

ผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีต่อไฮโดรเจลรูพรุนจากสารเมือกแมงลัก  
Effect of carboxymethylcellulose on porous hydrogel from mucilage gel of  
*Ocimum americanum*



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2556

ผลของการบดชีเมทิลเซลลูโลสที่มีต่อไฮโดรเจลรูพรุนจากสารเมือกแมงลัก

Effect of carboxymethylcellulose on porous hydrogel from mucilage gel of

*Ocimum americanum*



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-014-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effect of carboxymethylcellulose on porous hydrogel from mucilage gel of**

***Ocimum americanum***



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2013**

**KMITL-2013-SC-M-014-012**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2013**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีต่อไฮโดรเจลรูพุนจากสารเมือก  
แมงลัก  
Effect of carboxymethylcellulose on porous hydrogel from  
mucilage gel of *Ocimum americanum*

นักศึกษา นางสาวสุวิภา เจริญภักดิ์  
รหัสประจำตัว 54651105  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มาลินี ชัยคุงกิจสินธ์

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ |                | ลายมือชื่อ   |
|--------------------------|----------------|--|
| รศ.ดร.จุฑารัตน์          | ปรัชญาวรากร    |     |
| รศ.ดร.สมศักดิ์           | วรมงคลชัย      |   |
| ผศ.ดร.ชิตชนก             | มีใจชื่อ       |   |
| รศ.ดร.มาลินี             | ชัยคุงกิจสินธ์ |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2556 เวลา 9.00 – 12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 ชั้น 5 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนี ธนะบริพัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | ผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีต่อไฮโดรเจลรูพรุนจากสารเมือกแมงลัก |
| นักศึกษา                    | นางสาวสุวิภา เจริญภักดิ์   |
| รหัสประจำตัว                | 54651105   |
| ปริญญา                      | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา                    | เทคโนโลยีพอลิเมอร์   |
| พ.ศ.                        | 2556   |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์  |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและสารเมือกแมงลัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารเมือกแมงลักและ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เท่ากับ 2:0, 2:0.25, 2:0.5 และ 2:1 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปโดยเทคนิคทำแห้งแบบแช่แข็ง ใช้เอ็น,เอ็น-เมทิลีนบิสอะครีลาไมด์และ กรดซิตริกเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง โดยใช้แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนปริมาณอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส กับสารเมือกแมงลัก ปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยง ต่อสมบัติของไฮโดรเจลรูพรุน ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ การดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุลในน้ำกลั่น การกักเก็บน้ำ ค่าสัดส่วนเจล สมบัติทางความร้อน และค่าความแข็งแรงต้านการโค้งงอ

ผลการทดลองพบว่าไฮโดรเจลรูพรุนผสมที่มีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้อยดูดซับน้ำได้ดีกว่าไฮโดรเจลรูพรุนผสมที่มีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาก ไฮโดรเจลรูพรุนที่ใช้ กรดซิตริกเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง มีความเสถียรหลังการแช่น้ำน้อยกว่าใช้เอ็น,เอ็น-เมทิลีน บิสอะครีลาไมด์ และยังพบว่า สารก่อพันธะเชื่อมโยง MBA ที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงความแข็งแรง ของไฮโดรเจลรูพรุน แสดงว่าจำนวนพันธะเชื่อมโยงมากและความยาวของพอลิเมอร์เชื่อมขวางมี ผลต่อความทนต่อแรงกดอัดของไฮโดรเจล แต่การดูดซับน้ำที่สมดุลลดลง เนื่องจากพันธะเชื่อมโยง มากและลดขนาดช่องว่างที่จับโมเลกุลน้ำ

**Thesis Title** Effect of carboxymethylcellulose on porous hydrogel from mucilage gel of *Ocimum americanum*

**Student** Suvipa Charoenpakdee

**Student ID** 54651105

**Degree** Master of Science

**Program** Polymer Technology

**Year** 2013

**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsi

### ABSTRACT

This research studies on the effect of carboxymethylcellulose (CMC) on porous hydrogel from mucilage gel (M) of *Ocimum americanum*. Various ratio of M/CMC were studied such as 2:0, 2:0.25, 2:0.5 and 2:1 (W/W). The M/CMC hydrogels were prepared by using freeze drying technique. N, N-methylenebisacrylamide (MBA) and Citric Acid were used as a crosslinking agent. Ammonium persulfate (APS) was used as an initiator. The effect of various M/CMC ratio, the amount of crosslinking agent on the properties of porous hydrogel such as physical characteristic, %water uptake in distilled water, %equilibrium swelling, %water retention, %gel fraction, thermal property and flexural strength were investigated.

The experimental results found that porous hydrogel contained low content of CMC absorbed water higher than high content of CMC. Citric acid crosslinked hydrogel showed lower stability than MBA crosslinked hydrogel after soaking in water. It was found that increasing the amount of MBA improved the flexural strength of hydrogel. The number of crosslinking and the length of crosslinked network showed the influenced on the flexural strength of hydrogel. On the other hand, the equilibrium swelling was decreased according to higher crosslink density and smaller of network voids for holding water.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฬารัตน์ ปรัชญาวรรการ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ ผศ.ดร. ชิตชนก มีใจชื่อ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. กัญญา ตันติวิสุทธิกุล ที่ให้คำปรึกษาและความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้การดำเนินงานวิจัยนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือที่ยังมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุวิภา เจริญภักดี

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญตาราง.....  | XVI  |
| สารบัญรูป.....  | XV   |
| <br>  |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                                     | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....  | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 3    |
| <br>  |      |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                  | 4    |
| 2.1.1 โครงสร้างของเซลลูโลสและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ.....          | 4    |
| 2.1.2 ความสามารถในการละลายน้ำของเซลลูโลส.....                               | 4    |
| 2.1.3 ความสามารถในการบวมน้ำของเซลลูโลส.....                                 | 5    |
| 2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ ซีเอ็มซี (CARBOXYMETHYLCELLULOSE, CMC)..... | 5    |
| 2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง.....                                    | 5    |
| 2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC).....                   | 6    |
| 2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....                              | 7    |
| 2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....                          | 8    |
| 2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์.....   | 8    |
| 2.3 เมงลัก.....   | 10   |
| 2.3.1 ลักษณะและชื่ออื่นของเมงลัก.....                                       | 10   |
| 2.3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....  | 10   |
| 2.3.3 สารประกอบทางเคมี.....   | 10   |
| 2.3.4 ลักษณะทั่วไปของเม็ดเมงลัก.....  | 11   |
| 2.3.5 สรรพคุณทางยา.....   | 11   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.3.7 ไฟเบอร์ที่ไม่ละลายน้ำ (INSOLUBLE FIBER) .....                 | 12   |
| 2.3.8 สมบัติการพองตัวของเม็ดแมงลัก.....                             | 13   |
| 2.3.9 สารเมือก (MUCILLAGES) .....                                   | 13   |
| 2.3.10 วัสดุที่ตัดแปลงจากเม็ดแมงลัก .....                           | 15   |
| 2.4 ไฮโดรเจล (HYDROGEL) .....                                       | 16   |
| 2.4.1 โครงสร้างของไฮโดรเจล .....                                    | 16   |
| 2.4.2 กระบวนการเตรียมไฮโดรเจล .....                                 | 16   |
| 2.4.3 สมบัติของไฮโดรเจล.....  | 16   |
| 2.4.4 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล.....                                  | 17   |
| 2.4.5 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล.....                                | 18   |
| 2.4.6 กลไกและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล .....          | 19   |
| 2.4.7 การนำไปใช้งาน .....   | 20   |
| 2.4.7.1 วัสดุทางการแพทย์.....                                       | 20   |
| 2.4.7.2 วัสดุกั้นน้ำแทนกระสอบทราย .....                             | 21   |
| 2.4.7.3 คอนแทกเลนส์.....  | 22   |
| 2.4.7.4 วัสดุโรยดินที่ให้ความชุ่มชื้น .....                         | 22   |
| 2.4.7.5 วัสดุปลูกปลอ่ยยา .....                                      | 22   |
| 2.4.7.6 ผ้าอ้อม .....   | 23   |
| 2.4.7.7 วัสดุทำก้ามเนื้อเทียม.....                                  | 23   |
| 2.5 พอลิเมอร์ผสม (POLYMER BLEND) .....                              | 24   |
| 2.5.1 สมบัติการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม .....                      | 24   |
| 2.6 การดูดซับ (ADSORPTION).....                                     | 27   |
| 2.6.1 กระบวนการดูดซับ (ADSORPTION) .....                            | 27   |
| 2.6.2 ลักษณะการดูดซับ .....   | 28   |
| 2.6.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....               | 29   |
| 2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ .....                          | 29   |
| 2.6.4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (SIZE AND SURFACE AREA) ..... | 29   |
| 2.6.4.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (ADSORBATE CHARACTERISTICS) .....     | 29   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.6.4.3 อัตราเร่งของการปั่นกวน (MIXING SPEED).....                                     | 30   |
| 2.6.4.4 เวลาสัมผัส (CONTACT TIME) .....  | 30   |
| 2.6.4.5 ค่าพีเอช (PH).....   | 30   |
| 2.7 กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง (FREEZE-DRYING).....                                     | 30   |
| 2.7.1 หลักการและขั้นตอนการทำแห้งแบบแช่แข็ง.....  | 30   |
| 2.7.2 เครื่องมือและระบบที่ใช้ในขบวนการ FREEZE-DRYING.....                              | 32   |
| 2.7.2.1 LOW TEMPERATURE CONDENSER.....   | 32   |
| 2.7.2.2 HIGH VACUUM.....   | 32   |
| 2.7.2.3 CONTROLLED HEAT TO PRODUCT.....  | 32   |
| 2.8 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง .....   | 32   |
| 2.8.1 CITRIC ACID.....   | 32   |
| 2.8.2 เอ็น, เอ็น'-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (N,N'-METHYLENEBISACRYLAMIDE) .....            | 33   |
| 2.8.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES).....                 | 33   |
| 2.8.2.2 ความเสถียรภาพ (STABILITY).....   | 34   |
| 2.8.3 แอมโมเนียม เปอร์ซัลเฟต (AMMONIUM PERSULPHATE) .....                              | 34   |
| 2.8.3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES).....                 | 34   |
| 2.8.3.2 ความเสถียรภาพ (STABILITY).....   | 34   |
| 2.8.3.3 ความเป็นพิษ (TOXICOLOGY) .....   | 35   |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 35   |
| บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน .....  | 40   |
| 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....   | 40   |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....   | 40   |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....   | 41   |
| 3.3.1 การเตรียมผงวุ้นเม็ดแมงลัก.....   | 41   |
| 3.3.2 การเตรียมไฮโดรเจลรูปทรงระหว่างผงวุ้นเม็ดแมงลักแห้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส..... | 42   |
| 3.3.3 การเตรียมไฮโดรเจลจากผงวุ้นเม็ดแมงลักแห้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....           | 43   |
| 3.4 การทดสอบสมบัติของไฮโดรเจลรูปทรง.....   | 46   |
| 3.4.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน.....  | 46   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของสารเมือกแมงลัก.....   | 13   |
| 2.2 องค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำไฮโดรเจล.....   | 21   |
| 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมขึ้นรูปไฮโดรเจลรูปพรุน ตอนที่ 1.....                                | 43   |
| 3.2 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมขึ้นรูปไฮโดรเจลรูปพรุน ตอนที่ 2.....                                | 44   |
| 3.3 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมขึ้นรูปไฮโดรเจลรูปพรุน ตอนที่ 3.....                                | 45   |
| 4.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปไฮโดรเจลรูปพรุน.....                                    | 51   |
| 4.2 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวไฮโดรเจลสูตรต่างๆที่ไม่มีการใส่สารเชื่อมโยงและใส่สารเชื่อมโยง MBA..... | 52   |
| 4.3 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวไฮโดรเจลสูตรต่างๆที่มีการใส่สารเชื่อมโยง CA.....                       | 53   |
| 4.4 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของสารเมือกแมงลักและสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....   | 56   |
| 4.5 สรุปผล TGA.....   | 89   |
| A-1 การทดสอบความเป็นรูปพรุน.....  | 97   |
| B-1 การทดสอบหาความหนาแน่น.....  | 99   |
| C-1 ผลการทดสอบแรงกด.....  | 101  |
| D-1 การทดสอบการดูดซับน้ำ.....   | 103  |
| D-2 การทดสอบการดูดซับน้ำที่สมดุล.....   | 104  |
| D-3 การหา % ค่าสัดส่วนเจล.....  | 104  |
| D-4 การทดสอบการกักเก็บน้ำ.....  | 105  |

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงโครงสร้างของ (a) เซลลูโลส (b) อนุพันธ์ของเซลลูโลส.....                                     | 4    |
| 2.2 โครงสร้างของไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส.....   | 5    |
| 2.3 แสดงปฏิกิริยา etherification.....  | 7    |
| 2.4 แสดงต้นแมงลัก.....   | 10   |
| 2.5 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล.....  | 10   |
| 2.6 แสดงโครงสร้างอนุพันธ์ของน้ำตาลเพนโตสและเฮกโซส.....   | 14   |
| 2.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Glucuronic acid และ Galacturonic acid.....                             | 14   |
| 2.8 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Polygalacturonic acid.....   | 14   |
| 2.9 แสดงรูปคอนกรีตมวลเบาจากแมงลัก.....   | 15   |
| 2.10 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจล.....   | 16   |
| 2.11 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจลเมื่อมีน้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้าง.....                                  | 17   |
| 2.12 แสดงการบวมตัวของ Physical hydrogel.....   | 18   |
| 2.13 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล.....   | 20   |
| 2.14 แสดงรูปวัสดุคูกั้นน้ำจากไฮโดรเจล.....   | 22   |
| 2.15 โครงสร้างโมเลกุลของกรดซิทริก.....   | 33   |
| 2.16 แสดงโครงสร้างของ N,N'-Methylenebisacrylamide.....   | 33   |
| 2.17 แสดงโครงสร้างของ Ammonium persulphate.....  | 34   |
| 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมผงวุ้นแมงลักแห้งจากเมล็ดแมงลัก.....  | 41   |
| 3.2 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง.....   | 42   |
| 3.3 แสดงสรุปแผนผังการเตรียมไฮโดรเจลรูปท่อน.....  | 49   |
| 4.1 สเปกตรัมของ M2CMC0.....  | 54   |
| 4.2 สเปกตรัมของ M0CMC2.....  | 55   |
| 4.3 แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูปท่อนที่ไม่มีสารเชื่อมโยง สูตร M2CMC0.25 M2CMC0.5 และ M2CMC1..... | 57   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.4 แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูปวงแหวนเมื่อมีสารเชื่อมโยง MBA 0.1 กรัม.....                              | 59   |
| 4.5 แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูปวงแหวน เมื่อมีสารเชื่อมโยง Citric Acid 0.1 กรัม<br>และ 0.3 กรัม.....     | 62   |
| 4.6 แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูปวงแหวน เมื่อมีสารเชื่อมโยง Citric Acid 0.1 กรัมและ 0.3 กรัม<br>.....     | 64   |
| 4.7 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลรูปวงแหวนแมงลัก.....   | 65   |
| 4.8 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลรูปวงแหวนแมงลักเมื่อมีสารเชื่อมโยง.....  | 66   |
| 4.9 กราฟแสดงความเป็นรูปวงแหวนของไฮโดรเจลรูปวงแหวน.....   | 67   |
| 4.10 กราฟแสดงความหนาแน่นของไฮโดรเจลรูปวงแหวน.....  | 70   |
| 4.11 กราฟแสดงการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแมงลักและไฮโดรเจลแมงลักผสม CMC.....                                    | 71   |
| 4.12 ลักษณะการเกิด H-bond ของไฮโดรเจลแมงลักแห้ง.....   | 72   |
| 4.13 ลักษณะการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแมงลัก.....  | 72   |
| 4.14 ลักษณะการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแมงลักผสม CMC.....   | 73   |
| 4.15 กราฟแสดงการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเชื่อมโยงด้วย MBA.....   | 73   |
| 4.16 กราฟแสดงการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเชื่อมโยงด้วย CA.....  | 75   |
| 4.17 กราฟแสดงการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง.....                            | 76   |
| 4.18 กราฟแสดงการกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลรูปวงแหวนในน้ำกลั่น เมื่อใช้สารเชื่อมโยง<br>MBA 0.1 กรัม.....         | 77   |
| 4.19 กราฟแสดงการกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลรูปวงแหวนในน้ำกลั่น เมื่อใช้สารเชื่อมโยง<br>MBA 0.3 กรัม.....         | 78   |
| 4.20 กราฟแสดงการกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลรูปวงแหวนในน้ำกลั่น เมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 0.1<br>และ 0.3 กรัม..... | 80   |
| 4.21 กราฟแสดงค่าการรับแรงกดสูงสุดของไฮโดรเจลรูปวงแหวนสูตรต่างๆที่ไม่มีและมี<br>สารเชื่อมโยง.....           | 80   |
| 4.22 กราฟแสดงค่าการรับแรงกดของไฮโดรเจลรูปวงแหวนแมงลักผสม CMC ที่มีสารเชื่อมโยงต่างกัน<br>.....             | 82   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.23 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเฉลี่ยของไฮโดรเจลรูปวงแหวนแล็กทอสม CMC<br>ที่มีสารเชื่อมโยงต่างกัน..... | 83   |
| 4.24 เปอร์เซ็นต์การคูดน้ำที่สมดุลและค่าสัดส่วนเฉลี่ยของไฮโดรเจลรูปวงแหวนแล็กทอสม CMC.....                 | 84   |
| 4.25 แสดงสมบัติทางความร้อนของสูตร M2CMC0, M2CMC0MBA0.3 และ<br>M2CMC0CA0.3.....                            | 85   |
| 4.26 แสดงสมบัติทางความร้อนของสูตร M0CMC2, M0CMC2MBA0.3 และ<br>M0CMC2CA0.3.....                            | 87   |
| 4.27 แสดงสมบัติทางความร้อนของสูตร M2CMC0CA0.3, M2CMC1CA0.1 และ<br>M0CMC2CA0.3.....                        | 88   |
| E-1 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC0.....  | 107  |
| E-2 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC1.....  | 107  |
| E-3 สมบัติทางความร้อน สูตร M0CMC2.....  | 108  |
| E-4 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC0MBA0.3.....  | 108  |
| E-5 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC1MBA0.3.....  | 109  |
| E-6 สมบัติทางความร้อน สูตร M0CMC2MBA0.3.....  | 109  |
| E-7 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC0CA0.3.....   | 110  |
| E-8 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC1CA0.3.....   | 110  |
| E-9 สมบัติทางความร้อน สูตร M0CMC2CA0.3.....   | 111  |
| F-1 สัณฐานวิทยา สูตร M2CMC0.25.....   | 114  |
| F-2 สัณฐานวิทยา สูตร M2CMC0.25MBA0.3.....   | 114  |
| F-3 สัณฐานวิทยา สูตร M2CMC0.25CA0.3.....  | 114  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันชีววัสดุ (Biomaterials) ที่ใช้ในร่างกายเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์และเภสัชกรรม เช่น วัสดุรักษาแผล (Wound Healing) ซ่อมแซมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) สารนำส่งยาเข้าสู่ร่างกาย (Drug Delivery) มักจะผลิตจากวัสดุสังเคราะห์ เนื่องจากความสะดวกในการควบคุมคุณภาพการผลิต ทนความร้อนได้สูงทำให้หลีกเลี่ยงกระบวนการฆ่าเชื้อได้หลายวิธี และสามารถเลือกระดับความแข็งแรงของวัสดุได้ อย่างไรก็ตามความเป็นมิตรกับร่างกาย (biocompatibility) และความสามารถในการกระตุ้นการซ่อมแซมเนื้อเยื่อในร่างกายยังต่ำกว่าวัสดุจากธรรมชาติมาก

ชีววัสดุจากธรรมชาติที่นิยมใช้ทางการแพทย์ตั้งแต่ก่อนยุคพอลิเมอร์เฟื่องฟู และยังคงมีใช้มากในปัจจุบัน ได้แก่ สารจำพวกโปรตีน ได้แก่ คอลลาเจน เจลาติน โปรตีนจากเส้นไหม รวมทั้งสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติอุ้มน้ำได้ดี (hydrogel) เช่น alginate, pectin, agarose, glycosaminoglycans และอนุพันธ์ของเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนสารประเภทไขมันฟอสเฟต (phospholipids) นิยมใช้มากในการผลิตไลโปโซมในเครื่องสำอาง และการนำส่งสารพันธุกรรม การศึกษาวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้งานชีววัสดุจากธรรมชาติเพื่อการแพทย์ในประเทศไทย ในปัจจุบันมุ่งความสนใจไปที่วัสดุที่มีศักยภาพที่จะผลิตใช้ได้ในประเทศ ได้แก่ สารโคไคซาน ไฟโบรอิน เซรีซิน คอลลาเจน เจลาติน เซลลูโลส และ ไขมันฟอสเฟต

แมงลักเป็นหนึ่งในวัสดุจากธรรมชาติที่มีสรรพคุณหลากหลาย เช่น เป็นยาระบาย เพราะมีเส้นใยสูง เพิ่มปริมาณกากอาหาร และเมือกของแมงลักยังสามารถช่วยหล่อลื่นให้อุจจาระอ่อนตัว สามารถขับถ่ายได้สะดวก ป้องกันอาการท้องผูก และมะเร็งลำไส้ใหญ่ ช่วยหล่อลื่นทางเดินอาหาร จากคุณสมบัติเด่นของเมือกแมงลักที่โดนน้ำแล้วเกิดการพองตัว เมื่อเข้าสู่ร่างกาย เมือกแมงลักจะดูดซับน้ำ ดูดซับสารพิษ น้ำตาลและไขมัน ที่อยู่ในลำไส้ ได้เป็นอย่างดี ทำให้ขับถ่ายสะดวก นอกจากนี้ยังมีประโยชน์อย่างอื่นคือ ช่วยลด ไขมันในเส้นเลือด และช่วยลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ จึงได้มีการนำเมือกแมงลักมาทานในระหว่างมื้ออาหาร เพื่อไม่ให้กระเพาะอาหารว่าง จึงสามารถใช้ลดความอ้วนได้ เพราะเมือกแมงลักไม่ก่อให้เกิดพลังงาน และยังมีองค์ประกอบทางเคมีในสารเมือกแมงลักที่เป็นอนุพันธ์ของ cellulose ได้แก่ Glucuronic acid และ Galacturonic acid ที่มีสมบัติอุ้มน้ำได้ดี ทั้งยังมีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ถึง 45 เท่า จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวัสดุดูดซับน้ำ ที่จะพัฒนาต่อไปเป็นวัสดุปิดแผลสำหรับการใช้ในการแพทย์

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose, CMC) หรือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทหนึ่ง เกิดจากการแปรหรือปรับปรุงเซลลูโลสโดยการแทนที่โครงสร้างเดิมด้วยหมู่คาร์บอกซิเมทิล มีลักษณะเป็นของแข็งใส ไม่มีสี มีทั้งชนิดผง และชนิดเม็ด ละลายได้ในน้ำแต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของพืช และเกลือ โซเดียมของคลอโรแอซิทิกแอซิด ใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็น อิมัลซิฟายเออร์ และ ทิกเคนเนอร์ ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ไอศกรีม และอาหารควบคุมไม่ให้อ้วน โดยทำหน้าที่ช่วยให้ส่วนผสมต่างๆ เข้ากัน ได้ดี และเพิ่มความข้น เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก สบู่ สีโอัมลชัน ยา และเครื่องสำอาง

วัสดุทั้งแมงลักและเซลลูโลสเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ไม่เป็นพิษและยังเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมที่กำลังเป็นปัญหาอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส และแมงลักมาเป็นองค์ประกอบในการเตรียมพอลิเมอร์โครงสร้างแหกึ่งสอดไขว้ในรูปแบบไฮโดรเจลเนื่องจากสมบัติบางประการของวัสดุทั้งสอง คือ สามารถดูดซึมน้ำและสารละลายบางอย่างได้เป็นอย่างดี เพื่อปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลที่สามารถนำไปใช้ทางการแพทย์ ด้วยคุณสมบัติไม่เป็นพิษต่อร่างกาย เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุทางการเกษตรซึ่งมีราคาถูกและหาได้ง่ายในประเทศไทย มาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากสารละลายเมทิลเซลลูโลสผสมกับสารละลายเมือกแมงลัก และปรับปรุงด้วยสารก่อกัมมันต์เชื่อมโยง
2. เพื่อศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. เตรียมสารละลายเมือกแมงลักจากเม็ดแมงลัก
2. ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับการเตรียมไฮโดรเจล คือ อัตราส่วนระหว่าง สารละลายคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสต่อสารละลายเมือกแมงลัก ปริมาณสารก่อกัมมันต์เชื่อมโยง และตัวรีมปฏิกริยา
3. ศึกษาปริมาณการดูดซึมน้ำ การดูดซึมน้ำที่สมดุล ที่ไฮโดรเจลสามารถดูดซึมน้ำได้ในน้ำกลั่น
4. ศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลในสภาวะต่างๆ
5. ศึกษาสมบัติทางความร้อน
6. ศึกษาสัณฐานวิทยา

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ในการเตรียมสารละลายเมือกแมงลักเพื่อนำไปพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับน้ำต่อไป
2. สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทางการเกษตรที่มีสมบัติคล้ายคลึงกันชนิดอื่นต่อไป
3. เพื่อเพิ่มมูลค่าและทางเลือกให้กับวัสดุทางการเกษตร รวมทั้งการนำเมือกแมงลักซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีมากในประเทศไทย มาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

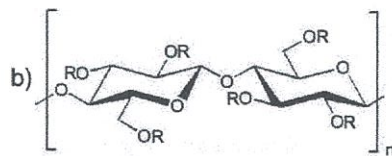
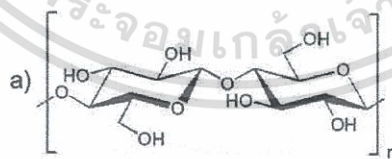
### 2.1 เซลลูโลส

#### 2.1.1 โครงสร้างของเซลลูโลสและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ [1, 2]

โครงสร้างหลักในพืชและเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยฝ้าย และเส้นใยลินิน คือ เซลลูโลส ซึ่งมีหน่วยย่อย คือกลูโคส และเชื่อมโยกันอยู่ด้วยพันธะ 1,4- $\beta$ -glucosidic การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสจะทำปฏิกิริยา etherification ที่หมู่ hydroxyl เพื่อจะให้ได้ cellulose derivatives กระบวนการในการผลิตง่ายและการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในช่วงกว้างในอุตสาหกรรม เซลลูโลสมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะสามารถย่อยสลายด้วยแบคทีเรียในอากาศ น้ำ และ ดิน ซึ่งกลไกในการสลายตัวจะไปทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความแข็งแรงเชิงกลลดลง ทำให้เพิ่มความสามารถในการละลาย

#### 2.1.2 ความสามารถในการละลายน้ำของเซลลูโลส [3]

เซลลูโลสที่สามารถละลายน้ำได้ส่วนใหญ่เกิดจากการทำปฏิกิริยา etherification ที่ทำให้หมู่ hydroxyl เกิดปฏิกิริยากับหมู่โครงสร้างทางออร์แกนิก เช่น หมู่เมทิล และหมู่เอทิล ซึ่งไฮโดรเจลสามารถทำจากสารละลายเซลลูโลส เช่น เมทิลเซลลูโลส (MC) ไฮดรอกซีเมทิลพโรพิล เมทิลเซลลูโลส (HPMC) เอทิลเซลลูโลส (EC) ไฮดรอกซีเอทิล เมทิลเซลลูโลส (HEC) และ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (NaCMC)



|       |   |
|-------|---|
| MC    | R= H, CH <sub>3</sub>   |
| HPMC  | R= H, CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> CH(OH)CH <sub>3</sub> |
| EC    | R= H, CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>                         |
| HEC   | R= H, CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH                      |
| NaCMC | R= H, CH <sub>2</sub> COONa                                   |

รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างของ (a) เซลลูโลส (b) อนุพันธ์ของเซลลูโลส [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ของพอลิเมอร์เหล่านี้ นำไปใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอาง ด้วยคุณสมบัติ คือ ราคาถูกและ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย

### 2.1.3 ความสามารถในการบวมตัวของเซลลูโลส [4, 5]

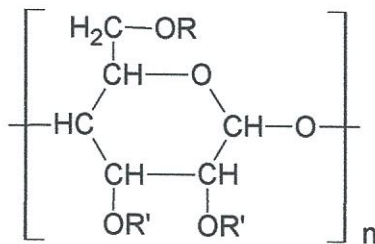
เส้นใยธรรมชาติ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ไซโตซาน มีความสามารถในการดูดซับสารละลายและบวมตัว ทำให้ไปลดช่องว่างของกระดาษ ทำให้รู้สึกอึดเร็วขึ้น ส่งผลให้รับประทานอาหารได้น้อยลง ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการควบคุมน้ำหนัก ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องอาศัยความซับซ้อนในการผ่าตัดให้เกิดความยุ่งยาก ไฮโดรเจลเป็นหนึ่งในวัสดุที่ถูกสนใจในการประยุกต์การใช้งานด้านนี้ เพราะความสามารถในการบวมตัวแล้ว ยังมีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมด้วยองค์ประกอบทางเคมี และ โครงสร้างทางกายภาพ ตามสภาวะทางอุณหภูมิและ pH ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการใช้งานได้ เช่น ไฮโดรเจลที่ทำจากสารละลายเซลลูโลส ได้จากการเตรียมพอลิเมอร์โครงร่างแข็งสอดไขว้ระหว่างสารละลายโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (NaCMC) และไฮดรอกซิลเอทิล เซลลูโลส (HEC) แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยสมบัติการบวมตัวได้ดีในสภาวะเป็นกลาง แต่ในกระดาษอาหาร มีสถานะความเป็นกรด ทำให้ต้องมีการปรับปรุงพัฒนาต่อไป

## 2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ ซีเอ็มซี (Carboxymethylcellulose, CMC)

### 2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง

อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม [1,6] คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หมายถึงเซลลูโลสที่ผ่านขบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถกระจายตัวได้ในน้ำเป็นคอลลอยด์ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอื่น เช่น เอทานอล อีเทอร์ เป็นต้น

สารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) หรือที่รู้จักกันในอีกหลายๆ ชื่อคือ NaCMC, Sodium CMC, CMC, CM cellulose, Cellulose gum, Carboxymethyl cellulose หรือ Sodium cellulose glycolate เป็นแอนไอออนิกเซลลูโลสอีเทอร์ที่ละลายน้ำ มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่แสดงจำนวนกลุ่ม  $\text{CH}_2\text{COONa}$  ที่แทนที่ไฮโดรเจนต่อ 1 หน่วยนี้เรียกว่า องศาการแทนที่ (Degree of substitution) ดังนั้นมีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 3 CMC แบ่งออกเป็นเกรดต่างๆ ตามการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งการแบ่งเกรดของ CMC ขึ้นอยู่กับ ค่าองศาการแทนที่ ความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ องศาการเกิดพอลิเมอร์ และองศาความบริสุทธิ์

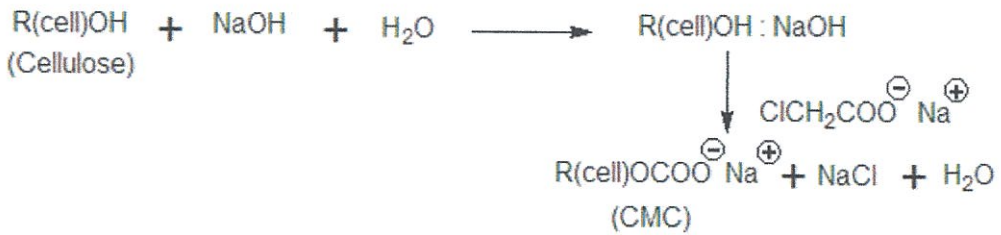
### 2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

CMC เป็นของแข็งใส ไม่มีสี มีทั้งชนิดผง และชนิดเม็ด ละลายได้ในน้ำแต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ [8, 9, 10] ใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็น อิมัลซิฟายเออร์ และทิกเคนเนอร์ ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ไอศกรีม และอาหารควบคุมไม่ให้อ้วน โดยทำหน้าที่ช่วยให้ส่วนผสมต่างๆ เข้ากัน ได้ดี และเพิ่มความข้น เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก สบู่ สีสีย้อมผ้า ยา และเครื่องสำอาง

เยื่อเซลลูโลสคุณภาพสูงจำพวกเซลลูโลสอีเทอร์ (cellulose ethers) ที่เป็นวัตถุดิบในการเตรียม CMC นั้น ในต่างประเทศส่วนใหญ่ผลิตจากไม้ยืนต้น จำพวกสน และยูคาลิปตัส ทั้งนี้เนื่องจากการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จำเป็นต้องควบคุมคุณภาพเยื่อเซลลูโลสที่ได้ให้คงที่จึงจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบจำนวนมาก เนื่องจากหากใช้วัตถุดิบจำพวกพืชไร่ที่มีคุณภาพและปริมาณแตกต่างกันไปจากหลายๆ แหล่ง จะทำให้ได้เยื่อเซลลูโลสที่มีสมบัติไม่คงที่ ประเทศไทยเรามีพืชและผลไม้หลายชนิด ที่สามารถสกัดแยกได้เยื่อเซลลูโลสคุณภาพสูง อาทิเช่น ชานอ้อย ข้าวโพด และวัชพืชหญ้าหลายชนิด ซึ่งสำคัญคือเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งหรือผลพลอยได้ทางการเกษตร มาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ การวิจัยเพื่อพัฒนาโดยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเซลลูโลสคุณภาพสูง จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหล่านี้ได้

การผลิต CMC ในอุตสาหกรรมอาศัยปฏิกิริยา etherification ระหว่างเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับ โซเดียมคลอโรอะซีเตต จากนั้นทำให้เป็นกลางด้วยกรด โดยมีโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไกลโคเลตเป็นผลจากปฏิกิริยาข้างเคียงต้องใช้เมทานอลหรืออะซีโตนสกัดแยกเกลือโซเดียมทั้งสองชนิดนี้เพื่อให้ได้ CMC ที่มีความบริสุทธิ์สูง

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้ [11]



และมีปฏิกิริยาข้างเคียงดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยา etherification

### 2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. เป็นสารละลายที่เพิ่มความหนืดและช่วยในการยึดเกาะ
2. ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำมัน และไขมัน สามารถละลายในสารละลายผลสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอล หรืออะซิโตน ได้สารละลายที่มีความหนืด
3. ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีอันตราย ไม่เป็นพิษ และไม่ระคายเคืองผิวหนัง
4. มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.5-8.0
5. ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติแม้จะเก็บไว้เป็นเวลานาน
6. ทำหน้าที่เป็นสารคงสภาพ (Stabilizer) สารช่วยในการแขวนลอย (Suspending acid) สารเพิ่มความหนืด (Thickener) สารช่วยในการกระจายอนุภาค (Dispersing acid) และสารยึด (Binder) ได้ดี
7. มีความคงทนต่อสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าสารธรรมชาติ
8. มีความสามารถในการดูดและเก็บน้ำได้ดี
9. ความหนืดลดลงเมื่อถูกแรงเฉือนและการกวนสารละลาย
10. เป็นสารเพิ่มเนื้อสำหรับอาหารและเครื่องสำอางค์เคลือบกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

การประยุกต์ใช้ซีเอ็มซีส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปการละลายในน้ำ ดังนั้นขั้นตอนการละลายน้ำจึงถือว่าสำคัญที่สุด เนื่องจากซีเอ็มซีมีแนวโน้มจะจับตัวเป็นก้อนที่เรียกว่า Lump ในบางครั้งอาจละลายซีเอ็มซีโดยใช้ตัวทำละลายอื่นๆ เช่น เอทานอล แล้วเติมน้ำภายหลังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Lump สำหรับส่วนผสมอื่นๆ ที่ต้องการผสมกับซีเอ็มซีให้ผสมกันขณะแห้งก่อนแล้วจึงละลายน้ำในการผสมแบบแห้งควรใช้ซีเอ็มซีน้อยกว่า 20 % โดยน้ำหนัก และการพ่นไอน้ำลงในภาชนะขณะละลายจะช่วยให้ซีเอ็มซีละลายได้ดีขึ้น

### 2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์

CMC เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ [12] เนื่องจากละลายน้ำได้ มีความเป็นกลางคือไม่เป็นกรดด่าง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์จึงไม่สะสมในแหล่งน้ำมีค่า BOD ต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ

CMC ที่ผลิตจำหน่ายมีมากมายหลายชนิดคุณภาพ เช่น สำหรับอาหาร ยา เครื่องสำอาง อุตสาหกรรม ดังนั้นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ เช่น CMC ที่ใช้ผสมในอาหาร ต้องมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.5% และมีตะกั่ว สารหนูในปริมาณต่ำมาก ความหนืดเป็นสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งที่ผู้ใช่มักคำนึงถึง ดังนั้น CMC ที่จำหน่ายมีความหนืดในช่วงต่างๆ กันคือ 10 - 6,000 Centipoise (ในสารละลาย 1%)

ตัวอย่างการใช้ CMC ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ มีดังนี้

- |                 |  |
|-----------------|--|
| อุตสาหกรรมอาหาร | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึกในไอศกรีม น้ำเชื่อม น้ำตาลไอซิ่งส์ อาหารพวกที่ฉาบน้ำตาล</li> <li>- ใช้เป็นสารป้องกันการคอลลอยด์ในมายองเนส</li> <li>- ใช้เป็นสารช่วยในการแขวนลอยในผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกนม น้ำผลไม้</li> <li>- ใช้เป็นสารทำให้ข้นในน้ำสลัด เครื่องดื่ม อาหารสัตว์</li> <li>- ใช้ทำให้เป็นวุ้นในเยลลี่ขนมหวาน</li> <li>- ใช้เป็นสารทำให้ข้นฟูในไอศกรีม whipping cream</li> </ul> |
| อุตสาหกรรมยา    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เคลือบเม็ดยาเพื่อให้ง่ายต่อการรับประทาน ใช้เป็นสารควบคุมการออกฤทธิ์ของยา เนื่องจาก CMC ไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรด เช่น ในลำไส้</li> <li>- ใช้เป็นสารทำให้คงตัวสำหรับยาที่มีส่วนผสมในลักษณะแขวนลอย</li> </ul>  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง - ใช้เป็นสารทำให้ขุ่น สารคงตัว สารช่วยการแขวนลอย สารก่อฟิล์ม ในผลิตภัณฑ์จำพวกครีม โลชั่น แชมพูยาสีฟัน
- อุตสาหกรรมผงซักฟอก - ใช้ผสมในผงซักฟอกเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกที่หลุดจากผ้ากลับติดบนเนื้อผ้า
- อุตสาหกรรมกาว - ใช้เป็นสารทำให้ขุ่นในกาวสูตรน้ำ
- อุตสาหกรรมสีและวาร์นิช - ใช้เป็นสารทำให้ขุ่นและสารช่วยการแขวนลอยของผงสี  
- ใช้เป็นสารก่อฟิล์มในวาร์นิช
- อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ - ใช้เป็นสารป้องกันคอลลอยด์ และสารช่วยทำให้การแขวนลอยคงตัวในปฏิกิริยา vinylchloride polymerization
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ - ใช้เป็นสารทำให้ด้ายคืบมีความแข็งแรงทน เรียบ และมีน้ำหนัก  
- ใช้เป็นสารทำให้ขุ่นในสีพิมพ์ผ้า
- อุตสาหกรรมกระดาษ - ใช้เป็นสารเคลือบกระดาษเพื่อให้การพิมพ์หมึกดีขึ้น ไม่ดูดซึมน้ำมัน
- อุตสาหกรรมน้ำมัน - ใช้เป็นส่วนผสมในดินที่ใช้สำหรับหล่อลื่นหัวขุดเจาะน้ำมัน เนื่องจาก CMC อุ้มน้ำได้ในปริมาณสูง ทำให้การแขวนลอยของดินคงตัว
- อุตสาหกรรมเซรามิก - ใช้เป็นสารช่วยการยึดหยุ่นในการทำผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนที่ใช้ในงานทางไฟฟ้า  
- ใช้เป็นสารทำให้ขุ่น และสารช่วยในการแขวนลอยในส่วนผสมของดิน
- อุตสาหกรรมฆ่าแมลง - ใช้เป็นสารช่วยการแขวนลอยในยาฆ่าแมลงสูตรน้ำ

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่า CMC เป็นสารที่มีประโยชน์มาก มีการใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพราะสมบัติเฉพาะตัวและความไม่เป็นพิษภัยต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งสภาวะแวดล้อมของ CMC นั้นเอง

## 2.3 แมงลัก

### 2.3.1 ลักษณะและชื่ออื่นของแมงลัก



รูปที่ 2.4 แสดงต้นแมงลัก [13]

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Ocimum americanum*

ชื่อสามัญ : Hairy Basil

วงศ์ : Apiaceae ( Labiatae )

ชื่ออื่น : ก้อมก้อขาว มังลัก

### 2.3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ [13]

เป็นพืชล้มลุก ลำต้นตรง โคนต้นแข็ง สูงประมาณ 40-65 ซม. แตกกิ่งก้าน ทุกส่วนมีกลิ่นหอม ใบเดี่ยว สี่ใบสลับ ใบมีขนอ่อน ๆ ใบเรียงตรงข้ามเป็นคู่ ๆ ดอก ช่อ ออกที่ปลายยอด ช่ออาจเป็นช่อเดี่ยว หรือแตกออกเป็นช่อย่อย ๆ ดอกบานจากข้างล่างขึ้นข้างบน กลีบรองดอกจะคงทนและขยายใหญ่ขึ้นเมื่อเป็นผล กลีบดอกสีขาวแบ่งเป็น 2 ปาก ร่วงง่าย เกสรตัวผู้จะยื่นยาวกว่ากลีบดอก ดอกย่อยออกโดยรอบก้านช่อเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นมีดอกย่อย 6 ดอก แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนละ 3 ดอก ดอกตรงกลางจะบานก่อน และช่อดอกย่อยที่อยู่ชั้นล่างสุดของก้านช่อดอกจะบานก่อนเช่นกัน ผล 1 ดอกมีผล 4 ผล ขนาดเล็ก คือเมล็ดแมงลัก รูปรางรี สีดำ

### 2.3.3 สารประกอบทางเคมี

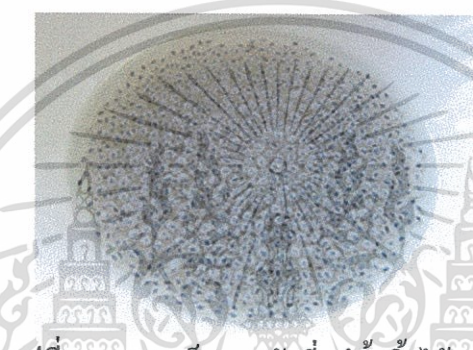
เมล็ดแมงลักประกอบด้วยสารคาร์โบไฮเดรตหลายชนิดซึ่งเป็นโมเลกุลใหญ่ และสารประกอบอื่นๆ เช่น Camphene , mucilage , myrcene oil , D-Glucose เป็นต้น เปลือกผลแมงลักมีสารเมือก (mucilage) ซึ่งพองตัวในน้ำได้ ใบมีน้ำมันหอมระเหย ประเภทการบูร, เบอร์นีอัล,

### ซินีออล และยูจินอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ลักษณะทั่วไปของเม็ดแมงลัก [15]

เม็ดแมงลักมีดำ ลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ด้านหลังโค้งงอเล็กน้อย รูปร่างคล้ายกระสวย แต่ค่อนข้างป้อมและปลายทั้งสองมน ด้านท้องเป็นเหลี่ยม เมื่อดูด้วยแว่นขยายจะเห็นเยื่อขาวๆหุ้มอยู่ภายนอกเมล็ด เปลือกแข็งมาก เม็ดแก่มีสีดำด้านๆ เม็ดยังไม่แก่มีสีน้ำตาลไหม้ ขนาดของเม็ดแมงลักมีขนาดเฉลี่ยยาว 2.00 mm × กว้าง 1.0 mm × หนา 0.8 mm น้ำหนักโดยเฉลี่ย 1.25 mg ต่อ 1 เม็ด เมื่อเอาเม็ดแมงลักแช่น้ำและทิ้งไว้ให้พองเต็มที่จะมีขนาดยาว 4.5 – 5.0 mm กว้าง 3.0 – 4.0 mm และหนา 2.7 – 3.0 mm



รูปที่ 2.5 แสดงเม็ดแมงลักที่แช่น้ำทิ้งไว้ [15]

### 2.3.5 สรรพคุณทางยา [15]

จากการวิจัยพบว่าเม็ดแมงลักมีสรรพคุณเป็นยาระบาย มีเส้นใยสูง เพิ่มปริมาณกากอาหาร และเมือกของมันยังสามารถช่วยหล่อลื่นให้อุจจาระอ่อนตัว สามารถขับถ่ายได้สะดวก ป้องกันอาการท้องผูก และมะเร็งลำไส้ใหญ่ ช่วยหล่อลื่นทางเดินอาหาร จากคุณสมบัติเด่นของเม็ดแมงลักที่โดนน้ำแล้วเกิดการพองตัว เมื่อเข้าสู่ร่างกาย เม็ดแมงลักจะดูดซับน้ำ ดูดซับสารพิษ น้ำตาลและไขมัน ที่อยู่ในลำไส้ ได้เป็นอย่างดี ทำให้ขับถ่ายสะดวก นอกจากนี้ยังมีประโยชน์อย่างอื่นคือ ช่วยลดไขมันในเส้นเลือด และช่วยลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ จึงได้มีการนำเม็ดแมงลักมาทานในระหว่างมื้ออาหาร เพื่อไม่ให้กระเพาะอาหารว่าง จึงสามารถใช้ลดความอ้วนได้ เพราะเม็ดแมงลักไม่ก่อให้เกิดพลังงาน

วิธีรับประทานเม็ดแมงลักเพื่อใช้ลดความอ้วน คือใช้เม็ดแมงลัก 1-2 ช้อนชาแช่น้ำ 1 แก้วใหญ่ ทิ้งไว้จนกว่าจะพองเต็มที่ ถ้าใช้เป็นยาระบายให้ทานก่อนนอน ถ้าเป็นยาลดความอ้วนให้ทานก่อนอาหารหรือ ทดแทนอาหารเป็นบางมื้อ เพราะอาจเป็นโรคขาดสารอาหารได้

สรรพคุณอื่นเพิ่มเติม [16]

1. เมล็ดแมงลักเป็นยาระบาย ช่วยให้อาการถ่ายสะดวก โดยนำเมล็ดแมงลักประมาณ 2 ช้อนชา ผสมน้ำ 1 แก้ว รอให้พองตัวเต็มที่เสียก่อนจึงค่อยรับประทาน
2. ใบแมงลักช่วยขับเหงื่อ ขับลม โดยรับประทานใบสด
3. แก้ไอ แก้โรคทางเดินอาหาร หรือ โรคที่เกี่ยวกับลำไส้ โดยรับประทานน้ำต้มใบแมงลัก และบรรเทาอาการปวดฟัน โดยอมหรือบ้วนปากด้วยน้ำต้มใบแมงลักเช่นกัน
4. แก้ไข้หวัดในเด็ก โดยให้รับประทานน้ำคั้นใบแมงลัก
5. ใบใช้ทาภายนอกแก้โรคผิวหนัง
6. น้ำมันแมงลักมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อวัณโรค

### 2.3.6 ไฟเบอร์ที่ละลายน้ำได้ (Soluble fiber) [17]

เมื่อไฟเบอร์นี้ละลายน้ำจะมีลักษณะเป็นเจลซึ่งเกาะติดกับโมเลกุลของไขมันจากอาหารที่รับประทานเข้าไปได้อย่างดี ทำให้ป้องกันการดูดซึมไขมันเข้าสู่กระแสเลือด และไฟเบอร์ชนิดนี้ก็จะนำพาสารอาหารที่ติดอยู่ขับออกไปทางอุจจาระ จึงช่วยลดระดับไขมันและน้ำตาลในคนไข้ที่มีปัญหาได้ดี และทำให้น้ำหนักค่อยๆ ลดลงอย่างปลอดภัย

### 2.3.7 ไฟเบอร์ที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble fiber)

ไฟเบอร์ชนิดนี้จะมีการทำงานคล้ายๆ ฟองน้ำ (sponge) โดยจะทำการดูดน้ำไว้กับตัวเองทำให้พองตัว ถ้ารับประทานไฟเบอร์ชนิดนี้เข้าไปก็จะทำให้รับประทานอาหารได้น้อยลง เพราะรู้สึกอิ่ม แน่นท้อง นอกจากนี้ก็จะส่งผลให้ปริมาณขับถ่ายมากขึ้น เร่งให้อุจจาระเคลื่อนที่ผ่านไป ลำไส้ใหญ่ได้เร็วขึ้น จึงป้องกันปัญหาการดูดซึมสารอาหารเข้าร่างกาย และทำให้ลดและป้องกันภาวะท้องผูก

จากประโยชน์ดังกล่าวของไฟเบอร์จากเมล็ดแมงลัก จึงได้มีการนำเมล็ดแมงลักมาทำการลดน้ำหนัก แก้ปัญหาไขมันในเลือดสูง หรือน้ำตาลในเลือดสูง และใช้ป้องกันและรักษาปัญหาท้องผูก ซึ่งมักมีการผสมไฟเบอร์ทั้งสองแบบในสัดส่วนที่แตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ แต่ส่วนใหญ่ที่มีขายตามท้องตลาดก็มักจะประกอบด้วย ไฟเบอร์ชนิดละลายน้ำได้ประมาณ 70-80% เพื่อป้องกันการดูดซึมไขมันและน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือด และไฟเบอร์ชนิดไม่ละลายน้ำประมาณ 20-30% เพื่อช่วยทำให้อิ่มเร็วขึ้นและเร่งการขับถ่าย ไม่ให้ท้องผูก เพื่อแก้ปัญหาสารตกค้างในลำไส้ที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง และแก้ไขปัญหาริดสีดวงทวารในคนที่ขับถ่ายได้ลำบาก

### 2.3.8 สมบัติการพองตัวของเม็ดแมงลัก [14]

เม็ดแมงลักเมื่อถูกน้ำจะพองตัวทันที โดยเปลือกนอกจะพองตัวเป็นเมือกสีขาวหนาและโปร่งใส เกิดจากการที่น้ำแทรกซึมเข้าไปในเปลือกของเม็ดแมงลัก ทำให้เส้นใยเกิดการพองตัวและเกิดกำลังดันจนดันปลายเส้นใยทะลุผิววนอกออกมาได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงเวลา 10 นาทีถึง 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเม็ดแมงลักยังพองตัวได้อีกเรื่อยๆ แต่จะค่อยๆ ซ้ำลง การพองตัวจะหยุดไปหลังจากผ่านไป 12 ชั่วโมง ถ้าวางทิ้งไว้ต่อไปเยือกเมือกบางส่วนจะเริ่มยุบหลุดออกจากเม็ด ปริมาตรที่สามารถดูดได้มากที่สุด คือ  $0.035 \text{ cm}^3$  ต่อ 1 เม็ด และจากการศึกษาสมบัติการพองตัวของเม็ดแมงลักต่อปัจจัยต่างๆ พบว่าเม็ดแมงลักจะพองตัวได้เร็วขึ้น เมื่ออยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง กล่าวคือ ในน้ำอุณหภูมิ  $100 \text{ C}^\circ$  เม็ดแมงลักใช้เวลา 4.30 นาทีในการพองตัวเต็มที่ ในน้ำอุณหภูมิ  $25 \text{ C}^\circ$  เม็ดแมงลักใช้เวลา 8.20 นาทีในการพองตัวเต็มที่ ในน้ำที่อุณหภูมิ  $10 \text{ C}^\circ$  เม็ดแมงลักใช้เวลา 26.45 นาที ในการพองตัวเต็มที่ แต่ในน้ำอุณหภูมิต่ำกว่า  $2 \text{ C}^\circ$  เม็ดแมงลักจะพองตัวไม่เต็มที่ คือจะพองเพียง 3 ใน 4 และต้องใช้เวลาจนถึง 225 นาที และพบว่าเมื่อนำเม็ดแมงลักมาบดเป็นผง พบว่ามีกรพองตัวเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 129.9 ของเม็ดปกติ ซึ่งแสดงว่า ถ้ายบดเม็ดแมงลักจนละเอียดจะทำให้เส้นใยในแมงลักแตกตัวได้ดี

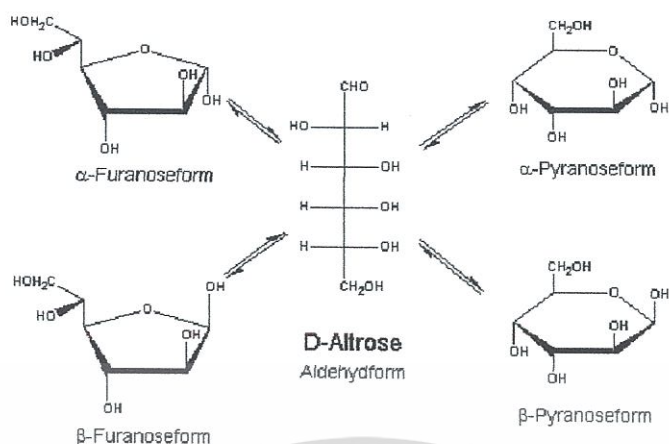
### 2.3.9 สารเมือก (Mucillages) [18]

สารเมือก (Mucillages) มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นพอลิยูโรไนด์ (Polyuronide) พบในธรรมชาติในรูปของเกลือ อาจจะเป็นเกลือของแคลเซียม โปแตสเซียมหรือแมกนีเซียมซึ่งประกอบด้วยน้ำตาล และ Uronic acid เชื่อมต่อกันด้วย Glycoside Linkage และเป็นลักษณะโซ่กิ่ง ส่วนน้ำตาลอาจเป็นเพนโตสหรือเฮกโซส (รูปที่ 2.6) แสดงโครงสร้างของ Uronic acid ที่พบมากคือ Glucuronic acid และ Galacturonic acid (รูปที่ 2.7) โครงสร้างทางเคมีของ Polygalacturonic (รูปที่ 2.8) และมีองค์ประกอบทางเคมีของสารเมือกแมงลักดังตารางที่ 2.1

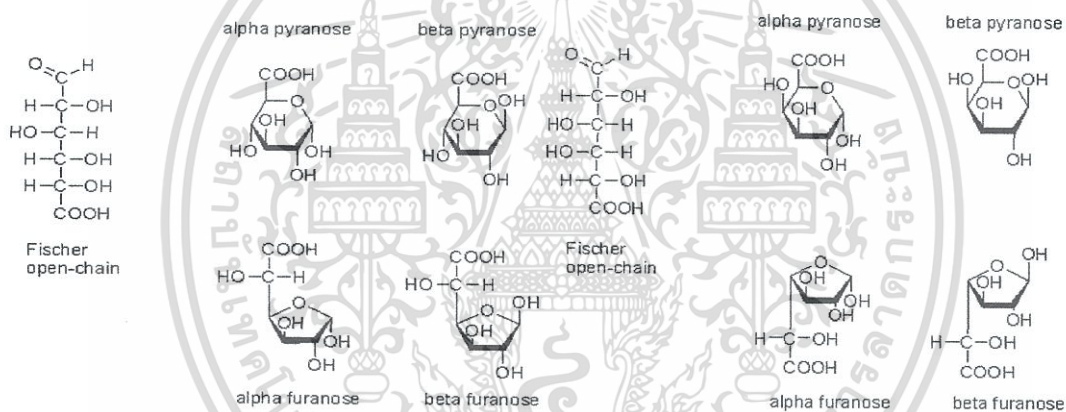
ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสารเมือกแมงลัก [18]

| Chemical composition | Content (%wet basis) |
|----------------------|----------------------|
| Moisture             | 10.48                |
| Protein              | 0.81                 |
| Fat                  | 1.73                 |
| Ash                  | 4.43                 |
| Crude fiber          | 17.35                |
| Carbohydrate         | 65.20                |

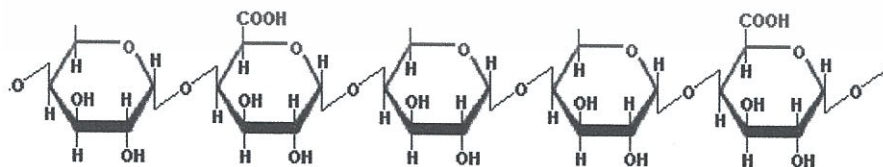
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.6 แสดง โครงสร้างอนุพันธ์ของน้ำตาลเพนโตสและเฮกโซส [19]



รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างทางเคมีของ Glucuronic acid และ Galacturonic acid [19]

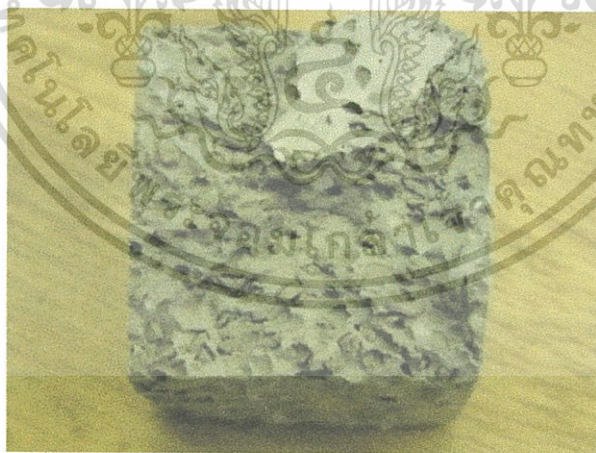


รูปที่ 2.8 แสดง โครงสร้างทางเคมีของ Polygalacturonic acid [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.10 วัสดุที่ตัดแปลงจากเม็ดแมงลัก [20]

นายชวาน พรรณดวงเนตร [20] คิดค้นการนำเม็ดแมงลักมาผสมกับคอนกรีต จากการค้นคว้าบวกแนวคิดของการก่อสร้างในปัจจุบัน พบว่าส่วนมากสถาปนิกมีการเลือกใช้คอนกรีตมวลเบา ซึ่งคอนกรีตมวลเบาที่มีวิธีการผลิตหลากหลายรูปแบบ เช่น การอบด้วยไอน้ำความดันสูงในระบบอุตสาหกรรมใหญ่เพื่อทำให้ตัวมวลของคอนกรีตฟองอากาศ มีน้ำหนักเบา จึงช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้าง ช่วยลดราคาในการก่อสร้าง และยังให้ประโยชน์ในการเป็นฉนวนกันความร้อน เม็ดแมงลัก เมื่อดูดซับน้ำไว้แล้ว ไฟเบอร์จากเม็ดแมงลัก จะมีลักษณะเป็นเยื่อเมือกสั้น สามารถแยกชนิดของ ไฟเบอร์ของเม็ดแมงลักตามลักษณะการละลายน้ำได้ 2 ชนิดคือ ไฟเบอร์ที่ละลายน้ำได้จะมีลักษณะเป็นเจล และไฟเบอร์ที่ไม่ละลายน้ำ จะมีลักษณะคล้ายฟองน้ำโดยคุณน้ำไว้กับตัวเอง ทำให้ฟองตัว ในส่วนของเส้นใยเม็ดแมงลักเมื่อแช่น้ำจะพองได้ถึง 45 เท่า การผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดแมงลักเป็นส่วนผสม หรือใช้วัสดุทางการเกษตรซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติเป็นส่วนผสม ควรตรวจสอบคัดเลือกเม็ดแมงลักในการนำมาใช้งานก่อนทุกครั้ง แม้ ปัจจุบันเม็ดแมงลักยังมีราคาสูงและปลูกเพื่อการบริโภคเท่านั้น แต่ถ้าได้รับการสนับสนุนให้เกษตรกรปลูกเม็ดแมงลักเพิ่มขึ้นเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม จะมีปริมาณเพียงพอสำหรับการผลิตคอนกรีต และประหยัดงบประมาณต่อหน่วยเมื่อผลิตเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังใช้พลังงานและเทคโนโลยีในการผลิตต่ำ ลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุดิบที่สร้างทดแทนได้ยาก ไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ และช่วยให้เกษตรกรไทยมีรายได้เพิ่มขึ้น

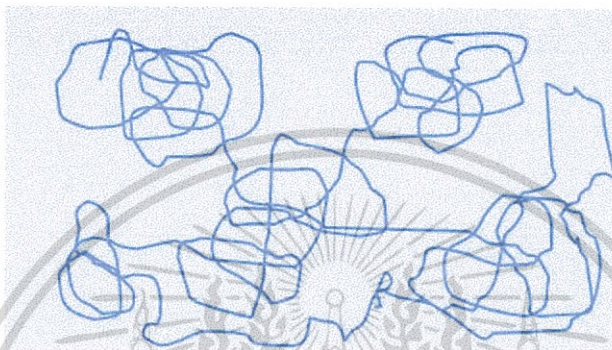


รูปที่ 2.9 แสดงรูปคอนกรีตมวลเบาจากแมงลัก [20]

## 2.4 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

### 2.4.1 โครงสร้างของไฮโดรเจล [14]

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหที่ละลายน้ำได้ บางครั้งเรียกว่า colloidal gel ซึ่งน้ำสามารถแพร่กระจายได้ในระดับปานกลาง ไฮโดรเจลเป็น superabsorbent ที่ได้จากธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ คือ สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า 99%



รูปที่ 2.10 แสดง โครงสร้างของไฮโดรเจล [21]

### 2.4.2 กระบวนการเตรียมไฮโดรเจล

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ให้เกิดไฮโดรเจลต้องละลายได้ในน้ำ เช่น Poly(vinyl alcohol) [PVA], Poly(vinyl pyrrolidone) [PVP], Poly(ethylene oxide) [PEO], Polyacrylamide [PMMA], Poly(acrylic acid) [PAA] และ Poly(vinyl methyl ether) [PVME] ซึ่งมีสมบัติในการเลือกมาสังเคราะห์ เช่น ต้องมี pH ที่เหมาะสม ionic strength ของ PAA และอุณหภูมิของ PVME เป็นต้น

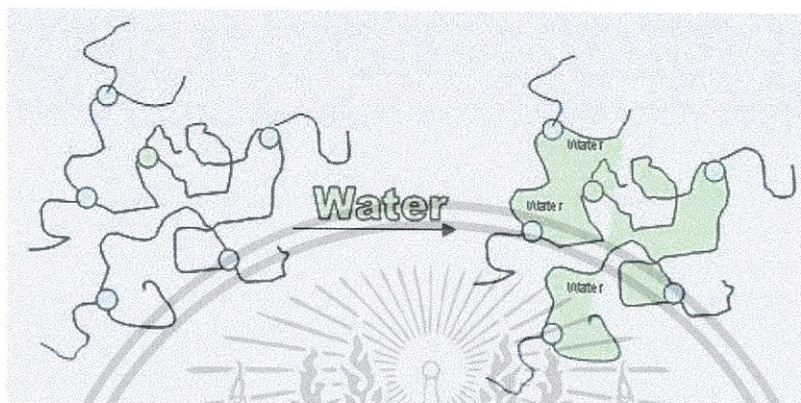
### 2.4.3 สมบัติของไฮโดรเจล [22, 23]

ส่วนประกอบที่ทำให้เกิดไฮโดรเจลมี 2 อย่างขึ้นไป คือ มีโครงสร้างของไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงแบบสามมิติ และมีส่วนของน้ำ ซึ่งจะเข้าไปอยู่ระหว่างช่องว่างของพอลิเมอร์โมเลกุลหนาแน่น จึงทำให้เกิดไฮโดรเจล สมบัติของพอลิเมอร์ที่ใช้ควรเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน เพราะโครงสร้างอสัณฐานมีช่องว่างในโครงสร้างมากจึงทำให้น้ำเข้าไปแทรกได้ดี ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์นั้นเกิดการบวมและขยายตัวมาเป็นเจลเปื่อย ซึ่งสัดส่วนของน้ำจะมากกว่าพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยประเภทที่ 1 เป็นไฮโดรเจลที่ได้จากกระบวนการทางฟิสิกส์ หรือเรียกว่าเจลเทียม ซึ่งเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ โดยพันธะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไฮโดรเจนของโมเลกุลจะเข้ามาจับกับอีกโมเลกุลหนึ่ง เจลที่ได้มักมีจุดหลอมเหลวสูง ส่วนประเภทที่ 2 ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งมักจะใส่สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงลงไป

ไฮโดรเจล คือพอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงในตัวกลางที่เป็นน้ำ และมีความสามารถในการดูดน้ำได้ดี มีลักษณะคล้ายเยลลี่ ไฮโดรเจลชอบน้ำเพราะมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอกซิล (COOH) และโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงเป็นตาข่ายจึงช่วยในการจับน้ำและดูดซึมเก็บน้ำเอาไว้



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจลเมื่อมีน้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้าง [22]

เมื่อไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวในน้ำจะมีลักษณะของน้ำที่อยู่ในไฮโดรเจล 3 แบบ คือ

1. Free water คือ น้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจล
2. Interfacial water คือ น้ำที่แทรกอยู่ในโมเลกุลของไฮโดรเจล
3. Bound water คือ น้ำที่ติดอยู่กับไฮโดรเจลด้วยพันธะไฮโดรเจน

#### 2.4.4 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล [24]

พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

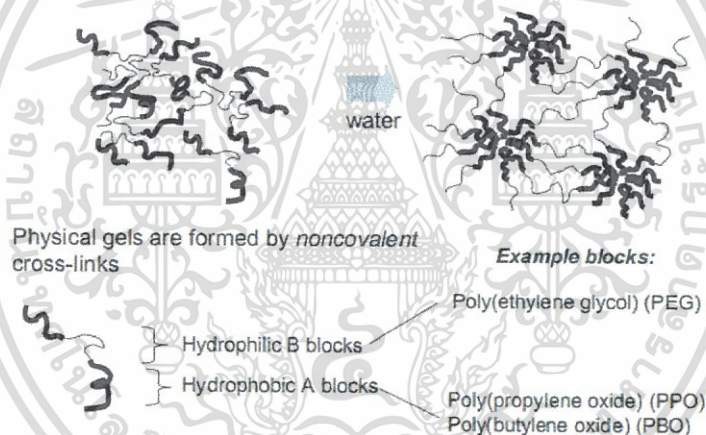
1. พันธะภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Intramolecular interaction) เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของมอนอเมอร์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (C) จึงทำให้มีพันธะโควาเลนต์เพื่อยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของคาร์บอน
2. พันธะระหว่างโมเลกุล (Intermolecular interaction) สามารถแบ่งออกได้หลายแบบ เช่น พันธะไฮโดรเจน ที่เกิดจากการดึงดูดอะตอมไฮโดรเจน โดยอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (EN) สูง เช่น F, O, N, Cl เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแรงไดโพล-ไดโพล ที่เกิดจากการมีแรงยึดเหนี่ยวหรือมีแรงผลักรวมของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่อ่อนมากที่สุด

จากพันธะต่างๆ ข้างต้น จะเห็นว่าพันธะภายใน โมเลกุลมีความแข็งแรงมากกว่า พันธะระหว่างโมเลกุล ดังนั้นการที่จะทำให้ลายโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเมอร์ ต้องใช้พลังงานที่สูงมาก

#### 2.4.5 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล

พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล มี 2 ลักษณะ คือ

1. พันธะเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslinked) โดยจะมีการทำให้เกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติ ด้วยพันธะไฮโดรเจน หรือแรงทางไฟฟ้าสถิต โดยจะมีการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มคล้ายปมของเชือก ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากเทคนิคที่เรียกว่า Freezing and thawing สมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิไม่สูง ประมาณ  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเรียกไฮโดรเจลที่มีพันธะเชื่อมโยงในลักษณะนี้ว่า Physical hydrogel หรือ Pseudogel



รูปที่ 2.12 แสดงการบวมน้ำของ Physical hydrogel [25]

2. พันธะเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical crosslinked) โดยจะมีการให้เกิดพันธะเชื่อมโยงที่เป็นพันธะโคเวเลนต์ หรือเป็นพันธะทางเคมีอื่นๆ โดยมีการใช้สารเชื่อมโยงเป็นสารเคมี เช่น สารประกอบพวกแอลดีไฮด์ และมีการใช้แสงหรือความร้อนในการเชื่อมโยง เช่น ริงส์ตีเอ็กซ์ ริงส์ตีแกมมา ซึ่งการเชื่อมโยงโดยวิธีนี้ จะได้พันธะเชื่อมโยงเป็นพันธะโคเวเลนต์ชนิดคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bond) ที่มีความแข็งแรงสูง

#### 2.4.6 กลไกและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล [23]

ไฮโดรเจลหรือสารซูเปอร์แอบซอร์เบนต์เมื่อดูดซับน้ำเข้าภายในโครงสร้างแล้วจะพองตัวได้มาก ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับ การแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้าง ปัจจัยที่มีผลในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คือ แรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) การเคลื่อนที่ของ Counter-ion และความชอบ (Affinity) ของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ (Polyelectrolyte) กับน้ำ และความยืดหยุ่นของโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์

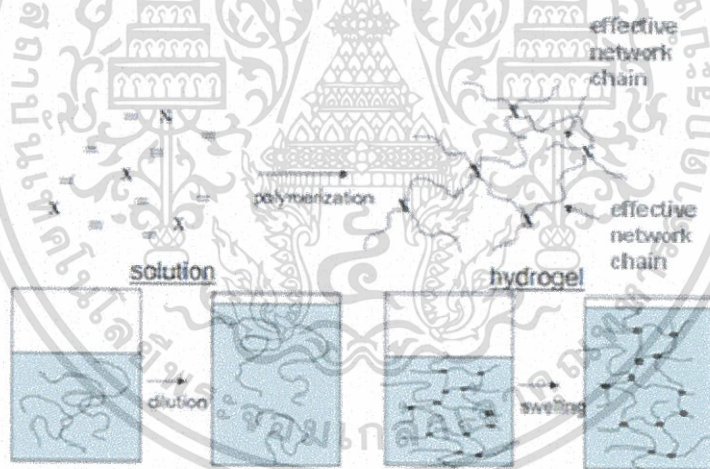
กลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 2.13 จากรูปเห็นว่ากลไกในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเกิดได้หลายแบบ และความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลก็เป็นผลโดยรวมจากกลไกต่างๆ เหล่านี้ ส่วนใหญ่ไฮโดรเจลเตรียมมาจากพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ คือ ประกอบด้วยหมู่ที่มีประจุบวกหรือลบอยู่ภายใน โมเลกุลจำนวนมาก ดังตัวอย่างในรูป 2.13 พอลิเมอร์ที่ใช้มีหมู่คาร์บอกซิล ( $\text{COO}^-$ ) ซึ่งจะดึงดูดน้ำเข้ามาได้ดี การดึงน้ำเข้ามาทำให้โครงสร้างภายในเกิดการพองตัว สายโซ่พอลิเมอร์มีการกระจายตัวมากขึ้น นอกจากนี้สายพอลิเมอร์อาจมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำอยู่ด้วย การนำพาน้ำเข้ามาภายในโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยหมู่ที่มีประจุ จะทำให้โอกาสที่หมู่ชอบน้ำอื่นๆ ที่มีอยู่จะเกิดพันธะกับน้ำ (เช่น พันธะไฮโดรเจน) ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

หมู่คาร์บอกซิเลตในพอลิเมอร์จะจับอยู่กับ โซเดียมไอออนเพื่อให้มีสภาพประจุที่เป็นกลาง เมื่อพอลิเมอร์ดูดซับน้ำเข้าในโครงสร้างตาข่าย โมเลกุลของน้ำซึ่งมีค่า Dielectric constant สูงกว่าแรงดึงดูดระหว่าง โซเดียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิเลต จะทำให้โซเดียมไอออนหลุดเป็นอิสระและกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างเจล ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) ภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจล แรงดันออสโมติกทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปสู่ภายในไฮโดรเจลเพื่อให้เกิดสภาพที่สมดุล เมื่อไฮโดรเจลอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีค่าลดลง ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำลดลง

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการพองตัว คือ ระดับการเชื่อมโยงสายโซ่พอลิเมอร์บริเวณที่เกิดการเชื่อมโยงจะมีการยึดตัวที่จำกัด ทำให้สายพอลิเมอร์บริเวณนั้นแยกออกจากส่วนอื่นและมีลักษณะขดเป็นวง (Coiled polymer) มีความแข็งมากและความไม่เป็นระเบียบ (Entropy) ของสายโซ่ลดลง ในขั้นตอนสุดท้ายของการดูดซับน้ำเป็นการเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการละลายได้ดี และแรงในการหดตัว (Retractive forces) เนื่องจากการเชื่อมโยง พบว่าโครงสร้างตาข่ายที่มีปริมาณการเชื่อมโยงสูง จะมีความหนาแน่นและเกิดแรงหดตัวมาก ทำให้ไฮโดรเจลมีระดับการพองตัวลดลงที่สภาวะสมดุล

จากกลไกการดูดซับน้ำสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลได้ดังนี้ [26]

1. แรงดันออสโมติก ถ้าความเข้มข้นของสารละลายภายในไฮโดรเจลสูงกว่าสารละลายภายนอก จะทำให้เกิดแรงดันออสโมติก น้ำจากภายนอกจะแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลได้ ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมากน้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมาก ทำให้เกิดการพองตัวได้ดี
2. แรงกระทำระหว่างน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสม จะสามารถเกิดแรงกระทำกับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนจะทำให้น้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
3. ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่มาก น้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นสูง แรงต้านการแพร่ของน้ำเพื่อเข้าสู่สมดุลจะต่ำ ทำให้น้ำเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
5. ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้ามีความหนาแน่นมากจะเป็นการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจลทำให้เกิดการพองตัวได้ไม่ดี



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล [25]

## 2.4.7 การนำไปใช้งาน

### 2.4.7.1 วัสดุทางการแพทย์ [27]

ไฮโดรเจลถูกนำมาใช้พัฒนาเป็นวัสดุทางการแพทย์ด้านการปิดบาดแผลเนื่องจากสามารถเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ เช่น การใช้เป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก เนื่องจากมีความชุ่มชื้นสูง ช่วยดูดซับน้ำเหลือง และของเหลวที่ไหลออกมาจากแผลได้ดี ในขณะเดียวกันออกซิเจนสามารถผ่านรูพรุนของเจลได้ ทำให้อวัยวะสามารถสร้างเนื้อเยื่อได้ดีกว่าปกติ และด้วยความใสทำให้สังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับแผลได้เป็นอย่างดีทั้งในแบบแผ่นและแบบเจล โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลจะดูดซับของเหลวที่ออกมาจากแผลและยังทำให้ผิวหนังนอกของแผลแห้ง ไฮโดรเจลมีหลายชนิด เช่น ไฮโดรเจลชนิดแบบโปร่งใสเพื่อทำให้ง่ายต่อการรักษาแผลบาดแผล ไฮโดรเจลแบบที่ไม่ยึดติดกับบาดแผลเพื่อที่เวลาดึงออกจะไม่ใช่ทำให้บาดแผลเสียหาย ซึ่งแต่ละชนิดของไฮโดรเจลจะขึ้นกับสภาวะการสังเคราะห์และวัสดุทางพอลิเมอร์ที่เลือกใช้

โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (NaCMC) เป็นหนึ่งในวัสดุที่นำมาใช้ทำไฮโดรเจล โดยมีพอลิโกลูโคสเป็นองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำไฮโดรเจล [27]

| Hydrogel wound dressing<br>(Producer) | Composition                                     |
|---------------------------------------|---|
| IntraSite™ Gel<br>(Smith and Nephew)  | Water<br>Propylene glycol<br>NaCMC              |
| GramGel™<br>(ConvaTec)                | Water<br>NaCMC<br>Propylene glycol<br>Pectin    |
| Purilon Gel™<br>(Coloplast)           | Water<br>CMC<br>Calcium alginate                |
| Aquacel Ag™<br>(ConvaTec)             | NaCMC<br>Silver ions (1.2%)<br>Calcium alginate |
| Silvercel™<br>(Johnson & Johnson)     | CMC<br>Silver ions (8%)                         |

#### 2.4.7.2 วัสดุกันน้ำแทนกระสอบทราย [28]

ถุงเอ็น- แสค (n-Sack) หรือกระสอบรุ่นใหม่ที่จะช่วยเสริมหรือทดแทนกระสอบทราย ที่มีปัญหาเรื่องขนานน้ำหนักทำให้ไม่สะดวกในการขนส่งและจัดเก็บรักษา ทั้งนี้ถุงเอ็น- แสค ทำมาจากไฮโดรเจลที่มีการพัฒนาสูตรที่เหมาะสม เมื่ออยู่ในสภาพปกติไม่โดนน้ำ ถุงนี้จะมีน้ำหนักเพียง 1 กิโลกรัม แต่เมื่อแช่น้ำ จะสามารถพองตัวได้ใน 1 ชั่วโมง และพองกว่า 100 เท่าโดยมีน้ำหนักประมาณ 10-15 กิโลกรัม สามารถใช้วางเสริมหรือทดแทนกระสอบทรายป้องกันน้ำเข้าบ้านเรือนได้ นอกจากนี้ยังสะดวกในการจัดเก็บเพราะเมื่อทำให้น้ำระเหยออกไปถุงจะยุบตัวลงเท่าเดิม สามารถเก็บรักษาไว้ใช้ใหม่ได้ 2-3 ครั้ง ซึ่งต่อไปทางนาโนเทคโนโลยีจะพัฒนาตัวถุงรวมถึงสารดังกล่าวให้สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติเมื่อหมดอายุการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงรูปวัสดุกันน้ำจากไฮโดรเจล

#### 2.4.7.3 คอนแทกเลนส์ [29]

คอนแทกเลนส์แบบใหม่จะมีการเพิ่มของประสิทธิภาพของการทำงานด้วยนวัตกรรมวัสดุซิลิโคน ไฮโดรเจล (silicone Hydrogel) ช่วยให้การส่งผ่านออกซิเจนสูงกว่าคอนแทกเลนส์วัสดุดั้งเดิม (hydrogel lens) อย่างน้อยห้าเท่า จึงช่วยป้องกันการขาดออกซิเจนของกระจกตา และช่วยป้องกันภาวะตาขร่าเกินวัย เมื่อใส่แล้วดวงตาจะแลดูขาว สว่างสดใส เป็นธรรมชาติแม้ใส่เวลานาน เหมาะแก่ผู้ที่ไม่สะดวกต่อการเปลี่ยนคอนแทกเลนส์บ่อยๆ เช่น นักบิน แอร์โฮสเตส รวมทั้งผู้ที่มีความจำเป็นต้องนั่งทำงานหน้าจอคอมพิวเตอร์เป็นเวลานานๆ ซึ่งในต่างประเทศสามารถใส่ได้ติดต่อกันนาน 6 วัน

#### 2.4.7.4 วัสดุโรยดินที่ให้ความชุ่มชื้น [30]

ใช้ทางด้านเกษตรกรรม โดยเติมลงในดินทำให้ดินมีคุณสมบัติที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของพืช ช่วยอุ้มน้ำในดิน ทำให้ดินมีความชุ่มชื้นสูง เมื่อพืชใช้น้ำในดินหมด ไฮโดรเจลจะค่อยๆ ปล่อยน้ำที่ดูดไว้ออกมา นอกจากนี้ยังช่วยดูดซับแร่ธาตุต่างๆ ในดินไม่ให้ถูกชะลงไปที่ดินชั้นล่างทำให้พืชสามารถได้รับประโยชน์จากแร่ธาตุหรือปุ๋ยในดินได้ดีขึ้น ทั้งยังสามารถนำมาใช้แทนดินในการเลี้ยงต้นไม้ประเภทไม้กระถาง ได้อีกด้วย

#### 2.4.7.5 วัสดุปลดปล่อยยา [30]

ไฮโดรเจลในแง่ของการเป็นสารนำส่งยาหรือ Drug delivery system ด้วยคุณสมบัติในการดูดซับของเหลวได้ดีจึงน่าจะดูดซับยาเก็บไว้แล้วปลดปล่อยยาออกมาในปริมาณที่ต้องการได้ ศาสตราจารย์ ดร. Zhibing Hu ผู้เชี่ยวชาญสาขาฟิสิกส์แห่งมหาวิทยาลัย North Texas ซึ่งเป็นหนึ่งในนักวิทยาศาสตร์ 100 คนของโลกที่ทำการศึกษา และพัฒนาไฮโดรเจลมาตั้งแต่ปี 1990 ได้ทำการสังเคราะห์ นาโนไฮโดรเจล (Nanohydrogel) ขึ้น เพื่อใช้ นาโนไฮโดรเจล เป็นสารนำส่งยาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถตอบสนองสภาวะต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปได้ เนื่องจากนาโนไฮโดรเจล สามารถดูดซับยาได้ในปริมาณมากและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย (Biocompatibility) และร่างกายสามารถย่อยสลายหรือกำจัดออกไปได้เอง

นาโนไฮโดรเจล (Nanohydrogel) คือ ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างขนาดรูพรุนขนาดเล็กกว่า 200 นาโนเมตร โดย ดร. Hu สังเคราะห์ ไฮโดรเจล อนุภาคนาโน โดยการผสมสารเคมีและน้ำกับไนโตรเจนได้ ไฮโดรเจลอนุภาคนาโนที่มีลักษณะเป็นทรงกลม จากนั้นก็แยกไฮโดรเจลอนุภาคนาโน ที่ได้ออกมาโดยการปั่นแยกทิ้งไว้ ไฮโดรเจลอนุภาคนาโน จะจับตัวกันเป็นผลึกด้วยพันธะเคมี ซึ่งขั้นตอนในการจับตัวกันเป็นผลึกนั้นสามารถควบคุมขนาดช่องว่างภายใน นาโนไฮโดรเจลได้ ขึ้นอยู่กับการควบคุมสภาวะแวดล้อมของ ไฮโดรเจลอนุภาคนาโน ที่กำลังจับตัวกัน จากขั้นตอนนี้จะส่งผลให้ได้ผลึก นาโนไฮโดรเจล ที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตรที่แตกต่างกัน และขนาดรูพรุนเหล่านี้เองที่มีผลต่อการปลดปล่อยยา และทำให้ นาโนไฮโดรเจล มีความไวต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง เช่น นาโนไฮโดรเจล บางชนิดมีความฉลาดเพียงพอที่จะรอกิจกรรมทั้งผ่านกระเพาะอาหารซึ่งมีความเป็นกรดสูงเมื่อไปยังลำไส้เล็กซึ่งค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นแล้วจึงจะทำการปลดปล่อยยาออกมา เพื่อป้องกันผลข้างเคียง ไม่พึงประสงค์จากการใช้ยาเช่น ทำให้เกิดการปวดท้อง หรือ บางชนิดไวต่ออุณหภูมิ เช่น เมื่อฉีดนาโนไฮโดรเจล ที่มียาอยู่เข้าสู่กระแสเลือด เมื่อร่างกายมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในกรณีที่เป็นไข้ นาโนไฮโดรเจล ก็จะปลดปล่อยยาออกมา แต่เมื่อใช้ลดอุณหภูมิร่างกายต่ำลง นาโนไฮโดรเจล ก็จะกักเก็บยาไว้ภายใน การทดลองเหล่านี้เป็นก้าวแรกในการตั้งโปรแกรม นาโนไฮโดรเจล ให้มีความฉลาดเพื่อใช้ในการนำส่งยาในบริเวณที่เฉพาะเจาะจงตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ดร. Hu เชื่อว่าจะสามารถพัฒนา นาโนไฮโดรเจล ที่สามารถฉีดเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย และถูกร่างกายกำจัดออกได้ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาที่ใช้งาน เช่นภายใน 1 เดือน หรือแม้กระทั่ง 1 วัน

#### 2.4.7.6 ผ้าอ้อม

ใช้คุณสมบัติพิเศษของนาโนไฮโดรเจลเป็นองค์ประกอบของผ้าอ้อมสำเร็จรูป โดยผ้าอ้อมในอนาคตจะสามารถตอบสนองต่ออุณหภูมิและความชื้นได้ เช่นเมื่อเด็กปัสสาวะออกมาจะมีความร้อนและชื้น นาโนไฮโดรเจล ภายในผ้าอ้อมก็จะดูดซับของเหลวไว้ภายใน และเมื่อดูดซับของเหลวจนหมดแล้ว อุณหภูมิก็จะลดลงส่งผลให้เกิดการกักเก็บของเหลวไว้ภายใน

#### 2.4.7.7 วัสดุทำกล้ำเนื้อเทียม

พบว่านาโนไฮโดรเจลมีความสามารถในการขยายตัวและหดตัวได้ จึงสามารถนำมาสร้างกล้ำเนื้อเทียม โดยนาโนไฮโดรเจลจะถูกโปรแกรมให้เกิดการตอบสนองต่อกระแสประสาทเหมือนกับกล้ำเนื้อปกติ โดยการยืดและหดตัวของ นาโนไฮโดรเจลจะสามารถทำให้แขนงอเข้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยึดออกได้ ซึ่งในอนาคตคาดว่าจะพัฒนานาโนไฮโดรเจลให้ทำงานทดแทนกล้ามเนื้อร่างกายที่สูญเสียไปได้

## 2.5 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [31]

### 2.5.1 สมบัติการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้น จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (defects) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสาน โมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

#### 1. กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility Mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (stress concentration) จากคิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

#### 2. วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้น การเลือกใช้ขึ้นกับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

##### ■ การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเอกสารนี้เห็นว่าการค้า  
ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\chi G = \chi H - T\chi S \quad (2.1)$$

$\chi G$  = การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม  
 $\chi H$  = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม  
 $\chi S$  = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม  
 $T$  = อุณหภูมิ (K)

#### ■ การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of Block or Graft Copolymers)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของ พอลิเมอร์แต่ละชนิด โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของ โคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
- โคบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
- โคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าโคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

#### ■ การเติมพอลิเมอร์ที่หมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of Functional/Reactive Polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน กับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือ โดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอฟีนส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของ มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโอฟีนส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสม ที่ได้รับความนิยม

ในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

- การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอโรเรเซชันในระหว่างการผสม (In-situ Grafting Polymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอโรเรเซชันในระหว่างการผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาตัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

- เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (initiator) ในระหว่างการผสม
- เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
- เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละ โมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง
- ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

### 2.5.2 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility)

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับ โมเลกุลจัดเป็นมโนทัศน์ทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏจักรเดี่ยวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มิประ โยชน์ในทางการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (Molecular miscibility) ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับศูนย์ ความมีขั้วคล้ายกัน และพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติอย่างหนึ่งของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดซึ่งละลายได้ในระดับ โมเลกุลและมีประ โยชน์ในทางการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ละลายกันไม่ได้ (Immiscible) ในระดับ

เอกลักษณะอันเอกลักรวมกันเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ผู้ใช้งาน โดยไม่ให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุล และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้ นานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (Strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาค และเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถเข้ากันได้ จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง ยิ่งไปกว่านั้นระบบชั้นนำหลายๆ ระบบมีการปรับปรุงระบบ ผสมรวมที่สำคัญ (Major synergistic improvement) มากกว่า 1 สมบัติ

## 2.6 การดูดซับ (Adsorption) [33]

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) และไคโตซาน กระบวนการนี้ใช้กำจัด โลหะหนักได้จนถึงระดับที่ยอมรับได้

### 2.6.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดื่มและน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Absorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยก โมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นเมื่อดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว สามารถนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนแปลงสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับสารละลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดีและระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือต้องการพื้นที่น้อย

## 2.6.2 ลักษณะการดูดซับ

การดูดซับแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)
2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waal's force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของแรง 2 ชนิด คือแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับ โมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้นซึ่งแต่ละชั้นของ โมเลกุลจะติดอยู่บนชั้น โมเลกุลก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของ โมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของการดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงนี้มีค่าน้อยการหลุดออกของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดซับทางเคมีนั้น จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง โมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ กลายเป็นสารเคมีประกอบใหม่ขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะคงอยู่ในรูปนั้นแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของ โมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) แต่การดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับได้ (reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่า อุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูง โดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์และแอกติเวตเตดซีลีกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามข้อเสีย คือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecular transfer)

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ
2. การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งในโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่พื้นผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นแรงต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นสิ่งที่ต้องคำนึง

### 2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

#### 2.6.4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface area)

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับและพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

#### 2.6.4.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Adsorbate characteristics)

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 2.6.4.3 อัตราเร็วของการปั่นกวน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรงซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการปั่นกวนของระบบ ถ้าน้ำการปั่นกวนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็น

ตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีการปั่นกววนสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 2.6.4.4 เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้จริง

#### 2.6.4.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน สามารถดูดซับได้เป็นอย่างดี ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับ

## 2.7 กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze-Drying) [34,35]

### 2.7.1 หลักการและขั้นตอนการทำแห้งแบบแช่แข็ง

Freeze drying คือขบวนการที่ทำให้ สารที่เปียกแห้ง ได้โดยทำให้สารนั้นเย็นจนแข็งตัว และระเหยและระเหยเอาน้ำแข็งออกไป การทำให้แห้งแบบ Freeze - Drying นี้รู้จักกันมานานแล้ว แต่เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากเครื่องมือราคาแพง เมื่อต้องใช้ระบบทำความเย็นจัดและเครื่องปั๊มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูด ให้เป็นสูญญากาศ และการใช้ ที่ต้องการเทคนิคเฉพาะ รวมทั้งการดูแลรักษา จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในระบบผลิตทั่ว ๆ ไป นอกจากผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น Biological Substances หรือผลิตภัณฑ์ยาบางชนิด ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ไม่สามารถทนต่อความร้อนสูง ที่ใช้กันในวิธีทำแห้งแบบทั่ว ๆ ไป ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยวิธีนี้นั้นมีคุณสมบัติของสารที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด สามารถคงตัวอยู่ได้นาน ณ อุณหภูมิห้อง และข้อดีที่สำคัญคือสามารถนำกลับมาละลายน้ำ (reconstitute) ได้ง่ายมาก ถ้าจะอธิบายให้ละเอียดมากขึ้น freeze drying ก็คือ การรักษาสภาพของสารที่เปียกหรือสารละลายในน้ำโดยผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้เย็นจนแข็ง และอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำ เกิดสภาวะน้ำแข็งระเหิด คือการเปลี่ยนจากสภาวะของแข็งเป็นสภาวะก๊าซ โดยไม่มีการละลาย และหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ และเอ็นไซม์ และมักจะรวมกับการแห้งโดยวิธีอื่น มีการทำให้มีความชื้นต่ำ และการดูดบรรยากาศให้เป็นสูญญากาศ

Freeze - Drying แบ่งเป็น 3 ขบวนการ คือ

1. Pre-freezing เป็นการลดอุณหภูมิของสารเพื่อทำให้เกิดก้อนผลึกของน้ำก่อนทำ Primary Drying จะทำให้สารแข็งตัวใน Freeze - Dryer (internal freezing) หรืออาจให้แข็งตัวในภาชนะเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษา เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือสนใจด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( external freezing ) ซึ่งความหนาของสารที่เหมาะสมเพื่อให้ Freezing Time และ Drying Cycle สั้น คือประมาณ 10 มม. หรือ ไม่ควรเกิน 15 มม. การละลายที่เป็นน้ำ Freezing Point คือ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  อาจจะมีปัญหาถ้าการละลายนั้น มีส่วนประกอบที่เป็นน้ำตาลหรือเกลือ Sodium Chloride อุณหภูมิของ Freezing Point จะต้องต่ำลง ไปอีกจาก  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  การที่ต้องทำให้วัตถุแข็งตัวก็เพื่อที่จะยึด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของแต่ละ Component ในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์นั้น แต่ โดยทั่วไป การลดอุณหภูมิที่  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ผลิตภัณฑ์แทบทุกชนิดจะแข็งตัว อย่างสมบูรณ์ภายใน 2-3 ชั่วโมง

2. Primary drying เป็นสภาวะระเหิด หรือการ Freeze - Drying โดยเฉพาะเพื่อดึงเอาน้ำแข็ง ออกจากผลิตภัณฑ์ เมื่อ Primary Drying เสร็จสมบูรณ์ น้ำแข็งจะละลายไปหมด และจะมีความชื้น หลงเหลืออยู่ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่แห้งจะดูดความชื้นนั้นไว้จึงต้องเอาความชื้นนั้นออกโดยใช้ Secondary Drying สิ่งที่แสดงว่า Primary Drying เสร็จสมบูรณ์คือ

- รอยต่อของน้ำแข็งและการที่แห้งหมดไป (ถ้าภาชนะเป็นแก้ว จะสังเกตเห็น)
- อุณหภูมิของการเพิ่มขึ้นไปจนถึงหรือใกล้กับสภาพแวดล้อม
- ความดันของ Drying Chamber ใกล้ กับ Condenser Chamber
- น้ำแข็งหรือความชื้นหายไปจากภาชนะบรรจุ ขณะที่อุณหภูมิไปถึงจุด

ถึงแม้ขบวนการ Primary Drying จะเสร็จสมบูรณ์แล้ว ก็มักจะให้เวลาของ Drying ต่อไป อีก 30 นาที หรือ 1 ชม. เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีน้ำหลงเหลืออยู่ สิ่งที่แสดงว่า Primary Drying ยังไม่เสร็จคือ

- ภาชนะบรรจุเมื่อนำออกจากตู้แล้ว สัมผัสรู้สึก "เย็น"
- สารที่แห้งจะหดตัวหรือสารละลายเป็นน้ำ

3. Secondary drying เป็นขบวนการดูดความชื้นที่หลงเหลือจาก Primary Drying เพื่อลด ปริมาณความชื้นจาก Primary Freeze - Drying เพื่อเพิ่มความคงตัวของสารที่มักจะมี ความชื้นจาก Primary Freeze - Drying หลงเหลือ

## 2.7.2 เครื่องมือและระบบที่ใช้ในขบวนการ Freeze-drying [34, 35]

### 2.7.2.1 Low Temperature Condenser

Condenser จะทำหน้าที่ดักจับไอน้ำในระบบไอน้ำที่อยู่เหนือผิว Product น้ำแข็งจะเคลื่อน ตัวไปสู่พื้นที่ความดันต่ำ (Low pressure area) คือบริเวณรอบๆผิว Condenser (อุณหภูมิต่ำกว่า) ส่วน ใหญ่จะอยู่ในช่วง  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วแต่ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้จะมี ประสิทธิภาพเพียงพอในการทำ Freeze - drying ซึ่งเครื่องมือที่ให้ condenser temperature ต่ำกว่า ย่อมมีประสิทธิภาพมากกว่า ทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง vapor pressure จะลดต่ำลงไปด้วย

ทำให้ความแตกต่าง vapor pressure ของ product ice และ condenser ice เพิ่มขึ้น นั่นคือการเพิ่ม rate of sublimation

### 2.7.2.2 High Vacuum

ปั๊มที่มีประสิทธิภาพซึ่งจะลดความดัน ในระบบให้เกิดสุญญากาศเพียงพอ (0.1 mm./Hg) เป็นสิ่งที่จำเป็นจะทำให้เกิดการระเหิดของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์และเป็นการกำจัดอากาศหรือ Non Condensable Gas ออกไป ลดแรงเสียดทานในระบบ ช่วยให้การเคลื่อนที่ของไอน้ำเกิดได้ดี และยังเป็น การป้องกันเกิดการเกิดออกซิเดชันระหว่างกระบวนการ และช่วงการเก็บรักษาด้วยโดยปกติ high vacuum ประมาณ 5-50 millitorr (0.005-0.05 mm./Hg) จะมีประสิทธิภาพ สูงสุด แต่ในเครื่องมือ Freeze Dryer ทั่ว ๆ ไป สามารถลดความดัน ได้ประมาณ 100-120 millitorr หรือต่ำกว่า ซึ่งนับว่า เพียงพอ (Int. Unit 1 millitorr or micron =  $10^{-3}$  Torr =  $10^{-3}$  mm./Hg)

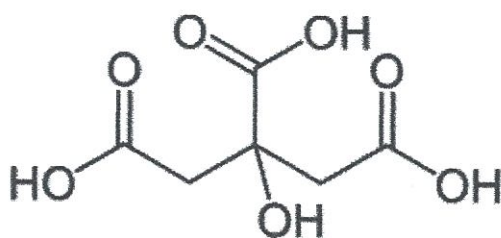
### 2.7.2.3 Controlled Heat to Product

การให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ ก็เพื่อที่จะช่วยให้การระเหิดเกิดได้อย่างสม่ำเสมอ แต่การเพิ่มอุณหภูมิต้องควบคุมให้เพียงพอที่จะผลักดันให้ ไอน้ำถูกกำจัดออกไปได้โดยที่ไม่เกิดการหลอมละลายกลับ (Melt Back) ของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ ซึ่งในทางปฏิบัติโดยทั่วไปเราจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ขณะทำ Freeze - Drying ให้ต่ำกว่าจุดที่ผลิตภัณฑ์จะเกิดการหลอมละลายกลับเล็กน้อย หลังจากน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไปเกือบหมดแล้ว จึงค่อยเริ่มเพิ่มความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ คือปรับอุณหภูมิให้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 20 C° หรือ 30 C° แล้วแต่ผลิตภัณฑ์ แต่ละตัว

## 2.8 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 Citric acid [36]

กรดซิตริกมีคุณสมบัติที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลายทาง นิยมใช้ใน อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เพื่อเป็นสารให้กลิ่น รส ในผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป นอกจากนั้นยังใช้เป็นสารลดความฝืด ลดการตกผลึกของน้ำผลไม้ และสามารถควบคุมระดับค่า pH ในผลิตภัณฑ์อาหารทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นโทษไม่สามารถเติบโตได้ จึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อการถนอมอาหารและเครื่องดื่ม กรดซิตริกยังมีคุณสมบัติแก้้ น้ำกระด้าง โดยกรดซิตริกจะจับกับ โลหะหนัก ในน้ำโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนกลายเป็นตะกอน Citric Complex ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงนิยมนำมาใช้ในการทำสบู่ และน้ำยาล้างจาน และกรดซิตริกยังมีคุณสมบัติในการขัดคราบสนิม และคราบสกปรกที่พื้น และผนัง จึงนิยมนำมาใช้ขัดสนิมในอุปกรณ์วัสดุเหล็กในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ด้วย



รูปที่ 2.15 โครงสร้าง โมเลกุลของกรดซิตริก [36]

### 2.8.2 เอ็น, เอ็น'-เมทิลีนบีสอะคริลาไมด์ (N,N'-Methylenebisacrylamide) [37]

|                  |  |
|------------------|--|
| ชื่อเคมี IUPAC : | N-[(Prop-2-enoylamino) methyl]prop-2-enamide   |
| ชื่อเคมีทั่วไป : | N,N'-Methylenebisacrylamide  |
| ชื่อพ้อง :       | Bis-acrylamide; N,N-Methylene-bis-acrylamide;<br>N,N'-Methylenebis(2-propenamamide); MBA; NAPP |
| สูตรโมเลกุล :    | $C_7H_{10}N_2O_2$  |
| สูตรโครงสร้าง :  |  |



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของ N,N'-Methylenebisacrylamide [37]

#### 2.8.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| ลักษณะ :                  | ผลึกสีขาว                 |
| น้ำหนักโมเลกุล :          | 154.17 g/mol              |
| จุดหลอมเหลว :             | 185 °C                    |
| ความหนาแน่น :             | 1.235 g/cm <sup>3</sup>   |
| ความสามารถในการละลายน้ำ : | 0.01-0.1 g/100 ml (18 °C) |

#### 2.8.2.2 ความเสถียรภาพ (Stability)

มีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติ เมื่อสลายตัวเกิดก๊าซอันตรายคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ในระหว่างพอลิเมอไรซ์ไม่เกิดสารที่เป็นอันตราย ไม่ทำปฏิกิริยากันกับเบสแก่ กรดแก่ และ oxidizing agent เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.2.3 ความเป็นพิษ (Toxicology)

อันตรายถ้ากลืนกินเข้าไป

### 2.8.3 แอมโมเนียม เปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulphate) [38]

ชื่อเคมีทั่วไป : Ammonium persulphate

ชื่อพ้อง : Ammonium peroxidesulphate , Peroxidisulfuric acid  
diammonium salt

สูตรโมเลกุล :  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$

สูตรโครงสร้าง :



รูปที่ 2.17 แสดง โครงสร้างของ Ammonium persulphate [38]

#### 2.8.3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

ลักษณะ : ไม่มีสีเป็นผลึกสีขาว

กลิ่น : ไม่มีกลิ่น

น้ำหนักโมเลกุล : 228.19 g/mol

จุดหลอมเหลว : 120°C (สลายตัว)

ความถ่วงจำเพาะ : 1.98 g/cm<sup>3</sup>

ค่า pH : 3.2 ที่ 20°C

ความสามารถในการละลายน้ำ : 582 g/l (20°C)

อุณหภูมิสลายตัว : >120 °C

#### 2.8.3.2 ความเสถียรภาพ (Stability)

มีความเสถียรอาจจะเกิดการลุกไหม้กับวัสดุที่ติดไฟได้ ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับเบส วัสดุติดไฟ  $\text{H}_2\text{O}_2$  สารประกอบซิลเวอร์ ซิงค์ และอาจจะสลายตัวได้ถ้าอยู่ในน้ำหรือในอากาศที่ชื้น

### 2.8.3.3 ความเป็นพิษ (Toxicology)

อันตรายหากทำการกลืนกิน เป็นอันตรายอย่างมากกับผนังเยื่อ อาจเป็นสาเหตุของโรคผิวหนังอักเสบ ตาอักเสบหรือระคายเคืองทางเดินหายใจ และอาจทำให้เกิดโรคมุมิแพ้ได้เนื่องจากการสูดดมหรือสัมผัสทางผิวหนัง

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sayed M. และคณะ [39] ศึกษาถึงการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และ โซเดียมอะซิเนต (SA) โดยการขึ้นรูปโดยใช้สารละลาย เปรียบเทียบผลปริมาณการฉายรังสีแกมมา (2.5, 5, 10, 15 และ 20 kGv) กับสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม CMC/SA ที่อัตราส่วนของ SA 20, 30 และ 40% ได้แก่ ปริมาณค่าสัดส่วนเจล (%) และการบวมตัว (%) พบว่า ปริมาณค่าสัดส่วนเจลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการฉายรังสี และการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ โซเดียมอะซิเนต สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเพิ่มปริมาณการฉายรังสี ศึกษาโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม CMC/SA โดย SEM พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มี SA ในอัตราส่วนมากขึ้น จะสามารถต้านแบคทีเรียชนิด Gram positive ได้ดี

หทัยกาญจน์ จันทร์ส่องแสง [40] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการเตรียม ไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย โดยใช้เอ็น, เอ็น-เมทิลินบิสอะคริลาไมด์เป็นสารก่อก้อนเชื่อม โยง และใช้แอม โนเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับไฟโบรอิน อัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูงกับไฟโบรอิน ปริมาณสารก่อก้อนเชื่อม โยง และปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ การดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ ค่าสัดส่วนเจล การดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายบัฟเฟอร์ การดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายเกลือ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล

ผลการทดลองพบว่าภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันฟิล์มผสมที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูงดูดซับน้ำได้ดีกว่าฟิล์มผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพราะมีหมู่คาร์บอกซิลเจตจำนวนมากขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อ 2% (w/v) ไฟโบรอินที่ 20:10 (v/v) มาศึกษาการเพิ่มปริมาณสารก่อก้อนเชื่อม โยงและสารริเริ่มปฏิกิริยาพบว่า สารก่อก้อนเชื่อม โยง และสารริเริ่มปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงความเสถียรของฟิล์ม แสดงว่าจำนวนพันธะเชื่อม โยงมากและความยาวของพอลิเมอร์เชื่อมขวางมีผลต่อรูปร่างที่เสถียรของฟิล์มหลังแช่น้ำ แต่การดูดซับน้ำที่สมดุลลดลง เนื่องจากพันธะเชื่อม โยงมากและลดขนาดช่องว่างที่จับโมเลกุลน้ำ ผลของไอออน

ประจุบวกที่มีต่อการดูดซับน้ำพบว่า  $\text{LiCl} > \text{NaCl} > \text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{AlCl}_3$  นั่นคือขนาดไอออนประจุบวกเล็กเกิดแรงดึงดูดกับหมู่  $\text{COO}^-$  ได้น้อยกว่าประจุบวกขนาดใหญ่ สำหรับประจุบวกไอออนมากกว่าหนึ่งเกิดแรงดึงดูดเชิงซ้อนกับหมู่  $\text{COO}^-$  จึงดูดน้ำได้ลดลง อิทธิพลความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย พบว่า फिल्मดูดซับน้ำที่สมดุลได้สูงสุดที่ pH 7 และดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำสุดที่ pH 14 फिल्मไฮโดรเจลแสดงสมบัติเป็น pH-sensitive hydrogel และการผสมไฟโบรอินใน फिल्मช่วยให้สมบัติเชิงกล เช่น ค่าความทนแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น แต่מודลัสของ फिल्मลดลง

ปิยนุตร์ น้อยด้วง และคณะ [41] การใช้มิวซิเลจแห้งจากเมล็ดแมงลักเป็นสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอม การใช้มิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักเป็นสารให้ความคงตัวแทนกัวร์กัมในการผลิต ไอศกรีมกล้วยหอม โดยแปรปริมาณของมิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักเป็น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.3, 0.4 และ 0.5 (w/w) พบว่า เมื่อปริมาณของมิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักเพิ่มขึ้น ไอศกรีมจะมีความหนืดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีผลทำให้อัตราการขึ้นฟูและการละลายลดลง เมื่อนำมาทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า ไอศกรีมกล้วยหอมที่เติมมิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักร้อยละ 0.5 ได้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัส การละลายในปากและความชอบโดยรวมสูงที่สุด และเมื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับ ไอศกรีมกล้วยหอมสูตรมาตรฐานที่ใช้กัวร์กัมเป็นสารให้ความคงตัว พบว่า สูตรที่ใช้มิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักมีเนื้อสัมผัส การละลายในปากและความชอบโดยรวมสูงกว่า และองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมที่เติม มิวซิเลจจากเมล็ดแมงลัก ร้อยละ 0.5 พบว่า มีความชื้น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใย ร้อยละ 73.83, 16.07, 4.90, 4.20, 1.00 และ 7.30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ ไอศกรีมกล้วยหอมสูตรมาตรฐาน พบว่า มีปริมาณเส้นใยสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สุวรรณ ละเอียดอินทร์ [42] งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว โดยจะมุ่งเน้นไปที่การปรับสภาพฟางข้าวก่อนนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นฟองน้ำเซลลูโลส การทดลองนี้จะทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อการปรับสภาพฟางข้าว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ คือ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที จากนั้นจึงนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมาผลิตเป็นฟองน้ำเซลลูโลสผ่านกระบวนการเตรียมวิสคอส (Viscose Process) โดยศึกษาผลของปริมาณเซลลูโลสในสารละลายวิสคอส อัตราส่วนระหว่างวิสคอสต่อโซเดียมซัลเฟตและปริมาณเส้นใยฝ้ายที่มีต่อการดูดซับน้ำ การพองตัว และการทนต่อแรงดึงของฟองน้ำเซลลูโลส จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟองน้ำเซลลูโลสได้แก่ สภาวะที่มีปริมาณเซลลูโลสในวิสคอสร้อยละ 6 อัตราส่วนระหว่างวิสคอสต่อโซเดียมซัลเฟต เป็น 1:2 และใส่เส้นใยฝ้ายร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักวิสคอส และฟองน้ำที่ผลิตได้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้สูงมากถึง 31 เท่าเมื่อเทียบกับน้ำหนักของฟองน้ำแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิมภรณ์ สมกิตติธรรม และคณะ [43] เมงลัก เป็นพืชล้มลุกที่จัดอยู่ในตระกูล Apiaceae (Labiatae) โดยพบว่า เม็ดเมงลักจะมีเยื่อหุ้มเมล็ด (Husk) ซึ่งจะให้ใยอาหารหรือไฟเบอร์ ที่มีคุณสมบัติดูดซับน้ำได้ถึง 25 เท่าของน้ำหนักแห้งของเมล็ด จึงมีการนำเมล็ดเมงลักมาปรุงเป็นของหวานเพื่อรับประทานเป็นยาเย็น ทานให้อิ่ม ช่วยระบาย และช่วยลดน้ำหนัก จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อต้องการศึกษาการเตรียมผงสำเร็จรูปพร้อมขงคิมจากวุ้นของเมล็ดเมงลัก จากการวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการพองตัวของวุ้นเมงลัก โดยนำเมล็ดเมงลักแห้งมาแช่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆพบว่า วุ้นเมงลักสามารถพองตัวได้เต็มที่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 90 นาที โดยมีความสามารถในการพองตัวเท่ากับ 88.6 มล./กรัม ในการนำวุ้นเมงลักที่พองตัวเต็มที่แล้วมาทำให้แห้งพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C นาน 6 ชั่วโมง จากการทดสอบคุณภาพมาตรฐานเปรียบเทียบกับ Psyllium seed ตามที่ระบุใน USP XXXI ในหัวข้อ Psyllium Hemicellulose พบว่า ผงวุ้นเมงลักแห้งที่ได้มีค่าความสามารถในการพองตัว เท่ากับ 200 มล./กรัม, ค่า Loss on drying เท่ากับ 7.23%, ค่า Total ash เท่ากับ 4.16% และค่า Acid insoluble ash เท่ากับ 0.3% โดยน้ำหนัก

กุลธิดา แซ่ฮุย [44] ได้ศึกษาการเตรียมผงสารเมือกแห้งจากเม็ดเมงลัก และเตรียมไฮโดรเจลจาก Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) ผสมกับสารเมือกจากเม็ดเมงลัก เนื่องจากสารเมือกจากเม็ดเมงลักมีสมบัติการดูดซับน้ำได้ดี จึงเหมาะที่จะนำมาพัฒนาและเตรียมเป็นไฮโดรเจล โดยศึกษาปริมาณของสารเมือกเมงลัก ปริมาณสารเชื่อม โยง (crosslinking agent) ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ผลของอุณหภูมิในขณะที่ทำการผสมที่มีต่อพฤติกรรมการพองตัวและสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล ผลจากการทดสอบ พบว่า อุณหภูมิของปฏิกิริยาไม่มีผลต่อการเกิดพันธะเชื่อม โยงในสารเมือกจากเม็ดเมงลัก แต่มีผลกระทบต่อ การเกิด Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) โดยที่อุณหภูมิสูงเกิดพอลิเมอร์ได้มาก เมื่อสารเชื่อม โยงและตัวริเริ่มปฏิกิริยามีน้อย ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วย FTIR, TGA และ SEM พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงว่า สารเมือกจากเมงลักสามารถนำมาทำเป็นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีความสามารถดูดซับน้ำได้ โดยใช้สารเชื่อม โยงเอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA)

พดาร์ตน์ นิลเจียรนัย และคณะ[45] ศึกษาการออกแบบและการเตรียมไฮโดรเจลสังเคราะห์ สำหรับประยุกต์ใช้งานชีวการแพทย์เพื่อใช้เป็นวัสดุปิดแผล ซึ่งทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS) และเกลือ โซเดียม (AMPS-Na<sup>+</sup>) โดยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอนุโมลติสระ ในตัวกลางที่เป็นน้ำ ใช้ 4,4'-Azo-bis(4cyanopentanoic acid) และ N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) เป็นตัวริเริ่มและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเชื่อมต่อสายโซ่ ตามลำดับ ในการทดลองได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลาย มอนอเมอร์ AMPS-Na<sup>+</sup> 30-50%w/v และปริมาณของ MBA ในช่วง 0.1-2.5% mole จากผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้น 40% และ 50%w/v AMPS-Na<sup>+</sup> ให้แผ่นไฮโดรเจลที่มีความคงรูป ในขณะที่ 30% w/v AMPS-Na<sup>+</sup> จะได้แผ่นไฮโดรเจลที่มีความเหนียวและไม่คงรูป จากนั้นทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้อง พบว่าความเข้มข้นของ MBA มีผลต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นไฮโดรเจลคือเมื่อเพิ่มปริมาณ MBA จะทำให้แผ่นไฮโดรเจลที่ได้ลักษณะง่ายขึ้นและมีความยืดหยุ่นลดลง นอกจากนี้พบว่าอัตราการผ่านออกของไอน้ำจากแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นมีความสามารถในการให้ไอน้ำผ่านได้ในอัตราที่เหมาะสมในช่วง 83-121 g/hr.m<sup>2</sup> ช่วยลดการสูญเสียน้ำและรักษาความชุ่มชื้นบริเวณรอบบาดแผลเพื่อช่วยในกระบวนการหายของแผล ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาไฮโดรเจลนี้เพื่อนำไปใช้ได้จริงในการแพทย์ต่อไป

รัตนา วงศ์วัฒนเสถียรและคณะ[46] ศึกษาการสังเคราะห์ซูเปอร์แอบซอร์เบนต์พอลิเมอร์ โดยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย ซึ่งใช้เวลาพอลิเมอร์ไรซ์สั้นสำหรับอะคริลิกแอซิดและอะคริลาไมด์มอนอเมอร์ในตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ (แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต / เอ็น,เอ็น,เอ็น-เททระเมทิลเอทิลีนไดเอมีน) ศึกษาชนิดของตัวเชื่อมขวาง (เอ็น,เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์, เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต และฟอร์มัลดีไฮด์) ในภาวะที่มีการเกิดฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของกรดอะคริลิกและ NaHCO<sub>3</sub> และสแตบิไลเซอร์ด้วย PF127 และใช้รอบกวานที่ 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โคลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ นำมาคั่งน้ำออกโดยตกตะกอนในเมทานอลที่มากเกินไป แล้วอบให้แห้งโดยใช้เตาอบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ศึกษาการดูดซึมน้ำ ณ ภาวะบวมตัวเต็มที่ เทียบกับเวลาของไฮโดรเจลในน้ำกลั่น นอกจากนี้ยังศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของโคลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสารละลายเกลือต่าง ๆ และในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นกรด-เบสต่าง ๆ พฤติกรรมการบวมตัวของแอบซอร์เบนต์ที่มีความสัมพันธ์กับ โครงสร้างทางเคมี สัดส่วนและธรรมชาติของสารละลายเกลือต่าง ๆ อิทธิพลของตัวแปรของปฏิกิริยาต่อการดูดซึมน้ำของโคลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โคลพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยมีส่วน โมลของอะคริลาไมด์ที่ 0.1, ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตที่  $2.3 \times 10^{-3}$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร, เอ็น, เอ็น, เอ็น, เอ็น-เททระเมทิลเอทิลีนไดเอมีน  $1.0 \times 10^{-2}$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร, กรดอะคริลิกที่ไม่ได้ทำให้เป็นกลาง, เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์  $4.0 \times 10^{-3}$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร, PF127 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ NaHCO<sub>3</sub>  $2.48 \times 10^{-1}$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ค่าการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุดวัดได้ 2,196 ซึ่งเท่ากับ 14 เท่าของน้ำหนักแห้ง และสามารถดูดซึมน้ำได้ 1,628 ซึ่งเท่ากับ 14 เท่าของน้ำหนักแห้งภายในเวลา 10 นาทีการคอมเพล็กซ์ของพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์) กับสารช่วยตกตะกอน Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·8H<sub>2</sub>O โดยเกิดพันธะเคมีระหว่างไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะและคาร์บอนซีกติกแอซิดหรือลิแกนด์เอไมด์ภายในพอลิเมอร์ สารช่วยตกตะกอนคอมเพล็กซ์ พอลิเมอร์นี้ให้ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้สารช่วยตกตะกอนที่ไม่ได้เกิดเป็นคอมเพล็กซ์

Pourjavadi A. และคณะ [47] ศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับน้ำที่ยืดจากคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสและ โซเดียมอัลจิเนต ซึ่งได้ทำการเตรียมโดยใช้เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA) เป็นสารก่อก้อนระเชื่อม โยง และใช้แอม โมเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการแปรปริมาณอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสและ โซเดียมอัลจิเนต อุณหภูมิในการผสม ปริมาณของ MBA และ APS ต่อสมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มที่สามารถดูดซับได้ในน้ำกลั่น และสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นกรด-ด่างต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นฟิล์มที่สามารถดูดซับได้ในสารละลายเกลือ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ ชนิดประจุบวกของสารละลายเกลือ และชนิดสารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่ง จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่แผ่นฟิล์มสามารถดูดซับได้ในน้ำกลั่นมีค่ามากขึ้นเมื่อมีปริมาณของคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น และแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีการตอบสนองในสารละลายบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน แนวโน้มของปริมาณน้ำสมดุลที่แผ่นฟิล์มสามารถดูดซับได้ในสารละลายเกลือเป็นดังนี้  $Na^+ > Ca^{2+} > Fe^{3+}$  และปริมาณน้ำสมดุลที่แผ่นฟิล์มสามารถดูดซับได้ในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่ง เป็นดังนี้  $LiCl > NaCl > KCl$  ตามลำดับ

Pourjavadi A. และคณะ [48] ศึกษาการสังเคราะห์และลักษณะการบวมพองของไฮโดรเจลที่เป็นวัสดุดูดซับน้ำที่ยืดด้วยวิธีการต่อกิ่งขาลูปซึ่งเป็นส่วนหัวของกลูต้าไมด์ด้วยกรดอะคริลิก การสังเคราะห์ไฮโดรเจลเกิดจาก 2 กระบวนการ คือ การเกิดพอลิเมอร์แบบเชื่อม โยงและการเกิด การต่อกิ่งโคพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์กรดอะคริลิกในสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน ชั้นแรกจะใช้ แอม โมเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มที่มีสมบัติละลายน้ำได้ และเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์เป็นสาร เชื่อม โยง โดยปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์ไฮโดรเจลนี้แตกต่างกันไปตามตัวแปรของการเกิด ปฏิกิริยาซึ่งมีผลต่อการบวมพองของผลิตภัณฑ์ สุดท้ายการพิจารณาตัวแปรเหล่านี้ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำสูงสุดของไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ แอม โมเนียมเพอร์ซัลเฟต กรดอะคริลิก และเปอร์เซินของการสะเทิน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นคือ 3,050 กรัมต่อกรัม (น้ำกลั่น) และเมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานพื้นผิวของไฮโดรเจลแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM) แล้วพบว่ามึรูพรุนขนาดนาโน 20-100 นาโนเมตร นอกจากนี้ ยังมีตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล ได้แก่ ความ เป็นกรด-ด่างของน้ำ ความว่องไวต่อสารละลายเกลือและส่วนผสมของตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การวิจัยและการดำเนินงาน

#### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เม็ดแมงลัก: ตราไรท์พิย์
2. คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โซเดียม น้ำหนักโมเลกุลสูง (Carboxymethylcellulose Sodium salt) loss on drying (110 °C)  $\leq 15\%$ , pH 5.5-8.5, (DS = 0.6-0.95) ของบริษัท Fluka
3. น้ำกลั่น
4. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  ของบริษัท UNIVA MW = 228g/mol เตรียมให้มีความเข้มข้น 0.1 M
5. เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (N, N-methylene-bis-acrylamide) ของบริษัท CARLO MW = 154.17g/mol

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier Transform Spectroscopy, FTIR) ของบริษัท Perkin Elmer Ltd.
2. เครื่องเทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermal gravimetric analysis, TGA) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น PYRIS 1 TGA
3. เครื่องเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง รุ่น cool safe 110 ของบริษัท Scientific Promotion Co.Ltd.
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งของบริษัท Scientific Promotion Co.Ltd. รุ่น BP221 S
5. ตู้อบ
6. ผ้าขาวบาง
7. แท่นให้ความร้อน (Heater)
8. เครื่องปั่นกวน
9. เขยือกพลาสติก
10. บีกเกอร์
11. เทอร์โมมิเตอร์
12. ตะแกรงลวด 200 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การเตรียมไฮโดรเจลจากผงวุ้นแมงลักแห้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง M/CMC ที่มีต่อสมบัติของไฮโดรเจลรูปท่อนโดยไม่ใส่สารเชื่อมโยง

1. นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกันในน้ำกลั่น 50 มล. ดังตารางที่ 3.1 และทำการปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปของไฮโดรเจลรูปท่อน

| สูตรที่ | M (กรัม) | CMC (กรัม) |
|---------|----------|------------|
| 1       | 2        | 0          |
| 2       | 2        | 0.25       |
| 3       | 2        | 0.50       |
| 4       | 2        | 1          |
| 5       | 0        | 2          |

หมายเหตุ CMC = Carboxymethylcellulose

M = Mucilage gel

MBA = N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

APS = Ammonium persulfate

2. นำไปขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่น นำไปแช่แข็งที่ตู้เย็นอุณหภูมิ -80 °C แล้วนำไปทำแห้งแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -102 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณสารก่อกวนระเหยयोग MBA ที่มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจล

1. นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกันในน้ำกลั่น 50 มล. ดังตารางที่ 3.2 และทำการปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมขึ้นรูปไฮโดรเจลรูปทรง

| สูตรที่ | M (กรัม) | CMC (กรัม) | MBA (กรัม) | APS (กรัม) |
|---------|----------|------------|------------|------------|
| 6       | 2        | 0          | 0.1        | 0.1        |
| 7       | 2        | 0.25       | 0.1        | 0.1        |
| 8       | 2        | 0.50       | 0.1        | 0.1        |
| 9       | 2        | 1          | 0.1        | 0.1        |
| 10      | 0        | 2          | 0.1        | 0.1        |
| 11      | 2        | 0          | 0.3        | 0.1        |
| 12      | 2        | 0.25       | 0.3        | 0.1        |
| 13      | 2        | 0.50       | 0.3        | 0.1        |
| 14      | 2        | 1          | 0.3        | 0.1        |
| 15      | 0        | 2          | 0.3        | 0.1        |
| 16      | 2        | 0          | 0.5        | 0.1        |
| 17      | 2        | 0.25       | 0.5        | 0.1        |
| 18      | 2        | 0.50       | 0.5        | 0.1        |
| 19      | 2        | 1          | 0.5        | 0.1        |
| 20      | 0        | 2          | 0.5        | 0.1        |

หมายเหตุ CMC = Carboxymethylcellulose

M = Mucilage gel

MBA = N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

APS = Ammonium persulfate

3. นำไปขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่น นำไปแช่แข็งที่ตู้เย็นอุณหภูมิต่ำ -80 °C แล้วนำไปทำแห้งแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำ -102 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 ศึกษาปริมาณ Citric acid ที่มีต่อสมบัติของไฮโดรเจลรูปทรง

- นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกันตามลำดับดังตารางที่ 3.3 และทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมขึ้นรูปไฮโดรเจลรูปทรง

| สูตรที่ | M (กรัม) | CMC (กรัม) | CA (กรัม) |
|---------|----------|------------|-----------|
| 16      | 2        | 0          | 0.1       |
| 17      | 2        | 0.25       | 0.1       |
| 18      | 2        | 0.5        | 0.1       |
| 19      | 2        | 1          | 0.1       |
| 20      | 0        | 2          | 0.1       |
| 21      | 2        | 0          | 0.3       |
| 22      | 2        | 0.25       | 0.3       |
| 23      | 2        | 0.5        | 0.3       |
| 24      | 2        | 1          | 0.3       |
| 25      | 0        | 2          | 0.3       |

หมายเหตุ CMC = Carboxymethylcellulose

M = Mucilage gel

CA = Citric acid

- นำไปขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่น นำไปแช่แข็งที่ตู้เย็นอุณหภูมิ -80 °C แล้วนำไปทำแห้งแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -102 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

### 3.4 การทดสอบสมบัติของไฮโดรเจลรูปทรง

#### 3.4.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน

นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาทำการตรวจวิเคราะห์โดยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในช่วง

ความยาวคลื่น  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมชิ้นตัวอย่างโดยบดผสมระหว่างไฮโดรเจลที่เตรียมได้ประมาณ 0.01 มิลลิกรัมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ประมาณ 1 มิลลิกรัม
2. นำไฮโดรเจลกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่บดได้มาทำให้เป็นแผ่นบาง โดยใช้เครื่องอัดแผ่นที่ความดัน 10 บาร์ เป็นเวลา 2 นาที
3. นำแผ่นตัวอย่างที่ได้มาวางลงบนแผ่นแม่เหล็กและประกบด้วยแผ่นแม่เหล็กอีกแผ่นเพื่อยึดแผ่นตัวอย่างไว้
4. จากนั้นนำมาใส่ในเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดยทำการสแกนเครื่องด้วยฟิล์มพอลิสไตรีน (Polystyrene) สแกนเป็นจำนวน 6 ครั้ง เพื่อตรวจว่าเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) สามารถตรวจวัดได้ตามมาตรฐานหรือไม่จากนั้นจึงทำการวัดตัวอย่าง ซึ่งทำการวัดในช่วง  $400-4000\text{ cm}^{-1}$
5. ทำซ้ำจนครบทุกสูตร

#### 3.4.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

ทดสอบการดูดซับน้ำ (%Water uptake) การดูดซับน้ำที่สมดุล (%Equilibrium swelling) การกักเก็บน้ำ (%Water retention) และของแข็งที่เหลือจากการแช่น้ำ (%Gel fraction)

1. ตัดตัวอย่างแต่ละสูตรที่เตรียมได้ ให้มีขนาด  $1 \times 1$  นิ้ว
2. ชั่งน้ำหนักของตะแกรงลวดเปล่าขนาด 200 mesh (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) และบันทึกผล
3. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างไฮโดรเจล (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) และบันทึกผล
4. นำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นแช่น้ำต่อจนครบ 72 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้จนถึงค่าที่อิ่มตัวสูงสุดแล้ว นำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำ

$$\% \text{ การดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\% \text{ การดูดซับน้ำที่สมดุล} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำที่สมดุล} - \text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\% \text{ การเก็บน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักที่เหลือหลังจากวางไว้ในอุณหภูมิต้อง}}{\text{น้ำหนักบวมตัวมากที่สุด}} \times 100 \quad (3.3)$$

6. นำชิ้นงานที่เหลือจากสมการ (3.3) มาอบแห้ง แล้วคำนวณหาน้ำหนักของแข็งที่เหลือ

$$\% \text{ ของแข็งที่เหลือ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำที่สมดุลและอบแห้งแล้ว}}{\text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.4)$$

### 3.4.3 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล

เตรียมชิ้นงานขนาด 1\*1 นิ้ว โดยนำชิ้นงานไปวางในเคชเคเตอร์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 70% (เตรียมจากสารละลายอิ่มตัว NaCl วางไว้เป็นเวลา 2 สัปดาห์) จากนั้นนำมาซ้อนกันให้มีความหนา 1 นิ้ว นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบแรงกดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (5K) โดยใช้ความเร็วในการกดชิ้นงาน เท่ากับ  $2.5 \pm 0.25$  มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อหาค่าความแข็งแรงต่อความโค้งงอ (Flexural strength) ที่เสียบรูปไป 1.7 cm

### 3.4.4 การทดสอบหาจำนวนรูพรุน [49]

3.4.4.1 ชั่งน้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลรูพรุน (W)

3.4.4.2 วัดปริมาตรของเฮกเซนเริ่มต้นในขวดวัดปริมาตร ( $V_1$ )

3.4.4.3 นำไฮโดรเจลรูพรุน จากข้อ 3.4.4.1 จุ่มลงในเฮกเซน แล้ววัดปริมาตรรวม ( $V_2$ )

3.4.4.4 แช่ทิ้งไว้ 5 นาที แล้วค่อยเอาไฮโดรเจลรูพรุนออกจากเฮกเซน วัดปริมาตรที่เหลือของเฮกเซน ( $V_3$ )

โดยที่

$$\text{ปริมาตรของไฮโดรเจลรูพรุน} = V_2 - V_3 \quad (3.5)$$

$$\text{ปริมาตรของเฮกเซนภายในไฮโดรเจลรูพรุน} = V_1 - V_3 \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ปริมาตรรวมของไฮโดรเจลรูพรุน (V)} &= (V_2 - V_1) + (V_1 - V_3) \\ &= V_2 - V_3 \quad (3.7) \end{aligned}$$

$$\therefore \% \text{ จำนวนรูพรุนของไฮโดรเจลรูพรุน} = (V_1 - V_3) / (V_2 - V_3) \times 100 \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 การทดสอบหาความหนาแน่น

เตรียมชิ้นงานขนาดประมาณ 1\*1 นิ้ว วัดปริมาตรของชิ้นงาน (ความยาว\*ความกว้าง\*ความหนา) และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน แล้วคำนวณหาค่าความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่น (D)} = \frac{\text{น้ำหนักของชิ้นงาน (M)}}{\text{ปริมาตรของชิ้นงาน (V)}} \quad (3.9)$$

### 3.4.6 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน Thermal gravimetric analyzer (TGA)

ใช้ TGA วิเคราะห์ความสามารถทนความร้อนของไฮโดรเจลรูปฟรอนและวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสาร ข้อมูลที่ได้บอกองค์ประกอบที่มีในตัวอย่าง และใช้ตรวจสอบการเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ โดยนำชิ้นงานมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ สภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

Heating rate 10°C /min ช่วงอุณหภูมิ 50-700 °C ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน

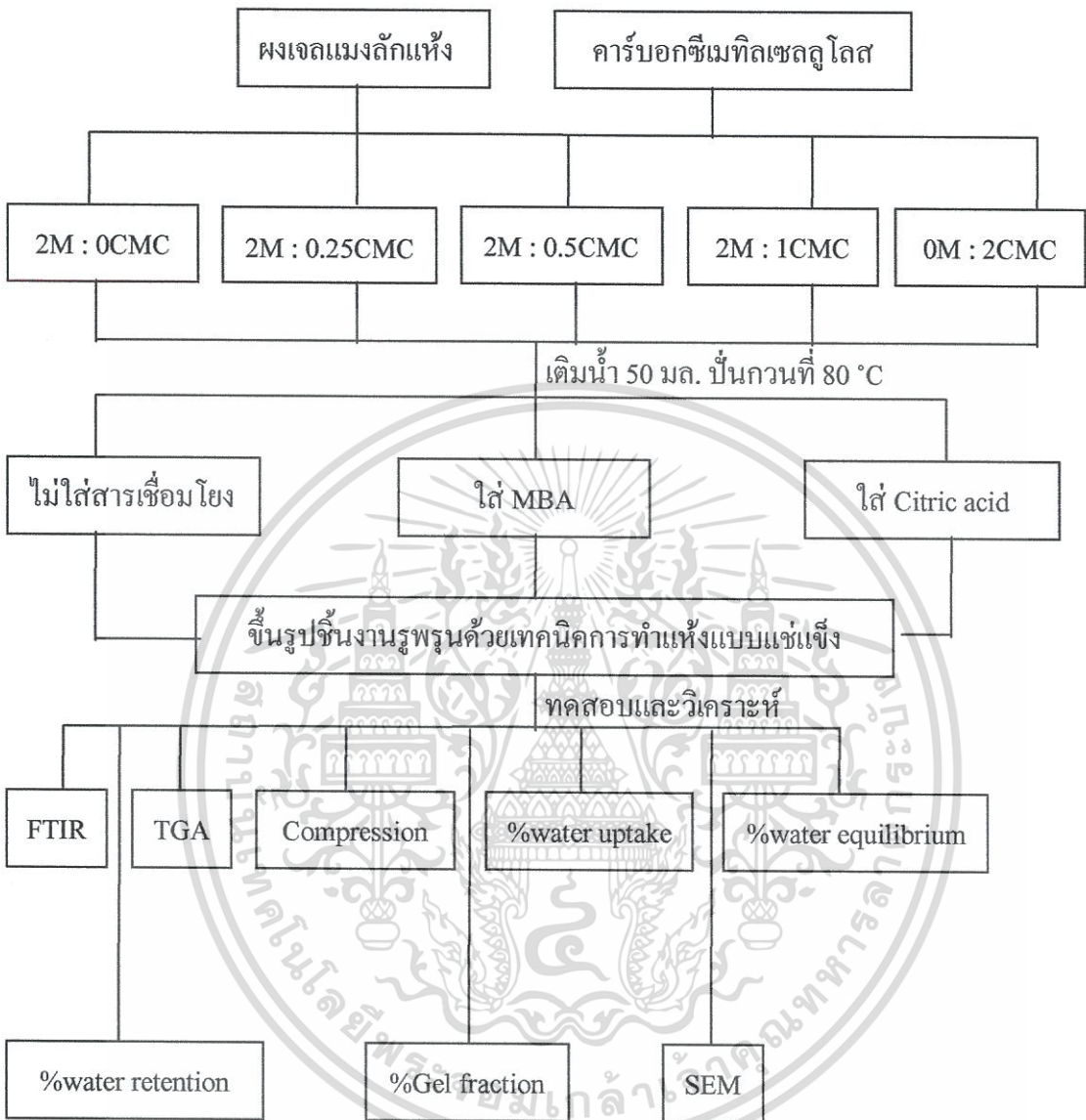
มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเตรียมตัวอย่างโดยให้น้ำหนักของตัวอย่างไม่เกิน 20 มิลลิกรัม
2. ทำการเทียบมาตรฐาน (Calibrate) เครื่องเทอร์มัลกราวิเมทรี (TGA) โดยใช้ถ้วยเปล่า
3. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ใส่ลงในถ้วย
4. ทำการวิเคราะห์ตั้งแต่อุณหภูมิ 50°C จนถึงอุณหภูมิ 700°C โดยทำการ Hold ไว้ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 15 นาที ให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 10 °C ต่อนาที และให้อัตราการเย็นตัวเป็น 20 °C ต่อนาที
5. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจะได้กราฟการสลายตัวออกมาและทำกราฟอนุพันธ์
6. ทำซ้ำจนครบทุกสูตร

### 3.4.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM - 5410LV ศึกษาลักษณะความเป็นรูพรุนในไฮโดรเจล โดยทำการตัดชิ้นงานในแนวภาคตัดขวาง (Cross section)

### 3.5 สรุปแผนผังการเตรียมไฮโดรเจลรูปทรงแปดหน้า



รูปที่ 3.3 แสดงสรุปแผนผังการเตรียมไฮโดรเจลรูปทรงแปดหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเตรียมไฮโดรเจลรูพรุนจากสารเมือกแมงลัก (Mucilage gel, M) ผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) โดยวิธี Freeze-drying แล้วเปรียบเทียบสมบัติของไฮโดรเจลรูพรุนเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ CMC ซึ่งผลการทดลองแปรตามอัตราส่วนระหว่าง M ต่อ CMC โดยเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของสารเชื่อมโยง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ N, N'-methylene-bis-(acrylamide) (MBA) และ Citric Acid (CA) เป็นสารเชื่อมโยง สมบัติที่ทำการทดสอบ ได้แก่ สัมฐานวิทยา การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติการดูดซับน้ำ การกักเก็บน้ำ ส่วนที่ไม่ละลายของไฮโดรเจลรูพรุน สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล

#### 4.1 ศึกษาอัตราส่วนของ CMC และสารเมือกแมงลักที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของไฮโดรเจลที่มีและไม่มีสารก่อก้อนระเชื่อมโยง

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปไฮโดรเจลรูพรุน

| สูตร | M (กรัม) | CMC (กรัม) | MBA (กรัม) | CA (กรัม) | APS (กรัม) | สัญลักษณ์       |
|------|----------|------------|------------|-----------|------------|-----------------|
| 1    | 2        | 0          | -          | -         | 0.1        | M2CMC0          |
| 2    | 2        | 0.25       | -          | -         | 0.1        | M2CMC0.25       |
| 3    | 2        | 0.5        | -          | -         | 0.1        | M2CMC0.5        |
| 4    | 2        | 1          | -          | -         | 0.1        | M2CMC1          |
| 5    | 0        | 2          | -          | -         | 0.1        | M0CMC2          |
| 6    | 2        | 0          | 0.1        | -         | 0.1        | M2CMC0MBA0.1    |
| 7    | 2        | 0.25       | 0.1        | -         | 0.1        | M2CMC0.25MBA0.1 |
| 8    | 2        | 0.5        | 0.1        | -         | 0.1        | M2CMC0.5MBA0.1  |
| 9    | 2        | 1          | 0.1        | -         | 0.1        | M2CMC1MBA0.1    |
| 10   | 0        | 2          | 0.1        | -         | 0.1        | M0CMC2MBA0.1    |
| 11   | 2        | 0          | 0.3        | -         | 0.1        | M2CMC0MBA0.3    |
| 12   | 2        | 0.25       | 0.3        | -         | 0.1        | M2CMC0.25MBA0.3 |
| 13   | 2        | 0.5        | 0.3        | -         | 0.1        | M2CMC0.5MBA0.3  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|    |   |      |     |     |     |                 |
|----|---|------|-----|-----|-----|-----------------|
| 14 | 2 | 1    | 0.3 | -   | 0.1 | M2CMC1MBA0.3    |
| 15 | 0 | 2    | 0.3 | -   | 0.1 | M0CMC2MBA0.3    |
| 16 | 2 | 0    | 0.5 | -   | 0.1 | M2CMC0MBA0.5    |
| 17 | 2 | 0.25 | 0.5 | -   | 0.1 | M2CMC0.25MBA0.5 |
| 18 | 2 | 0.5  | 0.5 | -   | 0.1 | M2CMC0.5MBA0.5  |
| 19 | 2 | 1    | 0.5 | -   | 0.1 | M2CMC1MBA0.5    |
| 20 | 0 | 2    | 0.5 | -   | 0.1 | M0CMC2MBA0.5    |
| 21 | 2 | 0    | -   | 0.1 | 0.1 | M2CMC0CA0.1     |
| 22 | 2 | 0.25 | -   | 0.1 | 0.1 | M2CMC0.25CA0.1  |
| 23 | 2 | 0.5  | -   | 0.1 | 0.1 | M2CMC0.5CA0.1   |
| 24 | 2 | 1    | -   | 0.1 | 0.1 | M2CMC1CA0.1     |
| 25 | 0 | 2    | -   | 0.1 | 0.1 | M0CMC2CA0.1     |
| 26 | 2 | 0    | -   | 0.3 | 0.1 | M2CMC0CA0.3     |
| 27 | 2 | 0.25 | -   | 0.3 | 0.1 | M2CMC0.25CA0.3  |
| 28 | 2 | 0.5  | -   | 0.3 | 0.1 | M2CMC0.5CA0.3   |
| 29 | 2 | 1    | -   | 0.3 | 0.1 | M2CMC1CA0.3     |
| 30 | 0 | 2    | -   | 0.3 | 0.1 | M0CMC2CA0.3     |

M = Mucilage gel

CMC = Carboxymethylcellulose

MBA = N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

CA = Citric acid


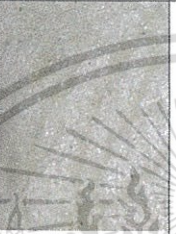














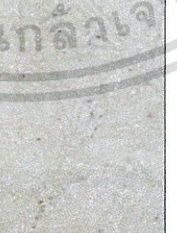

APS = Ammonium persulfate

นำส่วนผสมต่างๆ ตามระบุไว้ในแต่ละสูตรมาผสมกัน และทำการปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธี Freeze drying

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวของไฮโดรเจลในสูตรต่างๆ











ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวไฮโดรเจลสูตรต่างๆที่ไม่มีการใส่สารเชื่อมโยงและใส่สารเชื่อมโยง MBA

| M2CMC0   | M2CMC0.2<br>5   | M2CMC0.5  | M2CMC1  | M0CMC2   |                 |
|--|---|---|---|--|-----------------|
|    |    |    |    |    | MBA 0 กรัม      |
|   |   |   |   |   | MBA 0.1<br>กรัม |
|  |  |  |  |  | MBA 0.3<br>กรัม |
|  |  |  |  |  | MBA 0.5<br>กรัม |

จากตารางที่ 4.2 พบว่าพื้นผิวของตัวอย่างจะมีสีออกขาวเหลือง เพราะมีเมงลักประกอบอยู่ และในไฮโดรเจลรูปุนที่มีส่วนผสมของ CMC มากจะพบว่าไฮโดรเจลจะมีความนุ่ม เพราะหักน้อยกว่าชิ้นงานที่มี CMC น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

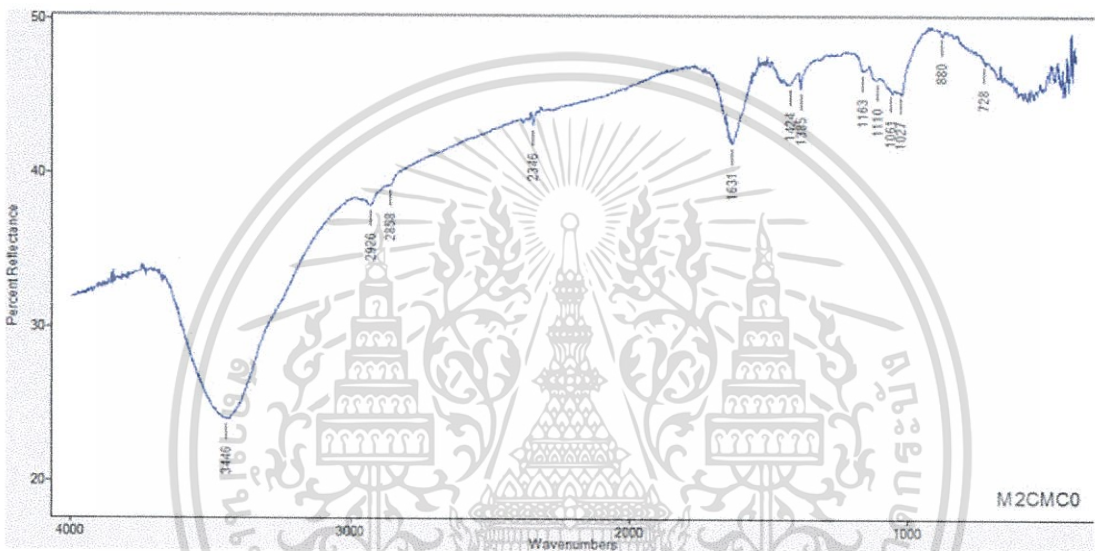
ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวไฮโดรเจลสูตรต่างๆที่มีการใส่สารเชื่อมโยง CA

| M2CMC0   | M2CMC0.25   | M2CMC0.5  | M2CMC1  | M0CMC2   |             |
|--|---|---|---|--|-------------|
|  |  |  |  |  | CA 0.1 กรัม |
|  |  |  |  |  | CA 0.3 กรัม |

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อมีการใส่สารเชื่อมโยง Citric Acid ทุกสูตรจะมีพื้นผิวเรียบกว่า ในทุกสูตรที่ใส่สารเชื่อมโยง MBA อาจสรุปได้ว่า การใส่สารเชื่อมโยง CA ทำให้เกิดการหดตัวของพอลิเมอร์ผสมน้อยกว่าการใช้ MBA เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงของ CA กับแมงลักและ CMC เป็นพันธะไฮโดรเจน ไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นในโครงสร้างของไฮโดรเจลรูปทรง

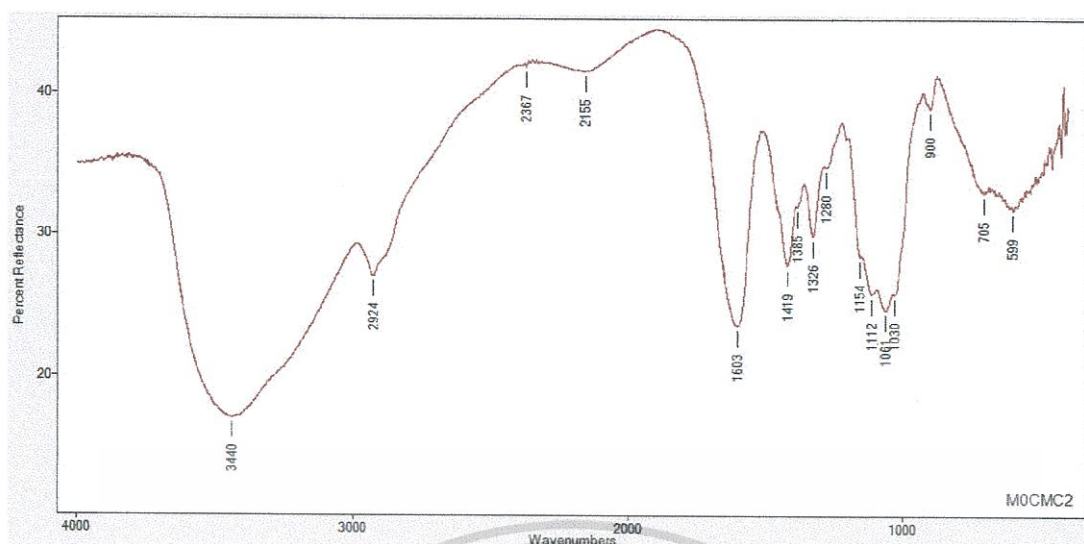
## 4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ของไฮโดรเจลสูตรต่างๆที่มีและไม่มีสารก่อพันธะเชื่อมโยงต่างๆ

ทดสอบ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างแห้งจากวิธีทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Drying) มาบดกับ KBr แล้วอัดให้เป็นแผ่น นำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของ M2CMC0

จากรูปที่ 4.1 แสดง IR spectrum ของไฮโดรเจลในสูตร M2CMC0 หรือสเปกตรัมของแมงลัก พบว่าเลขคลื่นที่  $3446\text{ cm}^{-1}$  และ  $2926\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง O-H stretching ของคาร์บอกซิลิก (Carboxylic) กับแอลกอฮอล์ ตามลำดับ เลขคลื่นบริเวณ  $1631\text{ cm}^{-1}$  และ  $1424\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง asymmetric และ symmetric stretching ของ  $\text{COO}^-$  และเลขคลื่น  $1061\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง  $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$  ของวงน้ำตาล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้พบอยู่ในโครงสร้างของพวก Uronic acid ที่มีอยู่ในแมงลัก [44]



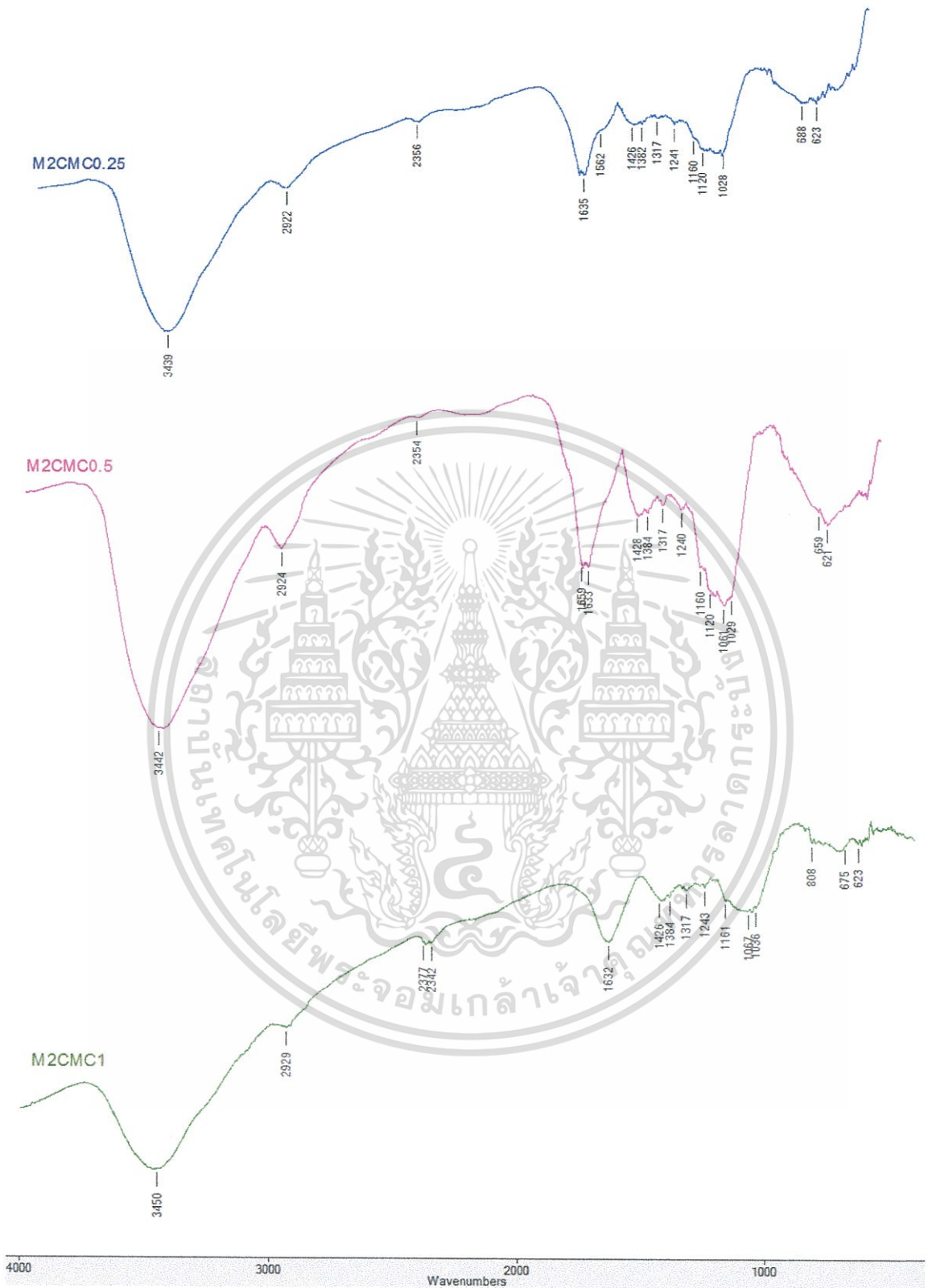
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของ M0CMC2

จากรูปที่ 4.2 แสดง IR spectrum ของไฮโดรเจลในสูตร M0CMC2 หรือสเปกตรัมของ CMC พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3440 และ 2924  $\text{cm}^{-1}$  คือ O-H stretching ของคาร์บอกซิลิก (Carboxylic) และ C-H stretching ตามลำดับ ที่เลขคลื่นประมาณ 1603  $\text{cm}^{-1}$  และ 1419  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึง asymmetric และ symmetric stretching ของ  $\text{COO}^-$  และที่เลขคลื่นประมาณ 1112  $\text{cm}^{-1}$  คือ C-O stretching ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้พบอยู่ในโครงสร้างของ CMC [40]

ตารางที่ 4.4 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของสารเมือกแมงลักและสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่ปรากฏในรูปที่ 4.1 และ 4.2

| เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) | ช่วงการดูดกลืน                                 |
|-------------------------------|--|
| 3300-3500                     | -OH stretching (Carboxylic acid) และ แอลกอฮอล์ |
| 3000                          | -CH stretching                                 |
| 1400-1600                     | C=O (Carboxylic acid)                          |
| 1000-1200                     | C-O stretching                                 |
| 1150-1160                     | -C-O stretching ของ C-OH                       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



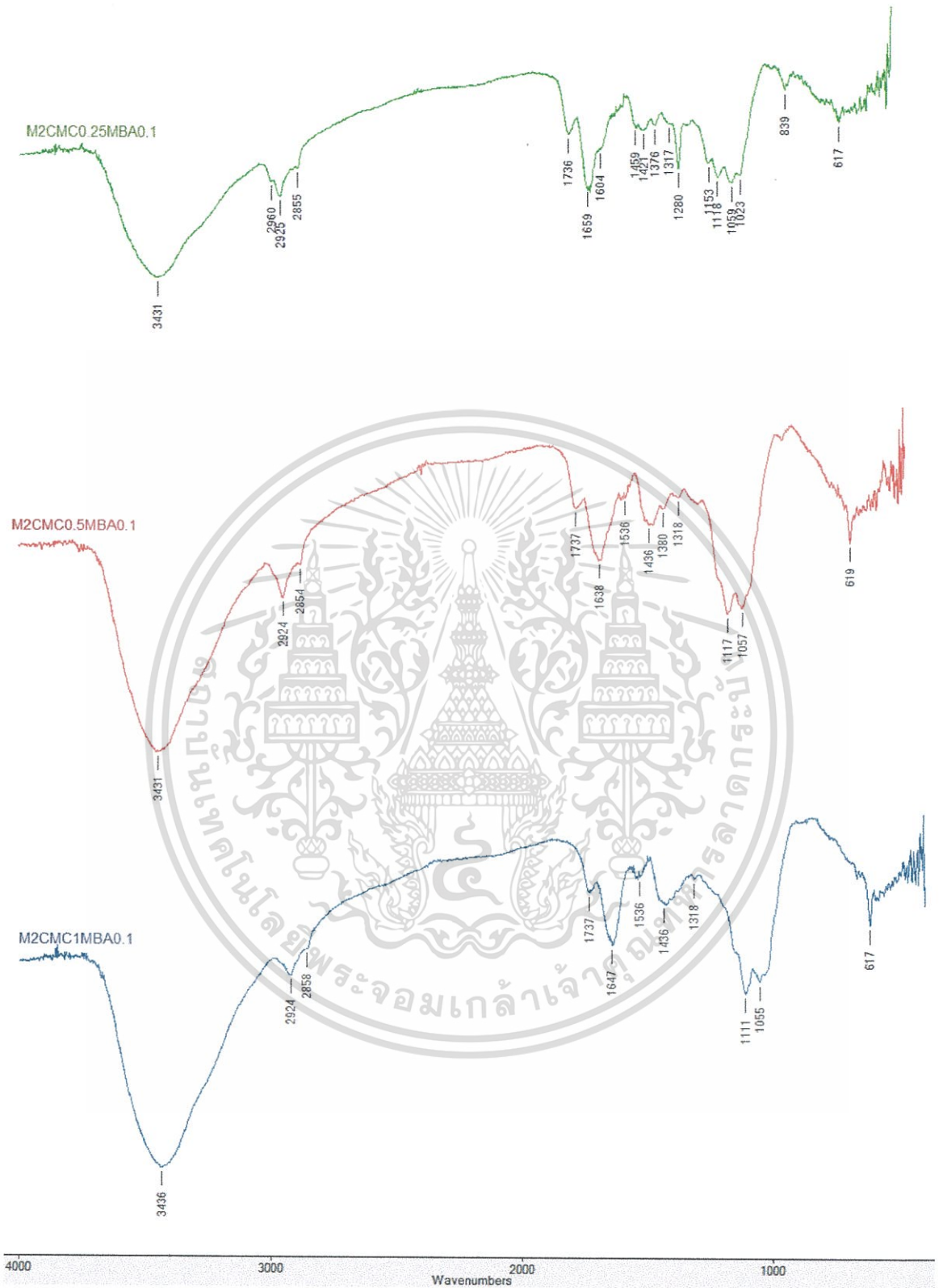
รูปที่ 4.3 แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูพรุนที่ไม่มีสารเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.3 เปรียบเทียบ IR spectrum ของไฮโดรเจลผสมเมื่อเพิ่มปริมาณ CMC M2CMC0.25 M2CMC0.5 และ M2CMC1 ตามลำดับ พบว่า ปรากฏพีค IR spectrum ที่คล้ายกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากทั้งแอมลิกและ CMC เป็นสารประกอบที่มีหมู่คล้ายกันอยู่ภายในโครงสร้าง ที่มีพันธะของ C=O และ -OH เป็นสเปกตรัมหลักซึ่งหมู่ฟังก์ชันหลักเหล่านี้จะปรากฏที่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ไม่สามารถแยกออกได้ว่าตำแหน่งไหนเป็นของสารเมือกจากเม็ดแอมลิกหรือของ CMC จากอินฟราเรดสเปกตรัมของสูตรที่ 2-4 พบว่าจะเกิดพีกที่เลขคลื่น  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของ O-H Stretching ของสารเมือกจากเม็ดแอมลิกและ CMC ที่เลขคลื่นประมาณ  $1659-1635\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ C=O สารเมือกจากเม็ดแอมลิกและ CMC

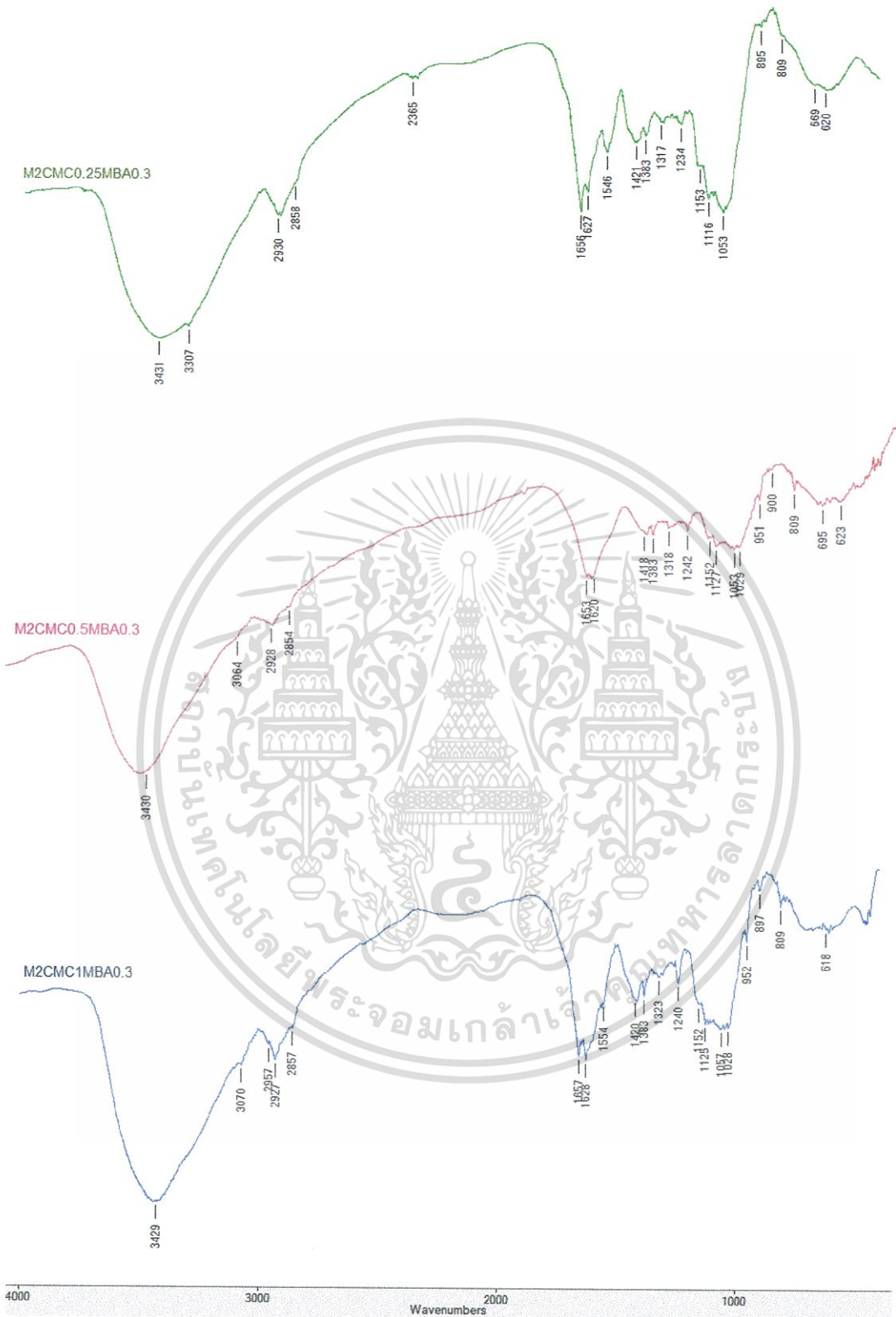
เมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของพีกที่บริเวณเลขคลื่น  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นของ O-H stretching และพีกของสูตรที่ M2CMC0.25 จะมีความกว้างน้อยกว่าสูตรอื่น อาจเป็นผลมาจากการที่ใส่ปริมาณ CMC น้อย สำหรับสูตรอื่นๆ พีกตำแหน่งนั้นมีความกว้างมากขึ้น เมื่อปริมาณของ CMC เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พีกที่เลขคลื่น  $1000-1200\text{ cm}^{-1}$  จะกว้างขึ้น เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันระหว่าง C-O stretching ของสารเมือกจากเม็ดแอมลิกกับ C-O stretching ของ CMC ที่เพิ่มขึ้น

IR Spectrum ของ M2CMC0.25 พบว่า พีกที่แสดงหมู่ -OH ปรากฏที่เลขคลื่น  $3439\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งต่ำกว่าพีก -OH ใน M2CMC0 ซึ่งปรากฏที่  $3446\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่า CMC ที่เติมไปเล็กน้อยในแอมลิก เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน ทำให้พีก -OH ของของผสมปรากฏที่เลขคลื่นต่ำกว่าของแอมลิก (เลขคลื่นต่ำ ต้องใช้พลังงานสูงในการสั่นสะเทือน) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น พบว่าพีกของ -OH ของของผสมปรากฏที่  $3450\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างแอมลิกกับ CMC น้อยลง หมู่ -OH เป็นอิสระมากขึ้น นอกจากนี้พีก -C-H- Stretching ปรากฏที่  $2929\text{ cm}^{-1}$  สูงกว่าที่ปรากฏในแอมลิก และไม่พบพีกที่  $1603\text{ cm}^{-1}$  ของ CMC แต่พบพีก  $1632\text{ cm}^{-1}$  คล้ายพีก  $1631\text{ cm}^{-1}$  ของแอมลิก นั่นคือเมื่อปริมาณ CMC มากเกินไป การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันของหมู่ -OH จะลดลง การดูดน้ำของไฮโดรเจลผสมสูงขึ้นด้วย เพราะ CMC มีหมู่ -COOH การเพิ่ม CMC เท่ากับเพิ่มหมู่ COOH ที่ชอบน้ำ จึงปรากฏพีก -OH ที่เลขคลื่นสูงกว่าทั้งของแอมลิก (-OH  $3446\text{ cm}^{-1}$ ) และ CMC (-OH  $3440\text{ cm}^{-1}$ )



รูปที่ 4.4 (a) แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูพรุนเมื่อมีสารเชื่อมโยง MBA 0.1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 (b) แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูปฟรอน เมื่อมีสารเชื่อมโย MBA 0.3 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 (a) เปรียบเทียบ IR Spectrum ของไฮโดรเจลผสม สูตร M2CMC0.25MBA0.1 M2CMC0.5 MBA0.1 และ M2CMC1MBA0.1 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย MBA 0.1 กรัม พบว่าหมู่ -OH stretching ปรากฏที่เลขคลื่น  $3431\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งต่ำกว่าเมื่อไม่มีสารเชื่อมโยง แสดงว่าการสั่นสะเทือนของหมู่ -OH ยากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลเชื่อมโยงให้ใกล้กัน นอกจากนี้พบพีคที่  $1736$  และ  $1536\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงหมู่ C=O stretching และ N-H bending ของสารเชื่อมโยง MBA

จากรูปที่ 4.4 (b) เปรียบเทียบ IR Spectrum ของไฮโดรเจลผสม สูตร M2CMC0.25MBA0.3 M2CMC0.5 MBA0.3 และ M2CMC1MBA0.3 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย MBA 0.3 กรัม พบว่าหมู่ -OH stretching ปรากฏที่เลขคลื่น  $3431\text{-}3429\text{ cm}^{-1}$  เช่นเดียวกับเมื่อเติม MBA 0.1 กรัม แต่พีคที่แสดงถึงหมู่ C=O stretching ปรากฏในช่วง  $1653\text{-}1657\text{ cm}^{-1}$  ใกล้เคียงกับหมู่ C=O ของแมงลัก และ CMC นอกจากนี้ยังพบพีคที่เลขคลื่น  $1536\text{ cm}^{-1}$  ของ N-H bending และพบพีคช่วง  $1000\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึง -C-O-C- ของน้ำตาลในทุกสูตร

รูปที่ 4.5 ต่อไปนี้เปรียบเทียบ IR Spectrum ของไฮโดรเจลที่มี CA เป็นสารเชื่อมโยง สูตร M2CMC0.25 และ M2CMC0.5 เมื่อใช้สารเชื่อมโยง CA 0.1 กรัม ที่เลขคลื่น  $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏพีคของ O-H stretching ที่เลขคลื่นประมาณ  $2928\text{ cm}^{-1}$  ของ C-H stretching ของสารเมือกจากเม็ดแมงลัก และ CMC และ Citric acid ที่เลขคลื่นประมาณ  $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคของ C=O สารเมือกจากเม็ดแมงลัก และที่เลขคลื่นประมาณ  $1606\text{ cm}^{-1}$  และ  $1730\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคของ C=O ของ Citric Acid

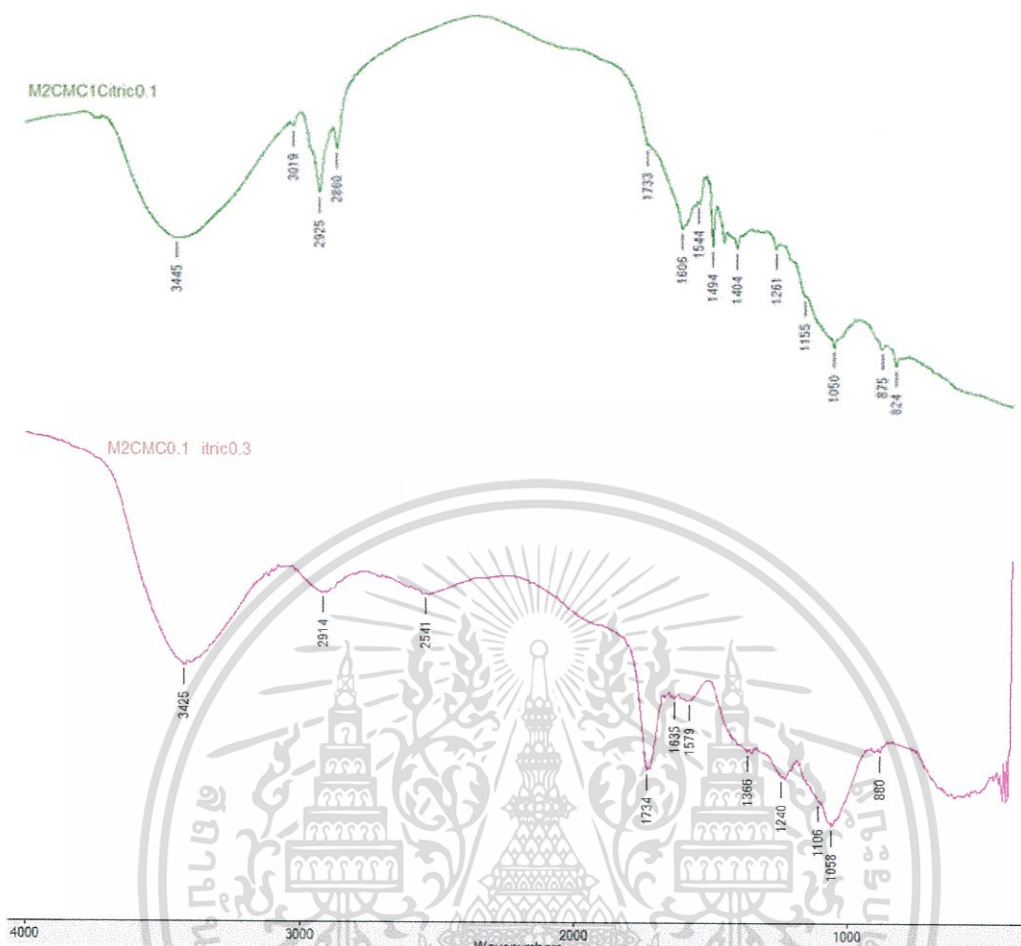
เมื่อ CMC เพิ่มมากขึ้นในสูตร M2CMC1 ที่ใส่สารเชื่อมโยง CA 0.1 กรัม พบว่า spectrum มีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับกรณี 2 สูตรแรก โดยพบ -OH stretching ที่เลขคลื่น  $3445\text{ cm}^{-1}$  เคลื่อนไปที่เลขคลื่นสูงขึ้น แสดงว่าสถานะนี้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันน้อย พบพีคที่  $1733\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีค -COOH ของ CA ไม่ใช่พีคของ ester carbonyl ระหว่าง -OH ของพอลิแซคคาไรด์กับกรด CA นอกจากนี้ยังพบพีค C-O ของ C-OH ในพอลิแซคคาไรด์ที่เลขคลื่น  $1155\text{-}1159\text{ cm}^{-1}$  และพบพีค C-O ของ C-O-C ในพอลิแซคคาไรด์ที่เลขคลื่น  $1059\text{ cm}^{-1}$

เปรียบเทียบ spectrum ของสูตร M2CMC0.5 ที่มี CA 0.1 และ 0.3 กรัม พบว่า -OH stretching เมื่อมี CA มากกว่า เคลื่อนไปยังเลขคลื่นสูงขึ้นที่  $3426\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่าการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -OH ลดลง แต่ยังคงพบพีคที่  $1735\text{ cm}^{-1}$  ของ -COOH ใน CA [51]



รูปที่ 4.5 แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูพรุน เมื่อมีสารเชื่อม โยง Citric Acid 0.1 กรัม และ 0.3 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

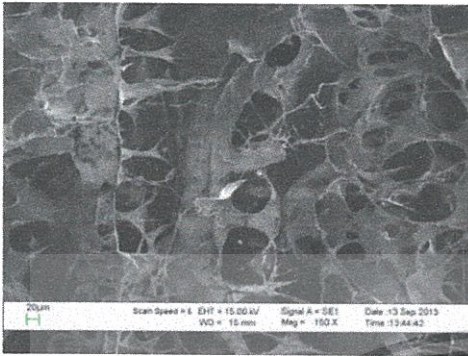


รูปที่ 4.6 แสดง IR spectra ของไฮโดรเจลรูพรุน เมื่อมีสารเชื่อม โยง Citric Acid 0.1 กรัม และ 0.3 กรัม

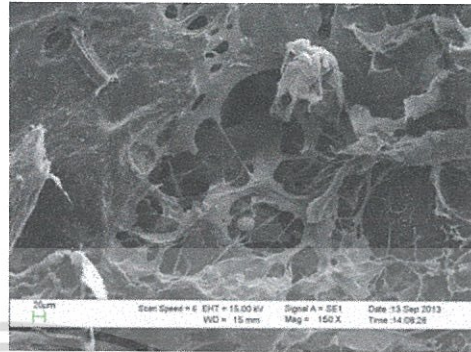
จากรูป 4.6 เปรียบเทียบ spectrum ของสูตร M2CMC1 ที่มี CA 0.1 และ 0.3 กรัม พบว่า -OH stretching เมื่อมี CA มากกว่า เคลื่อนไปยังเลขคลื่นต่ำลงที่  $3425\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่าในกรณีนี้มีสัดส่วนของ CMC มาก เมื่อเพิ่มปริมาณ CA ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนของหมู่ -OH มากขึ้น พิกที่เลขคลื่น  $1735\text{ cm}^{-1}$  แสดง -COOH ของ CA ชัดเจนยิ่งขึ้น

### 4.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

#### 4.3.1 ผลของ CMC ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลัก



รูปที่ 4.7 (a) M2CMC0



รูปที่ 4.7 (b) M2CMC0.25



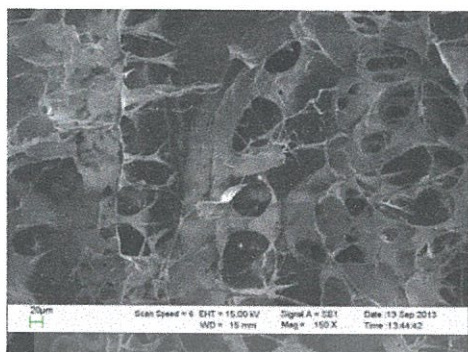
รูปที่ 4.7 (c) M2CMC1

#### รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อมโยง

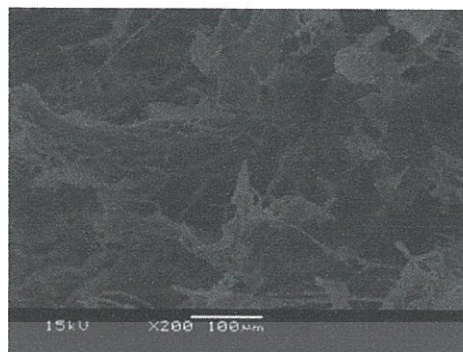
จากรูปที่ 4.7 แสดงถึง (a) M2CMC0 (b) M2CMC0.25 (c) M2CMC1 ซึ่งเป็นสูตรที่ไม่มีการใส่สารเชื่อมโยง พบว่าเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น ความเป็นรูพรุนในโครงสร้างของไฮโดรเจลจะใหญ่ขึ้น

นอกจากนี้พบว่า CMC ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับแมงลัก เมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 1 จะทำให้ผิวชิ้นงานบริเวณที่หัก มีสภาพยึดได้ก่อนขาด และเนื่องจากการใช้เทคนิค Freeze dry ในการขึ้นรูปไฮโดรเจล รูปร่างรูพรุน ขนาด และจำนวนรูพรุน คือ บริเวณที่น้ำอยู่รวมกันก่อนแห้งแข็ง และระเหิดไปจนกระทั่ง ดังนั้นในสูตร M2CMC1 มีขนาดรูพรุนใหญ่ จำนวนรูพรุนน้อยกว่าสูตร M2CMC0.25 แสดงว่า CMC ที่เพิ่มขึ้น หมู่ COO<sup>-</sup> ก็มากขึ้น ซึ่งจะเกิดการผลัดกัน ทำให้โมเลกุลน้ำเข้ามาล้อมรอบได้มากขึ้น เกิดโครงสร้างแบบเปิด

### 4.3.2 ผลของสารเชื่อมโยง MBA และ Citric acid ที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนของไฮโดรเจลรูพรุน



รูปที่ 4.8 (a) M2CMC0



รูปที่ 4.8 (d) M2CMC0MBA0.3

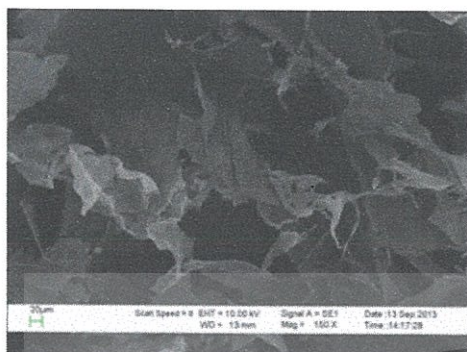


รูปที่ 4.8 (g) M2CMC0CA0.3

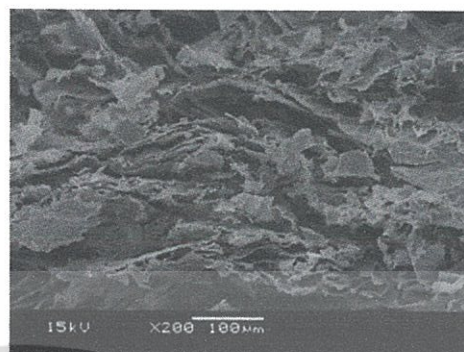
รูปที่ 4.8 ลักษณะรูพรุนของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักที่ไม่ใส่และใส่สารเชื่อมโยง

พิจารณาจากรูปที่ 4.8 (a), (d) และ (g) พบว่าไฮโดรเจลแมงลักล้วนมีรูพรุนขนาดเล็กและมีจำนวนมาก เมื่อใส่สารเชื่อมโยง MBA 0.3 กรัม ทำให้ขนาดรูพรุนใหญ่ และจำนวนรูพรุนน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ CA พบว่าขนาดรูพรุนเล็กลง และจำนวนรูพรุนมากขึ้น ขนาดรูพรุนใหญ่แสดงว่าเป็นบริเวณที่โมเลกุลน้ำรวมตัวกันมาก่อนที่จะระเหิดแห้ง นั่นคือ MBA เชื่อมขวางยึดโยงระหว่างโซ่แมงลัก เกิดช่องระหว่างสายโซ่ ทำให้โมเลกุลน้ำแทรกเข้าไปได้ เพราะ MBA มีหมู่เอไมด์เกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้

### 4.3.3 ผลของอัตราส่วนผสมและชนิดของสารเชื่อมโยงที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลรูพรุน



รูปที่ 4.9 (b) M2CMC1



รูปที่ 4.9 (c) M2CMC1MBA0.3



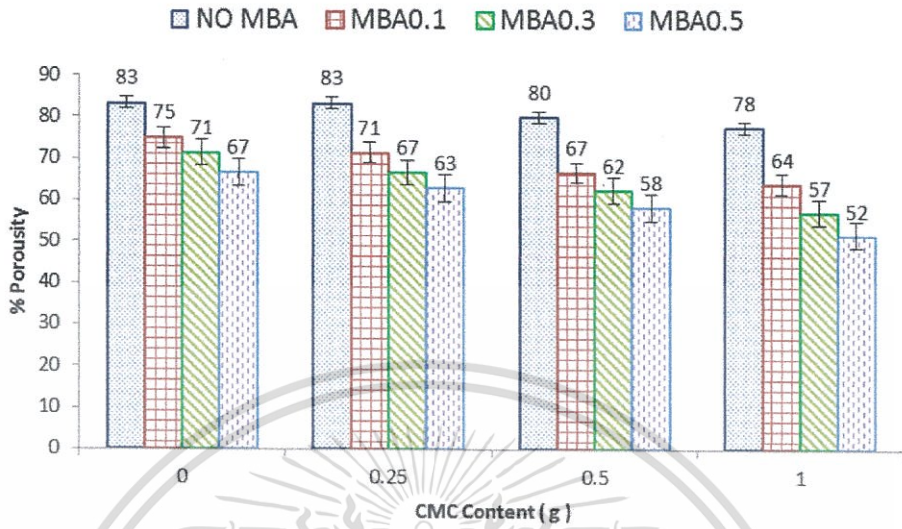
รูปที่ 4.9 (h) M2CMC1CA0.3

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักที่ไม่ใส่และใส่สารเชื่อมโยง

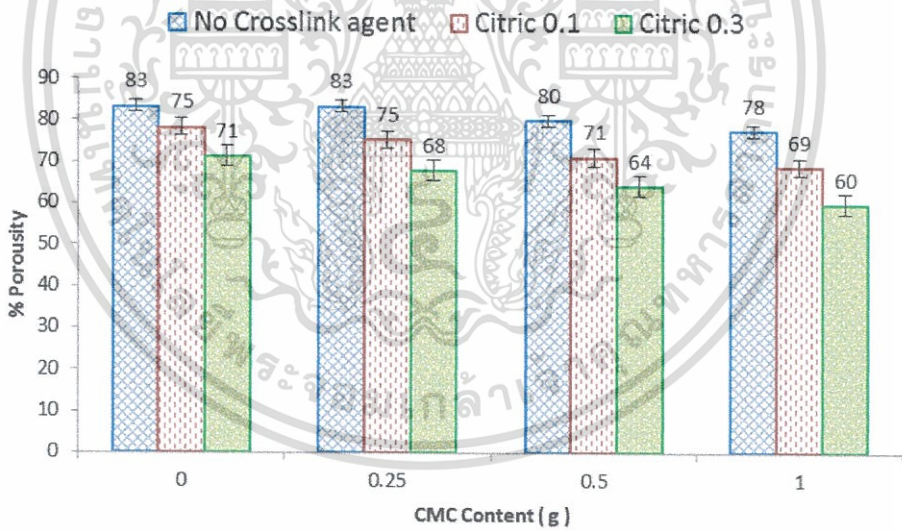
พิจารณาจากรูปที่ 4.9 (b), (c) และ (h) พบว่าเป็นไฮโดรเจลผสมของ M2CMC0.25 และ M2CMC1 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 0.3 กรัม และมี CMC มาก รูพรุนขนาดใหญ่ของ M2CMC1 เปลี่ยนเป็นแผ่น (sheet) ซ้อนๆกันอย่างหนาแน่น (compact structures) ความเป็นรูพรุนน้อยลง พื้นผิวสัมผัสน้ำลดลง ไฮโดรเจลรูพรุนดูดน้ำได้ลดลง ผลการทดลองคล้าย A.Pourjavadi [47] ที่เติม CMC ลงในไซเคียมอัลจินตและเชื่อมโยงด้วย MBA

ส่วนการเชื่อมโยงด้วย CA 0.3 กรัม พบว่าขนาดรูพรุนใหญ่กว่า (opened matrices structures) การใช้ MBA 0.3 กรัม อาจเนื่องจากหมู่ COOH ของ CA ที่เพิ่มขึ้น ต่อ 1 โมเลกุลของ CA เกิดแรงผลักร่วมกับหมู่ COO<sup>-</sup> ของ CMC ซึ่งเป็นแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์อย่างอ่อนๆ (weaker electrostatic interaction) ระหว่างแมงลักกับ CMC ทำให้โครงสร้างเป็นรูพรุนและดูดน้ำได้มาก [51]

#### 4.4 การทดสอบจำนวนรูพรุน



รูปที่ 4.10 (a) จำนวนรูพรุนของไฮโดรเจลรูพรุนที่ไม่มีและมีการเชื่อมโยง MBA



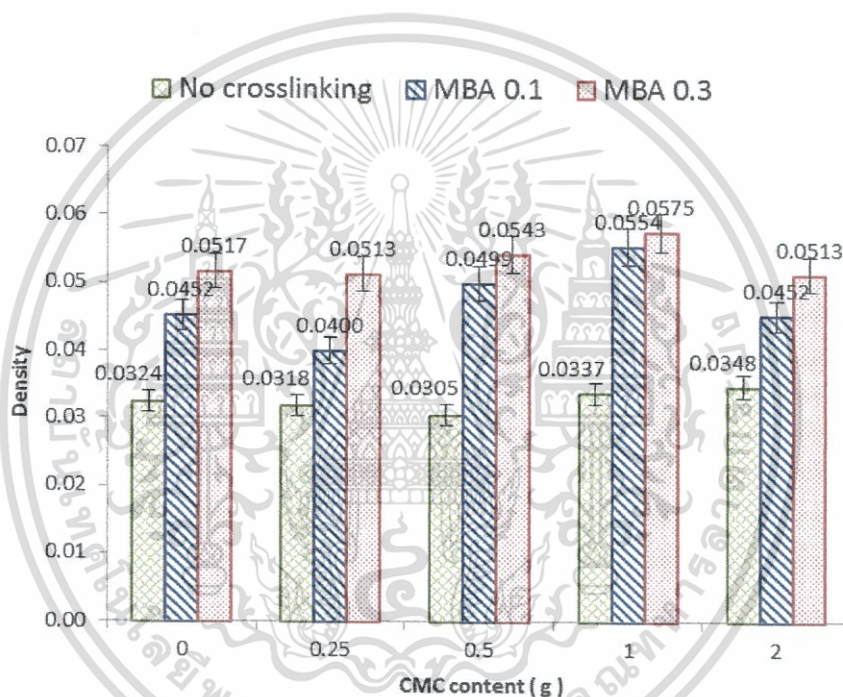
รูปที่ 4.10 (b) จำนวนรูพรุนของไฮโดรเจลรูพรุนที่ไม่มีและมีการเชื่อมโยง CA

จากรูปที่ 4.10 (a) พบว่าไฮโดรเจลรูพรุนจากแมงลักล้วนและผสม CMC 0.25 กรัม มีจำนวนรูพรุนใกล้เคียงกัน ที่ 83 % และเมื่อเพิ่มปริมาณ CMC พบว่าจำนวนรูพรุนลดลงเหลือ 80 % ผลการทดลองสอดคล้องกับรูปถ่าย SEM ที่แสดงให้เห็นว่าจำนวนรูพรุนลดลงตามปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารเชื่อมโยงพบว่าจำนวนรูพรุนลดลงตามปริมาณ CMC และสารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า CMC กับแมงลักผสมเข้ากันได้ดีเพราะมีหมู่  $-OH$  และ  $COOH$  เป็นองค์ประกอบที่เหมือนกัน ทำให้หมู่มีขั้วที่จะดึงดูดกับน้ำได้ลดลง เมื่อทำให้แห้ง จำนวนรูพรุนจึงลดลง สารไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

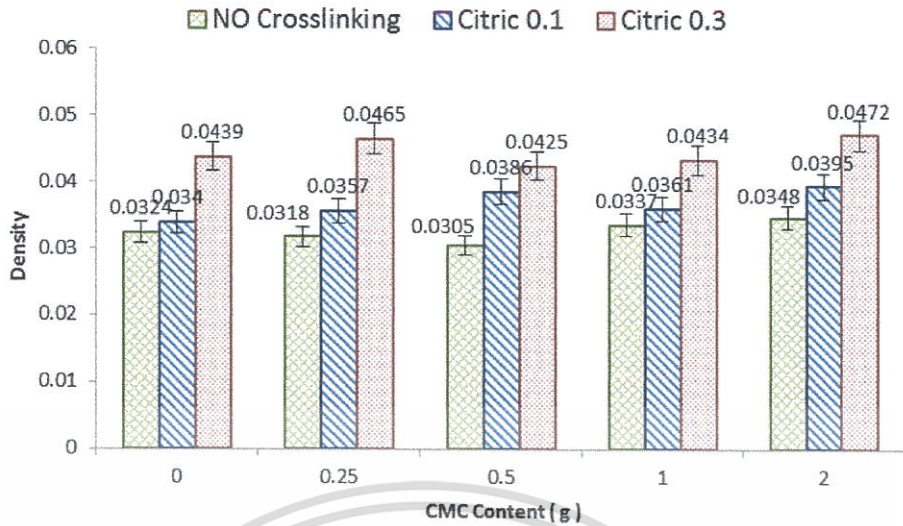
เชื่อมโยง MBA ช่วยยึดโยงสายโซ่โมเลกุลของแมงลักและ CMC ยิ่งมีปริมาณ MBA มากขึ้น จุดเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มากขึ้น ช่องว่างรูพรุนจึงมีขนาดเล็กลง

และจากรูปที่ 4.10 (b) พบว่าเมื่อใส่สารเชื่อมโยง CA ผลการทดลองเป็นแนวโน้มเดียวกันกับการใส่สารเชื่อมโยง MBA แต่จำนวนรูพรุนจะมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการใส่ CA ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงทางเคมีขึ้นในโครงสร้าง เกิดแต่เพียงพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลน้อย จึงมีโอกาสดังกล่าวที่จะมีจำนวนรูพรุนได้มาก

#### 4.5 การทดสอบหาความหนาแน่น



รูปที่ 4.11 (a) ความหนาแน่นของไฮโดรเจลรูพรุนที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง MBA



รูปที่ 4.11 (b) ความหนาแน่นของไฮโดรเจลรูพรุนที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง CA

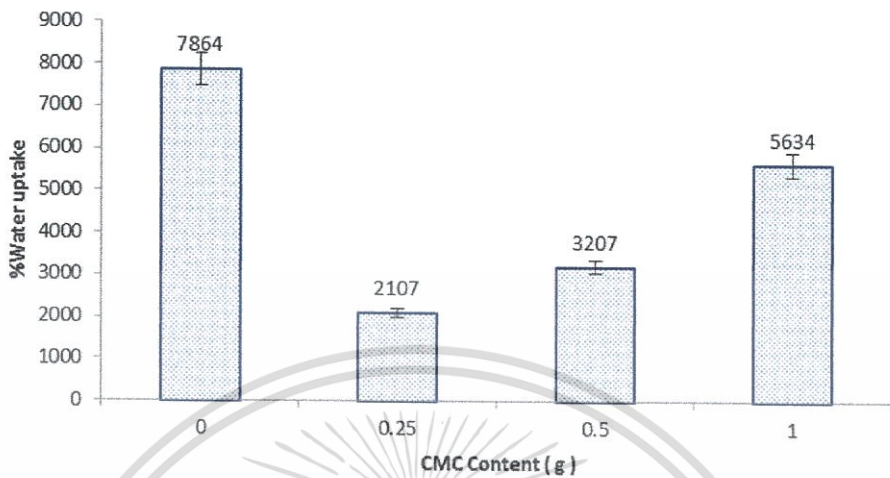
จากรูปที่ 4.11 (a) พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อม โยง MBA เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 0.3 กรัม พบว่าความหนาแน่นของไฮโดรเจลรูพรุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเชื่อม โยงทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ อยู่ใกล้กันดีขึ้น ในกรณีของ M2CMC0 และ M0CMC2 พบว่ามีความหนาแน่นใกล้เคียงกันในทั้งสองความเข้มข้นของสารเชื่อม โยง และที่ปริมาณ MBA 0.3 กรัมจะมีความหนาแน่นสูงกว่า MBA 0.1 กรัม สำหรับไฮโดรเจลผสม ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น

และจากรูป 4.11 (b) พบว่าเมื่อใส่สารเชื่อม โยง Citric acid ผลการทดลองเป็นแนวโน้มนี้อยู่ใกล้เคียงกับการใส่สารเชื่อม โยง MBA แต่ความหนาแน่นจะน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความเป็นรูพรุนที่มากของ Citric acid

#### 4.6 การดูดซับน้ำของไฮโดรเจลรูพรุนสูตรต่างๆที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง

ตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาด 2x2 เซนติเมตร นำตะแกรงลวดปลา และชิ้นงานไปซังเพื่อให้ ทรายน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ

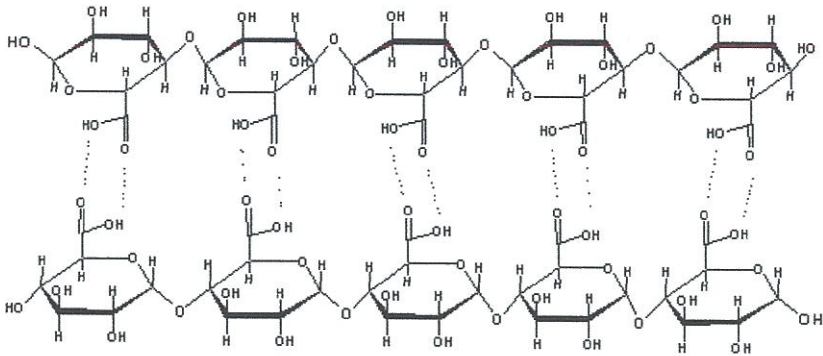
#### 4.6.1 กรณีไม่มีสารเชื่อมโยง



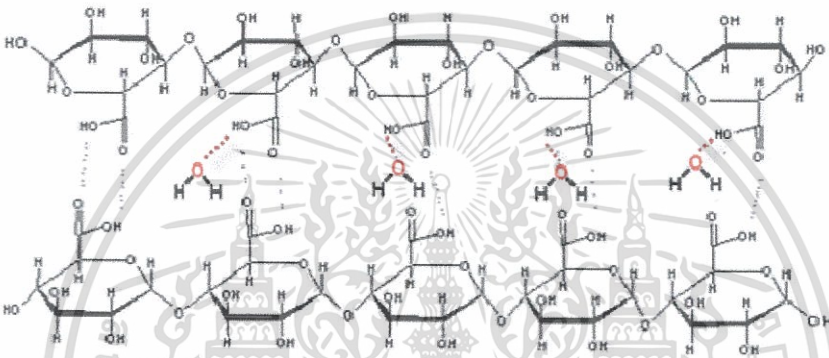
รูปที่ 4.12 การดูดน้ำของไฮโดรเจลแมงลักและไฮโดรเจลแมงลักผสม CMC

กรณีไม่มีสารเชื่อมโยง จากผลการทดลอง ในรูปที่ 4.12 พบว่าสูตรที่มีแมงลักล้วน จะมีความสามารถในการดูดน้ำมากที่สุด (7864 %) อาจเนื่องจากองค์ประกอบของแมงลักนั้น เป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก  $-COOH$  ในโครงสร้างสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันดังรูป 4.13 เมื่อแช่น้ำไปสักพักโมเลกุลของ  $H_2O$  ที่แพร่เข้าไปจะทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่  $-COOH$  ลงทำให้หมู่  $-COOH$  ดูดน้ำได้ดีขึ้น ดังรูป 4.14

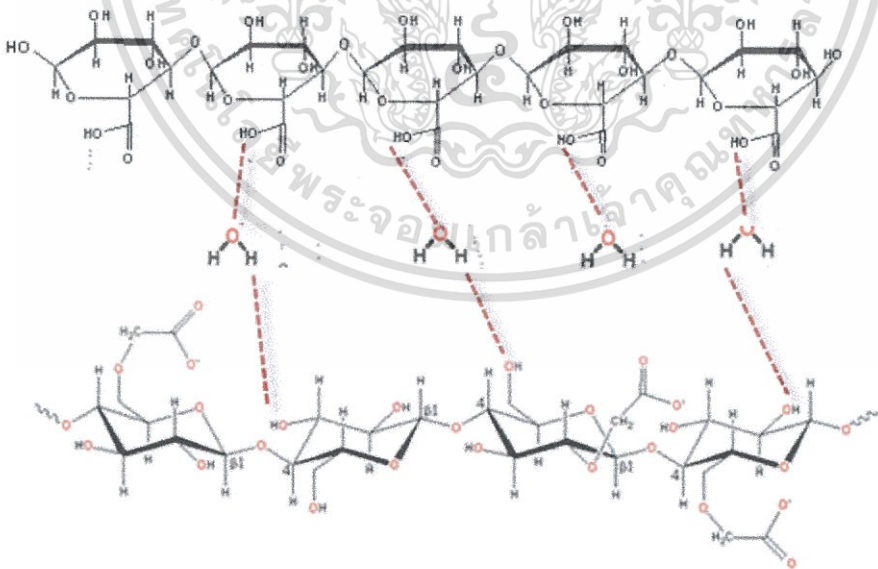
ส่วนสูตรที่เป็นของผสมระหว่างแมงลักและ CMC ความสามารถในการดูดน้ำลดลงเมื่อมี CMC 0.25 กรัม แต่จะมากขึ้นตาม ปริมาณของ CMC ดังนี้  $CMC 1 > 0.5 > 0.25$  กรัม เนื่องจากในโครงสร้างของ CMC นั้น ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิล ( $-COO^-$ ) และหมู่ไฮดรอกซิล ( $-OH$ ) ที่มีสมบัติชอบน้ำคล้ายแมงลัก หมู่มีขั้วเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่มีขั้วของแมงลักได้ ทำให้หมู่มีขั้วที่ชอบน้ำลดลง แต่เมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น เท่ากับเป็นการเพิ่มหมู่ชอบน้ำให้กับระบบ การดูดน้ำจึงเพิ่มขึ้น สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำกับออกซิเจนของหมู่คาร์บอกซิลที่มีอยู่ในไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 ลักษณะการเกิด H-bond ของไฮโดรเจลกับแมงลักแห้ง [52]



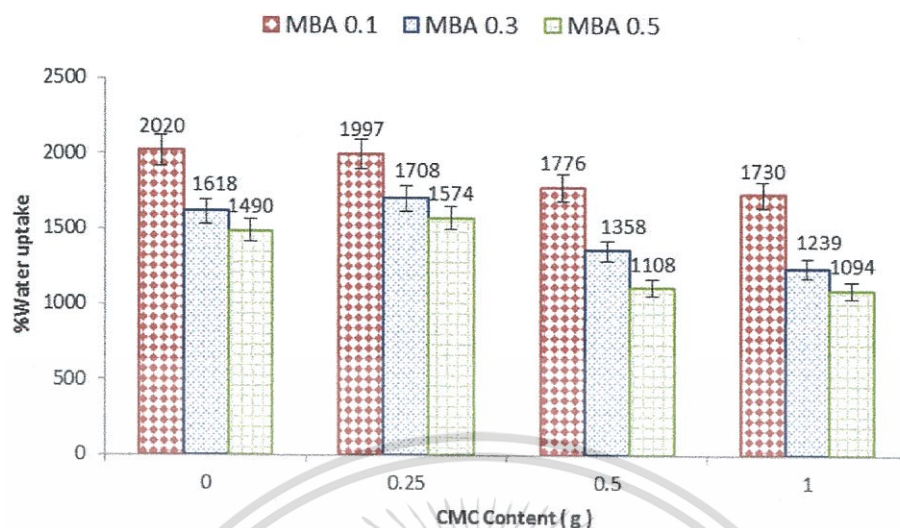
รูปที่ 4.14 ลักษณะการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลกับแมงลัก



รูปที่ 4.15 ลักษณะการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแมงลักผสม CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 กรณีใส่สารเชื่อมโยง MBA



รูปที่ 4.16 การดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเชื่อมโยงด้วย MBA

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อใส่สารเชื่อมโยง MBA ลงในไฮโดรเจลรูพรุนของแมงลัก จะทำให้การดูดซับน้ำของไฮโดรเจลลดลง ตามปริมาณ MBA ที่เพิ่มขึ้น  $MBA\ 0.1 > MBA\ 0.3 > MBA\ 0.5$  ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงเป็นการเพิ่มจุดเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของแมงลัก ทำให้ความหนาแน่นของไฮโดรเจลรูพรุนสูงขึ้น สายโซ่เกิดการขยับเขยื้อน (Relaxation) ได้ยาก ส่งผลให้การแพร่ของน้ำเกิดขึ้นได้ยาก [44]

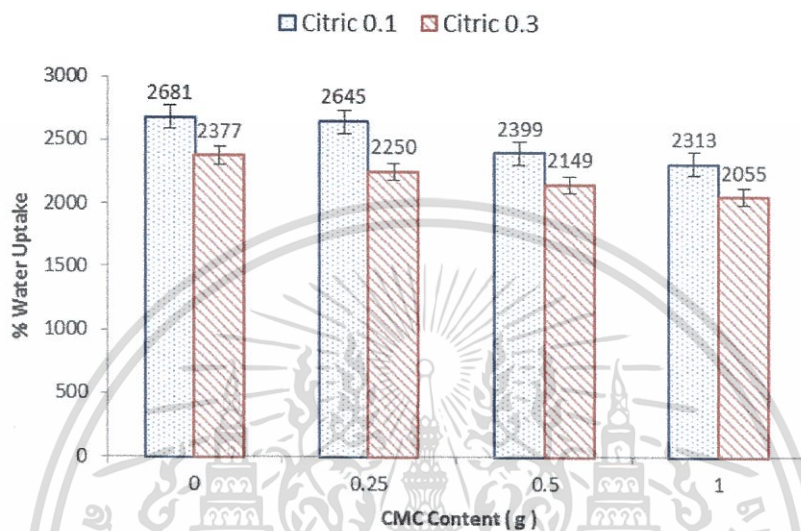
ในไฮโดรเจลรูพรุนผสมระหว่างแมงลักกับ CMC พบว่าให้ผลเช่นเดียวกันกับไฮโดรเจลรูพรุนของแมงลัก นั่นคือการดูดซับน้ำลดลงตามปริมาณของ CMC และ MBA ที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับความเป็นรูพรุนที่ลดลงรูปที่ 4.9 (a) และความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นในรูปที่ 4.10 (a)

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลรูพรุนก่อนเชื่อมโยงในรูปที่ 4.11 พบว่าไฮโดรเจลรูพรุนทุกสูตรหลังการเชื่อมโยงดูดซับน้ำได้น้อยกว่า โดยที่ไฮโดรเจลแมงลักดูดน้ำลดลงจาก 7864% เป็น 2020% เมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 0.1 กรัม แต่ไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักผสม CMC พบว่าเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น การดูดน้ำลดลง แสดงว่าพันธะเชื่อมโยงทำให้โมเลกุลของแมงลักและ CMC อยู่ใกล้กันมากขึ้น และพันธะเชื่อมโยงของ MBA เกิดที่หมู่ OH ทำให้เหลือหมู่ OH ไปดึงดูดน้ำภายนอกได้น้อยลง การดูดน้ำจึงลดลง

การศึกษาผลของ MBA ที่มีต่อ % การดูดซับน้ำ จากรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อทำการเติม MBA ลงไปในทุกสูตร จะทำให้ค่าการดูดซับน้ำของทุกสูตรเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่มีเติม MBA มีค่า % การดูดซับน้ำน้อยลงในทุกสูตร ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของสารก่อพันธะเชื่อมโยง (MBA) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยงมากจะเป็นการเพิ่มจำนวนของจุดเชื่อมโยง ทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงการค่าไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงช่องว่างระหว่างจุดเชื่อมโยงแคบลง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างได้น้อยลง ดังนั้นไฮโดรเจลจึงบวมตัวได้น้อย และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง

#### 4.6.3 กรณีใส่สารเชื่อมโยงกรดซิตริก



รูปที่ 4.17 การดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเชื่อมโยงด้วย CA

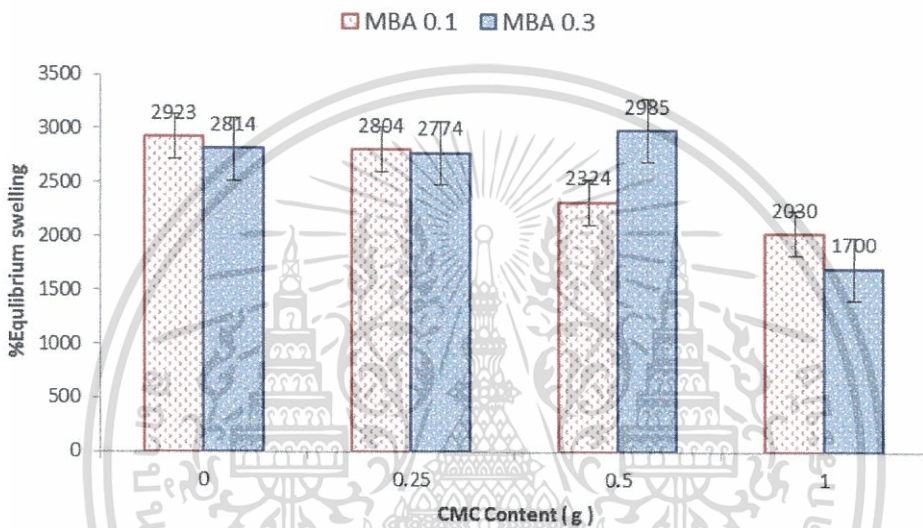
จากรูป 4.17 การศึกษาผลของ CA ที่มีต่อ % การดูดซับน้ำ พบว่าเมื่อใส่สารเชื่อมโยง CA ลงในไฮโดรเจลรูปของแมงลัก จะทำให้การดูดซับน้ำของไฮโดรเจลลดลง ตามปริมาณ CA ที่เพิ่มขึ้น CA 0.1 > CA 0.3 ตามลำดับ พบว่าให้ค่าการดูดซับน้ำของทุกสูตรเมื่อเทียบกับสารที่ไม่มีการเติม CA มีค่า % การดูดซับน้ำน้อยลง เหตุผลเป็นแนวโน้มนี้นี้คล้ายกับการใส่สารเชื่อมโยง MBA แต่การใส่สารเชื่อมโยง CA จะทำให้ไฮโดรเจลรูปสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าการใส่สารเชื่อมโยง MBA เพราะ โครงสร้างของ CA จะมีหมู่ -COOH 3 หมู่ และหมู่ -OH 1 หมู่ จึงเป็น 1) การเพิ่มหมู่ชอบน้ำให้กับไฮโดรเจลรูป 2) เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์กับ COO<sup>-</sup> ของ CMC นอกจากนี้ชิ้นงานไฮโดรเจลรูปที่ใช้ CA จะคงรูปได้ไม่เกิน 2 ชั่วโมงและจะเสีกรูป ละลายน้ำในที่สุด นั่นคือในสภาวะการทดลองนี้ พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ CA อาจเป็นพันธะเชื่อมโยงทางไฟฟ้าสถิตย์ สอดคล้องกับผลของ IR พบว่ายังผสม CA มาก เลขคลื่นของหมู่ OH ขึ้นที่เลขคลื่นสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าใช้พลังงานต่ำ

จากการทดลองการรับแรงกดและการดูดซับน้ำจากสูตรต่างๆ จะเห็นได้ว่าสูตรที่มีการใส่สารเชื่อมโยง MBA 0.1 และ 0.3 กรัม มีค่าการรับแรงและดูดซับน้ำที่ดี จึงได้นำสูตรดังกล่าวมาทดลองการดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของไฮโดรเจลในน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จุดสมดุลเป็นจุดที่แสดงความสามารถสูงสุดในการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล ในการหาจุดสมดุลดังกล่าวทำได้โดยแช่ชิ้นงานขนาด 2x2 cm ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้จนถึงค่าที่อิ่มตัวสูงสุด แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling)



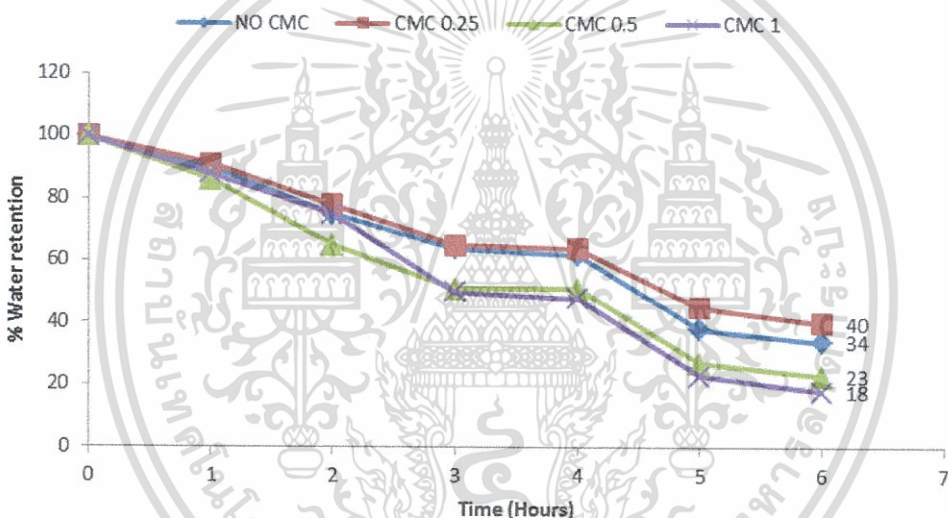
รูปที่ 4.18 การดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากรูป 4.18 เมื่อนำไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักและที่ผสม CMC ในอัตราส่วนต่างๆที่มีการเชื่อมโยงด้วย MBA 0.1 และ 0.3 กรัม ตามลำดับ มาทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การดูดน้ำที่สมดุลลดลง แนวโน้มคล้ายกับการดูดซับน้ำรูปที่ 4.15 และ 4.16 เนื่องจากทั้งแมงลักและ CMC มีหมู่มีขั้ว -OH และ -COOH เหมือนกัน เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ดี เมื่อเพิ่ม CMC จึงเท่ากับเป็นการลดหมู่ชอบน้ำของไฮโดรเจลรูพรุนลง การดูดน้ำจึงลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณ MBA ยิ่งทำให้การดูดน้ำลดลง เพราะทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยระหว่างจุดเชื่อมโยงสั้นลง ปริมาตรอิสระลดลง ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้ามาได้น้อย

#### 4.8 สมบัติการกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลรูปทรงแปดเหลี่ยมในน้ำกลั่น

นำชิ้นงานไฮโดรเจลรูปทรงแปดเหลี่ยมและ CMC อัตราส่วนต่างๆที่มีสารเชื่อมโยง MBA 0.1 กรัม และ 0.3 กรัม ตามลำดับ ที่บวมตัวสูงสุดมาอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (สมมติให้เป็น อุณหภูมิร่างกาย) โดยทำการบันทึกน้ำหนักก่อนอบไว้แล้วชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำหนักที่ชั่งได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่หายไป นั่นคือความสามารถในการเก็บความชื้นของชิ้นงานเมื่อนำมาใช้บนร่างกาย

##### 4.8.1 เมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 0.1 กรัม



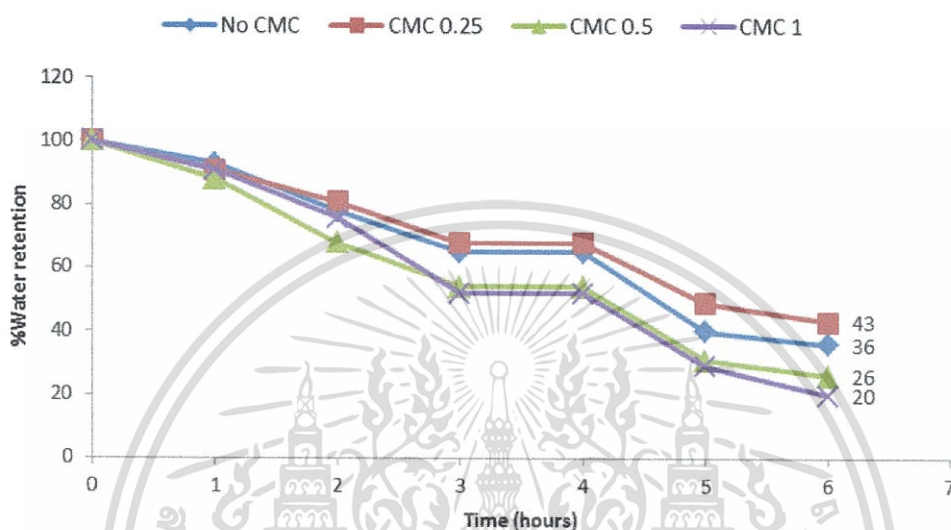
รูปที่ 4.19 การกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลรูปทรงแปดเหลี่ยมในน้ำกลั่น เมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 0.1 กรัม

ลักษณะน้ำที่ไฮโดรเจลสามารถดูดซับไว้อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ Free water ซึ่งอยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจลเป็นส่วนระเหยง่ายที่สุด Interfacial water เป็นน้ำที่แทรกอยู่ในโมเลกุลของไฮโดรเจล และ Bound water เป็นน้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเจลซึ่งระเหยได้ยากที่สุด [52]

จากรูป 4.19 ไฮโดรเจลรูปทรงแปดเหลี่ยมซึ่งเตรียมจาก CMC ผสมแมงลักในอัตราส่วน 2:0 2:1 2:0.5 และ 2:0.25 ตามลำดับ และมีการใส่ MBA 0.1 กรัม มาทดสอบปริมาณการกักเก็บน้ำ พบว่าน้ำจะค่อยๆระเหยออกจากไฮโดรเจลทุกสูตร เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ในไฮโดรเจลสูตรต่างๆ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ CMC0.25 (40%) > สูตร NO CMC (34%) > สูตร CMC0.5 (23%) และ CMC1 (18%) ตามลำดับ เหตุผลที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการระเหยของน้ำของไฮโดรเจลรูปทรงแปดเหลี่ยมจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวซึ่งเป็นส่วนที่ระเหยได้ง่าย ส่วนน้ำที่แทรกอยู่ในไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของไฮโดรเจลจะระเหยได้ยากกว่า และบางส่วนยังคงถูกกักเก็บไว้ในโครงสร้างของไฮโดรเจล เป็นผลให้การกักเก็บน้ำเป็นแนวโน้มเดียวกันกับการทดสอบการดูดซับในน้ำกลั่น

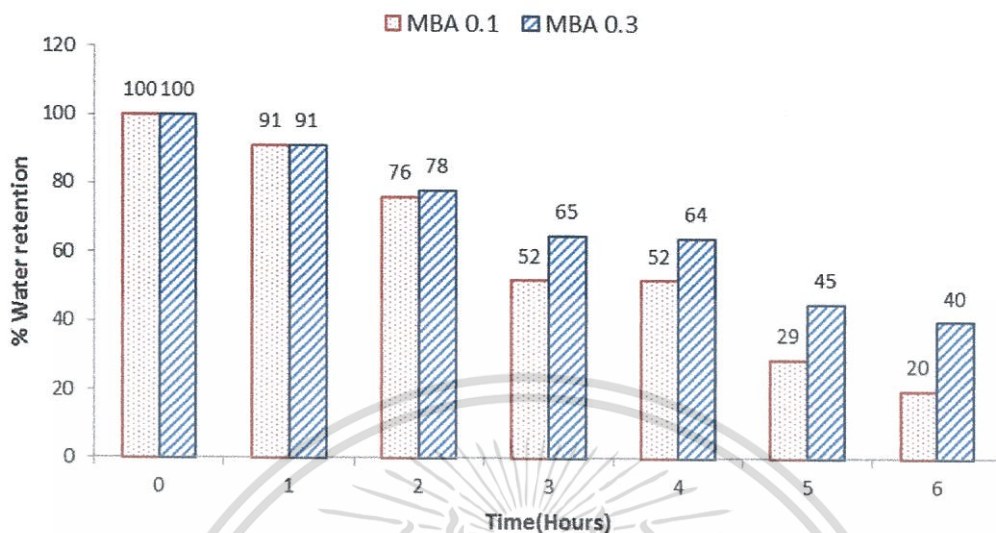
#### 4.8.2 เมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 0.3 กรัม



รูปที่ 4.20 การกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลรูปวงในน้ำกลั่น เมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 0.3 กรัม

พิจารณาจากรูป 4.20 สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สูตร CMC0.25 (43%) > สูตร NO CMC (36%) > สูตร CMC0.5 (26%) และ สูตร CMC1 (20%) ตามลำดับ โดยที่น้ำที่เหลืออยู่ในไฮโดรเจลควรจะเป็นน้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลของทั้งแมงลักและ CMC ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ และปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของ CMC และเก็บน้ำได้มากขึ้นเมื่อ MBA เพิ่มขึ้น

#### 4.8.3 เปรียบเทียบผลของ MBA เมื่อ CMC 0.25 กรัม

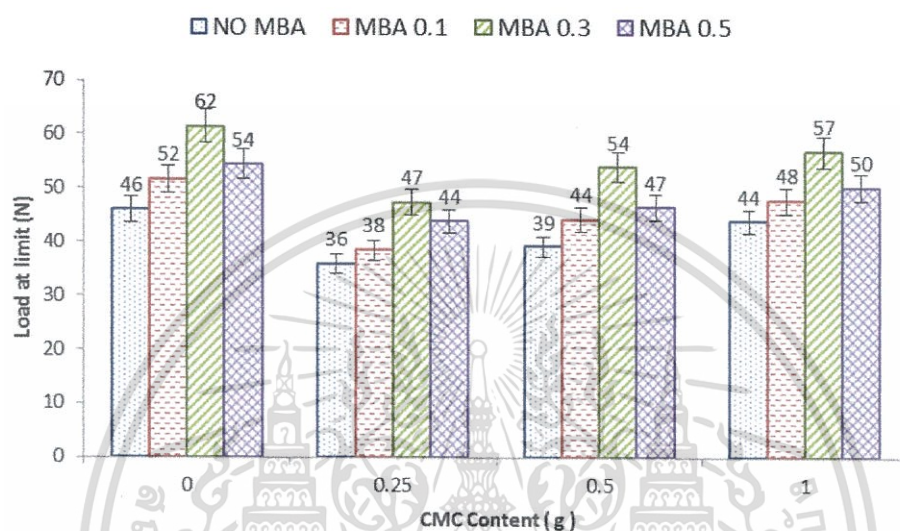


รูปที่ 4.21 การกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลรูพรุนในน้ำกลั่น เมื่อใช้สารเชื่อมโย MBA 0.1 และ 0.3 กรัม

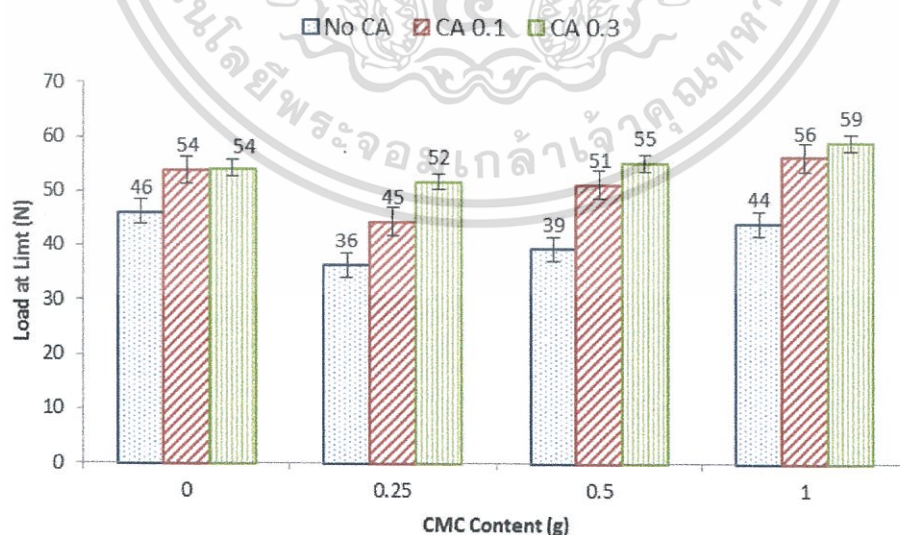
จากรูปที่ 4.21 เมื่อนำไฮโดรเจลในสูตรรูพรุนแมงลักผสม CMC 0.25 กรัม ที่เชื่อมโยด้วย MBA 0.1 และ 0.3 g ตามลำดับ พบว่า % การกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารก่อก้อนระเชื่อมโย เนื่องจากการกีดขวางของโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยอย่างหนาแน่น ทำให้น้ำที่แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจลรูพรุนระเหยออกไปได้ยาก

## 4.9 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอ

### 4.9.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอของไฮโดรเจลรูปพรุนในสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.22 (a) ค่าการรับแรงสูงสุดของไฮโดรเจลรูปพรุนสูตรต่างๆที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยงMBA



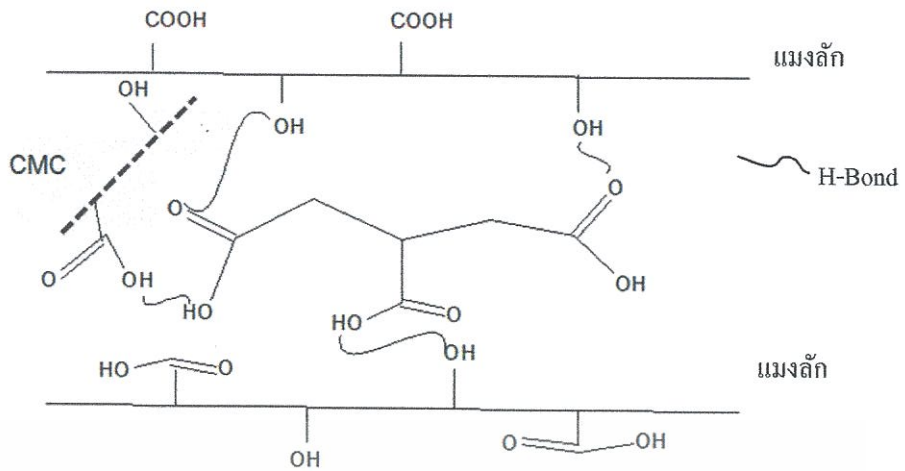
รูปที่ 4.22 (b) ค่าการรับแรงสูงสุดของไฮโดรเจลรูปพรุนสูตรต่างๆที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง CA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

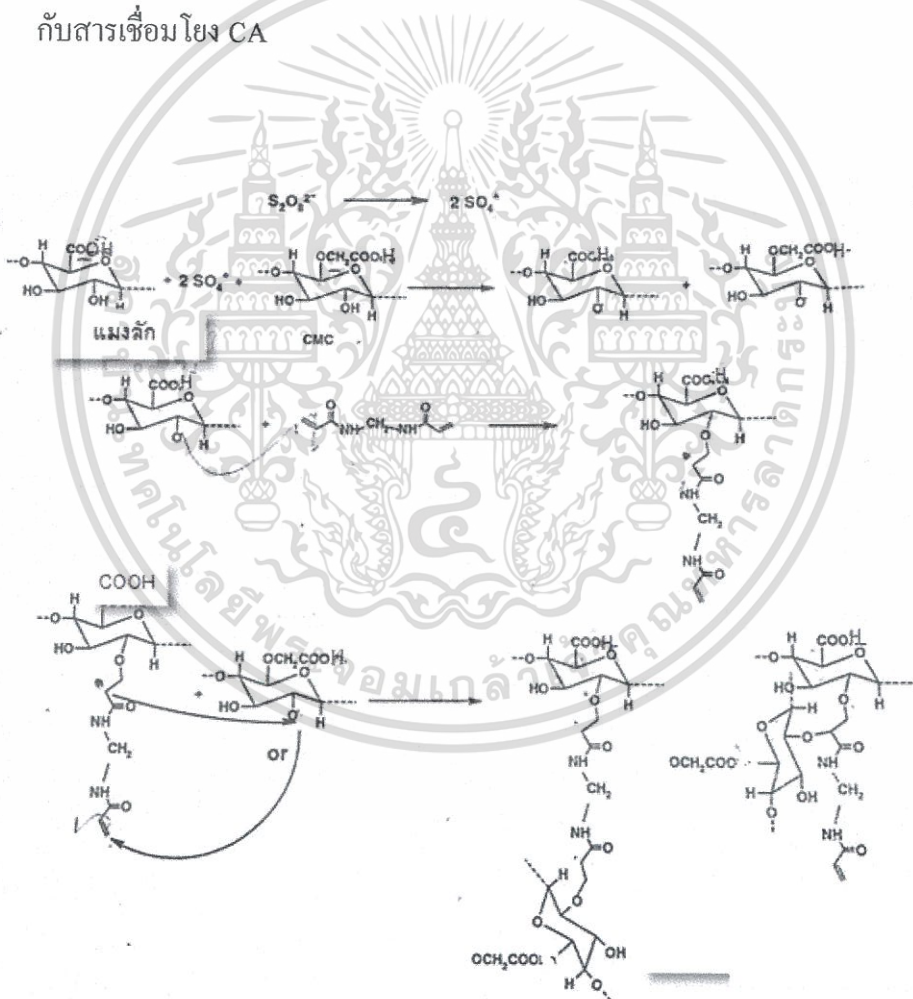
จากรูป 4.22 (a) กรณีไม่มีสารเชื่อม โยง สูตรที่มีเมงล็กล้วน จะมีค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอสูงสุดที่ 46 N เนื่องจากไม่มี CMC ไปขัดขวางการเรียงตัวทำให้ภายใน โครงสร้างของสูตรที่เป็นเมงล็กล้วนนั้น หมู่ -COOH ในเมงล็กเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ดี เมื่อทำการเติม CMC ลง พบว่าจะทำให้ค่าการรับแรงกดของทุกสูตรลดลง เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติม แต่จะสูงขึ้นตามปริมาณ CMC จาก 0.25 กรัมเป็น 1 กรัม มีค่าความแข็งแรงต่อความโค้งงอเพิ่มจาก 36 N เป็น 44 N ตามลำดับ เนื่องจาก CMC ทำให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีค่าความแข็งแรงต่อความโค้งงอเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอยังต่ำกว่าที่พบในเมงล็กล้วน

กรณีใส่สารเชื่อม โยง พบว่าเมื่อเติมสารก่อพันธะเชื่อม โยง เข้าไปในสูตรที่มีแต่เมงล็กและสูตรเมงล็กผสม CMC จะทำให้ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ MBA 0.1 กรัมและ 0.3 กรัม ตามลำดับ พิจารณารูปที่ 4.22 (b) การใช้ CA เป็นสารเชื่อม โยงให้ผลเป็นทำนองเดียวกันกับการใช้ MBA กล่าวคือปริมาณ CA และ MBA มาก ไฮโดรเจลจะรับแรงได้มาก CA สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ -OH ของเมงล็กและ CMC ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างเมงล็กกับ CMC ลดลง [51] ซึ่งสอดคล้องกับผลของ IR ในรูปที่ 4.5 การเติม CMC ลงในเมงล็ก มีผลทำให้ไฮโดรเจลผสมรับแรงได้มากขึ้น โดยการผสม CMC 0.25 กรัม มีค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอได้น้อยที่สุด และการผสม CMC 1 กรัม มีค่าความแข็งแรงต่อความโค้งงอได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับแรงยังน้อยกว่าในไฮโดรเจลเมงล็กล้วน แสดงว่าโมเลกุลของ CMC เข้าไปรบกวนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของเมงล็ก แต่เมื่อเติมสารเชื่อม โยง MBA ทำให้เกิดการเชื่อม โยงระหว่างเมงล็กกับ CMC เกิดส่งผ่านแรงดีขึ้น

ไฮโดรเจลรูปท่อนที่ใส่สารก่อพันธะเชื่อม โยง CA ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง CA กับเมงล็กและ CMC ขึ้นในโครงสร้างดังรูปที่ 4.22 (c) และเนื่องจากสารก่อพันธะเชื่อม โยง MBA ทำให้เกิดพันธะเชื่อม โยงทางเคมีระหว่างเมงล็กกับ CMC ดังรูปที่ 4.22 (d) ซึ่งทั้ง CA และ MBA จะทำให้มีค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอเพิ่มสูงขึ้นกว่าสูตรที่ไม่มีการใส่สารก่อพันธะเชื่อม โยง แต่เมื่อเติมสารก่อพันธะเชื่อม โยง MBA เข้าไปในปริมาณ 0.5 กรัมซึ่งเป็นปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้มีค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารก่อพันธะเชื่อม โยงเป็นการเพิ่มปริมาณของการเชื่อม โยงภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ทำให้เกิดการเชื่อม โยงกันแบบสายโซ่สั้น เมื่อถูกแรงกระทำ ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ จึงทำให้รับแรงได้น้อยลง



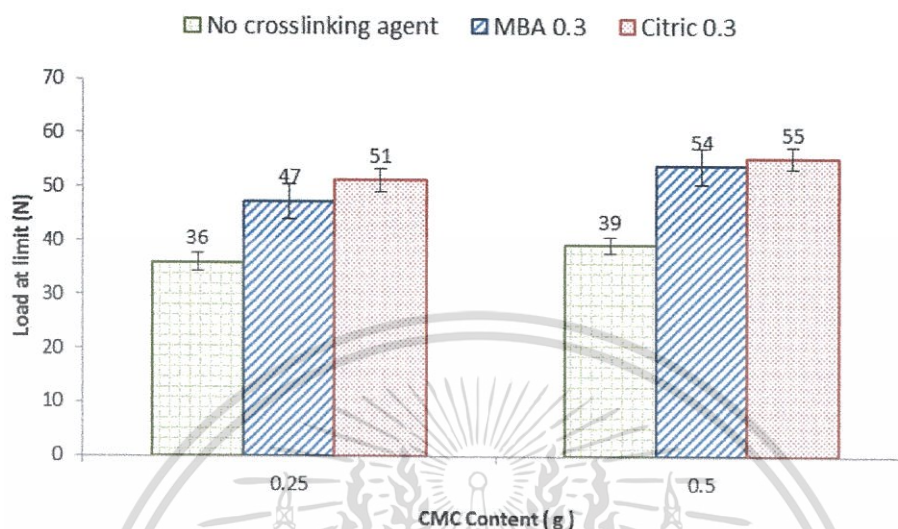
รูปที่ 4.22 (ค) แสดงแบบจำลองการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างแมงลักและ CMC กับสารเชื่อมโยง CA



รูปที่ 4.22 (ด) แสดงการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างแมงลัก กับสารเชื่อมโยง MBA [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9.2 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักผสม CMC ที่มีสารเชื่อมโยงต่างกัน

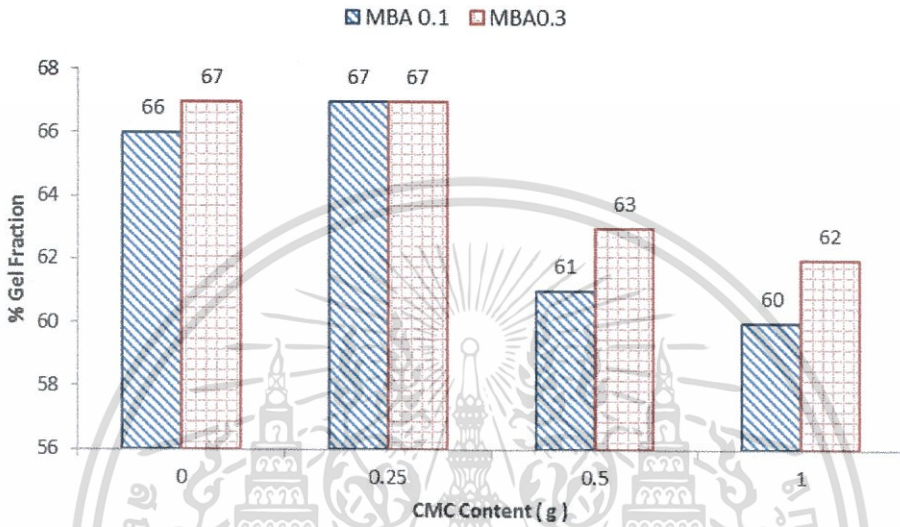


รูปที่ 4.23 ค่าการรับแรงของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักผสม CMC ที่มีสารเชื่อมโยงต่างกัน

รูปที่ 4.23 แสดงค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักผสม CMC 0.25 กรัม และ 0.5 กรัม ตามลำดับ เมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA และ CA ในปริมาณเท่ากัน ไฮโดรเจลรูพรุนผสมที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยงและมี CMC 0.5 กรัม ให้ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอ 39 N สูงกว่าไฮโดรเจลรูพรุนที่มี CMC 0.25 กรัม ให้ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอ 36 N เมื่อใส่สารเชื่อมโยง MBA 0.3 กรัม และมี CMC 0.5 กรัม ให้ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอ 54 N สูงกว่าไฮโดรเจลรูพรุนที่มี CMC 0.25 กรัม ซึ่งมีค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอ 47 N และเมื่อเปลี่ยนสารเชื่อมโยงจาก MBA เป็น CA ให้ผลในทำนองเดียวกัน คือ ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอของไฮโดรเจลรูพรุนที่มี CMC 0.5 กรัม เท่ากับ 55 N ส่วนไฮโดรเจลรูพรุนที่มี CMC 0.25 กรัม เท่ากับ 51 N อาจเนื่องจาก CMC แทรกเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของแมงลัก ทำให้โมเลกุลของแมงลักขยับเขยื้อน ยึดหยุ่นได้ดีขึ้น จึงรับและส่งแรงได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสารเชื่อมโยงระหว่าง MBA กับ CA พบว่า CA ทำให้ไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักผสม CMC มีค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอใกล้เคียงกัน

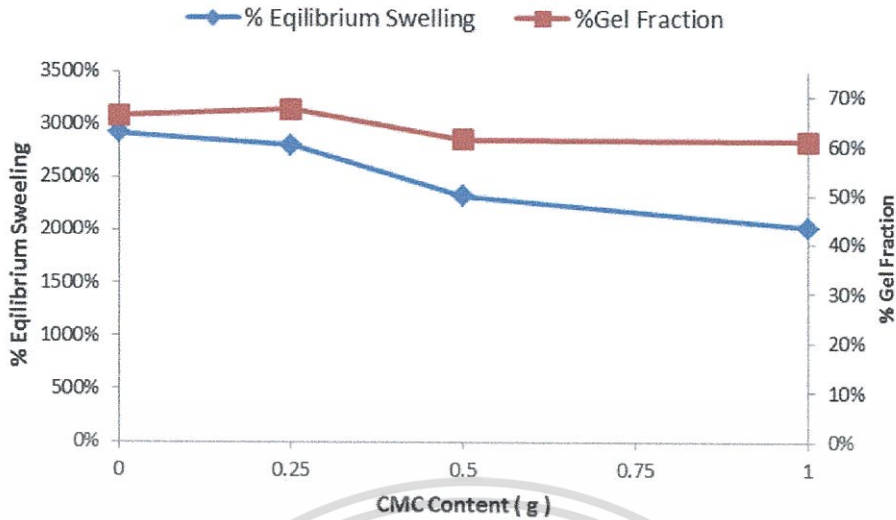
#### 4.10 เปอร์เซนต์ค่าสัดส่วนเจล

ค่าสัดส่วนเจลแสดงถึง โมเลกุลที่ไม่ละลายน้ำเพราะเกิดการเชื่อมโยง ส่วนที่ไม่ละลายสูงคาดว่าจะ เกิดพันธะเชื่อมโยงมาก



รูปที่ 4.24 เปอร์เซนต์ค่าสัดส่วนเจลของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักผสม CMC ที่มีสารเชื่อมโยงต่างกัน

จากรูปที่ 4.24 เมื่อนำไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักและที่ผสม CMC ที่มีการเชื่อมโยงด้วย MBA 0.1 และ 0.3 กรัม ตามลำดับ นำมาแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงละลายออก จากนั้นจึงนำไปอบให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก พบว่า ค่าเปอร์เซนต์สัดส่วนเจลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ตามปริมาณของ CMC 0.25>0.5>1 กรัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าเปอร์เซนต์สัดส่วนเจลของไฮโดรเจลลดลง เมื่อมีปริมาณของ CMC เพิ่มขึ้น โดยปริมาณ CMC น้อย ค่าสัดส่วนเจลมีค่าใกล้เคียงกับไฮโดรเจลรูพรุนที่ไม่มี CMC และไม่ต่างกันแม้ว่าจะมี MBA 0.1 กรัม หรือ 0.3 กรัม การดูดซับน้ำใกล้เคียงกัน แสดงว่าเมื่อปริมาณของ CMC น้อยลงจะผสมเข้ากันได้ดีกับโซ่ของแมงลัก ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างกันดังรูป 4.21 (c) เปอร์เซนต์ส่วนที่ไม่ละลายจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีปริมาณ CMC เพิ่มขึ้นเป็น 0.5 กรัม และ 1 กรัม ค่าเปอร์เซนต์สัดส่วนเจลลดลงเนื่องจาก CMC ที่ไม่เชื่อมโยงละลายน้ำออกมา

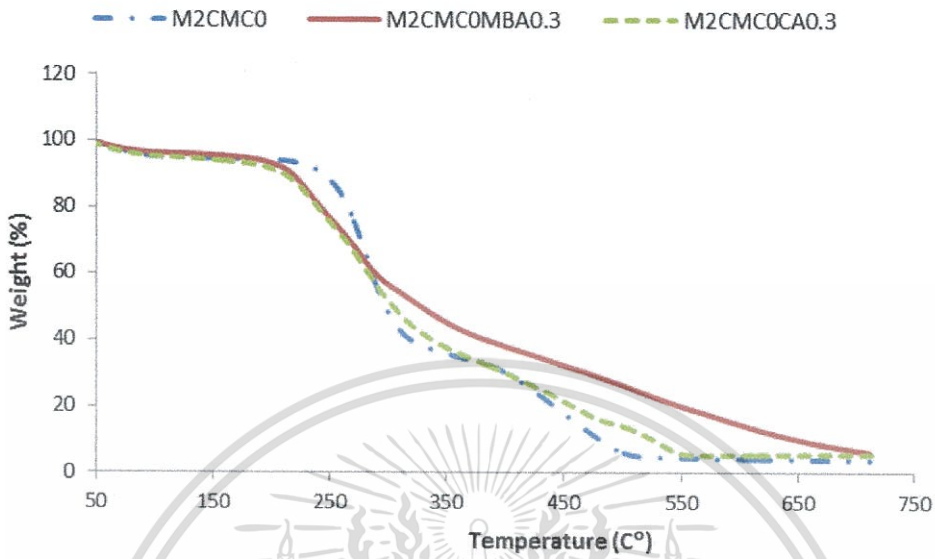


รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การดูดน้ำที่สมดุลและค่าสัดส่วนเจลของไฮโดรเจลรูพรุนแมงลักผสม CMC

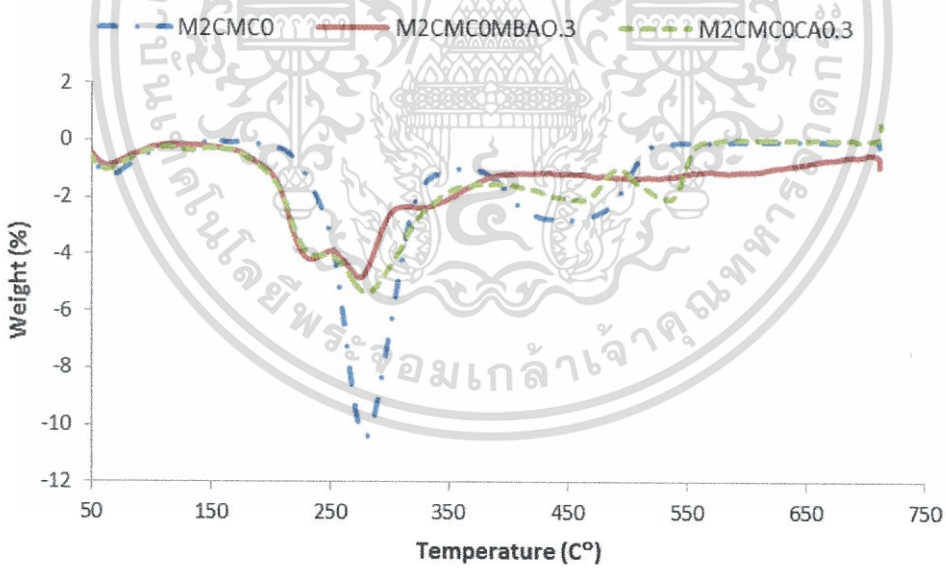
จากรูป 4.24 เมื่อพิจารณาสารเชื่อม โยง MBA เมื่อมีปริมาณ MBA มากขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณสารก่อก้อนระเชื่อม โยงมากจะทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อม โยงสูง โครงสร้างเกิดเป็นโครงร่าง 3 มิติ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น และ ไฮโดรเจลรูพรุนจึงมีความแข็งแรง การดูดซับน้ำลดลง ปริมาณของแข็งส่วนที่ไม่ละลายน้ำจึงมีปริมาณมาก

จากรูป 4.25 เมื่อพิจารณาจากปริมาณ CMC พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CMC ค่าการดูดซับน้ำ และ % Gel Fraction มีค่าลดลง

#### 4.11 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)



รูปที่ 4.26 (a) แสดงอุณหภูมิสลายตัวของสูตร M2CMC0, M2CMC0MBA0.3 และ M2CMC0CA0.3

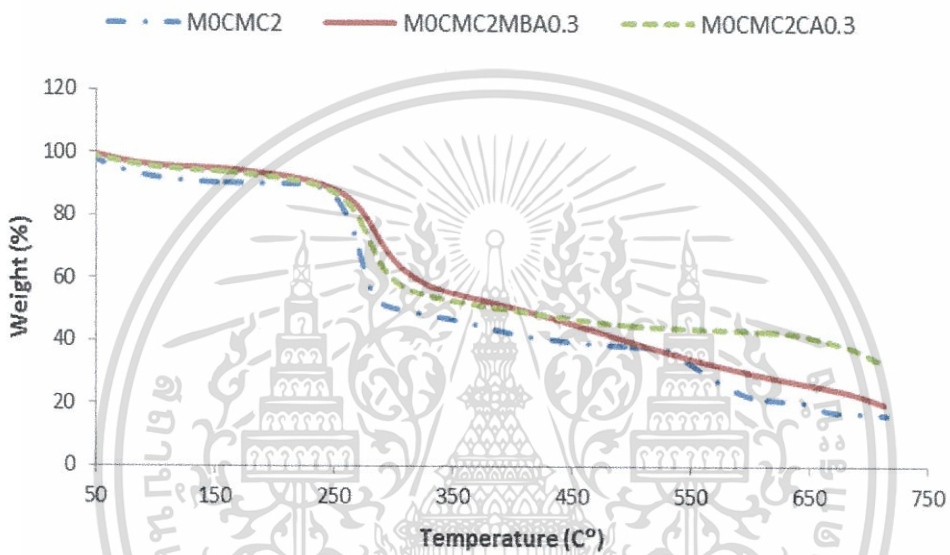


รูปที่ 4.26 (b) แสดงอนุพันธ์อันดับหนึ่งสมบัติทางความร้อน M2CMC0, M2CMC0MBA0.3 และ M2CMC0CA0.3

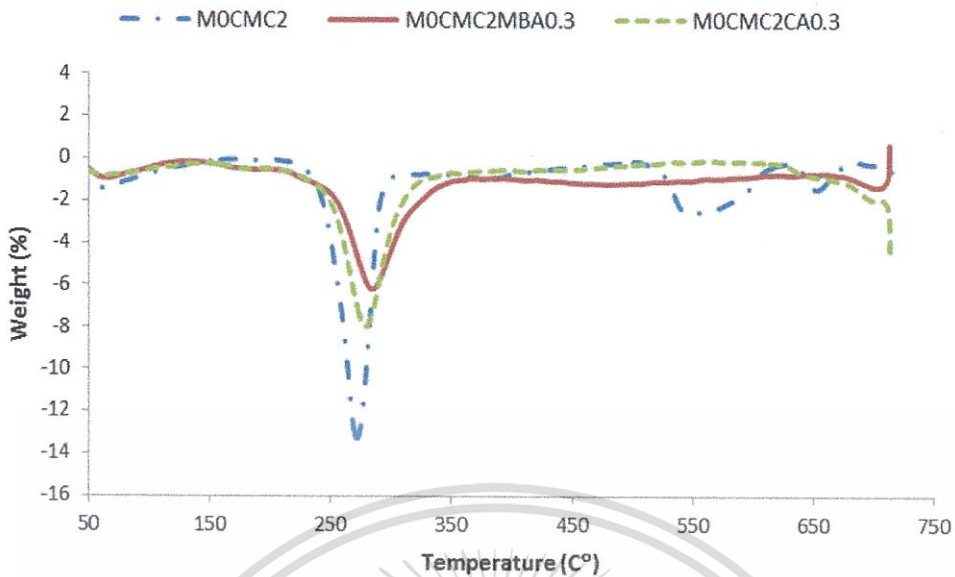
รูป 4.26 (a) และ 4.26 (b) เปรียบเทียบของ MBA และ CA ปริมาณ 0.3 กรัมที่มีต่อแมงลัก จากสูตร M2CMC0 พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ชั้น คือชั้นที่หนึ่งที่ 278 °C และชั้นที่สองที่ 447 °C เนื่องจากแมงลักประกอบด้วยพอลิเมอร์ใน 2 ชนิดคือ glucuronic และ galacturonic และจากเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติเห็นไปเซประเขยขนดานการค้ำ ไม่ว่าจะณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร M2CMC0MBA0.3 มีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ชั้นเช่นกัน แต่จะมีอุณหภูมิการสลายตัวในชั้นที่สองที่อุณหภูมิ 520 °C ที่สูงกว่า เพราะสารก่อกันระเชื่อม โยง MBA เกิดการเชื่อม โยงกับแมงลัก และพบว่า การลดลงของสารเมื่อเชื่อม โยงด้วย MBA เกิดอย่างช้าๆ

และในกรณีของ CA สูตร M2CMC0CA0.3 มีอุณหภูมิการสลายตัว 4 ชั้น คือ 216 °C 281 °C 460 °C และ 534 °C ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวในชั้นที่สองที่ 281 °C เป็นอุณหภูมิที่แมงลักสลายตัว

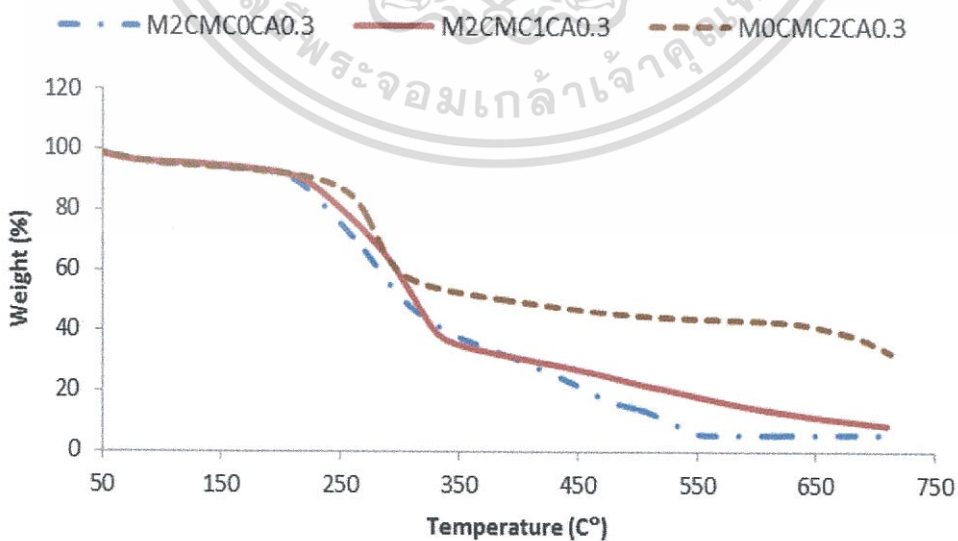


รูปที่ 4.27 (a) แสดงอุณหภูมิสลายตัวของสูตร M0CMC2, M0CMC2MBA0.3 และ M0CMC2CA0.3



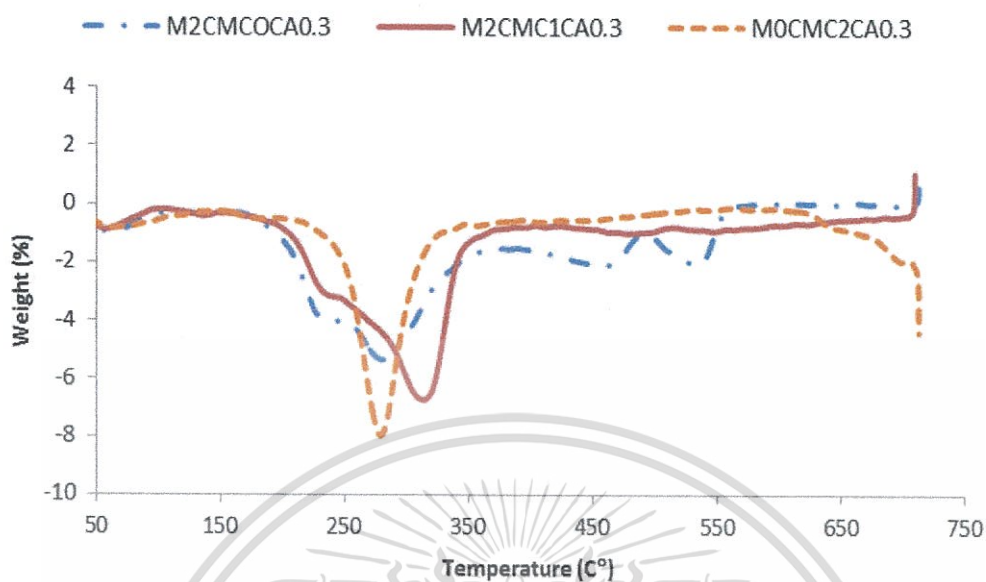
รูปที่ 4.27 (b) แสดงอนุพันธ์อันดับหนึ่งสมบัติทางความร้อน M0CMC2, M0CMC2MBA0.3 และ M0CMC2CA0.3

จากรูป 4.26 เปรียบเทียบการเชื่อมโยง CMC ด้วย MBA กับ CA ในปริมาณ 0.3 กรัม เท่ากัน พบว่า M0CMC2MBA0.3 มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่า M0CMC2CA0.3 แสดงถึงการเกิดพันธะเชื่อมโยงที่แข็งแกร่งกว่า แต่กรณีของการเติม CA พบ residual weight เหลือมากกว่า เนื่องจาก CA จะทำให้กระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อน (carbonization) เกิดได้ช้าลง [49]



รูปที่ 4.28 (a) แสดงอุณหภูมิสลายตัวของสูตร M2CMC0CA0.3, M2CMC1CA0.1 และ

M0CMC2CA0.3 รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 (b) แสดงอนุพันธ์อันดับหนึ่งสมบัติทางความร้อน M2CMC0CA0.3, M2CMC1CA0.3 และ M0CMC2CA0.3

จากรูป 4.28 (a) และ (b) เปรียบเทียบผลของ ไฮโดรเจลของผสม เมื่อมีสารเชื่อมโยง CA 0.3 กรัม พบว่า สูตร M0CMC2CA0.3 มีอุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่หนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 279 °C สูตร สูตร M2CMC0CA0.3 มีอุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่หนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 281 °C และสูตร M2CMC1CA0.3 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลผสมมีอุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่หนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 313 °C ซึ่งสูงกว่าสูตรไฮโดรเจลแมงกานีสและ CMC ล้วน แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น เมื่อมีทั้งแมงกานีสและ CMC อยู่ในโครงสร้างของไฮโดรเจล เนื่องจากแมงกานีสและ CMC สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนต่อกันได้

ตาราง 4.5 สรุปผล TGA

| สูตร | อัตราส่วน และ ส่วนผสม ของแต่ละสูตร | อุณหภูมิการสลายตัว (°C) |
|------|------------------------------------|-------------------------|
| 1    | M2CMC0                             | 278, 447                |
| 2    | M0CMC2                             | 271, 547, 652           |
| 3    | M2CMC1                             | 273                     |
| 4    | M2CMC0MBA0.3                       | 208, 274, 330           |
| 5    | M0CMC2MBA0.3                       | 284                     |
| 6    | M2CMC1MBA0.3                       | 283, 440                |
| 7    | M2CMC0CA0.3                        | 216, 281, 460, 534      |
| 8    | M0CMC2CA0.3                        | 279                     |
| 9    | M2CMC1CA0.3                        | 249, 313                |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลรูพรุนผสมเตรียมจากสารเมือกแมงลักและสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) โดยใช้ MBA และ Citric Acid เป็นสารก่อก้อนระเชื่อมโยง APS เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา acid เพื่อคุณสมบัติต่างๆจากสารเชื่อมโยงทั้ง 2 ชนิด วัดสมบัติ แรงกดอัด การทดสอบหุ้มฟุ้งกัซัน การดูดซับน้ำ ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA และทดสอบสถานะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ไฮโดรเจลรูพรุนที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ CMC เมื่อไม่มีการใส่สารเชื่อมโยง พบว่าเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการใส่สารเชื่อมโยง พบว่าเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น การดูดซับน้ำจะลดลง ซึ่งทั้ง MBA และ CA ให้ผลไปในแนวโน้มนเดียวกัน
2. ไฮโดรเจลรูพรุนที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเชื่อมโยง พบว่าเมื่อปริมาณของสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทั้งสารเชื่อมโยง MBA และ CA ทำให้ค่าความหนาแน่นมากขึ้น เปอร์เซ็นต์จำนวนรูพรุนลดลง และการดูดซับน้ำมีค่าลดลง
3. การกักเก็บน้ำและค่าสัดส่วนเจตของไฮโดรเจลรูพรุนที่ใส่สารเชื่อมโยง MBA ลดลง เมื่อมีปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น
4. จำนวนรูพรุนของไฮโดรเจลแมงลัก เมื่อไม่มีสารเชื่อมโยง มีขนาดรูพรุนเล็ก จำนวนรูพรุนมาก แต่เมื่อมีปริมาณ CMC ขนาดรูพรุนใหญ่ จำนวนรูพรุนน้อย ในกรณีที่มีสารเชื่อมโยง ทั้ง MBA และ CA จำนวนรูพรุนของไฮโดรเจลรูพรุนลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ CMC
5. ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอของไฮโดรเจลรูพรุนที่ไม่มีสารเชื่อมโยง รับแรงได้น้อย ส่วนไฮโดรเจลรูพรุนที่มีสารเชื่อมโยง การรับแรงดีขึ้น เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอระหว่างไฮโดรเจลรูพรุนที่ใส่สารเชื่อมโยง MBA และ CA ไฮโดรเจลรูพรุนที่ใส่สารเชื่อมโยง CA จะสามารถรับแรงได้ดีกว่า MBA และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง ทำให้ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อมีปริมาณของสารเชื่อมโยงมากเกินไป จะทำให้ค่าความแข็งแรงด้านความโค้งงอน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ไฮโดรเจลรูปทรงแผ่นบางลึกลับ CMC ที่ดีที่สุดคือสูตร M2CMC0.25MBA0.3 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.25 กรัม, พวงวุ้นแห้ง 2 กรัม, MBA 0.3 กรัม, APS 0.1 กรัม และน้ำ 50 มิลลิลิตร เนื่องจากมีสมบัติการดูดซับน้ำ การกักเก็บน้ำและสมบัติเชิงกลที่ดีเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในด้านทางการแพทย์ต่อไป

#### ข้อเสนอแนะ

1. อาจจะมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ CMC เพื่อคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณสาร
2. อาจจะมีการทดลองการดูดซับน้ำในสภาวะสลายเกลือ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านทางการแพทย์ต่อไป



## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Ross,R. Mayer,M. Benziman. **“Cellulose biosynthesis and function in bacteria.”** Microbiol, 1991, 55 (1), 35-38
- [2] B. Tomsic,B. Simončić,B. Orel,A. Vilcnik, H. Spreizer. **“Biodegradability of cellulose fabric modified by imidazolidinone.”** Carbohydr. Polym, 2007, 69 (3), 478-488
- [3] P.J. Flory. **“Principles of polymer chemistry.”** Cornell University Press: Ithaca, New York, USA, 1953
- [4] M.H. Pittler, E. Ernst. **“Dietary supplements for body-weight reduction: a systematic review.”** 2004, 79 (4), 529-536
- [5] R.B. Saper,D.M. Eisenberg, R.S. Philips. **“Common dietary supplements for weight loss.”**, 2004, 70 (9), 1731-1738
- [6] A.C Jen,W. Conley, A.G. Mikos. **“Hydrogels for cell immobilization. Biotechnol.”** Bioeng, 1996, 50 (4), 357-364
- [7] W.K. Czaja, D.J. Young, M. Kawecki, B. Malcolm. **“The future prospects of microbial cellulose in biomedical applications.”** Biomacromolecula, 2007, 8 (1), 1-12
- [8] B. Tomsic, B. Simoncic, B. Orel, A. Vilcnik, H. Spreizer. **“Biodegradability of cellulose fabric modified by imidazolidinone.”** Carbohydr. Polym., 2007, 69 (3), 478-488
- [9] [Online].Available:  
<http://www1.pttchem.com/library/dictionary/carboxymethylcellulose/index.shtml>

(18 สิงหาคม 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] B.L. Browning. “Wood Chemistry. In K.Wbritt (ed.), **Handbook of pulp and paper technology.**” 1990, pp. 3-9. New york : Van Nostrand reinhold Co.,
- [11] A.C. Jen,W. Conley, M. Mikos. “**Hydrogels for cell immobilization. Biotechnol.**” Bioeng., 1996, 50(4), 357-364
- [12] T. Miyamoto,S. Takahashi,H. Ito,H. Inagaki, Y. Nioshiki. “**Tissue biocompatibility of cellulose and its derivatives.**” J. Biomed. Mater. Res., 1989, 23 (1), 125-133
- [13] [Online].Available: [http://www.rspg.or.th/plants\\_data/herbs/herbs\\_05\\_8.html](http://www.rspg.or.th/plants_data/herbs/herbs_05_8.html) (22 สิงหาคม 2556)
- [14] T. Tanaka (1981), “**Gels. Sci. Am.**”, 244 (1), 124-136,138
- [15] [Online].Available:[http://thai-healthy.blogspot.com/2011/02/blog-post\\_25.html](http://thai-healthy.blogspot.com/2011/02/blog-post_25.html) (24 สิงหาคม 2556)
- [16] [Online].Available: <http://musa-vegetables.blogspot.com/2011/12/blog-post.html> (25 สิงหาคม 2556)
- [17] [Online].Available: <http://www.samunpai.com/diet/show.php?id=53&cat=3> (28 สิงหาคม 2556)
- [18] [Online].Available: <http://www.freezedryinginfo.com/> (28 สิงหาคม 2556)
- [19] [Online].Available: [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/biomolecule/chapter2\\_3.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/biomolecule/chapter2_3.html) (28 สิงหาคม 2556)
- [20] [Online].Available: [http://pr.ku.ac.th/pr\\_news/Acrobat/2551/310.pdf](http://pr.ku.ac.th/pr_news/Acrobat/2551/310.pdf) (28 สิงหาคม 2556)
- [21] [Online].Available: <http://polymericmaterialsgroup.uv.ro/> (28 สิงหาคม 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] [Online].Available: [http://polymericmaterialsgroup.uv.ro/Polymeric\\_Gels\\_1.html](http://polymericmaterialsgroup.uv.ro/Polymeric_Gels_1.html)  
(28 สิงหาคม 2556)
- [23] ปิยพร ลิ้มวรรณสรณ์. “การเตรียมซูเปอร์แอบซอร์เบนต์ที่สลายตัวได้ทางชีวภาพของแป้งมันสำปะหลัง-อะครีลาไมด์/โพแทสเซียมอะคริเลต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [24] ภาณุพงศ์ ภูทะวัง. “การศึกษาผลของชนิดเรซินต่างๆที่มีต่อสมบัติฟิล์มไฮโดรเจลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [25] P.J.Flory. “**Hydrogel Biomaterials: Structure and Physical Chemistry.**” [lecture].  
England: Cornell University. 2003.
- [26] รุ่งลาวัลย์ สมสุนันท์. “การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลที่มีพอลิอะครีลาไมด์เป็นองค์ประกอบสำหรับทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2544.
- [27] P.J. Bryant,S. Stein,A.R. Menjoge,S. Gunaseelan,S.N. Anumolu. “**Dressing compositions and methods.**” PatentWO2008070270 (A2), 2008
- [28] [Online].Available: <http://www.dailynews.co.th/technology/14482> (29 สิงหาคม 2556)
- [29] [Online].Available: <http://www.allaboutvision.com/contacts/silicone-hydrogel.html>  
(29 สิงหาคม 2556)
- [30] [Online].Available: [http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1965&Itemid=0](http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=1965&Itemid=0) (29 สิงหาคม 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1.” ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [32] Folkes, M.J. and Hope, P.S. *Polymer Blends and Alloys*, 1st Ed. New York, 1993.  
Paul, D.R., J.W. Barlow, H. Keskkula. “**Polymer Blends.**” in *Encyclopedia of Polymer*
- [33] C. Vinatier, D. Magne, A. and Moreau, O. “**Engineering cartilage with human nasal chondrocytes and a silanized hydroxypropyl methycellulose hydrogel.**” *J. Biomed Mater. Res.* 2007, 104(1). 30-33
- [34] Terence W. G. Rowe F Inst P and John W snowman of Edwards “**High Vacuum Cramley Edwards Freeze - Drying Handbook.**” 1978
- [35] จตุพล แสงสุริยัน, “**การทำแห้งแบบ Freeze - Drying ในงานเตรียมยาฉีด Tc-99 m.**” Radiopharmaceutical Kit
- [36] [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Citric\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Citric_acid) (30 สิงหาคม 2556)
- [37] [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/N,N'-Methylenebisacrylamide> (30 สิงหาคม 2556)
- [38] [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium\\_persulfate](http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_persulfate) (30 สิงหาคม 2556)
- [39] Sayeda M, Kariman M. El Salmawi (2012) “**Preparation and Properties of Carboxymethyl Cellulose (CMC) Sodium alginate (SA) Blends Induced by Gamma Irradiation.**” *J Polym Environ*
- [40] หทัยกาญจน์ จันทร์ส่องแสง. (2554). “**การเตรียมพอลิเมอร์โครงสร้างแหกึ่งสอดไขว้จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย.**” วิทยานิพนธ์ วท.ม., สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] ปิยนุตร์ น้อยค้วง และ วชิรพันธ์ จันทร์พงษ์. “การใช้มิวซิเลจแห้งจากเมล็ดแมงลักเป็นสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม กล้วยหอม.” [online]. Available: (20 ตุลาคม 2553) [foodtech.siam.edu/...](http://foodtech.siam.edu/...) การใช้มิวซิเลจเป็นสารให้ความคงตัวในไอศกรีมกล้วยหอม.
- [42] สุวรรณมา ละเอียดอินทร์. “การปรับปรุงกระบวนการผลิตฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวเพื่อใช้เป็นวัสดุคูดซับ.” 2553 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
- [43] พิมภรณ์ สมกิตติธรรม, รัตนาพร นิละนนท์ และรองศาสตราจารย์ ดร. วันดี กฤษณพันธ์. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร จากแมงลัก.” โครงการพิเศษ ภาควิชาเภสัชวินิจฉัย
- [44] กุลชิตา แซ่ฮ่วย. (2550). “การศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลผสมระหว่างพอลิ-2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและสารเมือกจากแมงลัก.” วิทยานิพนธ์ วท.ม., สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [45] พดาร์ตน์ นิลเจียรนัย, ชินานาฏ วิทยาประภากร, โรเบิร์ต มอลลรอย และคณะรัฐ ฒ ลำปาง. “การออกแบบและสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลสำหรับใช้ในการแพทย์เพื่อเป็นวัสดุปิดแผล.” Chiang Mai Journal of Science. ฉบับที่ 34, ตุลาคม 2550. หน้า 183-189.
- [46] รัตนา วงศ์วัฒนเสถียร (2543) “การสังเคราะห์และการตรวจลักษณะเฉพาะของซูเปอร์แอบซอร์เบนท์ที่มีรูพรุนของพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์).” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิทยาศาสตร์ (ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [47] A. Pourjavadi, Sh. Barzegar, G.R. Mahdavinia. “MBA-crosslinked Na-Alg/CMC as a smart full-polysaccharide superabsorbent hydrogels.” Carbohydrate Polymers., vol. 66, 2006. pp. 386-395.
- [48] A. Pourjavadi, Sh. Barzegar, G.R. Mahdavinia. "Synthesis and swelling behavior of a new superabsorbent hydrogel network based on polyacrylamide grafted onto salep." J. App. Poly. Sci , Vol. 112, 2625-2633, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] [Online].Available: <http://infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler524/PET524-porosity-2-ppt.pdf> [2013, March 10]
- [50] H.M. Fahmy,M.M.G. Fouda. **“Crosslinking of alginic acid chitosan matrices using polycarboxylic acid and their utilization of sodium diclofenone release”** Carbohydrate Polymer 73 (2008), 606-611
- [51] Y. Jingao,W.Ning and M.Xiaofei. **“The effect of citric acid on the properties of thermoplastic starch plasticized by glycerol”** Starch. 57 (2005) 494-504
- [52] ณิชฐา รัชมีพงศ์. (2553). **“การคัดแปรสารเมือกจากแมงลักเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับน้ำที่ยั่งยืน”**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Appendix-A

### ผลการทดสอบความเป็นรูปธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลการทดสอบความเป็นรูปพรุน**  
**ตาราง A-1 การทดสอบความเป็นรูปพรุน**

| สูตร            | % ความเป็นรูปพรุน |
|-----------------|-------------------|
| M2CMC0          | 83.2              |
| M2CMC0.25       | 83.4              |
| M2CMC0.5        | 70.1              |
| M2CMC1          | 78.0              |
| M2CMC0MBA0.1    | 75.3              |
| M2CMC0.25MBA0.1 | 70.6              |
| M2CMC0.5MBA0.1  | 67.4              |
| M2CMC1MBA0.1    | 64.4              |
| M2CMC0MBA0.3    | 70.8              |
| M2CMC0.25MBA0.3 | 67.4              |
| M2CMC0.5MBA0.3  | 62.3              |
| M2CMC1MBA0.3    | 56.8              |
| M2CMC0MBA0.5    | 67.4              |
| M2CMC0.25MBA0.5 | 62.7              |
| M2CMC0.5MBA0.5  | 58.3              |
| M2CMC1MBA0.5    | 52.2              |
| M2CMC0CA0.1     | 75.4              |
| M2CMC0.25CA0.1  | 74.6              |
| M2CMC0.5CA0.1   | 71.2              |
| M2CMC1CA0.1     | 69.5              |
| M2CMC0CA0.3     | 70.9              |
| M2CMC0.25CA0.3  | 68.1              |
| M2CMC0.5CA0.3   | 64.4              |
| M2CMC1CA0.3     | 60.5              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Appendix-B

### ผลการทดสอบหาความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบหาความหนาแน่น  
ตาราง B-1 การทดสอบหาความหนาแน่น

| สูตร            | ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------|----------------------------------|
| M2CMC0          | 0.0324                           |
| M2CMC0.25       | 0.0318                           |
| M2CMC0.5        | 0.0305                           |
| M2CMC1          | 0.0337                           |
| M0CMC2          | 0.0348                           |
| M2CMC0MBA0.1    | 0.0452                           |
| M2CMC0.25MBA0.1 | 0.0400                           |
| M2CMC0.5MBA0.1  | 0.0499                           |
| M2CMC1MBA0.1    | 0.0554                           |
| M0CMC2MBA0.1    | 0.0452                           |
| M2CMC0MBA0.3    | 0.0517                           |
| M2CMC0.25MBA0.3 | 0.0513                           |
| M2CMC0.5MBA0.3  | 0.0543                           |
| M2CMC1MBA0.3    | 0.0575                           |
| M0CMC2MBA0.3    | 0.0513                           |
| M2CMC0CA0.1     | 0.0340                           |
| M2CMC0.25CA0.1  | 0.0357                           |
| M2CMC0.5CA0.1   | 0.0386                           |
| M2CMC1CA0.1     | 0.0361                           |
| M0CMC2CA0.1     | 0.0395                           |
| M2CMC0CA0.3     | 0.0439                           |
| M2CMC0.25CA0.3  | 0.0465                           |
| M2CMC0.5CA0.3   | 0.0425                           |
| M2CMC1CA0.3     | 0.0434                           |
| M0CMC2CA0.3     | 0.0472                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central five-tiered umbrella (parasol) with a sunburst above it. The emblem is flanked by two smaller, three-tiered umbrellas. The entire design is set against a background of stylized floral and flame-like patterns. The Thai text around the border of the seal reads "มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์" (Mahavithayalai Rajabhat Buriram).

**Appendix-C**  
**ผลการทดสอบการหาค่าความแข็งแรงด้านการโค้งงอ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลทดสอบหาค่าความแข็งแรงด้านการโค้งงอ

ตาราง C-1 ผลการทดสอบแรงกด

| สูตร            | Load at limit (N) |
|-----------------|-------------------|
| M2CMC0          | 46.18             |
| M2CMC0.25       | 36.30             |
| M2CMC0.5        | 39.47             |
| M2CMC1          | 44.23             |
| M2CMC0MBA0.1    | 52.38             |
| M2CMC0.25MBA0.1 | 38.12             |
| M2CMC0.5MBA0.1  | 44.07             |
| M2CMC1MBA0.1    | 48.64             |
| M2CMC0MBA0.3    | 62.35             |
| M2CMC0.25MBA0.3 | 47.90             |
| M2CMC0.5MBA0.3  | 54.21             |
| M2CMC1MBA0.3    | 57.43             |
| M2CMC0MBA0.5    | 54.30             |
| M2CMC0.25MBA0.5 | 44.39             |
| M2CMC0.5MBA0.5  | 47.05             |
| M2CMC1MBA0.5    | 50.42             |
| M2CMC0CA0.1     | 53.85             |
| M2CMC0.25CA0.1  | 44.52             |
| M2CMC0.5CA0.1   | 51.37             |
| M2CMC1CA0.1     | 56.40             |
| M2CMC0CA0.3     | 54.24             |
| M2CMC0.25CA0.3  | 51.86             |
| M2CMC0.5CA0.3   | 55.35             |
| M2CMC1CA0.3     | 59.12             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ

ตาราง D-1 การทดสอบการดูดซับน้ำ

| สูตร            | น.น.<br>ไฮโดร<br>เจล | %ดูดซับ<br>น้ำ 1ช.ม. | %ดูดซับ<br>น้ำ 2ช.ม. | %ดูดซับ<br>น้ำ 3ช.ม. | %ดูดซับ<br>น้ำ 4ช.ม. | %ดูดซับ<br>น้ำ 5 ช.ม. | %ดูดซับ<br>น้ำ 6ช.ม. |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| M2CMC0          | 0.1366               | 2990.1               | 4634.7               | 5911.1               | 6616.5               | 7511.7                | 7864.2               |
| M2CMC0.25       | 0.2136               | 1875.6               | 1838.4               | 1822.3               | 1982.9               | 2003.4                | 2107.4               |
| M2CMC0.5        | 0.1672               | 2439.6               | 3553.4               | 3577.1               | 3054.3               | 2851.4                | 3207.0               |
| M2CMC1          | 0.1587               | 2677.9               | 4157.7               | 4662.5               | 5053.4               | 5342.5                | 5634.8               |
| M2CMC0MBA0.1    | 0.1206               | 1816.3               | 1835.1               | 1910.9               | 1885.7               | 2053.9                | 2020.8               |
| M2CMC0.25MBA0.1 | 0.2116               | 1875.6               | 1838.4               | 1822.3               | 1982.9               | 2103.4                | 1996.7               |
| M2CMC0.5MBA0.1  | 0.2285               | 1486.9               | 1525.4               | 1647.7               | 1628.5               | 1812.8                | 1775.7               |
| M2CMC1MBA0.1    | 0.1718               | 1246.6               | 1295.9               | 1474.7               | 1553.1               | 1606.4                | 1730.0               |
| M2CMC0MBA0.3    | 0.1975               | 1322.8               | 1342.9               | 1481.8               | 1425.4               | 1500.4                | 1618.3               |
| M2CMC0.25MBA0.3 | 0.1817               | 1494.3               | 1475.1               | 1546.0               | 1557.1               | 1616.1                | 1708.8               |
| M2CMC0.5MBA0.3  | 0.1296               | 1435.7               | 1301.2               | 1559.8               | 1346.4               | 1339.3                | 1358.2               |
| M2CMC1MBA0.3    | 0.1366               | 1262.6               | 1281.2               | 1329.7               | 1356.3               | 1395.3                | 1438.1               |
| M2CMC0MBA0.5    | 0.1331               | 1202.4               | 1414.8               | 1469.1               | 1462.3               | 1422.8                | 1490.8               |
| M2CMC0.25MBA0.5 | 0.1388               | 1326.9               | 1386.3               | 1391.3               | 1397.7               | 1533.9                | 1574.8               |
| M2CMC0.5MBA0.5  | 0.1388               | 810.9                | 956.7                | 990.9                | 1003.9               | 1007.1                | 1108.9               |
| M2CMC1MBA0.5    | 0.1450               | 959.0                | 1025.2               | 1107.7               | 1057.7               | 1083.1                | 1094.5               |
| M2CMC0CA0.1     | 0.1233               | 2104.3               | 2681.3               | -                    | -                    | -                     | -                    |
| M2CMC0.25CA0.1  | 0.1944               | 2084.3               | 2645.2               | -                    | -                    | -                     | -                    |
| M2CMC0.5CA0.1   | 0.2187               | 1982.5               | 2399.3               | -                    | -                    | -                     | -                    |
| M2CMC1CA0.1     | 0.1817               | 1905.3               | 2313.6               | -                    | -                    | -                     | -                    |
| M2CMC0CA0.3     | 0.1495               | 1895.3               | 2377.0               | -                    | -                    | -                     | -                    |
| M2CMC0.25CA0.3  | 0.2238               | 1739.5               | 2250.8               | -                    | -                    | -                     | -                    |
| M2CMC0.5CA0.3   | 0.1868               | 1584.3               | 2149.4               | -                    | -                    | -                     | -                    |
| M2CMC1CA0.3     | 0.1693               | 1695.3               | 2055.2               | -                    | -                    | -                     | -                    |

หมายเหตุ สูตรที่ใช้ CA เป็นสารเชื่อม โยงจะคงรูปในน้ำเป็นเวลา 2 ช.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง D-2 การทดสอบการดูดซับน้ำที่สมดุล

| สูตร            | % ดูดซับน้ำที่สมดุล |
|-----------------|---------------------|
| M2CMC0MBA0.1    | 2923.2              |
| M2CMC0.25MBA0.1 | 2804.5              |
| M2CMC0.5MBA0.1  | 2324.3              |
| M2CMC1MBA0.1    | 2030.0              |
| M2CMC0MBA0.3    | 2814.6              |
| M2CMC0.25MBA0.3 | 2774.0              |
| M2CMC0.5MBA0.3  | 2985.1              |
| M2CMC1MBA0.3    | 1700.6              |

ตาราง D-3 การหา % ค่าสัดส่วนเจล

| สูตร            | % ค่าสัดส่วนเจล |
|-----------------|-----------------|
| M2CMC0MBA0.1    | 2923.0          |
| M2CMC0.25MBA0.1 | 2804.5          |
| M2CMC0.5MBA0.1  | 2324.3          |
| M2CMC1MBA0.1    | 2030.7          |
| M2CMC0MBA0.3    | 2814.2          |
| M2CMC0.25MBA0.3 | 2774.2          |
| M2CMC0.5MBA0.3  | 2985.0          |
| M2CMC1MBA0.3    | 1700.8          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง D-4 การทดสอบการกักเก็บน้ำ

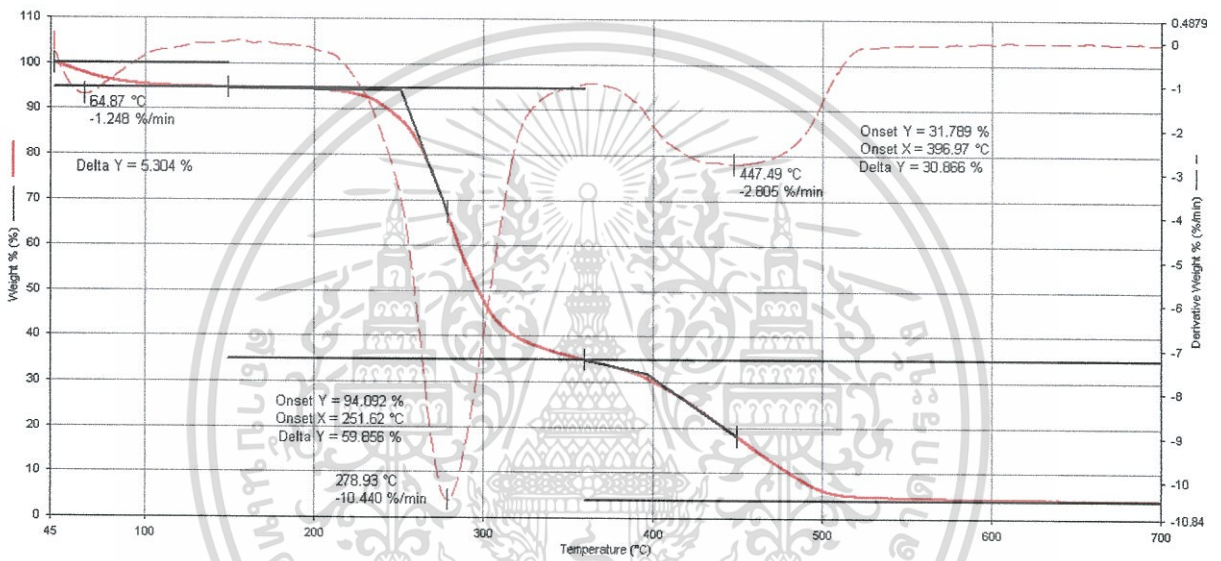
| สูตร            | % การกักเก็บ<br>น้ำ ช.ม.ที่ 1 | % การกัก<br>เก็บน้ำ ช.ม.<br>ที่ 2 | % การกัก<br>เก็บน้ำ ช.ม.<br>ที่ 3 | % การกัก<br>เก็บน้ำ ช.ม.<br>ที่ 4 | % การกัก<br>เก็บน้ำ ช.ม.<br>ที่ 5 | % การกัก<br>เก็บน้ำ ช.ม.<br>ที่ 6 |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| M2CMC0MBA0.1    | 90                            | 75                                | 64                                | 62                                | 38                                | 34                                |
| M2CMC0.25MBA0.1 | 91                            | 78                                | 65                                | 64                                | 45                                | 40                                |
| M2CMC0.5MBA0.1  | 86                            | 65                                | 51                                | 51                                | 27                                | 23                                |
| M2CMC1MBA0.1    | 88                            | 75                                | 50                                | 48                                | 23                                | 18                                |
| M2CMC0MBA0.3    | 93                            | 78                                | 65                                | 65                                | 40                                | 36                                |
| M2CMC0.25MBA0.3 | 91                            | 81                                | 68                                | 68                                | 49                                | 43                                |
| M2CMC0.5MBA0.3  | 88                            | 68                                | 54                                | 54                                | 31                                | 26                                |
| M2CMC1MBA0.3    | 91                            | 76                                | 52                                | 52                                | 29                                | 20                                |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

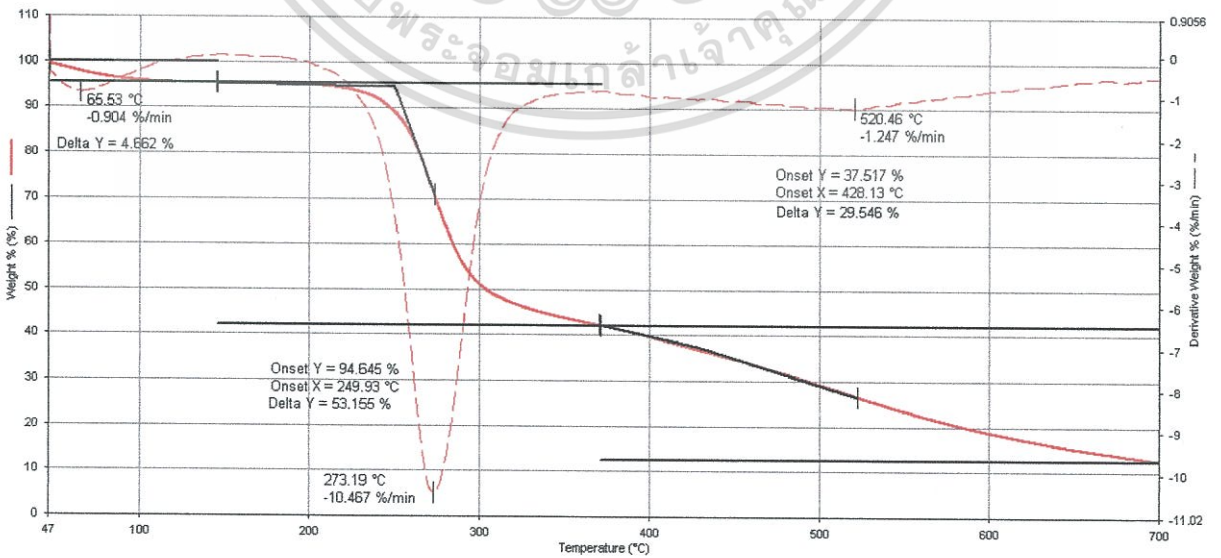


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ TGA

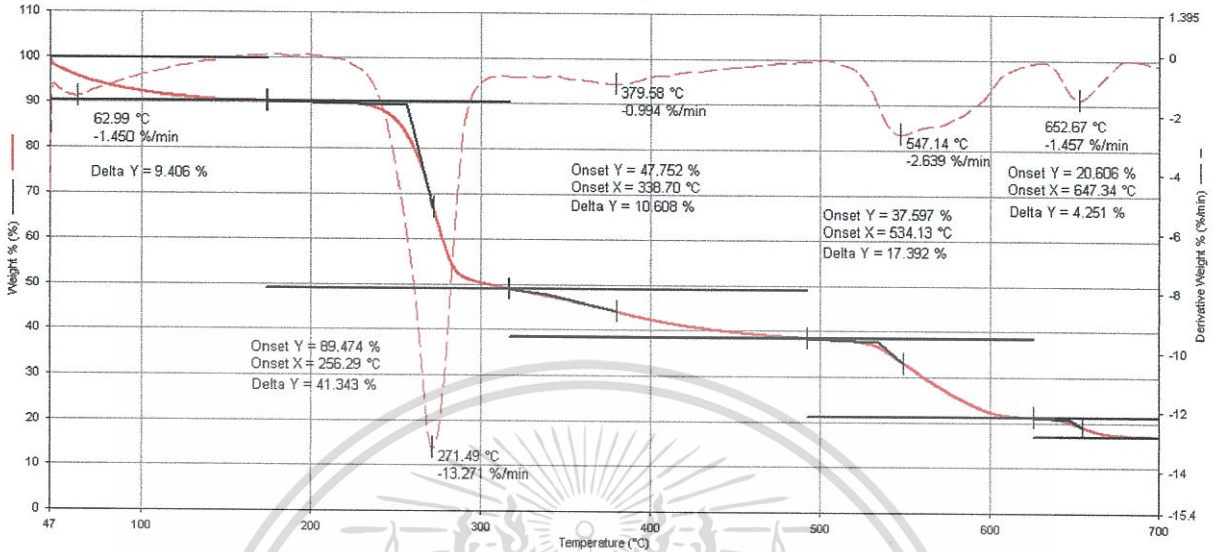


รูปที่ E-1 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC0

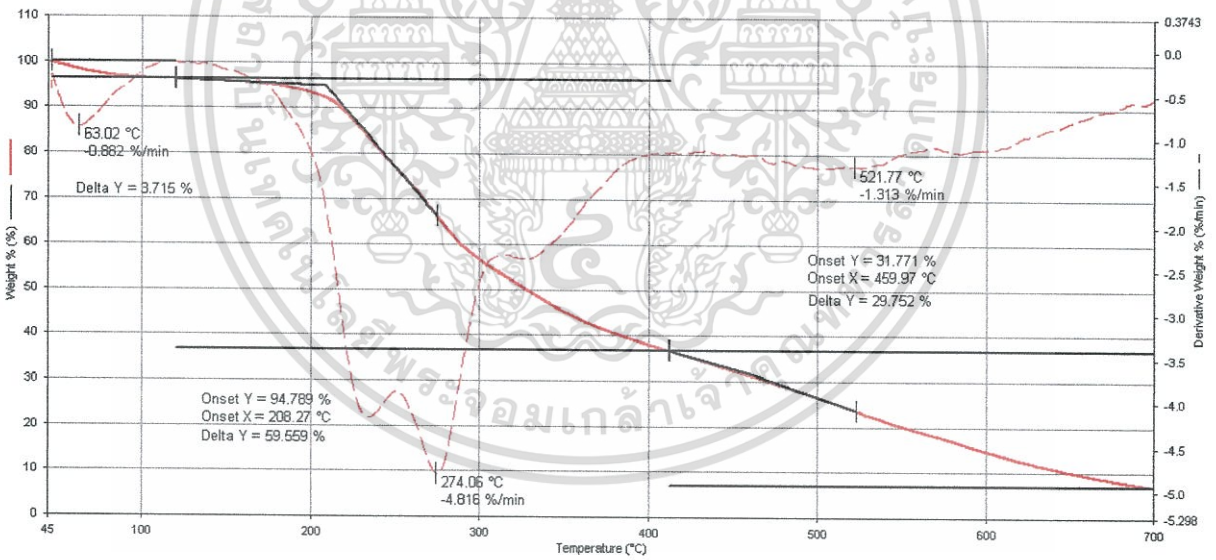


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ E-2 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC1

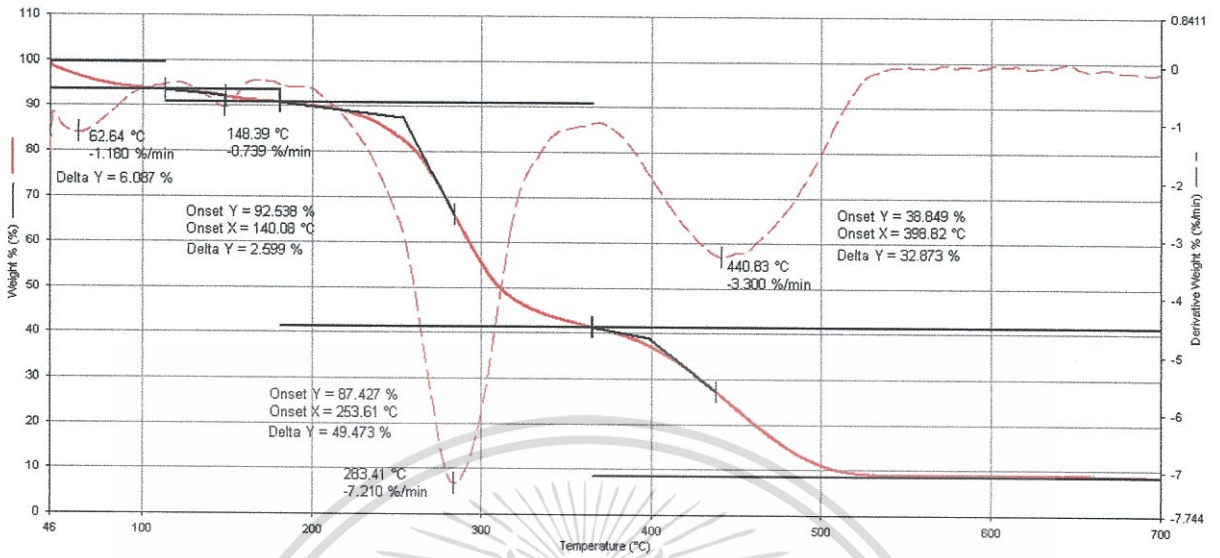


รูปที่ E-3 สมบัติทางความร้อน สูตร M0CMC2

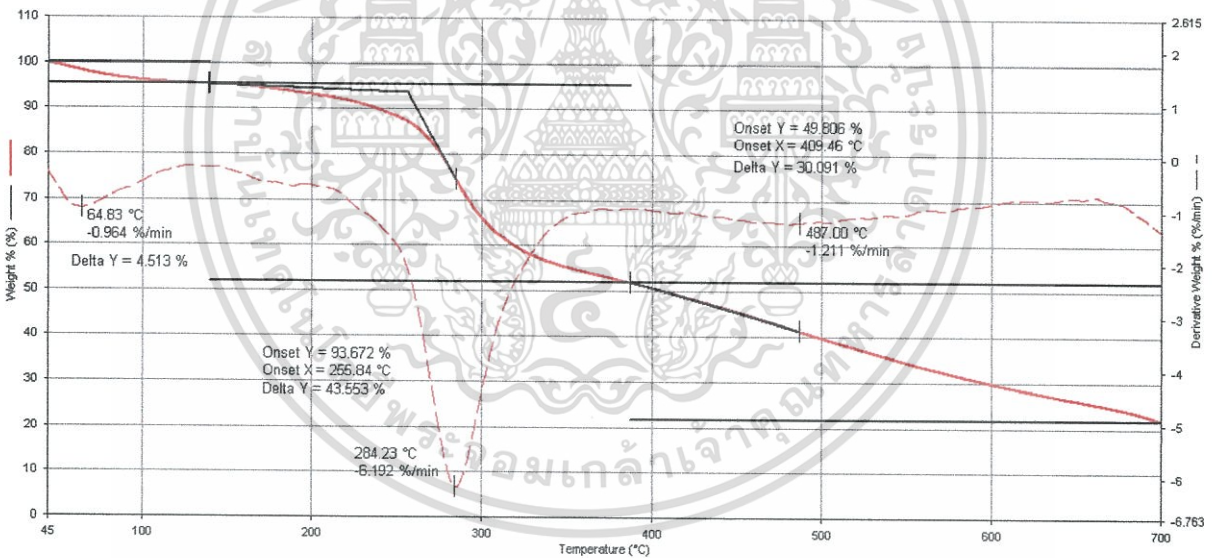


รูปที่ E-4 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC0MBA0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

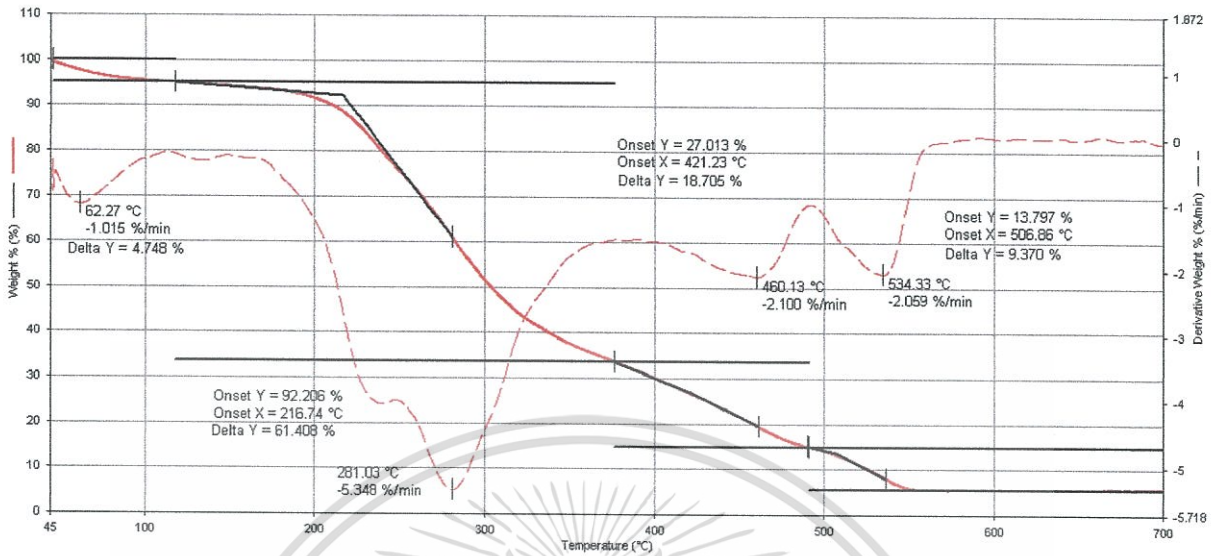


รูปที่ E-5 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC1MBA0.3

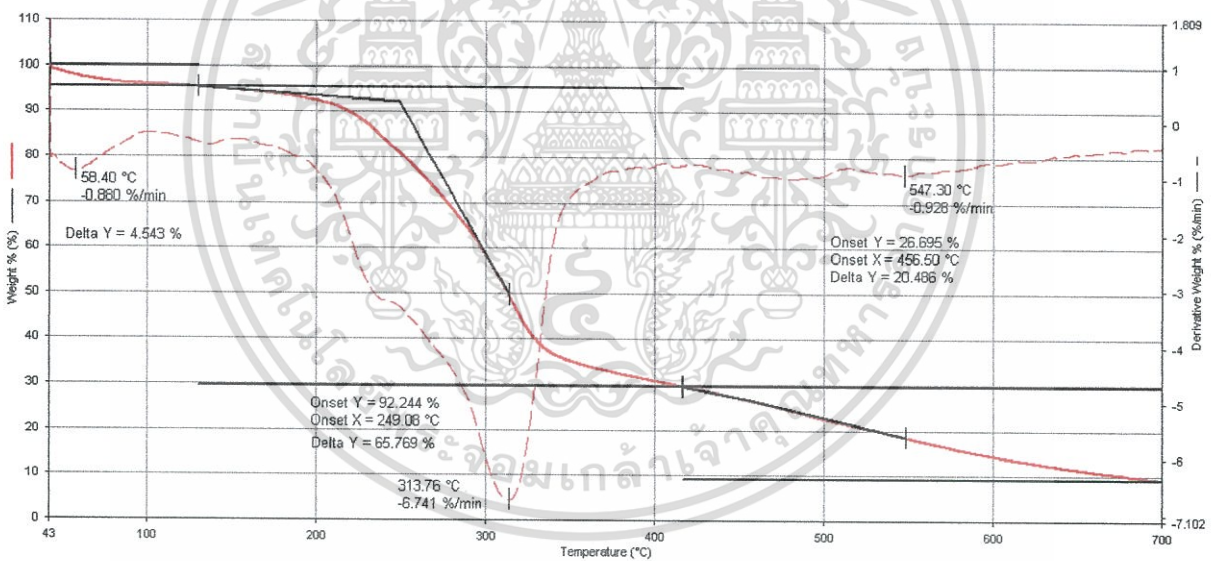


รูปที่ E-6 สมบัติทางความร้อน สูตร M0CMC2MBA0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

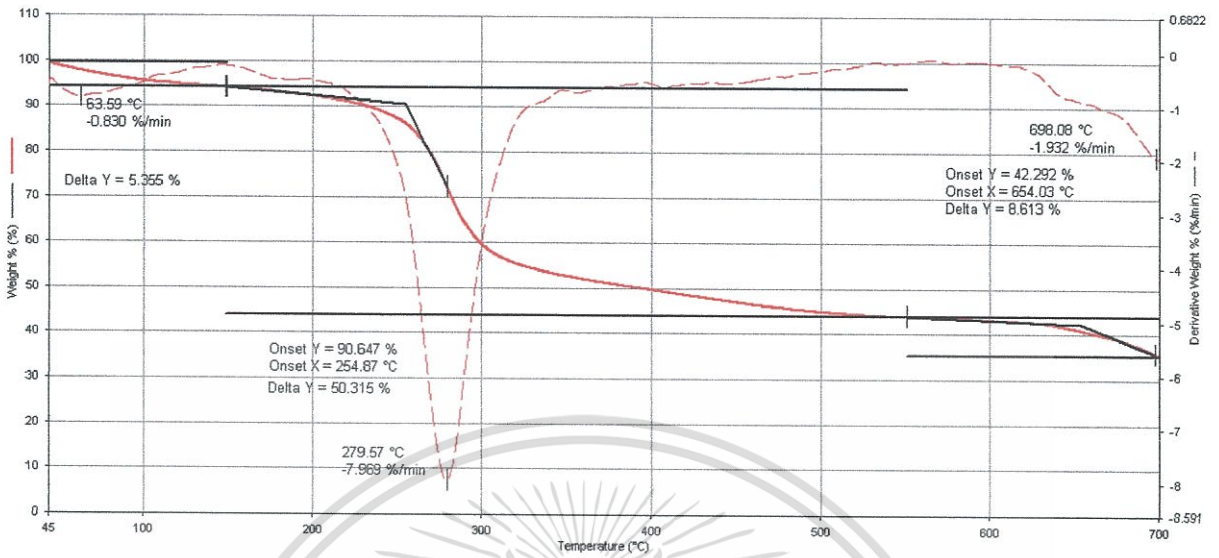


รูปที่ E-7 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC0CA0.3

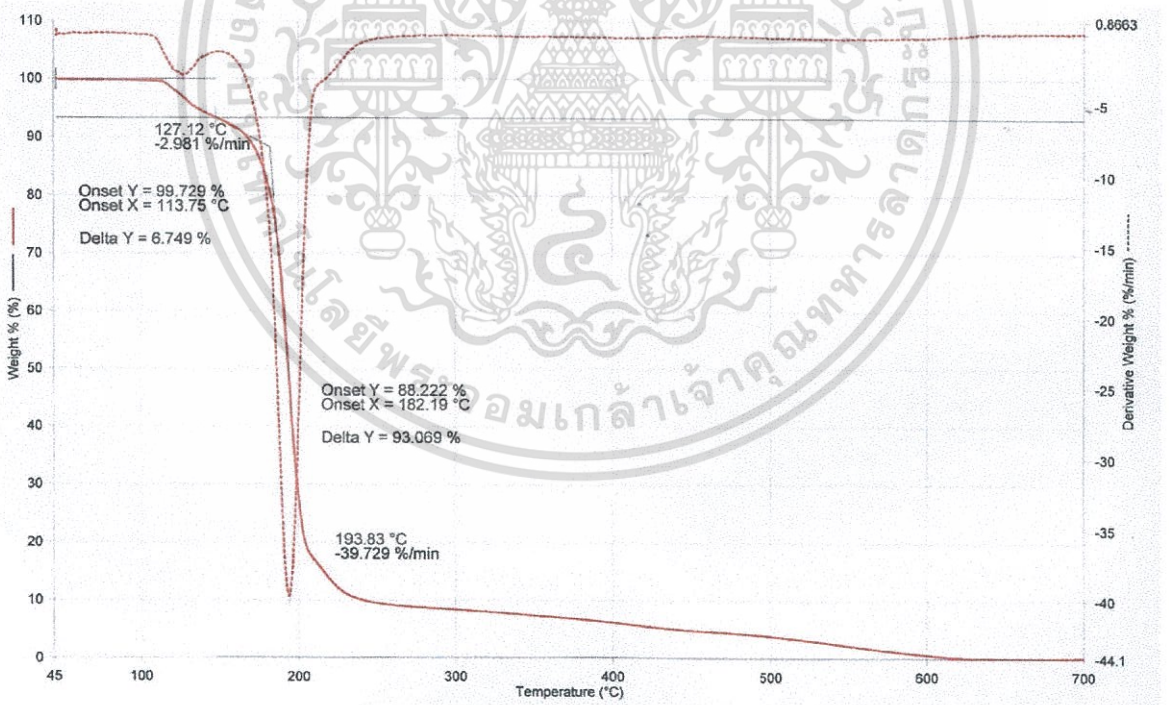


รูปที่ E-8 สมบัติทางความร้อน สูตร M2CMC1CA0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ E-9 สมบัติทางความร้อน สูตร M0CMC2CA0.3

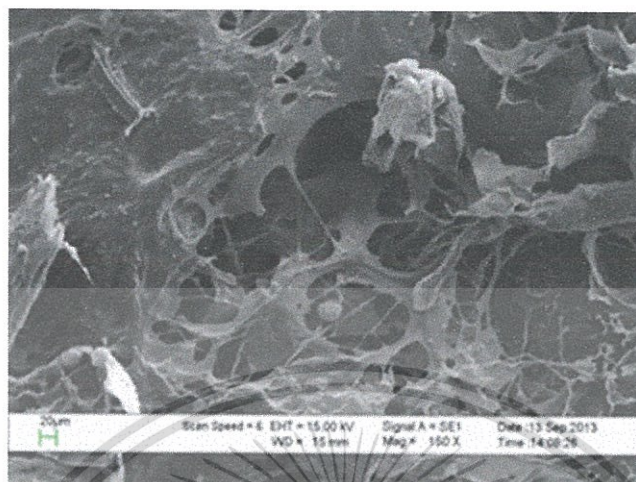


รูปที่ E-10 สมบัติทางความร้อน ของ Citric acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



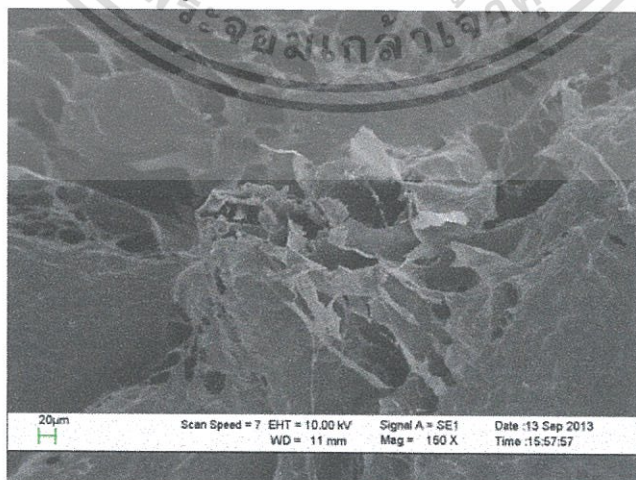
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ F-1 M2CMC0.25



รูปที่ F-2 M2CMC0.25MBA0.3



รูปที่ F-3 M2CMC0.25CA0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้