

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลสังเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้
ในทางการแพทย์

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF SYNTHETIC POLYMER
HYDROGELS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

นางสาวนภาเกตุ แก้วเมือง รหัส 53364772

นางสาวอรปรียา เพิ่มกาวิ รหัส 53364963

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 25 / 14.8 / 57
เลขทะเบียน..... 16550216
เลขเรียกหนังสือ..... 25-
มหาวิทยาลัยนเรศวร 4 / 196 7 2556

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2556



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน การเตรียมและการศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลสังเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

ผู้ดำเนินโครงการงาน นางสาวนภาเกตุ แก้วเมือง รหัส 53364772
นางสาวอรปรียา เพิ่มกาวิ รหัส 53364963

ที่ปรึกษาโครงการงาน ดร.นพวรรณ ไม้ทอง


ที่ปรึกษาโครงการงานร่วม Dr.Gareth Michael Ross


สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

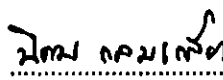
ปีการศึกษา 2556


.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี


.....ที่ปรึกษาโครงการงาน
(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)


.....กรรมการ
(ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์)

.....กรรมการ
(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)


.....กรรมการ
(ดร.นิตม กลมเกลี้ยง)


.....กรรมการ
(อาจารย์อภาภรณ์ จันท์ปรีกษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การเตรียมและศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลสังเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้ในทาง การแพทย์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวนภาเกตุ	แก้วเมือง	รหัส 53364772
	นางสาวอรปรียา	เพิ่มกาวิ	รหัส 53364963
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.นพวรรณ	ไม้ทอง	
ที่ปรึกษาโครงการร่วม	Dr.Gareth Michael Ross		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของไฮโดรเจล 2-อะครีลามิโด-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิคแอซิด เกลือโซเดียมซึ่งเชื่อมต่อด้วยตัวเชื่อมต่อด้านโซเอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาครีเลต เตรียมผ่านปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุโมลอิสระในระบบที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ โดยใช้ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และแสงอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาสัดส่วนขององค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ 2-อะครีลามิโด-2-เมทิลโพรเพนซัลโฟนิคแอซิด เกลือโซเดียม กลีเซอรอล และน้ำ ที่มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจล ทำการศึกษาหาลักษณะเฉพาะและสมบัติที่เกี่ยวข้องสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการทางการแพทย์ เช่น ลักษณะทางกายภาพ ปริมาณน้ำสมดุล อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ และสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึง เป็นต้น ซึ่งแผ่นไฮโดรเจลที่ได้มีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายใน มีสมบัติการยึดเกาะได้ดี โปร่งใส ยืดหยุ่น แต่ค่อนข้างฉีกขาดง่าย จากการทดลอง พบว่าระบบริเริ่มที่แตกต่างกันทำให้แผ่นไฮโดรเจลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมาก พบว่าลักษณะทางกายภาพของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ ลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีเหลืองอ่อน ผิวด้านหน้าลื่น ไม่เรียบ ผิวด้านหลังเหนียว สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว มีความสะดวก และง่ายต่อการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ส่วนลักษณะทางกายภาพของระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต คือ เกิดเจลเมื่อโดนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีขาวใส ผิวด้านหน้าและหลังลื่นเรียบ สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง ไม่เหนียว และยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์ จาก

งานวิจัย พบว่าไฮโดรเจล 2-อะครีลามิโด-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิกแอซิดเกลีโอไซด์ียม มีค่าปริมาณน้ำสมดุลอยู่ในช่วงร้อยละ 97.15 ถึง 99.41 ซึ่งบ่งบอกถึงการเป็นไฮโดรเจลที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง และมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำอยู่ในช่วง 18.69 ถึง 108.31 กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร ส่วนค่าทนต่อแรงดึงของอัตราส่วน RD1.5 มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น โดยมีค่าความแข็งแรง 14.4157 กิโลปาสคาล และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 44.9309 จากข้อมูลผลการทดลอง พบว่าแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ 2-อะครีลามิโด-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิกแอซิด เกลีโอไซด์ียม กลีเซอรอล และน้ำ ที่สังเคราะห์จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาต่อเพื่อนำไปประยุกต์ทางการแพทย์



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ ดร.นพวรรณ ไม้ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ Dr.Gareth Michael Ross อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ที่ได้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธีแก้ไขปัญหารวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ ต้องขอขอบคุณหน่วยงานอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือตอนล่างอาคารมหาธรรมราชา มหาวิทยาลัยนเรศวร พี่ๆ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปใช้สถานที่และเครื่องมือ สำหรับการสังเคราะห์ชิ้นงานเพื่อไปใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรม สั่งสอน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินโครงการ

นางสาวนภาเกตู แก้วเมือง

นางสาวอรปรียา เพิ่มกาวิ

พฤษภาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	3
1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	4
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	4
1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	37
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจล.....	40
3.3 การทดสอบ.....	42

หน้า ฉ

MISSING



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	4
2.1 สมบัติของ AMPS	17
2.2 สมบัติของกลีเซอรอล.....	20
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2 อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำไฮโดรเจล.....	40
4.1 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลที่อัตราส่วนต่างกัน ในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์.....	44
4.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลระหว่างตัวอย่างที่ RD1–RD2 ในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์.....	46
4.3 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลระหว่างตัวอย่างที่ UV1–UV2 ในระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	49
4.4 ค่าปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มที่ต่างกัน คือ ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	53
4.5 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มที่ต่างกัน คือ ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	58
4.6 แสดงอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำในผิวหนังปกติและแผลไฟไหม้ในระดับต่างๆ.....	62
4.7 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จาก ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์.....	64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์.....	9
2.2 ลำดับขั้นตอนการเกิดเจล.....	15
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด.....	24
2.4 กราฟการทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆ กัน.....	25
2.5 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ AMPS.....	29
2.6 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ Glycerol.....	32
2.7 แสดงลักษณะการพองตัวที่ใช้กลีเซอรอลตัวเชื่อมต่อกับ PAA ที่ค่า pH แตกต่างกัน คือ a) pH 10 b) pH 7 c) pH 4.....	33
2.8 แสดงลักษณะการพองตัวที่ใช้กลีเซอรอลตัวเชื่อมต่อกับ PAA ที่ค่า pH แตกต่างกัน คือ pH 7 ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ a) 50 องศาเซลเซียส b) 30 องศาเซลเซียส.....	33
2.9 แผ่นไฮโดรเจลก่อนการพองตัว (1 x 1 x 0.12 เซนติเมตร) ที่เวลา 0 นาทีค่าการพองตัว ร้อยละ 22 ที่ AMPS-Na ⁺ ร้อยละ 40 และ EGDM ร้อยละ 1 โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์.....	34
2.10 แผ่นไฮโดรเจลหลังการพองตัว (4 x 4 x 0.35 เซนติเมตร) ที่เวลา 30 นาทีค่าการพองตัว ร้อยละ 98 ที่ AMPS-Na ⁺ ร้อยละ 40 และ EGDM ร้อยละ 1 โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์.....	35
2.11 การดูดซับน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่เวลาผ่านไปเมื่อแช่แผ่นไฮโดรเจล ไว้ในน้ำกลั่น ที่ 37 องศาเซลเซียส.....	35
2.12 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน a) AMPS-Na ⁺ และไฮโดรเจลผสมชนิด b) CMCTS c) CMC.....	36
2.13 ลักษณะแผ่นไฮโดรเจล a) AMPS-Na ⁺ และไฮโดรเจลผสมชนิด b) CMCTS c) CMC ก่อนและหลังแช่น้ำกลั่นที่ 35.0±1.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วันจนถึงจุดสมดุล ของการดูดซับน้ำ.....	36
3.1 แผนผังการดำเนินการทดลอง.....	39
4.1 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลจาก AMPS-Na ⁺ ต่อ Glycerol ต่อ H ₂ O a) ตัวอย่างที่ RD1 AMPS-Na ⁺ ต่อ Glycerol ต่อ H ₂ O = (6.00 ต่อ 0.00 ต่อ 3.00) b) ตัวอย่างที่ RD2 AMPS-Na ⁺ ต่อ Glycerol ต่อ H ₂ O = (6.00 ต่อ 1.00 ต่อ 3.00).....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลที่อัตราส่วนจาก AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O	
a) ตัวอย่างที่ RD1.1 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.00 ต่อ 3.00)	
b) ตัวอย่างที่ RD1.2 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.25 ต่อ 1.75)	
c) ตัวอย่างที่ RD1.3 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.50 ต่อ 1.50)	
d) ตัวอย่างที่ RD1.4 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.75 ต่อ 1.25)	
e) ตัวอย่างที่ RD1.5 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 1.00 ต่อ 2.00).....	47
4.3 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลที่อัตราส่วนจาก AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O	
a) ตัวอย่างที่ UV1.1 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.00 ต่อ 3.00)	
b) ตัวอย่างที่ UV1.2 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.25 ต่อ 1.75)	
c) ตัวอย่างที่ UV1.3 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.50 ต่อ 1.50)	
d) ตัวอย่างที่ UV1.4 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 0.75 ต่อ 1.25)	
e) ตัวอย่างที่ UV1.5 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6.00 ต่อ 1.00 ต่อ 2.00).....	50
4.4 a) ไฮโดรเจลที่ได้จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ b) ไฮโดรเจลที่ได้จากระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	51
4.5 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำสมดุลของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มที่ต่างกัน.....	53
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล ณ เวลาต่างๆ ของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์.....	54
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล ณ เวลาต่างๆ ของระบบริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	54
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล ณ เวลาต่างๆ ของระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่ต่างกันในอัตราส่วนที่ต่างกัน.....	55
4.9 การทดสอบอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ.....	57
4.10 แผนภูมิแสดงอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มที่ต่างกัน.....	58
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของการเตรียมไฮโดรเจลจากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์.....	59
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของการเตรียมไฮโดรเจลจากระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของระบบริเริ่มปฏิบัติการที่ต่างกัน ในอัตราส่วนที่ต่างกัน.....	60
4.14 การทดสอบสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึง a) ก่อนการทดสอบสมบัติเชิงกล b) หลังการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	64
4.15 แผนภูมิแสดงความแข็งแรงดึงของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มด้วยปฏิบัติการรีดอกซ์.....	65
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุลและอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจล เพื่อนำไปประยุกต์ในทางการแพทย์.....	69



สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

AMPS- Na^+ = 2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic
Acid Sodium Salt

EWC = Equilibrium Water Content

WVTR = Water Vapor Transmission Rate

pH = Power of Hydrogen Ion Concentration

RD = การเตรียมในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

UV = การเตรียมในระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันได้มีการนำพอลิเมอร์มาใช้งานด้านต่างๆ เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะนำมาใช้ทางด้านการแพทย์โดยได้มีการนำพอลิเมอร์มาสังเคราะห์เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราวหรือนำมาสังเคราะห์เป็นแผ่นปิดแผล ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุให้มีสมบัติที่เหมาะสม เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราวหรือแผ่นปิดแผลและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ต่อไป

ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุไฮโดรเจล (Hydrogel) มาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เพื่อนำมาเป็นวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราวหรือแผ่นปิดแผลไฮโดรเจล เนื่องจากไฮโดรเจลมีสมบัติที่น่าสนใจและเหมาะสม คือ สามารถเข้าได้กับสิ่งมีชีวิต ไม่มีสมบัติต่อต้านเนื้อเยื่อ นิ่ม และมีความยืดหยุ่น มีความตึงผิว (Interfacial Tension) ระหว่างไฮโดรเจลกับของเหลวที่อยู่ภายในร่างกายและเนื้อเยื่อต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อข้างเคียง ไม่ละลายในน้ำหรือตัวทำละลายใดๆ ใต้ง่าย สามารถดูดซับและปลดปล่อยสารละลายหรือของเหลวต่างๆ ได้ดี และยังสามารถป้องกันการติดเชื้อจากแบคทีเรียได้อีกด้วย

จากงานวิจัยหลายชิ้น [1, 24-35] พบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ 2-อะครีลามิโด-2-เมทิลโพรเพน ซัลโฟนิคแอซิด โซเดียมเกลือ (2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic Acid Sodium Salt, AMPS- Na^+) สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นวัสดุปิดแผล เพื่อช่วยในการสมานแผลที่มีประสิทธิภาพ กล่าวคือ มีหมู่ซัลโฟนิคซึ่งเป็นหมู่ไฮโดรฟิลิก ละลายน้ำได้ดี ดังนั้นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จึงมีน้ำเป็นองค์ประกอบ พอลิเมอร์ที่ได้จึงมีคุณสมบัติในด้านการรักษาความชุ่มชื้นบริเวณบาดแผล อากาศสามารถถ่ายเทเข้าออกได้ สามารถดูดซับของเหลว หรือสารพิษจากบาดแผลได้ดี และไม่มีพิษหรือทำปฏิกิริยากับบาดแผล มีลักษณะที่ยืดหยุ่นได้ดี จึงสามารถถูกนำมาทดแทนวัสดุสมานแผลที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น พอลิเมอร์ประเภทยูรีเทนที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการรักษาบาดแผล แต่มีราคาสูง โดยเฉพาะการรักษาบาดแผลที่เกิดจากน้ำร้อนลวกหรือแผลไฟไหม้ ซึ่งแผลลักษณะนี้เป็นแผลที่มีพื้นที่กว้างจะต้องใช้เวลาในการรักษานาน ทำให้ผู้ป่วยเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาสูง ปัญหาเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการเลือกสังเคราะห์มอนอเมอร์ AMPS- Na^+ ร่วมกับกลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งกลีเซอรอลมีลักษณะเฉพาะต่างๆ เช่น ส่งเสริมการเจริญเติบโตของเซลล์ผิวหนัง ช่วย

ให้เซลล์ที่ถูกทำลายเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ สามารถช่วยรักษาบาดแผลให้หายได้อย่างรวดเร็ว เป็นสารที่สร้างความชุ่มชื้นให้แก่ผิวหนัง ส่งผลให้ผิวหนังบริเวณนั้นๆ ปกคลุมไปด้วยความชุ่มชื้นและยังช่วยรักษาสมดุลน้ำให้ชั้นผิวหนัง จากลักษณะเฉพาะต่างๆ ของกลีเซอรอล จึงนำกลีเซอรอลมาเป็นมอนอเมอร์ที่ใช้ร่วมกับ AMPS-Na^+ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ โดยผ่านระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Initiation) โดยตัวรีดิวซ์ ซึ่งตัวรีดิวซ์ที่ใช้มักจะเป็นพวกเกลือของเหล็กและโลหะอื่นๆ ใส่ลงไประหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และให้ฟรีแรดิคัลไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ ซึ่งลักษณะพิเศษของปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ จะมีพลังงานกระตุ้นต่ำมาก ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่างๆ และผ่านระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Photo Initiation) โดยระบบริเริ่มด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตนั้นเป็นระบบที่อาศัยพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ตในการทำให้ตัวริเริ่มแตกตัวเพื่อให้ฟรีแรดิคัลไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาอัตราส่วนการเตรียมมอนอเมอร์ชนิด AMPS-Na^+ กลีเซอรอล และน้ำเพื่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยผ่านระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และผ่านระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ และช่วยลดปริมาณการใช้มอนอเมอร์ AMPS-Na^+ ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีต้นทุนสูง ราคาแพง ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล

ในงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจในมอนอเมอร์ AMPS-Na^+ เนื่องจากมีหมู่ซัลโฟนิคซึ่งเป็นหมู่ไฮโดรฟิลิก ละลายในน้ำได้ดี ดังนั้นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จึงมีน้ำเป็นองค์ประกอบ พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีข้อดี คือ สามารถเกาะติดกับผิวหนังได้ดี ไม่ติดกับเนื้อเยื่อที่สร้างขึ้นใหม่ และสามารถยอมให้ออน้ำ รวมถึงแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านได้ นอกจากนั้นยังสามารถเข้ากับสิ่งมีชีวิตได้ [1] ส่วนกลีเซอรอล ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีหมู่ไฮดรอกซิล มีสมบัติในละลายน้ำได้ดี การจับกับน้ำได้ดี (Hydroscopic) เป็นสารที่มีสามารถในการเก็บความชื้นได้ (Humectants) และยังเป็นสารที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย [17, 34] ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักในการนำกลีเซอรอลมาใช้เป็นองค์ประกอบร่วมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บความชื้น การดูดซับน้ำของแผ่นพอลิเมอร์สังเคราะห์ และศึกษาสมบัติทางกายภาพ คือ ปริมาณสมดุล (Equilibrium Water Content, EWC) ทหาอัตราการแพร่ผ่านของอน้ำ (Water Vapour Transmission Rate, WVTR) และทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ให้กับแผ่นไฮโดรเจล

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลจาก AMPS- Na^+ กลีเซอรอล และน้ำในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจากระบบริเริ่มที่ต่างกัน คือ ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในรูปแบบของแผ่นบาง

1.2.2 เพื่อศึกษาหาปริมาณน้ำสมดุล อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ และทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึงของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

1.3 ขอบเขตในการดำเนินงานโครงการ

1.3.1 ตัวแปรควบคุม

1.3.1.1 ตัวริเริ่มของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ แอสคอร์บิกแอซิด (Ascorbic Acid) และออกซิเจนโมโนเปอร์ซัลเฟต คอมพาวนด์ (OXONE, Monopersulfate Compound)

1.3.1.2 ตัวริเริ่มของระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต คือ 2-ไฮดรอกซี-2-เมทิล-1-ฟีนีลโพรพานอน (2-Hydroxy-2-Methyl-1-Phenylpropanone)

1.3.1.3 ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ คือ เอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาครีเลต (Ethylene Glycol Dimethacrylate)

1.3.1.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิห้อง

1.3.1.5 ระยะเวลาในการเกิดเจล

1.3.2 ตัวแปรต้น

1.3.2.1 อัตราส่วนของสารผสมระหว่าง 2-อะครีลาไมด์-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิคแอซิด เกลือโซเดียม กลีเซอรอล และน้ำ

1.3.2.2 ระบบริเริ่มที่ต่างกัน คือ ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

1.3.3 ตัวแปรตาม

1.3.3.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

1.4.1 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.4.2 อาคารมหาธรรมราชา มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ไฮโดรเจล

การสังเคราะห์พอลิเมอร์อุ้มน้ำ (Water Absorbent Polymer) เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1938 ทำการพอลิเมอไรเซชันจากมอนอเมอร์อะคริลิกแอซิดและไดไวนิลเบนซีนโดยมีน้ำเป็นสารตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา และในปี ค.ศ. 1950 ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ไฮโดรเจลขึ้นเป็นครั้งแรก โดยใช้ไฮดรอกซีอัลคิลเมทาคริลเลตเป็นมอนอเมอร์ เพื่อเตรียมผลิตเป็นคอนแทคเลนส์แบบนุ่ม (Soft Contact Lens) ส่วนการผลิตไฮโดรเจลเป็นสินค้าและเป็นที่นิยมกันมาก คือ การผลิตเป็นผ้าอ้อมสำหรับเด็กโดยบริษัทในเยอรมันและฝรั่งเศสที่ผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1980 และได้มีการนำไฮโดรเจลมาใช้งานด้านการแพทย์ เช่น การผลิตไฮโดรเจลเป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้น้ำร้อนลวก เนื่องจากไฮโดรเจลมีความชื้นสูงและมีรูพรุนเพื่อให้ออกซิเจนสามารถผ่านรูพรุนของไฮโดรเจลได้ ร่างกายจึงสามารถสร้างเนื้อเยื่อได้ดีขึ้น ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้มีการพัฒนาไฮโดรเจลในด้านการส่งยา ด้วยสมบัติไฮโดรเจลที่ดูดซับได้ดี จึงสามารถกักเก็บและปลดปล่อยยาออกมาในปริมาณที่ต้องการ

ไฮโดรเจลที่ผลิตขึ้นในปัจจุบันมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับความจำเป็นในด้านการใช้งาน เช่น การผลิตเป็นคอนแทคเลนส์ซึ่งคอนแทคเลนส์มีทั้งแบบแข็งและแบบนุ่ม โดยคอนแทคเลนส์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ไฮโดรเจลจะเป็นคอนแทคเลนส์แบบนุ่ม วัสดุที่นิยมนำมาผลิต เช่น พอลิไฮดรอกซีเมทาคริลเลต พอลิเมทาคริลเลตแอซิด พอลิไดเมทิลอะคริลาไมด์ เป็นต้น ข้อดีของคอนแทคเลนส์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ไฮโดรเจล คือ มีความยืดหยุ่นสูง มีอัตราการขยายตัวเนื่องจากการบวมสูง และมีพื้นผิวที่ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง หรือผลิตเป็นวัสดุปิดแผลโดยไฮโดรเจลมีตัวยารักษาบาดแผลบรรจุอยู่และจะปลดปล่อยยาออกมาจากไฮโดรเจล ในขณะที่เดียวกันรูพรุนของแผ่นไฮโดรเจลสามารถยอมให้ออกซิเจนผ่านสู่ผิวหนังได้ บาดแผลจึงหายเร็วขึ้น ส่วนการประยุกต์ใช้งานที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ การนำไฮโดรเจลเคลือบหรือหุ้มด้วยตัวยารักษา เพื่อควบคุมให้การปลดปล่อยยามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการนำไฮโดรเจลมาใช้จะส่งผลดีต่อการควบคุมการปลดปล่อยตัวยานานขึ้น หรือมีประโยชน์ที่สามารถคัดขนาดสารที่ต้องการปลดปล่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮโดรเจลยังสามารถนำไปใช้ในด้านธุรกิจความงาม เช่น การผลิตแผ่นมาร์คหน้า ที่มีไฮโดรเจลที่ช่วยกักเก็บตัวยารักษาผิวพรรณ ในปัจจุบันมีการนำไฮโดรเจลมาผลิตเป็นอิเล็กทรอนิกส์ โดยผลิตจากพอลิอะคริลา-

ไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นต้นกับบิสอะคริลาไมด์ มีประโยชน์ในการใช้แยกโมเลกุลของสารที่มีประจุออกจากกัน เช่น การแยกดีเอ็นเอ เป็นต้น โดยโมเลกุลของดีเอ็นเอประกอบด้วยหมู่ฟอสเฟตจำนวนมาก ดีเอ็นเอมีประจุเป็นลบ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าดีเอ็นเอจะเคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวกจึงเกิดการแยกเฟสขึ้น

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ [4] โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำที่เรียกว่าส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Group) เช่น หมู่ $-OH$, $-COOH$, $-CONH_2$, $-CONH-$ และ $-SO_3$ เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Group) เช่น หมู่ $-CH_2-$ และ $-CH_3-$ เป็นต้น [6] ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ ในสายโซ่ ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากมายและโมเลกุลมีการพันตัวกันหรือขดตัวกันอยู่ ทำให้ภายในโครงสร้างโดยรวมเกิดรูพรุนเล็กๆ มากมาย สมบัติเด่นของไฮโดรเจล คือสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นร่างตาข่าย (Crosslinked Network Structure) (ร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 90) พร้อมทั้งสามารถพองตัวหรือขยายตัวออกได้และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป นอกจากนั้นยังไม่สามารถในตัวทำลายทุกชนิด [4]

2.1.2 ประเภทของไฮโดรเจล

การจำแนกประเภทของไฮโดรเจลสามารถจำแนกได้ 4 ประเภท ตามลักษณะต่างๆ ดังนี้

2.1.2.1 จำแนกตามลักษณะการสังเคราะห์ (Frabrication of Hydrogel) [5]

ไฮโดรเจลแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ที่ได้เป็น 4 แบบ คือ

ก. ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast Film) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์มมักนำไปใช้เพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ แสดงดังรูป 2.1

ข. ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายที่เตรียมจากการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerisation) ระหว่างสารละลายผสมมอนอเมอร์ (Monomer) ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และตัวเชื่อมสายโซ่ (Crosslinked Agent) หรือบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นเทลงในแม่พิมพ์โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ แสดงดังรูป 2.1

ค. ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการได้ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าหรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เป็นต้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ แสดงดังรูป 2.1

ง. ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating Network) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์กเป็น ไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงมาก เทคนิคนี้จึงเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่ง โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ แสดงดังรูป 2.1

2.1.2.2 จำแนกตามขนาดของรูพรุน [5]

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุนออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

ก. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous Hydrogel) ไฮโดรเจลชนิดนี้เตรียมได้โดยการตกตะกอนพอลิเมอร์ในตัวกลางที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ สีขาว ขุ่น มัว มองเห็นไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) แต่โปร่งแสง

ข. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous Hydrogel) ไฮโดรเจลชนิดนี้เตรียมได้โดยการพอลิเมอไรเซชันในตัวกลางที่ทั้งมอนอเมอร์และตัวเชื่อมต่อนี้ สามารถละลายได้ดีทั้งคู่ ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดเล็ก ใส เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

2.1.2.3 จำแนกตามลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้าง [7]

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้างออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

ก. นอนไอออนิกพอลิเมอร์ (Non-Ionic Polymer) นอนไอออนิกพอลิเมอร์จะมีการดูดซับน้ำหรือของเหลวเข้าไปภายใน โครงสร้างโดยอาศัยความแตกต่างของโครงสร้างไฮโดรเจลซึ่งมีส่วนที่มีระเบียบและไม่ระเบียบ (Entropic Interactions) และส่วนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ ที่อยู่ตามความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยหมู่ที่ชอบน้ำจะทำการเชื่อมต่อนพันธะกับโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ซึ่งการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับ การเชื่อมพันธะระหว่างโครงสร้างของโมเลกุลกับพอลิเมอร์ของการดูดซับเมื่อทำการเชื่อมต่อนพันธะแล้วจะทำให้สาย

ของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำแต่ก็สามารถที่จะเปลี่ยนรูปร่างหรือปริมาณได้ จะทำให้เจลชนิดนี้มีการพองตัวและเป็นเจลที่นุ่ม (Soft Gel)

ข. ไอออนิกพอลิเมอร์ (Ionic Polymer) ไอออนิกพอลิเมอร์ จะมีการดูดซับน้ำได้มากกว่าแบบนอนไอออนิกพอลิเมอร์เนื่องจากมีจำนวนไอออนมากกว่าและมีแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นเป็นแบบไอออนไดโพล (Ion-Dipole Interaction) โดยโครงสร้างของไอออนิกพอลิเมอร์จะมีหมู่ที่มีประจุลบหรือบวก บนสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ดังนั้นเจลจึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำเข้าล้อมรอบตัวเองได้

2.1.2.4 จำแนกตามชนิดพันธะภายในโครงสร้าง [7]

การเตรียมไฮโดรเจลโดยการทำให้เกิดพันธะภายในโครงสร้างนั้นจะมีการครอสลิงค์ของพอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่ายหลายมิติซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของไฮโดรเจล โดยชนิดของพันธะที่เชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์นั้น แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

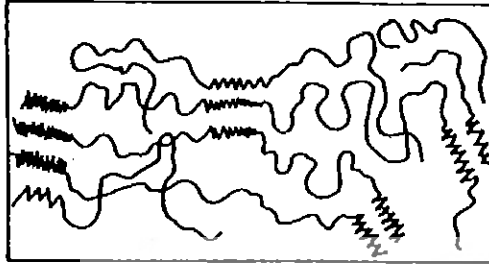
ก. พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonds) พันธะโควาเลนต์จะเป็นการครอสลิงค์ภายในโครงสร้างของสายพอลิเมอร์หลักซึ่งทำปฏิกิริยากับสารที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (2 หรือ 3 หมู่) โดยอาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งแบบควบแน่น (Condensation Reaction) หรือแบบเติม (Addition Reaction) ทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่ายได้ เช่น การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบควบแน่น เป็นต้น ในการเลือกวิธีการครอสลิงค์แบบพันธะโควาเลนต์สามารถเลือกชนิดของสารที่นำไปเป็นสารครอสลิงค์ สภาวะที่ใช้ในการเตรียมและควบคุมกระบวนการเตรียมได้ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม



ข. พันธะไอออนิก (Ionic Bonds) การครอสลิงค์แบบพันธะไอออนิกเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิวาเลนซ์ไอออน (Polyvalention) กับสายโซ่ของพอลิเมอร์หลักจะเกิดการจับพันธะกันของประจุที่ต่างชนิดกัน สารครอสลิงค์จึงมีผลต่อโครงสร้างของไฮโดรเจลด้อยกว่าการครอสลิงค์แบบโควาเลนต์ในการดูดซับของเหลวอาจจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกันของพอลิเมอร์ โดยการเตรียมไฮโดรเจลตามลักษณะพันธะไอออนิกนี้จะทำได้ยาก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เร็วมาก ทำให้การควบคุมการเตรียมเป็นไปได้ยาก

ค. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonds) การครอสลิงค์แบบทางกายภาพซึ่งเป็นการสร้างพันธะไฮโดรเจนของสายโซ่พอลิเมอร์หลักกับสายโซ่พอลิเมอร์อีกเส้นหนึ่ง ทำให้พันธะที่เกิดขึ้นมีลักษณะแข็งแรงจึงเกิดการรวมตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งการครอสลิงค์ชนิดนี้มีข้อเสีย คือ พันธะ-

ไฮโดรเจลที่มีการครอสลิงค์ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อถูกความร้อนจะทำให้โครงสร้างนั้นถูกทำลายไปและเมื่อเกิดการดูดซับเจลที่ได้จะขยายเฉพาะส่วนที่ครอสลิงค์มากกว่าส่วนที่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์




1) ไฮโดรเจลแบบฟิล์ม (Cast Film)



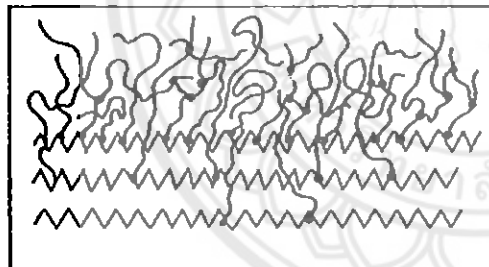
-  พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ
 พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ




2) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network)



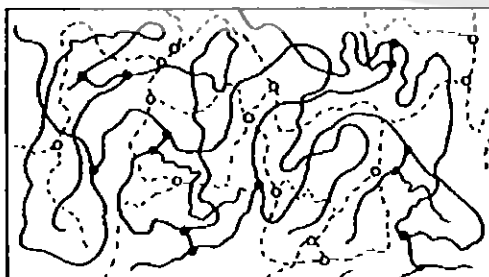
-  พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ
 พอลิเมอร์ส่วนที่เกิดพันธะโควาเลนต์
 พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ


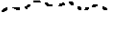


3) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer)



-  พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ
 พอลิเมอร์ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ
 พอลิเมอร์ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ

4) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating Polymer Network)



-  พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่ชอบน้ำ)
 พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่ชอบและไม่ชอบน้ำ)
 พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ)
 พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [5]

2.1.3 สมบัติทั่วไปของไฮโดรเจล (Properties of Hydrogels) [8]

สมบัติของไฮโดรเจลสามารถจำแนกได้ 4 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

2.1.3.1 การบวมน้ำ (Swelling)

การบวมน้ำของไฮโดรเจลในสารละลายนั้นมีความสัมพันธ์ที่พิเศษอย่างหนึ่งส่งผลให้ไฮโดรเจลถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อใช้เป็นเจลสมานแผล เพื่อรักษาความชุ่มชื้นของแผลโดยไม่เกิดการหมักหมม และช่วยในการดูดซับส่วนของเลือดและน้ำหนองที่เกิดจากแผลด้วย โดยทั่วไปคุณสมบัติของการบวมจะสามารถวัดได้จากความจุ (Capacity) ของการดูดซับน้ำหรือสารละลาย การบวมน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยซึ่งประกอบไปด้วย ประเภทและองค์ประกอบของมอนอเมอร์ ความหนาแน่นของพันธะ และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ค่า pH และความแข็งแรงของพันธะไอออน

สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล [5] คือ สามารถพองตัวแต่ไม่ละลายในน้ำซึ่งเกิดจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลนั้นได้ เนื่องจากแรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ในโมเลกุลของน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวหรือเกิดการพองตัวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกันได้ เนื่องจากภายในจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยมีตัวเชื่อมต่อสายโซ่ เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายพอลิเมอร์ไว้ การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัว สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจล มีดังนี้

ก. แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณของน้ำที่อยู่ภายในและภายนอกแผ่นไฮโดรเจลมีไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลนั้น ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น

ข. แรงกระทำระหว่างโมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นหรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วจะทำให้เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก

ค. ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือมีรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มาก น้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มาก

ง. ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่พันธะมีความยืดหยุ่นที่ดีจะเป็นการลดแรงต้าน (Resistance Force) ของการแพร่ของโมเลกุลเพื่อเข้าสู่สมดุใหม่ ทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก

จ. ความหนาแน่นของการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าที่ในโครงสร้างมีความหนาแน่นของการเชื่อมต่อนั้นเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายของไฮโดรเจล ทำให้ความสามารถในการพองตัวได้ลดลง

โมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะ ได้แก่ โมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ เรียกว่า “โมเลกุลน้ำอิสระ” (Free Water) สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ระบายได้ง่าย มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลไม่มากนักและโมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่ (Bound Water) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่าและต้องใช้ความร้อนปริมาณหนึ่งในการระเหยโมเลกุลน้ำออก ปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในไฮโดรเจล (Water Content, WC) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{ร้อยละของปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ} = \frac{|W_s - W_d|}{W_s} \times 100\% \quad (2.1)$$

โดยค่า W_s และ ค่า W_d คือ ค่าน้ำหนักของแผ่นไฮโดรเจลหลังจากที่มีการบวม น้ำและน้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองใช้ในการคำนวณหาร้อยละของปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในไฮโดรเจล

2.1.3.2 ความหนาแน่นของพันธะร่างแห (Cross-Linking Density)

ความหนาแน่นของพันธะร่างแหของไฮโดรเจลจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติอื่นๆ เช่น การบวมตัวของไฮโดรเจล โดยความหนาแน่นของพันธะร่างแหจะมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ความแข็งแรงของโครงสร้าง การให้อากาศ และของเหลวซึมผ่านได้ ซึ่งความแข็งแรงของโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีพื้นฐานที่สำคัญมาจากองค์ประกอบและโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่จะนำมาเตรียมไฮโดรเจลทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะตาข่าย (Network) ทำให้ไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มาก แต่ถ้าความหนาแน่นของพันธะร่างแหน้อย สามารถปรับปรุงโดยการเพิ่มความหนาแน่นของพันธะ

2.1.3.3 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation)

ไฮโดรเจลสามารถย่อยสลายตัวเองได้ช้าและสลายได้ในร่างกาย ทำให้มีการประยุกต์ใช้ทางด้านระบบนำส่งยา (Drug Release) และใช้งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ซึ่งการย่อยสลายนี้ สามารถย่อยสลายด้วยการไฮโดรไลซิสอย่างง่ายหรือการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการไฮโดรไลซิสพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น สารจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์โคโตซาน อัลจินต หรือ Poly(Lactic Acid), Poly(Glycolic Acid) เป็นต้น

2.1.3.4 ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ในขณะที่การยืดหยุ่นของวัสดุจะมีปัญหา คือ กลไกของแรงดึงซึ่งอาจจะทำให้ไฮโดรเจลเปลี่ยนรูปหรือขยายตัวมากเกินไป โดยพื้นฐานส่วนใหญ่แล้วค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุจะเป็นอัตราส่วนต่อแรงกด ซึ่งจะได้ผลต่อการขยายตัวของไฮโดรเจลหรือเมื่อมีการดึงแล้วไฮโดรเจลที่ได้สามารถกลับคืนตัวได้ ซึ่งการบวมตัวของไฮโดรเจลจะมีความสำคัญต่อความยืดหยุ่นของไฮโดรเจลและขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลด้วย

2.1.4 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลในทางการแพทย์เพื่อเป็นวัสดุปิดแผล [5]

(Medical Applications of Hydrogels for used as Wound Dressing)

ในปัจจุบันได้มีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราว เนื่องจากไฮโดรเจลมีสมบัติที่น่าสนใจและเหมาะสมดังนี้ คือ ไฮโดรเจลส่วนใหญ่เข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต ไม่มีสมบัติต่อต้านเนื้อเยื่อ นิ่ม และมีความยืดหยุ่นมีความตึงผิว (Interfacial Tention) ระหว่างแผ่นไฮโดรเจลกับของเหลวภายในร่างกายและเนื้อเยื่อต่ำ เมื่อนำมาปิดบาดแผลจึงไม่ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อข้างเคียง ไม่ละลายในน้ำหรือตัวทำละลายใดๆ ได้ง่าย สามารถดูดซับและปลดปล่อยสารละลายหรือของเหลวต่างๆ ได้ดี เมตาบอลิซึมสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ของเสีย และเกลือจากบาดแผลได้เช่นเดียวกับเนื้อเยื่อของร่างกายและยังสามารถป้องกันการติดเชื้อจากแบคทีเรียได้อีกด้วย [5, 9]

2.1.5 การพอลิเมอไรเซชันของไฮโดรเจล [11]

2.1.5.1 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล

มอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจะต้องมีหมู่ที่แสดงความเป็นไฮโดรฟิลิกอยู่ภายในโครงสร้าง เช่น $-OH$, $-NH_2$, $-COOH$ และ $-SO_3H$ เป็นต้น เพื่อที่จะทำให้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์สามารถดูดซับน้ำได้ ตัวอย่างมอนอเมอร์ที่มีการนำไปสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล เช่น 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต อะคริลาไมด์ และ AMPS เป็นต้น ในส่วนของตัวเชื่อมต่อสายโซ่จะต้องมี $C=C$ อย่างน้อยสองตำแหน่งอยู่ภายในโครงสร้าง เพื่อให้โครงสร้างของไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์เทอร์โมเซต (Thermoset Polymer) ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับน้ำและพองตัวได้ในน้ำ แต่ไม่ละลายในตัวละลายทุกชนิด ตัวอย่างตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่นิยมใช้ เช่น NMBA และ EGDM เป็นต้น

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลส่วนใหญ่จะเกิดผ่านปฏิกิริยาฟรีแรดิคัลพอลิเมอไรเซชันในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่แรดิคัลนั้นจะมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน คือ ขั้นเริ่มต้น (Initiation) ขั้นแผ่ขยาย (Propagation) และในขั้นสิ้นสุด (Termination) ซึ่งก่อนที่จะเกิดขั้นเริ่มต้นขั้นนั้นจะต้องมีตัวริเริ่ม การเกิดฟรีแรดิคัลในปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์ส่วนใหญ่ซึ่งก่อนที่จะเกิดผลมักเกิดผ่านตัวกลางก่อน ซึ่งตัวกลางนี้จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ เรียกว่า “ฟรีแรดิคัล”

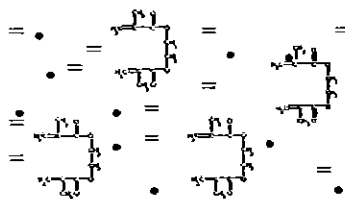
การทำให้เกิดฟรีแรดิคัลมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal Initiation) ของสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์หรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวริเริ่มที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันน้อยมากเพียงร้อยละ 0.1 ถึงร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มที่ใช้โดยทั่วไปมีดังนี้ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl Peroxide) 2,2'-เอโซบิสไอโซบิลลิโลไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile, AIBN) และเปอร์ซัลเฟต (Persulphates) เป็นต้น นอกจากการเกิดฟรีแรดิคัลจะไ้จากการสลายตัวด้วยความร้อนและแสงแล้ว ยังเกิดได้จากปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Initiation) โดยมีตัวริเริ่ม ซึ่งตัวริเริ่มที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกเกลือของเหล็กและโลหะอื่นๆ ซึ่งกรณีนี้ เรียกว่า “Accelerator” ใส่ลงไปร่วมกับตัวริเริ่ม ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และให้ฟรีแรดิคัลไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์แล้วได้พอลิเมอร์ลักษณะพิเศษของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยรีดอกซ์นี้ คือ จะมีพลังงานกระตุ้นต่ำมาก เพราะฉะนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดเริ่มต้นโดยรีดอกซ์สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่างๆ และวิธีสุดท้ายจะอาศัยพลังงานจากรังสีอิเล็กตรอน (Electron Initiator) ซึ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากการริเริ่มแบบการสลายตัวด้วยความร้อนและจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งวิธีนี้จะไม่มีการใช้ตัว

ริเริ่มตัวเชื่อมต่อด้ายโซ่ ซึ่งการเกิดพอลิเมอร์โซ่และการเชื่อมต่อนี้จะเกิดขึ้นจากการแตกตัวของ $C=C$ ในมอนอเมอร์เป็นแรดิคัลโดยอาศัยพลังงานจากรังสีอิเล็กตรอน

2.1.5.2 การเกิดเจล (Gelation)

กลไกในการเกิดเจลสามารถแบ่งออกได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้ Initiation, Microgel Formation, Cluster Formation, Macrogelation และ Post-Gelation ตามลำดับ เมื่อระบบประกอบด้วยสารละลายมอนอเมอร์ ตัวเชื่อมต่อด้ายโซ่ และตัวริเริ่ม (ระบบสังเคราะห์ที่ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต) การสังเคราะห์เริ่มจากขั้นเริ่มต้น (Initiation) ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อให้ตัวริเริ่มแตกตัวให้ฟรีแรดิคัล เพื่อริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์โซ่ โดยฟรีแรดิคัลที่ได้จากข้างต้นจะทำอันตรกิริยากับตัวมอนอเมอร์หรือตัวเชื่อมต่อด้ายโซ่ เกิดเป็น Monomeric Radicals จากนั้นจะเป็น Monomeric Radicals ดังกล่าวจะเกิดการเชื่อมต่อกันใน 2 ลักษณะ คือ การเชื่อมต่อนองภายในของ Monomeric Radicals ทั้งนี้จะนำไปสู่การรวมตัวกันกลายเป็นกลุ่มก้อน (Intramolecular Crosslink) หรือเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่าง Monomeric Radicals กลายเป็นร่างแหตาข่าย ซึ่งการเกิดทั้งสองลักษณะข้างต้นนำไปสู่การเกิด Microgel การดำเนินไปของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้มีอัตราส่วนประมาณร้อยละ 20 จากนั้นจะปฏิกิริยาดำเนินต่อไปสู่ขั้นตอนที่ 3 (Cluster Formation) ซึ่งจะอยู่ในช่วงร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 80 ของการดำเนินไปของปฏิกิริยา กล่าว คือ เป็นขั้นตอนที่มีเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจาก Microgel ก้อนอื่นหรือจากมอนอเมอร์และตัวเชื่อมต่อด้ายโซ่ที่ยังไม่เกิดการเชื่อมต่อ สารละลายภายในระบบของขั้นตอนนี้จะเกิดความหนืดเพิ่มมากขึ้นตามลำดับหรือเริ่มเข้าสู่การเกิดเจล (Gel Point) เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนที่เกิดเจลหรือขั้นตอนที่ 4 (Macrogelation) จะเกิดเปลี่ยนแปลงจาก Microgel ก้อนเล็กๆ กลายเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น จากนั้นปฏิกิริยาดำเนินไปสู่ขั้นตอนสุดท้าย คือ Post-Gelation ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่อัตราปฏิกิริยาเกิดการลดลงตามลำดับหรืออัตราของขั้นตอนการแผ่ขยายมีน้อยกว่าและตามด้วยขั้นสิ้นสุดตามลำดับ ตามรูปที่ 2.2

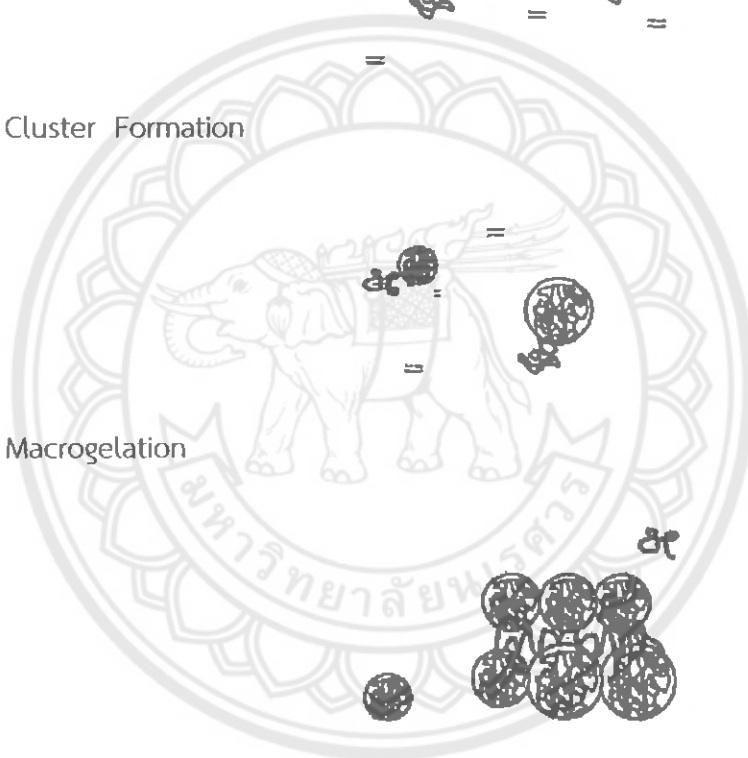
1. Initiation



2. Microgel Formation



3. Cluster Formation



4. Macrogelation



รูปที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนการเกิดเจล [11]

2.1.6 กลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเมื่อดูดซับน้ำเข้าภายในโครงสร้างแล้วจะพองตัวได้มาก ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับ การแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้าง ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของพอลิเมอร์ คือ แรงดันออสโมติก การเคลื่อนที่ของ Counter-Ion ความชอบกันของพอลิเมอร์ อิเล็กโทรไลต์กับน้ำและความยืดหยุ่นของโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์

กลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลจะเห็นได้ว่า กลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเกิดขึ้นได้ และความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเป็นผลโดยรวมจากกลไกต่างๆ ส่วนใหญ่ไฮโดรเจลจะเตรียมจากพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ คือ มีหมู่ที่มีประจุบวกและประจุลบบอยู่ภายในโครงสร้างจำนวนมาก พอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งจะดึงดูดน้ำเข้ามาได้ดี การดึงน้ำเข้ามาทำให้โครงสร้างภายในเกิดการพองตัว คือ สายโซ่พอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่มากขึ้นนอกจากนี้สายพอลิเมอร์อาจมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำอยู่ด้วย การนำพาน้ำเข้ามาในโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยหมู่ที่มีประจุ ทำให้โอกาสที่หมู่ชอบน้ำอื่นที่มีอยู่เกิดพันธะกับน้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย

หมู่คาร์บอกซิเลตในพอลิเมอร์จะจับอยู่กับโซเดียมไอออน เพื่อให้มีสภาพประจุเป็นกลาง เมื่อพอลิเมอร์ดูดซับน้ำเข้าในโครงสร้างตาข่าย โดยโมเลกุลของน้ำซึ่งมีค่า Dielectric Constant สูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโซเดียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิเลต จึงทำให้โซเดียมไอออนหลุดเป็นอิสระและกระจายอยู่ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจล แรงดันออสโมติกทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปสู่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลเพื่อให้เกิดสภาพที่สมดุล เมื่อไฮโดรเจลอยู่ในสภาวะละลายเกลือความแตกต่างของแรงดันออสโมติกภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีค่าลดลง ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำลดลง

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจล คือ ระดับการครอสลิงค์ของสารพอลิเมอร์ที่เกิดการครอสลิงค์จะมีการยึดตัวที่จำกัด ทำให้พอลิเมอร์บริเวณนั้นแยกออกจากส่วนอื่น และมีลักษณะขดเป็นวง (Coiled Polymer) ที่มีค่าความแข็งแรงมากและมีค่าความไม่เป็นระเบียบ (Entropy) ของสายโซ่นั้นลดลง ในขั้นตอนสุดท้ายของการดูดซับน้ำเป็นการเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการละลายได้ดีและแรงในการหดตัว (Retractive) เนื่องจากการครอสลิงค์ พบว่าโครงสร้างตาข่ายมีปริมาณการครอสลิงค์สูงจะมีความหนาแน่นและเกิดแรงหดตัวมาก ทำให้ไฮโดรเจลมีระดับการพองตัวลดลงที่สภาวะสมดุล

2.1.7 สารเคมี

2.1.7.1 2-อะคริลามิโด-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิคแอซิด

2-อะคริลามิโด-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิคแอซิด เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาระหว่าง อะคริโลไนไตรล (Acrylonitrile) และไอโซบิวทิลีน (Isobutylene) ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงมากกว่ากรดซัลฟูริกและน้ำ สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮโดรฟิลิก กรดซัลฟูริก ที่ใช้ในการเปลี่ยนสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ให้มีประจุลบ ในปี ค.ศ. 1970 ได้มีการใช้มอนอเมอร์ชนิดนี้ในการผลิตเส้นใยอะคริลิก ซึ่งในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ AMPS ในหลายด้าน เช่น ด้านการบำบัดน้ำเสีย น้ำมัน สารเคมีที่ใช้ในงานก่อสร้าง ไฮโดรเจลสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ ผลิตภัณฑ์เพื่อการดูแลตัวเอง สารเคลือบผิว และการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์

ก. ลักษณะเฉพาะของ AMPS

ก.1 ความเสถียรต่อน้ำและความร้อน โดยหมู่ Geminal Dimethyl และหมู่ Sulfomethyl รวมตัวกันเกิดแรงกีดขวางเนื่องจากขนาดของโครงสร้างขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ ส่งผลให้มีพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของ AMPS ความเสถียรในด้านความร้อนและการย่อยสลาย

ก.2 มีขั้วและชอบน้ำ หมู่ซัลโฟเนตที่อยู่ภายในโครงสร้างส่งผลให้ AMPS มีความชอบน้ำในระดับสูงและมีประจุลบจึงทำให้มีค่า pH ที่หลากหลายและนอกจากนี้ AMPS มีความสามารถในการดูดซับน้ำและสามารถปรับปรุงลักษณะการดูดซับน้ำให้เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย

ก.3 ความสามารถในการละลาย AMPS เป็นสารที่ละลายได้ดีในน้ำและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide, DMF) แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ AMPS

ตัวทำละลาย	ความสามารถในการละลายของ AMPS (gAMPS 100/100 กรัม ตัวทำละลาย)
น้ำ	150
ไดเมทิลฟอร์มาไมด์	มากกว่า 100
เอ็น-เมทิล-2-ไพโรลิโดน	80
เมทานอล	8.7

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/2-Acrylamido-2-methylpropane_sulfonic_acid

ก.4 การยับยั้งการเกิดไอออนที่มีประจุ 2^+ กรดซัลฟิวริกที่อยู่ใน AMPS เป็น หมู่ไอออนิกที่มีความแข็งแรงมากและกระจายอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างของสารละลายช่วยในการ ตกตะกอนของเกลือที่ไม่ต้องการ โดยที่การรวมตัวของพอลิเมอร์ที่มี AMPS เป็นส่วนประกอบนั้น สามารถช่วยในการตกตะกอนของเกลือและการเกิดไอออนที่มีประจุ 2^+ ผลที่ได้ดังกล่าว คือ การลดลง ของตะกอนของเกลือหลากหลายชนิด เช่น เกลือของแคลเซียม เกลือของแมกนีเซียม เหล็ก อะลูมิเนียม สังกะสี แบริียม และโครเมียม

ข. การใช้งาน AMPS

ข.1 เส้นใยอะคริลิก จากการปรับปรุงลักษณะต่างๆ โดยทำการเติม AMPS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของเส้นใยอะคริลิก โดยการสังเคราะห์เส้นใยพอลิอะคริลิก เส้นใยพอลิ-โพรพิลีน และเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ร่วมกับ AMPS พบว่ามีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น

ข.2 ไฮโดรเจลทางการแพทย์ จากสมบัติเด่นของ AMPS คือ ความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการพองตัวสูง จึงเลือกนำ AMPS มาใช้ประโยชน์ในการ สังเคราะห์ไฮโดรเจล ซึ่งไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จาก AMPS นั้น มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ มีความ แข็งแรง เหนียว สามารถยืดเกาะผิวได้อย่างเหมาะสม และผลิตเป็นตัวกลางในการตรวจคลื่นไฟฟ้า หัวใจ (Electrocardiograph, ECG)

2.1.7.2 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอลถูกค้นพบขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1779 โดยซีลี (Shceele) พบว่ากลี- เซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยาการผลิตสบู่ระหว่างน้ำมันมะกอกกับออกไซด์ของตะกั่ว ต่อมา ในปี ค.ศ. 1813 เชฟรูล (Chevreul) ได้ค้น พบว่ากลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบในไขมัน โดยอยู่ในรูป ของกลีเซอรอลเอสเทอร์ของกรดไขมันจึงเรียกว่า กลีเซอรอล กลีเซอรอลถูกนำมาใช้อุตสาหกรรมครั้งแรกเมื่อ ปี ค.ศ. 1866 โดยอัลเฟรด โนเบล (Alfred Noble) ได้นำกลีเซอรอลมาใช้ในการผลิตระเบิด ไตนาไมต์หรือไนโตรกลีเซอรอล (Nitroglycerol) ต่อมาช่วงปลายปี ค.ศ. 1930 ฟาร์เบน (Farben) ได้พัฒนาและสังเคราะห์กลีเซอรอล โดยใช้สารตั้งต้นเป็นโพรเพนและตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1980 จนถึง ปัจจุบัน การผลิตกลีเซอรอลส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันที่ได้จากธรรมชาติมากถึงร้อยละ 97 และจากการสังเคราะห์โพรเพนร้อยละ 25 กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ในอุตสาหกรรม คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่ง [12] คือ เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น มี การใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้กลีเซอรอลเป็นสารรักษาความชื้น เป็นตัวเพิ่มสภาพ พลาสติกชนิดที่ช่วยเก็บรักษาความอ่อนนุ่มและความหนืด เป็นสารอิมัลชันและสารเพิ่มความคง ตัวในผลิตภัณฑ์ประเภทมาการีน น้ำสลัด และลูกกวาด ใช้เป็นกลีเซอรอลรักษาความชื้นให้กับยาสูบ

และเป็นส่วนผสมในไส้กรอง ทำให้บุหรีติดไฟช้า ใช้เป็นส่วนผสมในยาหลายชนิด สารละลายกลีเซอรอลฟีนอล (Glycerolphenol) ใช้ในการล้างหู ใช้ผสมในเครื่องสำอางประเภทครีมและโลชั่น เพื่อทำให้ผิวหนังนุ่มและชุ่มชื้น ใช้เพื่อป้องกันไม่ให้ยาสีฟันแห้งแข็งตัวในหลอด ใช้ห่อเนื้อ ทำกระดาษชนิดพิเศษ และใช้เป็นสารหล่อลื่น เนื่องจากมีความหนืดสูงและไม่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ ใช้กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบซีเมนต์ สารอิมัลซิไฟเออร์ในยางลาดถนน เซรามิก และกาว เป็นต้น

กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และน้ำ แต่ไม่ละลายในน้ำมัน เนื่องจากกลีเซอรอลมีคุณสมบัติทางเคมีที่หลากหลายจึงสามารถนำไปใช้เป็นส่วนตั้งต้นในการสังเคราะห์สารเคมีอื่นๆ ได้ ด้วยคุณสมบัติที่ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และน้ำ จึงนำกลีเซอรอลไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ซึ่งกลีเซอรอลบริสุทธิ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมหรือเป็นตัวช่วยในกระบวนการผลิตเครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์ในท้องถิ่น สุขอนามัยส่วนบุคคล อาหาร ยาสีฟัน ยาสระผม และนิยมใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ เพราะกลีเซอรอลเป็นส่วนช่วยหล่อลื่นเหมือนมอยส์เจอร์ไรเซอร์ เพื่อป้องกันผิวไม่ให้แห้งและดูดซับความชื้นเมื่อสัมผัสกับอากาศ ซึ่งจะทำให้รู้สึกว้าผิวมีความชุ่มชื้น อ่อนโยนต่อผิว ขจัดความสกปรกที่ฝังแน่น ไม่ทำให้อุดตันรูขุมขน รวมทั้งปลอดภัยต่อผิวหนัง [13]

การที่กลีเซอรอลเป็นส่วนที่ไม่มีพิษในทุกๆ รูปแบบของการประยุกต์ใช้งาน [18, 19] ไม่ว่าจะใช้เป็นส่วนตั้งต้นหรือสารเติมแต่ง ทำให้กลีเซอรอลเป็นส่วนเคมีที่ได้รับความสนใจและนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น การทำยาเหน็บทวาร ใช้เป็นยาระบาย และยังสามารถใช้เป็นยาเฉพาะสำหรับปัญหาทางผิวหนังหลายชนิดรวมถึง โรคผิวหนัง ผื่น แผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก แผลกดทับ และบาดแผลจากของมีคม กลีเซอรอลถูกนำไปใช้เพื่อรักษาโรคเหงือกได้ เนื่องจากกลีเซอรอลสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องได้ [17]

ก. สมบัติของกลีเซอรอล [16]

กลีเซอรอล อาจเรียกได้หลายชื่อ เช่น Glycerol, Glycerrin หรือ 1,2,3-propanetriol กลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ มีรสหวานเล็กน้อย ละลายได้ดีในน้ำและเอทานอล ไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล เพนทานอล รวมทั้งฟีนอลไกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮทเทอโรไซคลิก ไดเอทิลอีเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ และไดออกเซน ไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์มีสายโซ่และตัวทำละลายจำพวกแฮโลเจน สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของกลีเซอรอล [16]

คุณสมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล	ค่า
น้ำหนักโมเลกุล	92.06
จุดหลอมเหลว	18.17 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	
ที่ 13.33 กิโลปาสกาล	222.4 องศาเซลเซียส
ที่ 101.3 กิโลปาสกาล	290 องศาเซลเซียส
การระเหย	
ที่ 100 องศาเซลเซียส	26 ปาสกาล
ที่ 200 องศาเซลเซียส	6100 ปาสกาล
แรงตึงผิว ที่ 20 องศาเซลเซียส	63.4 มิลลินิวตันต่อเมตร
ความหนืด ที่ 20 องศาเซลเซียส	1499 มิลลิปาสคาลนาที่
อุณหภูมิกลายเป็นไอ	
ที่ 55 องศาเซลเซียส	88.12 กิโลจูลต่อโมล
ที่ 195 องศาเซลเซียส	76.02 กิโลจูลต่อโมล

เมื่อนำกลีเซอรอลร้อยละ 66.7 โดยน้ำหนัก ละลายในน้ำร้อยละ 33.3 จะได้สารละลายที่มีจุดเยือกแข็งที่ต่ำมาก คือ -46.5 องศาเซลเซียส กลีเซอรอลมีจุดเดือดสูงถึง 290 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ (101.3 กิโลปาสกาล) และมีจุดเดือดลดลงตามความดันที่ลดลง

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์ทั่วไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซิลด้านนอกจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซิลตรงกลาง ภายใต้สภาวะเป็นกลางหรือเบส กลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดอะโครลีนในทางกลับกันในสภาวะที่เป็นกรดเล็กน้อย พบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเกิดอะโครลีน ดังนั้นปฏิกิริยาของกลีเซอรอลจึงควรทำในสภาวะที่เป็นกลางหรือเบสและที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้กลีเซอรอลยังถูกออกซิไดส์ได้ง่ายโดยที่อะตอมคาร์บอนด้านนอกจะถูกออกซิไดส์เป็นหมู่คาร์บอกซิลและอะตอมคาร์บอนตรงกลางเกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล

ข. ลักษณะเฉพาะของกลีเซอรอล [17]

ข.1 ส่งเสริมการเจริญเติบโตของเซลล์กลีเซอรอลหรือกลีเซอรินสามารถป้องกันผลกระทบของโรคทางผิวหนัง เช่น โรคสะเก็ดเงิน ซึ่ง Drs. Xiangjian Zheng และ Wendy Bollinger Bollag ได้อธิบายเมื่อเดือนธันวาคม ในวารสารวิชาการเกี่ยวกับการใช้กลีเซอรอลรักษา

ปัญหาเกี่ยวกับโรคผิวหนัง ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับการใช้กลีเซอรอลในการรักษาโรคสะเก็ดเงิน โรคสะเก็ดเงินเป็นโรคผิวหนังเรื้อรัง ซึ่งเกิดจากการหนาตัวของชั้นหนังกำพร้า มีลักษณะเป็นตุ่มหรือปื้นแดง ที่มีขุยหรือสะเก็ดขาวติดอยู่ มักเกิดกับผิวหนังบริเวณที่ถูกเสียดสีบ่อยๆ รวมทั้งศีรษะและเล็บด้วย ดังนั้นการประยุกต์ใช้กลีเซอรอลสามารถหยุดกระบวนการผิดปกติดังกล่าวและยังช่วยให้เซลล์ที่ถูกทำลายเจริญเติบโต สารประกอบนี้ยังสามารถช่วยรักษาแผลให้หายได้อย่างรวดเร็วในบางกรณี

ข.2 รักษาสมดุลของน้ำกลีเซอรอลเป็นสารที่เรียกว่าสาร Humectants ซึ่งมีความหมายว่า เป็นสารที่ทำหน้าที่สร้างความชุ่มชื้นให้แก่ผิว โดยเมื่อตัวสารอยู่บนผิวหนังแล้วสาร Humectants จะดูดความชื้นจากอากาศมาสู่ตัวสาร ทำให้ผิวที่อยู่ใต้สาร Humectants ปกคลุมอยู่มีความชื้นและเมื่อกลีเซอรอลหรือกลีเซอรินถูกนำไปใช้กับผิวหนัง จะส่งผลให้ผิวหนังบริเวณนั้นปกคลุมไปด้วยความชุ่มชื้นและยังช่วยรักษาสมดุลน้ำในชั้นผิวหนังซึ่ง Dermaxime ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นส่วนผสมได้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับการต่อต้านริ้วรอย ซึ่งกลีเซอรอลที่ผสมอยู่จะช่วยรักษาสมดุลของน้ำในชั้นผิวหนังให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม และกลีเซอรอลที่ผสมอยู่ในโลชั่นหรือผลิตภัณฑ์ดูแลผิวอื่นๆ สามารถช่วยป้องกันอาการผิวแห้ง

ข.3 ปรับปรุงและฟื้นฟูลักษณะของผิวหนังลักษณะเฉพาะนอกจากการรักษาระดับความชุ่มชื้นของผิวหนัง ซึ่งในการติดตามผลของการใช้กลีเซอรอลที่ผสมในเครื่องสำอางที่ใช้กับผิวหนังผิวหนัง พบว่าผิวหนังมีสุขภาพดีมากขึ้น ลักษณะที่ดีขึ้นของผิวหนังเกิดจากลักษณะเฉพาะของกลีเซอรอล คือ ช่วยปรับปรุงและฟื้นฟูผิวแห้ง ส่งผลให้ผิวหนังบริเวณนั้นมีความชุ่มชื้น ไม่มีลักษณะเป็นขุยและผิวไม่แห้ง กลีเซอรอลยังช่วยรักษาบาดแผลและโรคผิวหนังต่างๆ ยังช่วยให้ผิวดูมีสุขภาพดีเรียบเนียน ชุ่มชื้น และอ่อนนุ่มน่าสัมผัส

ค. การใช้งานกลีเซอรอล [18-20]

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอลที่เป็นสารไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ทำให้ กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม นอกจากนี้กลีเซอรอลยังเป็นสารฮิวแมคแทนท์ ประเภทสารอินทรีย์ (Organic Humectant) จำพวกโพลไฮดริคแอลกอฮอล์ ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถดูดเก็บความชื้นจากอากาศได้ดีและยังมีความหนืดที่ทำให้สารละลายมีลักษณะเป็นน้ำเชื่อม (Syrup) ได้ดีการทำปฏิกิริยาได้หลากหลายของกลีเซอรอล จึงถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ดังต่อไปนี้

ค.1 อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง กลีเซอรอลถูกใช้เป็นส่วนผสมในยาหลายชนิด เพื่อเพิ่มความชื้นและทำให้ตัวยามีลักษณะเป็นน้ำเชื่อม สารละลายกลีเซอรอล-ฟีนอล (Glycerol – Phenol) ใช้ในการล้างหู ในเครื่องสำอางมีการผสมกลีเซอรอลในครีม ทำให้ผิวดูชุ่ม ชุ่มชื้น และยังเป็นส่วนผสมที่ทำให้ยาสีฟันเป็นมันวาว

ค.2 อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม สามารถใช้แทนคาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนประกอบของน้ำเชื่อมในลูกอมและไอซิ่ง (Icing) ใช้เป็นตัวทำละลายสารแต่งกลิ่นและสีต่างๆ เช่น วานิลลา สารหล่อลื่นเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร และการบรรจุหีบห่อ

ค.3 บุหรี เป็นส่วนสำคัญในการขึ้นรูปบุหรีก่อนบรรจุ ทำให้บุหรีติดไฟช้า

ค.4 สารหล่อลื่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นเมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นไม่ได้เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่มีความหนืดสูงและไม่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ นิยมใช้ในการอัดออกซิเจน เพราะทนปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่ามีเนอรอลลอยล์ (Mineral Oil)

ค.5 อุตสาหกรรมพลาสติก (Alkyd Resins) นำใช้ในการเคลือบพื้นผิว เป็นส่วนผสมเพื่อให้พลาสติกนุ่มและยืดหยุ่นได้ดียิ่งขึ้น

2.1.8 ทฤษฎีที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.8.1 การหาลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวกับน้ำของแผ่นไฮโดรเจล [21]

ก. การหาปริมาณน้ำโมเลกุลน้ำ ที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่ โมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ของพอลิเมอร์ เรียกว่า “โมเลกุลน้ำอิสระ” ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระเหยออกได้ง่าย มีผลต่อสมบัติของแผ่นไฮโดรเจลไม่มาก และโมเลกุลของน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่ (Bound Water) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่าและต้องใช้ความร้อนปริมาณหนึ่งในการระเหยโมเลกุลน้ำออกร้อยละปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ภายในแผ่นไฮโดรเจล สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

สำหรับปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในไฮโดรเจล ขณะที่ไฮโดรเจลพองตัวเต็มที่แล้ว เรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุล”

ข. การหาอัตราการผ่านของไอน้ำ [22] การหาอัตราการผ่านของไอน้ำหาได้จากปริมาณของน้ำที่ระเหยผ่านวัสดุตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จากวิธีของ The American Society for Testing and Materials (AMPS E 96-93) โดยเทคนิคคัพเทอร์คัพ (Water Cup) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$WVTR = \frac{G}{lA} = \left[\frac{\left(\frac{G}{l} \right)}{A} \right] \quad (2.2)$$

กำหนด ค่า WVTR	=	อัตราการผ่านของไอน้ำ
G	=	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
t	=	เวลา
A	=	พื้นที่ของปากถ้วยอะลูมิเนียม
G/t	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

2.1.8.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) [23]

สมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราว คือ มีความยืดหยุ่น อ่อนนุ่ม ไม่ระคายเคืองต่อเซลล์ที่สร้างขึ้นใหม่ อีกทั้งมีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงดึง ไม่ฉีกขาดเมื่อดึงออก ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาสมบัติเชิงกลและทดสอบความแข็งแรงของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาพอลิเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์ขึ้นมาว่ามีความแข็งแรงและมีความปลอดภัยที่จะพัฒนาเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้หรือไม่

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุมีหลายประเภท เช่น การทดสอบความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงอัด (Compressive Strength) ความทนต่อแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ความทนต่อแรงกระทบ (Impact Strength) การคืบ (Creep) และความแข็ง (Hardness) เป็นต้น

ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยเทอม 2 เทอมที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (Stress: σ) และความเครียด (Strain: ϵ) ความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด

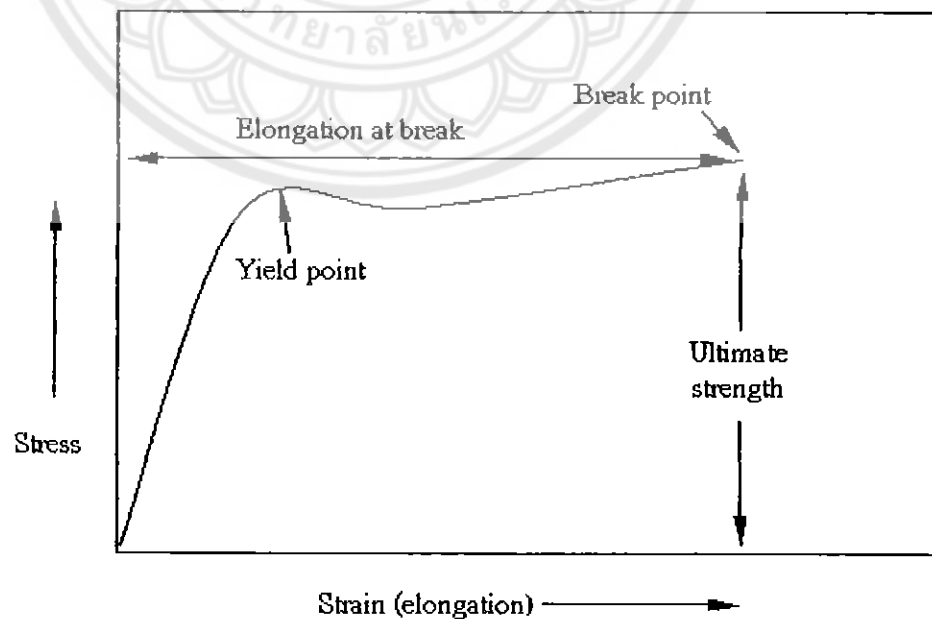
$$\text{ความเค้น}(\sigma) = \frac{\text{แรง} (F)}{\text{พื้นที่หน้าตัด} (A)} \quad (2.3)$$

ความเครียด (ϵ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น

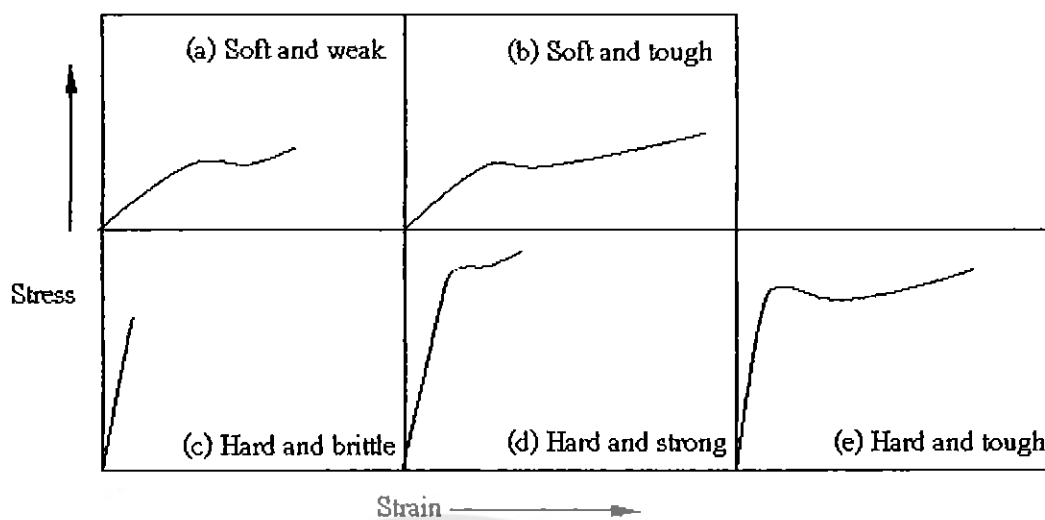
$$\text{ความเครียด} (\epsilon) = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป} \Delta L}{\text{ความยาวเดิม} (L)} \quad (2.4)$$

$$\text{โมดูลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\epsilon)} \quad (2.5)$$

เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นลักษณะที่ขึ้นกับเวลา อัตราเร็วที่ความเค้น หรือแรงถูกให้กับตัวอย่างจึงมีผลต่อการยึดของตัวอย่างหรือความเครียดเป็นอย่างมาก เช่น เมื่อนำตัวอย่างประเภทเส้นใยมาทดสอบ โดยใช้แรงดึงอย่างรวดเร็วจนทำให้เส้นใยขาดออกโดยง่าย แต่เมื่อใช้แรงขนาดเดิมแต่ดึงอย่างช้าๆ จะทำให้เส้นใยยืดออกและทนต่อแรงดึงอยู่ได้นานก่อนที่จะขาด เมื่อถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงที่รู้ขนาดแน่นอน จากนั้นจึงนำข้อมูลไปพล็อตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง (Elastomer) ซึ่งเกิดการยืดออกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึง กราฟที่ได้มีลักษณะ ดังรูปที่ 2.3 นอกจากความเค้นและความเครียดแล้วยังมีเทอมที่แสดงสมบัติเชิงกลประเภทอื่นของพอลิเมอร์อีก เช่น Modulus หรือ Stiffness ซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด (หรือความชันในช่วงแรกของเส้นกราฟ) และ Toughness ซึ่งแสดงความต้านทานต่อการขาดข้อมูลสำคัญที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด คือ ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile Strength at Break)



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 2.4 กราฟการทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆ กัน



2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ผ่านมา พบว่ากระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลส่วนมากจะนิยมใช้มอนอเมอร์ชนิดต่างๆ ยกตัวอย่าง เช่น 2-Hydroxyethyl-Methacrylate, Acrylamide, Methacrylic Acid, N,N-Dimethylaminoethyl Methacrylate, N-Vinyl Pyrrolidone, Ethylene Oxide, 2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic, Ethylene Glycol และมอนอเมอร์ธรรมชาติที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกที่ดี เป็นต้น ซึ่งมอนอเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจะได้ลักษณะเฉพาะของแผ่นไฮโดรเจล สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียด ดังนี้

Yingsak และคณะ [24] ได้ศึกษาผลของสภาวะในการเตรียมเจลแบ่งและปริมาณสารเชื่อมขวางต่อ คุณสมบัติของไฮโดรเจลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งพุดรักษาซึ่งสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแป้งกับซัคซินิคแอนไฮไดรด์ โดยมี 4-ไดเมทิลอะมิโนไพริดีนเป็นสารเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลอง พบว่าการใช้สภาวะในการเตรียมเจลแบ่งที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที จะทำให้เม็ดแบ่งแตกและกระจายตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที โดยแป้งมันสำปะหลังมีการแตกกระจายของเม็ดแบ่งอย่างสมบูรณ์ เม็ดเจลที่ได้มีลักษณะที่สม่ำเสมอและไม่พบชิ้นส่วนของเม็ดแบ่ง ในขณะที่เม็ดแบ่งพุดรักษาจะยังคงเห็นเป็นชิ้นส่วนของเม็ดแบ่งโดยมีชิ้นส่วนเล็กๆ ที่แตกออกมากกระจายแทรกอยู่ทั่วไปเมื่อนำเจลแบ่งที่ได้ไปสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของซัคซินิคแอนไฮไดรด์ต่อหน่วยกลูโคสแอนไฮไดรด์เท่ากับ 5 ต่อ 1 และ 10 ต่อ 1 พบว่าการเพิ่มปริมาณของซัคซินิคแอนไฮไดรด์จะทำให้ได้ไฮโดรเจลที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง โดยไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากเจลแบ่งซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าที่สังเคราะห์จากเจลแบ่งซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังมีค่าการดูดซับน้ำสูงสุดที่ 92 กรัมต่อกรัมไฮโดรเจลแห้ง เมื่อใช้สภาวะในการเตรียมเจลแบ่งที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและอัตราส่วนโดยโมลของสารเชื่อมขวางเท่ากับ 5 ต่อ 1 ในขณะที่ไฮโดรเจลที่เตรียมจากแป้งพุดรักษาในสภาวะเดียวกัน ให้ค่าการดูดซับน้ำสูงสุดต่ำกว่าเล็กน้อย (89 กรัมต่อกรัม)

วรินดา [25] ได้ศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลคอมโพสิตชนิดไคโตซาน/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ และ NOCC (N,O-Carboxymethyl Chitosan)/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ ที่มีสมบัติเป็นเจลสมานแผลโดยสังเคราะห์ NOCC จากไคโตซานและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ NOCC ด้วยเทคนิค FT-IR จากนั้นเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตของไคโตซานและ NOCC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 1 และ 1.5 ต่ออัลจินตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนต่างๆ นำแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น อัตราการบวมน้ำ การปล่อยผ่านไอน้ำ ความต้านทานแรงดึงขาด ค่าการยึดตัวและการผ่านของแบคทีเรีย พบว่าแผ่นฟิล์ม NOCC/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ และแผ่นฟิล์มไคโตซาน/

อัลจินต-ดำนกัมมันต์ ในขณะที่อัตราส่วนของดำนกัมมันต์สูงชันในแผ่นฟิล์มทั้งสองชนิดมีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงขาดและค่าการยืดตัวลดลง ส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีลักษณะแข็งและเปราะ นอกจากนี้ พบว่าไฮโดรเจลคอมโพสิตชนิดโคโคซานและชนิด NOCC สามารถป้องกันการผ่านของแบคทีเรียได้ดีทั้งกรณีการเติมดำนกัมมันต์และไม่เติมดำนกัมมันต์

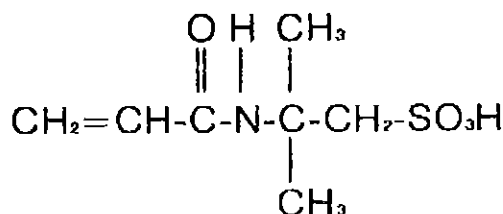
อมรรรัตน์ และคณะ [26] สังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่างเอ็น-ไอโซโพรพิลอะคริลาไมด์กับกรดมาลิกที่อัตราส่วนสารตั้งต้นเป็น 1 ต่อ 0.35 ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุโมลอิสระในสารละลายเอควียสและเตรียมแผ่นฟิล์มเจลอุ้มน้ำด้วยวิธีคาสติง จากสารละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ที่มีการเติมสารเชื่อมขวางไดเอทิลีนไกลคอล แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางแบบเอสเทอร์ฟิเคชันที่ อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส พบว่าโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เท่ากับร้อยละ 55 ± 2 และแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีค่าการดูดซึมน้ำที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 23 ± 6 กรัมต่อกรัมน้ำหนักพอลิเมอร์แห้งและสามารถตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดในแต่ละขั้นตอนได้อย่างชัดเจนด้วยเทคนิคอินฟราเรดและนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

Jiraporn และคณะ [27] ได้ศึกษาไฮโดรเจลเชื่อมขวางแบบกึ่งโครงร่างตาข่าย (Semi-IPN) ของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติโดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (APS) เป็นสารตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ N,N'-Methylene Bis Acrylamide (MBA) ใช้เพื่อเป็นสารเชื่อมขวางทำปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยตัวแปรที่ทำการทดลอง ได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมขวางและสัดส่วนระหว่างแป้งต่อยาง พบว่าร้อยละการดูดน้ำและอัตราการบวมพองน้ำของไฮโดรเจลสูงสุด คือ ประมาณร้อยละ 76 และ 250 ตามลำดับ เมื่อปริมาณของ MBA ที่ใช้ phr ในขณะที่สัดส่วนของแป้งต่อยางที่ 90 ต่อ 10 ให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำและการบวมพองที่สูงที่สุด คือ ร้อยละ 80 และ 600 ตามลำดับ ส่วนสมบัติความเสถียร พบว่าอัตราการส่วนระหว่างแป้งต่อยาง 60 ต่อ 40 มีความเสถียรสูงสุดและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้การทดลองอัตราการคายน้ำ พบว่าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 1 วัน โดยอัตราส่วน 50 ต่อ 50 และ 60 ต่อ 40 มีอัตราการคายต่ำที่สุด ตามลำดับ

ชวนพิศ [28] ได้ศึกษาสภาวะของโคพอลิเมอร์เซชันแบบสารละลายเมธิลครีเลตกับ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าเตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาอย่างน้อยที่สุด 18 ชั่วโมง และมีความเข้มข้นของตัวริเริ่มที่เหมาะสม คือ 0.20 %mole ไฮโมและโคพอลิเมอร์ของเมธิลครีเลตกับเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน ที่มีปริมาณ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในตอนเริ่มต้นร้อยละ 20 ถึง 90 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมได้มีสีขาว เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเหนียวและติด

ภาษาณะ จากอินฟราเรดสเปกตร้าของโคพอลิเมอร์ปรากฏแถบการยืดหดของพันธะในหมู่คาร์บอนิลทั้งที่ 1720 และ 1680 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นหมู่ของเอสเตอร์และเอไมด์ ตามลำดับ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิที่เริ่มสูญเสียน้ำหนักและมีอุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนักไปร้อยละ 50 ของไฮโดรเจล มีค่าอยู่ในช่วง 83 ถึง 107 องศาเซลเซียส 299 ถึง 383 องศาเซลเซียส และ 400 ถึง 461 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในสภาวะที่อ้อมตัวด้วยน้ำ แผ่นไฮโดรเจลที่ได้เป็นสีขาว มีความยืดหยุ่นเหนียวแต่มีความอ่อนนุ่ม และแนบติดผิวหนังไม่ตึงนัก ค่าการขยายตัวตามพื้นที่และปริมาตร ปริมาณน้ำสมดุล ปริมาณน้ำคงเหลือสมดุล อัตราการแพร่ผ่านไอน้ำ โดยวิธีวอเตอร์คัพและอินเวทเทคคัพของแผ่นไฮโดรเจลที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน เริ่มต้นร้อยละ 20 ถึง 70 โดยน้ำหนักมีค่าอยู่ในช่วง ร้อยละ 5.7 ถึง 37.1 ร้อยละ 7 ถึง 137 ร้อยละ 7.3 ถึง 63.2 ร้อยละ 1.0 ถึง 2.7 1.6 ถึง 18 กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร และ 2.8 ถึง 79.8 18 กรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตามลำดับ โคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นร้อยละ 80 ถึง 90 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้เมื่ออยู่ในน้ำ ส่วนค่าความคงทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาดและมอดูลัสแบบยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีปริมาณเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนเริ่มต้นร้อยละ 40 ถึง 70 โดยน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 18.2 เมกะปาสคาล ร้อยละ 15.8 ถึง 53.9 และ 68 ถึง 597 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดนในตอนเริ่มต้นกับสมบัติต่างๆ ไม่มีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง ซึ่งจากการศึกษาการพัฒนาสมบัติการแนบติดผิวหนัง และความอ่อนนุ่มให้ดีขึ้น แผ่นไฮโดรเจล พอลิ(เมธิล-เมธาคริเลต-สแตต-เอ็น-ไวนิล-2-ไพโร-ลิโดน) สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราวได้

ในงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจอนอเมอร์ AMPS เนื่องจากโครงสร้างของ AMPS มีหมู่ซัลโฟนิคเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นหมู่ที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกที่ดี และมีหมู่ $-CH_3$ ที่ช่วยรักษาความเสถียรทางความร้อนและที่สำคัญอีกประการ คือ มีหมู่ฟังก์ชันของอะคริลิก (Acrylic Function Group) ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยามอนอเมอร์ดังกล่าวสามารถละลายในน้ำได้ในปริมาณที่สูงมากถึง 150 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม นอกจากนั้นยังสามารถเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายของเกลือกับไอออน K^+ หรือ Na^+ ได้ ดังนั้นพอลิเมอร์สังเคราะห์จึงมีน้ำเป็นองค์ประกอบ นอกจากนั้นยังมีความสนใจในกลีเซอรอลเป็นสารเคมีที่มีหมู่ไฮดรอกซิล มีสมบัติในละลายน้ำได้ดี การจับกับน้ำได้ดี เป็นสารที่สามารถเก็บความชื้นได้ และยังเป็นสารที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาเป็นการนำอนอเมอร์ AMPS ไปร่วมสังเคราะห์กับมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติ โดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ AMPS

Phusit และคณะ [1] ได้ศึกษาการสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลจากมอนอเมอร์ 2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพน ซัลโฟนิคแอซิด เกลือโซเดียม (AMPS- Na^+) รวมถึงไฮโดรเจลผสมระหว่าง AMPS- Na^+ กับคาร์บอกซีเมธิลไคโตซาน (CMCTS) หรือผสมเข้ากับคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลส (CMC) ผ่านปฏิกิริยาแรดิคอลพอลิเมอไรเซชันในสารละลายโดยอาศัยแสงอัลตราไวโอเล็ต ในการสังเคราะห์ใช้ Ethylene Glycol Dimethacrylate (EGDM) และ 4,4-Azo-Bis(4-Cyanopentonic Acid) (AZO) เป็นตัวเชื่อมต่อสายโซ่และตัวริเริ่มตามลำดับ พบว่าไฮโดรเจลผสมทั้งสองชนิดมีความสามารถในการดูดซับน้ำในปริมาณสูงโดยพิจารณาจากค่า Swelling มากกว่าไฮโดรเจลชนิด AMPS- Na^+ จากการศึกษาอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 61 ถึง 67 กรัมต่อชั่วโมง ตารางเมตร และจากการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ L929 โดยวิธี Direct Contact พบว่าไม่สามารถแสดงสมบัติความเป็นพิษ ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาไฮโดรเจลเหล่านี้ต่อไปเพื่อนำมาใช้ในการรักษาได้จริง

Rosso และคณะ [29] ได้ศึกษาการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์สองชนิดระหว่าง HEMA กับ 2-Methacryloyloxyethyl Ammonium Chloride โดยโคพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมี HEMA เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งโคพอลิเมอร์ทั้งสองที่ได้มีลักษณะประจุทางไฟฟ้าเป็นบวก (Cationic) และลบ (Anionic) ตามลำดับ โดยใช้ AIBN เป็นตัวริเริ่มและใช้ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ชนิดเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต ที่อุณหภูมิ 60 ถึง 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลที่ได้ พบว่าโคพอลิเมอร์ทั้งสองมีค่าการดูดซับน้ำอยู่ในช่วง 635 ถึง 857 กรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าไฮโดรเจล HEMA ซึ่งมีการดูดซับประมาณ 56 กรัมต่อกรัม จากการทดสอบการเกาะติดเซลล์ (Cell Adhesion) พบว่าโคพอลิเมอร์ที่มีลักษณะประจุทางไฟฟ้าที่เป็นบวกสามารถเกาะติดเซลล์ได้ดีกว่าประจุลบนอกจากนั้นยัง พบว่าโคพอลิเมอร์ทั้งสองไม่มีความเป็นพิษ

Abdel-Azim และคณะ [30] ได้ทำการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์สองชนิดระหว่าง AMPS กับ Acrylamide และ AMPS กับ Acrylic acid ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Initiation Polymerisation) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl Peroxide) และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium Persulphate) เป็นตัวริเริ่มและใช้ 1,1,1-Trimethylolpropane Trimethacrylate (TPT) เป็นตัว

เชื่อมต่อกับสายโซ่ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาอัตราส่วนมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ พบว่าโคพอลิเมอร์ที่ได้ทั้งสองชนิดที่ใช้อัตราส่วนของ AMPS ที่มากกว่าส่งผลทำให้มีค่าปริมาณน้ำสมดุลสูงกว่าและยังพบว่าที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ที่เท่ากันโคพอลิเมอร์ชนิดที่มีองค์ประกอบของ Acrylamide มีค่า EWC มากกว่าโคพอลิเมอร์ชนิดที่มีองค์ประกอบของ Acrylic Acid เนื่องจาก Acrylamide มีหมู่ไฮโดรฟิลิกที่ต่ำกว่า Acrylic Acid

Yan Bao และคณะ [31] ได้ศึกษาไฮโดรเจลดูดซับยิ่งยวด ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ระหว่างกรดอะคริลิก (AA) อะคริลาไมด์ (AM) และ AMPS ในโซเดียมคาร์บอกซิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethyl Cellulose, CMC) และมอนต์มอริลโลน (Montmorillonite, MMT) โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium Persulfate, KPS) เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาฟรีเรดิคอลพอลิเมอไรเซชันและใช้ N,N-Methylene Bis Acrylamide (MBA) เป็นตัวเชื่อมต่อกับสายโซ่ ซึ่งโครงสร้างและลักษณะรูปร่างของไฮโดรเจลดูดซับยิ่งยวดสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FT-IR การวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน (SEM) จากการศึกษาลักษณะต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าไฮโดรเจลดูดซับยิ่งยวดประกอบด้วยโครงสร้างที่มีรูพรุนซึ่งเกิดจากตัวเชื่อมต่อกับสายโซ่ คือ MMT และ CMC ที่กระทำกับสายโซ่ที่อยู่ข้างเคียง คือ Carboxamide, Carboxylate และ Sulfate พฤติกรรมการพองตัวของไฮโดรเจลดูดซับยิ่งยวดขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลายภายนอก ขนาดอนุภาค และความเข้มข้นของสารละลายเกลือ

Pourjavadi A. และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลดูดซับยิ่งยวดจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งสังเคราะห์ AMPS ร่วมกับ คัปปา-คาราจีแนน (Kappa-Carrageenan, C) ด้วยกระบวนการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโคพอลิเมอร์เป็นปฏิกิริยาของสารเนื้อเดียวกัน โดยที่ใช้ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium Persulfate, APS) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในขณะที่ใช้ N,N,N',N'-Tetramethyl Ethylenediamine (TMEDA) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ N,N-Methylene Bis Acrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมขวาง ซึ่งได้มีการศึกษาการสังเคราะห์ kC-g-AMPS ไฮโดรเจลและการศึกษาโครงสร้างของ kC-g-AMPS ไฮโดรเจลด้วยเทคนิค FT-IR ตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ คือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา สารเชื่อมขวาง และความเข้มข้นของมอนอเมอร์ เช่นเดียวกับอุณหภูมิของกระบวนการสังเคราะห์ การวัดปริมาณการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลสามารถทำได้โดยการวัดค่าจากสารละลายของ LiCl, NaCl, KCl, MgCl₂, CaCl₂, SrCl₂, BaCl₂ และ AlCl₃ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสูงอยู่ในรูปของสารละลายเกลือ ไฮโดรเจลดังกล่าว อาจเรียกว่า "Superabsorbents Antisalt" ซึ่งเป็นการดูดซับของ Superabsorbent Hydrogel ถูกวัดค่า pH เมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย โดยที่ค่า pH จะอยู่

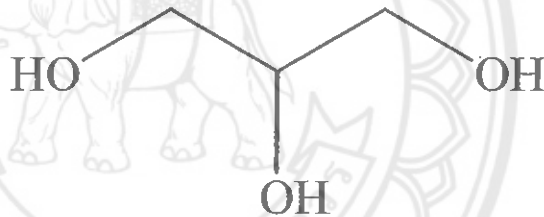
ระหว่าง 1-13 และ kC-g-AMPS มีการตอบสนองต่อค่า pH ในส่วนที่สามารถดูดซับและไม่สามารถดูดซับได้ที่ pH เท่ากับ 2 และ 8 ตามลำดับ

Chinanat และคณะ [2] ได้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลสำหรับการใช้งานทางด้านการแพทย์เพื่อเป็นวัสดุปิดแผล ซึ่งเตรียมไฮโดรเจลจาก Sodium-2- Acrylamido-2- Methylpropane Sulfonate (Na-AMPS) ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยารีดอกซ์ จากผลการศึกษา พบว่าแผ่นไฮโดรเจลมีลักษณะเกาะกันอย่างดี โดยที่มีค่าการดูดซับน้ำสมดุลของแผ่นไฮโดรเจล คือ ร้อยละ 98 ซึ่งจะเกิดสภาวะสมดุลในเวลา 30 นาที และโมเลกุลของน้ำสามารถระเหยออกจากแผ่นไฮโดรเจลในเวลา 240 นาที และสามารถเก็บกักน้ำได้ร้อยละ 22 โดยที่อัตราการแพร่ของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจลมีค่าประมาณ 85 กรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจลในเชิงพาณิชย์ การซึมผ่านของออกซิเจนของแผ่นไฮโดรเจลมีค่า 300-400 cc.mm/cm².s.cmHg

พดาร์ตัน [33] ศึกษาไฮโดรเจลพอลิเมอร์ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากเกลือโซเดียมของ 2-อะครีลามิโด-2-เมทิลโพรเพน ซัลโฟนิคแอซิด ซึ่งเป็นมอนอเมอร์และใช้ตัวเชื่อมต่อด้ายโซ่เอ็น-เอ็น'-เมทิลีน-บิส-อะครีลาไมด์หรือเอทิลีนไกลคอลไดเมทาครีเลตและใช้ 4,4'-เอโซ-บิส เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบใช้แสงยูวีโดยเตรียมผ่านปฏิกิริยาฟรีแรดิคัลพอลิเมอไรเซชันในระบบที่มีน้ำเป็นเป็นตัวกลางผลของการใช้ความเข้มข้นที่ต่างกันของตัวเชื่อมต่อด้ายโซ่ในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 2.5 โมล และความเข้มข้นของมอนอเมอร์เอเอ็มพีเอส-โซเดียมไอออนที่แตกต่างกันระหว่างร้อยละ 30 ถึง 50 น้ำหนักโดยปริมาตรได้ถูกศึกษาในลักษณะของควมมีอิทธิพลต่อสมบัติของการดูดซับน้ำ เอ็น-ไวนิลโพลีโรล และเมทาคริลิกแอซิด จะถูกใช้เป็นมอนอเมอร์ร่วมที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเป็นทางเลือกเพื่อที่จะได้ไฮโดรเจลพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแตกต่างกันแผ่นไฮโดรเจลได้ถูกหาลักษณะเฉพาะและประเมินในด้านสมบัติทางกายภาพ เช่น ปริมาณน้ำอ่องค์ประกอบ สัดส่วนการพองตัว ปริมาณน้ำคงอยู่ อัตราการผ่านของไอน้ำ ความแข็งแรงในการยึดเกาะผิวจุลศาสตร์การแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน ไอออนโครมาโทกราฟีและการทดสอบความเป็นพิษ จากผลการทดลอง พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่ดูดซับน้ำเต็มที่มีปริมาณน้ำอ่องค์ประกอบ ณ สมดุลอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 98 มีค่าการแพร่ผ่านของ ก๊าซออกซิเจนโดยประมาณอยู่ในช่วง 357 ถึง 694 ซีซีเซนติเมตรต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีต่อเซนติเมตรปรอทที่ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะผิวอยู่ในช่วง 0.74 ถึง 1.98 นิวตันต่อ 25 มิลลิเมตร ค่าจุลศาสตร์การแพร่ของแผ่นไฮโดรเจลที่ใช้ เอ็นเอ็มบีเอเป็นตัวเชื่อมต่อด้ายโซ่ที่ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 2.5 โมล แสดงถึงค่าเอ็กโพเนนเชียลของการแพร่ เป็นแบบฟิคเกียน ทำให้อัตราการแพร่ของน้ำช้ากว่าการขยายตัวของโครงสร้างแบบร่างตาข่ายนอกจากนี้ไฮโดรเจลที่

สังเคราะห์ขึ้นระหว่าง เอ็มเอเอ กับ เอเอ็มพีเอส-โซเดียมไอออน ถูกทดสอบการดูดซับในสารละลายที่มีค่าพีเอสแตกต่างกัน (1.2 ถึง 9.0) ซึ่งมีค่าสูงสุดที่พีเอส 7.4 เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณมอนอเมอร์ตกค้างในแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ได้โดยเทคนิคไอออนโครมาโตกราฟีที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.15 โดยมวล ต่อปริมาตร การทดสอบความเป็นพิษโดยใช้วิธีสัมผัสโดยตรงกับเซลล์ไฟโบบลาสของหนูแอล 929 บ่งบอกได้ว่าแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ไม่แสดงความเป็นพิษ จากผลการทดลองในเบื้องต้นนี้ได้แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จาก เอเอ็มพีเอส ด้วยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบใช้แสงมีศักยภาพอย่างมากสำหรับใช้ในทางการแพทย์เพื่อเป็นวัสดุปิดแผล

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลข้างต้นส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์ AMPS และมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจใน กลีเซอรอล เป็นสารเคมีที่มีหมู่ไฮดรอกซิล มีสมบัติในละลายน้ำได้ดี การจับกับน้ำได้ดี เป็นสารที่สามารถเก็บความชื้นได้ และยังเป็นสารที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่มีรายละเอียดดังนี้

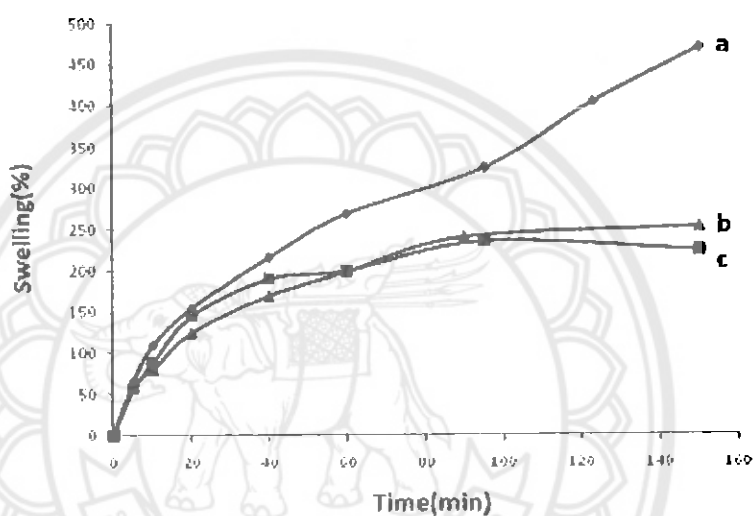


รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ Glycerol

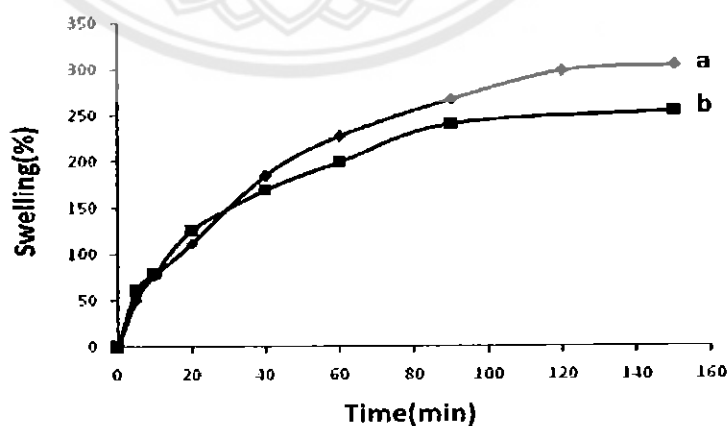
Luz และคณะ [34] ได้สังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่างอะคริลาไมด์กับอะคริลิก โดยใช้ N,N'-Methylene Bis Acrylamide หรือ N-Isopropylacrylamide เป็นสารเชื่อมขวางและสังเคราะห์สารเชื่อมขวางระหว่างอะคริลิกและกลีเซอรอลจะได้เป็นสารเชื่อมขวางชนิดใหม่ คือ ไดอะคริเลตกลีเซอรอล (Diacrylate Glycerol, DAG) ซึ่ง DAG จะช่วยให้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ ช่วยให้โครงสร้างขนาดไมโครมีสภาพแห้ง ช่วยให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้นในระหว่างการบวม สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า และความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเชื่อมขวาง DAG ด้วย ซึ่งในการสังเคราะห์ได้แบ่งออกเป็น 2 วิธี โดยใช้สารเชื่อมขวางที่แตกต่างกัน จะได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างอะคริลาไมด์และอะคริลิกโดยการใช้สารเชื่อมขวาง N,N'-Methylene Bis Acrylamide หรือ N-Isopropylacrylamide นำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกล การ

พองตัว และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล พบว่าลักษณะต่างๆ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเชื่อมขวางนั้นๆ และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของอะคริลาไมด์และอะคริลิกโดยใช้สารเชื่อมขวางโดยใช้สารเชื่อมขวาง DAG นำมาวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลสองด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

Agela Lisanda S. และคณะ [35] ได้ศึกษาและพัฒนาแผ่นไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติควบคุมการปลดปล่อยตัวยา โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารเชื่อมขวางของการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก Acrylic Acid



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการพองตัวที่ใช้กลีเซอรอลตัวเชื่อมต่อกับ PAA ที่ค่า pH แตกต่างกัน คือ a) pH 10 b) pH 7 c) pH 4



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการพองตัวที่ใช้กลีเซอรอลตัวเชื่อมต่อกับ PAA ที่ค่า pH แตกต่างกัน คือ pH 7 ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ a) 50 องศาเซลเซียส b) 30 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จาก Acrylic Acid โดยการเติมสารเชื่อมขวางและไม่เติมสารเชื่อมขวาง พบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากการเติมสารเชื่อมขวางมีการบวมมากกว่าร้อยละ 100 ในเวลา 20 นาที โดยที่การบวมของไฮโดรเจลจะมีค่ามากในช่วงของค่า pH ที่เป็นกลางและกรด ซึ่งไฮโดรเจลที่มีค่า pH เท่ากับ 10 มีการบวมร้อยละ 470 ในช่วงเวลา 100 นาที และที่ค่า pH ที่ 7 และ 4 มีการบวมร้อยละ 250 และ 220 ตามลำดับ จากการศึกษา พบว่าเมื่อเติมกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารเชื่อมขวาง จะส่งผลให้การบวมน้ำของไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้น การบวมขึ้นอยู่กับค่า pH และ อุณหภูมิ

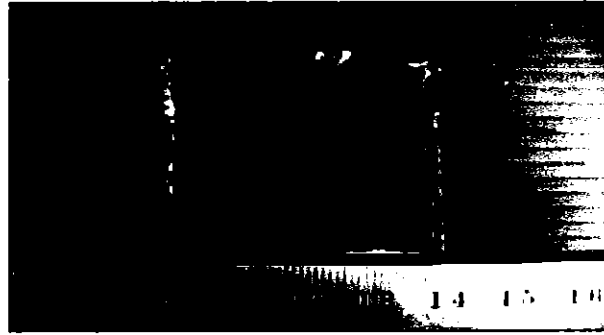
จากงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ผ่านมาได้ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบสมบัติต่างๆ ของไฮโดรเจล โดยเฉพาะลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับน้ำของไฮโดรเจล เช่น การหาปริมาณน้ำ สัดส่วนการพองตัว (Swelling Ratio) การหาปริมาณคงอยู่ การหาอัตราการผ่านของไอน้ำ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน คือ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์และการทดสอบสมบัติเชิงกล คือ สมบัติแรงดึง จากสมบัติต่างๆ ของไฮโดรเจลที่เกิดจากการนำมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ ไปร่วมสังเคราะห์กับมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

จากงานวิจัยของ Chinanat และคณะ [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่างๆ เช่น การหาปริมาณน้ำ การดูดซับน้ำสมดุล การหาอัตราการผ่านของไอน้ำ การระเหยของน้ำ การกักเก็บน้ำ เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองสามารถ แสดงได้ดังต่อไปนี้

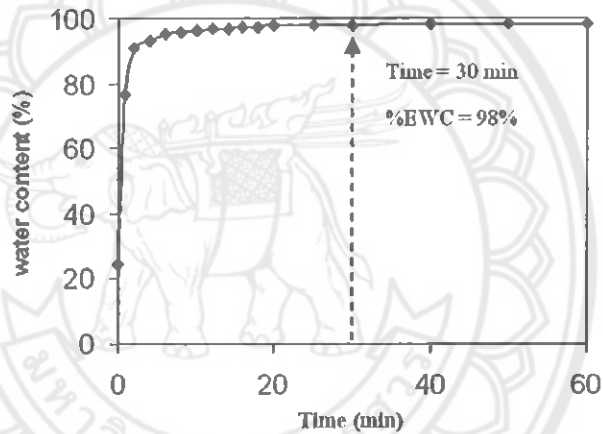
การหาปริมาณน้ำสมดุล



รูปที่ 2.9 แผ่นไฮโดรเจลก่อนการพองตัว ($1 \times 1 \times 0.12$ เซนติเมตร) ที่เวลา 0 นาที มีค่าการพองตัวร้อยละ 22 ที่ AMPS- Na^+ ร้อยละ 40 และ EGDM ร้อยละ 1 โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์



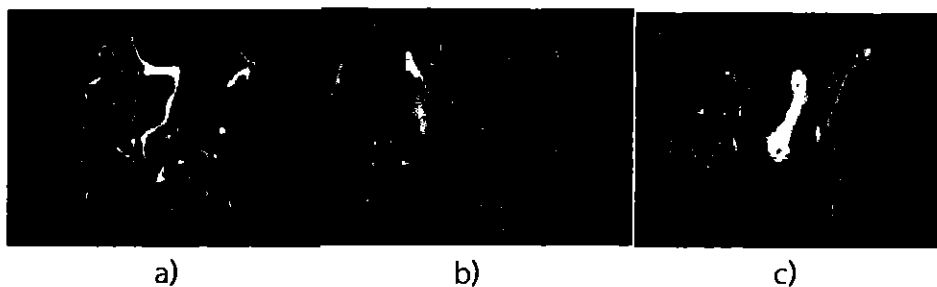
รูปที่ 2.10 แผ่นไฮโดรเจลหลังการพองตัว (4 x 4 x 0.35 เซนติเมตร) ที่เวลา 30 นาที
ค่าการพองตัวร้อยละ 98 ที่ AMPS-Na⁺ ร้อยละ 40 และ EGDM ร้อยละ 1
โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์



รูปที่ 2.11 การดูดซับน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่เวลาผ่านไปเมื่อแช่
แผ่นไฮโดรเจลไว้ในน้ำกลั่น ที่ 37 องศาเซลเซียส

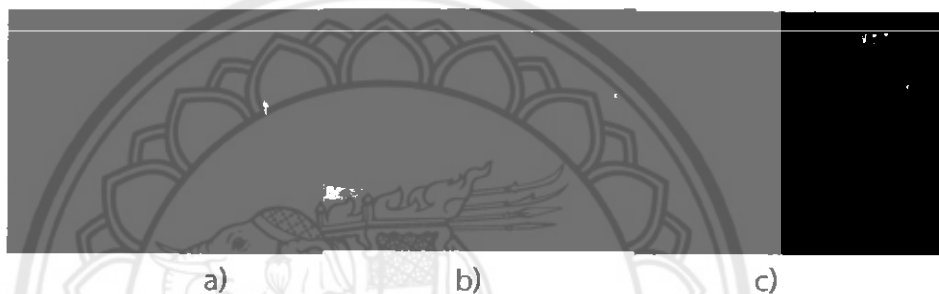
ซึ่งจากตัวอย่างการทดสอบการหาปริมาณน้ำสมดุลของ งานวิจัยของ Chinanat และคณะ พบว่าไฮโดรเจลจาก AMPS Na⁺ ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ มีค่าการดูดซับน้ำสมดุลของแผ่นไฮโดรเจล คือ ร้อยละ 98 ซึ่งจะเกิดสภาวะสมดุลในเวลา 30 นาที และยังสามารถเก็บกักน้ำได้ร้อยละ 22

จากงานวิจัยของ Phusit และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากมอนอเมอร์ AMPS-Na⁺ รวมถึงไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างกับคาร์บอกซีเมธิลไคโตซาน (CMCTS) หรือผสมกับคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลส (CMC) ผ่านปฏิกิริยาแรดิคอลพอลิเมอไรเซชันในสารละลายโดยอาศัยแสงอัลตราไวโอเล็ตและศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของไฮโดรเจล แสดงดังรูปที่ 2.12 และ 2.13



รูปที่ 2.12 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน

a) AMPS- Na^+ และไฮโดรเจลผสมชนิด b) CMCTS c) CMC



รูปที่ 2.13 ลักษณะแผ่นไฮโดรเจล a) AMPS- Na^+ และไฮโดรเจลผสมชนิด b) CMCTS c) CMC

ก่อนและหลังแช่น้ำกลั่นที่ 35.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จนถึงจุดสมดุล

ซึ่งจากตัวอย่างการทดสอบการหาปริมาณน้ำสมดุลของ งานวิจัย Phusit และคณะ พบว่าเมื่อนำคาร์บอกซีเมธิลไคโตซานและคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสเข้ามาเป็นองค์ประกอบร่วมในการสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจล AMPS- Na^+ พบว่าสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพที่ทำให้มีความเหนียวยืดหยุ่นมากขึ้น เพิ่มปริมาณการดูดซับน้ำ ช่วยลดปริมาณการใช้มอนอเมอร์ AMPS- Na^+

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากสารละลายมอนอเมอร์ 2-อะครีลาไมโด-2-เมทธิลโพรเพน-ซัลโฟนิคแอซิด เกลือโซเดียมผสมกันกับกลีเซอรอล และน้ำในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน และระบบริเริ่มที่ต่างกัน จากนั้นจะทำการนำแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบหาปริมาณน้ำ สมดุล หาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ และศึกษาสมบัติเชิงกล โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

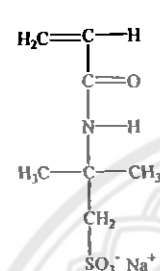
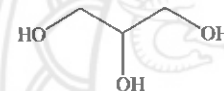
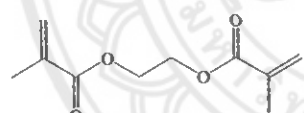
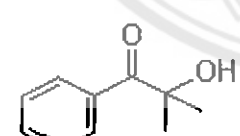
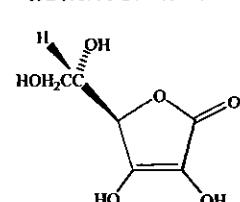
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

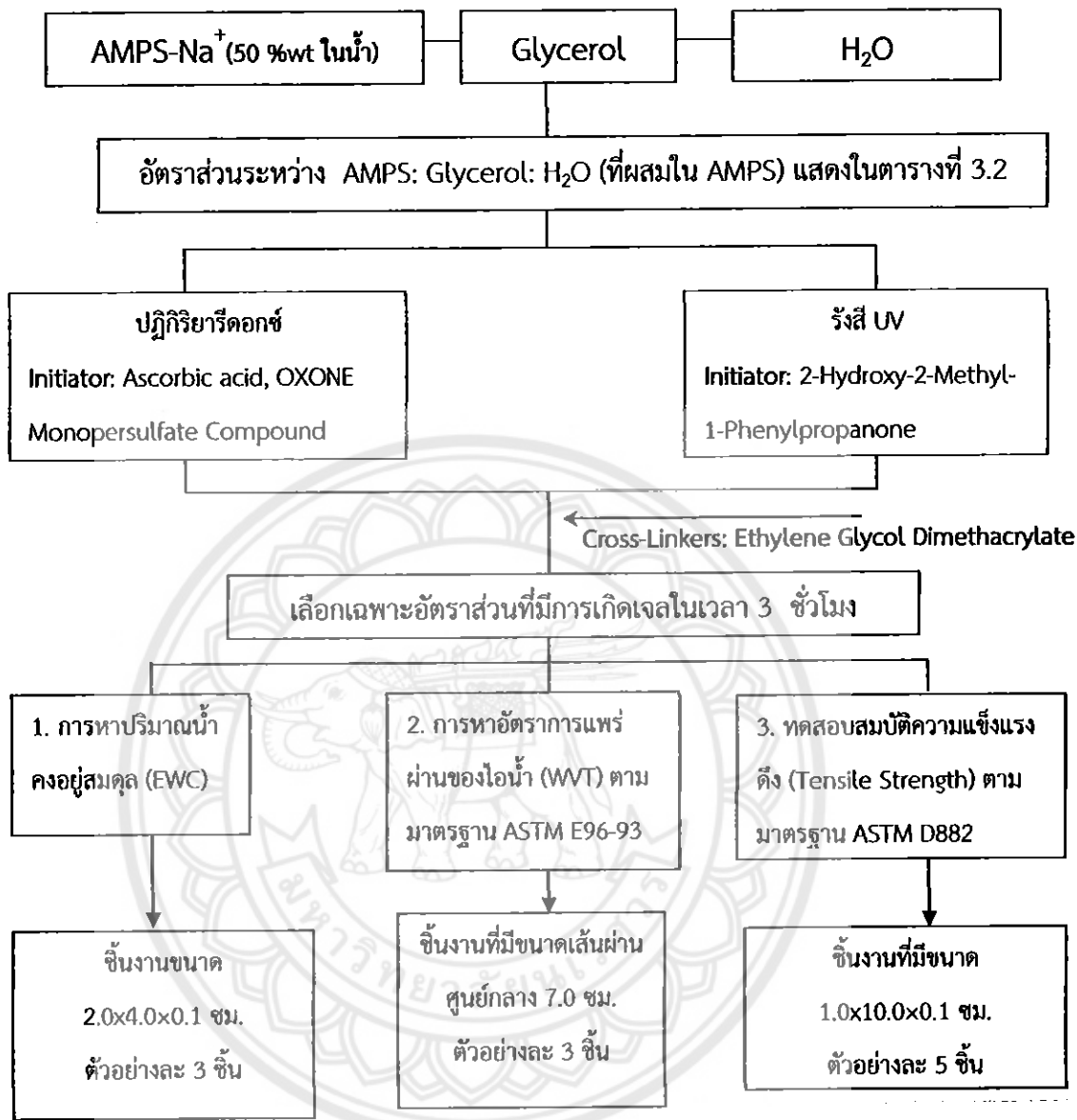
- 3.1.1.1 เครื่องวัดสมบัติเชิงกล (Mechanical Tester)
- 3.1.1.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Electrical Balance)
- 3.1.1.3 ชุดอุปกรณ์การหาอัตราการผ่านของไอน้ำ
- 3.1.1.4 อินคิวเบเตอร์ (Incubator)
- 3.1.1.5 ตู้อบ (Drying Oven)
- 3.1.1.6 กระจกนาฬิกา (Watch Glass)

3.1.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	น้ำหนักโมเลกุล	หน้าที่	ความบริสุทธิ์
2-อะครีลาไมโด-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิค แอซิดเกลือโซเดียม 	207.25	มอนอเมอร์	50 %wt ในน้ำ
กลีเซอรอล 	92.09	มอนอเมอร์	≥99.5 %
เอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาคริเลต 	198.22	ตัวเชื่อมตอสายโซ่	75 %
2-ไฮดรอกซี-2-เมทิล-1-ฟีนิลโพรพานอน 	196.99	ตัวเริ่มปฏิกิริยา	-
แอสโครบิก แอซิด 	176.12	ตัวเริ่มปฏิกิริยา	-
ออกโซน โมโนซัลเฟต คอมพาวนด์ $\text{KHSO}_5 \cdot \frac{1}{2}\text{KHSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{K}_2\text{SO}_4$	307.38	ตัวเริ่มปฏิกิริยา	-



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจล

3.2.1 ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

3.2.1.1 ผสมสารละลายมอนอเมอร์ที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนต่างๆ ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำไฮโดรเจล

ปริมาณ AMPS-Na ⁺ (กรัม)	ปริมาณ Glycerol (กรัม)	ปริมาณ H ₂ O (กรัม)
6.00	0.00	3.00
6.00	0.25	2.75
6.00	0.50	2.50
6.00	0.75	2.25
6.00	1.00	2.00

3.2.1.2 เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาแอสโครบิก แอซิดและออกโซน โมโนซิลเฟต คอมพาวนด์ในปริมาณ 0.65 กรัม ทั้งสองชนิดตามลำดับ และเติมสารเชื่อมต่อกับสายโซ่เอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาครีเลตในปริมาณ 0.1 กรัม คนสารละลายให้เข้ากันจากนั้นเทสารละลายมอนอเมอร์ลงในแม่พิมพ์

3.2.1.3 รอเวลา 3 ชั่วโมง ให้แผ่นไฮโดรเจลเกิดปฏิกิริยาแล้วนำแผ่นเจลออกจากแม่พิมพ์

3.2.1.4 นำแผ่นไฮโดรเจลที่ได้มาไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.1.5 นำชิ้นงานมาตัดให้ได้จำนวน 55 ชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่

ก. การหาปริมาณน้ำดูดซับใช้ชิ้นงานที่มีขนาด 2×4×0.1 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้นงาน

ข. การหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำด้วยวิธีวอเตอร์คัพใช้ชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้นงาน

ค. การศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงใช้ชิ้นงานที่มีขนาด 1×10×0.1 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้นงาน

3.2.2 ระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

3.2.2.1 ผสมสารละลายมอนอเมอร์ที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนต่างๆในตารางที่ 3.2

3.2.2.2 เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา 2-ไฮโดรอกซี-2-เมธิล-1-พรีนิลโพรพาโนนปริมาณ 0.65 กรัม และเติมสารเชื่อมต่อดายไซเอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาครีเลตในปริมาณ 0.1 กรัม คนสารละลายให้เข้ากันจากนั้นเทสารละลายมอนอเมอร์ลงในแม่พิมพ์

3.2.2.3 นำแม่พิมพ์เข้ากล่องอะลูมิเนียมเพื่อให้แสงอัลตราไวโอเลตโดยที่ฉายแสงอัลตราไวโอเลตในระยะห่างจากแม่พิมพ์ 10 เซนติเมตร ในทิศทางขนานกับแม่พิมพ์เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลที่ได้ออกจากแม่พิมพ์

3.2.2.4 นำแผ่นไฮโดรเจลที่ได้มาเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.2.5 นำชิ้นงานจำนวน 55 ชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่

ก. การหาปริมาณน้ำสมดุลใช้ชิ้นงานที่มีขนาด $2 \times 4 \times 0.1$ เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้นงาน

ข. การหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำด้วยวิธีวอเตอร์คัพใช้ชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้นงาน

ค. การศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงใช้ชิ้นงานที่มีขนาดประมาณ $1 \times 10 \times 0.1$ เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้นงาน

3.3 การทดสอบ

3.3.1 การหาปริมาณน้ำสมมูล

การหาปริมาณน้ำสมมูลเป็นการวัดความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์สามารถทำได้โดย

3.3.1.1 นำแผ่นไฮโดรเจลขนาด $2 \times 4 \times 0.1$ เซนติเมตร มาชั่งน้ำหนักแผ่นเจลแห้ง

3.3.1.2 นำแผ่นไฮโดรเจลไปแช่ในน้ำกลั่นที่ 35 องศาเซลเซียส ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.1.3 นำไฮโดรเจลที่บวมน้ำออกมาอย่างระมัดระวังและจะวางไว้บนกระดาษกรองเพื่อซับน้ำที่อยู่รอบนอกของแผ่นไฮโดรเจลออก จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละของปริมาณน้ำสมมูลในสมการที่ 2.1 ต่อไปซึ่งในครั้งนี้จะเป็นการบวมน้ำครั้งที่ 1

3.3.1.4 จากแผ่นไฮโดรเจลที่บวมน้ำในข้อที่ 3 นำไปแช่ในน้ำกลั่น 35 องศาเซลเซียส ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.1.5 นำแผ่นไฮโดรเจลที่บวมน้ำออกมาอย่างระมัดระวังและจะวางไว้บนกระดาษกรองเพื่อซับน้ำที่อยู่รอบนอกของแผ่นไฮโดรเจลออก จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำสมมูลในสมการที่ 2.1 ต่อไปซึ่งในครั้งนี้จะเป็นการบวมน้ำครั้งที่ 2

3.3.1.6 ทำซ้ำเหมือนข้อที่ 4-5 อีกครั้งจนน้ำหนักคงที่

3.3.2 การหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ

การหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของไฮโดรเจลนี้ สามารถศึกษาได้โดยการคำนวณค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำตามมาตรฐาน ASTM E96-93 ด้วยวิธีวอเตอร์คัพโดยทดสอบได้ ดังนี้

3.3.2.1 นำแผ่นไฮโดรเจลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ทหนา 0.10 เซนติเมตร

3.3.2.2 นำแผ่นไฮโดรเจลที่มาประกอบเข้ากับถ้วยอลูมิเนียมที่มีน้ำอยู่ 40 มิลลิลิตร ใช้พาราฟินแวกซ์ปิดฉนวนให้สนิทเพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำที่ด้านปากขวด ชั่งน้ำหนักของถ้วยอลูมิเนียมที่ประกอบเสร็จบันทึกเป็นเวลาเท่ากับศูนย์

3.3.2.3 จากนั้นนำไปวางไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 35 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 55 เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง และนำออกมาชั่งน้ำหนัก

3.3.2.4 พล็อตกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา เพื่อนำความชันที่ได้นำไปคำนวณหาอัตราการผ่านของไอน้ำจากสมการที่ 2.2

3.3.3 การศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึง

ทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึง การศึกษาสมบัติเชิงกลจะศึกษาความเค้นแรงดึงของไฮโดรเจลโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ โดยนำไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ± 5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วตัดให้มีขนาด 1.0×10.0 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้นงาน จากนั้นนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยมีสภาวะของการทดสอบ ดังนี้

ระยะห่างของตัวรองรับตัวอย่าง (Gauge Length)	= 50.0 มิลลิเมตร
ตัววัดแรง (Load Cell)	= 100 นิวตัน
ความเร็วของคานสำหรับยึดตัววัดแรง (Cross-Head Speed)	= 10 มิลลิเมตรต่อนาที
อุณหภูมิ	= 25.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	= ร้อยละ 55 ± 5

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

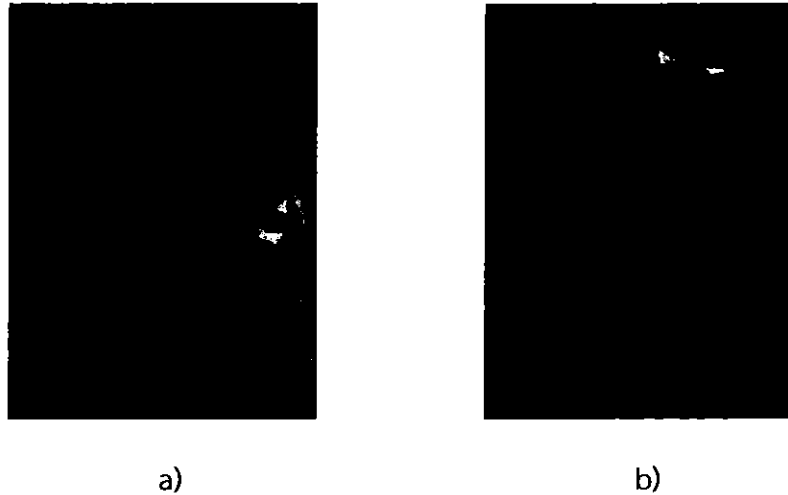
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่ต่างกันจากระบบริเริ่มที่ต่างกัน คือ ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในรูปแบบแผ่นบาง ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นและนำแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำดูด อัตรากการแพร่ผ่านของไอน้ำ และทดสอบความแข็งแรงดึง โดยรายละเอียดผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองมีดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของแผ่นไฮโดรเจล

ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของแผ่นไฮโดรเจลจากการเปรียบเทียบในอัตราส่วนและระบบที่ต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนที่แตกต่างกันและระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางและรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลที่อัตราส่วนต่างกัน
ในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

ตัวอย่าง	อัตราส่วน AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O	เวลา (นาที)	ลักษณะทางกายภาพ
RD1	6 ต่อ 0 ต่อ 3	60	เกิดเจลในระยะเวลาที่เร็ว
RD2	5 ต่อ 1 ต่อ 3	120	เกิดเจลในระยะเวลาที่เร็ว
RD3	4 ต่อ 2 ต่อ 3	180	เกิดเจลในระยะเวลาที่ช้า
RD4	3 ต่อ 3 ต่อ 3	มากกว่า180	ไม่เกิดเจล
RD5	2 ต่อ 4 ต่อ 3	มากกว่า180	ไม่เกิดเจล



รูปที่ 4.1 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลจาก AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O

a) ตัวอย่างที่ RD1 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0 ต่อ 3)

b) ตัวอย่างที่ RD2 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 1 ต่อ 3)

จากการทดลองสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลและสังเกตถึงลักษณะทางกายภาพ เมื่อสังเคราะห์ในอัตราส่วนและระบบริเริ่มที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบและหาลักษณะภายนอกเบื้องต้น เพื่อใช้เลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ต่อไป จากตารางที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนที่เกิดเจลตามระยะเวลาที่กำหนด (3 ชั่วโมง) คือ ระหว่างอัตราส่วนที่ 1 และ 2 โดยที่อัตราส่วน คือ AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O มีค่าเท่ากับ 6 ต่อ 0 ต่อ 3 ถึง 6 ต่อ 1 ต่อ 3 จะได้แผ่นไฮโดรเจลที่มีลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีเหลืองอ่อน ผิวด้านหน้าลื่น ผิวด้านหลังเหนียว สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก และเกิดเจลในระยะเวลาที่กำหนด ส่วนในอัตราส่วนที่ไม่เกิดเจลตามระยะเวลาที่กำหนด (3 ชั่วโมง) คือ อัตราส่วนที่ 3 4 และ 5 เกิดจากกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นและ AMPS- Na^+ ที่ลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนดังกล่าวเกิดเจลช้า (อัตราส่วนที่ 3) และไม่เกิดเจล (อัตราส่วนที่ 4 และ 5) เนื่องจากปริมาณมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ ที่ลดลงปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ AMPS- Na^+ มีหมู่ไฮดรอกซิลเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตัวเชื่อมต่อสายโซ่จำนวนมาก ทำให้ลักษณะของเจลที่ได้มีความเหนียวมากขึ้นตามปริมาณของกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ไฮโดรเจล AMPS- Na^+ สังเคราะห์ได้จึงไม่มีความคงตัวและไม่สามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลระหว่างตัวอย่างที่ RD1 ถึง RD2 ในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

ตัวอย่าง	อัตราส่วน AMPS-Na ⁺ ต่อ Glycerol ต่อ H ₂ O	เวลา (นาที)	ลักษณะทางกายภาพ
RD1.1	6 ต่อ 0 ต่อ 3.00	18	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เกิดเจลช้า
RD1.2	6 ต่อ 0.25 ต่อ 2.75	15	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เกิดเจลช้า
RD1.3	6 ต่อ 0.50 ต่อ 2.50	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลช้า
RD1.4	6 ต่อ 0.75 ต่อ 2.25	9	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลช้า
RD1.5	6 ต่อ 1.00 ต่อ 2.00	9	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลช้า
RD1.6	6 ต่อ 1.25 ต่อ 1.75	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็ว
RD1.7	6 ต่อ 1.50 ต่อ 1.50	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็ว
RD1.8	6 ต่อ 1.75 ต่อ 1.25	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็ว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์
RD1.9	6 ต่อ 2.00 ต่อ 1.00	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็ว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์
RD1.10	6 ต่อ 2.25 ต่อ 0.75	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็ว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์
RD1.11	6 ต่อ 2.50 ต่อ 0.50	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็ว มาก ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลระหว่างตัวอย่างที่ RD1 ถึง RD2 ในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

ตัวอย่าง	อัตราส่วน AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O	เวลา (นาที)	ลักษณะทางกายภาพ
RD1.12	6 ต่อ 2.75 ต่อ 0.25	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็วมาก ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์
RD1.13	6 ต่อ 3.00 ต่อ 0.00	5	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น และเมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว เกิดเจลเร็วมาก ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 4.2 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลที่อัตราส่วนจาก AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O

- ตัวอย่างที่ RD1.1 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.00 ต่อ 3.00)
- ตัวอย่างที่ RD1.2 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.25 ต่อ 1.75)
- ตัวอย่างที่ RD1.3 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.50 ต่อ 1.50)
- ตัวอย่างที่ RD1.4 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.75 ต่อ 1.25)
- ตัวอย่างที่ RD1.5 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 1.00 ต่อ 2.00)

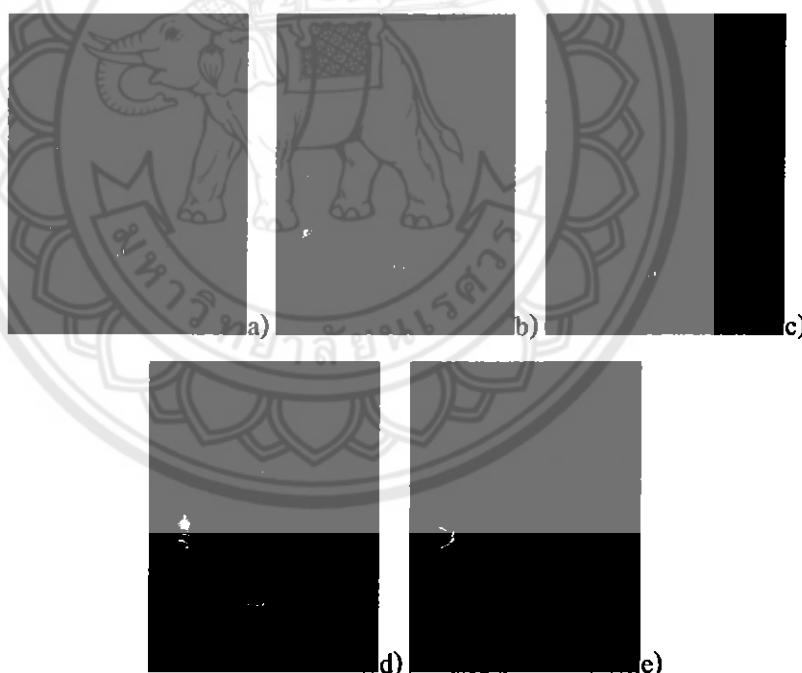
จากตารางที่ 4.1 จะได้อัตราส่วนที่เหมาะสม ดังนั้นจึงกำหนดอัตราส่วนเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้อัตราส่วนอยู่ระหว่างตัวอย่างที่ RD1 และ RD2 ซึ่งในอยู่ช่วง AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O เท่ากับ (6 ต่อ 0 ต่อ 3) และ AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O เท่ากับ (6 ต่อ 1 ต่อ 2) (6 ต่อ 0 ต่อ 3) (6 ต่อ 0.25 ต่อ 2.75) (6 ต่อ 0.50 ต่อ 2.50) (6 ต่อ 0.75 ต่อ 2.25) และ (6 ต่อ 1 ต่อ 2) โดยลดปริมาณน้ำจาก 3 ถึง 0 กรัม เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ต่อไป ซึ่งจากตารางที่ 4.2 ได้เพิ่มความละเอียดของอัตราส่วนในส่วนของกลีเซอรอลและน้ำ พบว่าทุกๆ อัตราส่วนสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้และเกิดเจลตามระยะเวลาที่กำหนด โดยที่ในแต่ละอัตราส่วนจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ ลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีเหลืองอ่อน ผิวด้านหน้าลื่น ไม่เรียบ ผิวด้านหลังเหนียว สามารถยึดติดกับพื้นผิวได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก และเนื้อเจลเหนียว แต่แตกต่างกันที่ระยะเวลาในการเกิดเจล ความยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์ และความเหนียวของเจล ดังนั้นจากตารางที่ 4.2 จึงสามารถเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวกับน้ำและสมบัติแรงดึง โดยหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดอัตราส่วนที่เลือกนำมาทดสอบ คือ ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจล ระยะเวลาในการเกิดเจล ความเหนียวของเจล ความคงรูปของแผ่นไฮโดรเจล และการทนต่อแรงดึง เมื่อนำออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งจะได้อัตราส่วนที่อยู่ในช่วง ตัวอย่างที่ RD1.1 ถึง RD1.5 ของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์มีลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีเหลืองอ่อน ผิวด้านหน้าลื่น ไม่เรียบ ผิวด้านหลังเหนียว สามารถยึดติดกับพื้นผิวได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลเหนียว และเกิดเจลช้า

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลระหว่างตัวอย่างที่ UV1-UV2 ในระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

ตัวอย่าง	อัตราส่วน AMPS-Na ⁺ ต่อ Glycerol ต่อ H ₂ O	เวลา (นาที)	ลักษณะทางกายภาพ
UV1.1	6 ต่อ 0 ต่อ 3.00	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง ไม่เหนียว
UV1.2	6 ต่อ 0.25 ต่อ 2.75	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง ไม่เหนียว
UV1.3	6 ต่อ 0.50 ต่อ 2.50	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว
UV1.4	6 ต่อ 0.75 ต่อ 2.25	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว
UV1.5	6 ต่อ 1.00 ต่อ 2.00	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว
UV1.6	6 ต่อ 1.25 ต่อ 1.75	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว
UV1.7	6 ต่อ 1.50 ต่อ 1.50	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว
UV1.8	6 ต่อ 1.75 ต่อ 1.25	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์
UV1.9	6 ต่อ 2.00 ต่อ 1.00	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์
UV1.10	6 ต่อ 2.25 ต่อ 0.75	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์
UV1.11	6 ต่อ 2.50 ต่อ 0.50	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลระหว่างตัวอย่างที่ UV1–UV2 ในระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

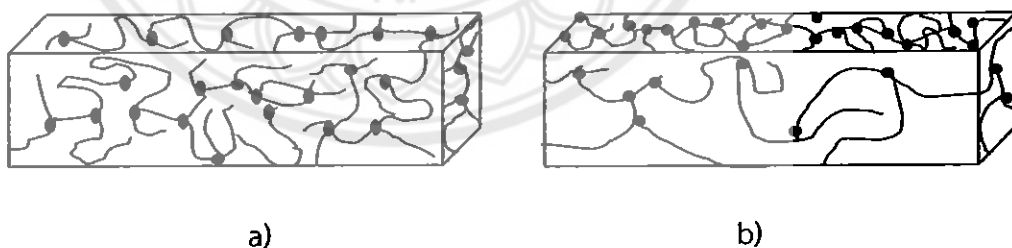
ตัวอย่าง	อัตราส่วน AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O	เวลา (นาที)	ลักษณะทางกายภาพ
UV1.12	6 ต่อ 2.75 ต่อ 0.25	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว ยากต่อการดึงออกจาก แม่พิมพ์
UV1.13	6 ต่อ 3.00 ต่อ 0.00	10	สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง เหนียว ยากต่อการดึงออกจาก แม่พิมพ์



รูปที่ 4.3 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลที่อัตราส่วนจาก AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O

- ตัวอย่างที่ UV1.1 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.00 ต่อ 3.00)
- ตัวอย่างที่ UV1.2 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.25 ต่อ 1.75)
- ตัวอย่างที่ UV1.3 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.50 ต่อ 1.50)
- ตัวอย่างที่ UV1.4 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 0.75 ต่อ 1.25)
- ตัวอย่างที่ UV1.5 AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O = (6 ต่อ 1.00 ต่อ 2.00)

จากตารางที่ 4.1 จะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมจากอัตราส่วนของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังนั้นจึงกำหนดอัตราส่วนเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้อัตราส่วนอยู่ระหว่างตัวอย่างที่ UV1 และ UV 2 ซึ่งอยู่ในช่วง AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O เท่ากับ (6 ต่อ 0 ต่อ 3) และ AMPS- Na^+ ต่อ Glycerol ต่อ H_2O เท่ากับ (6 ต่อ 1 ต่อ 2) คือ (6 ต่อ 0 ต่อ 3) (6 ต่อ 0.25 ต่อ 2.75) (6 ต่อ 0.50 ต่อ 2.50) (6 ต่อ 0.75 ต่อ 2.25) และ (6 ต่อ 1 ต่อ 2) โดยลดปริมาณน้ำจาก 3 ถึง 0 กรัม เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ต่อไป ซึ่งจากตารางที่ 4.3 ได้เพิ่มความละเอียดของอัตราส่วนในส่วนของกลีเซอรอลและน้ำ พบว่าทุกๆ อัตราส่วนสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้และเกิดเจลตามระยะเวลาที่กำหนด โดยที่ในแต่ละอัตราส่วนจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ เกิดเจลเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเลต ลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีขาวใส ผิวด้านหน้าและหลังลื่น เรียบ สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อดึงฉีกขาดได้ยาก เนื้อเจลแข็ง ไม่เหนียว ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์ และระยะเวลาที่เกิดจะเกิดในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน คือ 10 นาที โดยที่ในแต่ละอัตราส่วนสามารถขึ้นรูปได้และมีลักษณะแผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสม แต่เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ กับระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ จึงเลือกอัตราส่วนที่อยู่ในช่วง ตัวอย่างที่ UV1.1 ถึง UV1.5 ของระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งมีลักษณะ คือ เกิดเจลเมื่อโดนแสงอัลตราไวโอเลต ลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีขาวใส ผิวด้านหน้าและหลังลื่น เรียบ สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็งและไม่เหนียว



รูปที่ 4.4 a) ไฮโดรเจลที่ได้จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

b) ไฮโดรเจลที่ได้จากระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

จากรูปที่ 4.4 คือ แผ่นไฮโดรเจลที่ได้จากระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลที่ได้มีความแตกต่างกันด้วย ซึ่งแผ่นไฮโดรเจลจากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์มีลักษณะทางกายภาพที่ยืดหยุ่นและดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ดีกว่าแผ่นไฮโดรเจลจากระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเลต เกิดจากความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายสามมิติภายในแผ่น

ไฮโดรเจล ซึ่งระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์มีการผสมมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเชื่อมตอสายโซ่ก่อนเทลงบนแม่พิมพ์ ส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยากันก่อนเทลงแม่พิมพ์ จึงเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ภายในโครงสร้างอย่างหนาแน่นทั่วแผ่นและในระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตมีการผสมมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และสารเชื่อมตอสายโซ่ จากนั้นนำไปให้แสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งแสงอัลตราไวโอเล็ตจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์และสารเชื่อมตอสายโซ่ แต่เนื่องจากการให้แสงอัลตราไวโอเล็ตบริเวณด้านบนของแม่พิมพ์เท่านั้น จึงเกิดการเชื่อมตอสายโซ่เพียงบริเวณด้านบนและภายในแผ่นไฮโดรเจลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแยกว่าระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์



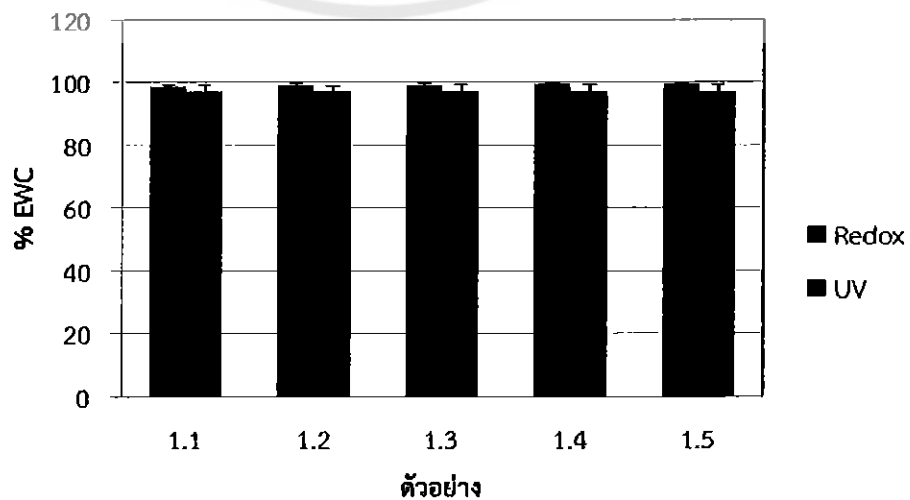
4.2 การหาลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับน้ำ

4.2.1 การหาปริมาณน้ำสมมูล

ปริมาณน้ำสมมูลที่คำนวณได้ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจล จากการเปรียบเทียบในอัตราส่วนที่ต่างกันและระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยการนำแผ่นไฮโดรเจล ตัวอย่างมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2.0x4.0 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 แผ่น จากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจล ตัวอย่างไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักตามระยะเวลาที่กำหนด จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาค่าปริมาณน้ำสมมูลที่ไฮโดรเจลดูดซับไว้ ณ เวลาต่างๆ ดังสมการที่ 2.1 โดยที่ค่าปริมาณน้ำสมมูลของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8 ตามลำดับ

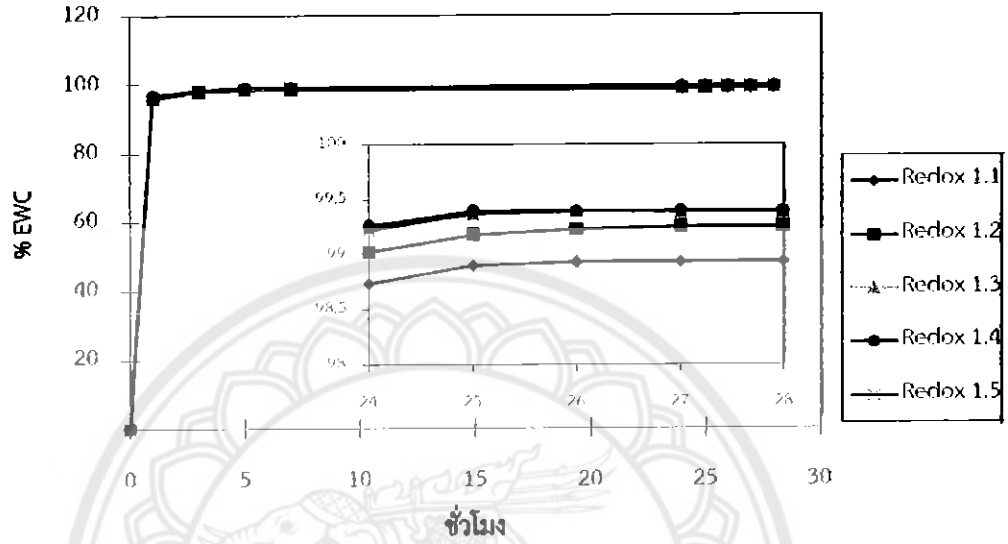
ตารางที่ 4.4 ค่าปริมาณน้ำสมมูลของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มที่ต่างกัน คือ ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

ตัวอย่าง	Redox (ร้อยละ)	UV (ร้อยละ)
1.1	98.93	97.15
1.2	99.24	97.18
1.3	99.38	97.22
1.4	99.4	97.4
1.5	99.41	97.42

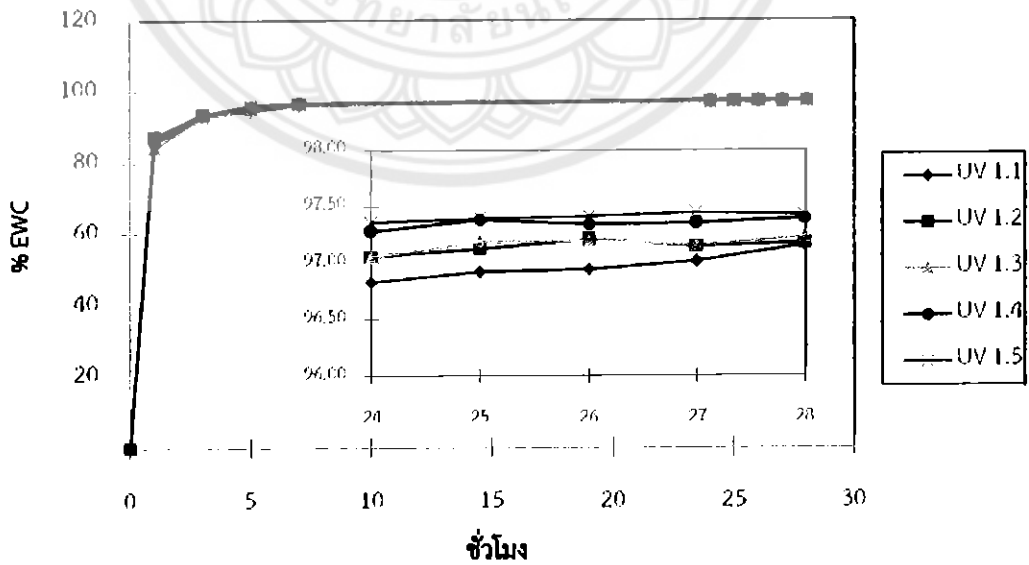


รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำสมมูล (ร้อยละ) ของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มที่ต่างกัน

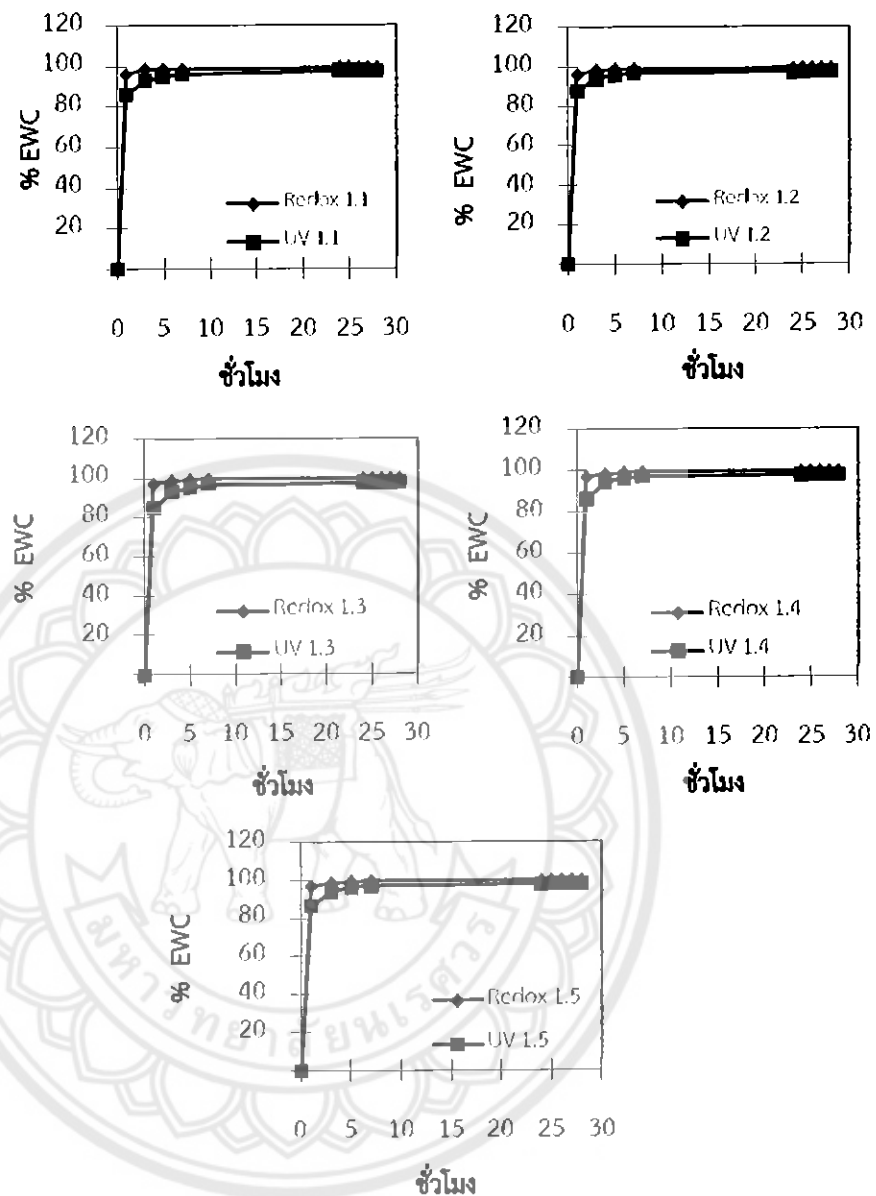
จากตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำสมดุล (ร้อยละ) ของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มที่ต่างกัน พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์มีปริมาณการดูดซับน้ำมากกว่าระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในทุกอัตราส่วน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล ณ เวลาต่างๆ ของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล ณ เวลาต่างๆ ของระบบริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล ณ เวลาต่างๆ ของระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่ต่างกันในส่วนที่ต่างกัน

ไฮโดรเจลเมื่อดูดซับน้ำเข้าภายในโครงสร้างแล้วจะพองตัวได้มาก การดูดซับน้ำของไฮโดรเจล ขึ้นอยู่ความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล คือ ระบบริเริ่ม ปริมาณ และชนิดของหมู่ไฮโดรฟิลิกที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของไฮโดรเจล

จากกราฟรูปที่ 4.6 ถึง 4.7 เป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของสัดส่วนที่แตกต่างกันของ AMPS- Na^+ (6 กรัม) กลีเซอรอล (0 ถึง 1 กรัม) และน้ำ (2 ถึง 3 กรัม) ในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยา

รีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ตามลำดับ ที่มีผลต่อค่าปริมาณน้ำสมดุล ลักษณะกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน พบว่าในอัตราส่วนมีปริมาณกลีเซอรอลที่สูง ทำให้ค่าปริมาณน้ำสมดุลเพิ่มขึ้นด้วย ใน RD1.5 และ UV1.5 มีค่าปริมาณสมดุลมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Agela Lisanda S. พบว่าเมื่อเติมกลีเซอรอลเข้าไปในขณะสังเคราะห์ไฮโดรเจล ส่งผลให้ค่าปริมาณน้ำสมดุลเพิ่มขึ้นด้วย จากกราฟรูปที่ 4.6 ถึง 4.7 พบว่าเมื่อปริมาณของ $AMPS-Na^+$ มีเท่ากัน เมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลและลดปริมาณน้ำ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมของแผ่นไฮโดรเจล ดังกล่าวมีการเชื่อมต่อภายในโครงสร้างลดลงหรือมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่น้อยลง จึงทำให้ภายในโครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายสามมิติ มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และพื้นที่ว่างภายในโครงสร้างน้อยลง เนื่องจากโมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างพื้นที่ว่างของแผ่นไฮโดรเจลและปริมาณน้ำในแผ่นไฮโดรเจลลดลง ดังนั้นภายในโครงสร้างของแผ่นไฮโดรเจลมีโมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่และปริมาณน้ำภายในโครงสร้างน้อยกว่าน้ำภายนอกโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นเมื่อแรงดันออสโมติกมีความแตกต่างกันมาก น้ำภายนอกจึงสามารถแพร่เข้าไปในช่องว่างของแผ่นไฮโดรเจลได้มากและปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลภายในโครงสร้างของแผ่นไฮโดรเจล ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้แผ่นไฮโดรเจลสามารถดึงดูดน้ำเข้ามาภายในโครงสร้างได้ดี โดยที่การดูดน้ำเข้ามาทำให้โครงสร้างภายในแผ่นไฮโดรเจลเกิดการพองตัว คือ สายโซ่พอลิเมอร์มีการกระจายตัวมากขึ้น เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างมากขึ้น นอกจากนี้ภายในโครงสร้างอาจมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่มีสมบัติชอบน้ำอยู่ด้วย การดึงดูดน้ำเข้ามาภายในโครงสร้างด้วยหมู่ที่มีประจุ ทำให้โอกาสที่หมู่ชอบน้ำอื่นที่มีอยู่เกิดพันธะกับน้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบอหิทธิพลระบบริเริ่มที่แตกต่างกันระหว่างระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตของสัดส่วนที่แตกต่างกันของ $AMPS-Na^+$ (6 กรัม) กลีเซอรอล (0 ถึง 1 กรัม) และน้ำ (2 ถึง 3 กรัม) ที่มีผลต่อค่าปริมาณน้ำสมดุล ซึ่งลักษณะกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน พบว่าที่ปริมาณของ $AMPS-Na^+$ ที่เท่ากัน เมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลและลดปริมาณน้ำของระบบริเริ่มที่แตกต่างกันระหว่างระบบริเริ่มแบบรีดอกซ์และระบบริเริ่มแบบรังสีอัลตราไวโอเล็ต ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าปริมาณน้ำสมดุล ซึ่งอยู่ในช่วง ร้อยละ 98.93 ถึง 99.1 และร้อยละ 97.15 ถึง 97.42 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าปริมาณน้ำสมดุลที่ได้ ไม่มีความแตกต่างกันมาก แต่อย่างไรก็ตามค่าปริมาณน้ำสมดุลที่ได้จากทั้งสองระบบริเริ่มที่แตกต่างกันถือว่าเป็นค่าที่สูง โดยแนวโน้มของกราฟทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ไฮโดรเจลที่ใช้ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์มีค่าปริมาณน้ำสมดุลมากกว่าระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ไฮโดรเจลที่เตรียมจากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ให้ลักษณะโครงสร้างที่มีโครงร่างตาข่ายสามมิติที่หนาแน่นกว่าระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่ตึกกว่าระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ แสดงดังรูปที่ 4.4 คือ มีความยืดหยุ่น ดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย จึงทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายสามมิติที่แข็งแรงและสามารถคงรูปอยู่ได้เมื่อโมเลกุลของน้ำแพร่เข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจล ระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตมีค่าปริมาณน้ำสมดุลที่น้อยกว่า เกิดจากลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มแบบแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความยืดหยุ่น ดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ยาก จึงทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายที่ไม่มีความหนาแน่น ไม่มีความแข็งแรงภายในโครงร่างตาข่ายสามมิติ เมื่อโมเลกุลของน้ำแพร่เข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจลจึงเกิดการแตกเปราะและสามารถดูดซับน้ำไว้ในระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น

4.2.2 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ

อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่คำนวณได้ ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจลจากการเปรียบเทียบในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยการนำแผ่นไฮโดรเจลตัดเป็นรูปร่างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ถึง 60 จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วประกอบเข้ากับถ้วยอะลูมิเนียมที่มีน้ำ 20 มิลลิลิตร ใช้พาราฟินปิดผนึก ชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมที่ประกอบเสร็จเป็นน้ำหนักที่เวลาเท่ากับศูนย์ จากนั้นนำไปวางไว้ในตูบเพื่อไม่ให้มีน้ำในถ้วยอะลูมิเนียมสัมผัสกับแผ่นไฮโดรเจล จากนั้นนำถ้วยอะลูมิเนียมออกมาชั่งน้ำหนักตามระยะเวลาที่กำหนด ดังรูปที่ 4.9

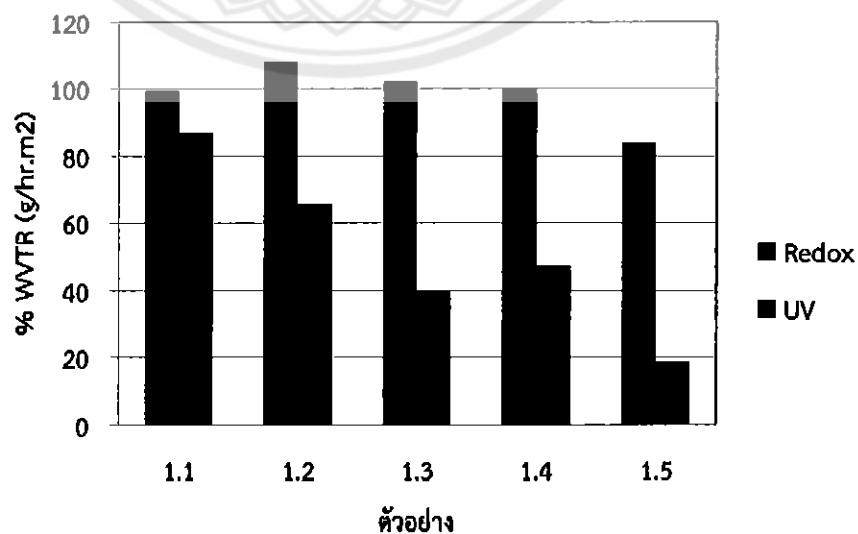


รูปที่ 4.9 การทดสอบอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ

อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ หาได้จากปริมาณที่ระเหยผ่านแผ่นไฮโดรเจลต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จากวิธีของ The American Society for Testing and Materials (ASTM E96-93) เพื่อหาค่าความชันของกราฟ แล้วมาคำนวณหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำจากสมการ 2.2 ดังนั้นจะได้อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ระเหยไปผ่านแผ่นไฮโดรเจลกับเวลาที่เปลี่ยนไป โดยวิธีวอเตอร์คัพของแผ่นไฮโดรเจลจากการเปรียบเทียบในอัตราส่วนและระบบที่ต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนที่แตกต่างกันและระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 ตามลำดับ

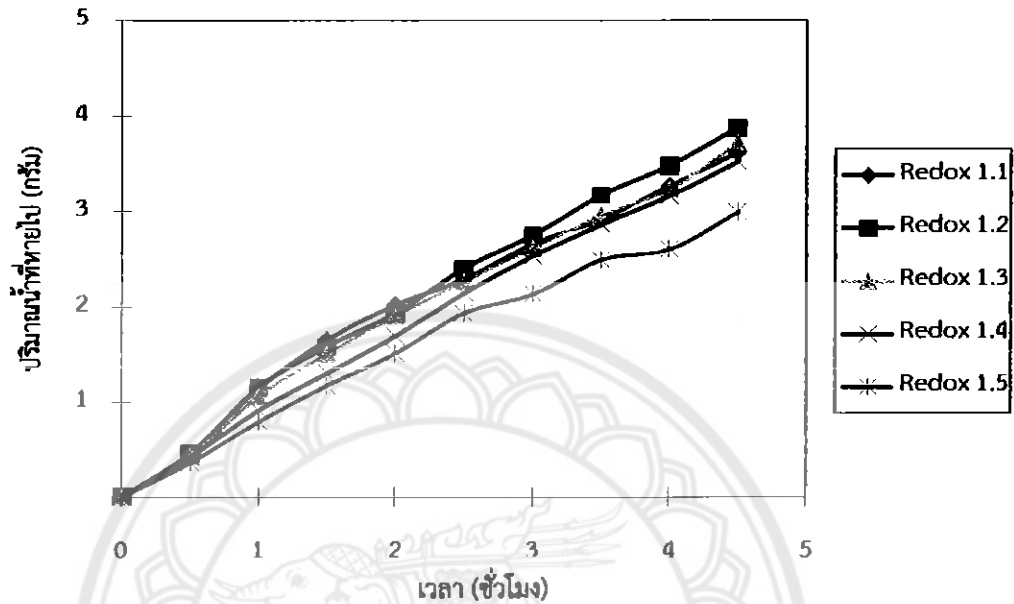
ตารางที่ 4.5 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มที่ต่างกัน

ตัวอย่างที่	Redox (กรัมต่อชั่วโมง ตารางเมตร)	UV (กรัมต่อชั่วโมง ตารางเมตร)
1.1	99.52	87.07
1.2	108.31	65.96
1.3	102.45	39.69
1.4	99.97	47.49
1.5	83.99	18.69

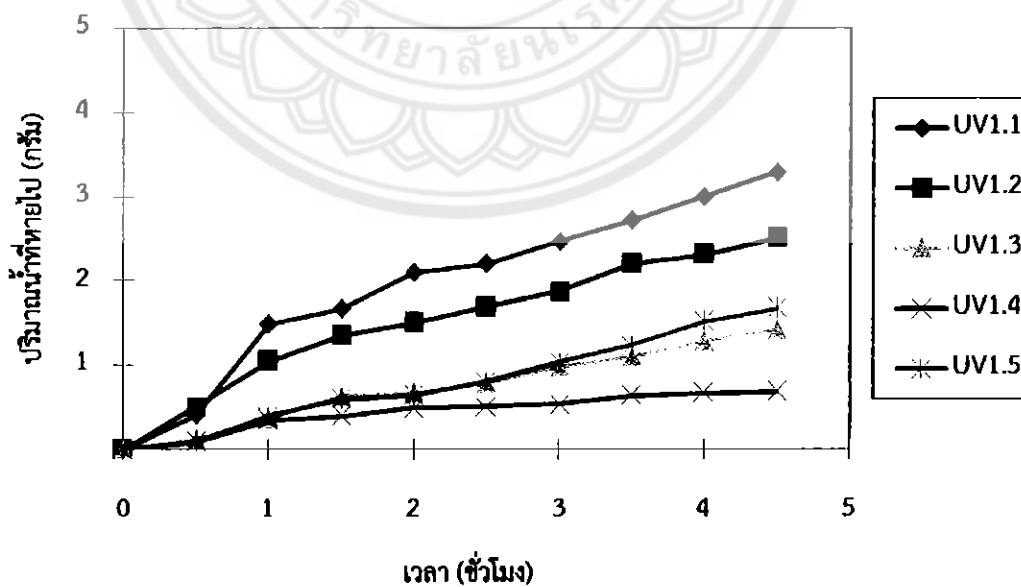


รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มที่ต่างกัน

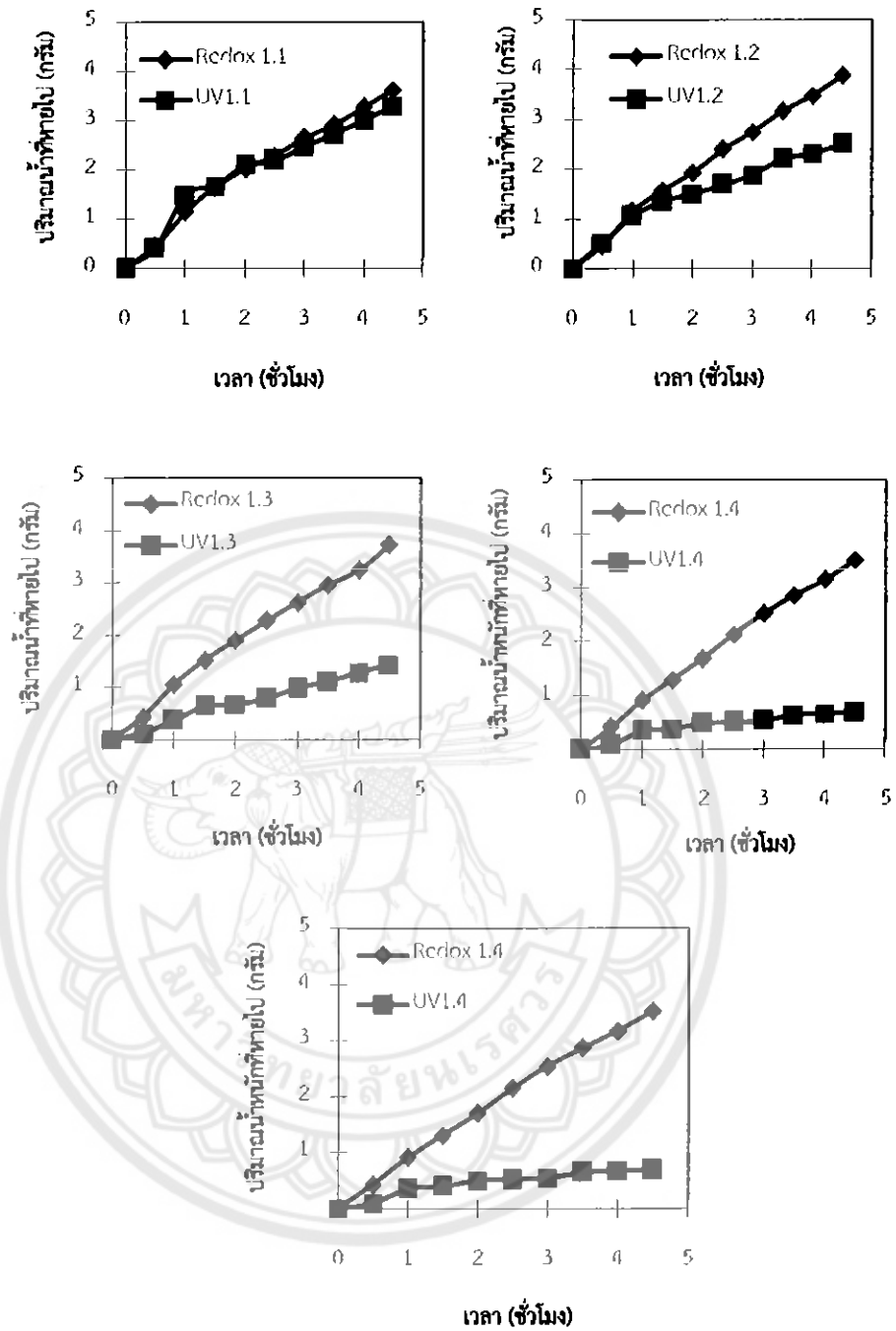
จากตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มที่ต่างกัน พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์มีปริมาณอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำมากกว่าระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในทุกอัตราส่วน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของการเตรียมไฮโดรเจลจากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของการเตรียมไฮโดรเจลจากระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหน้ที่หายไปกับเวลา

ของระบบริเริ่มปฏิกริยาที่ต่างกันในอัตราส่วนที่ต่างกัน

อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้น ต้องมีค่าที่เหมาะสม เนื่องจากบาดแผลแต่ละชนิดจะมีกระบวนการรักษาที่แตกต่างกัน ถ้าสามารถปล่อยผ่านน้ำมากเกินไป

จะทำให้เจลสูญเสียน้ำ ทำให้แผ่นไฮโดรเจลติดบาดแผลได้ แต่ถ้าสามารถปล่อยผ่านไอน้ำน้อยเกินไป จะทำให้แผลเกิดการหมักหมม

การแพร่ผ่านของไอน้ำภายในแผ่นไฮโดรเจลประกอบด้วย 3 ขั้นตอน เริ่มจากการดูดซับ โมเลกุลน้ำเข้าทางด้านหนึ่ง ต่อจากนั้นโมเลกุลน้ำก็จะแพร่กระจายไปอีกด้านหนึ่งจนทั่วแผ่นและสุดท้าย คือ การระเหยโมเลกุลน้ำออกไป ซึ่งขั้นตอนทั้ง 3 จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ สภาพภายในและภายนอกแผ่นไฮโดรเจลดังที่ได้กล่าวไว้ในผลการทดลองปริมาณสมดุล

จากกราฟรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของสัดส่วนที่แตกต่างกัน ของ $AMPS-Na^+$ (6 กรัม) กลีเซอรอล (0 ถึง 1 กรัม) และน้ำ (2 ถึง 3 กรัม) ในระบบริเริ่มด้วย ปฏิกริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ตามลำดับ ที่มีผลต่อค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ ซึ่งลักษณะกราฟมีแนวโน้มของปริมาณน้ำที่หายไปในทิศทางเดียวกันของทั้งสองระบบริเริ่ม ปฏิกริยา พบว่าที่ปริมาณของ $AMPS-Na^+$ ที่เท่ากันและเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลทำให้ค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องจากการเกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันในของแต่ละอัตราส่วนในกรณีของอัตราส่วนที่ 1.5 ของทั้งสองระบบริเริ่ม เมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอล ทำให้ปริมาณของกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นเข้าไปกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล จึงทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายเพิ่มมากขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลของความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายที่ แสดงดังรูปที่ 4.4 ที่จะกล่าวถึงในผลการทดลองสมบัติทางกลความแข็งแรงดังต่อไป ทำให้ไปเพิ่มปริมาณ Bound Water และยากในแพร่กระจายของโมเลกุลน้ำภายในโครงสร้างและในกรณีของอัตราส่วนที่ 1.1 ของทั้งสองระบบริเริ่ม เมื่อไม่มีปริมาณของกลีเซอรอลในโครงสร้างของไฮโดรเจล จึงทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายน้อยกว่าในอัตราส่วนที่มีการเติมกลีเซอรอล ทำให้ภายในโครงสร้างมีโมเลกุลน้ำชนิด Free Water มากขึ้นจึงง่ายต่อการระเหยของน้ำ ดังนั้นในอัตราส่วนที่ 1.1 จึงมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของน้ำที่มากกว่าเมื่อเทียบกับในอัตราส่วนที่ 1.5

จากกราฟรูปที่ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลระบบริเริ่มที่แตกต่างกันระหว่างระบบริเริ่มด้วยปฏิกริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตของสัดส่วนที่แตกต่างกันของ $AMPS-Na^+$ (6 กรัม) กลีเซอรอล (0 ถึง 1 กรัม) และน้ำ (2 ถึง 3 กรัม) ที่มีผลต่ออัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ ซึ่งลักษณะกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน พบว่าที่ปริมาณของ $AMPS-Na^+$ ที่เท่ากัน เมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลและลดปริมาณน้ำของระบบริเริ่มที่แตกต่างกันระหว่างระบบริเริ่มด้วยปฏิกริยารีดอกซ์และระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของไฮโดรเจลที่อยู่ในระหว่างช่วง 83.99 ถึง 108.31 (กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร)

และ 18.69 ถึง 81.07 (กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร) ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละอัตราส่วนมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่ใกล้เคียงกัน โดยที่แนวโน้มของกราฟทั้งสองเป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ ไฮโดรเจลที่ใช้ระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำน้อยกว่าระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ สาเหตุที่ทำให้ไฮโดรเจลทั้งสองระบบมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่แตกต่างกันเนื่องจากโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งไฮโดรเจลที่ใช้ระบบริเริ่มแบบรีดอกซ์มีลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ มีความยืดหยุ่น ดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ซึ่งเกิดจากโครงสร้างมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายสามมิติมากกว่า ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่ามีพื้นที่ว่างภายในโครงสร้างและมีความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์มากกว่า จึงทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างได้ง่ายและมากกว่า หลังจากการดูดซับโมเลกุลน้ำเข้าไปจะเกิดการแพร่กระจายโมเลกุลน้ำเข้าไปทั่วโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างที่มีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายสามมิติที่น้อยกว่าจะสามารถแพร่กระจายโมเลกุลได้เร็วกว่า เนื่องจากโครงสร้างอยู่กันอย่างหลวมๆ และโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างส่วนใหญ่มักจะเป็นชนิด Free Water เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่ห่างกันและสามารถขยายโครงร่างตาข่ายได้มากกว่า ทำให้โอกาสที่โมเลกุลของน้ำจะอยู่ห่างจากสายโซ่พอลิเมอร์ได้ในระดับที่ต่ำ จึงทำให้โมเลกุลน้ำง่ายต่อการถูกกระเเยค ดังนั้นแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมจากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์จึงมีอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่มากกว่าในระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำในผิวหนังปกติและแผลไฟไหม้ในระดับต่างๆ

	จำนวนผู้ป่วยที่ ทำการศึกษา (คน)	อุณหภูมิ ของผิวหนัง (องศาเซลเซียส)	อัตราการแพร่ผ่านของ ไอน้ำ (กรัมต่อชั่วโมงต่อ ตารางเมตร)
ผิวหนังปกติ	60	35.8±0.2	8.5±0.5
แผลไฟไหม้ตื้นที่ 1	12	35.5±0.1	11.6±1.1
แผลไฟไหม้ตื้นที่ 2	30	35.3±0.4	178.1±5.5
แผลไฟไหม้ตื้นที่ 3	20	34.5±0.4	143.2±4.5

จากรายงานการศึกษาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำจากผิวหนังปกติและแผลไฟไหม้ระดับต่างๆ พบว่าแผลไฟไหม้ตื้นที่ 2 และ 3 ที่มีค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำในระดับที่สูง จึงเป็นการเสี่ยงของผู้ป่วยที่จะเกิดภาวะขาดน้ำซึ่งจะนำไปสู่การเสียชีวิต เมื่อนำตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบกับ

รายงานการศึกษาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำจากผิวหนังปกติและแผลไฟไหม้ระดับต่างๆ โดยใช้เทคนิคอีแวพอริมิเตอร์ (Evaporimeter Technique) ของ Nilsson [36] แสดงดังตารางที่ 4.6 ไส้โครเจลที่สังเคราะห์ได้มีอัตราการแพร่ผ่านไอน้ำอยู่ระหว่าง 18.69 ถึง 108.31 กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร พบว่าไส้โครเจลที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองระบบริเริ่มมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่ต่ำกว่าแผลไฟไหม้ระดับที่ 2 และ 3 จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้

4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล

สมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราว คือ มีความยืดหยุ่น อ่อนนุ่ม ไม่ระคายเคืองต่อเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ มีความแข็งแรงทนต่อแรงดึง และไม่ฉีกขาดง่ายเมื่อดึงออกจากบาดแผล ดังนั้นมีการศึกษาสมบัติเชิงกลและทดสอบความแข็งแรงของไส้โครเจลที่สังเคราะห์ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาไส้โครเจลที่สังเคราะห์ขึ้นมาว่ามีความแข็งแรงและมีความปลอดภัยที่จะพัฒนา เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนผิวหนังชั่วคราวได้หรือไม่

สมบัติเชิงกลหรือพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุต่างๆ เมื่อถูกแรงภายนอกมากกระทำจะเกิดแรงภายใน ซึ่งเป็นแรงต้านทานเพื่อที่จะให้ตัวของวัสดุอยู่ในสภาพที่สมดุล ผลของแรงภายนอกที่มากกระทำจะเท่ากับแรงที่ต่อต้านจากภายในวัสดุนั้น ซึ่งขณะที่มีแรงมากกระทำและเกิดการต่อต้านจะส่งผลให้เกิดความเค้นและความเครียดในวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลรุ่น Universal Testing Machine ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของแผ่นไส้โครเจลที่สังเคราะห์ได้ การทดสอบความแข็งแรงดึงของแผ่นไส้โครเจลจากการเปรียบเทียบในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทำได้โดยนำแผ่นไส้โครเจลมาตัดให้มีขนาด 1.0x10.0 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้นงาน จากนั้นนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยมีสถานะของการทดสอบดังนี้

ระยะห่างของตัวรองรับตัวอย่าง	=	50.0	มิลลิเมตร
ตัววัดแรง	=	100	นิวตัน
ความเร็วของคานสำหรับยึดตัววัดแรง	=	10	มิลลิเมตรต่อนาที
อุณหภูมิ	=	25±1	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	=	ร้อยละ 50-60	



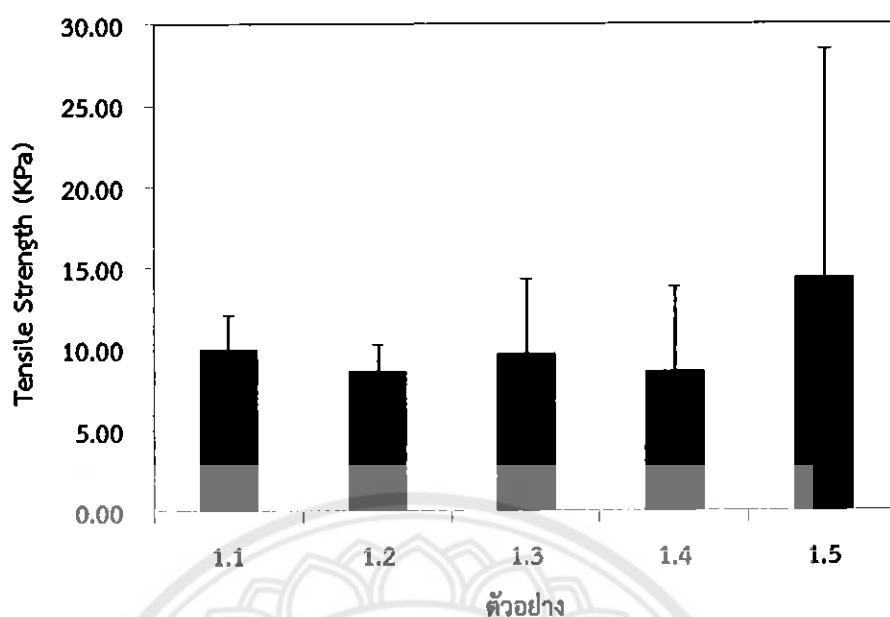
รูปที่ 4.14 การทดสอบสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึง

- a) ก่อนการทดสอบสมบัติเชิงกลที่เวลา 0 นาที
b) หลังการทดสอบสมบัติเชิงกลที่เวลา 10 นาที

ความทนต่อแรงดึงของไฮโดรเจลสามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่าง เมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยเทอม 2 เทอมที่สัมพันธ์กัน คือ ความเค้นและความเครียด ในสมการ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นไฮโดรเจล แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จาก
ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

ตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (กิโลปาสคาล)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสของยัง (กิโลปาสคาล)
RD1.1	10.0151	99.6868	0.1873
RD1.2	8.6999	108.4732	0.1031
RD1.3	9.7811	232.2240	0.0520
RD1.4	8.6524	216.1924	0.0437
RD1.5	14.4157	44.9309	0.4874



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความแข็งแรงดึงของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึง สามารถทดสอบได้เพียงไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ เนื่องจากระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเกิดการฉีกขาดขณะทำการตัดชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบและจากลักษณะทางกายภาพ ไม่มีความยืดหยุ่น และยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ จึงทำให้แผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเลตไม่สามารถนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึงได้

จากตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของแต่ละอัตราส่วนในระบบริเริ่มที่ต่างกัน พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์สามารถนำมาทดสอบความแข็งแรงดึงได้ของสัดส่วนที่แตกต่างกันของ AMPS-Na^+ (6 กรัม) กลีเซอรอล (0 ถึง 1 กรัม) และน้ำ (2 ถึง 3 กรัม) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึง จากค่าที่ได้ตามตารางที่ 4.7 พบว่าแต่ละอัตราส่วนมีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกันและอัตราส่วนที่ RD1.5 มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด เนื่องจากกลีเซอรอลจะเข้าไปกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลและปริมาณของกลีเซอรอลจะจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นอยู่ในโครงสร้าง ส่งผลให้ช่องว่างในโครงสร้างของแผ่นไฮโดรเจลด้อยลง จึงสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าในอัตราส่วนที่ไม่ได้เติมกลีเซอรอล ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Luz และคณะ [34] ที่เติมกลีเซอรอลในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไป ซึ่งการทดสอบความแข็งแรงดึงเป็นการดึงชิ้นงานซึ่งทำให้ชิ้นงานอยู่ในสภาวะการยึดและเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป โดยการ

เสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นงานจากแรงที่กระทำ จากความยาวของระยะทดสอบที่เปลี่ยนไปในการทดสอบเทียบกับระยะเริ่มต้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงแล้วเกิดการเสียรูปขึ้น เกิดจากอะตอมของชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมเพียงเล็กน้อยชิ้นงานจึงเกิดการเสียรูปแบบคืบตัว อะตอมของชิ้นงานจะเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเดิมและเมื่อเพิ่มขนาดของแรงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปเป็นจำนวนมากจนกระทั่งไม่สามารถกลับสู่รูปแบบเดิมได้อย่างสมบูรณ์ จึงเกิดการเสียรูปแบบถาวรและขาดในที่สุด ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงที่ได้นั้น แสดงถึงค่าที่ชิ้นงานสามารถรับแรงที่กระทำต่อชิ้นงานในลักษณะให้ยืดออก โดยที่ในอัตราส่วนที่ RD1.5 มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด แสดงว่าในอัตราส่วนที่มีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น สามารถรับแรงดึงได้มากขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณของกลีเซอรอลจะจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นอยู่ภายในโครงสร้าง ส่งผลให้ช่องว่างในโครงสร้างของแผ่นไฮโดรเจลน้อยลง จึงสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าในอัตราส่วนที่ไม่ได้เติมกลีเซอรอลและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความอ่อนของวัสดุ โดยที่ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่ามาก แสดงว่าวัสดุชนิดนั้นมีความอ่อนตัวมากและเมื่อได้รับแรงจะเกิดการเปลี่ยนรูปมากด้วย [37] แต่ในอัตราส่วนที่ RD1.5 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดน้อย แสดงว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เข้าไปกระจายตัวอยู่ระหว่างสายเชื่อมต่อสายโซ่ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลช่วยให้โครงสร้างของไฮโดรเจลมีความหนาแน่น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อได้รับแรงจึงไม่เสียรูปมาก ค่ามอดูลัสของยังจะมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมในชิ้นงาน ถ้าค่ามอดูลัสของยังมีค่าสูง ซึ่งในอัตราส่วนที่ RD1.5 มีค่ามอดูลัสของยังสูงสุด แสดงว่าแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความยืดหยุ่นสูงจะมีความแข็งแรงสูงและหักงอได้ยาก แต่ในการทดสอบความแข็งแรงดึงที่ได้ในอัตราส่วนที่ RD1.1 ถึง RD1.5 อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากในขั้นตอนของการดึงตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ทำให้แผ่นไฮโดรเจลเกิดการยืดตัวก่อนนำไปทดสอบความแข็งแรงดึง จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้ไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจล ในระบบริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ได้แก่ ระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ $AMPS-Na^+$ กลีเซอรอล และน้ำในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยออกแบบให้โครงสร้างพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายซึ่งมีความเป็นไฮโดรฟิลิก เพื่อสามารถดูดซับและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้าง มีความชุ่มชื้น รวมถึงไม่ถูกละลายในตัวทำละลายใดๆ เพื่อเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ จึงได้ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง โดยได้ออกแบบแม่พิมพ์ซึ่งสามารถควบคุมความหนาได้โดยใช้แผ่นพลาสติกที่มีความหนาต่างๆ กัน ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากระบบริเริ่มต่างๆ ชำต้น สามารถอธิบายได้ว่าทุกอัตราส่วนสามารถคงรูปเป็นแผ่นได้ โปร่งใส และมีความยืดหยุ่น แต่เมื่อออกแรงดึงด้วยมือค่อนข้างนิ่มขาดง่ายและจะเปราะมากขึ้นเมื่อดูดซับน้ำเข้ามาไว้ภายในโครงสร้าง

5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล

จากการพิจารณาอัตราส่วนที่แตกต่างกันของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าในระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ทุกๆ อัตราส่วน สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ และเกิดเจลตามระยะเวลาที่กำหนด โดยที่ในแต่ละอัตราส่วนจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ ลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีเหลืองอ่อน ผิวด้านหน้าลื่น ไม่เรียบ ผิวด้านหลังเหนียว สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี มีความยืดหยุ่น เมื่อดึงนิ่มขาดได้ยาก และเนื้อเจลเหนียว ส่วนระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตทุกๆ อัตราส่วน สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ เกิดเจลตามระยะเวลาที่กำหนด โดยที่ในแต่ละอัตราส่วนจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ เกิดเจลเมื่อโดนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ลักษณะเจลเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่นโปร่งใส มีสีขาวใส ผิวด้านหน้าและหลังลื่น เรียบ สามารถยึดติดกับผิวหนังได้ดี ไม่มีความยืดหยุ่น เนื้อเจลแข็ง ไม่เหนียว และยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์

เมื่อพิจารณาระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าแผ่นไฮโดรเจลมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน คือ ระบบริเริ่มปฏิกิริยาแบบแสงอัลตราไวโอเล็ตมีความเรียบ โปร่งใสมีความสะดวก รวดเร็ว แต่ยากต่อการดึงออกจากแม่พิมพ์ ส่วนระบบริเริ่ม

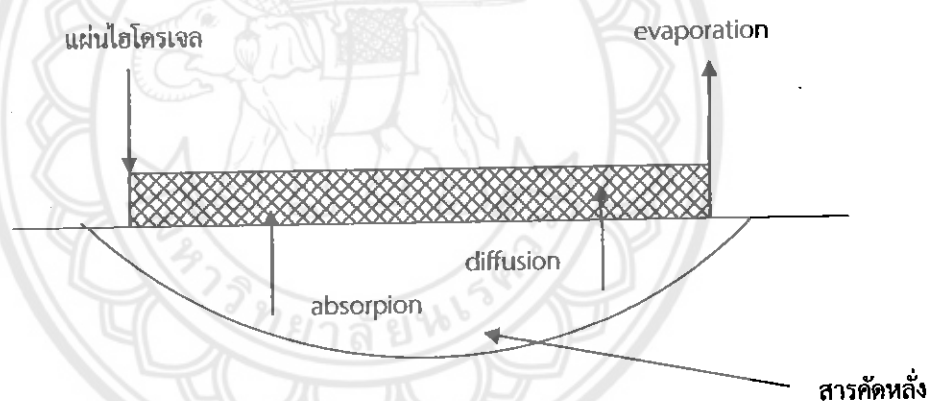
ตัวริเริ่มปฏิกริยาร่วมและตัวเร่ง เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้นจะทำให้แผ่นไฮโดรเจลมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการเตรียมสารละลายในระบบริเริ่มด้วยปฏิกริยารีดอกซ์มีความยุ่งยากอีกทั้งยังมีเวลาในการผสมสารละลายก่อนการเทลงแม่พิมพ์ค่อนข้างสั้น ซึ่งอาจทำให้สารละลายที่เตรียมเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเจลก่อนได้

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุลและอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงการนำแผ่นไฮโดรเจลไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุลและอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ โดยค่าปริมาณทั้งสองข้างต้นจะต้องสมดุลกันค่าปริมาณสมดุลเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการดูดซับน้ำหรือของเหลวจากบาดแผล ค่าปริมาณน้ำที่แผ่นไฮโดรเจลสามารถดูดซับเข้ามาไว้ในโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะโครงสร้างไฮโดรเจล โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และลักษณะของของเหลวที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีผลต่อความดันออสโมติกของน้ำระหว่างภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจล โดยทั่วไปการทดสอบปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นไฮโดรเจลในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในน้ำกลั่นซึ่งเป็นเพียงการทดสอบเบื้องต้นเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของโครงสร้างตาข่ายสามมิติของแผ่นไฮโดรเจลจากการทดสอบด้วยสภาวะต่างๆ ค่าปริมาณน้ำสมดุลที่ดีควรเป็นค่าที่สามารถดูดซับของเหลวที่ออกจากบาดแผลในส่วนเกินออกเท่านั้น ไม่ควรดูดซับของเหลวที่มากเกินไปกว่าที่ออกจากแผลไว้ในแผ่นไฮโดรเจลจนหมด ซึ่งจะทำให้แผลแห้งและเป็นการเพิ่มความเสี่ยงน้ำของร่างกาย จากงานวิจัย พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ของระบบริเริ่มด้วยปฏิกริยารีดอกซ์และแสงอัลตราไวโอเล็ตค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 98.93 ถึง 99.41 และ ร้อยละ 97.15 ถึง 97.42 ตามลำดับ

เนื่องจากการนำแผ่นไฮโดรเจลไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่เหมาะสมถือเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของแผ่นไฮโดรเจล โดยจะส่งผลกระทบต่อความชุ่มชื้นของบาดแผล ถ้าแผ่นไฮโดรเจลมีอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่ต่ำจะทำให้บาดแผลมีสารคัดหลั่งบริเวณบาดแผลที่มากเกินไป ซึ่งอาจนำไปสู่การติดเชื้อ เจ็บปวด เนื่องจากมีแรงดันเพิ่มขึ้น อักเสบ และเน่าเปื่อยของแผลได้ ในทางกลับกันถ้าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำมีค่าสูงมากเกินไปจะส่งผลเสียต่อผู้ป่วย อาจทำให้เกิดสภาวะเสี่ยงต่อการขาดน้ำอาจนำไปสู่การเสียชีวิตได้ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสียชีวิตมากที่สุด ทำให้แผลแห้งขาดความชุ่มชื้นซึ่งอาจก่อให้เกิดสะเก็ดแผลและนำไปสู่การเกิดแผลเป็นได้ จากงานวิจัย พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันของระบบริเริ่มด้วยปฏิกริยารีดอกซ์และแสงอัลตราไวโอเล็ตมีค่าอัตราการแพร่ผ่าน คือ 83.99 ถึง 108.31 กรัมต่อ

ด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์และแสงอัลตราไวโอเลตมีค่าอัตราการแพร่ผ่าน คือ 83.99 ถึง 108.31 กรัมต่อ ชั่วโมงตารางเมตร และ 18.69 ถึง 81.07 กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร ตามลำดับ และเมื่อนำค่าข้างต้น ไปเปรียบเทียบกับรายงานการศึกษาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำจากผิวหนังปกติและแผลไฟไหม้ ระดับต่างๆ ในตารางที่ 4.6 พบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองระบบบริเริ่มมีค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่ต่ำกว่าแผลไฟไหม้ระดับที่ 2 และ 3 ดังนั้นคาดว่าเมื่อนำแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ไป ปิดแผลไฟไหม้ระดับที่ 2 และ 3 จะสามารถช่วยลดการสูญเสียน้ำได้ในระดับหนึ่งและยังยอมให้มีไอน้ำ บางส่วนผ่านออกไปได้ ซึ่งน่าจะช่วยระบายความร้อนและไม่ให้แผลและจนเกินไป นอกจากนั้นการ ยอมให้ไอน้ำผ่านได้ของแผ่นไฮโดรเจลยังเป็นการยืนยันในเบื้องต้นว่าแผ่นไฮโดรเจลสามารถยอมให้ O_2 และ CO_2 ผ่านได้เช่นกัน ซึ่งทั้งก๊าซ O_2 และ CO_2 ในทางการแพทย์ระบุไว้ว่ามีความสำคัญใน กระบวนการสมานแผล ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุล และอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ แสดง ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสมดุลและอัตราการผ่านของไอน้ำของแผ่นไฮโดรเจล เพื่อนำไปประยุกต์ในทางการแพทย์

จากรูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำสมดุลและอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ พบว่าค่าปริมาณน้ำสมดุลเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการดูดซับน้ำหรือของเหลวที่ออกจากบาดแผล ซึ่งไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้แต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยและค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำแสดงปริมาณน้ำที่สามารถแพร่ผ่านแผ่นไฮโดรเจลไปได้ ซึ่งค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำควรมีค่าที่ไม่ต่ำหรือสูงมาก คือ ถ้าต่ำมากเกินไปจะทำให้เกิดการขังของของเหลวที่ออกจากบาดแผลและถ้าสูงมากเกินไปจะทำให้น้ำถูกดูดซับจนหมดบาดแผลแห้งและยึดติดกับวัสดุปิดแผล

ดังนั้นจะเห็นว่าค่าปริมาณสมดุลและค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำควรมีค่าที่เหมาะสม ไม่ต่ำหรือสูงมากเกินไปและควรมีความสัมพันธ์กัน เพื่อให้บาดแผลอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งเป็นการส่งเสริมกระบวนการรักษาบาดแผลให้ดียิ่งขึ้นและใช้เวลาน้อยที่สุด

5.1.3 สมบัติเชิงกลของแผ่นไฮโดรเจล

เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งแผ่นไฮโดรเจลสำหรับใช้เป็นวัสดุปิดแผลควรมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น เมื่อทำการดึงออกจากบาดแผล ไม่ฉีกขาดง่าย ไม่จำเป็นต้องทนแรงดึงมากแต่ควรมีความแข็งแรงพอสมควร ในขณะที่นำไปประยุกต์เมื่ออิมมัวด้วยน้ำ ไม่เปราะแตกแยกกันเป็นชิ้นเล็กๆ จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลขึ้น ส่งผลให้แผ่นไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงดึงมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าความแข็งแรงตั้งอยู่ในช่วง 8.6524 ถึง 14.4157 กิโลปาสคาล เมื่อพิจารณาในด้านของการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ พบว่าเมื่อนำแผ่นไฮโดรเจลไปแช่น้ำสามารถดูดซับและปลดปล่อยน้ำได้ดี เช่นเดียวกับผิวหนังของมนุษย์ มีความยืดหยุ่นและนุ่ม ไม่เกิดความระคายเคืองต่อผิว มีอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำต่ำกว่าแผลไฟไหม้ระดับที่ 2 และ 3 มีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างไม่ดี ฉีกขาดง่าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลมีหลายหลายระบบริเริ่มปฏิบัติการ ผู้ที่ทำการศึกษาคควรเลือกวิธีที่เหมาะสมกับหัวข้อที่ศึกษาและระยะเวลาในการปฏิบัติงาน

5.2.2 แผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์จะต้องมีความสามารถยอมให้ O_2 และ CO_2 แพร่ผ่านได้ จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเบื้องต้นเพียงอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ เนื่องจากกระบวนการรักษาบาดแผลจะต้องใช้ทั้งก๊าซทั้งสองข้างต้นและไม่ทำให้แผลเกิดการเน่าเปื่อยได้ ดังนั้นควรทำการศึกษารวมถึงปริมาณการแพร่ผ่านของ O_2 และ CO_2

5.2.3 ในการทดสอบชิ้นงานมักเกิดข้อผิดพลาดอยู่เสมอ ควรเตรียมชิ้นงานเพื่อความผิดพลาด

5.2.4 จากงานวิจัยนี้สมบัติเชิงกลความแข็งแรงตั้งมีค่าต่ำ ควรศึกษาการออกแบบและปรับปรุงสมบัติเชิงกลเพิ่มเติม ด้วยการใส่ตาข่ายพลาสติกเพื่อเป็นโครงยึดให้แก่แผ่นไฮโดรเจลเพื่อให้แผ่นไฮโดรเจลทนต่อแรงดึงได้ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] กุสสิทธิ์ ใจกาวิ, คณารัฐ ณ ลำปาง, วนิดาจันทร์วิกุล และโรเบิร์ต มอลลอย. (2553). การออกแบบสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลแบบผสมสำหรับใช้ในทางการแพทย์เพื่อเป็นวัสดุปิดรักษาแผล (Design and Synthesis of Blended Hydrogel Sheets for Biomedical Use as Wound Dressing). ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- [2] Chinanat Witthayaprapakorn. (2009). Design and Preparation of Synthetic Hydrogels for Biomedical Use as Wound Dressings. Doctor of Philosophy.
- [3] เกศินี เหมวิเชียร และพิริยาร สุวรรณมาลา. (2553). การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ตอนที่ 1. (Polymer Characterization). กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมีสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ. (องค์การมหาชน Hydrogel based on semi-interpenetrating polymer network of cassava starch and natural rubber).
- [4] Ottenbrite, R.M., Huang, S.J. and Park.K. (1996). Hydrogels and Biodegradable Polymers for Bioapplication. Washington D.C. American. Chemical Society.
- [5] William, D.F. (1981). Biocompatibility of Clinical Implant Material Vol. 2. Florida CRC Press Inc.
- [6] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.สอาด ริยะจันทร์, เจริญขวัญ วงษา และนิเวศน์ ลาล่อง. (2552). บทความทางวิชาการ: พอลิเมอร์ไฮโดรเจลการเตรียมสมบัติการใช้งาน.
- [7] Fredric L. Buchholz and Andrew T. Graham. (1998). Modern Superabsorbent Polymer Technology. John wiley& sons Inc. American.
- [8] Ijeoma F. Uchebu, Andreas G. and Schatzlein. (2006). Polymer in Drug Delivery. Taylor&Francis Group.
- [9] Corkhill, P.H., Halilton, C.J. and Tighe B.J. (1989). Synthetic Hydrogels: VI. Hydrogel composite as Wound Dressings and Implant Material. Biomaterials.
- [10] Kroschwitz and J.I. (1989). Polymer: Biomaterials and Medical Applications. New York. John Wiley & Sons.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Dumitriu S. and Medvichi C.D. (2002). Hydrogel and General Properties of Biomaterial Polymer Structure and Properties. Marcel Dekker Inc. New York.
- [12] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญพร เถลิ้มพงศ์. (2550). ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (Food Network Solution). สืบค้นเมื่อ 19 กรกฎาคม 2556, จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1926/glycero>.
- [13] Karina Carrillo Hernandez. (2551). Is Pure Glycerin Harmful to the Skin. สืบค้นเมื่อ 19 กรกฎาคม 2556, จาก http://www.ehow.com/facts_5832226_pure-glycerin-harmful-skin_.html.
- [14] Karina Carrillo Hernandez. (2551). Glycerol to the skin. สืบค้นเมื่อ 19 กรกฎาคม 2556, จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/Glycerol>.
- [15] Encyclopaedia Britannica. (2550). Glycerol. สืบค้นเมื่อ 19 กรกฎาคม 2556, จาก <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/236029/glycerol>.
- [16] ปิยนาง อีทนกุล. (2547). การทำกลีเซอรอลที่ได้จากการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพให้บริสุทธิ์. ปรินญาณีพันธ์ วม. (วิศวกรรมปิโตรเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- [17] Erica Roth. (2011). The Effects of glycerol on skin. สืบค้นเมื่อ 19 กรกฎาคม 2556, จาก <http://www.livestrong.com/article/78934-effects-glycerin-skin>.
- [18] UPS Grade, Kosher. (2554). Refined Glycerol 99.5%. สืบค้นเมื่อ 19 กรกฎาคม 2556, จาก <http://www.pantipmarket.com/mall/bepcthai/?node=products&id>.
- [19] สุธิดา อรรถยานันท์ และอมรชัย อภรณ์วิชานพ. (2012). ทำความรู้จักกับกลีเซอรอล. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [20] Fluhr JW, Darlenski R, Surber C and Br J Dermatol. (2008). Glycerol and the skin: holistic approach to its origin and functions. Germany.
- [21] Bifi B, Mohanty M, Umashankar P.R. and Jayakrishnan A. (2005). Evaluation of an in situ forming hydrogel wound dressing based on oxidized alginate and gelatin. *Biomaterials*. Vol. 26, pp. 6335–6342.
- [22] The American society for testing and materials. (AMPS E 96 - 93).
- [23] Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, Designation. ASTM (D882 - 10).
- [24] ยิ่งศักดิ์ ไกรพินิจ, ดุษฎี อุดภาพ, วิไล รังสาดทอง และจूरีรัตน์ พุดตาลเล็ก. (2554). การศึกษาคุณสมบัติของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งพุทธรักษา (Characterization of hydrogels prepared from cassava and canna starches). ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.
- [25] วรินดา วราพันธ์. (2553). การศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลคอมโพสิตชนิดโคโตะซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นเจลสมานแผล. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- [26] อมรรัตน์ สายทองดี, พุทธรักษา วรานุศูภากุล, และอภิชาติ อิมิมี. (2553). การเตรียมฟิล์มเจลอุ้มน้ำและการหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคอินฟราเรดและนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [27] จิราพร กวานเทียน, ทิพย์สุดา บุญประสพ และชัยวุฒิ วัดจั้ง. (2554). ไฮโดรเจลเชื่อมโยงแบบกึ่งโครงร่างตาข่ายของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติ (Hydrogel based on semi – interpenetrating polymer network of cassava starch and natural rubber). ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.
- [28] ชวนพิศ ขาวคง. (2553). การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลแบบเทอร์โมพลาสติกบางชนิดสำหรับทดแทนผิวหนังชั่วคราว. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [29] Rosso F., Barbarisi A., Barbarisi M., Petillo O., Calarco A. and Peluso G. (2003). **Materials Science and Engineering**. Department of Chemistry. Sharif University of Technology. Azadi Ave.
- [30] Atta, A.M. and Abdel-Azim. (1999). **Polymers for Advanced Technologies**. Department of Chemistry. Sharif University of Technology. Azadi Ave.
- [31] Yan Bao, Jianzhong Ma and Na Li. (2011). **Synthesis and swelling behaviors of sodium carboxymethyl cellulose-g-poly(AA-co-AM-co-AMPS)/MMT superabsorbent hydrogel**. College of Resources and Environment. Shaanxi University of Science and Technology. China.
- [32] A. Pourjavadi, H. Hosseinzadeh and R. Mazidi. (2011). **Synthesis and Swelling Behavior of Crosslinked C-g-AMPS Superabsorbent Hydrogel with Antisalt and pH-Responsiveness Properties**. Polymer Research Laboratory. Department of Chemistry. Sharif University of Technology. Azadi Ave.
- [33] Padarat Ninjaranai. (2010). **Design and Synthesis of Sodium AMPS-based Hydrogel Copolymer Sheets for Use as Wound Dressings**. Master of Science (Chemistry).
- [34] Luz Cecilia Lopez-Ureta, Eulogio Orozco - Guaareno, Luis Emolio Cruz – Berba, Alejandro Gonzalez – Alvarez and Fernando Bautista – Rico. (2011). **Synthesis and Characterization of Acrylamide/Acrylic Acid Hydrogels Crosslinked Using a Novel Diacrylate of Glycerol to Produce. Multistructured Materials**.
- [35] Angela Lisandra S. Lee, Gayzen A. Ordoez and Soma Chakraborty. (2010). **Novel Glycerol- Crosslinked Poly (acrylic acid) Hydrogel for Encapsulation and Release of Benzocaine**. Department of Chemistry. School of Science and Engineering. Ateneo de Manila University.
- [36] Nilsson G.E. (1977). **On the Measurement of Evaporative Water Loss. Method and Clinical Application**. Department of Medical Engineering Linkoping University.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [37] ขจรศักดิ์ ศิริมัย. โลหะวิทยาในงานอุตสาหกรรม. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2556, จาก <http://www.mtec.or.th/laboratory/mech/index.php/knowledge/24-tensile-test-of-metal>.



หน้า 76

MISSING



ตารางที่ ก.1 การศึกษาหาปริมาณน้ำสมดุลของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

Redox 1.1								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	0.7	0.7	1.11	1.11	1.21	1.21	1.01	0
1		24.94		26.2		25.94	25.69	96.08
3		60.31		62.33		62.59	61.74	98.37
5		70.03		65.87		64.86	66.92	98.49
7		75.89		68.66		68.35	70.97	98.58
24		82.21		77.33		79.59	79.71	98.74
25		92.28		88.36		93.98	91.54	98.90
26		94.21		92.42		94.77	93.80	98.93
27		94.29		94.23		94.78	94.43	98.93
28		94.29		94.22		94.78	94.43	98.93
Redox 1.2								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	0.8	0.8	1.04	1.04	1.25	1.25	1.03	0
1		23.36		26.89		28.34	26.19	96.07
3		52.24		60.57		63.41	58.74	98.25
5		67.95		80.25		94.44	80.88	98.73
7		71.11		96.05		112.65	93.27	98.89
24		76.02		106.6		134.2	105.61	99.02
25		88.05		130.81		156.43	125.10	99.18
26		91.25		140.72		170.53	134.17	99.23
27		92.25		142.89		176.67	137.27	99.25
28		92.25		142.9		176.67	137.27	99.25

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) การศึกษาหาปริมาณน้ำสมดุลของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

Redox 1.3								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	0.82	0.82	0.96	0.96	0.99	0.99	0.92	0
1		25.34		27.21		30.65	27.73	96.67
3		50.89		56.32		64.32	57.18	98.39
5		74.32		73.9		86.45	78.22	98.82
7		100.43		111.9		116.78	109.70	99.16
24		119.54		121.93		128.91	123.46	99.25
25		131.91		142.24		163.74	145.96	99.37
26		140.43		151.59		164.63	152.22	99.39
27		133.69		149.07		164.65	149.14	99.38
28		133.69		149.74		164.65	149.36	99.38
Redox 1.4								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	0.96	0.96	1.12	1.12	0.41	0.41	0.83	0
1		28.45		29.22		20.5	26.06	96.81
3		46		54.09		38.9	46.33	98.21
5		87.01		89.12		60.3	78.81	98.95
7		103.43		106.82		78.95	96.4	99.14
24		112.94		139.71		82.9	111.85	99.26
25		130.4		180		98.56	136.32	99.39
26		131.41		182.05		98.92	137.46	99.40
27		131.51		180.09		99	136.87	99.39
28		131.55		180.79		98.98	137.11	99.39

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) การศึกษาหาปริมาณน้ำสมดุลของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

Redox 1.5								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	1.11	1.11	0.89	0.89	0.75	0.75	0.92	0
1		28.78		25.89		24.98	26.55	96.55
3		56.43		54.99		49.66	53.69	98.29
5		97.1		92.05		97.34	95.50	99.04
7		129.3		107.71		100.39	112.47	99.18
24		137.51		112.87		103.71	118.03	99.22
25		169.95		139		128.76	145.90	99.37
26		170.11		151.79		128.76	150.22	99.39
27		174.61		153.35		128.76	152.24	99.40
28		174.65		153.4		128.76	152.27	99.40

ตารางที่ ก.2 การศึกษาหาปริมาณน้ำสมดุลของระบบริเริ่มด้วยแสงอัตราไวโอเลต

UV 1.1								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	0.75	0.75	0.79	0.79	1.1	1.1	1.1	0
1		4.5		5.26		7.81	7.81	85.92
3		10.64		12.29		15.6	15.6	92.95
5		15.76		18.21		20.49	20.49	94.63
7		22.45		24.98		27.75	27.75	96.04
24		27.68		29.93		34.74	34.74	96.83
25		28.57		31.09		35.7	35.7	96.92
26		27.19		30.39		35.99	35.99	96.94
27		27.23		30.92		36.78	36.78	97.01
28		27.24		30.92		38.65	38.65	97.15
UV 1.2								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	1.01	1.01	0.81	0.81	1	1	1.005	0
1		8.46		5.12		7.67	8.065	87.53
3		16.99		11.49		14.87	15.93	93.69
5		23.76		23.54		22.89	23.325	95.69
7		30.55		27.09		30.53	30.54	96.71
24		35.65		31.11		32.56	34.105	97.05
25		35.35		32.52		34.67	35.01	97.13
26		37.91		32.95		34.03	35.97	97.21
27		36.35		33.42		34.15	35.25	97.15
28		36.44		32.17		34.86	35.65	97.18

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) การศึกษาหาปริมาณน้ำสมดุลของระบบบริเวณด้วยแสงอัตราไวโอเล็ต

UV 1.3								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	0.49	0.49	0.8	0.8	0.98	0.98	0.76	0
1		3.34		5.43		5.76	4.84	84.38
3		8.65		10.32		12.43	10.47	92.78
5		12.54		15.96		18.9	15.80	95.21
7		18.93		22.45		25.13	22.17	96.59
24		20.11		27.06		29.82	25.66	97.05
25		20.75		28.75		31.07	26.86	97.18
26		20.34		29.66		31.1	27.03	97.20
27		20.38		28.78		30.6	26.59	97.15
28		20.64		29.69		31.47	27.27	97.22
UV 1.4								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	0.9	0.9	0.49	0.49	0.43	0.43	0.61	0
1		5.44		4.12		3.42	4.33	85.98
3		13.23		8.66		6.69	9.53	93.63
5		19.89		14.04		10.54	14.82	95.91
7		27.55		16.98		13.09	19.21	96.84
24		31.67		19.22		15.92	22.27	97.28
25		32.46		19.82		17.21	23.16	97.38
26		32.71		18.52		17.22	22.82	97.34
27		32.54		19.36		16.72	22.87	97.35
28		32.55		19.51		17.8	23.29	97.39

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) การศึกษาหาปริมาณน้ำสมดุลของระบบริเริ่มด้วยแสงอัตราไวโอเลต

UV 1.5								
เวลา (ชั่วโมง)	ชั้นที่ 1 (กรัม)		ชั้นที่ 2 (กรัม)		ชั้นที่ 3 (กรัม)		เฉลี่ย	%EWC
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
0	1.34	1.34	0.76	0.76	1.2	1.2	1.10	0
1		9.2		6.32		8.11	7.88	86.03
3		19.36		14.87		16.09	16.77	93.44
5		27.65		26.48		28.44	27.52	96.00
7		34.85		30.55		34.64	33.35	96.70
24		45.64		34.88		44.51	41.68	97.36
25		45.88		34.96		45.55	42.13	97.39
26		46.98		35.31		45.38	42.56	97.42
27		47.24		35.23		46.32	42.93	97.44
28		45.73		35.46		46.8	42.66	97.42



ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

R.D 1.1			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	61.72	0	0.78
0.5	61.26	0.46	
1.0	60.58	1.14	
1.5	60.07	1.65	
2.0	59.70	2.02	
2.5	59.43	2.29	
3.0	59.06	2.66	
3.5	58.8	2.92	
4.0	58.45	3.27	
4.5	58.1	3.62	
WVTR (g/hr.m ²)		99.52	
R.D 1.2			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	64.54	0	0.8502
0.5	64.08	0.46	
1.0	63.39	1.15	
1.5	62.96	1.58	
2.0	62.61	1.93	
2.5	62.14	2.4	
3.0	61.79	2.75	
3.5	61.37	3.17	
4.0	61.06	3.48	
4.5	60.66	3.88	
WVTR (g/hr.m ²)		108.31	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการศึกษาหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

R.D 1.3			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	Slope
0	63.47	0	0.8042
0.5	63.04	0.43	
1.0	62.41	1.06	
1.5	61.96	1.51	
2.0	61.57	1.9	
2.5	61.2	2.27	
3.0	60.85	2.62	
3.5	60.51	2.96	
4.0	60.23	3.24	
4.5	59.75	3.72	
WVTR (g/hr.m ²)		102.45	
R.D 1.4			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	64.44	0	0.7848
0.5	64.02	0.42	
1.0	63.53	0.91	
1.5	63.14	1.3	
2.0	62.75	1.69	
2.5	62.3	2.14	
3.0	61.91	2.53	
3.5	61.58	2.86	
4.0	61.28	3.16	
4.5	60.92	3.52	
WVTR (g/hr.m ²)		99.97	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการศึกษาหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

R.D 1.5			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	63.14	0	0.6593
0.5	62.78	0.36	
1.0	62.35	0.79	
1.5	61.97	1.17	
2.0	61.63	1.51	
2.5	61.21	1.93	
3.0	61.01	2.13	
3.5	60.65	2.49	
4.0	60.54	2.6	
4.5	60.15	2.99	
WVTR (g/hr.m ²)		83.99	

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

UV 1.1			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	62.4	0	0.6835
0.5	61.99	0.41	
1.0	60.91	1.49	
1.5	60.73	1.67	
2.0	60.3	2.1	
2.5	60.2	2.2	
3.0	59.93	2.47	
3.5	59.68	2.72	
4.0	59.4	3	
4.5	59.11	3.29	
WVTR (g/hr.m ²)		87.07	
UV 1.2			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	64.45	0	0.5178
0.5	63.94	0.51	
1.0	63.4	1.05	
1.5	63.1	1.35	
2.0	62.95	1.5	
2.5	62.76	1.69	
3.0	62.57	1.88	
3.5	62.25	2.2	
4.0	62.14	2.31	
4.5	61.94	2.51	
WVTR (g/hr.m ²)		65.96	

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการศึกษาหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

UV 1.3			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	60.23	0	0.3116
0.5	60.11	0.12	
1.0	59.86	0.37	
1.5	59.6	0.63	
2.0	59.56	0.67	
2.5	59.45	0.78	
3.0	59.25	0.98	
3.5	59.13	1.1	
4.0	58.95	1.28	
4.5	58.81	1.42	
WVTR (g/hr.m ²)		39.69	
UV 1.4			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	61.49	0	0.3728
0.5	61.4	0.09	
1.0	61.14	0.35	
1.5	61.1	0.39	
2.0	61	0.49	
2.5	60.98	0.51	
3.0	60.95	0.54	
3.5	60.85	0.64	
4.0	60.82	0.67	
4.5	60.81	0.68	
WVTR (g/hr.m ²)		47.49	

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการศึกษาหาอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของระบบริเริ่มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

UV 1.5			
เวลา (ชั่วโมง)	เฉลี่ย		
	น้ำหนัก (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	slope
0	59.02	0	0.1467
0.5	58.93	0.09	
1.0	58.62	0.4	
1.5	58.43	0.59	
2.0	58.38	0.64	
2.5	58.21	0.81	
3.0	57.98	1.04	
3.5	57.78	1.24	
4.0	57.5	1.52	
4.5	57.35	1.67	
WVTR (g/hr.m ²)		18.69	



ตารางที่ ค. ผลการศึกษาหาสมบัติเชิงกลของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

ชั้นที่	Load (นิวตัน)	Extension (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งแรงดึง (กิโลปาสกาล)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่ามอดูลัสของยัง (กิโลปาสกาล)
R.D 1.1					
1	0.09908	97.024	9.908	94.048	0.1054
2	0.12139	84.128	12.139	68.256	0.1778
3	0.066315	56.395	6.6315	12.79	0.5184
4	0.10437	118.89	10.437	137.78	0.0757
5	0.1096	142.78	10.96	185.56	0.0590
เฉลี่ย	0.100151	99.8434	10.0151	99.6868	0.1873
R.D 1.2					
1	0.070931	73.938	7.0931	47.876	0.1481
2	0.09647	140.12	9.647	180.24	0.0535
3	0.10304	135.51	10.304	171.02	0.0602
4	0.069989	72.117	6.9989	44.234	0.1582
5	0.086999	104.2366	8.69992	108.473	0.1031
เฉลี่ย	0.094566	99.498	9.4566	98.996	0.0955
R.D 1.3					
3.1	0.082428	182.54	8.2428	265.08	0.0310
3.2	0.1435	249.21	14.35	398.42	0.0360
3.3	0.082355	105.6	8.2355	111.2	0.0740
3.4	0.094108	103.43	9.4108	106.86	0.0880
3.5	0.086664	189.78	8.6664	279.56	0.0310
เฉลี่ย	0.097811	166.112	9.7811	232.224	0.0520

ตารางที่ ค. (ต่อ) ผลการศึกษาหาสมบัติเชิงกลของระบบริเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์

ชั้นที่	Load (นิวตัน)	Extension (มิลลิเมตร)	ค่าความแข็งแรงดึง (กิโลปาสคาล)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่ามอดูลัสของยัง (กิโลปาสคาล)
R.D 1.4					
1	0.11703	222.49	11.703	344.98	0.0339
2	0.043812	91.921	4.3812	83.842	0.0522
3	0.055331	106.73	5.5331	113.46	0.0487
4	0.078017	134.79	7.8017	169.58	0.0460
5	0.13843	234.55	13.843	369.1	0.0375
เฉลี่ย	0.086524	158.0962	8.6524	216.1924	0.0436
R.D 1.5					
5.1	0.095879	55.0067	9.5879	10.0134	0.9575
5.2	0.11543	72.42	11.543	44.84	0.2574
5.3	0.080757	89.975	8.0757	79.95	0.1010
5.4	0.28456	72.46	28.456	44.92	0.6334
เฉลี่ย	0.144157	72.46543	14.41565	44.93085	0.4873