คือ ค่าความเค้น

จากรูป 3.70 สามารถหาค่าความเครียดตามยาวและด้านข้าง ได้ดังสมการ (25) และ (26) ตามลำดับ

$$\text{ความเครียดตามยาว} = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0 \quad (25)$$

$$\text{ความเครียดด้านข้าง} = \Delta d / d_0 = (d - d_0) / d_0 \quad (26)$$

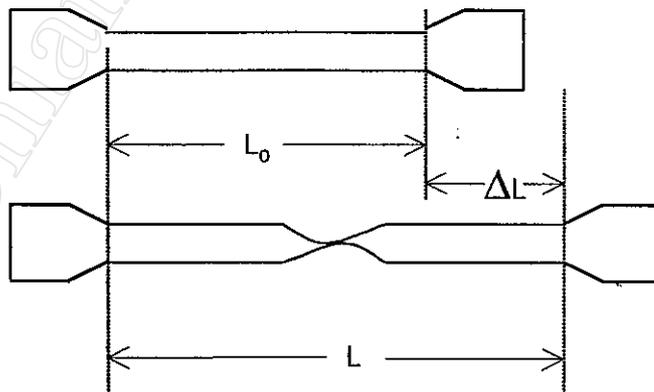
เมื่อ ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป Δd คือ ความยาวด้านที่ตั้งฉากกับแรงดึงที่เปลี่ยนไป
 L_0 คือ ความยาวเดิม d_0 คือ ความยาวเดิมด้านที่ตั้งฉากกับแรงดึง
 L คือ ความยาวหลังจากที่ตั้งวัสดุ d คือ ความยาวด้านที่ตั้งฉากกับแรงดึงหลังจากที่ตั้งวัสดุ

3.4.8.1.3 การยืด

การยืด (elongation) คือความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เมื่อวัสดุถูกแรงดึงจากภายนอกมากระทำ วัสดุจะยืดออกแล้วขาดออกจากกันตรงบริเวณใจกลางที่แคบของวัสดุ แสดงดังรูป 3.71 การทดสอบหาค่าการยืดนี้มักใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบกับความยาวเดิมของวัสดุว่ามีการยืดได้ที่เปอร์เซ็นต์ การหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืด แสดงดังสมการ (27)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด} = (\Delta L / L_0) \times 100 \quad (27)$$

เมื่อ L_0 = ความยาวเดิม
 ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป

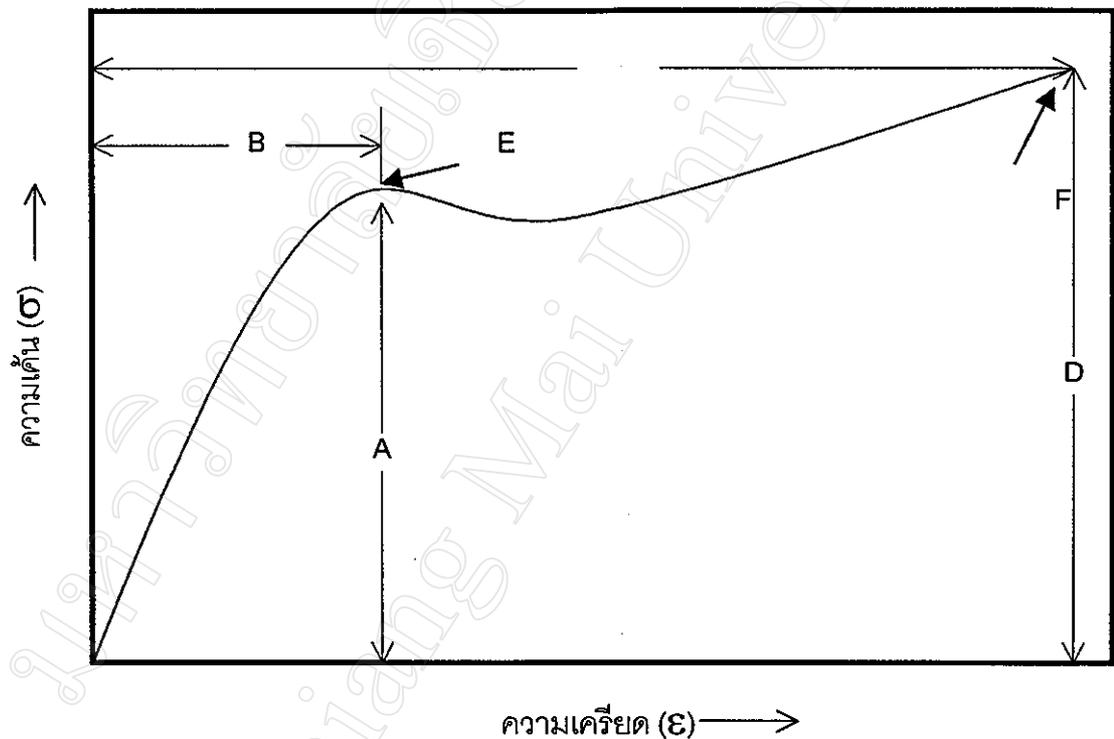


รูป 3.71 การหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืด [62]

เมื่อ ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป L_0 คือ ความยาวเดิม
 L คือ ความยาวหลังจากที่ตั้งวัสดุ

3.4.8.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการทดสอบวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทดสอบว่าเป็นประเภทไหน วัสดุแต่ละประเภทจะให้ความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันออกไป แม้แต่วัสดุประเภทเดียวกันก็อาจจะต่างกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วในการทดสอบ และค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวกับการทดสอบ สำหรับเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุโดยทั่วไปและค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง แสดงดังรูป 3.72



รูป 3.72 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุทั่วไปและค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง [61]

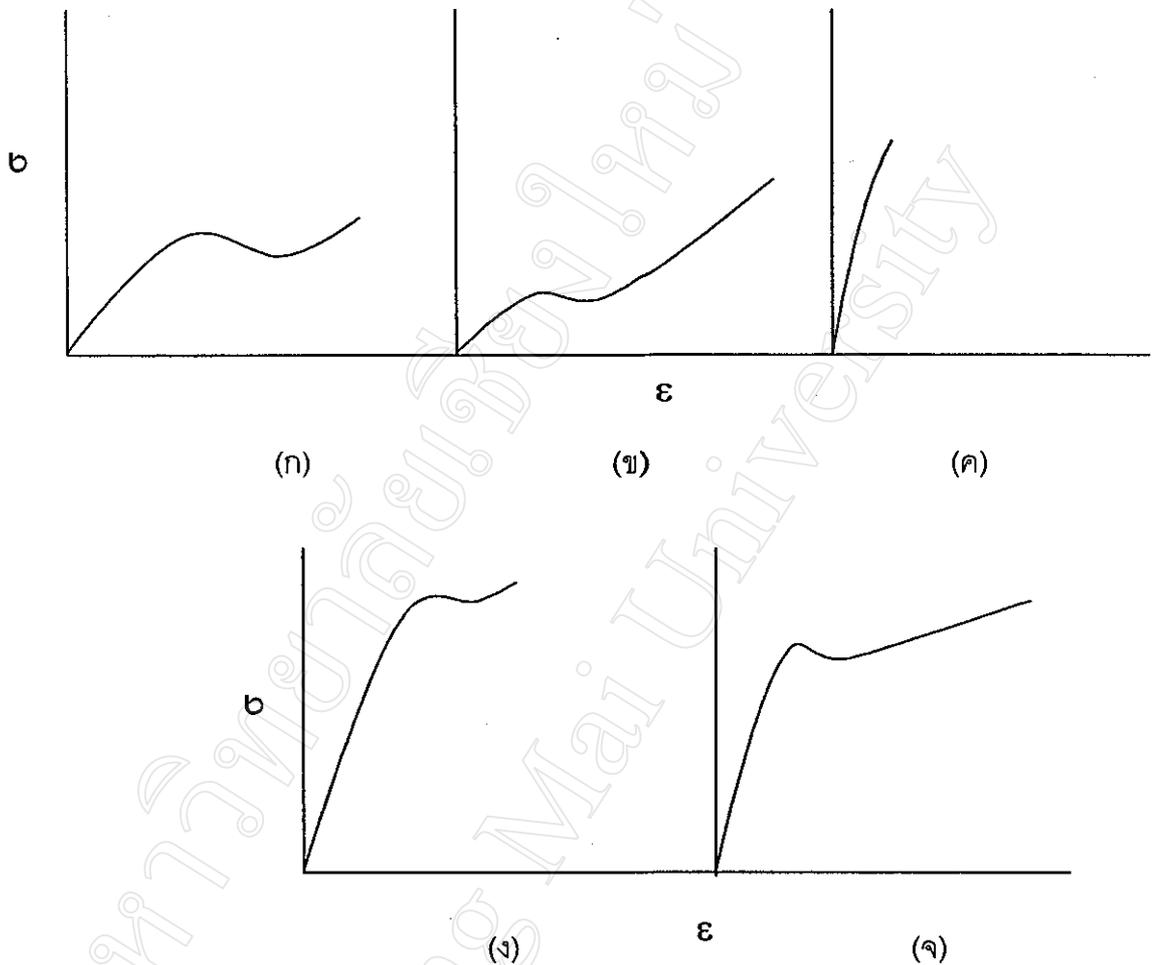
- เมื่อ
- A คือ ความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress)
 - B คือ การยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield)
 - C คือ การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)
 - D คือ ค่าความแข็งสูงสุด (Ultimate strength)
 - E คือ จุดคราก (Yield point)
 - F คือ จุดขาด (Breaking point)

จากรูป 3.72 จะเห็นว่า ในช่วงแรก เมื่อให้แรงดึงกระทำต่อวัสดุ วัสดุจะยืดออกและเมื่อปล่อยแรงออกจะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ โดยที่โครงสร้างของวัสดุนั้นไม่เสียหาย จากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดึงให้มากขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่ง ที่วัสดุจะถูกยืดออกได้โดยไม่ต้องเพิ่มแรง หรือเป็นจุดที่ความเค้นเพิ่มขึ้นโดยที่ไม่มีการเพิ่มความเครียด เรียกจุดนี้ว่า จุดคราก (yield point) ในช่วงนี้โครงสร้างของวัสดุจะเริ่มยืดและเกิดการยืดอย่างถาวร แม้ปล่อยแรงในช่วงนี้ก็ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ จากนั้นวัสดุจะถูกดึงต่อไปจนกระทั่งถึงจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุดที่สามารถทนต่อแรงที่มากระทำได้ เรียกว่า ความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength) [61]

เมื่อนำพอลิเมอร์ต่างๆ ที่มีสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน มาทดสอบความทนต่อแรงดึง จะแสดงลักษณะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่แตกต่างกัน ดังรูป 3.73 และตาราง 3.29

ตาราง 3.29 ลักษณะเฉพาะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่สัมพันธ์กับสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ [61]

สมบัติของพอลิเมอร์	ลักษณะเฉพาะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด			
	ความเค้น ณ จุดคราก	แรงดึง สูงสุด	ค่าการยืด ณ จุดขาด	ลักษณะของเส้นโค้ง จากรูป 3.73
อ่อนนุ่มและฉีกขาดง่าย (soft and weak)	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	(ก)
อ่อนนุ่มและเหนียว (soft and tough)	ต่ำ	เท่ากับความเค้น ณ จุดคราก	สูง	(ข)
แข็งและเปราะ (hard and brittle)	ไม่มี	ปานกลาง	ต่ำ	(ค)
แข็งและแตกหักยาก (hard and strong)	สูง	สูง	ปานกลาง	(ง)
แข็งและเหนียว (hard and tough)	สูง	สูง	สูง	(จ)



รูป 3.73 เส้นโค้งความเค้น(σ)-ความเครียด(ϵ)

ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆ กัน [61]

- เมื่อ
- (ก) คือ เส้นโค้งของพอลิเมอร์ที่อ่อนนุ่มและฉีกขาดง่าย
 - (ข) คือ เส้นโค้งของพอลิเมอร์ที่อ่อนนุ่มและเหนียว
 - (ค) คือ เส้นโค้งของพอลิเมอร์ที่แข็งและเปราะ
 - (ง) คือ เส้นโค้งของพอลิเมอร์ที่แข็งและแตกหักยาก
 - (จ) คือ เส้นโค้งของพอลิเมอร์ที่แข็งและเหนียว

3.4.8.1.5 มอดุลัส

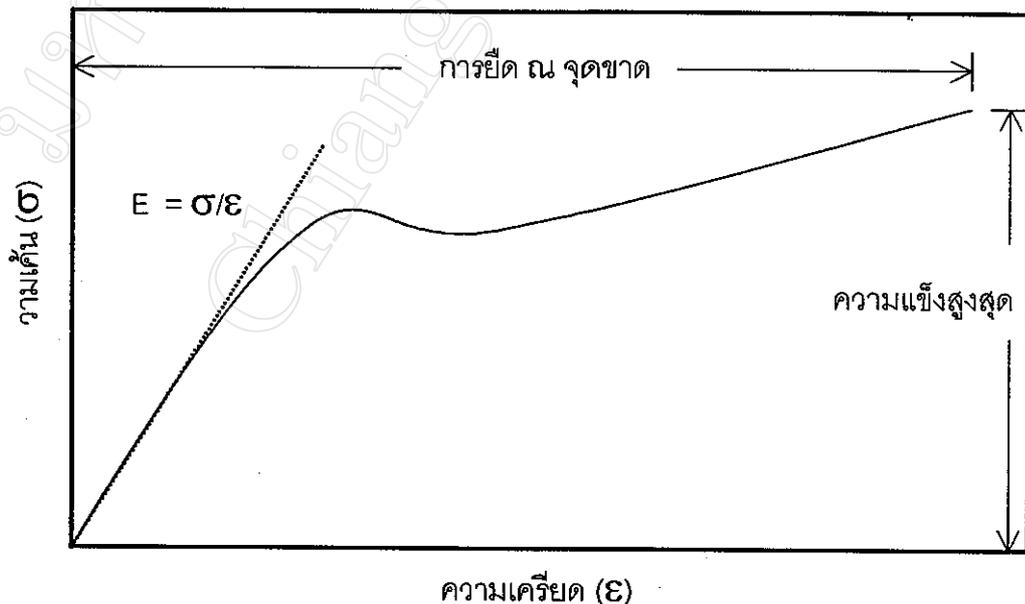
มอดุลัส (modulus) หรือมอดุลัสแบบยืดหยุ่น (elastic modulus) หรือ มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือ มอดุลัสของยัง (Young's modulus) เป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความเค้น ดังสมการ (28) ค่ามอดุลัสเป็นสิ่งที่วัดความแข็งแรงแหรือความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุ ซึ่งเป็นความสามารถในการแปรรูปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ขณะรับแรง

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (28)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} E &= \text{ค่ามอดุลัส} \\ \sigma &= \text{ความเค้น} \\ \epsilon &= \text{ความเครียด} \end{aligned}$$

การหาค่ามอดุลัสจากกราฟความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูป 3.74 โดยหาค่ามอดุลัสได้จากการวัดความชันของเส้นสัมผัสเริ่มแรก ซึ่งเป็นส่วนที่ชันที่สุดของกราฟ



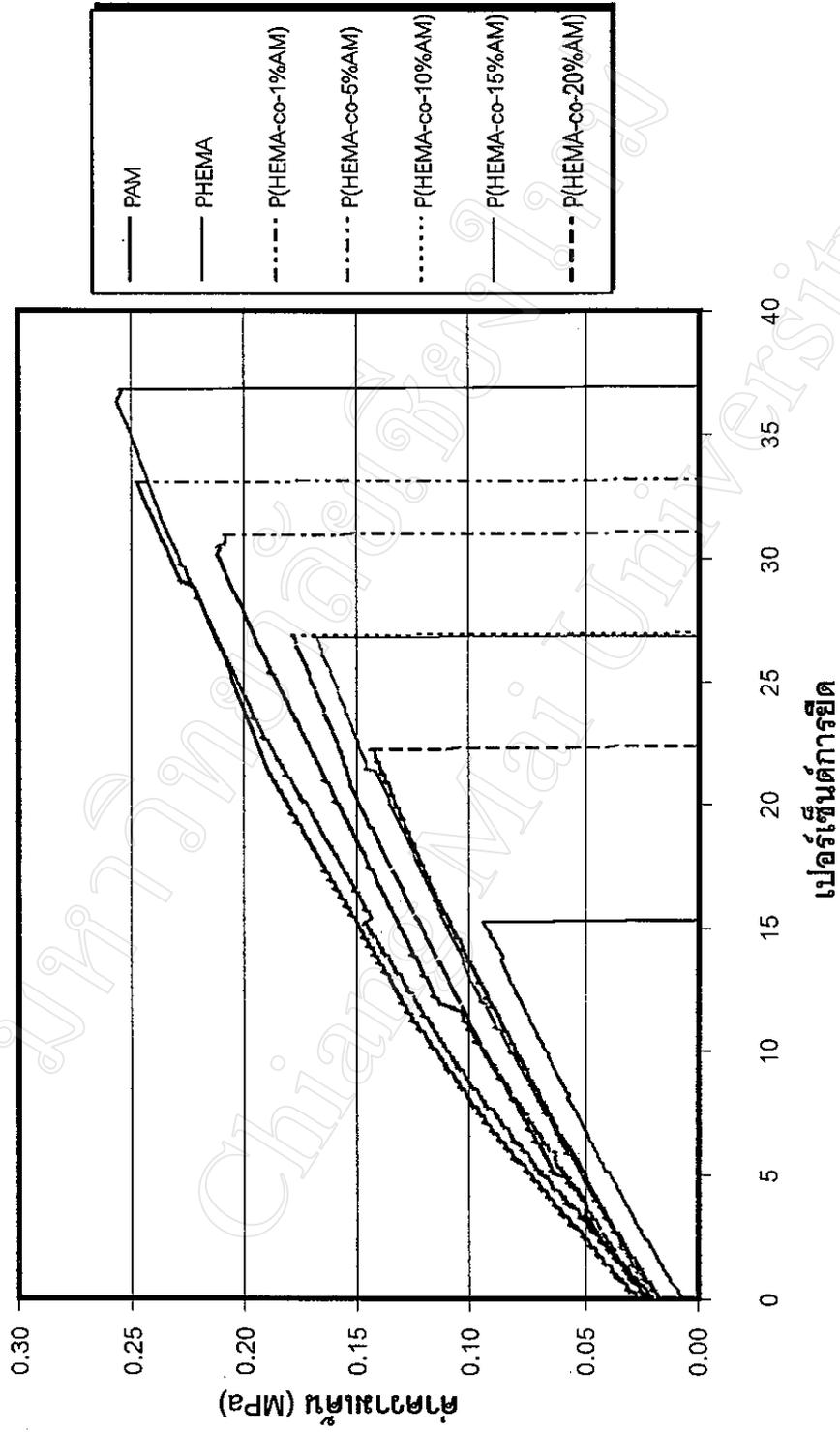
รูป 3.74 การหาค่ามอดุลัส จากกราฟความเค้น-ความเครียด [61]

3.4.8.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

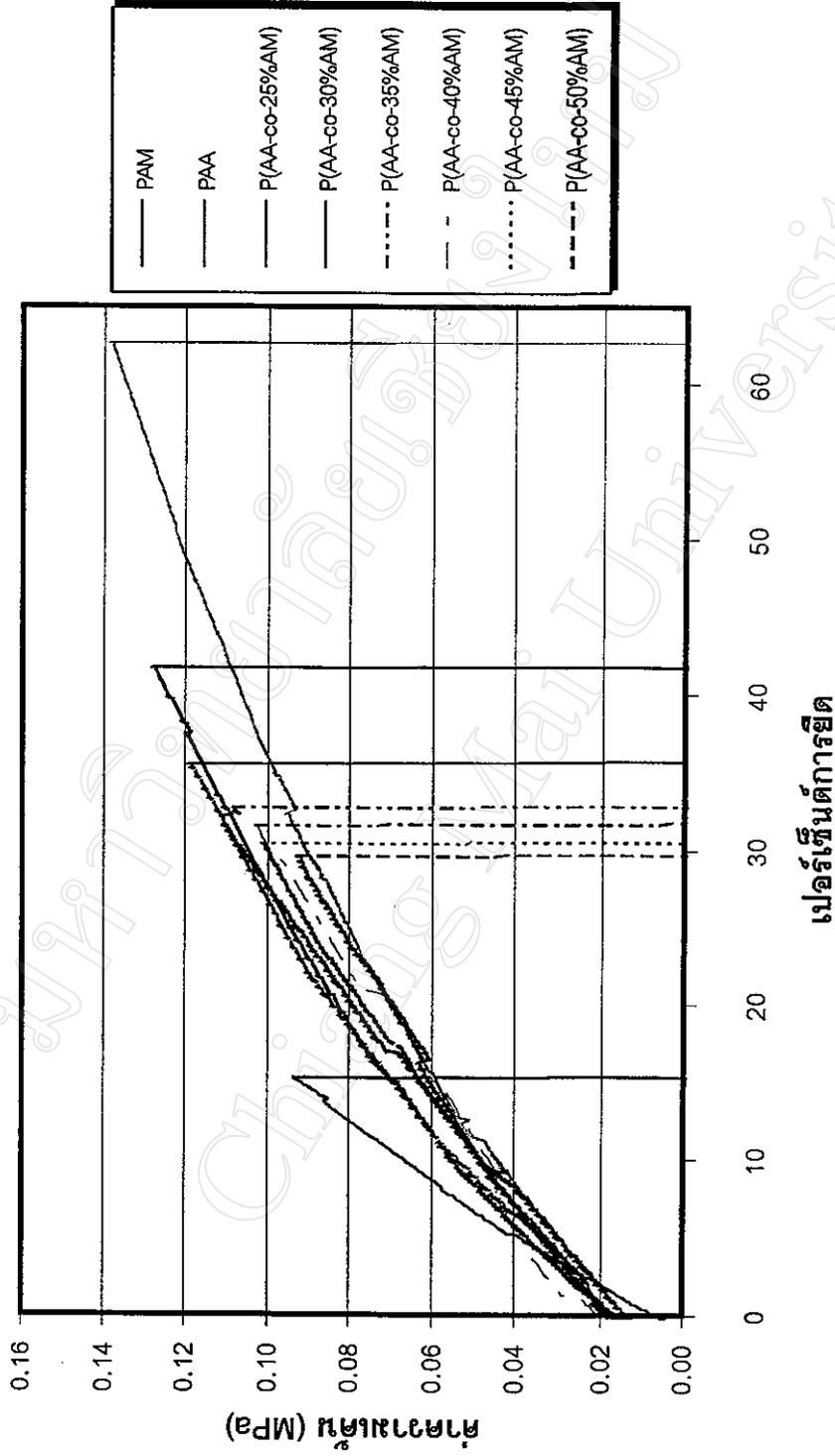
ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล รุ่น LRX ของบริษัท LLOYD ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยนำพอลิเมอร์ไปแช่ในน้ำกลั่น 1 คืน แล้วตัดให้มีขนาด 1.0×10.0 เซนติเมตร ประมาณ 50 ชิ้นตัวอย่าง จากนั้นนำไปทดสอบ โดยมีสถานะของการทดสอบดังนี้

ระยะห่างของตัวรองรับตัวอย่าง (gauge length)	=	50.0 มิลลิเมตร
ตัววัดแรง (load cell)	=	10 นิวตัน
ความเร็วของคานสำหรับยึดตัววัดแรง (cross-head speed)	=	10 มิลลิเมตร / นาที
อุณหภูมิ	=	25 ± 1 °C
ความชื้นสัมพัทธ์	=	55 – 60%

เส้นกราฟความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) จากการทดลองครั้งที่ 1 แสดงดัง รูป 3.75 และ 3.76 ตามลำดับ และค่าความเค้น เปอร์เซ็นต์การยืด และค่ามอดูลัสของยัง ของไฮโดรเจลต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังตาราง 3.3 และความสัมพันธ์ของค่าความเค้น เปอร์เซ็นต์การยืด และค่ามอดูลัสของยังกับปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ตอนเริ่มต้น (monomer feed) แสดงดังรูป 3.77 – 3.82 ตามลำดับ และแสดงความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ กับปริมาณอะคริลาไมด์ ในรูปของสมการ ดังสมการ (29) – (34) แสดงในตาราง 3.31



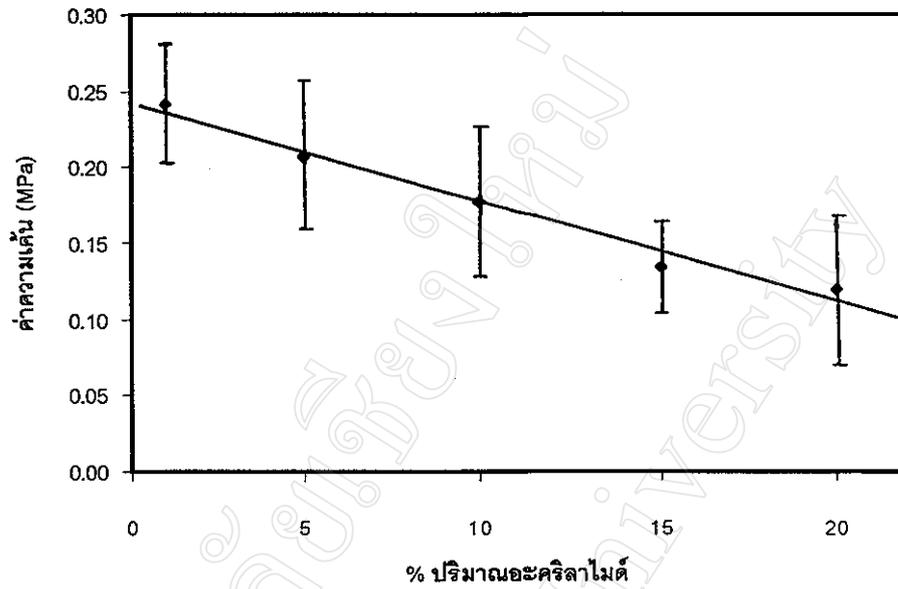
รูป 3.75 เส้นกราฟความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิอะคริลาไมด์ พอลิฮีมา พอลิ(ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน ความหนา 0.51±0.05 มม.



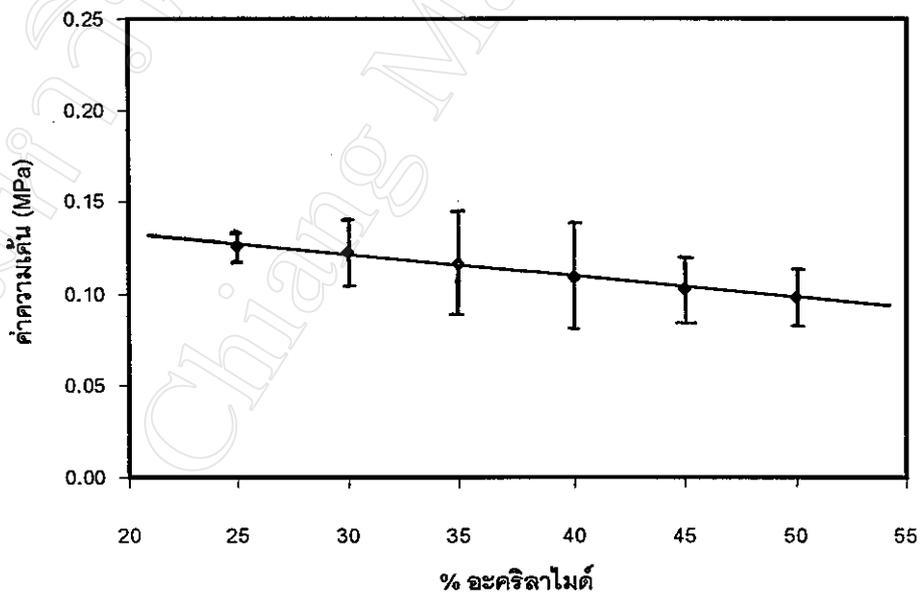
รูป 3.76 เส้นกราฟความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิอะคริลาไมด์ พอลิอะคริลิกเอซิด พอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ที่มีปริมาณอะคริลาไมด์ต่างๆ กัน ความหนา 0.58±0.06 มม.

ตาราง 3.30 ค่าความเค้น เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสของยัง ของไฮโดรเจลต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้

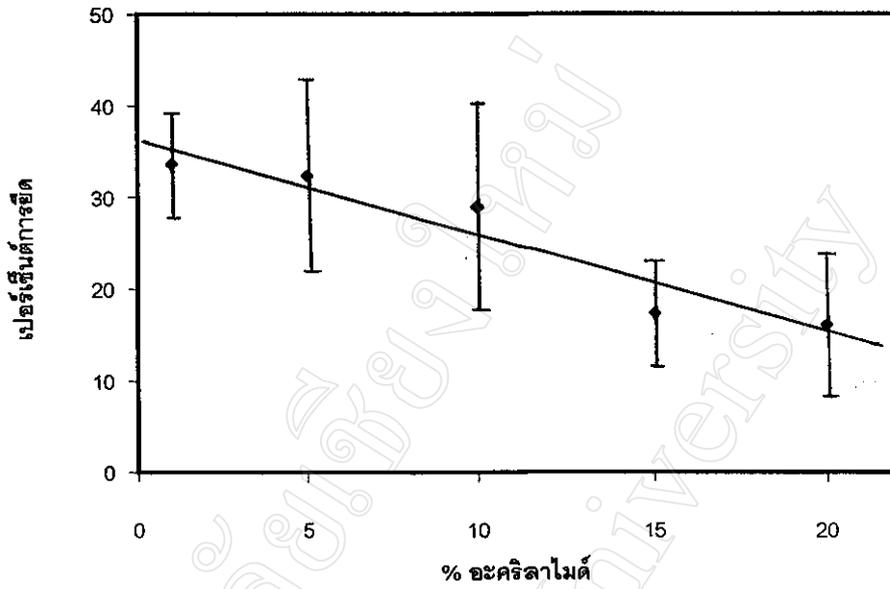
พอลิเมอร์	ความหนา (มม.)	ค่าความเค้น (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืด ณ จุดขาด	ค่ามอดูลัสของยัง (MPa)
PAM	1.73 ± 0.91	0.09 ± 0.04	15 ± 6	$(7.5 \pm 1.7) \times 10^5$
PHEMA	0.51 ± 0.04	0.26 ± 0.05	34 ± 9	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^6$
P(HEMA-co-1%AM)	0.44 ± 0.12	0.24 ± 0.04	34 ± 6	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^6$
P(HEMA-co-5%AM)	0.47 ± 0.07	0.21 ± 0.05	32 ± 11	$(1.0 \pm 0.2) \times 10^6$
P(HEMA-co-10%AM)	0.54 ± 0.06	0.18 ± 0.05	29 ± 12	$(1.1 \pm 0.4) \times 10^6$
P(HEMA-co-15%AM)	0.50 ± 0.05	0.13 ± 0.03	17 ± 6	$(1.0 \pm 0.4) \times 10^6$
P(HEMA-co-20%AM)	0.58 ± 0.03	0.12 ± 0.05	16 ± 8	$(8.4 \pm 1.5) \times 10^5$
PAA	0.47 ± 0.08	0.13 ± 0.02	54 ± 18	$(4.8 \pm 1.6) \times 10^5$
P(AA-co-25%AM)	0.62 ± 0.03	0.13 ± 0.01	42 ± 8	$(4.8 \pm 0.9) \times 10^5$
P(AA-co-30%AM)	0.54 ± 0.06	0.12 ± 0.02	37 ± 12	$(5.2 \pm 1.3) \times 10^5$
P(AA-co-35%AM)	0.58 ± 0.04	0.12 ± 0.03	34 ± 15	$(5.5 \pm 1.3) \times 10^5$
P(AA-co-40%AM)	0.50 ± 0.04	0.11 ± 0.03	31 ± 13	$(5.2 \pm 2.4) \times 10^5$
P(AA-co-45%AM)	0.61 ± 0.08	0.10 ± 0.02	32 ± 10	$(6.6 \pm 1.7) \times 10^5$
P(AA-co-50%AM)	0.65 ± 0.06	0.10 ± 0.02	29 ± 10	$(5.5 \pm 1.8) \times 10^5$



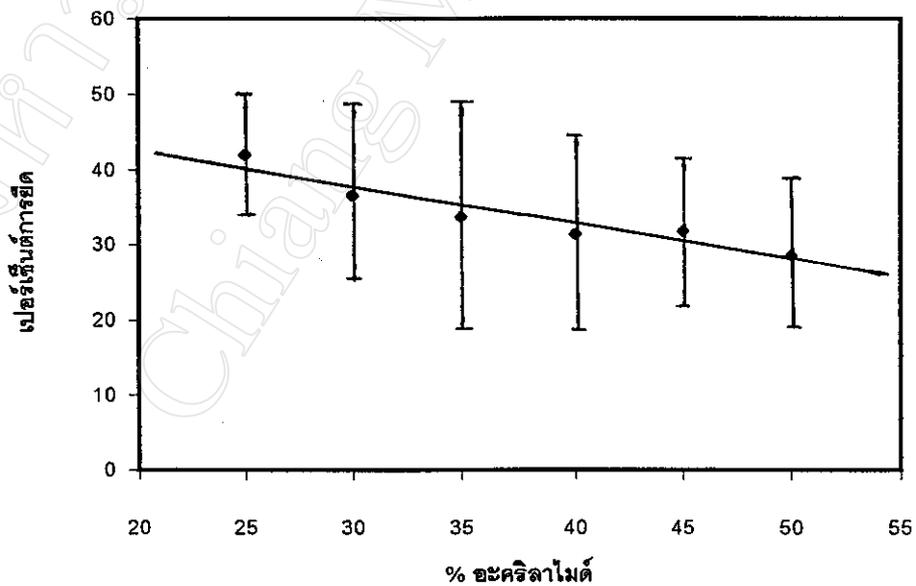
รูป 3.77 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและปริมาณอะครีลาไมด์
ในพอลิ(ฮีมา-โค-อะครีลาไมด์) ความหนา 0.51 ± 0.05 มม.



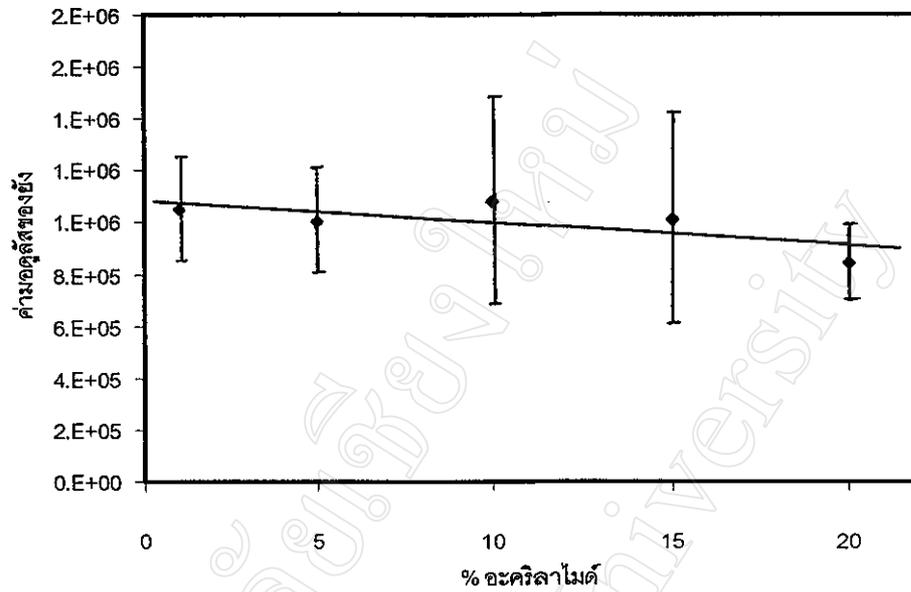
รูป 3.78 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและปริมาณอะครีลาไมด์
ในพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะครีลาไมด์) ความหนา 0.58 ± 0.06 มม.



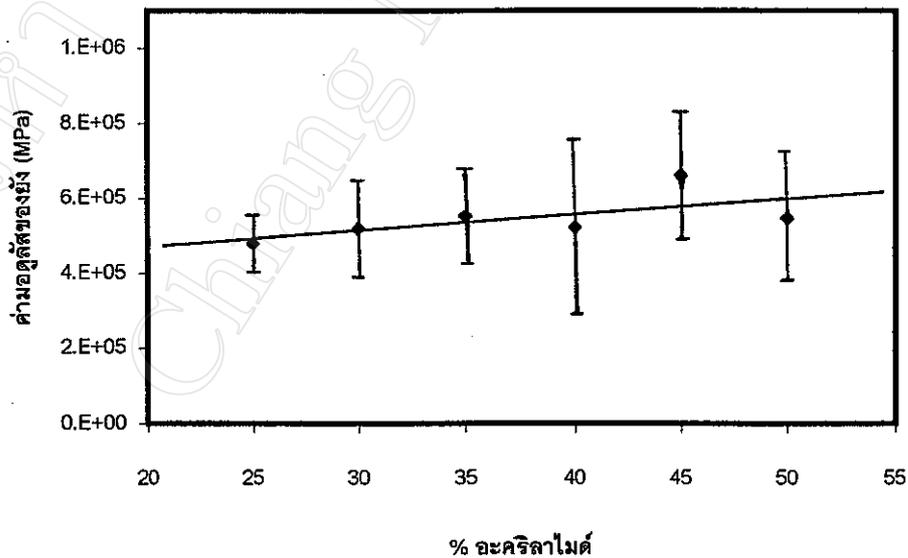
รูป 3.79 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยัด ณ จุดขาดและปริมาณอะคริลาไมด์ในพอลิ (ฮีมา-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.51 ± 0.05 มม.



รูป 3.80 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยัด ณ จุดขาดและปริมาณอะคริลาไมด์ ในพอลิ(อะคริลิกเอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.58 ± 0.06 มม.



รูป 3.81 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของแข็งและปริมาณอคริลาไมด์ในพอลิ (ฮีมา-โค-อคริลาไมด์) ความหนา 0.51 ± 0.05 มม.



รูป 3.82 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของแข็งและปริมาณอคริลาไมด์ในพอลิ (อคริลิกแอซิด-โค-อคริลาไมด์) ความหนา 0.58 ± 0.06 มม.

ตาราง 3.31 สมการความสัมพันธ์ของค่าความเค้น เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยังกับปริมาณอะคริลาไมด์ของ พอลิ(อีมา-โค-อะคริลาไมด์) และพอลิ(อะคริลิคเอทิลดี-โค-อะคริลาไมด์)

	พอลิ(อีมา-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.51±0.05 มม.	พอลิ(อะคริลิคเอทิลดี-โค-อะคริลาไมด์) ความหนา 0.58±0.06 มม.
ค่าความเค้น	$\sigma = -(0.0066 \pm 0.0025)A_m + (0.24 \pm 0.05)$ (29)	$\sigma = -(0.0012 \pm 0.0004)A_m + (0.16 \pm 0.02)$ (30)
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	$\epsilon = -(1.1 \pm 0.4)A_m + (36 \pm 9)$ (31)	$\epsilon = -(0.48 \pm 0.23)A_m + (52 \pm 11)$ (32)
ค่ามอดูลัสของยัง	$Y = -(8.7 \pm 3.4) \times 10^3 A_m + (1.0 \pm 0.3) \times 10^6$ (33)	$Y = (4.2 \pm 3.2) \times 10^3 A_m + (3.9 \pm 1.6) \times 10^5$ (34)

เมื่อ σ = ค่าความเค้น (MPa) Y = ค่ามอดูลัสของยัง (MPa)
 ϵ = เปอร์เซ็นต์การยืด A_m = %อะคริลาไมด์โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ : กราฟที่เป็นเส้นตรงทุกกราฟที่วิเคราะห์หิเมงานวิจัยนี้ได้ทำการลากเส้นตรงโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์การถดถอย (regression)