

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิอะคริลิกแอซิด  
ด้วยวิธีการฉายรังสี และทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติมผงไหม



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

เลขหน้.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขทะเบียน..... 37642

วัน, เดือน, ปี..... 19 ก.ย. 2543

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Gamma Radiation Induced Hydrogel of Poly(vinyl alcohol) / Poly(acrylic acid)  
and modification of properties by adding silk protein**



A special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement  
for the Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

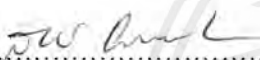
หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ พอลิอะคริลิก  
แอซิด ด้วยวิธีการฉายรังสี และทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม  
ซิลค์โปรตีน

นักศึกษา นางสาวสุมิตรา เกษมชัยนันท์  
นายสุรเกียรติ คำตา

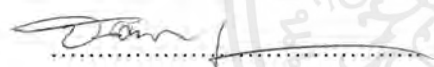
ภาควิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
.....  
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

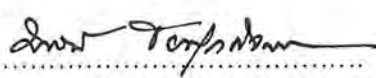
หัวหน้าภาควิชาเคมี

  
.....  
ประธานกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ

(ดร.จินตนา บุนนาค)

  
.....  
กรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ

(รศ.อรุณี ลungskดีไพศาล)

  
.....  
กรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ

(ผศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์)

ลิขสิทธิของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์ไฮโดรเจลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และพอลิอะคริลิกแอซิด (PAA) ด้วยวิธีการฉายรังสี และทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติมผงไหม (silk protein)
นักศึกษา	นางสาวสุมิตรา เกษมชัยนันท์ นายสุรเกียรติ์ คำตา
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2542

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล จากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) / พอลิอะคริลิกแอซิด (PAA) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) / พอลิอะคริลิกแอซิด (PAA) / ผงไหม (silk protein) โดยเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วนำไปฉายรังสีแกมมาที่ความเข้ม 10 และ 20 kGy ตามลำดับ จากนั้นนำมาหล่อเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเพื่อนำไปทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำและสารละลายเกลือ ตลอดจนสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลดังกล่าวคือ 20 kGy เมื่อพิจารณาสมบัติการดูดซับน้ำพบว่า แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจะเริ่มเข้าสู่สมดุลการบวมตัวในชั่วโมงที่หนึ่ง ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณการดูดซับน้ำจะลดลง โดยแผ่นฟิล์มที่มีพอลิอะคริลิกแอซิด เป็นองค์ประกอบจะมีปริมาณการดูดซับน้ำสูง ในขณะที่แผ่นฟิล์มที่มีผงไหมเป็นองค์ประกอบ จะมีความสามารถดูดซับน้ำในสารละลายเกลือได้ดีกว่าแผ่นฟิล์มตัวอย่างอื่น ๆ การทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงให้เห็นว่าเกิดการรบกวนความเป็นผลึกซึ่งกันและกันของแต่ละองค์ประกอบในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

<b>Special Project Title</b>	Gamma Radiation Induced Hydrogel of Poly (vinyl alcohol) /Poly (acrylic acid) and modification of properties by adding silk protein
<b>Name</b>	Miss Sumitra Kasemchainun Mr. Surakiet Kumta
<b>Special Project Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Malinee Chaisupakitsin
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Academic Year</b>	1999

### Abstract

The preparation of Poly (vinyl alcohol) , Poly (vinyl alcohol) / Poly (acrylic acid) and Poly (vinyl alcohol) / Poly(acrylic acid) / Silk protein (SF) hydrogel blend film were studied in this special project. Mixture of polymer solutions were gamma irradiated under N<sub>2</sub> atmosphere. Water absorption, salt absorption and thermal property were investigated. It was found that 20 kGy is suitable dose for preparation film. The result showed that swelling property reached equilibrium within one hour. In case of high temperature, water absorption rate was decreased. It was observed that blend film with Poly (acrylic acid) solution exhibited high rate of water absorption. On the other hand, blend film with silk protein solution provided the highest water absorption of salt solution compared to the other film. The results received from DSC suggested that there is a combination between each component leading to decreased degree of crystallinity.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้ สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือตลอดจน คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำ จากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์คณะกรรมการ ตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยกรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.จินตนา บุณนาค อาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม ที่ กรุณาช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณศิริรัตน์ พิระมนตรี และเจ้าหน้าที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฉายรังสี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อน ๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด ตลอดจนขอขอบคุณ วัน เวลาที่ดีที่ทำให้ มีโอกาสศึกษาวิจัย และทำโครงการพิเศษนี้ให้ลุล่วงไปด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากซึ่งมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำจึงขอขอบคุณ เป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวสุมิตรา เกษมชัยนันท์

นายสุวเกียรติ คำตา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 คำนำ	1
1.2 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	2
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการพิเศษ	5
1.3 วิธีดำเนินการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไฮโดรเจล	7
2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	12
2.3 พอลิอะคริลิกแอซิด	13
2.4 ผงไหม(ซัลค์โปรตีน)	13
2.5 การฉายรังสี	19
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและเครื่องมือ	22
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลที่เตรียมได้	27
4.2 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของฟิล์มไฮโดรเจล	28
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการดูดซับน้ำ	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.4 การศึกษาอัตราการดูดซับสารละลายเกลือของฟิล์มไฮโดรเจล	33
4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วย เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก. แสดงค่าการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลชนิดต่าง ๆ	41
ภาคผนวก ข. กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค DSC	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าอัตราส่วน ปริมาตรรังสี และลักษณะของไฮโดรเจล ตัวอย่างต่างๆ ทั้งก่อนและฉายรังสี	28
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัดส่วนเจล	32
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

## หน้า

รูปภาพที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดเป็น ไฮโดรเจลได้	7
รูปภาพที่ 2.2 แสดงการแพร่ผ่านผิวน้ำไฮโดรเจลของสีย้อมเมทิลเรด	11
รูปภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทุติยภูมิของ โปรตีน	15
รูปภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแอลฟา เฮลิคของพอลิเพปไทด์	16
รูปภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างบีตา ชีทของพอลิเพปไทด์	17
รูปภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของแผ่นจีบบีตาแบบขนานและ ไม่ขนาน	18
รูปภาพที่ 2.7 แสดงโครงสร้างสามมิติของ ไหม	19
รูปภาพที่ 2.8 แสดงการเกิดอนุภาคอิสระของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิอะคริลิกแอซิด	21
รูปภาพที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ ไฮโดรเจล	28
รูปภาพที่ 4.2 แสดงค่าอัตราการบวมตัวของ ไฮโดรเจล	29
รูปภาพที่ 4.3 แสดงค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	30
รูปภาพที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	30
รูปภาพที่ 4.5 แสดงค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	31
รูปภาพที่ 4.6 แสดงการเกิดพันธะเคมีของไฮโดรเจล	32
รูปภาพที่ 4.7 แสดงค่าปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือ 0.5 % w/v KCL	33
รูปภาพที่ 4.82 แสดงค่าปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือชนิดต่าง ๆ ของไฮโดรเจล	34

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 คำนำ

ปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุต่าง ๆ เพื่อประโยชน์ใช้สอยอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะวัสดุพอลิเมอร์ได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ เนื่องจากสามารถใช้ทดแทนวัสดุบางชนิดได้ ประกอบกับวัสดุพอลิเมอร์มีน้ำหนักเบาและนำมาขึ้นรูปต่าง ๆ ได้ตามต้องการ ในขณะที่วัสดุชนิดอื่น เช่น แก้ว ไม้ โลหะ ทำได้ยากกว่า นอกจากนี้ความหลากหลายของพอลิเมอร์ทำให้สามารถนำมาใช้งานได้หลายลักษณะขึ้นกับคุณสมบัติที่เหมาะสมของพอลิเมอร์นั้น ๆ ดังนั้น การศึกษา ค้นคว้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ไฮโดรเจลหรือพอลิเมอร์ดูดซับน้ำที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติหรือ โครงสร้างร่างแหจัดว่าเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติการดูดซับน้ำได้ 90% หรือมากกว่า สามารถดูดซับไอออน โดยสมบัติเชิงกลและรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งสมบัติดังกล่าวคล้ายคลึงกับอวัยวะบางอย่างในร่างกายคน เช่น กล้ามเนื้อ เอ็น ถ้าใส่เล็ก นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังเข้าได้กับสารชีวภาพ เช่น เลือด น้ำเหลือง เนื้อเยื่อ จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ทำเลนส์สัมผัส (contact lenses) , วัสดุตกแต่งบาดแผลจากไฟไหม้ (burn wound dressing) ตลอดจนใช้เคลือบวัตถุที่ต้องนำมาใช้สัมผัสกับร่างกาย เช่น ใช้เคลือบอวัยวะเทียมที่ใช้ในร่างกาย เป็นต้น

แนวทางการปรับปรุงคุณภาพในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ไฮโดรเจลให้มีสมบัติทางกายภาพที่ดีและเหมาะสมที่จะใช้ในทางการแพทย์ ได้แก่ การใช้เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา เพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงซึ่งเป็นวิธีที่สะอาด เนื่องจากไม่ต้องใช้สารเชื่อมโยง หรือสารเคมีใด ๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ไม่มีปัญหาการกำจัดสารเคมีที่ตกค้างอยู่

การใช้รังสีสังเคราะห์ไฮโดรเจลนั้น จะฉายรังสีลงบนมอนอเมอร์ที่ละลายอยู่ในน้ำ รังสีจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระทั้งบน มอนอเมอร์และน้ำ จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ มากมาย และน้ำยังช่วยให้โซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ทั่วทั้งระบบ ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาถึงการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ตลอดจนกลไกการเกิดระหว่างสารละลายผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิอะคริลิกแอซิดโดยใช้เทคนิคการฉายรังสี ให้เกิดพันธะเชื่อมโยงสามมิติและศึกษาสมบัติต่าง ๆ ตลอดจนศึกษาผลของ ซิลค์โปรตีนที่มีต่อไฮโดรเจลนี้

## 1.2 ความเป็นมาของโครงการ

ไฮโดรเจล เป็นวัสดุที่สามารถบวมและดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้ โดยไม่เกิดการละลาย ซึ่งอาจเรียกรูปแบบของวัสดุประเภทนี้ในสถานะแห้งว่า “xerogels”

ภายใน โครงสร้างของไฮโดรเจล จะมีพันธะเชื่อมโยง 3 มิติ โดยทั่วไปแล้วสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยา Block polymerization ของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ ( hydrophilous monomer ) กับสารเชื่อมโยง ( crosslinking agent )
2. การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสารละลายพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilous polymer)
3. การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันไปพร้อมกับการเชื่อมโยงพันธะของมอนอเมอร์กับสารเชื่อมโยง

ด้วยโครงสร้างที่เป็นร่างแห 3 มิติทำให้ไฮโดรเจล สามารถดูดซับและบวมน้ำ โดยไม่เกิดการละลาย เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงทำให้พอลิเมอร์มีขนาดและน้ำหนักของโมเลกุลเพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นในการเชื่อมโยง (crosslinks density) จะส่งผลให้ความแข็งแรง (strength) เพิ่มขึ้นในขณะที่สมบัติการบวมตัวกลับลดลง

ตามปกติไฮโดรเจล สามารถดูดซับน้ำได้อย่างน้อย 10 เท่าของน้ำหนัก และนอกจากน้ำแล้วยังสามารถดูดซับสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte solution) และของเหลวจากร่างกายได้จากลักษณะเด่นดังกล่าว ทำให้มีการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุไฮโดรเจล เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางไม่เพียงแต่เป็นวัสดุที่ใช้ในการดูดซับเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ การเกษตร ตลอดจนด้านอุตสาหกรรมด้วย

- เนื่องจากมีสมบัติเข้ากันได้ทางชีวภาพ ความสามารถในการดูดซับน้ำ ไฮโดรเจลจึงเริ่มมีการใช้ในวงการแพทย์ในปี 1960 โดย Wichterle และ Lim<sup>1</sup> ได้ศึกษาการเกิดพันธะเชื่อมโยงและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการฉายรังสีให้แก่ พอลิไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลท (PHEMA)

- ไฮโดรเจลสามารถทำการสังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์หลายชนิด Goni ,I และคณะ<sup>2</sup> จึงได้ศึกษาถึงการสังเคราะห์และสมบัติการดูดน้ำ (% water retention) ของพอลิเมอร์ร่วมพวก อะคริเลท ที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำหลายชนิด , ทำการต่อกิ่งบนอะไมโลเพกติน โดยใช้ EGDMA และ MBAM เป็นสารเชื่อมโยง พบว่า EGDMA จะให้ เปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งมากกว่า เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเดียวกัน ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำจะแปรผกผันกับปริมาณการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เกิดจากการต่อกิ่งของมอนอเมอร์ผสมต่างชนิดลงบนอะไมโลเพกติน ที่ได้นี้ มีความสามารถเข้ากันได้กับสารชีวภาพจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่ง

- Jonggeon Jegal และ KEW-HO LEE<sup>3</sup> ได้ทำการศึกษาพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมไอออนิกพอลิเมอร์พวกโซเดียม อัลจินเนต หรือ โกลโคแซนธุกเตรียมโดยการหล่อขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์ดังกล่าว แล้วทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงด้วย กุตุคาร์ตีไฮด์ ซึ่งองค์ของการเชื่อมโยงจะถูกควบคุมด้วยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา สมบัติการซึมผ่านของฟิล์มจะศึกษาอัตราส่วนการปล่อยทิ้งของสารละลายตัวอย่าง เช่น โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของการปล่อยทิ้ง พบว่าปัจจัยที่อิทธิพลต่อการซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้แก่ สปีชีส์ของตัวถูกละลายและสมบัติทางเคมีของผิวแผ่นฟิล์ม เช่น องค์การเชื่อมโยง เป็นต้น ทั้งนี้แผ่นฟิล์มที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยการให้ความร้อนจากคุณสมบัติเค้นข้างดันทำให้ฟิล์มดังกล่าวเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเยื่อเลือกผ่าน (nanofiltration membrane) ในระบบรีเวอร์สออสโมซิสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

-เส้นใยไหม (silk fibroin) เป็นวัสดุทางชีวภาพชนิดหนึ่งที่ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อมุ่งเน้นประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยีและการแพทย์ Giuliano Freddi, Masuhiro Tsukada และ Silvia Beretta<sup>4</sup> จึงได้มีการทดลองศึกษาถึงโครงสร้างของแผ่นฟิล์มที่ได้จากการผสมใยไหมกับ poly acrylamide แล้วตรวจสอบโดยเทคนิค DSC, TGA, TMA, DMA, และ FT-IR ตลอดจนทดสอบสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรง การดึงยืด ณ จุดขาด เป็นต้น

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นพอลิเมอร์หนึ่งในหลายชนิดที่สามารถเกิดเป็นไฮโดรเจลและมีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพอย่างดีเยี่ยม จึงมีการพัฒนาใช้งานด้านการแพทย์เพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากมีข้อเสีย คือ สามารถละลายได้ในน้ำร้อน จึงไม่คงทนต่อการนำไปผ่านการฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ เป็นสาเหตุให้ Yoshii, F. และคณะ<sup>5</sup> พัฒนาไฮโดรเจลที่มีสมบัติทนต่อความร้อนเพื่อประโยชน์สำหรับงานด้านเวชภัณฑ์ โดยทำการปรับปรุงด้วยปฏิกิริยา acetylation ก่อนหรือหลังทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยรังสีแล้วทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่า หลังทำการปรับปรุง ไฮโดรเจลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จะมีความแข็งแรงดึงสูงขึ้น มีค่าการดึงยืด 270-320% โดยประมาณ สามารถทนต่อความร้อนดีขึ้น ตลอดจนมีสมบัติการยึดติดกับบาดแผลเป็นอย่างดี และยังช่วยรักษาแผลไฟไหม้ให้หายเร็วยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ผ้ากอซ

Masuhiro Tsukada, Giuliano Freddi และ John S. Crighton<sup>6</sup> ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และความเข้ากันได้ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ ผสม ระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับใยไหม (PVA/SF) พบว่าเมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) จะปรากฏพีคการสลายตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และใยไหม ที่ตำแหน่งอุณหภูมิ 220°C และ 280°C ตามลำดับ เช่นเดียวกับแถบสเปกตรัมของ IR ที่ปรากฏพีคเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และใยไหม ส่วนเทคนิค TMA และ TGA พบว่าแผ่นฟิล์มแสดงสมบัติอยู่ระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับใยไหมที่เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและส่องผ่าน (SEM, TEM) จะสามารถสังเกตเห็นวิถุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(phase) ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 - 7  $\mu\text{m}$  กระจายตัวอยู่จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไซไทมไม่สามารถเข้ากันได้ (incompatible)

Kazuo Yamaura และคณะ<sup>7</sup> ทำการศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางแสง ความร้อน การบวมตัว การซึมผ่าน ตลอดจนสมบัติทางเคมีเชิงกล (optical, thermal, swelling, mechanochemical and permeation) ของแผ่นฟิล์มที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างไซไทม (silk fibroin; SF) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถึงความ เป็นระเบียบ (syndiotactic-PVA ;s-PVA) พบว่าสารละลายพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีอัตราการเกิดเจลต่ำกว่าสารละลายของ SF หรือ s-PVA ที่ความเข้มข้นเดียวกัน จากการทดสอบแผ่นฟิล์ม SF/s-PVA ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) ปรากฏพีการสลายตัวของ SF ที่ช่วงอุณหภูมิ 288<sup>o</sup>C – 299<sup>o</sup>C และพีค จุดหลอมเหลวของ s-PVA ในช่วงอุณหภูมิ 233<sup>o</sup>C – 241<sup>o</sup>C เมื่อศึกษาแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะพบวัฏภาคขนาดเล็ก (microphase) กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิของน้ำไม่มีผลต่อองศาการบวมตัว และค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง pH 2 – 12 มีผลน้อยมากต่อสมบัติทางเคมีเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่บวมน้ำ ส่วนการที่มี SF เป็นองค์ประกอบนั้น จะช่วยให้การซึมของสารละลายเกลือที่เป็นกลาง (neutral salt) ผ่านแผ่นฟิล์มดีขึ้น

ในทางการแพทย์ยอมรับสูตรไฮโดรเจลที่ Janusz M.Rosiak<sup>8</sup> เตรียมจาก N-vinyl pyrrolidone ผสมกับเอทิลีน ไกลคอลและ วุ้น agar ที่ผลิตขึ้นภายใต้ชื่อทางการค้าว่า HDR ไฮโดรเจล ตกแต่งพิเศษชนิดนี้ ได้ริเริ่มมีการพัฒนาขึ้นในประเทศโปแลนด์ ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์โดยการฉายรังสีในปริมาณ 25 kGy ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเกิดพันธะเชื่อมโยง 3 มิติที่เสถียรภายในโครงสร้างและเพียงพอต่อการฆ่าเชื้อโรค เทคโนโลยีการผลิต HDR มีข้อดีหลายประการ ดังนี้

1. เป็นเทคโนโลยีธรรมดาที่ง่าย และ สะอาด (ไม่ก่อให้เกิดของเสีย น้ำทิ้ง ไอของสารหรืออื่น ๆ ที่เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง )
2. ไม่จำเป็นต้องมีการดูแลเป็นพิเศษหรือแม้แต่การใช้ห้องปลอดเชื้อ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็สามารถอยู่ในสภาพปราศจากเชื้ออย่างสมบูรณ์
3. สามารถดำเนินการเป็นแบบกระบวนการต่อเนื่อง หรือกระบวนการแบบครั้ง

### 1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและทดลองหาปริมาณรังสีที่ใช้ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงโครงร่างแหในพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กับ พอลิเมอร์อื่น ๆ
2. ศึกษาผลของพอลิเมอร์อื่น เช่น พอลิอะคริลิก แอซิดและซิลค์โปรตีนที่เติมลงไปว่ามีผลต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจลอย่างไร
3. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยเติมพอลิอะคริลิกแอซิด (PAA) หรือ ซิลค์โปรตีนลงไปเพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสมบัติของเจลให้เหมาะสม นอกจากนี้ยังศึกษาการใช้ปริมาณรังสีแกมมาเพื่อให้เกิดโครงสร้างร่างแหของพอลิเมอร์ผสมนี้เพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีสมบัติที่ดีสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม ทางเกษตร หรือในทางการแพทย์ต่อไป

### 1.5 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ในการวิจัย ทำการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) กับพอลิเมอร์อื่น ๆ นำสารละลายผสมดังกล่าวไปฉายรังสีแกมมาเพื่อทำให้พอลิเมอร์เกิดพันธะโครงสร้งร่างแห หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้มาเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล โดยการเทลงจานเพาะเชื้อแล้วอบภายใต้สุญญากาศ เพื่อกำจัดน้ำ รวมทั้งสารอื่น ๆ ออก นำฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อนและความสามารถในการดูดซับน้ำ, ความสามารถในการดูดซับไอออน และความสามารถในการดูดซับน้ำเมื่อมีเกลือชนิดต่าง ๆ ละลายอยู่ ที่พีเอชต่าง ๆ โดยทำการเปรียบเทียบฟิล์มที่ได้จากสารละลายพอลิเมอร์ผสมกับฟิล์มที่ได้จากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อย่างเดียว ทำการสรุปผลการวิจัยเพื่อนำไปใช้งาน

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสม เพื่อให้ได้ फिल्मไฮโดรเจล
2. ทราบถึงปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมในการทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดพันธะเชื่อม โยง โครงร่างแห โดยยังสามารถเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มได้
3. ทราบถึงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความสวยงามและมีคุณภาพสูง
4. ทราบถึงสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น วุ้น (agar) , gelatin หรือจากการสังเคราะห์ เช่น poly (vinyl alcohol) มีโครงสร้างเป็น โครงร่างตาข่ายสามารถดูดน้ำเข้าไปอยู่ในโครงสร้างได้ 90% หรือมากกว่า

พอลิเมอร์หรือมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดเป็นไฮโดรเจลได้ต้องมีสมบัติชอบน้ำ(hydrophilic) และละลายน้ำได้ โดยมีหมู่ฟังก์ชัน ดังตัวอย่าง ต่อไปนี้ คือหมู่  $-OH$  ,  $-COOH$  ,  $-CONH_2$  ,  $-SO_3H$  ,  $-CONH$

ตัวอย่างของ พอลิเมอร์ที่สามารถเกิดเป็นไฮโดรเจลได้



#### พันธะเคมีในไฮโดรเจล

พันธะเชื่อมโยงระหว่างโซ่พอลิเมอร์ ได้แก่ พันธะโคเวเลนต์ (ในกรณีที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี) และพันธะไฮโดรเจนหรือแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (ในกรณีที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ)

1. พันธะเชื่อมโยงทางเคมี (chemical crosslinked) แต่ละสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรง ดังนั้นจึงทำให้สลายตัวได้เพียงในกรณีที่โมเลกุลมหภาค (macromolecule) ถูกทำลายเท่านั้นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการเตรียมไฮโดรเจลชนิดนี้ ได้แก่ เทคนิคการฉายรังสี

2. พันธะเชื่อมโยงทางกายภาพ(physical crosslinked) ไฮโดรเจลที่มีพันธะเชื่อมโยงชนิดนี้ เรียกว่า physical hydrogel , reversible gel หรือ Pseudogel โดยจะมีโครงสร้างเป็นร่างแห 3 มิติ แต่ละสายโซ่มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอ่อน ๆ หรือแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งจะเตรียมไฮโดรเจลชนิดนี้ได้ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า “Freezing and thawing” วิธีการนี้แม้จะให้ไฮโดรเจลที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรงสูง แต่จะหลอมเหลวกลับไปเป็นสารละลายได้ที่อุณหภูมิ 55 °C เนื่องจากไม่มีพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มีเพียงการเชื่อมโยงทางกายภาพเท่านั้น

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการฉายรังสีนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1. การฉายรังสีเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสารละลายมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ เช่น acrylamide , 2-hydroxy ethylmethacrylate , vinyl pyrrolidone
2. การฉายรังสีเพื่อเหนี่ยวนำสารละลายพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกัน

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล มี 2 วิธี ดังนี้

1. เตรียมสารละลายมอนอเมอร์ หรือพอลิเมอร์  $\Rightarrow$  เทลงในแม่พิมพ์  $\Rightarrow$  ฉายรังสีในแม่พิมพ์ที่ปิดฝา  $\Rightarrow$  จะได้ไฮโดรเจลที่เกิดพันธะเชื่อมโยงตามต้องการ  $\Rightarrow$  อบให้แห้ง
2. เตรียมสารละลายมอนอเมอร์ หรือพอลิเมอร์  $\Rightarrow$  เทลงในหลอดทดลองแล้วฉายรังสี  $\Rightarrow$  นำไฮโดรเจลที่ได้มาเทลงแม่พิมพ์  $\Rightarrow$  อบให้แห้ง

การเกิดไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการฉายรังสี อธิบายกลไกได้ว่าแรงกระทำต่อมวลสารเนื่องมาจากการฉายรังสีจะทำให้สารถูกเร้าให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสารมัธยันต์ (intermediate) ที่มีความว่องไว จึงก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ขึ้นมากมาย โดยอนุมูลอิสระดังกล่าวอาจเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของตัวทำละลายหรือตัวกลางด้วยก็ได้ ถ้าอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นบนแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งกันและกัน ก็จะเกิดการรวมตัวกัน เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ที่เชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ โดยหากว่า ปริมาณของพันธะที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีมากเพียงพอที่จะเกิดส่วนที่สามารถบวมตัวได้ แต่ไม่ละลายน้ำที่เรียกว่า “gel” ขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามยังคงมีบางส่วนที่ยังไม่ได้เกิดพันธะเชื่อมโยงหลงเหลืออยู่ ซึ่งเรียกส่วนดังกล่าวนี้ว่า “sol” และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณรังสีที่ฉายให้แก่ระบบพบว่าส่วนของเจลจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย

พิจารณาสมการ



เมื่อ	M	=	โมเลกุลของมอนอเมอร์
	R $\cdot$	=	อนุมูลอิสระของมอนอเมอร์
	S	=	โมเลกุลของตัวทำละลาย
	S $\cdot$	=	อนุมูลอิสระของตัวทำละลาย
	OH $\cdot$	=	อนุมูลอิสระไฮดรอกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H• = อนุมูลอิสระไฮดรอกซี

e<sub>aq</sub> = solvated electron

จะเห็นว่าปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันนั้นไม่เพียงแต่ถูกริเริ่มได้ด้วยอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์เท่านั้น แต่ยังสามารถริเริ่มได้ด้วยอนุมูลอิสระของน้ำ จากการศึกษพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสมการ (2) และ (3) มีปริมาณมากกว่า (1) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุมูลอิสระของน้ำที่มีบทบาทในการแผ่ขยายสายโซ่

หลังจากมอนอเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ 80-90% แล้ว อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อทำการฉายรังสีต่อไปจะเกิดการรวมกันของอนุมูลอิสระมหภาค เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้น จึงเป็นเหตุให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย อนุมูลอิสระขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลโดยตรงจากการฉายรังสีให้แก่พอลิเมอร์ หรือเป็นผลมาจากสารมัธยันต์ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลมหภาค (macromolecule) ส่วนการเกิดโครงสร้างร่างแหนั้นอาจเกิดจากการรวมกันของอนุมูลอิสระที่อยู่บนแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งถือว่าเป็นการเกิดพันธะเชื่อมโยงอย่างง่าย หรืออาจเกิดจากการรวมกันของอนุมูลอิสระที่อยู่บนปลายโซ่กับ อนุมูลอิสระขนาดใหญ่ตัวอื่น โดยเรียกรวมกันแบบนี้ว่า “endlinking”

### สมบัติของไฮโดรเจลและการนำไปใช้งาน

ไฮโดรเจล สามารถดูดซับน้ำและไอออนได้ โดยสมบัติเชิงกลและรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสมบัติดังกล่าวคล้ายคลึงกับอวัยวะบางอย่างในร่างกายคน เช่น กล้ามเนื้อ เอ็น ลำไส้เล็ก เป็นต้น นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังมีสมบัติเข้ากันได้ดีกับสารชีวภาพ เช่น เลือด น้ำเหลือง เนื้อเยื่อ จึงสามารถนำมาทำเลนส์สัมผัส วัสดุตกแต่งบาดแผลจากไฟไหม้ ตลอดจนใช้เคลือบวัตถุที่ต้องนำมาใช้สัมผัสกับร่างกาย ใช้เคลือบอวัยวะเทียมที่ใช้ในร่างกาย

### Hydrogel dressing

แผลที่เกิดจากอุบัติเหตุไฟไหม้ หรือน้ำร้อนลวกนั้น มีความเสี่ยงสูงมากต่อการเกิดเชื้อโรคจากสิ่งแวดล้อม และการสูญเสียเนื้อจากร่างกาย โดยทั่วไปแล้ว การรักษาพยาบาลแผลไฟไหม้ธรรมดาจนถึงแผลถาวร ทำได้ด้วยวิธีปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ หรือการทำศัลยกรรมแต่งผิวเท่านั้น เพื่อช่วยแก้ปัญหาการสูญเสียผิวหนัง และเร่งการรักษาบาดแผลให้เร็วยิ่งขึ้น โดยแผ่นผิวหนังที่ใช้อาจเป็นแผ่นผิวหนังที่สมบูรณ์ หรือผิวหนังที่ผ่านการเพาะเลี้ยงจากห้องปฏิบัติการ เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีข้อเสีย ผิวหนังเทียมจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญอีกทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหา โดย Hydrogel dressing เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มว่านำมาใช้เป็นผิวหนังเทียมปิดรักษาบาดแผลที่นิยมมากที่สุด วัสดุตกแต่งบาดแผลหรือหนังเทียมที่ใช้นั้น สามารถแบ่งเป็นกลุ่ม ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กลุ่มธรรมดา (conventional) ได้แก่ ผ้ากอซ (guaze) ผ้าพันแผลที่อิมมัลด้วยซีซีหรือน้ำมันซิลิโคน เป็นต้น
2. กลุ่มชีวภาพ (biological) ได้แก่ ผิวหนังจากศพ ผิวหนังสัตว์ ฟองน้ำ และ collagen เป็นต้น
3. กลุ่มสังเคราะห์ (synthesis) ได้มาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์

วัสดุตกแต่งแผลจะมีการนำมาใช้แบบครั้งต่อครั้ง ซึ่งความถี่ของการเปลี่ยนแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเอง เช่น สมบัติการซึบดูด หรือขึ้นกับปฏิกิริยาการต่อต้านของร่างกายเมื่อมีสิ่งแปลกปลอมผ่านเข้ามา

สมบัติของวัสดุตกแต่งบาดแผล มีดังนี้

1. สามารถดูดซับของเหลว ออกจากร่างกายได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ดูแลสุขภาพผิวได้
3. มีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงเชิงกลสูง
4. มีความโปร่งใส
5. ขอมให้ก๊าซออกซิเจนแพร่ซึมเข้าไปถึงผิวหนังของบาดแผลได้
6. ควรปราศจากเชื้อโรค
7. สามารถควบคุมปริมาณการปล่อยยาได้
8. ใช้ง่าย สะดวก และเก็บรักษาง่าย
9. มีความเสถียรคงทน หาได้ทั่วไปและราคาถูก

นอกจากนี้วัสดุตกแต่งบาดแผลยังต้องมีคุณสมบัติสำคัญเพิ่มเติม ได้แก่

- การควบคุมความชื้นของแผล วัสดุตกแต่งแผลควรมีสมบัติในการควบคุมความชื้นของแผลให้เหมาะสม ไม่เปียกชุ่มเกินไปไปด้วยน้ำเหลืองที่ออกจากแผล หรือปล่อยให้แผลแห้งจนเป็นสะเก็ด เพราะแผลที่เปียกชุ่มเกินไปจะทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ แต่ถ้าแผลแห้งจนเป็นสะเก็ดก็จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของเซลล์ผิวหนังที่พยายามจะเคลื่อนที่มาสวมแผล โดยกลไกธรรมชาติ ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ปิดแผลจะต้องมีความสามารถในการดูดซับของเหลวได้ในอัตราเดียวกับการผลิตของเหลวจากแผล และสามารถให้อิโนนาระเหยออกจากแผลได้ ซึ่งจะสามารถรักษาระดับความชื้นของแผลไว้ได้
- ความสามารถในการยึดติดกับแผล วัสดุที่ใช้ควรสามารถยึดเกาะกับแผลได้แนบสนิท แต่ไม่ควรจะแน่นเกินไปจนทำลายเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นใหม่ เมื่อลอกวัสดุตกแต่งออกจากแผล

#### สมบัติบางประการของ Hydrogel dressing

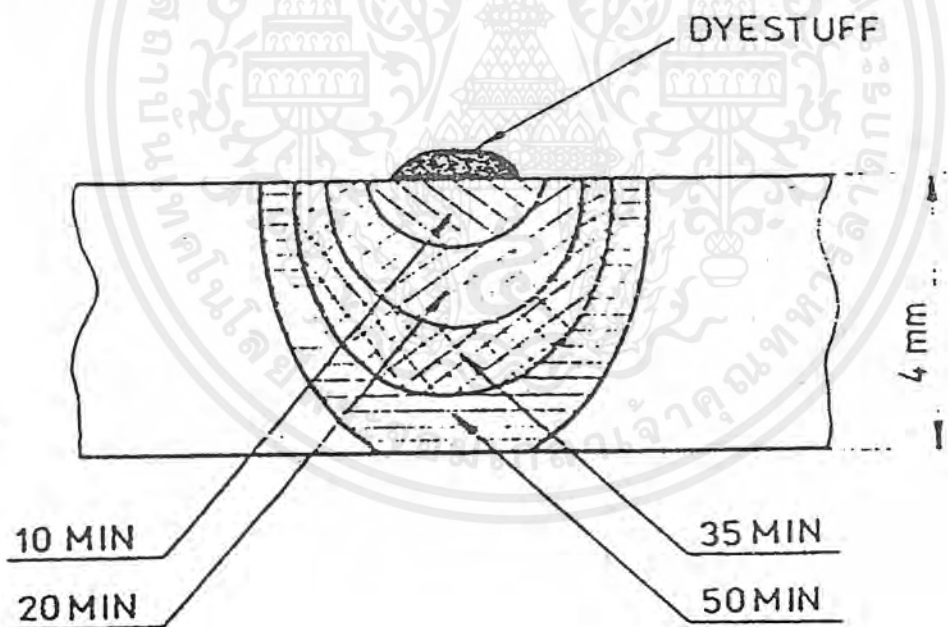
ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้มาก เมื่อทำเป็นแผ่นบางจะมีความยืดหยุ่น ใส สะดวกต่อการนำไปใช้ แต่มีปัญหาบางประการ ได้แก่ เมื่อทำเป็นแผ่นบาง อัตราการสูญเสียน้ำจากไฮโดรเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสูง ทำให้เจลแข็ง แข็ง เพราะและทำให้ติดผิวหนังรวมทั้งดูดซับน้ำหรือของเหลวออกจากร่างกาย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยเติมสารละลายพอลิเอทิลีนหรือพอลิพรอพิลีน ไกลคอลและสารทำให้คงรูปร่าง เช่น วัณ หรือเจลาติน เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ เอทิลีน ไกลคอล และวัณ จะทำให้อัตราการบวมตัวเปลี่ยน ดังนี้ คือ ถ้าเพิ่มปริมาณของเอทิลีน ไกลคอล จะทำให้ไฮโดรเจล มีสมบัติการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้ามีวัณ ในปริมาณมากจะส่งผลให้สมบัติการดูดซับน้ำต่ำลง

สมบัติเชิงกลของ Hydrogel dressing บางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง และอัตราการดึงยืด ณ จุดขาด ไม่เพียงแต่แปรตามปริมาณองค์ประกอบในไฮโดรเจลเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนด้วย ซึ่งพบว่าที่ปริมาณรังสีมาก ๆ ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลจะเพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าองศาการเชื่อมโยงที่สูงขึ้นนั่นเอง

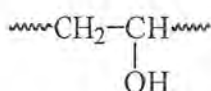
เนื่องจาก Hydrogel dressing มีความสามารถในการดูดซับน้ำ จึงยอมให้มีการซึมผ่านของออกซิเจนหรือก๊าซอื่นๆ เข้าไปในบาดแผลได้ นอกจากนี้ Hydrogel dressing ยังยอมให้สารบางชนิดที่เป็นของแข็งแพร่ผ่านจากผิวหนังด้านหนึ่งไปยังผิวหนังอีกด้านหนึ่งได้ ดังรูปที่ 1 จะแสดงอัตราการแพร่ผ่านจากผิวหนังเข้าไปในไฮโดรเจลด้วยสีย้อม methyl red ที่อยู่ในรูปผงแป้ง (power)



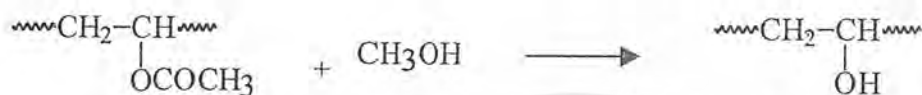
รูปที่ 2.1 แสดงอัตราการแพร่ผ่านจากผิวหนังเข้าไปในไฮโดรเจล ของสีย้อม metyl red ที่อยู่ในรูปผงแป้ง (power)

## 2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

สูตรโครงสร้าง



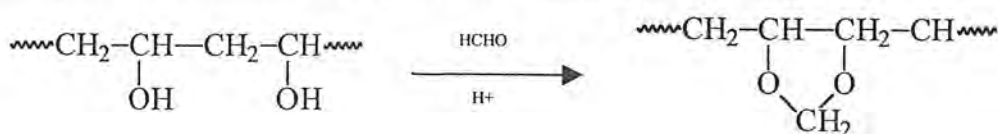
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญตัวหนึ่ง มีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานเตรียมได้จากไวนิลแอลกอฮอล์มอนอเมอร์ เพราะมอนอเมอร์นี้ไม่เสถียร แต่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต (PVAc) ดังสมการที่ 4



ปฏิกิริยาการเตรียม PVA จากพอลิไวนิลอะซิเตตจะทำในสารละลายแอลกอฮอล์ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ เมทานอล โดยมีเบสแก่หรือกรดแก่เป็นคะตะลิสต์ และจะเกิด transesterification ของหมู่ ester ของพอลิเมอร์ (หรือเรียกชื่ออีกอย่างได้ว่า ปฏิกิริยา saponification)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความหนาแน่น  $1.293 \text{ g/cm}^3$  อุณหภูมิ  $T_g = 80^\circ \text{C}$  มีสมบัติคล้ายแข็ง คือ เกิดสีน้ำตาลกับไอโอดีน ละลายในน้ำเย็นและค้างอ่อน โครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบอะแทกติกแต่มีความเป็นผลึกมากกว่าพอลิไวนิลอะซิเตต เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซี (-OH) มีขนาดเล็กกว่าหมู่อะซิเตต น้ำหนักโมเลกุลที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีอยู่ 3 ช่วง คือ 250000-300000 , 120000-150000 และ 25000-30000 ตามลำดับ สมบัติทางกายภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นอยู่กับคีรีของแอลกอฮอล์ซิส คือ ถ้าถูกไฮโดรไลซ์สมบูรณ์ 100% จะมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ทนทานต่อการฉีกขาดมากกว่าและพันธะไฮโดรเจนมากกว่า นอกจากนี้สมบัติทางกายภาพยังได้รับอิทธิพลจากความชื้นของสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะเหตุว่าน้ำจะทำตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับพอลิเมอร์ตัวนี้ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้ามีความชื้น 50 % ความทนต่อแรงดึงจะลดลงแต่จะไปเพิ่มความสามารถในการยืดตัวออกมากขึ้น น้ำหนักโมเลกุลก็มีผลต่อสมบัติทางกายภาพด้วย เช่น ถ้าน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะทนต่อแรงดึงต่ำ ทนต่อแรงฉีกขาดต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

สมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของ PVA คือ ความสามารถในการละลายน้ำได้ แต่จากสมบัตินี้เองทำให้เส้นใย PVA ที่ได้นั้นไม่สามารถนำมาใช้งานได้ในสภาพความเป็นจริง จึงมีการปรับปรุงเปลี่ยนพอลิเมอร์นี้ให้อยู่ในสภาพของพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายน้ำ ด้วยปฏิกิริยาทางเคมีกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยเปลี่ยน 1/3 หมู่ของ -OH ไปเป็นหมู่ฟอร์มัล (formal,  $\text{CH}_2\text{O}$ )

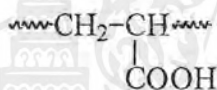


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาของ PVA และฟอร์มัลดีไฮด์จะเกิดขึ้นตามสมการที่ 5 หมู่ -OH ข้างเคียงภายในโซ่ของ PVA จะเข้าทำปฏิกิริยากับ HCHO ทำให้เกิดวงแหวนของ 1,3-dioxane ขึ้นภายในโซ่ในปฏิกิริยานี้ PVA ที่ใช้จะอยู่ในสภาพของแข็ง ดังนั้นฟอร์มัลดีไฮด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เฉพาะในส่วนอสัณฐาน (amorphous) แต่ไม่เข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว PVA ในสภาพที่เป็นของแข็งจะมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึก ถ้าส่วนที่เป็นผลึกนั้นมีปริมาณที่ไม่มากพอ ก็จะทำให้ PVA ดังกล่าวสามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 50°C แต่ถ้านำ PVA นี้มาผ่าน heat treatment ที่ 200 °C ก่อน ก็จะทำให้ความเป็นผลึกของ PVA เพิ่มขึ้นกว่า 50% และ PVA ดังกล่าวจะไม่ละลายน้ำแม้จะเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 80°C เพราะฉะนั้นเมื่อนำ PVA ที่ผ่าน heat treatment มาทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ ส่วนที่เป็นอสัณฐานเท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น จากหลักการนี้เอง จะทำให้เราสามารถควบคุมเปอร์เซ็นต์การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับฟอร์มัลดีไฮด์ได้ตามปริมาณความเป็นผลึกของ PVA

### 2.3 พอลิอะคริลิกแอซิด

สูตร โครงสร้าง



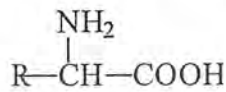
กรดอะคริลิกแอซิด ( $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ) เตรียมได้โดยตรงจาก เอธิลีนไซยาโนไฮไดริน หรือได้จากเกลือของกรดเมธาไคริลิกถูกพอลิเมอไรเซชันแล้วทำปฏิกิริยากับกรดอะคริลิกแอซิด นอกจากนี้จะได้จากการที่พอลิอะคริเลท หรือพอลิเมธาไครเลท ทำปฏิกิริยาซาฟอนนิฟิเคชัน แล้วให้พอลิอะคริลิกแอซิด การเตรียมจากมอนอเมอร์โดยตรงนิยมใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม เกิดพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัวโดยอนุมูลอิสระ พอลิอะคริลิกแอซิดจะไม่ละลายในมอนอเมอร์ของมันเองและไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ แต่ละลายได้ในน้ำและเบสเจือจาง มีคุณสมบัติเปราะเมื่อแห้ง และถ้าได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นโครงร่างตาข่าย จากลักษณะเหล่านี้ทำให้การใช้งานของมันมีจำกัด นิยมนำมาทำเป็นกาวและ thickening agent แต่ส่วนใหญ่จะทำเป็นโคพอลิเมอร์กับพวก ไวนิล และไคอินมอนอเมอร์

### 2.4 ซิลค์ โปรตีน

โปรตีนเป็นชีวโมเลกุล ที่มีมวลโมเลกุลสูง โปรตีนทุกชนิดประกอบด้วยธาตุ C, H, N, O และ S แต่โปรตีนบางชนิดมีธาตุ P, Fe, Zn และ Cu เพิ่มเข้ามา หน่วยโครงสร้างของโปรตีนคือ กรดอะมิโน ซึ่งสามารถถูกแยกออกจากโปรตีนได้โดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด กรดอะมิโนที่พบในโปรตีนมีทั้งหมด 20 ชนิด แต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายยาวที่เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์ ในลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีการแตกกิ่ง พันธะโคเวเลนต์ที่เชื่อมระหว่างกรดอะมิโนมีชื่อว่าพันธะเพปไทด์ พันธะนี้เป็นพันธะเอไมด์ ที่เกิดจากการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโนตัวที่หนึ่งกับ หมู่  $\alpha$  อะมิโนของกรดอะมิโนตัวที่อยู่ถัดไป โมเลกุลของโปรตีนอาจจะประกอบด้วยโซ่พอลิเพปไทด์เพียงโซ่เดียวหรือมากกว่าก็ได้ โซ่พอลิเพปไทด์มีความยาวแตกต่างกันไป โดยมีกรดอะมิโนตั้งแต่ประมาณ 40 ถึงมากกว่า 4,000 หน่วย โปรตีนแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมี มวลโมเลกุลและการเรียงลำดับของกรดอะมิโนที่จำเพาะจากการที่โปรตีนประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ เรียกว่า กรดอะมิโน ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่มีอยู่เพียง 20 ชนิดที่มีความสำคัญมาก กรดอะมิโนมีสูตรโมเลกุลทั่วไป ดังนี้



ภายใน โมเลกุลของกรดแอลฟาอะมิโน จะมีหมู่อะมิโนคั่งอยู่ที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนของกรดคาร์บอกซิลิก (กรดอะมิโนทุกตัวมีแอลฟาคาร์บอน ยกเว้นไกลซีน) ด้วยเหตุที่เอมีนเป็นเบสและคาร์บอกซิลิกเป็นกรด จึงเกิดการส่งผ่านโปรตอนจากกรดให้เบส สูตรโมเลกุลของกรดอะมิโนจึงเขียนอยู่ในรูปแตกตัวเป็นไอออนหรือรูปที่มีประจุสองขั้วได้ ดังนี้



โครงสร้างที่เป็นประจุของกรดแอลฟาอะมิโน

โปรตีนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ โดยอาศัยโครงสร้าง (conformation) หรือรูปร่าง 3 มิติ ได้ดังนี้คือ

1. โปรตีนกลอบูลาร์ ประกอบด้วย โซ่พอลิเพปไทด์มาขดม้วนแน่นในลักษณะกลมโดยเอาหมู่ R ที่มีขั้วของกรดอะมิโนอยู่ข้างนอกโมเลกุล ซึ่งจะถูกไฮเดรต ด้วยน้ำ และเอาหมู่ R ที่ไม่ชอบน้ำไว้ข้างในโมเลกุล โครงสร้างของโปรตีนพวกนี้ประกอบด้วยเกลียวอัลฟา และโครงสร้างเบตา ในปริมาณต่าง ๆ กัน ส่วนใหญ่ละลายในน้ำได้ ตัวอย่างเช่น เอนไซม์เกือบทุกชนิด แอนติบอดี สอร์โอมบางชนิดและโปรตีนขนส่ง

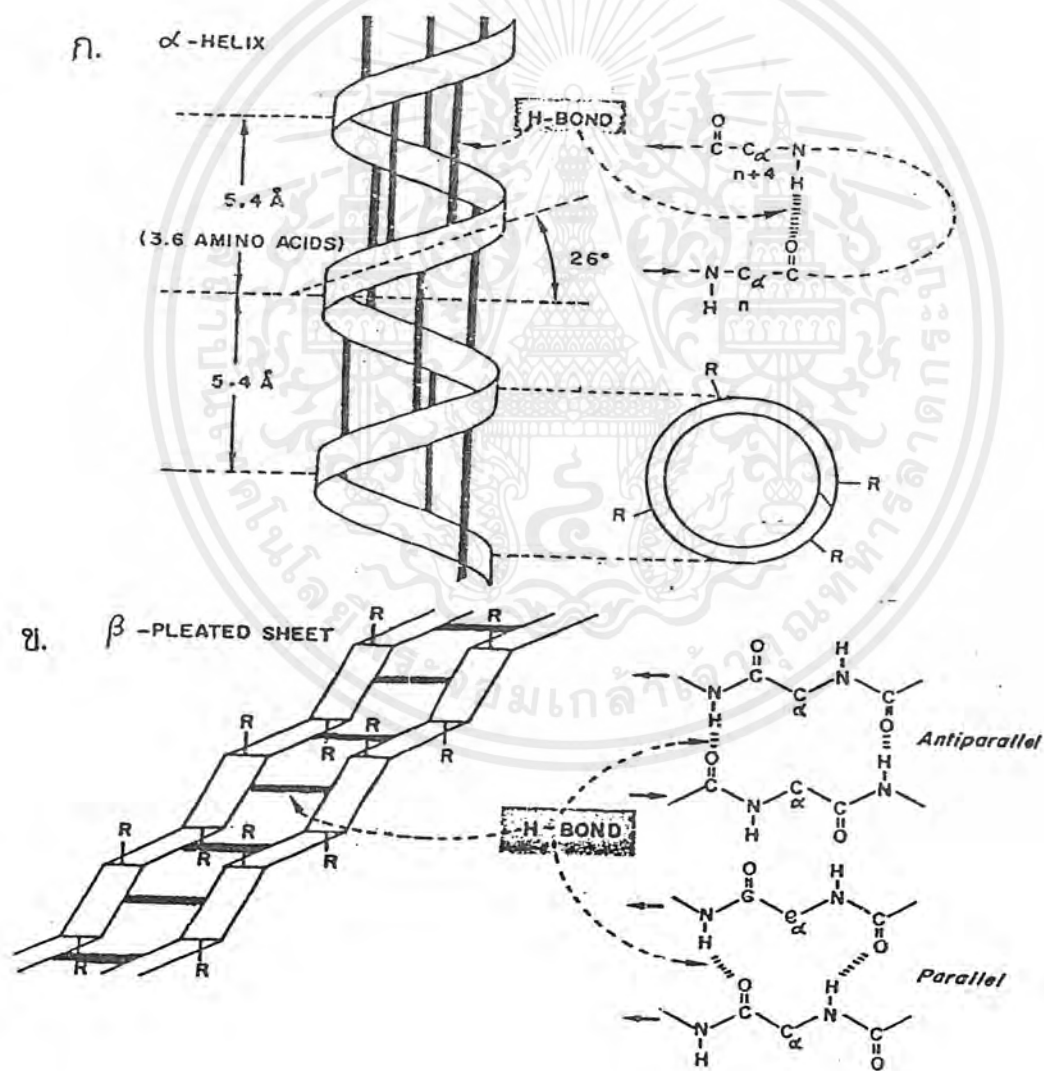
2. โปรตีนเส้นใย ประกอบด้วย โซ่พอลิเพปไทด์ เป็นเส้นยาวขนานกับแกนในลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น มีความแข็ง เหนียวและอาจจะยืดหยุ่นได้ ไม่ละลายในน้ำหรือในสารละลายเกลือที่เจือจาง โปรตีนพวกนี้เป็นโปรตีนโครงสร้างที่สำคัญในเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของสัตว์ชั้นสูง ตัวอย่างเช่น คอลลาเจน ของเอ็น และของเมทริกซ์ของกระดูก คีราตินของเส้นผม ขน และไฟโบรอินของเส้นไหม

โครงสร้างของโปรตีนสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

1. โครงสร้างปฐมภูมิ หมายถึงโครงสร้างของโปรตีนที่ประกอบด้วยการเรียงลำดับของกรดอะมิโนที่จำเพาะเป็นสายยาวของโซ่ พอลิเพปไทด์ ด้วยพันธะเพปไทด์

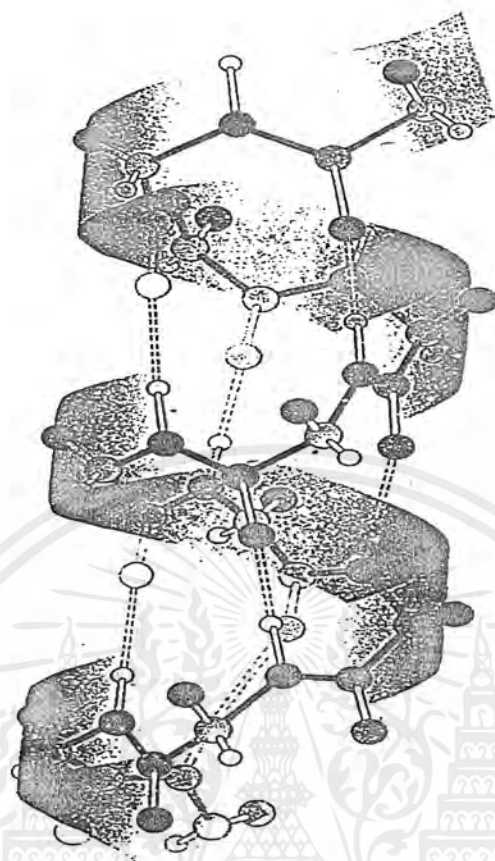
2. โครงสร้างทุติยภูมิ โปรตีนทั้งหลายในธรรมชาติประกอบขึ้นด้วยสายพอลิเพปไทด์ที่มีโครงสร้างแบบทุติยภูมิ 3 แบบด้วยกัน<sup>10</sup> คือ  $\alpha$ -เฮลิคส์ ,  $\beta$ -ชีท และ  $\beta$ -เบนด์

2.1  $\alpha$ -เฮลิคส์ โครงสร้างระดับทุติยภูมิของสาย พอลิเพปไทด์ ที่พบมากที่สุด คือแบบ  $\alpha$ -เฮลิคส์ ซึ่งโครงสร้างของสายพอลิเพปไทด์ จะขดวนเป็นเกลียวเหมือนสปริง หมุ่คาร์บอนิลมีพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ NH ของเอมิดที่ห่างออกไป 4 ยูนิท การหมุนวนของขดสปริงที่พบส่วนใหญ่เป็นแบบวนขวา ความเสถียรของ  $\alpha$ -เฮลิคส์เกิดจากการที่มีพันธะไฮโดรเจนสำหรับหมู่คาร์บอนิลของทุกยูนิทของอะมิโนแอซิดเรซิดิว และยังเป็นโครงสร้างที่ทำให้มีการจัดตัวของสายพอลิเพปไทด์ที่ประหยัดที่ คืออัดตัวกันอยู่อย่างแน่นหนาเป็นเกลียว ในการเขียนรูปโครงสร้างของโปรตีนนิยมใช้รูปขดสปริงแทนโครงสร้างแบบ  $\alpha$ -เฮลิคส์ ดังรูปที่ 2.2 ก. และรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน ก. เกลียวอัลฟา ข. แผ่นพลิทชีต

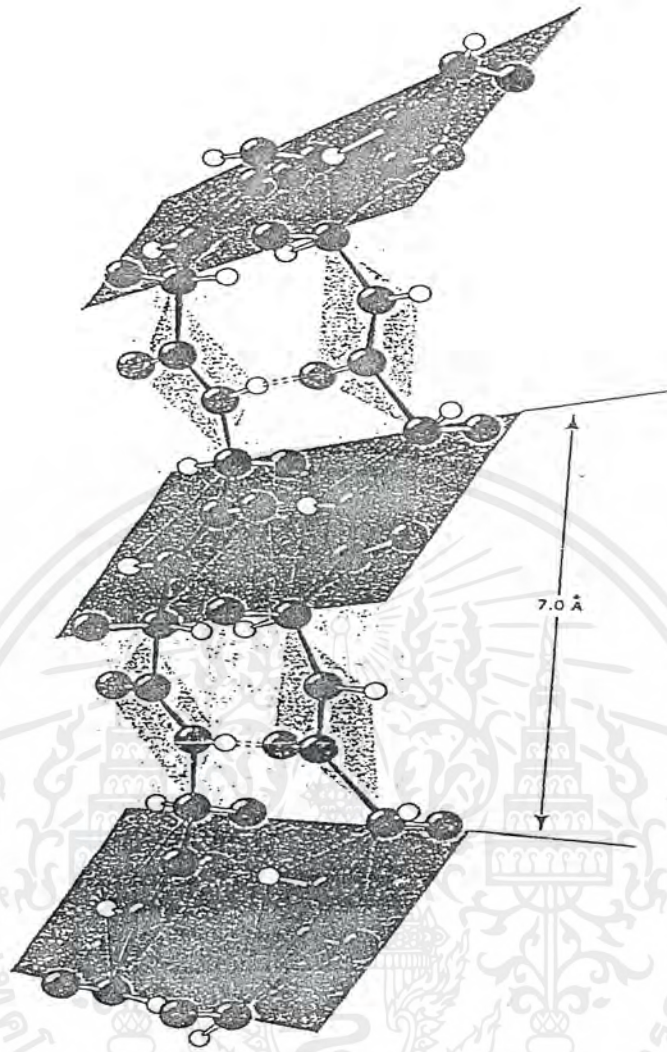
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปโครงสร้าง  $\alpha$ -เฮลิคส์ของพอลิเพปไทด์

2.2  $\beta$ -ชีท เป็น โครงสร้างระดับทุติยภูมิที่พบมากเป็นอันดับสองรองจาก  $\alpha$ -เฮลิคส์  $\beta$ -ชีทเกิดจากการที่สายพอลิเพปไทด์ 2 สายมาอยู่คู่ขนานกัน และเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอนิลของสายหนึ่งกับหมู่ NH ของเอมิคจากอีกสายหนึ่ง แผ่นหรือระนาบที่เกิดจากวางขนานกันของสายพอลิเพปไทด์ จะมีการหักขึ้นลงเป็นคลื่นเหมือนรอยหยักขึ้น-ลงของพับกระดาษ  $\beta$ -ชีทที่สายพอลิเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไป C เหมือนกัน เรียกว่า พาราเลล  $\beta$ -ชีท (parallel  $\beta$ -sheet) ส่วน  $\beta$ -ชีท ที่คู่สายพอลิเพปไทด์มีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไป C ในทิศตรงกันข้ามกันเรียกว่า แอนติพาราเลล  $\beta$ -ชีท (Antiparallel  $\beta$ -sheet) ในการเขียนโครงสร้างของโปรตีนนิยมใช้รูปเส้นลูกศรแบบง่โครงสร้างแบบ  $\beta$ -ชีท ดังรูปที่ 2.2 ข. และรูปที่ 2.4

2.3  $\beta$ -เบนด์ คอนฟอร์เมชันแบบ  $\beta$ -เบนด์จะพบบริเวณจุดหักมุมเพื่อกลับทิศทางของสาย  $\alpha$ -เฮลิคส์ หรือ  $\beta$ -ชีท ลักษณะโดยทั่วไปจะเป็นลูป (loop) ซึ่งเกิดจากการที่หมู่คาร์บอนิลเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ ถัดไป 3 ยูนิต



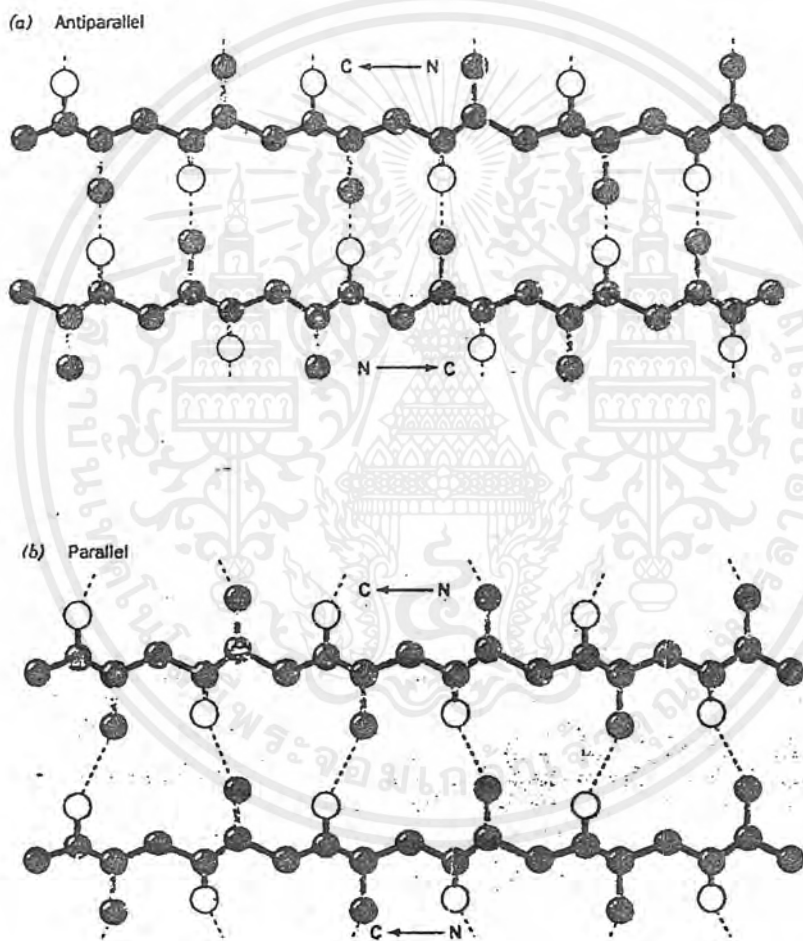
รูปที่ 2.4 รูปโครงสร้าง  $\beta$ -ชีของพอลิเพนไทด์

3. โครงสร้างคดียภูมิ หมายถึง โครงสร้างที่มีโซ่พอลิเพนไทด์มาขม้วนแน่นในลักษณะกลมของโปรตีนกลอบูลาร์ พันธะที่เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้โครงสร้างนี้เสถียรอยู่ได้ คือ พันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งเป็นพันธะโคเวเลนต์และพันธะอ่อน เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรโฟบิก หรือพันธะนอนโพลาร์และแรงแวนเดอร์วาลส์

4. โครงสร้างจตุรภูมิ หมายถึง โครงสร้างที่ประกอบด้วยโซ่พอลิเพนไทด์มากกว่าหนึ่งโซ่อยู่รวมกันด้วยพันธะอ่อน แต่ละโซ่พอลิเพนไทด์หรือหน่วยย่อย หรือ โปรโตเมอร์ (protomer) อาจจะเหมือนกันหรือต่างกันได้ โปรตีนที่มีโครงสร้างลักษณะนี้เรียกว่าโอลิโกเมอร์โปรตีน ตัวอย่างเช่น ฮีโมโกลบิน ประกอบด้วยโซ่อัลฟา 2 โซ่ และโซ่เบตา 2 โซ่

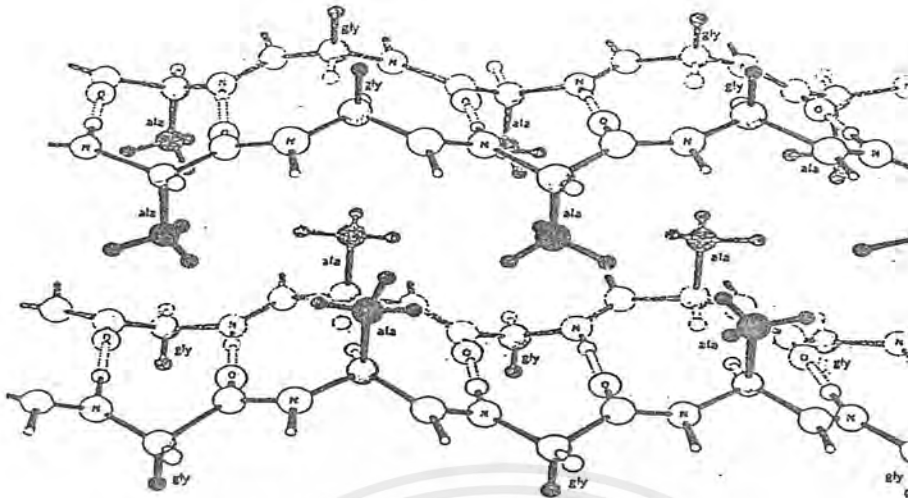
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัลโคโปรตีน เป็นโปรตีนพวกไฟโบรอินที่พบในเส้นไหม ประกอบด้วย กรดอะมิโน ดังนี้ คือ ไกลซีน 40 % อะลานีน 29 % และเซรีน 12% และมีโครงสร้างปฐมภูมิที่ซ้ำกัน คือ  $(\text{Gly-Ser-Gly-Ala-Gly-Ala})_n$  โครงสร้างไฟโบรอินจะเป็นแผ่นพืดบีตา ชนิดที่มีสายเพปไทด์วิ่งสวนทางกัน ทำให้ไฟโบรอินมีลักษณะเป็นแผ่นพืดหลาย ๆ แผ่นมาซ้อนทับกัน ในแผ่นพืดบีตาสายเพปไทด์จะวิ่งขนานกัน มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มและกลุ่มของพันธะเพปไทด์ของสายเพปไทด์ที่เคียงคู่กัน แขนงข้าง (หมู่ R) จะชี้ออกสู่ด้านล่างและด้านบนของสายเพปไทด์แขนงข้างที่มีขนาดเล็ก เช่น ไกลซีน เซรีนและอะลานีนจะช่วยทำให้แผ่นพืดอยู่ตัวได้ดี ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 เป็นโครงสร้างของซัลโคโปรตีน



รูปที่ 2.5 รูปโครงสร้างแผ่นจิบเบตาแบบไม่ขนานและขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 รูปโครงสร้างสามมิติของไหม

## 2.5 การฉายรังสี<sup>11</sup>

การแผ่รังสี หมายถึงการนำพาพลังงานทั้งในรูปของคลื่นและอนุภาค ตัวที่นำพาพลังงานในรูปของคลื่นเราเรียกว่า โฟตอน ในการแผ่พลังงานนี้ โฟตอนจะประพาดตัวเป็นลักษณะคล้ายคลื่นเมื่อมันเคลื่อนไหว และจะประพาดตัวคล้ายอนุภาคเมื่อถูกดูดกลืน หรือปลดปล่อยโดยอะตอมหรือโมเลกุล

การแผ่รังสีสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยการเร่งหรือจากไอโซโทปของธาตุที่แผ่รังสีที่เกิดในธรรมชาติ หรือไอโซโทปที่เกิดจากการสังเคราะห์ แต่แหล่งของการควบคุมการแผ่รังสี คือ ไอโซโทปที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์

รังสีแกมมาเป็นรังสีคลื่นสั้นๆเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากแต่ไม่มีประจุโฟตอนของรังสีแกมมาสามารถทะลุทะลวงแม้ในสสารที่มีความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งถ้าต้องการที่จะหยุดการทะลุทะลวงของรังสีแกมมานั้นต้องใช้คอนกรีตที่มีความหนามากกว่า 1 เมตร

### ข้อดีของการฉายรังสี

1. สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าในกระบวนการทางเคมีปกติ
2. สามารถทะลุทะลวงได้อย่างดี ถึงแม้ว่ารังสีแกมมาจาก Cobalt-60 สามารถทะลุทะลวงได้มากถึง 12 นิ้ว (300mm) แต่จะเคลื่อนที่ในอัตราที่ช้าและใช้เวลานานขณะที่รังสีอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในอัตราที่รวดเร็วมาก แต่สามารถทะลุทะลวงได้ในความหนาเพียง 0.36 นิ้ว (10mm) ด้วยเหตุนี้ผลิตภัณฑ์จากการฉายรังสี 90 % จึงถูกผลิต โดยการใช้แหล่งอิเล็กตรอนพลังงานสูง
3. ไม่จำเป็นต้องใช้สารตัวเติมพวกสารริเริ่ม หรือ คะตะลิสต์ทำให้สารปราศจากสิ่งปนเปื้อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสะอาดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ได้กับมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ ที่ไม่สามารถเกิด โครงสร้างร่างแห ได้โดยตัวริเริ่มทางเคมี

5. ความว่องไวของปฏิกิริยาไม่ลดลง ถึงแม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ขึ้นและเกิด โครงสร้างร่างแหแล้วก็ตาม

6. ขบวนการนี้ควบคุมง่ายและน่าเชื่อถือ จึงทำให้สามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ได้

7. หลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากการผสม และการเก็บสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

#### ข้อเสียของการฉายรังสี

1. ในการติดตั้งเครื่องฉายรังสีเกมมามีราคาแพง

2. ต้องการการดูแลรักษาและบุคคลากรผู้ชำนาญ โดยเฉพาะในรังสีที่ทำให้เกิด ไอออน

3. มีศักยภาพในการเกิดอันตรายสูง เนื่องจากเป็นรังสีที่ทำให้เกิด ไอออนและเป็นธาตุกัมมันตรังสี

รังสีแกมมาจัดเป็นรังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยทางอ้อม การใช้รังสีแกมมา จาก Co-60 เนื่องจากมีราคาถูก เมื่อเทียบกับไอโซโทปอื่น ๆ ที่แผ่รังสีชนิดเดียวกันและมีครึ่งชีวิตที่พอเหมาะ คือ 5.25 ปี Co-60 มีความคงทนภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีปริมาณรังสีสูงและสามารถใช้งานได้แม้กระทั่งในอุณหภูมิสูงถึง 1000° C Co-60 ให้รังสีแกมมา 2 โฟตอนต่อการสลายตัวหนึ่งนิวเคลียส โดยพลังงานโฟตอนทั้งสองเท่ากับ 1.17 MeV และ 1.33 MeV ตามลำดับ หรือคิดเฉลี่ยให้พลังงานโฟตอน 2.5MeV ต่อการสลายตัวหนึ่งครั้งในกระบวนการฉายรังสีทางอุตสาหกรรม จะใช้ต้นกำเนิด Co-60 ที่ให้ความแรงรังสีระดับหมื่นหรือแสนคูรี ลักษณะของต้นกำเนิดอาจเป็นแท่งทรงกระบอก เป็นแผ่น เป็นเม็ดบรรจุในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมหรือแบบอื่น ๆ ตามแต่ความสะดวก กล่าวโดยสรุปความเหมาะสมของการใช้ Co-60 เนื่องจากรังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูง ฉายรังสีได้อย่างต่อเนื่อง เสื่อมสภาพได้ช้าและไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนเสริมต้นกำเนิดบ่อยครั้ง

เนื่องจากการฉายรังสีแสดงคุณสมบัติในการควบคุมการซึมผ่านและความเข้มได้ ซึ่งคุณสมบัติพิเศษนี้ จึงมีการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการสังเคราะห์และปรับปรุง พอลิเมอร์พวกวัสดุชีวภาพ โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เทคนิคการฉายแสงของพวกวัสดุชีวภาพ และยาที่ใช้กับสิ่งมีชีวิต จึงเป็นที่สนใจ มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว และนำไปใช้ในค้ำต่าง ๆ ได้แก่

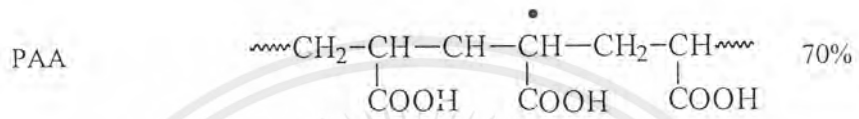
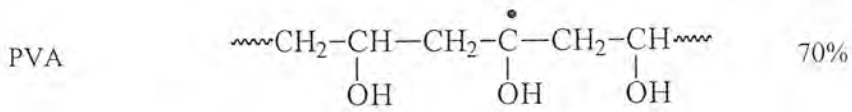
1. การสังเคราะห์ไฮโดรเจล

2. ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีของผิววัสดุชีวภาพ

3. ใช้สังเคราะห์พวก microsphere

4. เป็นตัวก่อให้เกิด โครงสร้างร่างแหบนพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ และพวกไฮโดรเจล

การเกิดอนุมูลอิสระของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิอะคริลิก แอซิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.2 วิธีการทดลอง

ก. การหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล PVA+PAA

#### 3.2.1 การเตรียมสารละลาย

3.2.1.1 สารละลาย 5% w/v พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 50 กรัม ค่อย ๆ ละลายด้วยน้ำกลั่นร้อน



ตั้งสารละลายบนแท่นให้ความร้อน คนสารละลายตลอดเวลา



เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 ml



ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.2.1.2 สารละลาย 5 % w/v พอลิอะคริลิกแอซิด (PAA)

ชั่งพอลิอะคริลิกแอซิด 5 กรัม



ละลายด้วยน้ำกลั่น



เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.2.1.3 สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 95 ส่วนต่อสารละลายพอลิอะคริลิกแอซิด 5 ส่วน

นำสารละลาย PVA 475 ml ผสมกับสารละลาย PAA 25 ml



ผสมให้เข้ากันในขวดวัดปริมาตร 500 ml

3.2.1.4 สารละลายของผงไหม เข้มข้น 5% w/v

ชั่งผงไหมมา 5 กรัม



ละลายด้วยน้ำกลั่น



เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### 3.2.1.5 สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 95 ส่วน ต่อสารละลายผงไหม 5 ส่วน

นำสารละลาย PVA 475 ml ผสมกับสารละลายผงไหม 25 ml



ผสมให้เข้ากันในขวดวัดปริมาตร 500 ml

### 3.2.1.6 สารละลาย PVA : PAA : silk protein 95:2.5:2.5

นำสารละลาย PVA 475 ml + สารละลาย PAA 12.5 ml + สารละลายผงไหม 12.5 ml

เทลงขวดวัดปริมาตร



เขย่าให้เข้ากันในขวดวัดปริมาตร 500 ml

### 3.2.2 การบรรจุสารตัวอย่างและการฉายรังสี

นำสารละลายในข้อ 3.2.1.1 (PVA) , 3.2.1.3 (PVA+PAA), 3.2.1.5 (PVA+S) และ 3.2.1.6

(PVA+PAA+S) ที่เตรียมได้



ใส่ในหลอดทดลอง



ใส่ก๊าซไนโตรเจนลงไปเพื่อไล่ออกซิเจนออก



ปิดจุกให้แน่นเพื่อกันอากาศเข้า



นำไปฉายรังสีที่ความเข้มต่าง ๆ

### 3.2.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มหลังการฉายรังสีเกมมา

สำหรับสารละลายที่เป็น สารละลาย



เทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อ

ประมาณ 20 ml

สำหรับสารละลายที่เป็น เจล



ค่อย ๆ นำเจลออกจากหลอด

ทดลองแล้วแบ่งครึ่งเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

↓↓  
 นำไปอบในตู้อบแบบธรรมดาที่อุณหภูมิ 50 °C จนฟิล์มหรือเจลแห้ง(ประมาณ5-6ชั่วโมง)  
 ↓↓  
 ลอกแผ่นฟิล์มออกจากจานเพาะเชื้อ  
 ↓↓  
 นำไปอบอีกครั้งในตู้อบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50 °C นาน 2 ชั่วโมง  
 ↓↓  
 นำฟิล์มหรือเจลออกจากจานเพาะเชื้อและควรเก็บไว้ในเคซิเคเตอร์เพื่อกันความชื้นจากอากาศ

### 3.2.4 การทดสอบสมบัติของฟิล์มและเจลที่ได้

#### 3.2.4.1 ทดสอบการบวมตัว

แบ่งแผ่นฟิล์มและนำมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน  
 ↓↓  
 แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์  
 หรือจนแน่ใจว่าเจลบวมตัวเต็มที่แล้ว  
 ↓↓  
 นำฟิล์มออกมา ชั่งน้ำให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก  
 เปรี่เซนส์การบวมตัว =  $\frac{(\text{น้ำหนักอิมมิดวของฟิล์มหลังการแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำ}) * 100}{\text{น้ำหนักของฟิล์มก่อนแช่น้ำ}}$

#### 3.2.4.2 ทดสอบอัตราการดูดซับน้ำ

นำชิ้นงานที่อบแห้งมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน  
 ↓↓  
 แช่ในน้ำกลั่นนาน 1 ชั่วโมง  
 ↓↓  
 นำขึ้นมาชั่งให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก  
 ↓↓  
 นำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมงจนน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก  
 เปรี่เซนส์การดูดซับน้ำ =  $\frac{(\text{น้ำหนักหลังการแช่} - \text{น้ำหนักก่อนแช่}) * 100}{\text{น้ำหนักก่อนแช่}}$  ที่เวลาใด ๆ

### 3.2.4.3 ทดสอบอัตราการดูดซับน้ำของสารละลายเกลือ

เตรียมสารละลายเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้

สารละลาย	ความเข้มข้น (%w/v)
NaCl	0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0
KCl	0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0
MgCl <sub>2</sub>	0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0
CaCl <sub>2</sub>	0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0

ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.2.4.2

### 3.2.4.4 ทดสอบอัตราการดูดซับน้ำเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

นำชิ้นงานทุกตัวอย่างที่อบแห้งมาชั่งน้ำหนัก



แช่ในน้ำกลั่นที่ควบคุมอุณหภูมิเป็น 30 , 40 , และ 50 °C



นำชิ้นมาชั่งน้ำหนักให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักทุก ๆ ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

### 3.2.4.5 ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter)

นำแผ่นฟิล์ม PVA, (PVA+PAA), (PVA+S) และ (PVA+PAA+S) ที่เตรียมได้ มาชั่งน้ำหนัก 5-10 mg



นำมาอัดเม็ดด้วย aluminium pan



ทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC

## บทที่ 4

## ผลการทดลอง

## 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

หลังจากการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 5% w/v สารละลายพอลิอะคริลิกแอซิด (PAA) 5%w/v และสารละลายผงไหม (SF) 5%w/v นำไปเตรียมสารละลายผสมของพอลิเมอร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วนำไปฉายรังสีในปริมาณ 10 และ 20 kGy จากนั้นสังเกตลักษณะของสารสังเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม ปริมาณรังสี และลักษณะของพอลิเมอร์ผสม ก่อนและหลังฉายรังสี

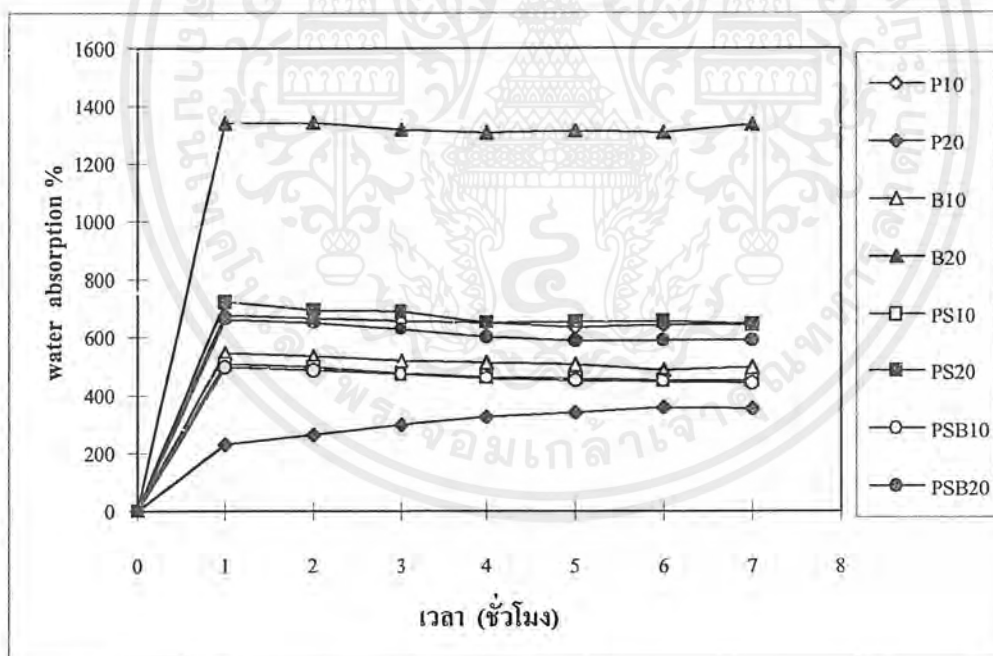
ตัวอย่าง	อัตราส่วนของ PVA:PAA:SF	ปริมาณรังสีที่ ฉาย (kGy)	ลักษณะของสาร ก่อนฉายรังสี	ลักษณะของสาร หลังฉายรังสี
P 10	100:0:0	10	ของเหลวใสหนืด	ของเหลวใสหนืด
P 20	100:0:0	20	ของเหลวใสหนืด	เจลของแข็งใส และนุ่ม
B 10	95:5:0	10	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย
B 20	95:5:0	20	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย
PS 10	95:0:5	10	ของเหลวใสหนืด	ของเหลวใสหนืด
PS20	95:0:5	20	ของเหลวใสหนืด	ของเหลวใสหนืด
PSB 10	95:2.5:2.5	10	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย
PSB 20	95:2.5:2.5	20	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย	ของเหลวหนืด ขุ่นเล็กน้อย

จากลักษณะของพอลิเมอร์สังเคราะห์ดังกล่าว ทำให้สามารถเตรียมแผ่นฟิล์มของไฮโดรเจลได้ในทุกตัวอย่าง ยกเว้น P20 เพราะมีลักษณะเป็นก้อนเจลใส ทั้งนี้เนื่องจากสารได้รับรังสีในเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์พลังงานสูงสำหรับการใช้งานเพื่อการรักษาเท่านั้น ไม่น่าจะเหมาะไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณที่สูงพอที่จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง โควาเลนต์ที่มาก จนเกิดการเปลี่ยนสภาพจากของเหลวหนืดไปเป็นเจลของแข็งได้ ส่วนในตัวอย่างที่มีพอลิอะคริลิกแอซิด และ ผงไหม (silk protein) เป็นองค์ประกอบนั้น ยังคงได้สารสังเคราะห์ที่เป็นของเหลวอยู่ ซึ่งเป็นผลมาจากหน่วยไกลซีนในผงไหมเมื่อได้รับรังสีพลังงานสูงจะแตกตัว (fragment) ให้อนุมูลอิสระแล้วเข้าไปทำปฏิกิริยายับยั้งการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นอกจากนี้การที่พอลิอะคริลิกแอซิดไม่เกิดพันธะเชื่อมโยงแม้ได้รับรังสีที่มีความเข้มสูงถึง 50 kGy ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ขัดขวางการเกิดเจลด้วย อย่างไรก็ตามพอลิอะคริลิกแอซิดมีหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) กับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ จึงส่งผลให้ระบบที่มีพอลิอะคริลิกแอซิดเป็นองค์ประกอบเกิดความขุ่นขึ้น

#### 4.2 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของฟิล์มไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำและเกิดการบวมตัวได้ โดยที่ปริมาณการดูดซับน้ำจะแปรตามเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในช่วงแรกปริมาณการดูดซับน้ำจะมีค่ามาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณการดูดซับน้ำจะมีค่าลดลงและเริ่มมีค่าคงที่เมื่อถึงจุดสมดุล ดังกราฟรูปที่ 4.1

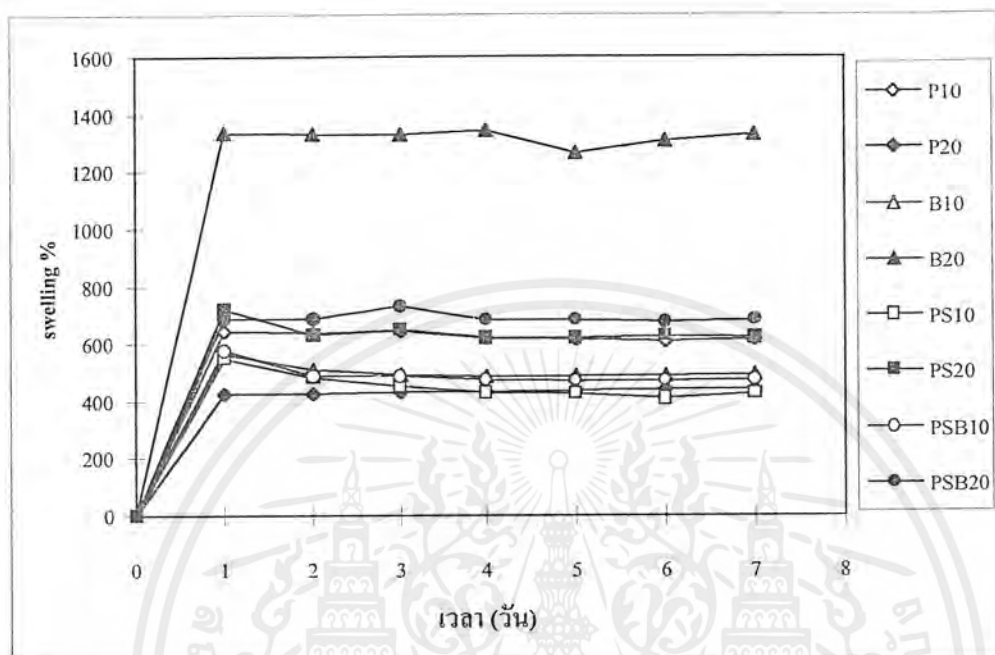


รูปที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

ณ จุดสมดุล เป็นจุดที่แสดงความสามารถสูงสุดในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล จะเห็นว่า ในช่วงแรกของ การดูดซับน้ำ ปริมาณการดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากชั่วโมงที่ 1 ผ่านไป ค่าการดูดซับน้ำก็จะเริ่มคงที่ และเมื่อพิจารณาค่าอัตราการบวมตัว (% swelling) ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

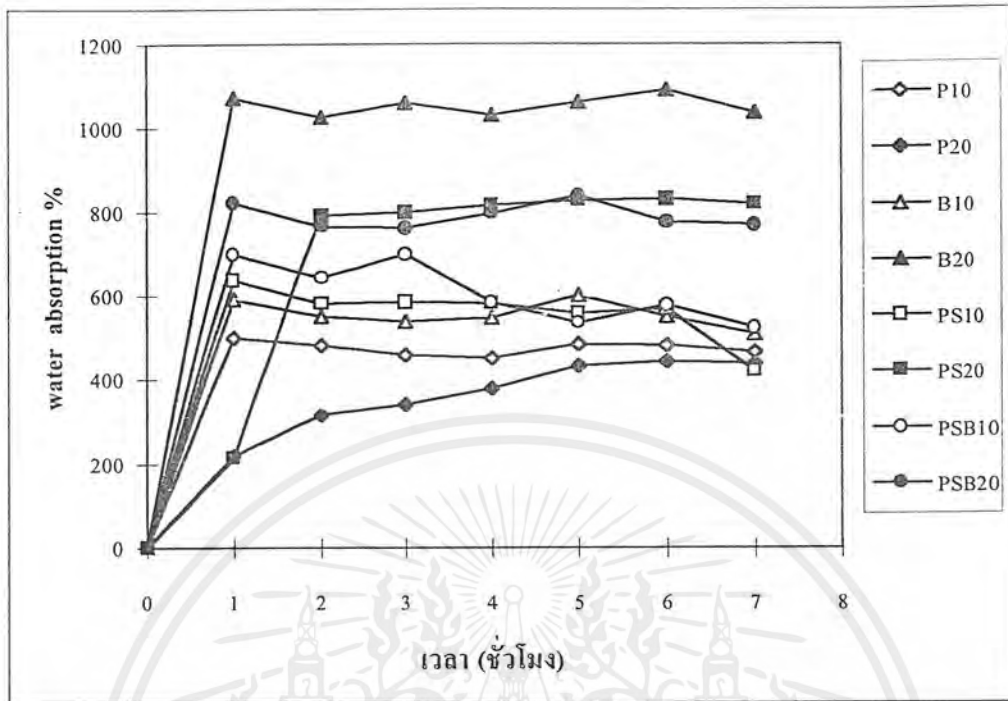
พบว่าอัตราการบวมตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 1 วัน จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้น จะเข้าสู่สมดุลการบวมตัวตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีความสำคัญต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลมากที่สุด



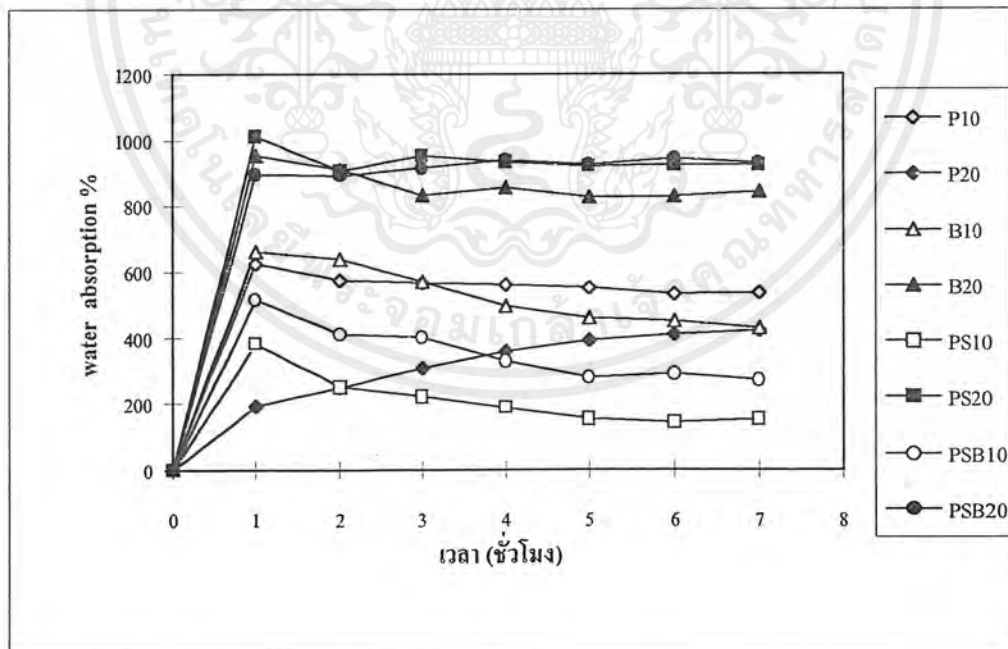
รูปที่ 4.2 แสดงค่าอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำของแต่ละตัวอย่าง พบว่า B 20 จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงสุด เนื่องจากมีพอลิอะคริลิกแอซิดที่สามารถดูดน้ำได้สูงเป็นองค์ประกอบอยู่ และที่ปริมาณรังสี 20 kGy จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในปริมาณที่เหมาะสมพอน้ำแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างได้

### 4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณการดูดซับน้ำ

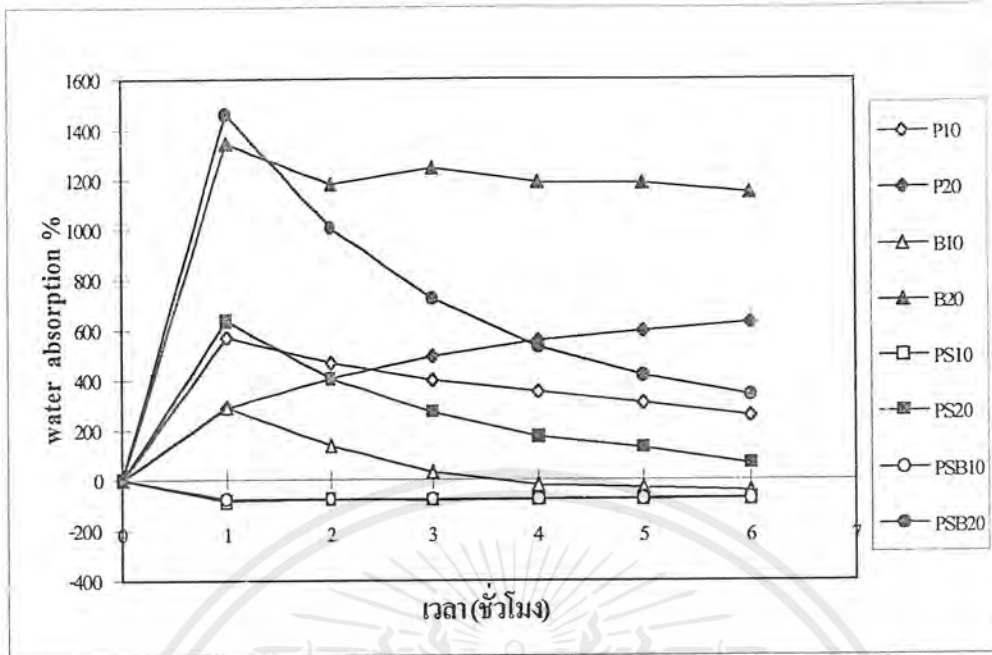


รูปที่ 4.3 แสดงค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 30°C



รูปที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 40°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 50 °C

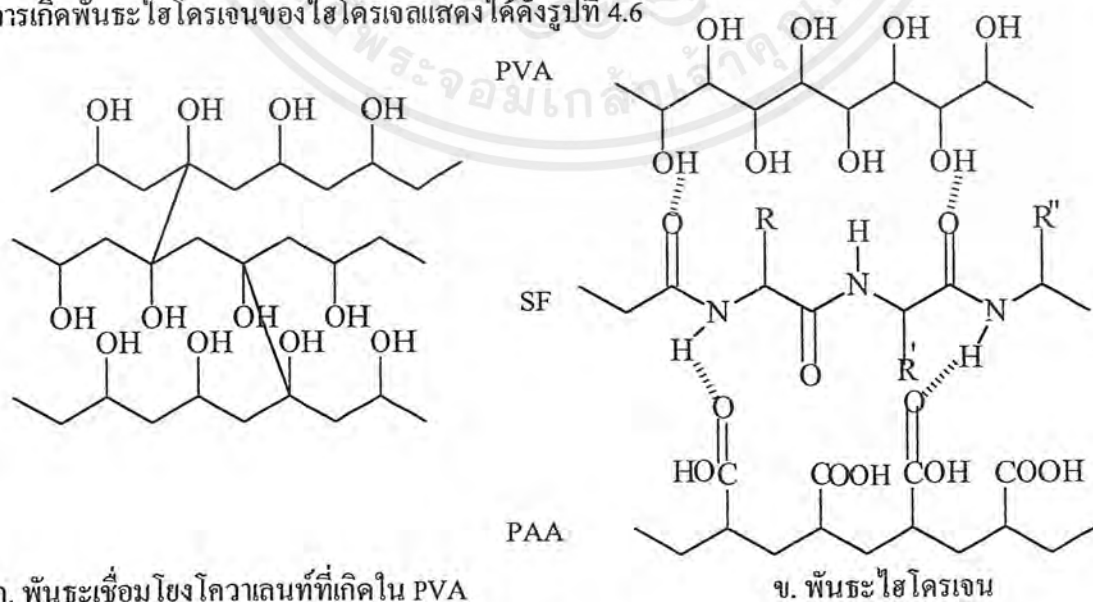
จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 30°C และ 40°C ตามลำดับพบว่า มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้อง (28°C) แต่ในรูปที่ 4.5 จะพบว่าหลังจากชั่วโมงที่ 1 ผ่านไป ค่าการดูดซับน้ำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างที่มีผงไหมผสมอยู่ เนื่องจากฟิล์มไฮโดรเจลเริ่มละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้น 50°C แสดงว่าไฮโดรเจลเกิดพันธะเชื่อมโยงชนิดโควาเลนต์ใน โมเลกุลไม่สมบูรณ์ 100% แต่มีพันธะระหว่าง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับผงไหมมากกว่า ส่วนในกรณีของ P20 นั้น พบว่าสามารถทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิ 50°C และยังคงสภาพ การดูดซับน้ำได้ดี ซึ่งปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงสามารถพิจารณาได้จากค่าสัดส่วนเจล (gel fraction) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัดส่วนเจลของไฮโดรเจล

ตัวอย่าง	น้ำหนักตาข่าย	นน.ตาข่าย+ฟิล์ม	น้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น	น้ำหนักฟิล์มสุดท้าย♥	%gel fraction
P10	3.1836	3.4392	0.2556	0.1382	54
P20	3.0312	3.5534	0.5222	0.4320	83
B10	2.7160	2.9680	0.2520	0.1175	47
B20	3.0188	2.2385	0.2197	0.1126	51
PS10	2.8792	3.0518	0.1726	0.0274	16
PS20	3.1452	3.2818	0.1366	0.0339	25
PSB10	3.1560	3.4083	0.2523	0.0960	38
PSB20	3.2154	3.4446	0.2292	0.0900	39

♥ น้ำหนักฟิล์มอบแห้งหลังแช่น้ำ 7 วัน

จากตารางพบว่า ปริมาณเจลของ P 20 มีค่าเท่ากับ 82.7 % ซึ่งมีความสูงที่สุด แสดงว่า P20 เกิดพันธะเชื่อมโยง โควาเลนซ์มาก จึงมีความเสถียรที่อุณหภูมิ 50 °C โดยยังคงสภาพเป็นก้อนเจลเหมือนเดิมและยังมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นต่างจากตัวอย่างอื่นที่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะตัวอย่างเกิดการละลายดังได้อธิบายมาแล้ว ในกรณีของตัวอย่างที่มีผงไหมเป็นองค์ประกอบ เช่น PS10 , PS20 พบว่ามีปริมาณเจลต่ำ แสดงว่าน่าจะมีพันธะเชื่อมโยง โควาเลนซ์ที่อยู่ น้อย แต่มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กับผงไหมอยู่มากกว่า ซึ่งที่อุณหภูมิสูงเมื่ออะตอมได้รับพลังงานจะเกิดการสั่น ทำให้พันธะไฮโดรเจนอ่อนลง จึงเป็นเหตุให้ตัวอย่างละลายออกมาได้มาก การเกิดพันธะไฮโดรเจนของไฮโดรเจลแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



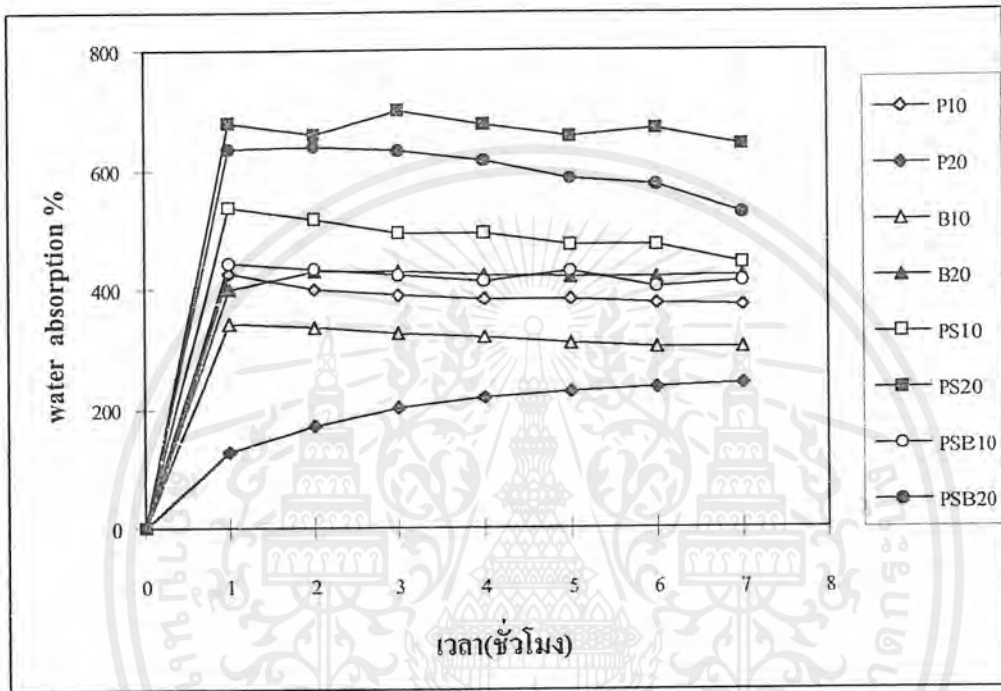
รูปที่ 4.6 แสดงการเกิดพันธะเคมีของไฮโดรเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การศึกษาปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือของฟิล์มไฮโดรเจล

##### 4.4.1 ปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือของฟิล์มไฮโดรเจล

เนื่องจากผงไหมเป็นสารที่มีสมบัติในการดูดซับสารละลายเกลือได้ดี ดังนั้นไฮโดรเจลที่มีผงไหมเป็นองค์ประกอบ จะสามารถดูดซับสารละลายเกลือได้ดีกว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีผงไหม ทั้งนี้ ปริมาณรังสี และปริมาณผงไหม ยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือของไฮโดรเจลอีกด้วย

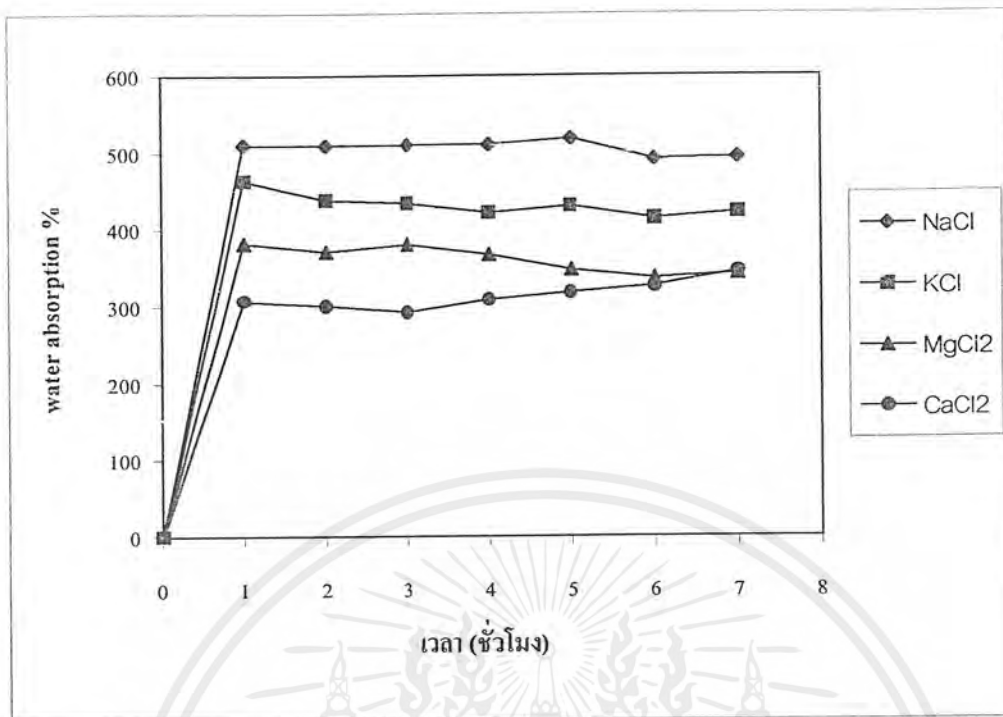


รูปที่ 4.7 แสดงค่าปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือ 0.5%w/v KCl

จากกราฟรูปที่ 4.7 พบว่า PS 20 มีความสามารถในการดูดซับเกลือ KCl ได้ดีที่สุดใน เนื่องจากมีปริมาณของผงไหมอยู่มากและได้รับปริมาณรังสีที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามแม้ PSB 20 จะมีปริมาณของผงไหมอยู่น้อยกว่า PS10 แต่เนื่องจาก ได้รับปริมาณรังสีมากกว่าจึงมีผลให้ PSB 20 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับมากกว่า PS 10

##### 4.4.2 การศึกษาชนิดของสารละลายเกลือที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับน้ำของ PS 20

การศึกษาปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือ 4 ชนิด ที่สามารถแตกตัวให้ออนประจุบวกหนึ่งและประจุบวกสองของตัวอย่าง PS 20 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจล PS20 สามารถดูดซับสารละลายเกลือที่มีไอออนประจุบวกหนึ่งได้ดีกว่าประจุบวกสอง และ NaCl มีอัตราการถูกดูดซับสูงสุด ซึ่งอัตราการถูกดูดซับของสารละลายเกลือสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้  $\text{NaCl} > \text{KCl} > \text{MgCl}_2 > \text{CaCl}_2$  ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงค่าปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือชนิดต่าง ๆ ของไฮโดรเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC)

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล

ตัวอย่าง	อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ , °C)	อุณหภูมิการเกิด ผลึก ( $T_c$ , °C)	Heat (mJ)	องศาการตกผลึก
PVA	224.8	160.3	398.3	100%
PAA	137.5	-	2189.2	100%
P101	226.9	188.7	321.4	80.7%
P20	209.6	179.3	239.8	60.2%
B10	143.2 <sup>*</sup> , 226.6 <sup>◇</sup>	179.2	848.9 <sup>*</sup> , 213.1 <sup>◇</sup>	38.8% <sup>*</sup> , 53.5% <sup>◇</sup>
B20	148.1 <sup>*</sup> , 221.7 <sup>◇</sup>	173.5	913.9 <sup>*</sup> , 194.8 <sup>◇</sup>	41.7% <sup>*</sup> , 48.9% <sup>◇</sup>
PS10	223.1 <sup>◇</sup> , 270.5 <sup>◆</sup>	179.2	227.0 <sup>◇</sup>	56.98% <sup>◇</sup>
PS20	215.9 <sup>◇</sup> , 257.3 <sup>◆</sup>	168.6	347.2 <sup>◇</sup>	87.2% <sup>◇</sup>
PSB10	144.9 <sup>*</sup> , 223.9 <sup>◇</sup> , 271.3 <sup>◆</sup>	173.4	614.2 <sup>*</sup> , 185.8 <sup>◇</sup> , 151.4 <sup>◆</sup>	28.1% <sup>*</sup> , 56.2% <sup>◇</sup>
PSB20	145.9 <sup>*</sup> , 217.0 <sup>◇</sup>	161.5	362.0 <sup>*</sup> , 147.7 <sup>◇</sup>	16.5% <sup>*</sup> , 37.1% <sup>◇</sup>

\* = PAA

◇ = PVA

◆ = SF

จากตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณความเป็นผลึกของไฮโดรเจล พบว่าจำนวนพีกของอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของสารที่เป็นองค์ประกอบใน พอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก  $T_m$  เป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาปริมาณความเป็นผลึกพบว่าถ้าปริมาณรังสีมีค่ามาก แนวโน้มของปริมาณความเป็นผลึกจะลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดผลึกถูกขัดขวางโดยพันธะเชื่อมโยงโครงร่างแหที่อยู่ในโมเลกุลพอลิเมอร์

นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) ของพอลิอะคริลิกแอซิดมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วน  $T_m$  ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีแนวโน้มลดลง แสดงว่าสารทั้งสองอาจเกิดการรบกวน

ความเป็นผลึกซึ่งกันและกัน และทำให้พื้กมีแนวโน้มน้ล่อนเข้าหากัน ส่วนตัวอย่าง PSB20 จะไม่สามารถมองเห็นพื้กของผงโหมอาจเป็นเพราะที่รังสีปริมาณสูง 20 kGy ผงโหมเกิดการแตกตัว (fragment) เป็น โมเลกุลเล็ก ๆ จนทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นพื้กตามปกติได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1. ที่ปริมาณรังสี 20 kGy ไฮโดรเจลทุกตัวอย่าง ยังสามารถเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มได้ ยกเว้น P20 เนื่องจาก P20 เกิดพันธะเชื่อมโยงโครงร่างแหในปริมาณที่สูง
2. ไฮโดรเจลที่มีอัตราการดูดซับน้ำสูงที่สุด คือ B20 เพราะ B20 มีพอลิอะคริลิกแอซิด เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล
3. ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจลจะมีปริมาณการดูดซับน้ำลดลง เนื่องจากแผ่นฟิล์มเกิดการละลายออกมา
4. ไฮโดรเจลที่มีปริมาณการดูดซับสารละลายเกลือสูงที่สุด คือ PS20 เนื่องจากมีผงไหมเป็นองค์ประกอบ
5. ปริมาณการดูดซับน้ำในสารละลายเกลือ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับสารละลายเกลือ NaCl ได้มากที่สุด
6. พอลิอะคริลิกแอซิดและผงไหมที่ผสมในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นอกจากจะช่วยให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดูดซับน้ำและสารละลายเกลือได้มากขึ้น ตามลำดับแล้ว ยังทำหน้าที่หน่วงเหนี่ยวการเกิดพันธะเชื่อมโยงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งพิจารณาจากปริมาณรังสีที่ใช้ในกรณีเมื่อไม่มีการผสมพอลิอะคริลิกและผงไหม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดไฮโดรเจลแข็งที่ 20 kGy แต่เมื่อผสมสารดังกล่าว พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังคงเป็นของเหลวแต่มีความหนืดขึ้นเท่านั้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาปริมาณรังสีที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการดูดซับน้ำ
2. ศึกษาอัตราการดูดซับไอออนของโลหะหนักเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด
4. ในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจล ควรมีการควบคุมความหนาของตัวอย่างทุกครั้ง
5. ในการเตรียมตัวอย่าง ควรควบคุมช่วงเวลาก่อนนำตัวอย่างไปฉายรังสีและหลังการฉายรังสีในแต่ละครั้งควรมีช่วงเวลาใกล้เคียงกัน
6. ควรเก็บตัวอย่างไฮโดรเจลไว้ในเคซิเคเตอร์ทุกครั้ง เพราะไฮโดรเจลสามารถดูดความชื้นได้สูงมาก จะทำให้ตัวอย่างมีสมบัติเปลี่ยนไป

## หนังสืออ้างอิง

1. Wichterle, O.; Lim, D. Nature .1962, 114,185.
2. Goni, I.; Gurruchaga, M.D.; Vazquez, B.; Valero, M.; Guzman, G.M. Proceedings of the international conference on recent developments in petrochemical and polymer technologies. 1989, December 12-16, s1-s6.
3. Jonggeon, J.; Kew, H.L. J Appl Polym Sci .1999,72,1755.
4. Giuliano, F.; Masuhiro, T.; Silvia, B. J Appl Polym Sci .1999,71,1563.
5. Yoshii, F.; Makuuchi, K.; Darwis, D.; Iriawan, T.; Razzak, M. T.; Janusz, M. Rosiak. Radiat. Phys. Chem. 1995,46(2),169.
6. Tsukada, M.; Freddi, G.; Crighton, John S. J Polym Sci:Part B:Polymer Physics. 1994,32,243-248.
7. Yamaura, K.; Kuranuki, N.; Suzuki, M.; Tanigami, T.; Matsuzawa, S. J Appl Polym Sci. 1990,41,2409-2425.
8. Janusz, M. Rosiak. Radiation Effect on Polymers. 271.
9. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ “เคมีอินทรีย์ 2 “ โครงการตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2527,หน้า 8/1.
10. โสภณ เรืองสำราญ “อินทรีย์เคมี 2” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2539, ครั้งที่1, หน้า 274-278.
11. กมลรัตน์ คุรัตน์ชัชวาล และดุจดาว ปรีชาวงศ์ “บทบาทของมัลติฟังก์ชันนัล มอนอเมอร์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างขวด HDPE ที่ใช้แล้วกับพอลิพรอพิลีนผสมกับชานอ้อย” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. แสดงค่าการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลชนิดต่าง ๆ

ภาคผนวก ข. กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค DSC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก. แสดงค่าการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

ตารางที่ 1 แสดงค่า water absorption ในน้ำกลั่น (%)								
ตัวอย่าง	ชั่วโมงที่							
	0	1	2	3	4	5	6	7
P10	0	677.2534	665.4295	657.4761	651.7497	635.631	642.7359	648.4624
P20	0	229.7868	261.5341	298.0967	324.8573	338.1424	356.7187	353.9399
B10	0	545.523	536.7782	520.2092	512.7615	504.728	487.8661	500.2929
B20	0	1339.567	1345.768	1320.276	1308.366	1314.075	1309.055	1335.827
PS10	0	511.5057	500.1776	476.7756	460.4048	456.4631	450.4261	449.8224
PS20	0	722.4732	693.5209	691.0774	651.7586	653.2766	659.3484	646.7975
PSB10	0	497.4151	489.0046	473.4954	456.7901	449.8843	447.9552	443.0556
PSB20	0	660.8759	649.0771	627.253	601.6649	586.8621	591.5671	591.4948

ตารางที่ 2 แสดงค่า swelling ในน้ำกลั่น (%)								
ตัวอย่าง	วันที่							
	0	1	2	3	4	5	6	7
P10	0	646.3615	637.8326	644.3271	619.3271	615.9233	608.6463	616.5884
P20	0	426.848	426.6948	431.8077	430.9843	436.8824	439.8123	438.7974
B10	0	563.4127	511.3095	491.3492	483.9286	487.2222	489.881	491.3095
B20	0	1336.018	1332.723	1329.283	1343.045	1264.129	1303.807	1326.94
PS10	0	548.6095	481.518	450.7532	430.7068	424.8552	410.7184	424.3917
PS20	0	718.4342	629.8134	650.7965	623.4411	618.2977	624.761	621.1652
PSB10	0	578.4384	488.2283	488.4661	473.6425	468.6881	469.3222	472.4138
PSB20	0	685.5585	685.9511	729.9738	682.0681	682.5916	674.3455	682.4607

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงค่า water absorption ในน้ำก้น ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (%)								
	ชั่วโมงที่							
ตัวอย่าง	0	1	2	3	4	5	6	7
P10	0	499.3768	483.2845	460.3006	451.2463	484.8607	481.3416	467.7053
P20	0	220.158	316.2467	341.2937	379.7668	433.4712	443.3246	440.3159
B10	0	591.6839	550.9814	537.5517	548.2955	601.4463	550.5682	510.5372
B20	0	1072.377	1026.816	1060.807	1030.762	1062.78	1090.673	1035.336
PS10	0	639.5451	583.1255	587.0139	581.438	558.0337	570.066	421.5701
PS20	0	214.0714	791.1192	798.3779	816.2206	826.8856	831.3869	818.9376
PSB10	0	700.3115	643.8214	700.1038	585.2544	536.9678	579.0239	526.1682
PSB20	0	821.8474	766.3207	763.6222	797.0939	840.218	776.5439	771.3025

ตารางที่ 4 แสดงค่า water absorption ในน้ำก้น ที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (%)								
	ชั่วโมงที่							
ตัวอย่าง	0	1	2	3	4	5	6	7
P10	0	626.0887	574.2676	568.5273	559.8971	549.8021	531.0768	533.7688
P20	0	195.6162	248.4454	309.4958	360.2241	391.2745	407.3109	420.4762
B10	0	660.6078	639.9656	571.6743	495.5849	459.0596	452.3509	427.8096
B20	0	952.5615	912.6708	831.9331	856.1475	826.6393	830.362	843.9208
PS10	0	383.6292	252.3176	222.8304	187.9191	156.8047	144.1321	152.071
PS20	0	1010.364	906.9328	952.3459	935.5392	920.9384	926.3655	924.4048
PSB10	0	516.3851	410.473	401.295	329.5045	278.2095	292.0608	272.0158
PSB20	0	897.7763	891.9945	917.7899	939.2405	929.1481	942.6959	931.1324

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงค่า water absorption ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (%)							
ตัวอย่าง	ชั่วโมงที่						
	0	1	2	3	4	5	6
P10	0	569.102	469.3469	397.551	351.3061	309.8367	258.1224
P20	0	286.7772	409.6019	492.74	557.2509	597.0816	629.22
B10	0	290.7785	139.9444	32.06673	-18.582	-29.3327	-41.798
B20	0	1342.475	1179.45	1245.039	1191.193	1183.501	1146.414
PS10	0	-85.3215	-73.2195	-77.9601	-76.5854	-75.6098	-71.4856
PS20	0	639.8558	403.0381	269.9794	171.9876	128.1668	66.63234
PSB10	0	-77.325	-73.1544	-73.2982	-77.0853	-73.0105	-70.7095
PSB20	0	1464.387	1004.274	722.9345	530.057	421.7236	337.6781

ตารางที่ 6 แสดงค่า water absorption ของ 0.5 KCl (%)								
ตัวอย่าง	ชั่วโมงที่							
	0	1	2	3	4	5	6	7
P10	0	425.4601	398.6708	390.6953	384.3558	382.1063	376.1759	373.4663
P20	0	127.4975	171.3421	200.3532	220.0807	228.2038	235.217	243.4914
B10	0	342.6637	336.0722	327.2686	319.6388	310.158	302.6185	302.9345
B20	0	400.9339	428.9511	430.1006	422.1983	420.546	421.2644	423.7787
PS10	0	537.5746	516.4347	493.9695	493.3731	474.9503	472.8297	442.7435
PS20	0	678.3265	659.1221	697.5309	676.9547	655.144	668.7243	641.9753
PSB10	0	443.3923	432.7784	425.078	413.2154	429.3444	403.7461	412.9032
PSB20	0	633.9059	638.6109	631.8895	616.8036	583.5698	574.3839	528.7528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงค่าอัตราการดูดซับน้ำในสารละลาย 0.5 MgCl <sub>2</sub> ที่ pH ต่าง ๆ (%)			
ตัวอย่าง	pH4	pH7	pH9
P10	644.2374	588.4437	637.1185
P20	372.4005	289.514	309.3318
B10	504.9689	527.7103	544.8701
B20	688.2349	738.7254	713.3869
PS10	450.0268	458.5817	453.8187
PS20	907.3709	933.6005	935.5568
PSB10	450.772	416.3199	451.1873
PSB20	619.817	659.7732	703.7527

ตารางที่ 8 แสดงค่า อัตราการดูดซับน้ำในสารละลาย 0.5 NaCl ที่ pH ต่าง ๆ (%)			
ตัวอย่าง	pH4	pH7	pH9
P10	565.9907	563.7059	598.0247
P20	310.2248	382.647	364.8721
B10	458.0357	514.6289	508.3527
B20	640.5226	686.8037	653.7238
PS10	360.2092	349.033	390.9199
PS20	893.5824	885.0676	811.7828
PSB10	439.5242	515.7847	460.139
PSB20	685.0218	726.4947	729.9978

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

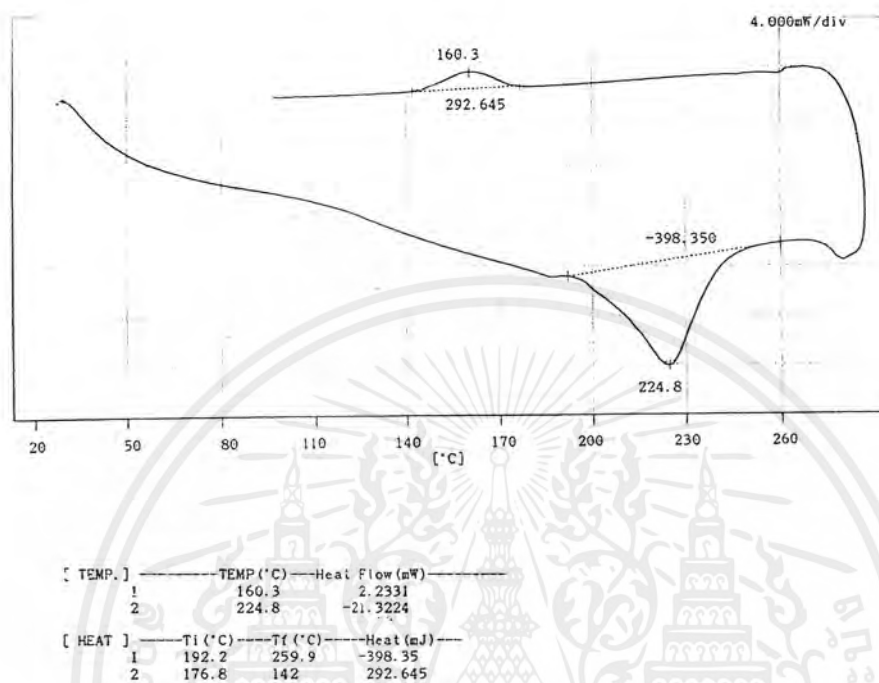
ตารางที่ 9 แสดงค่า อัตราการดูดซับน้ำของ PS20 ในสารละลายเกลือชนิดต่าง ๆ (%)								
สารละลาย	ชั่วโมงที่							
	0	1	2	3	4	5	6	7
NaCl	0	511.1348	508.7234	510.3546	511.2766	517.4468	491.1348	493.9716
KCl	0	462.88	438.24	433.8133	421.76	429.9733	413.92	420.8533
MgCl <sub>2</sub>	0	382.0957	371.6997	380.4455	366.5017	347.9373	336.8812	341.7991
CaCl <sub>2</sub>	0	307.5984	301.8186	292.3269	307.8724	317.6881	326.4574	344.9925



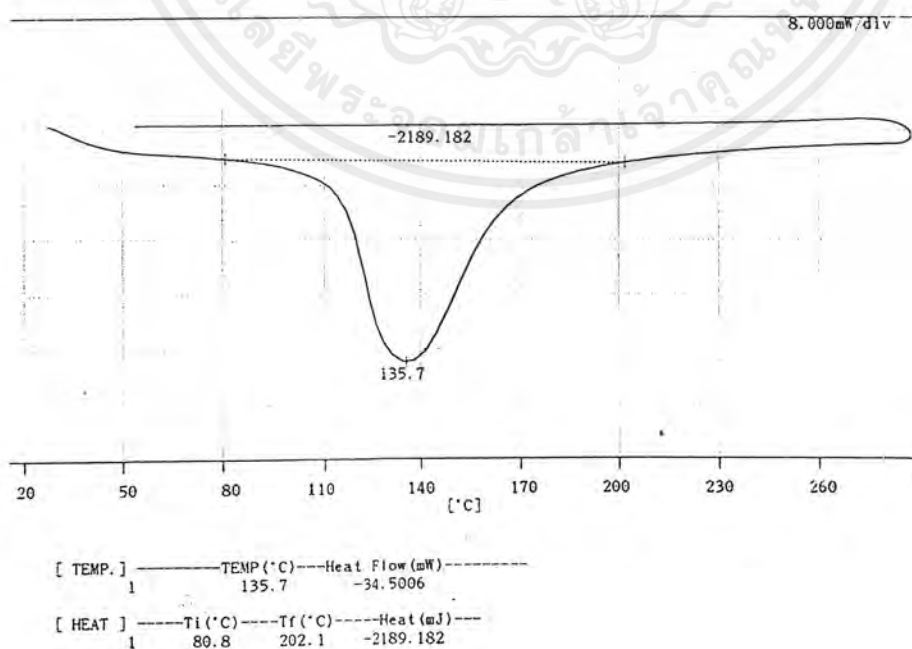
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน

1. Poly(vinyl alcohol) ; PVA (ไม่ฉายรังสี)

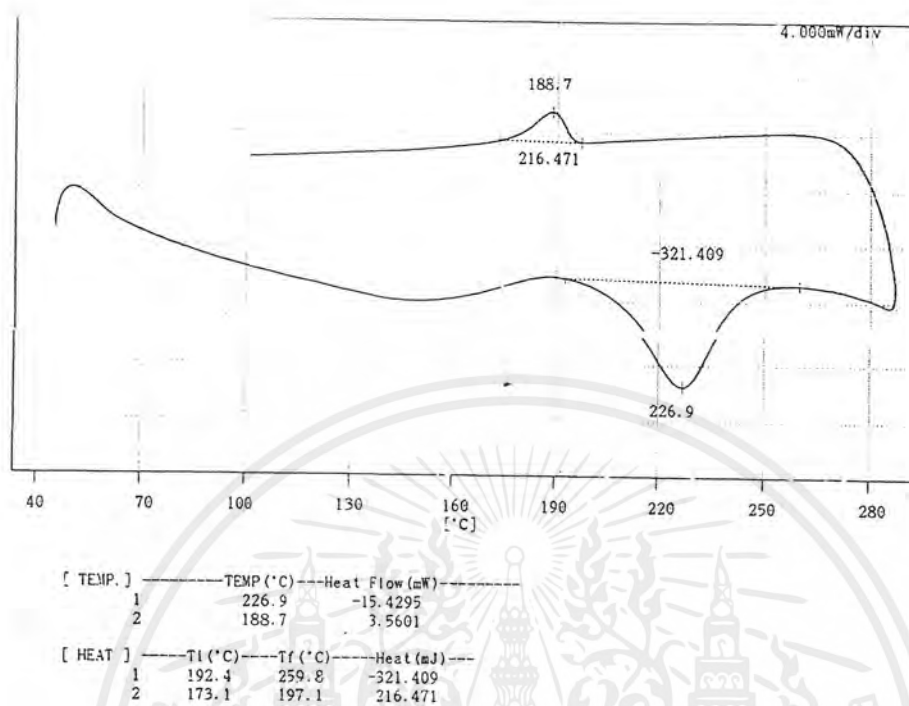


2. Poly(acrylic acid) ; PAA (ไม่ฉายรังสี)

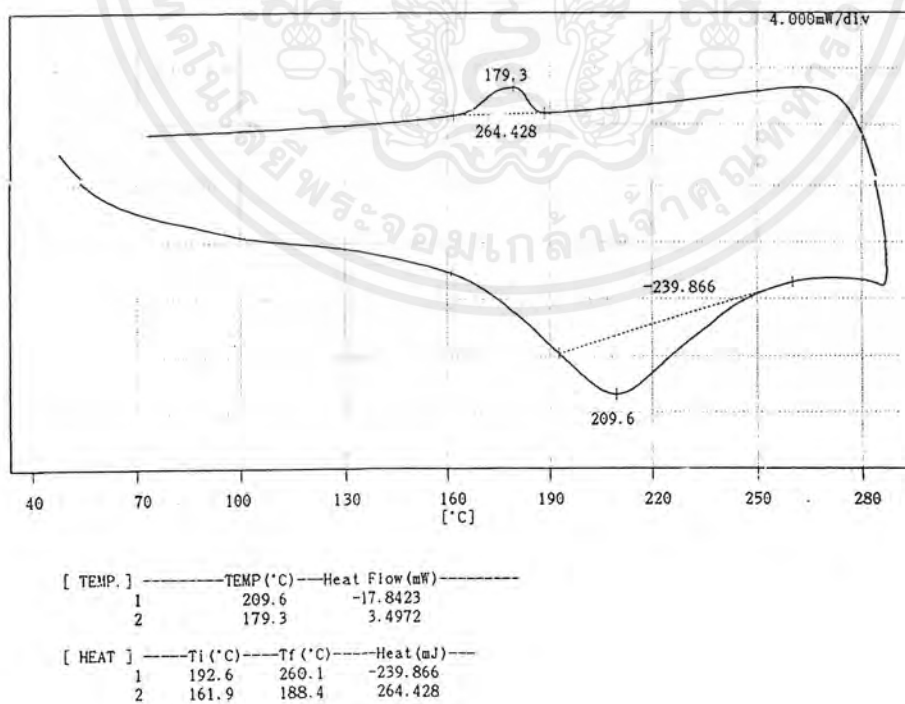


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3. P10

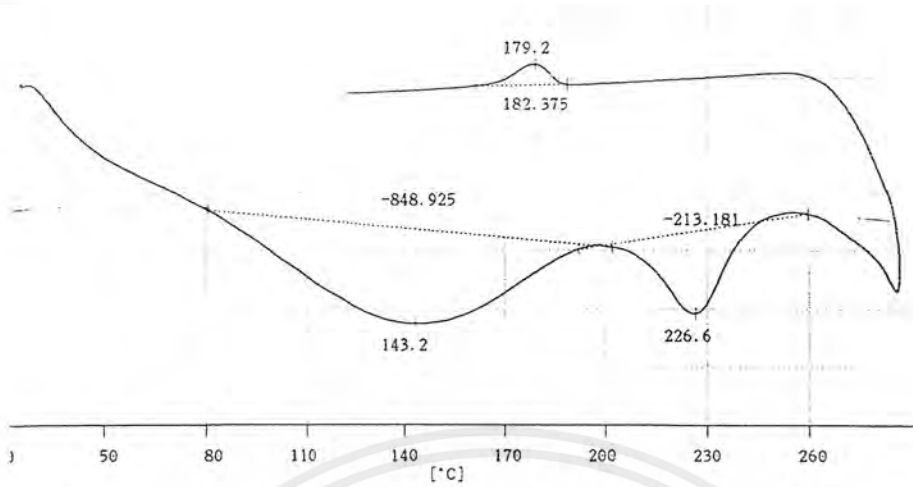


## 4. P20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. B10

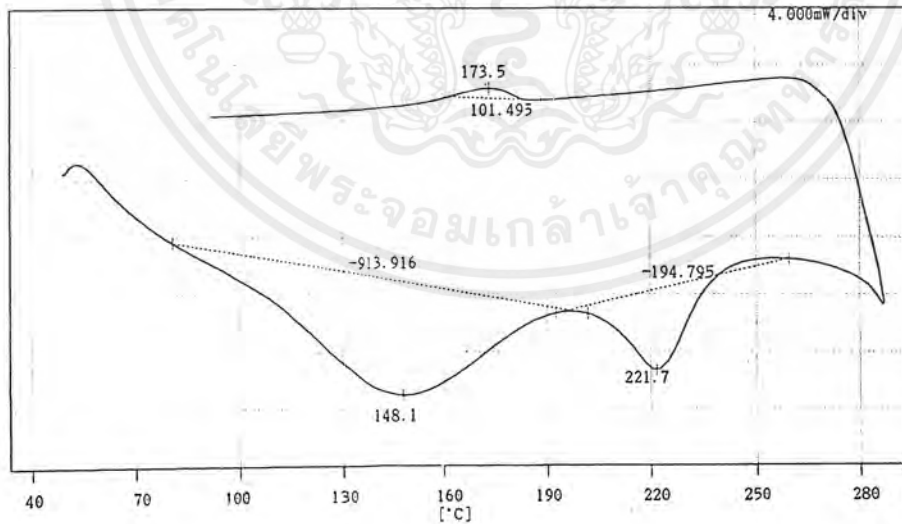


[ TEMP. ]	TEMP (°C)	Heat Flow (mW)
1	143.2	-15.5701
2	226.6	-14.8293
3	179.2	2.4644

[ HEAT ]	Ti (°C)	Tf (°C)	Heat (mJ)
1	80.6	202.1	-848.925
2	192	259.7	-213.181
3	161.4	188.6	182.375

6. B20



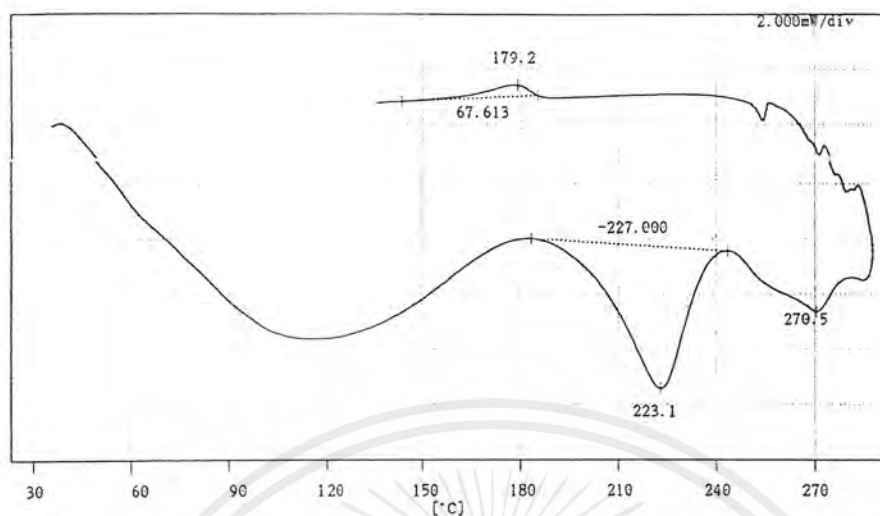
[ TEMP. ]	TEMP (°C)	Heat Flow (mW)
1	148.1	-19.1918
2	221.7	-17.4282
3	173.5	2.2286

[ HEAT ]	Ti (°C)	Tf (°C)	Heat (mJ)
1	80.8	201.9	-913.916
2	192.6	259.5	-194.795
3	161.9	188.5	101.495

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

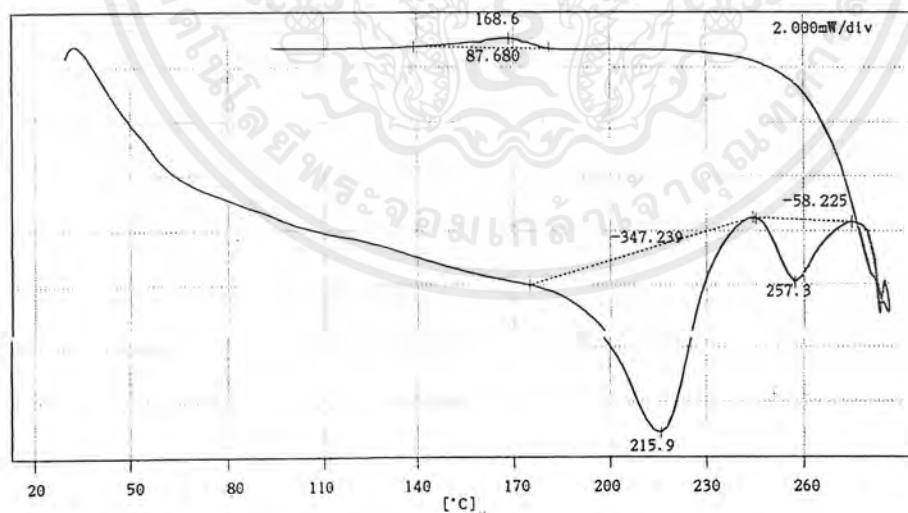
## 7. PS10



[ TEMP. ]	TEMP (°C)	Heat Flow (mW)
1	223.1	-10.0723
2	270.5	-7.2856
3	179.2	0.7763

[ HEAT ]	Ti (°C)	Tf (°C)	Heat (mJ)
1	183.3	243.3	-227
2	185.4	143.7	67.613

## 8. PS20

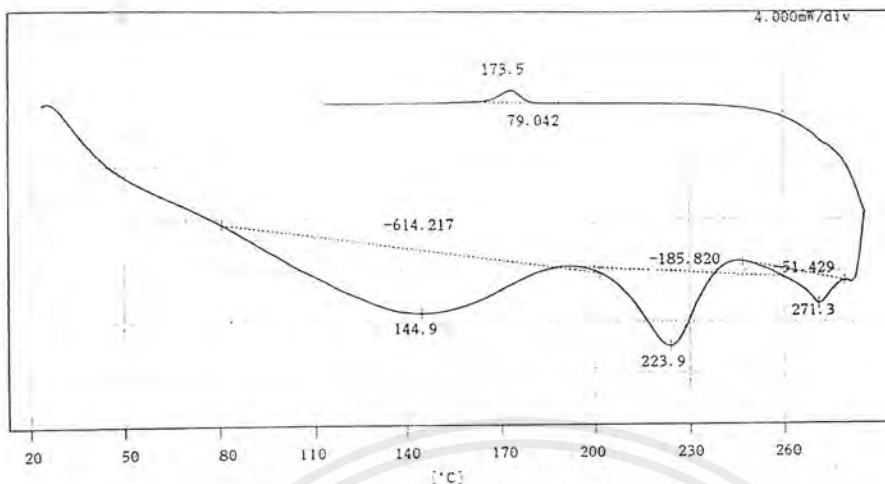


[ TEMP. ]	TEMP (°C)	Heat Flow (mW)
1	215.9	-14.0302
2	257.3	-8.8496
3	168.6	0.1234

[ HEAT ]	Ti (°C)	Tf (°C)	Heat (mJ)
1	174.9	244.3	-347.239
2	245.4	274.9	-58.225
3	181.1	139.1	87.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

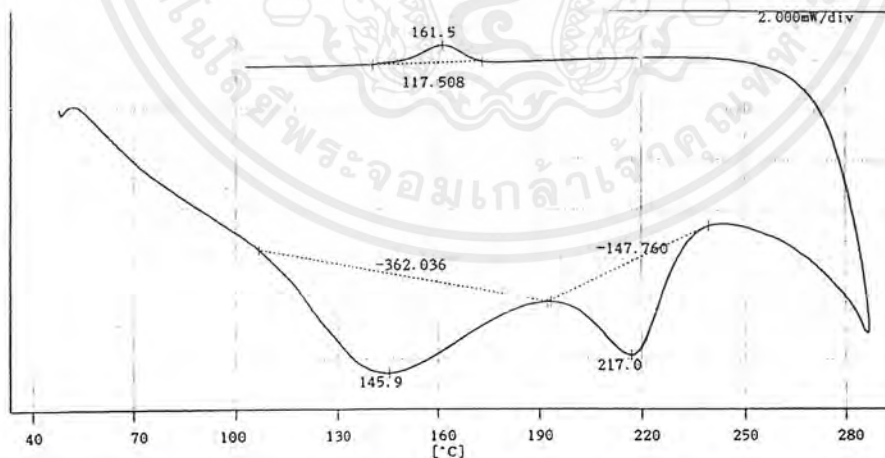
9. PSE10



[ TEMP. ]	TEMP (°C)	Heat Flow (mW)
1	144.9	-16.2045
2	223.9	-18.8119
3	271.3	-15.4696
4	173.5	0.9841

[ HEAT ]	Ti (°C)	Tf (°C)	Heat (mJ)
1	80.9	201.9	-614.217
2	192.2	260	-185.82
3	246.8	279.3	-51.429
4	161.3	188.6	79.042

10. PSB20



[ TEMP. ]	TEMP (°C)	Heat Flow (mW)
1	145.9	-12.3443

2	217	-11.6262
3	161.5	0.7861

[ HEAT ]	Ti (°C)	Tf (°C)	Heat (mJ)
1	193.4	106.6	-362.036
2	192.4	239.5	-147.76
3	173	141	117.508

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้