



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

“การเตรียมและหาลักษณะเฉพาะของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและ
เนื้อพรุนที่ย่อยสลายได้จากแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส”

“Preparation and Characterization of Degradation Dense and Porous
Hydrogel from Rice Starch and Carboxymethyl Cellulose”

จัดทำโดย

๑. ดร.อนุชา รักสันติ
๒. นายสุวิทย์ วงศ์ศิลา
๓. นางสาวเบญญาภา มหาพราหมณ์

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๘

บทคัดย่อ

แป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุห้ามเลือดที่ย่อยสลายในร่างกายได้ พิล์มผสมของแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ ได้ถูกเตรียมและศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ สัณฐานวิทยาและโครงสร้างโมเลกุลได้ถูกวิเคราะห์ด้วยการถ่ายภาพโดยใช้กำลังขยาย อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีตามลำดับ และค่าความพรุน การพองตัว การละลายน้ำ ปริมาณความชื้น เศษแก้ว และการย่อยสลาย ได้นำมาใช้ในการคำนวณ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมของแป้งข้าวเจ้าต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส คือ 60 ต่อ 40 โดยโครงสร้างโมเลกุลแสดงให้เห็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้ากับหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งเป็นการเชื่อมโยงทางกายภาพ แผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและแบบเนื้อพรุนมีค่าความพรุน การพองตัว การละลายน้ำ ปริมาณความชื้น ความเครียด ความเค้น เศษแก้ว และการย่อยสลาย เท่ากับ ไม่มี, 46.8 ± 0.3 เท่า, 42.63 ± 0.72 %, 9.5 ± 0.5 %, 30.4 ± 1.5 เมกะปาสคาล, 5.76 ± 0.31 %, 3.85 ± 1.01 %, 71.4 ± 0.4 % และ 82.3 ± 0.5 %, 38.1 ± 1.0 เท่า, 44.35 ± 0.47 %, 8.4 ± 0.3 %, ไม่มี, ไม่มี, 4.99 ± 0.16 %, 28.4 ± 0.3 % ตามลำดับ โดยแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นมีค่าการพองตัว การละลายน้ำ และปริมาณความชื้นมากกว่าแบบเนื้อพรุน สำหรับแผ่นไฮโดรเจลที่เหมาะสมในการใช้ในร่างกายคือแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10

Abstract

Rice starch and carboxymethyl cellulose are natural polymers that can be used as adsorbable materials for stopping bleeding in body. Blended films with different weight ratios of rice starch and carboxymethyl cellulose were prepared and characterized in the term of physicochemical properties. The morphology and molecular conformation were analyzed by scanning electron microscopy and Fourier transform infrared spectroscopy, respectively. The percent porosity, degree of swelling, water solubility, moisture content, residual ash, and degradation were evaluated. This result found that the optimum weight ratio of rice starch and carboxymethyl cellulose hydrogel was 60 per 40. Molecular conformation occurred the hydrogen bond between the hydroxyl groups of rice starch and the carboxyl groups of carboxymethyl cellulose as physical cross-linkage. The dense and porous hydrogels have the porosity, degree of swelling, solubility, moisture content, tensile strength, elongation at break, residual ash and degradability about NA, 46.8 ± 0.3 times, 42.63 ± 0.72 %, 9.5 ± 0.5 %, 30.4 ± 1.5 MPa, 5.76 ± 0.31 %, 3.85 ± 1.01 %, 71.4 ± 0.4 % and 82.3 ± 0.5 %, 38.1 ± 1.0 times, 44.35 ± 0.47 %, 8.4 ± 0.3 %, NA, NA, 4.99 ± 0.16 %, 28.4 ± 0.3 %, respectively. The values of degree of swelling, water solubility and moisture content of dense hydrogel were higher than the porous hydrogel. The dense hydrogel of rice starch and carboxymethyl cellulose at 90 per 10 was used in the body properly.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานนี้สำเร็จได้ด้วยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) ผู้ให้ทุนวิจัยทำโครงการนี้ขึ้นมา ผู้เขียนจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณ อ.ดร.ศักดิ์พล เทียนเสมอ หน่วยวิจัยชีววัสดุแพทย์และเซรามิกอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และห้องปฏิบัติการของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ จันทร์หอม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณคุณเบญญาภา มหาพราหมณ์ ที่ช่วยทำการวิจัยนี้ให้สำเร็จด้วยดี และคุณสุวิทย์ วงศ์วิลา ที่ให้คำปรึกษา ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการกลาง ภาควิชาเคมี ที่ให้ทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันในตัวอย่าง

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่ารายงานนี้จะเป็นประโยชน์ไม่มากนักสำหรับผู้สนใจต่อไป

อนุชา รักสันติ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | II |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | III |
| กิตติกรรมประกาศ | IV |
| สารบัญ | V |
| สารบัญตาราง | IX |
| สารบัญภาพ | X |
| รายการอักษรย่อและสัญลักษณ์ | XIV |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| 1.5 นิยามศัพท์ | 3 |
| บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 ทฤษฎีที่สัมพันธ์กับเรื่องที่วิจัย | 4 |
| 2.1.1 แบ่งข้าวเจ้า | 4 |
| 2.1.1.1 องค์ประกอบภายในแบ่ง | 5 |
| 2.1.1.2 สมบัติที่สำคัญของแบ่ง | 12 |
| 2.1.1.3 แบ่งดัดแปร | 16 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.1.1.4 การใช้ประโยชน์จากแป้ง | 18 |
| 2.1.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 19 |
| 2.1.2.1 สมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 21 |
| 2.1.2.2 การเตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 24 |
| 2.1.2.3 การใช้ประโยชน์จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 25 |
| 2.1.3 พอลิเมอร์ผสม | 26 |
| 2.1.4 การผลิตฟิล์ม | 27 |
| 2.2 แนวคิดที่สัมพันธ์กับเรื่องที่วิจัย | 29 |
| 2.3 งานวิจัยที่สัมพันธ์กับเรื่องที่วิจัย | 29 |
| บทที่ 3 การทดลอง | |
| 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี | 33 |
| 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ | 33 |
| 3.1.2 วัสดุและสารเคมี | 35 |
| 3.2 การเตรียมสารละลาย | 36 |
| 3.2.1 สารละลาย 5 % w/v แป้งข้าวเจ้า | 36 |
| 3.2.2 สารละลาย 5 % w/v คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 36 |
| 3.2.3 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1.0 M | 36 |
| 3.2.4 สารละลายอัลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M | 36 |
| 3.2.5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.0 M | 37 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.2.6 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M | 37 |
| 3.2.7 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M | 37 |
| 3.3 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุนจากแป้งข้าวเจ้าผสม คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 37 |
| 3.3.1 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่น | 37 |
| 3.3.2 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อพรุน | 38 |
| 3.4 การศึกษาสมบัติทางเคมีของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและ เนื้อพรุน | 38 |
| 3.4.1 โครงสร้างโมเลกุล | 38 |
| 3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและ เนื้อพรุน | 39 |
| 3.5.1 สัณฐานวิทยา | 39 |
| 3.5.2 ความพรุน | 39 |
| 3.5.3 การพองตัวและการละลายน้ำ | 40 |
| 3.5.4 ปริมาณความชื้น | 40 |
| 3.5.5 สมบัติเชิงกล | 41 |
| 3.5.6 เศษแก้ว | 41 |
| 3.5.7 การย่อยสลาย | 41 |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล | 42 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.1 แผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน | 42 |
| 4.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน | 45 |
| 4.2.1 โครงสร้างโมเลกุล | 45 |
| 4.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน | 48 |
| 4.3.1 สันฐานวิทยา | 48 |
| 4.3.2 ความพรุน | 51 |
| 4.3.3 การพองตัวและการละลายน้ำ | 53 |
| 4.3.4 ปริมาณความชื้น | 65 |
| 4.3.5 สมบัติเชิงกล | 72 |
| 4.3.6 เศษแก้ว | 73 |
| 4.3.7 การย่อยสลาย | 77 |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ | |
| 5.1 สรุปผล | 82 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 83 |
| บรรณานุกรม | 84 |
| ภาคผนวก ก | 90 |
| ประวัติผู้เขียน | 91 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 33 |
| 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 35 |
| 4.1 ค่าความพรุนของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ | 51 |
| 4.2 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่างๆ และเวลาต่างๆ | 53 |
| 4.3 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ | 56 |
| 4.4 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่างๆ | 59 |
| 4.5 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ | 62 |
| 4.6 ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ | 65 |
| 4.7 ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่างๆ และเวลาต่าง ๆ | 69 |
| 4.8 เศษเถ้าของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ | 73 |
| 4.9 เศษเถ้าของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ | 75 |
| 4.10 การย่อยสลายแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่างๆ และที่เวลาต่างๆ | 77 |
| 4.11 การย่อยสลายแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่างๆ และที่เวลาต่างๆ | 79 |
| 4.12 สมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ | 81 |
| 4.13 สมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ | 81 |

สารบัญภาพ

| ภาพ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ภาพของเม็ดแป้ง Era-Tab (ก) เกาะกลุ่มกลม (ข) มีขนาด 6.8 μm | 5 |
| 2.2 โครงสร้างของ (a) อะมิโลส (b) อะมิโลเพกทิน | 7 |
| 2.3 ลักษณะการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์และการจับกับโมเลกุลของน้ำ | 8 |
| 2.4 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทิน | 10 |
| 2.5 โครงสร้างของเม็ดแป้ง | 11 |
| 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน | 12 |
| 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่าง ๆ | 13 |
| 2.8 ลักษณะการพองตัวและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายแป้ง | 15 |
| 2.9 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 20 |
| 2.10 ปฏิบัติการเตรียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 20 |
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพภายนอกของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100 | 43 |
| 4.2 แผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100 | 44 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพ | หน้า | |
|-----|---|----|
| 4.3 | สเปกตรัม FTIR ของแผ่นไฮโดรเจล (ก) แบ่งข้าวเจ้า (ข) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (ค) แบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ 60/40 | 45 |
| 4.4 | สเปกตรัม FTIR ของไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100 | 47 |
| 4.5 | ภาพ SEM พื้นผิวภายนอกของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ (x2000 เท่า) (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100 | 48 |
| 4.6 | ภาพ SEM พื้นผิวภาคตัดขวางของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ (x500 เท่า) (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100 | 49 |
| 4.7 | ภาพ SEM พื้นผิวภาคตัดขวางของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ (x200 เท่า) (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100 | 50 |
| 4.8 | ค่าความพรุนของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ | 52 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพ | | หน้า |
|------|--|------|
| 4.9 | การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 54 |
| 4.10 | การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h | 55 |
| 4.11 | การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 57 |
| 4.12 | การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h | 58 |
| 4.13 | การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 60 |
| 4.14 | การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h | 61 |
| 4.15 | การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 63 |
| 4.16 | การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h | 64 |
| 4.17 | การดูดซับความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 66 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพ | | หน้า |
|------|--|------|
| 4.18 | ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h | 68 |
| 4.19 | การดูดซับความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 70 |
| 4.20 | ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h | 71 |
| 4.21 | ค่าความเครียดและความเค้นของแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ | 72 |
| 4.22 | เศษแก้วของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 850 °C และที่เวลา 3 h | 74 |
| 4.23 | เศษแก้วของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 850 °C และที่เวลา 3 h | 77 |
| 4.24 | อัตราการย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นในสารละลายอัลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 78 |
| 4.25 | อัตราการย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนในสารละลายแอลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ | 80 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

| | |
|--------------------|------------------------|
| $^{\circ}\text{C}$ | องศาเซลเซียส |
| CMC | คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส |
| cm | เซนติเมตร |
| d | วัน |
| g | กรัม |
| h | ชั่วโมง |
| mL | มิลลิลิตร |
| M | โมลาร์ |
| MW | น้ำหนักโมเลกุล |
| min | นาที |
| μm | ไมโครเมตร |
| NA | ไม่มี |
| Pa | ปาสคาล |
| pH | ความเป็นกรด-เบส |
| RS | ข้าวเจ้า |
| U | หน่วย |
| v/v | ปริมาตรต่อปริมาตร |
| w | อาทิตย์ |
| w/v | น้ำหนักต่อปริมาตร |
| w/v | น้ำหนักต่อน้ำหนัก |
| % | เปอร์เซ็นต์ |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตสร้างวัสดุห้ามเลือดต่อเนื่องนุ่มทาง ศัลยศาสตร์ได้ด้วยตนเองจำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศเพื่อมาจำหน่ายให้แก่ผู้ป่วยด้วย ราคาแพง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประเทศไทยต้องสูญเสียงบประมาณจำนวนมากในแต่ละปี เช่น surgicel (oxidized regenerated cellulose) เป็นวัสดุห้ามเลือดในร่างกายที่ผลิตมาจาก เซลลูโลสแล้วตัดแปรให้มีความเป็นกรด โดยการทำงานจะก่อปฏิกิริยากับเลือดที่สัมผัสให้ออกฤทธิ์เป็นกรด ซึ่งจะไปทำให้โปรตีนของเลือดเปลี่ยนสภาพทำให้กลายเป็นลิ่มเลือดและทำให้ เลือดหยุดไหลในบริเวณที่กำลังตกเลือด โรงพยาบาลมหาสารนครเชียงใหม่ มีสถิติการใช้ surgicel ปีละประมาณ 1,500 ชิ้น โดยจำหน่ายให้ผู้ป่วยชิ้นละ 360 บาท ในขณะที่ประเทศไทย มีโรงพยาบาลประมาณ 800 แห่ง ถ้าเฉลี่ยแต่ละโรงพยาบาลใช้ surgicel 300 ชิ้นต่อปี ประเทศไทยก็จะมีสถิติการใช้ surgicel ถึงปีละ 240,000 ชิ้น คิดเป็นมูลค่าประมาณ 70 ล้านบาท [Punyanitya *et al.*, 2007] เพื่อที่จะช่วยแก้ไขปัญหาค่าขาดดุลชำระเงินทางเทคโนโลยี ของประเทศไทย คณะผู้วิจัยจึงได้ร่วมมือกันวิจัยคิดค้นเพื่อผลิตวัสดุห้ามเลือดทางการแพทย์ ขึ้นเองภายในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อผลิตแผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุนที่ย่อยสลายเองได้จากแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาลักษณะเฉพาะทางเคมี ทางกายภาพ และพฤติกรรมการย่อยสลายได้เองของแผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุน
- 1.2.3 เพื่อนำข้อมูลการเตรียมและการศึกษาในห้องปฏิบัติการของแผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุนที่ได้ไว้ใช้สำหรับการทดลองทางสัตว์ทดลองและทางคลินิกต่อไป

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 แผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นและเนื้อพรุนจากแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
- 1.3.2 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ 1 บทความ
- 1.3.3 การขอจดสิทธิบัตร 1 สิทธิบัตร

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการนำแป้งข้าวเจ้า (Era-Tab) ที่บริสุทธิ์ 99 % มาผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งมีความสามารถเป็นตัวช่วยดูดซับน้ำ แล้วทำการแล้วดัดแปรทางกายภาพด้วยการผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเพื่อทำเป็นแผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุน โดยการศึกษาหาลักษณะเฉพาะทางเคมี กายภาพ รวมทั้งการหาลักษณะเฉพาะของแผ่นวัสดุห้ามเลือดที่ใช้ในร่างกายตามมาตรฐาน US

Pharmacopoeia [The United Pharmacopoeia 26, 2002] ได้แก่ การพองตัวซึ่งมีค่าไม่ต่ำกว่า 35 เท่าต่อน้ำหนักแห้ง (กรณีไฮโดรเจลเนื้อพรุน) เศษเก่าที่เหลือจากการเผาไหม้ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และการย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลโดยเปรียบเทียบตามมาตรฐานของฟองเจลาตินที่ใช้ห้ามเลือดในร่างกาย (gelatin sponge) ที่จะมีการย่อยสลายได้สมบูรณ์ที่ 4-6 สัปดาห์ ด้วยเอ็นไซม์เปปซิเดส เป็นต้น

1.5 นิยามศัพท์

แป้งข้าวเจ้า (rice starch) หมายถึง พอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose) หมายถึง อนุพันธ์ของเซลลูโลสในรูปอีเธอร์ ผลิตได้จากปฏิกิริยาของโซเดียมมอโนคลอโรแอซีเตตกับแอลคาลิเซลลูโลสได้เป็นโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ไฮโดรเจล (hydrogel) หมายถึง พอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน เป็นต้น

เนื้อแน่น (dense film) แผ่นฟิล์มที่มีอัดแน่นโดยมีช่องว่างภายในน้อยมาก

เนื้อพรุน (porous film) แผ่นฟิล์มที่มีรูพรุนเหมือนฟองน้ำ

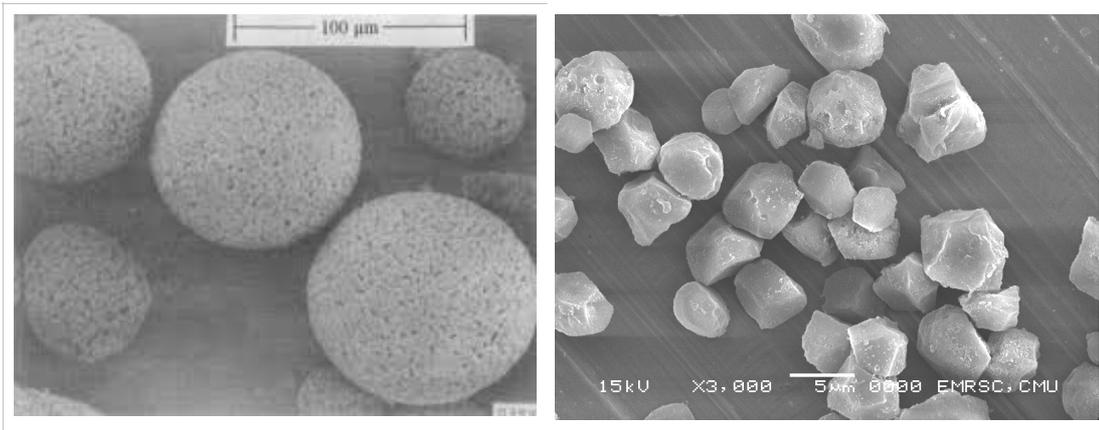
บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่สัมพันธ์กับเรื่องที่วิจัย

2.1.1 แป้งข้าวเจ้า (Rice Starch, RS) [สุคนธา, 2002]

แป้ง (flour) จะมีองค์ประกอบหลักที่พบอยู่ในโครงสร้าง ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ และอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับคุณภาพของเมล็ดและการนำเมล็ดไปแปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แป้งจะมีคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในเมล็ดข้าวเป็นจำนวนมาก โดยบทบาทที่สำคัญของแป้งคือใช้เป็นแหล่งอาหารพลังงานสูงสำหรับมนุษย์ แป้งโดยทั่วไปจะยังมีสารประกอบอื่น ๆ อยู่ เช่น แป้งข้าวเจ้าที่มีโปรตีน 7-8 % แต่เมื่อได้สกัดสิ่งเจือปน ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่น ๆ ออกไปจนหมด ด้วยการเหวี่ยงความเร็วสูงในตัวกลางต่าง ๆ ซึ่งสุดท้ายจะเหลือแต่แป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์ (Rice Starch, RS) โดยแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์ ชนิด Era-Tab (เอราวัฒน์ฟามาซูติคอลลรีเชิซแอนด์ลาบอราตอรี, ไทย) เป็นผงแป้งจากข้าวเจ้าไทยที่ผ่านขบวนการแปรสภาพทางฟิสิกส์ มีคุณสมบัติตามเกณฑ์ตำรับยา (Pharmacopoeia) จากข้อกำหนดของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข ประเทศไทย มีลักษณะเป็นผงแห้งสีขาว ปราศจากกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายน้ำ มีค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่เป็นกลาง มีคุณสมบัติสีนํ้าใสที่ตีเหยี่ยม วัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของยาเม็ด ลักษณะโครงสร้างทางจุลกายวิภาคประกอบด้วยผงเม็ดแป้งเกาะกลุ่มเป็นภาพกลมดังภาพ 2.1 ขนาดผงเม็ดแป้ง 6.8 μm ขนาดเม็ดแป้งเกาะกลุ่ม 90 μm [Shihus *et al.*, 2005; กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2003]



(ก)

(ข)

ภาพ 2.1 ภาพของเม็ดแป้ง Era-Tab (ก) เกาะกลุ่มกลม (ข) มีขนาด 6.8 μm

2.1.1.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

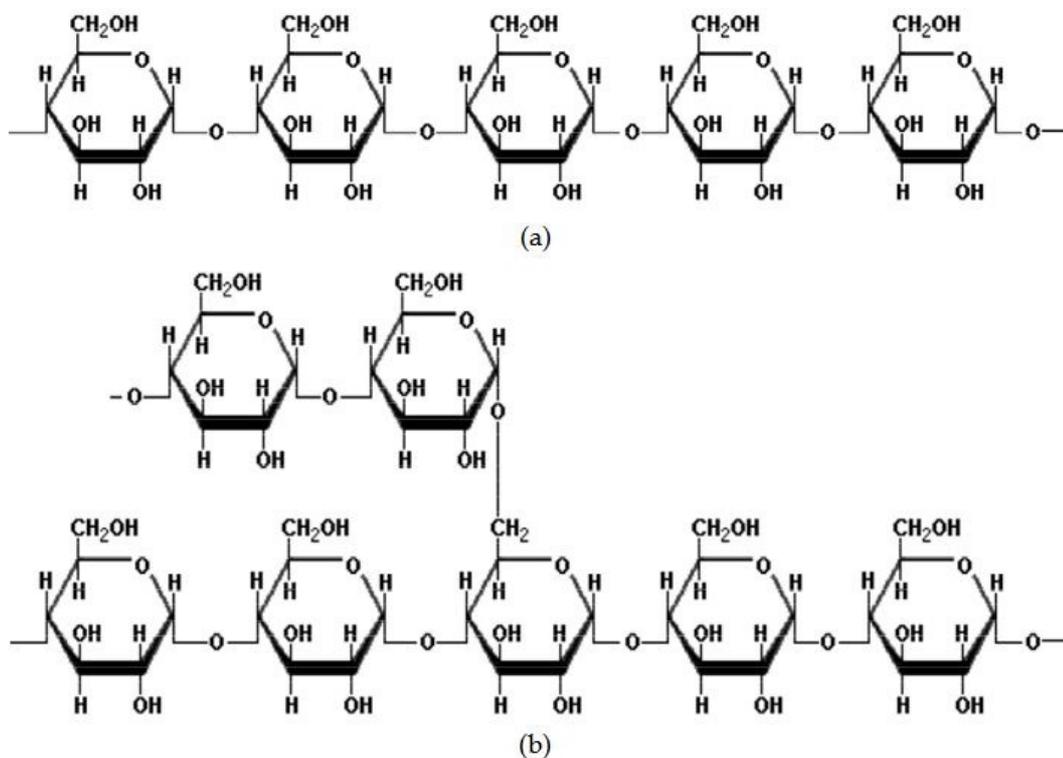
แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 เม็ดแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ดังแสดงดังตาราง 2.1 โดยทั่วไปแล้ว แป้งประกอบด้วยอะมิโลส 20–30 % อะมิโลเพกทิน 70–80 % แป้งจาก amylo maize จะมีอะมิโลสมากกว่า 50 % และแป้งจาก waxy maize มีอะมิโลสต่ำไม่เกิน 1 %

ตาราง 2.1 ปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทินของของแป้งจากแหล่งต่าง ๆ [สุคนธา, 2002]

| starch sources | amylose | amylopectin |
|----------------|---------|-------------|
| Oats | 27 | 73 |
| Wheat | 26-31 | 69-74 |
| Maize | 28 | 72 |
| Amylomaize | 52-80 | 20-48 |
| Waxy maize | 0-1 | 99-100 |
| Barley | 22-29 | 71-78 |
| Rice | 14-32 | 68-86 |
| Rye | 28 | 72 |
| Sorghum | 21-34 | 66-79 |
| Horsebean | 32-34 | 66-68 |
| Smooth pea | 33-35 | 65-67 |
| Wrinkled pea | 63-75 | 25-37 |
| Manihot | 17 | 83 |
| Potato | 23 | 77 |

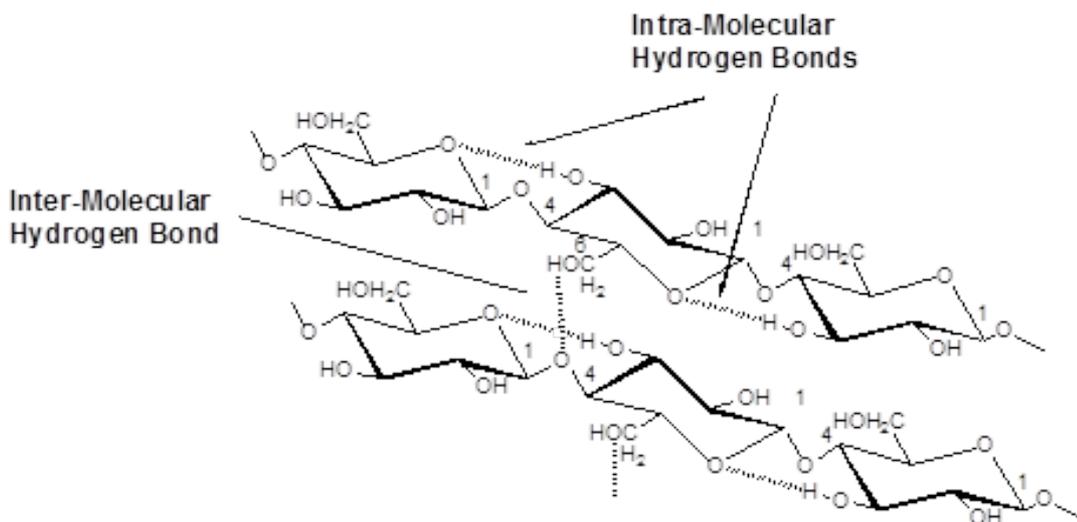
a) อะมิโลส (amylose)

อะมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage ดังภาพ 2.2 (a) มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 อะมิโลสในแป้งบางชนิดอาจมีพันธะ α -1,6-glucosidic linkage บ้างเล็กน้อยประมาณ 0.3-0.5 % ของพันธะทั้งหมด



ภาพ 2.2 โครงสร้างของ (a) อะมิโลส (b) อะมิโลเพกทิน [Saunders *et al.*, 2011]

อะมิโลสไม่ละลายน้ำ เมื่อเติมน้ำลงไปจะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย เนื่องจากโมเลกุลของอะมิโลสเป็นสายยาว จึงมีโอกาสจับคู่กับอะมิโลสอีกโมเลกุลหนึ่งเป็นสายคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นตาข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังภาพ 2.3 ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้



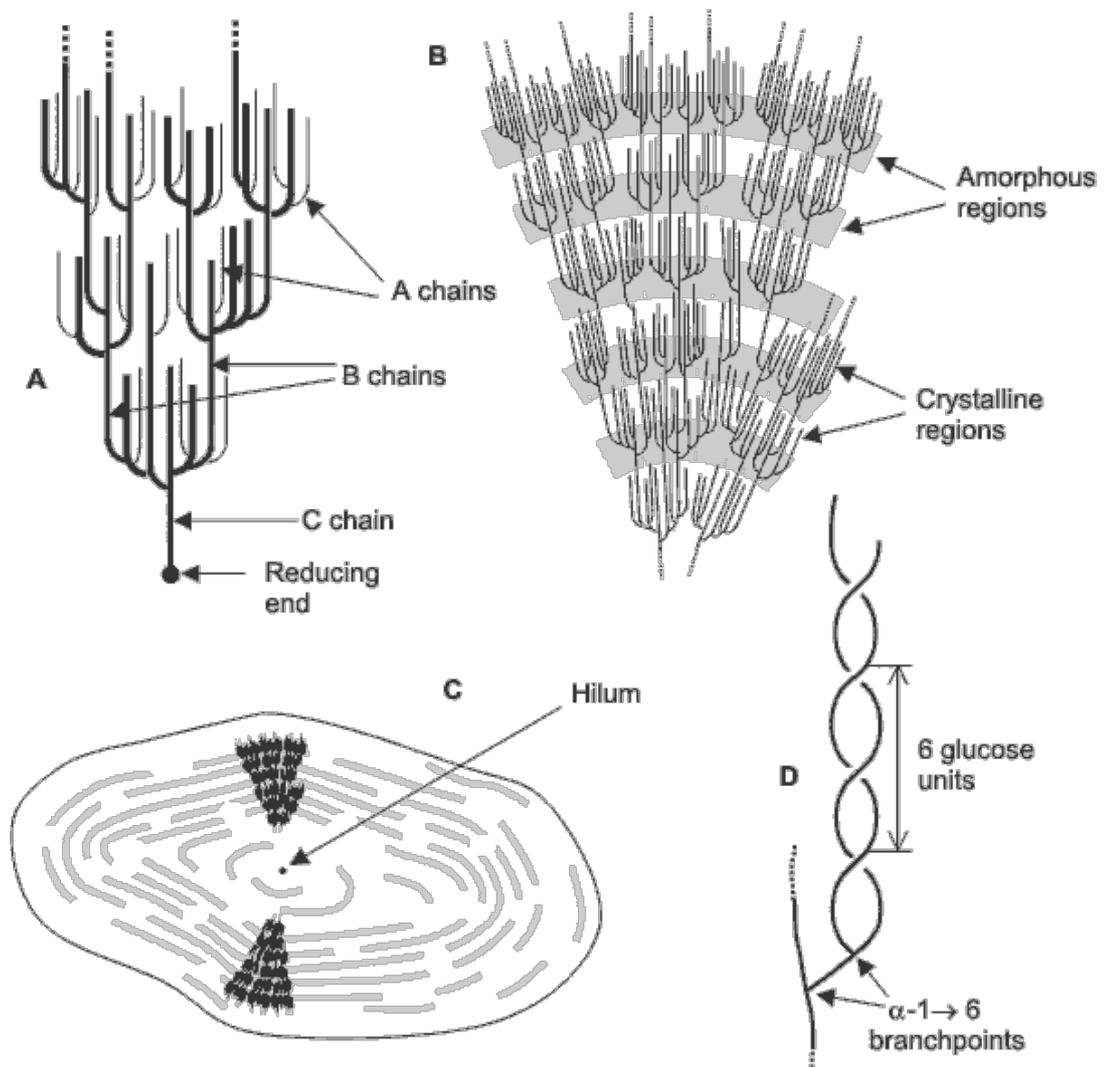
ภาพ 2.3 ลักษณะการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์และการจับกับโมเลกุลของน้ำ [<http://www.carbolea.ul.ie/composition.php>]

อะมิโลสสามารถจับกับไอโอดีน โดยจะพันเป็นเกลียว (helical structure) รอบ ๆ ไอโอดีน ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อน amylose-iodine complex มีสีน้ำเงิน นอกจากนี้อะมิโลสยังรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน

b) อะมิโลเพกทิน (amylopectin)

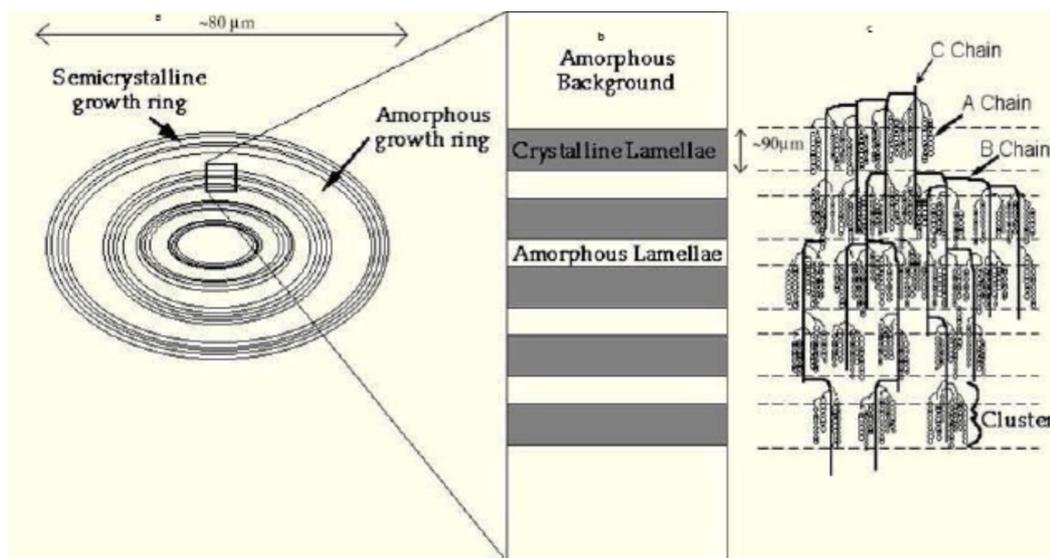
อะมิโลเพกทิน เป็นพอลิเมอร์กิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้น เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic linkage ดังภาพ 2.2 (b) หน่วยกลูโคสมีพันธะ α -1,6-glucosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณหน่วยกลูโคส ในอะมิโลเพกทินทั้งหมด อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือประมาณ 10^7 - 10^9 และมีอัตราการคืนตัวต่ำเนื่องจากอะมิโลเพกทินมีโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย (chain) 3 ชนิด คือ สาย A เป็นสายที่เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อกอกจากสายชนิดนี้ สาย B เป็นสายที่มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า และสาย C เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ อะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C 1 สายเท่านั้น โครงสร้างของอะมิโลเพกทินมี 2 ส่วนคือ ส่วนผลึก (crystallite region) เป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นสาย และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) เป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อม ดังภาพ 2.4



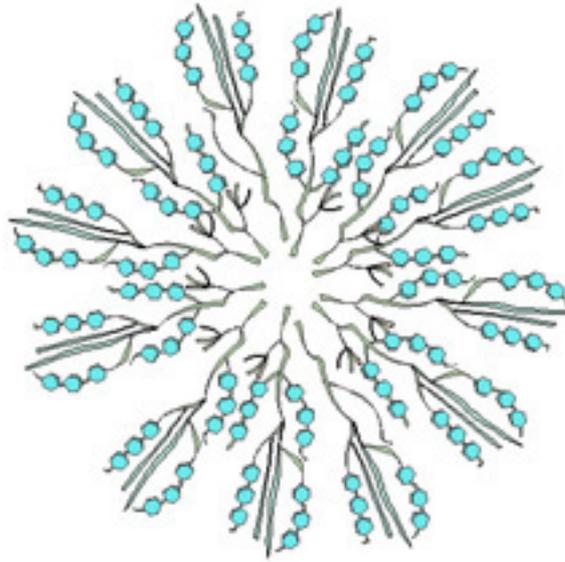
ภาพ 2.4 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทิน [<http://www.sbu.ac.uk/water/hysta.html>]

เมื่อส่องเม็คแตงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) จะพบวงแหวนหนาแน่น เรียกว่า growth ring ภายในโครงสร้างของ growth ring มีลักษณะเป็น semicrystalline ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็น crystalline และ amorphous ดังภาพ 2.5 จะเห็นว่าในส่วน amorphous จะพบอะมิโลส และจุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะมิโลเพกทิน ในส่วน crystalline จะพบส่วนที่เป็นสายของอะมิโลเพกทิน



ภาพ 2.5 โครงสร้างของเม็ดแป้ง [http://www.poco.phy.cam.ac.uk/research/starch/whatis.htm]

แบบจำลองของเม็ดแป้งซึ่งประกอบอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน แสดงดังภาพ 2.6 ในแบบจำลองนี้แสดงถึงลักษณะเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทินที่รวมกันเป็น ผลึก รวมทั้งสองส่วนของอะมิโลสที่อยู่อย่างอิสระหรืออยู่ร่วมกับไซมันในลักษณะเป็นเกลียว



ภาพ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [<http://www.orst.edu/instruct/nfm236/starch/index.cfm>]

2.1.1.2 สมบัติที่สำคัญของแป้ง

a) การพองตัว (swelling) และการละลาย (solubility)

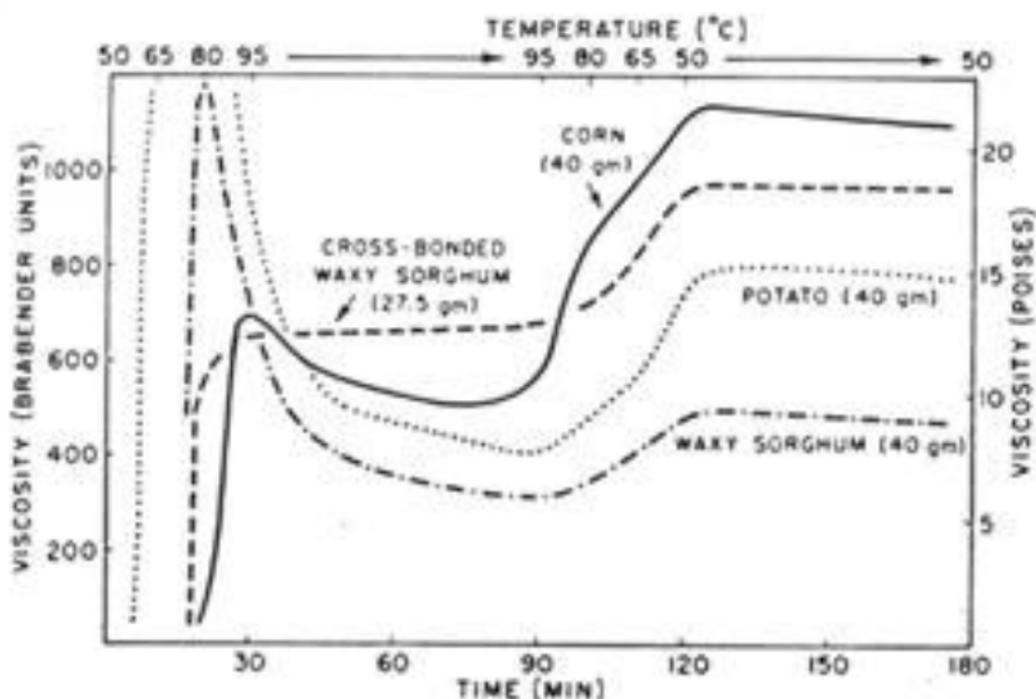
แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กัน แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้เกิดการละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเบี่ยงเบนแสงโพลาไรซ์ (birefringence) หดไป

การพองตัวของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของแป้ง ปริมาณและโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน สารอื่น ๆ ที่มีอยู่ในแป้ง เช่น

ไขมัน หมู่ฟอสเฟต เป็นต้น แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของอะมิโลสที่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ดี และอะมิโลสอาจจับตัวกับไขมันทำให้ขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งได้ แป้งข้าวเจ้าเป็นแป้งที่มีอะมิโลสปานกลาง จึงมีกำลังพองตัวได้ปานกลาง และมีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังการพองตัว โดยค่ากำลังการพองตัว ซึ่งวัดได้จากน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวอย่างอิสระในน้ำต่อน้ำหนักแห้งของแป้ง

b) ความหนืด (viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของน้ำแป้งหลังจากได้รับความร้อน ความหนืดของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน ดังภาพ 2.7



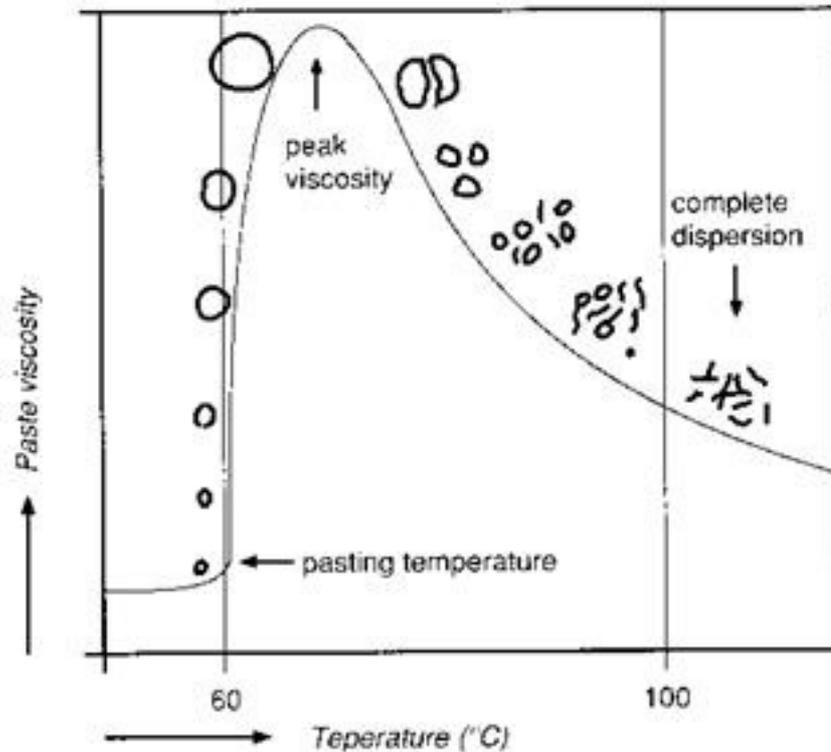
ภาพ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่าง ๆ [Radley, 1968]

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีกรวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดลดลง ต่อมาการลดอุณหภูมิลงทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้งและการดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่าง ๆ นอกจากนี้ยังพบว่า แป้งที่มีขนาดเม็ดแป้งใหญ่ จะมีกำลังการพองตัวสูงและให้จุดที่มีความหนืดสูงสุด แป้งชนิดใดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะแสดงค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) สูงด้วยเช่นกัน สำหรับปัจจัยทางภายนอกคือ ถ้ามีการใช้ความร้อนสูงหรือมีการใช้แรงกวนมาก จะทำให้เม็ดแป้งแตกและสมบัติด้านความหนืดลดลง

c) เจลาติไนเซชัน (gelatinization)

เจลาติไนเซชันของแป้ง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการทำให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง เม็ดแป้งจะเริ่มดูดน้ำจากภายนอกและจะพองตัวจนกระทั่งแตกออกดังภาพ 2.8 ได้เป็นสารละลายข้นหนืด เจลาติไนเซชันของแป้งนี้เป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ ดังนั้นเม็ดแป้งจะสูญเสียความสามารถในการเปียงเบนแสงโพลาไรซ์และโครงสร้างที่เป็นผลึก นอกจากนี้ยังมีโมเลกุลของอะมิโลสหลุดออกมาอยู่ภายนอกของเม็ดแป้งได้บางส่วน



ภาพ 2.8 ลักษณะการพองตัวและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายแป้ง [นิริยา, 2000]

ช่วงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาติไนซันสมบูรณ์จะแปรผันได้ตามวิธีการที่ใช้วัด อัตราส่วนของแป้งต่อน้ำ ชนิดของเมล็ดแป้ง และความไม่สม่ำเสมอ (heterogeneity) ภายในเมล็ดแป้ง

d) รีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพของสารละลายเม็ดแป้งที่เกิดเจลาติไนซันแล้วเย็นลง เนื่องจากโมเลกุลของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มี การดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก

เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาออกเซลล์ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า *sysneresis* ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะเกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะมิโลสในระหว่างเย็นตัวสูง ทำให้เกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง อะมิโลเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน

2.1.1.3 แป้งดัดแปร (*Modified starch*) [Thomas and Attwell, 1997]

แป้งดัดแปรคือแป้งที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของแป้งเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน วิธีการที่ใช้มีทั้งวิธีการทางเคมี ทางกายภาพ และวิธีการทางชีวภาพ วิธีการทางเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ การทำให้เกิดอนุพันธ์ หรือเกิดการก่อตัวเป็นอีเธอร์ (ether) หรือเอสเทอร์ (ester) การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ที่หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ที่พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bonds)

a) การเชื่อมขวางสายโซ่ (*crosslinking*)

คือการดัดแปรด้วยการทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (cross-link) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนสายพอลิเมอร์เดียวกันหรือต่างกัน พันธะที่เกิดจากการเชื่อมขวางเป็นเสมือนจุดเชื่อมต่อที่ทำให้เกิดการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของแป้ง การเชื่อมขวางจะทำให้เกิดการควบคุมการพองตัว (swelling) และทำให้แป้งสามารถทนอุณหภูมิสูง ทนต่อแรงเฉือน และทนสภาวะความเป็นกรดได้

การทำกรเชื่อมขวางมักทำปฏิกิริยาในสภาวะที่เป็นด่าง มีค่า pH 7.5–12.0 ใช้น้ำแข็งเข้มข้น 30–45 % สารเคมีสำหรับทำกรเชื่อมขวางที่ได้รับอนุญาตให้ใช้ อาหาร ได้แก่ phosphorus oxychloride, sodium trimetaphosphate และสารผสมของ acetic anhydride ทำปฏิกิริยาที่ 25–50 °C นาน 0.5–24 h หลังจากนั้นนำมาปรับ pH ให้เป็นกลาง กรอง ล้าง และอบให้แห้ง

b) การทำแทนที่ (substitution)

ปัญหาที่มักพบบ่อย ๆ ในแป้งคือ เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดและเนื้อสัมผัสเมื่อเก็บไว้ระยะหนึ่ง เนื่องจากแป้งมีความสามารถในการเกิดการรวมตัวกันใหม่ (retrogradation) ซึ่งมักเกิดเมื่อแป้งที่มีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบได้รับความเย็น ผลจากการเกิดรีโทรเกรดชันทำให้แป้งตกผลึกและมีเนื้อสัมผัสเป็นเจล เมื่อนานขึ้นเจลมีลักษณะคล้ายยางและทำการคายน้ำออกมาเรียกว่าเป็น syneresis ซึ่งมักพบในผลิตภัณฑ์อาหารทั่วไปที่ใช้แป้งที่มีอะมิโลสที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร กระบวนการทำแทนที่ (substitution) เป็นวิธีการที่นำมาใช้ป้องกันการเกิดรวมตัวกันใหม่ โดยจะแทนที่ด้วยสารเคมีที่อยู่ในกลุ่ม acetyl หรือ hydroxypropyl ในโครงสร้างพอลิเมอร์ การแทนที่จะเป็นผลให้ลดอุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature) ทำให้แป้งเสถียรมากขึ้น แป้งที่ดัดแปรด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่มักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง

c) การเปลี่ยนขนาด (conversion)

โดยทั่วไปแล้วแป้งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เพื่อเป็นการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น การผลิตเป็นลูกกวาด หรือการนำไปเป็นวัสดุห่อหุ้มอาหาร ทำให้มีการลดขนาดของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ เป็นผลให้ความหนืดลดลง การลดน้ำหนักโมเลกุลทำได้หลายวิธี เช่น acid hydrolysis, oxidation, pyroconversion และการใช้เอนไซม์

2.1.1.4 การใช้ประโยชน์จากแป้ง

a) อุตสาหกรรมอาหาร (food industry)

ภาชนะบรรจุอาหารและฟิล์มที่ทานได้จัดเป็นหลักในการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ สิ่งสำคัญที่ต้องการสำหรับวัสดุห่อหุ้มอาหาร ได้แก่ การลดปริมาณที่หายไปให้อาหารคงสดใหม่

Kuchaiyaphum *et al.* [2014] ได้เตรียมแผ่นฟิล์มผสมจากแป้งข้าวเจ้าผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไฟโบรอินด้วยการหล่อขึ้นรูป โดยพบว่าฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมแป้งข้าวเจ้ามีสมบัติเชิงกลที่ดีและละลายน้ำได้ดี่า เมื่อเติมไฟโบรอินเข้าไปจะพบว่าฟิล์มผสมที่ได้ยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านได้มากขึ้น ซึ่งฟิล์มที่ได้นี้เหมาะสำหรับห่อหุ้มผลไม้

b) เกษตร (agriculture)

มีการนำพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งนำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ปกคลุมเรือนกระจก ฟิล์มที่ย่อยสลายได้ และวัสดุควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย

Rattanamanee *et al.* [2014] ได้เตรียมถุงปุ๋ยที่ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเจลาตินผสมไฟโบรอินและโคโคซานสำหรับปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนให้ช้าลง โดยผลที่ได้จากเทคนิค FTIR ของถุงปุ๋ยหลังจากเติมโคโคซานลงในไฟโบรอินผสมเจลาตินพบว่าไม่มีพันธะเชื่อมต่อกัน (intermolecular interactions) ซึ่งหลังจากเติมโคโคซานลงไปจะทำให้ค่าความพรุนลดลง โดยอัตราการปลดปล่อยยูเรีนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของโคโคซาน ซึ่งจะทำให้ถุงปุ๋ยมีการปลดปล่อยได้นานขึ้น

c) การแพทย์ (medical field)

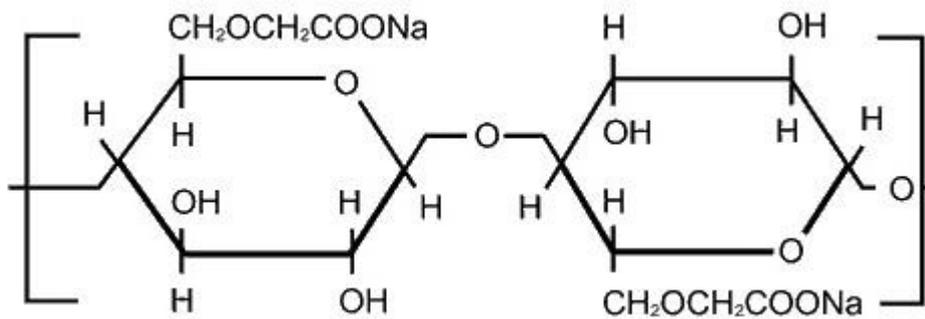
พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งเป็นหลักจะมีข้อดีตรงที่

สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้ เพราะว่ามีความสามารถในการเข้ากันได้ดี ย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษ สมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม โดยมีการนำไปใช้ศึกษาด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ กระดูก

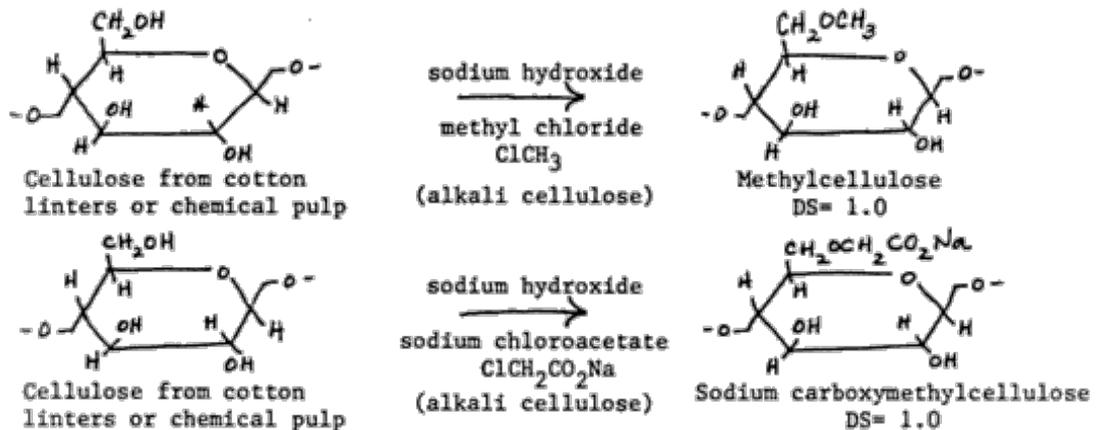
Racksanti *et al.* [2015] ได้เตรียมแผ่นฟิล์มแบบมีรูพรุนสำหรับห้ามเลือดในร่างกาย โดยฟิล์มเตรียมจากแป้งข้าวเจ้าผสมไฟโบรอินโดยเชื่อมไข้วด้วยไตรโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (STMP) ที่ pH 12 อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที และทำแห้งแบบเยือกแข็ง 2 วัน โดยพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 17 เป็น 126 μm หลังจากเติม STMP 5.0 % w/w โครงสร้างโมเลกุลจะพบว่าการเชื่อมระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้ากับหมู่ไตรฟอสเฟตของ STMP ความหนาแน่นของการเชื่อมไข้ว (cross-linking density) เพิ่มขึ้นเมื่อ STMP เพิ่มขึ้น โดยตรวจสอบได้จากการดูดซับเมธิลีนบลู ซึ่งการเติม STMP จะมีผลต่อการพองตัว และอัตราการซึมผ่านออกซิเจนลดลง โดยเฉพาะถ้าที่ได้ไม่เกิน 2.0 % w/w และอัตราการย่อยสลายของฟิล์มผสมใน 0.01 PBS ใช้เวลาประมาณ 2 อาทิตย์

2.1.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) [สันธิณี, 1998]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (sodium carboxymethyl cellulose, NaCMC) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่ละลายน้ำได้โดยจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดที่มีประจุลบ (anionic polymer) เตรียมจากปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน (etherification) ของเซลลูโลสกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดโมโนคลอโรแอซิดิก (ClCH_2COOH) หรือโซเดียมโมโนคลอโรแอซิดेट ($\text{ClCH}_2\text{COONa}$) ดังแสดงในภาพ 2.9



ภาพ 2.9 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [Feddersen and Thorp, 1993]



ภาพ 2.10 ปฏิกริยาการเตรียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [<http://cool.conservat-ion-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v01/bp01-04.html>]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จึงเกิดการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยย่อยของเซลลูโลส คือ แอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) ด้วยหมู่ไซเตียมคาร์บอกซีเมทิลได้เป็นเซลลูโลสอีเทอร์ การแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยย่อยซ้ำ ๆ ของเซลลูโลส 1 หน่วยนั้นสามารถเกิดได้ถึง 3 ตำแหน่ง หากมีการแทนที่ครบทั้ง 3 ตำแหน่ง จะหมายถึงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสนั้นมี DS (degree of substitution) เท่ากับ 3.0 ซึ่งเป็นค่าสูงสุด ในทางการค้า

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่วนใหญ่ จะมีค่า DS อยู่ในช่วง 0.4–1.4 แต่ชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุด จะมีค่า DS อยู่ระหว่าง 0.7–0.8 [Glenn *et al.*, 1980]

ตาราง 2.2 แสดงสมบัติบางประการของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีค่า DS เท่ากับ 0.7 [Glenn *et al.*, 1980]

| Solid Powder | |
|--------------------------------|--------|
| Moisture content as packed, % | 8.0 |
| Browning temperature, °C | 227 |
| Charring temperature, °C | 252 |
| Bulk density, g/mL | 0.75 |
| Solutions | |
| Specific gravity, 2%w/v, 25 °C | 1.0068 |
| Refractive index, 2%w/v, 25 °C | 1.3355 |
| pH, 2%w/v | 7.0 |
| Films | |
| Specific gravity, g/mL | 1.59 |
| Refractive index | 1.52 |

2.1.2.1 สมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นอนุพันธ์เซลลูโลสในรูปที่ละลายน้ำได้ โดยความสามารถในการละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับค่า DS โดยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีค่า DS สูง หรือมีหมู่แทนที่มากจะสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าชนิดที่มีค่า DS ต่ำ ส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดที่มี DP มาก เมื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะให้ฟิล์มที่มีความเหนียวและแข็งแรงสูง

[Feddersen and Thorp, 1993]

a) การละลายน้ำ (water solubility)

สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสขึ้นอยู่กับค่า DS นั่นคือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดที่มีค่า DS น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.3 จะไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นต่าง แต่ถ้าเป็นชนิดที่มี DS ตั้งแต่ 0.4 ขึ้นไป ก็จะสามารถละลายน้ำได้ดี ส่วนค่า DP ซึ่งแสดงถึงขนาดโมเลกุลนั้นจะมีผลต่อความหนืดของสารละลายที่ได้ หากเป็นสารละลายที่เตรียมจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีค่า DP สูง ก็จะมีความหนืดสูงตามไปด้วย [Feddersen and Throp, 1993]

การตกตะกอน (precipitation) และการเกิดเจล (gellation) ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถทำได้โดยการเติม polyvalent cation เช่น Al^{3+} , Cr^{3+} , หรือ Fe^{3+} ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้สารละลายข้นขึ้นจนเกิดเป็นเจลได้

b) ความหนืด (viscosity)

สารละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในน้ำจะมีความหนืดสูงในกรณีเป็นสารละลายที่เตรียมจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยที่ความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดของสารละลายจะลดลง และในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์นี้จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น หากให้ความร้อนแก่สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นเวลานาน ๆ จะทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ และลดความหนืดของสารละลายได้ถาวร

โดยทั่วไปสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีเสถียรภาพที่ pH 7-9 แต่ที่ pH สูง 10 และต่ำกว่า 4 สารละลายจะมีความหนืดลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่ในกรณีของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เตรียมจากพอลิเมอร์ที่มี DS เป็น 0.7 ที่ pH เท่ากับ 2 ความหนืดกลับมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

c) การเกิดเจล (gelation)

การเติมเกลือของไอออนโลหะหมู่ III เช่น อลูมิเนียมแอสซีเตต ($\text{AlOH}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$) หรืออลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ลงในสารละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะทำให้สารละลายข้นขึ้นจนกลายเป็นเจลได้ เนื่องจากไอออน Al^{3+} นั้นจะทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายระหว่างหมู่คาร์บอกซีเมทิลในโมเลกุลพอลิเมอร์นั่นเอง ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการคงรูปและอยู่ตัวของเจล ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ปริมาณไอออนโลหะที่เติมลงไปและความยาวของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ เจลที่เตรียมจากวิธีข้างต้นสามารถคงสภาพได้นานกว่า 4 ปี โดยไม่เสียสภาพใด ๆ

อัตราการเกิดเจลของสารละลายพอลิเมอร์นั้นควบคุมได้โดยการกำหนดปริมาณไอออนของโลหะที่ทำให้เกิดสภาพเจลกับอนุโมลที่ให้ประจุลบ เช่น ซีเตรต และฟอสเฟตไอออน ซึ่งต้านทานการเกิดเจลให้พอเหมาะ ตามปกติหากต้องการเจลที่ยืดหยุ่นดีควรเลือกใช้สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้นสูง แต่ให้ความหนืดต่ำ แต่ถ้าต้องการเจลที่แข็งตัวมากขึ้นก็สามารถทำได้โดยการเติมไอออนโลหะให้มากขึ้น

2.1.2.2 การเตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

การขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมมากนัก อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่เตรียมจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสนี้ก็มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานต่อไขมันและน้ำมัน ดังแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 สมบัติบางประการของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ชนิด DS 0.7 [Feddersen and Thorp, 1993]

| Property tested | Typical values | | |
|-------------------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Low viscosity | Medium viscosity | High viscosity |
| Tensile strength, MPa | 360 | 590 | 600 |
| Elongation, 1% at break | 8.3 | 14.3 | 14.3 |
| Flexibility, MIT double folds | 93 | 131 | 513 |
| Electrostatic charge | Negative | Negative | Negative |
| Refractive index | 1.515 | 1.515 | 1.515 |
| Specific gravity | 1.59 | 1.59 | 1.59 |

การเพิ่มความสามารถในการยึดตัวของฟิล์มนั้นสามารถเติมสารพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล ลงในสารละลายก่อนการขึ้นรูปฟิล์มได้ การเติมกลีเซอรอลลงในสารละลายพอลิเมอร์ 10–30 % จะทำให้ฟิล์มมีการยึดตัวเพิ่มขึ้นกว่าเดิม 40–50% [Glickmans, 1969] ส่วนการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มด้านความต้านทานต่อไขมันทำได้โดยการทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายในโมเลกุลด้วยพอลิเอไมด์ (polyamide) หรือเมลามีน-

พอร์มาลดีไฮด์ (malamine-formaldehyde) หรือนำฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เตรียมได้มา ทำปฏิกิริยากับสารละลายเกลือของไอออนโลหะหมู่ III ซึ่งจะเข้าไปแทนที่โซเดียมไอออนใน โมเลกุลของพอลิเมอร์

2.1.2.3 การใช้ประโยชน์จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเมื่อละลายน้ำจะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ ให้ความหนืดสูงและไม่เป็นพิษต่อร่างกาย จึงมักนิยมใช้เป็น thickening agent, suspending agent, binding agent, และ film-forming ในอุตสาหกรรมอาหาร สิ่งทอ เครื่องสำอาง และอื่นๆ

a) สิ่งทอ (texture)

ด้วยสมบัติในด้านการละลายและการเกิดฟิล์ม คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงถูกใช้เป็น sizing ของเส้นใย โดยเฉพาะเส้นใยฝ้าย ก่อนนำไปทอซึ่งจะช่วยลดปริมาณสารมลพิษจากโรงงานทอผ้าได้ และยังสามารถนำไปใช้เป็น thickening agent ของสีที่ใช้พิมพ์ผ้าได้อีกด้วย

b) อาหาร (food)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นที่นิยมใช้เป็น thickening agent ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เป็นสารละลายใสไม่มีสี และไม่ให้พลังงานใด ๆ แก่ร่างกาย สามารถผสมเข้ากันได้กับสารอาหารมากมาย เช่น โปรตีน และน้ำตาล เป็นต้น

c) เครื่องสำอางและเวชภัณฑ์ (cosmetics and medical equipment)

ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมักใช้เป็น stabilizing agent และ thickening agent ในโลชั่นและครีมต่างๆ

สมบัติเด่นอีกประการหนึ่งของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสนั้นคือ การที่พอลิเมอร์นี้ไม่ละลายด้วยกรดในกระเพาะอาหาร แต่จะละลายในสารละลายต่างในลำไส้ จึงนิยมใช้เป็นสารเคลือบเม็ดยาในทางการแพทย์

2.1.3 พอลิเมอร์ผสม (blended polymer)

พอลิเมอร์ผสม เกิดจากการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมด้วยกัน เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสม การพัฒนาทางด้านพอลิเมอร์ผสมเริ่มมาตั้งแต่ในช่วง พ.ศ. 2523 และมีการพัฒนาเป็นอย่างมากในปี 2530 ประมาณ 60-70 % ของพอลิโอเลฟิน (polyolefins) และ 23 % ของพอลิเมอร์ชนิดอื่นจะถูกจำหน่ายในเชิงพอลิเมอร์ผสม ในปลายปี 2523 อัตราการใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมมีประมาณ 2-4 % ต่อปี ในขณะที่อัตราการใช้พอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง 9-11 % ต่อปี และอัตราการใช้พอลิเมอร์ผสมในเชิงวิศวกรรมมีประมาณ 13-17 % ดังนั้นแนวโน้มของอุตสาหกรรมพอลิเมอร์จะมุ่งไปยังระบบที่ซับซ้อนขึ้นเพื่อจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติสูงสุดตามต้องการ โดยการปรับกระบวนการผลิตและการทำให้เกิดการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ โดยที่การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมมี 2 ประเภท คือ

1) การเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเป็นการที่พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) เพียงค่าเดียว และมีค่าพลังงานอิสระแบบ Gibbs ดังสมการ

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \leq 0$$

หรือผลต่างระหว่างเอนทาลปี (enthalpy) และเอนโทรปี (entropy) ของการ

ผสมมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปเอนโทรปีของการผสมของพอลิเมอร์มีค่าต่ำมาก ดังนั้นเอนทัลปีของการผสมจึงต้องมีค่าเป็นศูนย์หรือต่ำกว่าศูนย์ หรือกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ต่างชนิดกันจะต้องยึดเกาะกันมากกว่าพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมโดยทั่วไปจึงมักเข้ากันได้ไม่ดีในทางเทอร์โมไดนามิกส์

2) การเข้ากันได้แบบส่งเสริมสมบัติเฉพาะด้าน จะเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อใช้เทคนิควิธีผสมพิเศษ สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติที่ดีกว่าเดิม [Coran, 2000]

2.1.4 การผลิตฟิล์ม (film preparation)

กระบวนการหลักที่ใช้ในการผลิตฟิล์ม โดยทั่วไปแล้วมี 3 วิธี คือ

a) การหล่อฟิล์ม (casting)

การหล่อฟิล์ม เป็นการนำสารผสมของฟิล์มเทปบนภาชนะที่มีผิวเรียบ เช่น แผ่นพลาสติก กระดาษ หรือฟอรัไมกา [เกตคีณี, 1996] หลังจากนั้นนำไปทำแห้งด้วยลมร้อน [Kaya and Kaya, 2000] วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการอบแห้งนาน

b) การอัดรีด (extrusion)

การอัดรีด เป็นการอัดพลาสติกหลอมให้ไหลผ่านหัวตาย (die) ที่มีรูปร่างเหมาะสม เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตฟิล์มสังเคราะห์ทั่ว ๆ ไป ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นฟิล์มที่รับประทานได้ ตัวอย่างการใช้กระบวนการนี้ ได้แก่ การผลิตฟิล์มคอลลาลาเจน เพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทไส้กรอก นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเพื่อนำมาใช้ในการผลิตฟิล์มที่รับประทานได้จากผักผลไม้อีกด้วย [Arvanitoyanis et al., 1997]

c) การอัด (compression)

การอัด เป็นการนำสารผสมของฟิล์มมาเติมลงในแบบ แล้วอัดแบบโดยใช้ความร้อน ตัวอย่างการใช้กระบวนการนี้ได้แก่ การทำฟิล์มแข็งผสมกับโปรตีนข้าวโพด หรือซีน (zein) ทำโดยใช้ซีนละลายในสารละลายเมทานอลเข้มข้น 75 % จากนั้นเติมพลาสติกไซเซออร์ สี่ และแข็งลงไป ส่วนผสมที่ได้จะถูกทำแห้งจนมีลักษณะคล้ายโด (dough) จากนั้นนำไปกดอัดจนได้รูปร่างตามต้องการ ซึ่งเวลาในการผลิตทั้งหมดจะขึ้นกับความชื้นของโด

ในงานวิจัยนี้เตรียมไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุนที่ย่อยสลายได้เองจากแป้งข้าวเจ้ามาผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยเตรียมด้วยวิธีการหล่อฟิล์มเพื่อให้เป็นแผ่นเนื้อแน่น สำหรับแผ่นฟิล์มเนื้อพรุนจะแตกต่างคือเมื่อเทลงแบบแล้วจะนำไปแช่แข็งแล้วทำให้แห้งด้วยการทำแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying method) ซึ่งเป็นการดูดผลึกน้ำแข็งออกมาจากตัวอย่างทั้งหมด

สำหรับแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหลัก ($-OH$ groups) ซึ่งจะสามารถมีความเข้ากันได้ดี ไม่เป็นพิษ ย่อยสลายได้เอง เป็นต้น ในขณะที่สมบัติที่ด้อยของแป้งข้าวเจ้าคือเมื่อแห้งจะมีความแข็งและแตกง่าย ในขณะที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีความเหนียวซึ่งสามารถช่วยลดการแตกง่ายของแป้งข้าวเจ้า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเตรียมแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ และหาสภาวะที่ดีที่สุด พร้อมหาลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลผสมดังกล่าว เช่น ความพรุน (porosity) การพองตัว (degree of swelling) การละลายน้ำ (water solubility) ปริมาณความชื้น (moisture content) สมบัติเชิงกล (mechanical properties) เศษเถ้า (residual ash) และการย่อยสลาย (degradability) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นไฮโดรเจลดูดซับสำหรับห้ามเลือดในร่างกาย

2.2 แนวคิดที่สัมพันธ์กับเรื่องที่วิจัย

แป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีสมบัติที่สามารถนำมาใช้ในร่างกายได้ โดยสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มผสมเพื่อหาลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมแผ่นฟิล์มผสมที่อัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นหาลักษณะเฉพาะต่าง ๆ เพื่อยืนยันในสมบัติที่ได้เพื่อนำเป็นวัสดุต้นแบบสำหรับห้ามเลือดชั่วคราวในร่างกาย

2.3 งานวิจัยที่สัมพันธ์กับเรื่องที่วิจัย

จากคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่กล่าวมาจึงทำให้มีคณะวิจัยได้นำมาศึกษาในด้านต่าง ๆ

Punyanitya *et al.* [2013] ได้ทำการดัดแปรข้าวเจ้าให้มีฤทธิ์เป็นกรดสำหรับใช้ห้ามเลือดชั่วคราวบริเวณอวัยวะอ่อนนุ่มในร่างกาย โดยพบว่าข้าวเจ้ากรดห้ามเลือดมีลักษณะโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์เป็นแผ่นเจลสีขาวภาพกลม เมื่อส่องกราดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นส่วนที่เป็นเม็ดข้าวเจ้ากระจายอยู่ในส่วนเนื้อวัสดุแบบอสัณฐานและมีการเชื่อมติดประมาณ 50 % โดยปริมาตร ส่วนที่ไม่เชื่อมติดมีลักษณะเป็นโพรงอากาศขนาดเล็กแบบปิด เมื่อขึ้นงานสัมผัสน้ำจะแสดงฤทธิ์เป็นกรดทำให้เกิดค่าความเป็นกรด-เบสเฉลี่ย 1.55 การทำปฏิกิริยากับเลือดสดจะทำให้เกิดการแปรสภาพจากน้ำเลือดสีแดงสดกลายเป็นก้อนลิ่มสีน้ำตาลคล้ำ การตรวจสอบด้วยชุดวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersion x-ray Spectroscopy, EDS) พบว่าส่วนที่เป็นผลึกประกอบด้วยคาร์บอน 55.87 % และออกซิเจน 44.13 % ส่วนที่เป็นอสัณฐานประกอบด้วยคาร์บอน 52.01 % ไนโตรเจน 20.05 % และออกซิเจน 27.97 % สำหรับการแช่วัสดุในน้ำนาน 7 วัน แล้วทำการตรวจน้ำโดย

รอบไม่พบการปนเปื้อนของแบง์และซิงงานสามารถคงภาพโดยไม่เปื่อยยุ่ย โดยการดูดซับน้ำ เป็น 2.07 เท่าของน้ำหนักแห้ง และขยายตัว 2.4 เท่าในเวลาประมาณ 30 นาที การเผาด้วย เปลวไฟพบเศษเถ้าหลงเหลือ 1.79 % การทดสอบสิ่งประดิษฐ์ในสัตว์ทดลองพบว่า แผ่นเจล ชาวเจ้ากรดสามารถห้ามเลือดหนูทดลองได้ภายในเวลา 2 ถึง 3 วินาที เมื่อฝังแผ่นเจลไว้ใน เนื้อเยื่อนุ่มใต้ผิวหนังบริเวณลำคอหนูทดลองพบว่าแผ่นเจลถูกย่อยสลายหายไปจนหมดสิ้น ภายในเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ และบริเวณเนื้อเยื่อโดยรอบมีการฟื้นฟูสภาพกลับคืนเป็นปกติ

Souto-Maior *et al.* [2010] ได้นำเพกทิน (pectin) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์แล้วนำมา คัดแปรด้วยไตรโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (STMP) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยเลือกทำที่ pH 12 ขึ้นรูปฟิล์มด้วยการหล่อฟิล์ม (casting) ที่อุณหภูมิ 50 °C การเชื่อมไข้วก็เพื่อให้ pectin มีความ สามารถในการละลายน้ำลดลง โดยลักษณะทางเคมีของ pectin-STMP เมื่อถูกตรวจสอบหมู่ ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่า pectin-STMP จะมี หมู่ P-O-C, P=O, P-O-P ที่ช่วง wavenumber 1425, 1324 และ 954 cm^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่หมู่ -OH จะมี intensity ลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมไข้วกับหมู่ $-\text{PO}_4^{3-}$ สำหรับค่า การบวมน้ำของ pectin-STMP ในน้ำย่อยกระเพาะจำลอง (simulated gastric fluid) ที่ pH 1.2 จะพบว่า pectin-STMP สามารถป้องกันการปลดปล่อยยา ก่อนถึงเป้าหมายจากการถูกย่อย สลายได้

Dulong *et al.* [2004] ได้เตรียมไฮยาลูโรแนน (Hyaluronan) เพื่อเชื่อมไข้ว กับ STMP ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้เป็นอนุภาคไฮโดรเจล จากนั้นศึกษาการบวมน้ำของอนุภาค พร้อมทั้งศึกษาผลของไอออนของ NaCl ที่เติมลงไปจะทำให้อนุภาค hyaluronan สามารถพอง น้ำได้มากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากไอออนของ NaCl ที่ไปดึงดูดโมเลกุลน้ำเข้ามา จากนั้นจะหาเวลา ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเมธิลีนบลู (MB) เพื่อนำมาหาค่าความหนาแน่นการเชื่อมไข้ว

(crosslinking density) ซึ่งจะพบว่าปริมาณ crosslinking density จะมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับเข้าไป และอนุภาค hyaluronan คัดแปรนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาเพื่อใช้ในการรักษาโรคมะเร็งต่อไป

Ghanbarzede *et al.* [2010] ทำการศึกษาทางกายภาพของแผ่นฟิล์มผสมระหว่างแป้งคัดแปรและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยเตรียมสารละลายผสมแล้วใช้เทคนิคการเท (casting method) ลงในแม่แบบเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มชนิดใหม่ ผลการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในแป้งคัดแปรส่งผลให้สมบัติทางกายภาพโดยฟิล์มผสมที่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 % w/w จะมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำสุด และอัตราการดูดซับความชื้นและความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นฟิล์มมีแนวโน้มคล้ายกัน สำหรับการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 20 % w/w จะทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด

Mua *et al.* [2012] ศึกษาการเตรียมและหาสมบัติของฟิล์มไดอัลดีไฮด์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (dialdehyde carboxymethyl cellulose) ที่เชื่อมไขว้กับเจลาติน โดยพบว่าฟิล์มเจลาตินผสมกลีเซอรอลมีลักษณะที่ดีเมื่อมีการเติมสารเชื่อมไขว้ dialdehyde polysaccharide, dialdehyde carboxymethyl cellulose (DCMC) โดยเทคนิคการเท พร้อมทั้งนำแผ่นฟิล์มเจลาตินและไดอัลดีไฮด์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทำการศึกษสมบัติเชิงกล ความสามารถทนความร้อน สมบัติกันแสง พฤติกรรมการพองตัว การซึมผ่านของไอน้ำ โดยเมื่อเติมไดอัลดีไฮด์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปจะทำให้ความเค้น (tensile strength) ของแผ่นฟิล์ม และความทนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเครียด (elongation at break) ของแผ่นฟิล์มมีค่าลดลง และมีสมบัติกันแสง ultraviolet ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้การเติมไดอัลดีไฮด์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะสามารถลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ การพองตัว สำหรับการเติมกลีเซอรอลจะทำให้เพิ่มความเครียดและอัตราการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์ม ในขณะที่ความทนต่อความร้อน

และการพองตัวมีค่าลดลง

Tongdeesoontorn *et al.* [2011] ได้ใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมแป้งมันสำปะหลัง การเตรียมแผ่นฟิล์มที่ย่อยสลายได้ โดยแผ่นฟิล์มผสมได้เติมพลาสติกไซเซอร์ด้วยกลีเซอรอลใน อัตราส่วน 30 g ต่อ 100 g แป้ง โดยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้ถูกผสมในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40 % w/w ของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งทำให้ค่าความเค้นและความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงตามลำดับ ในขณะที่การละลายน้ำมีค่าลดลงเช่นกัน ซึ่งมาจากโครงสร้างโมเลกุลที่เกิดการเชื่อมไขว้ทางกายภาพระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันกับหมู่คาร์บอกซิลของ คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส

Siritientong and Aramwit [2015] ได้หาลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลผสมที่เตรียมจาก คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมเซรีซิน โดยพบว่า การนำเซรีซินเข้าไปผสมกับคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลสจะทำให้ไฮโดรเจลละลายน้ำได้ยากขึ้น และทนต่อการย่อยสลายจากเอ็นไซม์อะมิเลส โดยพบว่ามวลโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สูงจะทำให้เกิดอัตราการย่อยสลายได้ช้า และทำให้เซรีซินปลดปล่อยออกมาได้ช้ากว่ามวลโมเลกุลที่น้อยกว่า สำหรับเซรีซินที่ได้จะนำไป ใช้ในการผลิตคอลลาเจนของเซลล์ L929

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

| เครื่องมือและอุปกรณ์ | รุ่น | บริษัทผู้ผลิต |
|--|----------------------|--|
| Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) | S P E C T R U M 2000 | Parkin Elmer, Watham, USA |
| มาตรวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) | Orion 2-Star | Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA |
| ควอทซ์เซลล์ ขนาด 3 cm (Quartz cells) | | |
| ตู้เย็น (Refrigerator) | | Mitsubishi |
| Scanning electron microscope (SEM) | JSM-5910 LV | JEOL, Tokyo, Japan |
| Thickness measuring equipment | 547-400S | Mitutoyo, Japan |
| Universal mechanical testing machine | LRX | Lloyds, Instrument, England |
| อ่างน้ำร้อนและเครื่องเขย่า (water & shaker bath) | GX-800 | Leicester, England |

ตาราง 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

| เครื่องมือและอุปกรณ์ | รุ่น | บริษัทผู้ผลิต |
|---|-----------|--|
| เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance) | ALPHA 1-4 | Memmert, Cologne, Germany |
| เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) | UM500 | A&D, Tokyo, Japan Christ, Lower Saxony, Germany |
| เตาอบ (Hot air oven) | 3504 | Memmert, Schwabach, Germany |
| เตาอบไฟฟ้าความร้อนสูง (Electric furnace) | MSH | Euro-therm, Ashburn, USA |
| เครื่องให้ความร้อนและหมุนเวียน (Hotplate & Stirrer) | 744 | IKA, Selangor, Malaysia |
| ไมโครปิเปต (Microliter pipette) | | Thermo Fisher Scientific, Vantaa, Finland |

* การวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR จัดทำที่ห้องปฏิบัติการกลางภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เทคนิค SEM จัดทำที่ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์ อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ การหาสมบัติเชิงกล จัดทำที่ศูนย์วิจัยวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3.1.2 วัสดุและสารเคมี

ผงแป้งข้าวเจ้า (Rice starch, Era-Tab, 99.0%), บริษัทเอราวัณฟามาซูติคอลล
รีเซิร์ทแอนด์ลาบอราตอรีจำกัด, นครปฐม

ผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose stadium salt, high
viscosity (degree of substitute 0.65–0.85), 99.5%) Sigma-Aldrich Co., USA

ตาราง 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

| สารเคมี | สูตรเคมี | MW | เกรด | บริษัทผู้ผลิต |
|---|--------------------------------|-------|------|--|
| กรดไฮโดรคลอริก 37 % (v/v) (Hydrochloric acid) | HCl | 36.46 | AR | Ajax Finechem, Sydney, Australia |
| โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) | NaOH | 40.00 | AR | Fisher Scientific, Leicester, England |
| เฮกเซน (Hexane) | C ₆ H ₁₄ | 86.18 | AR | Fisher Chemicals, Leicester, England |
| ผงฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer APHA) | | 34.00 | AR | Fluka, Mumbai, India |
| เอ็นไซม์อัลฟาอะมิเลส (alpha amylase from <i>Bacillus subtilis</i> , ~50 U/ mg) | | | AR | Sigma-Aldrich Co., Switzerland |

3.2 การเตรียมสารละลาย

3.2.1 สารละลาย 5 % w/v แป้งข้าวเจ้า

ชั่งผงแป้งข้าวเจ้า 5.0 g ละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 min ทิ้งไว้จนเย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง ถ่ายลงในขวดปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.2 สารละลาย 5 % w/v คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ชั่งผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5.0 g ละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 15 min ทิ้งไว้จนเย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง ถ่ายในขวดปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.3 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1.0 M

ชั่งผงฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 34.0 g ละลายในน้ำกลั่น 950 mL ปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็น 7.4 ด้วยสารละลาย 0.1 N NaOH และสารละลาย 0.1 M HCl ถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 1000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.4

3.2.4 สารละลายอัลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M

ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1.0 M ปริมาตร 10 mL เติมนลงในน้ำกลั่น ถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 1000 mL ผสมผงอัลฟาอะมิเลส 0.01 g แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นพร้อมปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็น 7.4 ด้วยสารละลาย 0.1 N NaOH และสารละลาย 0.1 M HCl

3.2.5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.0 M

ปิเปต 37 % v/v กรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 8.20 mL เติมน้ำกลั่น ถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 100 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.6 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริก 1.0 M ปริมาตร 10 mL เติมน้ำกลั่น ถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 100 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.7 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 g ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 100 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.3 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุนจากแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

3.3.1 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อแน่น

นำสารละลาย 5 % w/v แป้งข้าวเจ้า และสารละลาย 5% w/v คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสนำมาผสมกันที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ดังนี้ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 0/100 โดยผสมสารละลาย 5 % w/v แป้งข้าวเจ้า 20, 18, 16, 14, 12, และ 0 mL เข้ากับสารละลาย 5 % w/v คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0, 2, 4, 6, 8, และ 20 mL ตามลำดับในบีกเกอร์ 25 mL จากนั้นทำการกวนสารละลายผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 min จากนั้นหล่อขึ้นรูป (casting solution) ด้วยการนำสารละลายผสม 25 mL มาเทลงในแม่แบบ Petri dish ที่เคลือบด้วยเทฟลอน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ทิ้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 2 d นำแผ่น

ไฮโดรเจลผสมแบบเนื้อแน่นออกจากแม่แบบและนำเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) เพื่อเตรียมวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะ

3.3.2 แผ่นไฮโดรเจลชนิดเนื้อพรุน

ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.3.1 แต่เปลี่ยนวิธีการทำให้แห้งโดยนำสารละลายผสมที่ได้เทลงแม่แบบพลาสติก (PE) เส้นผ่าศูนย์กลาง 10.0 cm นำไปแช่แข็งที่ -10 ถึง -20 °C เป็นเวลา 18 h จนสารละลายผสมแข็งตัว แล้วนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็งเป็นเวลา 3 d นำแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อพรุนออกจากแม่แบบและนำเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) เพื่อเตรียมวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะ

3.4 การศึกษาสมบัติทางเคมีของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน

3.4.1 โครงสร้างโมเลกุล (Molecular conformation)

ชั่งแผ่นไฮโดรเจล 0.01 g นำมาบดกับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอัดผงผสมที่ได้ให้เป็นแผ่นฟิล์มบางแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Spectrum 2000 FTIR spectrometer) โดยสเปกตรัมของแผ่นไฮโดรเจลจะถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1}

3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน

3.5.1 สัณฐานวิทยา (Morphology)

สัณฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลผสมทั้งชนิดเนื้อแน่นและเนื้อพรุนนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM, JSM-5910 LV, JEOL, Japan) โดยนำแผ่นไฮโดรเจลมาแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการหักแผ่นไฮโดรเจลเพื่อวิเคราะห์ภาคตัดขวาง (cross-sectional part) นำแผ่นตัวอย่างที่ได้ไปวางบนตอทองเหลืองแล้วทำการเคลือบด้วยทองคำ

3.5.2 ความพรุน (Porosity)

ความพรุนของแผ่นไฮโดรเจลผสมถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยของเหลว (liquid displacement method) [Bhardwaj and Kundu, 2011] ซึ่งแผ่นไฮโดรเจล 0.1 g นำตัวอย่างแห้งที่ได้ไปจุ่มในสารละลายเฮกเซน 5 mL (V_1) (ใน 10.0 mL graduated cylinder) เป็นเวลา 5 min เพื่อให้เฮกเซนได้แทรกซึมเข้าไปในรูพรุนทั้งหมดของแผ่นไฮโดรเจล จากนั้นบันทึกปริมาตรทั้งหมด (V_2) หลังจากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลที่มีเฮกเซนออกจากกระบอกตวง (graduated cylinder) แล้วบันทึกปริมาตรเฮกเซนที่เหลืออยู่ (V_3) ค่าความพรุน (ϵ) ของแผ่นไฮโดรเจลจะถูกคำนวณโดยสมการ (1)

$$\epsilon = \left[\frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3} \right] \times 100 \quad (1)$$

3.5.3 การพองตัวและการละลายน้ำ (Degree of swelling and Water solubility)

ชั่งแผ่นไฮโดรเจล 0.1 g ให้มีขนาด 3x3 cm² พร้อมบันทึกน้ำหนักที่ได้ (W_1) โดยทำการจุ่มลงในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5-1440 min หลังจากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลที่บวมน้ำออกมาพร้อมทั้งซับน้ำส่วนเกินที่บริเวณพื้นผิวนอกของแผ่นไฮโดรเจล จากนั้นชั่งน้ำหนักของแผ่นไฮโดรเจลที่บวมน้ำ (W_2) นำแผ่นไฮโดรเจลที่ได้ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 h จนน้ำหนักที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงบันทึกเป็น (W_3) อัตราการพองตัว (DS) และเปอร์เซ็นต์การละลายน้ำ (S) ของแผ่นไฮโดรเจลสามารถคำนวณด้วยสมการ (2) และ (3) [Rodkate et al., 2010] [AOAC, 1990] ตามลำดับ

$$DS = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (2)$$

$$S = \left[\frac{W_1 - W_3}{W_1} \right] \times 100 \quad (3)$$

3.5.4 ปริมาณความชื้น (Moisture contents)

นำแผ่นไฮโดรเจลมาตัดให้ได้ขนาดความกว้างและความยาว 3x3 cm² พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักเริ่มต้น (W_1) นำมาตั้งทิ้งไว้ในภาชนะปิดที่มีน้ำในบีกเกอร์ปริมาตร 25 mL วางภายใน โดยมีค่าความชื้น ~60% (thermo-hygrometer, 302, China) เป็นเวลา 5-1440 min พร้อมบันทึกน้ำหนักสุดท้ายที่ได้ (W_4) โดยปริมาณความชื้น (MC) สามารถคำนวณได้ตามสมการ (4)

$$MC = \left[\frac{W_4 - W_1}{W_1} \right] \times 100 \quad (4)$$

3.5.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

นำแผ่นไฮโดรเจลมาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 1 cm ความยาว 5 cm [ASTM D882-91, 1992] โดยความเครียดและความเค้นของแผ่นไฮโดรเจล (Tensile strength and Elongation at break) ถูกทดสอบด้วยเครื่องวัดยูนิเวอร์แซล (LRX, Lloyds Instrument, England) แผ่นไฮโดรเจลจะถูกแรงดึงที่อัตรา 50 mm/min

3.5.6 เศษเถ้า (Residual ash) [The United States Pharmacopoeia, 2002]

ชั่งแผ่นไฮโดรเจล 1.0 g บันทึกเป็น (W_5) เผาแผ่นไฮโดรเจลที่ได้ในเตาเผาไฟฟ้า (Euro-therm, model 3504, USA) ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 3 h เปอร์เซ็นต์เศษเถ้าของแผ่นไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้ตามสมการ (5)

$$\text{Residual ash} = \left[\frac{W_5}{W_1} \right] \times 100 \quad (5)$$

3.5.7 การย่อยสลาย (Degradation)

ชั่งแผ่นไฮโดรเจล 0.1 g (W_1) นำมาแช่ในสารละลายอัลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M ที่ pH 7.4 และอุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 1 d ถึง 6 wk หลังจากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลออกแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดเกลือออกไป นำแผ่นไฮโดรเจลไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 h จากนั้นชั่งน้ำหนักที่เหลืออยู่ (W_6) โดยเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้จากสมการที่แสดงดังต่อไปนี้ [Martinez-Valencia *et al.*, 2011]

$$\text{Degradability (\%)} = \frac{(W_5 - W_6)}{W_5} \times 100 \quad (6)$$

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

การศึกษาแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่น และไฮโดรเจลแบบเนื้อพรุน

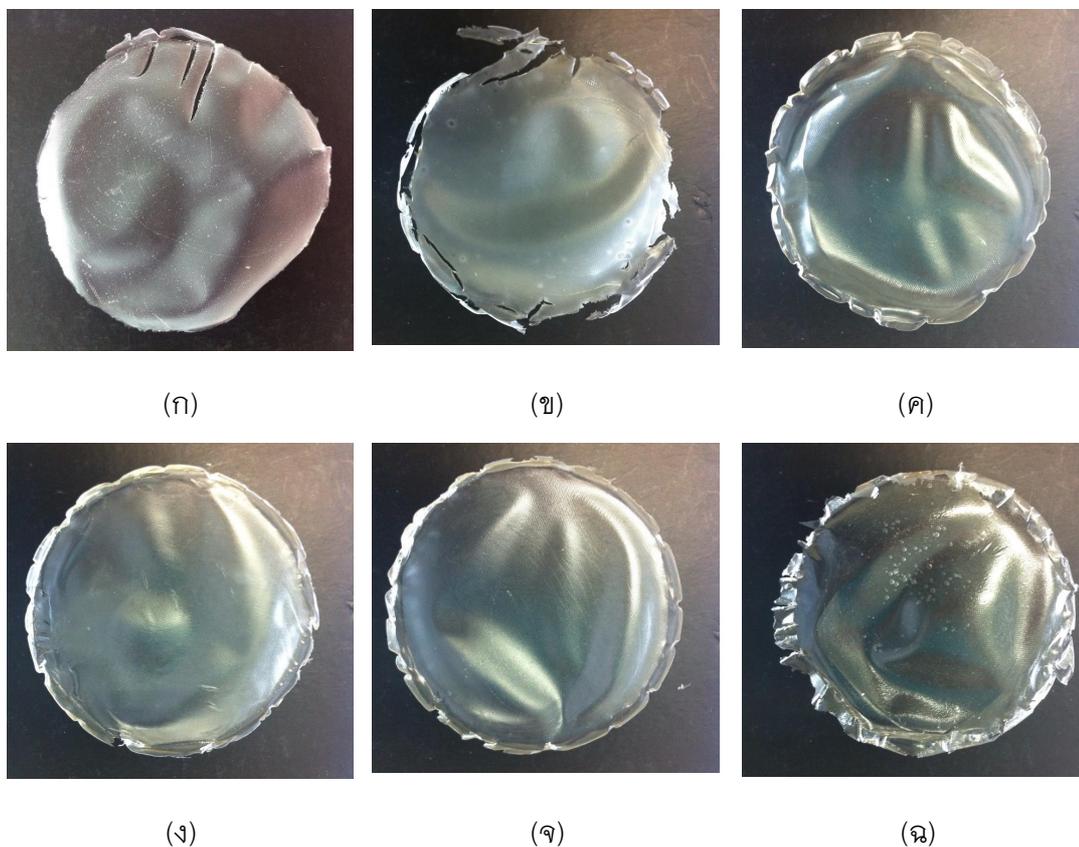
การเตรียมแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน ได้จากการนำสารละลาย 5 % w/v แป้งข้าวเจ้า ผสมกับสารละลาย 5 % w/v คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ ได้แก่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 0/100 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยศึกษาจากสัณฐานวิทยาที่ได้จากภาพถ่าย SEM เพื่อตรวจสอบว่าแป้งข้าวเจ้ามีความเข้ากันได้ดีกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นทำการตรวจสอบการเชื่อมโยงทางกายภาพจากหมู่ฟังก์ชันของแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยเทคนิค FTIR และทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจล ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพภายนอก ความพรุน การพองตัว การละลายน้ำ ปริมาณความชื้น และสมบัติเชิงกล

สำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุห้ามเลือดในร่างกาย จะทำการศึกษาตามมาตรฐาน US Pharmacopoeia เพิ่มเติม ได้แก่ ปริมาณเศษเก้าที่เหลืออยู่ และการย่อยสลายในสารละลายอัลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เพื่อยืนยันการนำไปใช้ในร่างกาย โดยผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

4.1 แผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน

ลักษณะทางกายภาพภายนอก (physical appearance) ของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นจากแป้งข้าวเจ้า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่

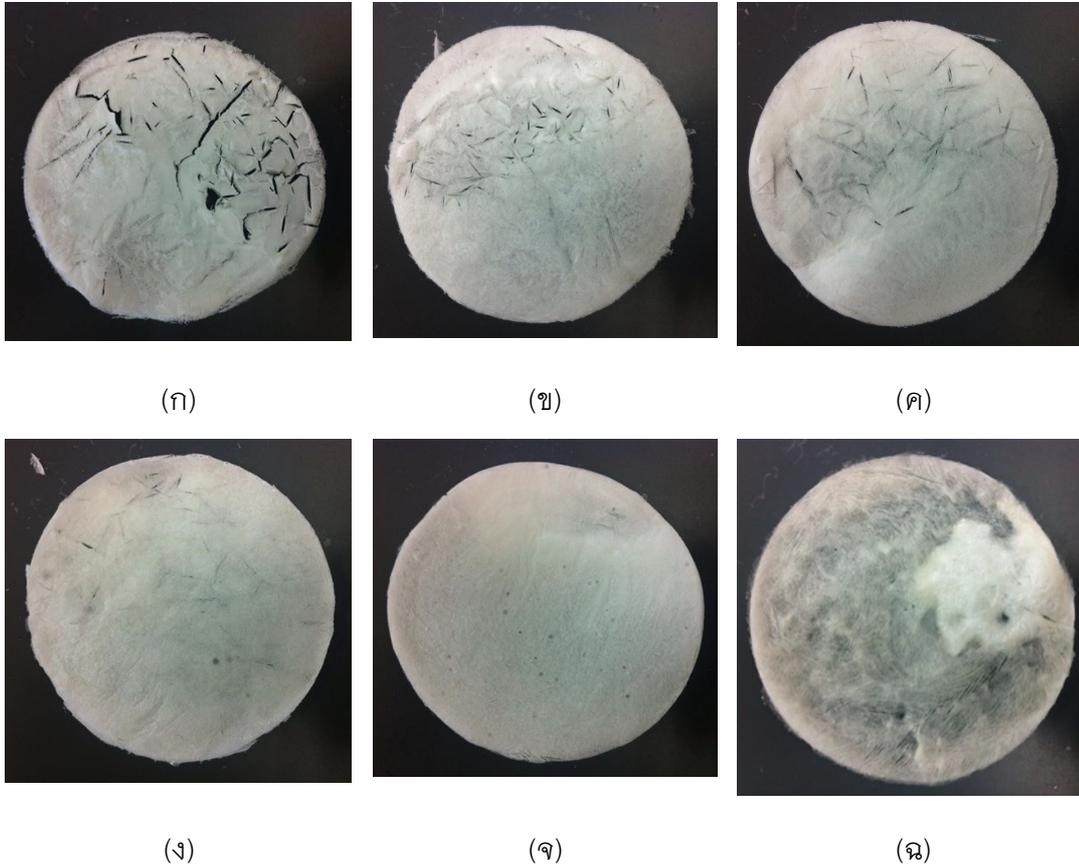
อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพ 4.1



ภาพ 4.1 ลักษณะทางกายภาพภายนอกของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100

จากภาพ 4.1 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าจะมีสีขาวขุ่นใส (transparent) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แผ่นฟิล์มผสมที่ได้จะมีสีใสมากขึ้น โดยแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีสีใสมากที่สุด เมื่อสัมผัสแผ่นฟิล์มทั้งหมดจะพบว่าแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเจ้าจะมีความแข็งเปราะมากกว่าแผ่นฟิล์มผสมและแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติที่ชอบน้ำมาก (strong hydrophilicity) [Yadollahi, 2014] ทำให้สามารถดูดความชื้นที่มีในอากาศได้ดีกว่าแป้งข้าวเจ้า

ลักษณะทางกายภาพภายนอกของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนแสดงดังภาพ 4.2



ภาพ 4.2 แผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100

จากภาพ 4.2 จะพบว่าแผ่นฟิล์มเนื้อพรุนทั้งหมดจะมีรูพรุนแบบต่อเนื่องตลอดโครงสร้างอันเนื่องมาจากกระบวนการทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง ซึ่งน้ำแข็งจะระเหิดออกมาจากการถูกดูดด้วยแรงดึงจากปั๊มปีจนกระทั่งวัสดุแห้งสนิท โดยแผ่นไฮโดรเจล 100/0 แข็งกรอบแตกหักง่าย สำหรับแผ่นไฮโดรเจลผสมจะพบว่าเมื่อมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น แผ่นไฮโดรเจลจะทนต่อการแตกหักเมื่อพับงอได้ดีขึ้น และมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นตัวประสานที่ดี [Arancibia *et al.*, 2013] จากนั้นจึงทำการศึกษา

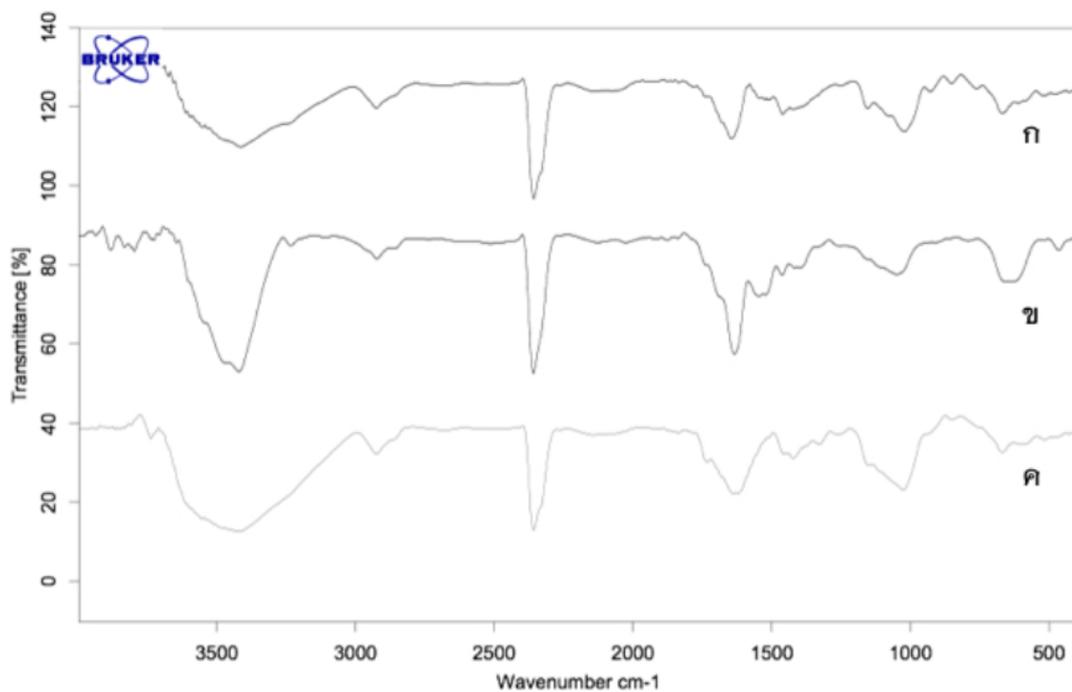
โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค FTIR ดังหัวข้อต่อไป

4.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน

สำหรับการโครงสร้างโมเลกุลจะเลือกแสดงผลจากแผ่นฟิล์มแบบเนื้อแน่น ซึ่งฟิล์มเนื้อพรุนก็จะให้ผลเช่นเดียวกัน

4.2.1 โครงสร้างโมเลกุล (Molecular conformation)

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแผ่นไฮโดรเจลชนิดต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค FTIR ได้สเปกตรัมดังภาพ 4.3



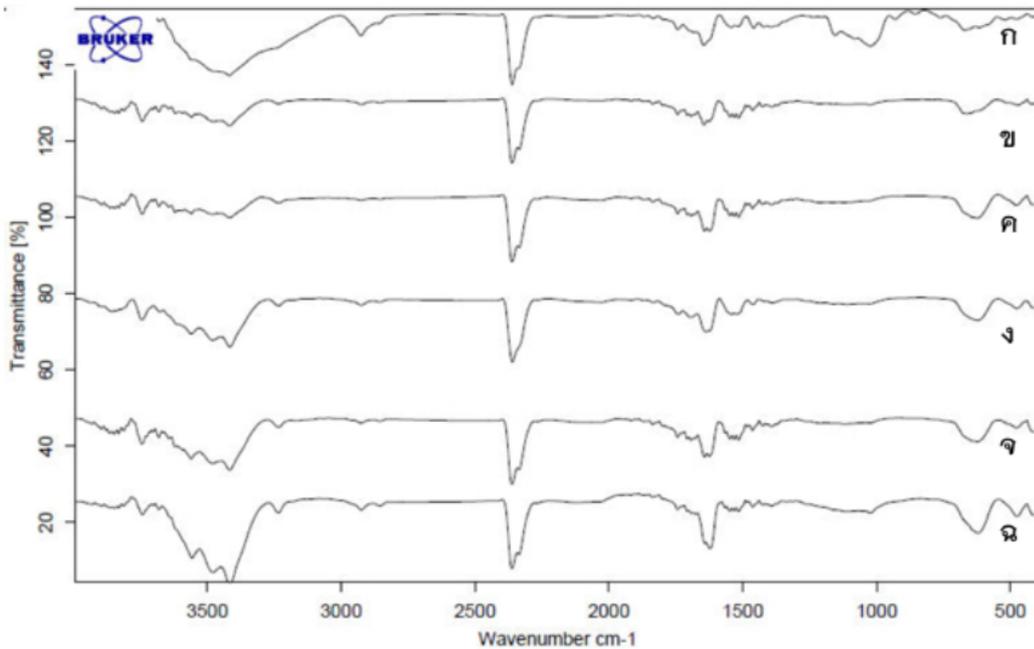
ภาพ 4.3 สเปกตรัม FTIR ของแผ่นไฮโดรเจล (ก) แป้งข้าวเจ้า (ข) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (ค) แป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ 60/40

จากภาพ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมแป้งข้าวเจ้าจะแสดงพีคกว้าง (broad band) ของหมู่ O-H stretching และหมู่ C-H stretching ที่ 3416 และ 2927 cm^{-1} ตามลำดับ สำหรับพีคที่ 1643 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงหมู่ C=O ในขณะที่พีคที่ 1024 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C-O stretching

สำหรับสเปกตรัมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะพบหมู่ O-H stretching ที่ 3421 cm^{-1} ในขณะที่พีคที่เด่นขึ้นมาที่ 1634 cm^{-1} แสดงถึง symmetrical and asymmetric absorption vibration ของหมู่ C=O ของ $-\text{COONa}$ โดยพีค 1050 cm^{-1} แสดงถึง C-O stretching สำหรับพีคที่ 980 และ 851 cm^{-1} แสดงถึง $-\text{CH}$ ring vibration และ C-C stretching vibration ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของฟิล์มข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ 60/40 จะว่าพบหมู่ O-H stretching ของแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซ้อนทับกันที่ 3418 cm^{-1} ในขณะที่พีคของหมู่ $-\text{COO}^-$ ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะเคลื่อนมาที่ 1636 cm^{-1} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มผสมเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและคาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [Zhang *et al.*, 2013] และแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [Tongdeesoontorn *et al.*, 2011]

จากนั้นจึงทำการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังภาพ 4.4



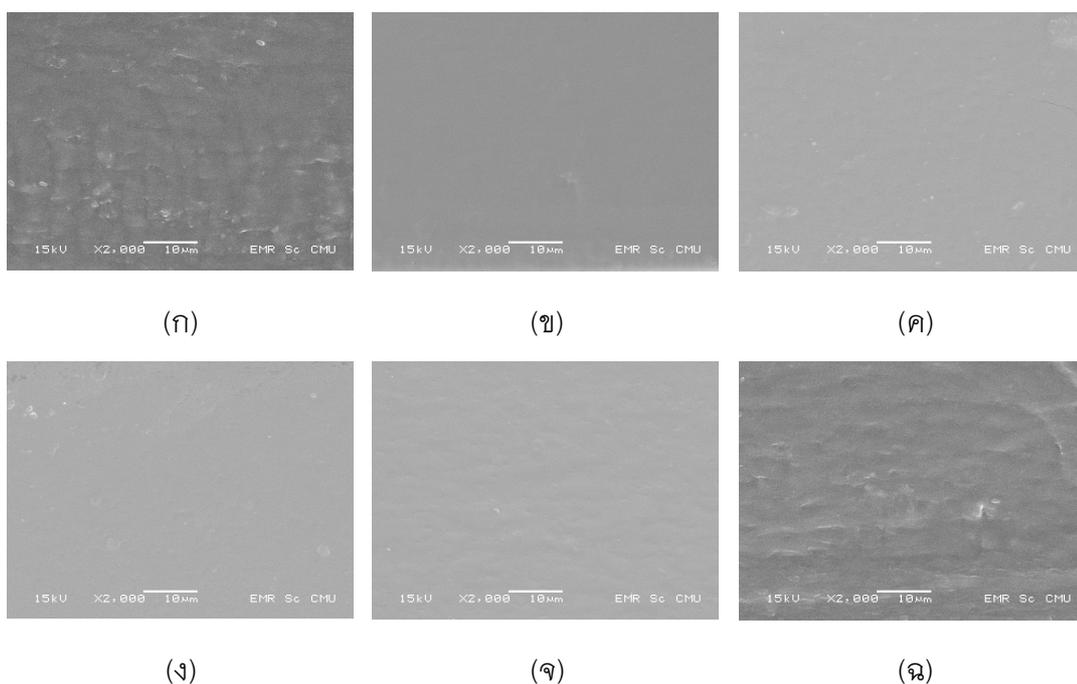
ภาพ 4.4 สเปกตรัม FTIR ของไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100

จากภาพ 4.4 จะพบว่าสเปกตรัมของแบ่งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูงขึ้น จะพบว่าพีคของหมู่ O-H ที่ซ้อนทับกัน และพีคของหมู่ -COO^- ของแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแบ่งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการพองตัวและการละลายน้ำ จากนั้นจึงทำการศึกษาสัญญาณวิทยาเพื่อยืนยันการเข้ากันระหว่างแบ่งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ดังหัวข้อต่อไป

4.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุน

4.3.1 สัณฐานวิทยา (Morphology)

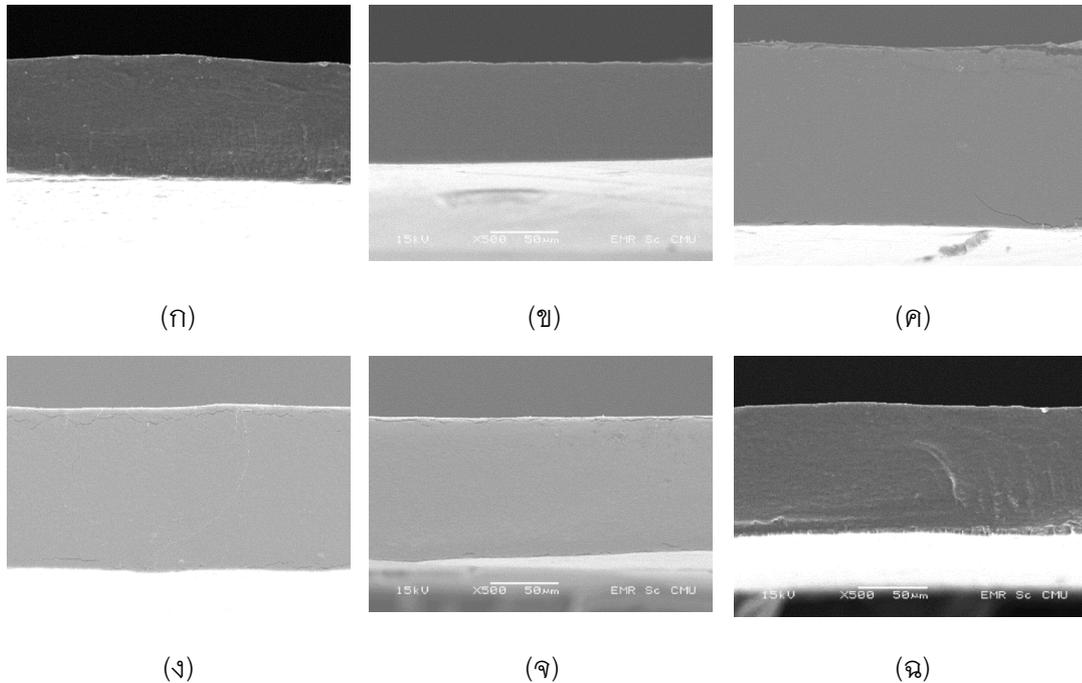
สัณฐานวิทยาพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเนื้อแน่นทั้งหมดแสดงดังภาพ 4.5



ภาพ 4.5 ภาพ SEM พื้นผิวภายนอกของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ (x 2000 เท่า) (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100

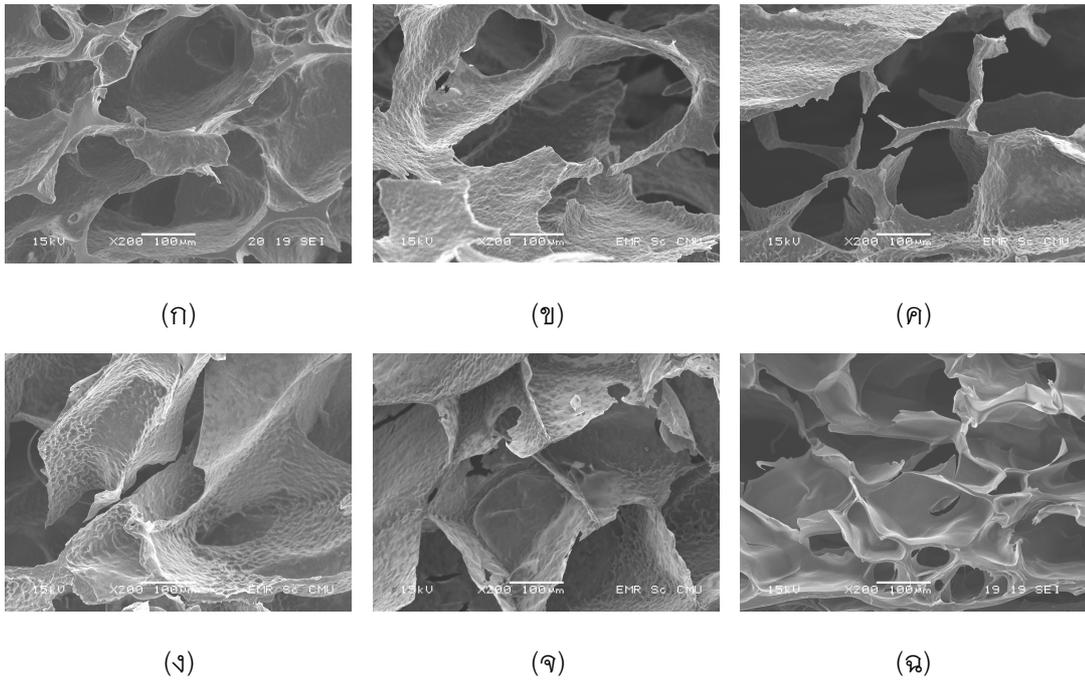
จากการศึกษาภาพ 4.5 แสดงถึงภาพ SEM พื้นผิวของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นของแบ่งข้าวเจ้า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าพื้นผิวของแผ่นฟิล์มแบ่งข้าวเจ้า และแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีความขรุขระมากกว่าพื้นผิวของแผ่นไฮโดรเจลของแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวเจ้าสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นตัวประสานที่ดี [Yadollahi *et al.*, 2014]



ภาพ 4.6 ภาพ SEM พื้นผิวภาคตัดขวางของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ ($\times 500$ เท่า) (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100

เมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะภาพ SEM แผ่นไฮโดรเจลภาคตัดขวางก็จะได้ภาพขยายดังภาพ 4.6 พบว่าเมื่อสังเกตภาพขยายแผ่นไฮโดรเจลของแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีลักษณะเข้ากัน ไม่แยกเฟส แสดงถึงการรวมเป็นเนื้อเดียวกัน [Tongdeesoontorn *et al.*, 2011] เนื่องมาจากแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular interactions) ระหว่างแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับผล FTIR ที่ได้



ภาพ 4.7 ภาพ SEM พื้นผิวภาคตัดขวางของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ (x 200 เท่า) (ก) 100/0 (ข) 90/10 (ค) 80/20 (ง) 70/30 (จ) 60/40 และ (ฉ) 0/100

สำหรับภาพ SEM แผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อพรุนทั้งหมดดังภาพ 4.7 พบว่าลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ และมีรูพรุนตลอดโครงสร้าง ซึ่งแนวโน้มของขนาดรูพรุนจะขนาดเล็กลงจากการประสานที่ดีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [Yadollahi *et al.*, 2014] เมื่อมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น จากนั้นจึงทำการทดสอบหาความพรุนของแผ่นฟิล์มเนื้อพรุนตามหัวข้อต่อไป

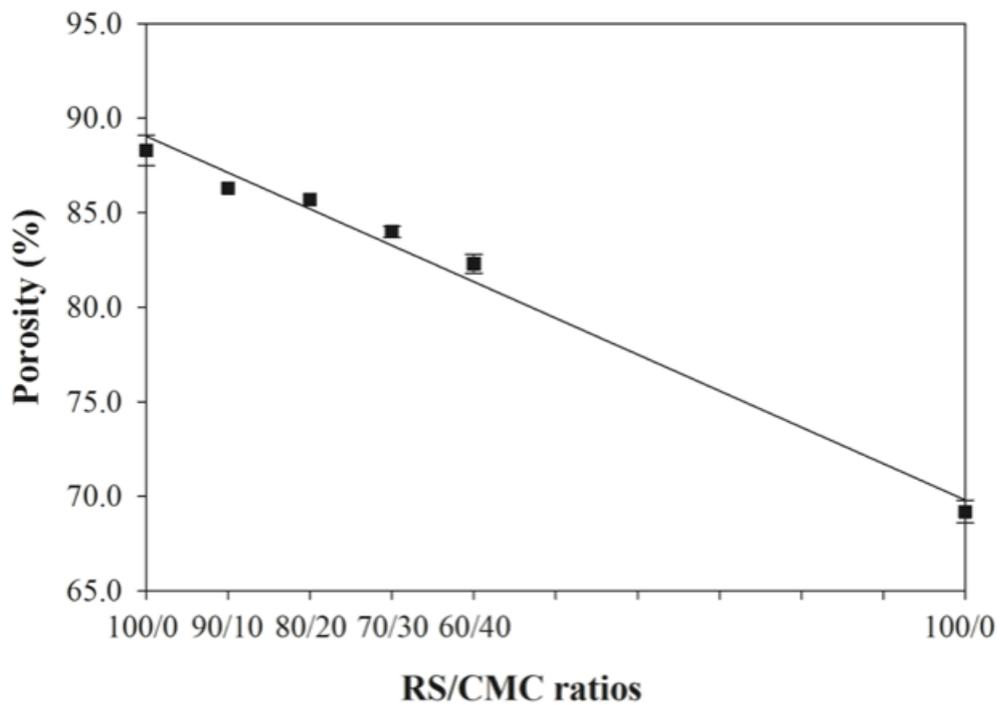
4.3.2 ความพรุน (Porosity)

ค่าความพรุนของแผ่นฟิล์มทั้งหมดสามารถหาได้ด้วยเทคนิคการแทนที่น้ำ

(liquid displacement method) [Bhardwaj and Kundu, 2011]

ตาราง 4.1 ค่าความพรุนของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ

| RS/CMC | ความพรุน (%Porosity) |
|--------|----------------------|
| 100/0 | 88.3±0.8 |
| 90/10 | 86.3±0.0 |
| 80/20 | 85.7±0.0 |
| 70/30 | 84.0±0.3 |
| 60/40 | 82.3±0.5 |
| 0/100 | 69.2±0.6 |



ภาพ 4.8 ค่าความพรุนของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

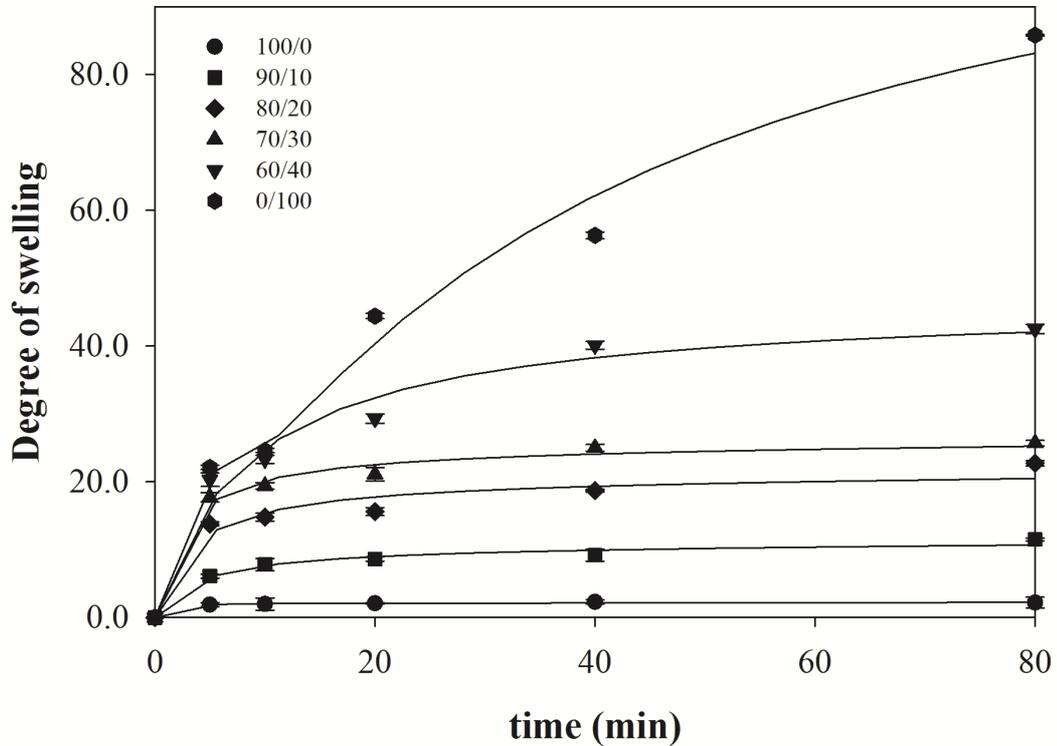
จากภาพ 4.8 ค่าความพรุนของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้ากับหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อนำไปใช้ในการห้ามเลือดแบบชั่วคราวจึงทำการหาปริมาณการพองตัวและการละลายน้ำ ดังหัวข้อต่อไป

4.3.3 การพองตัวและการละลายน้ำ (Degree of swelling and Water solubility)

การพองตัวและการละลายในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่น แสดงดังตาราง 4.2-4.3 และภาพ 4.9-4.12 ตามลำดับ

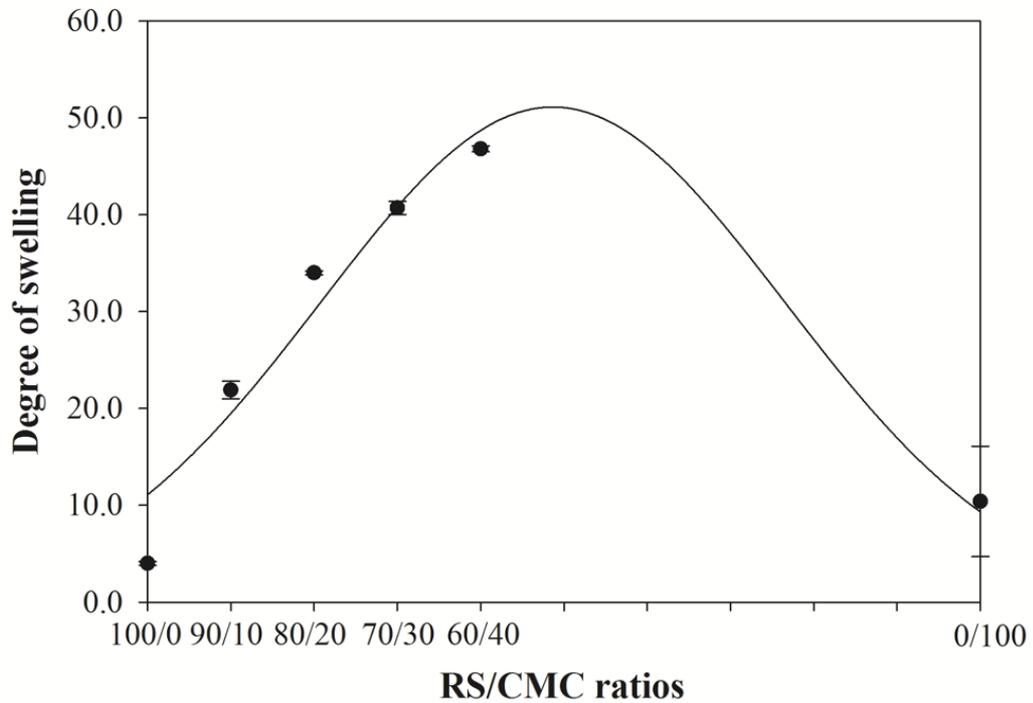
ตาราง 4.2 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ

| เวลา (min) | การพองตัว (Degree of swelling) | | | | | |
|---------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 |
| 5 | 1.9±0.3 | 6.1±0.3 | 13.8±0.3 | 17.7±0.7 | 20.3±1.0 | 22.1±0.3 |
| 10 | 2.0±0.9 | 7.8±0.9 | 14.8±0.6 | 19.4±0.5 | 23.3±0.6 | 24.6±0.3 |
| 20 | 2.1±0.1 | 8.6±0.3 | 15.6±0.6 | 21.1±1.0 | 29.3±0.7 | 44.4±0.4 |
| 40 | 2.3±0.3 | 9.2±0.9 | 18.7±0.2 | 25.0±0.5 | 40.1±0.6 | 56.3±0.5 |
| 80 | 2.2±0.8 | 11.5±0.2 | 22.7±0.4 | 25.7±0.4 | 42.5±0.7 | 85.8±0.1 |
| 1440 | 4.0±0.2 | 21.5±0.9 | 34.0±0.2 | 40.7±0.7 | 46.8±0.3 | 10.4±0.7 |



ภาพ 4.9 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

จากภาพ 4.9 แสดงถึงการพองตัวของแผ่นไฮโดรเจล 100/0, 90/10, 80/20 และ 70/30 ที่ 80 นาที จะพบว่าเวลาเหมาะสมสำหรับการพองตัวคือที่เวลา 10 นาที หลังจากนั้นค่าการพองตัวจะเริ่มคงที่ ในขณะที่แผ่นไฮโดรเจลที่ 60/40 จะเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที สาเหตุน่าจะมาจากปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาไฮโดรเจลที่ 0/100 พบว่ามีค่าการพองตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากสมบัติที่ชอบน้ำของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

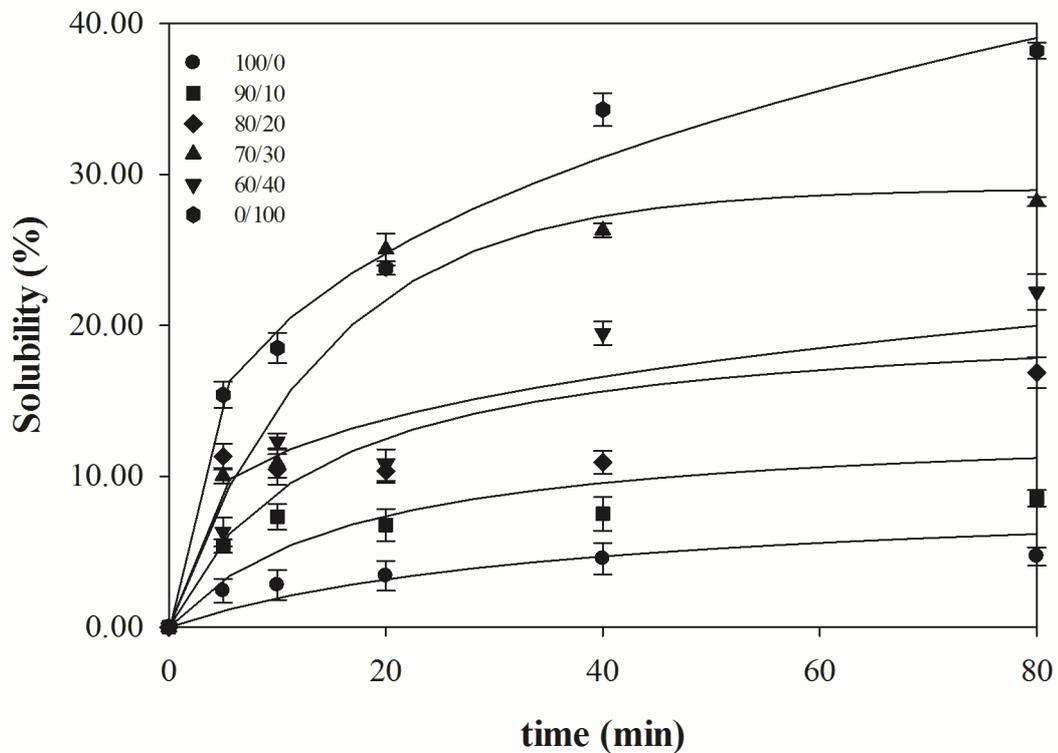


ภาพ 4.10 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h

จากภาพ 4.10 แสดงให้เห็นถึงการพองตัวของไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ 24 h จะพบว่าการพองตัวจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น แต่แผ่นไฮโดรเจล 0/100 จะมีการพองตัวลดลง น่าจะมาจากสาเหตุที่ว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการละลายน้ำออกด้วยไปทำให้น้ำหนักเริ่มต้นลดลง ซึ่งจะเห็นถึงการพองตัวที่สูงสุดของแผ่นไฮโดรเจลผสมคือที่ 60/40 ดังแสดงในภาพ 4.9

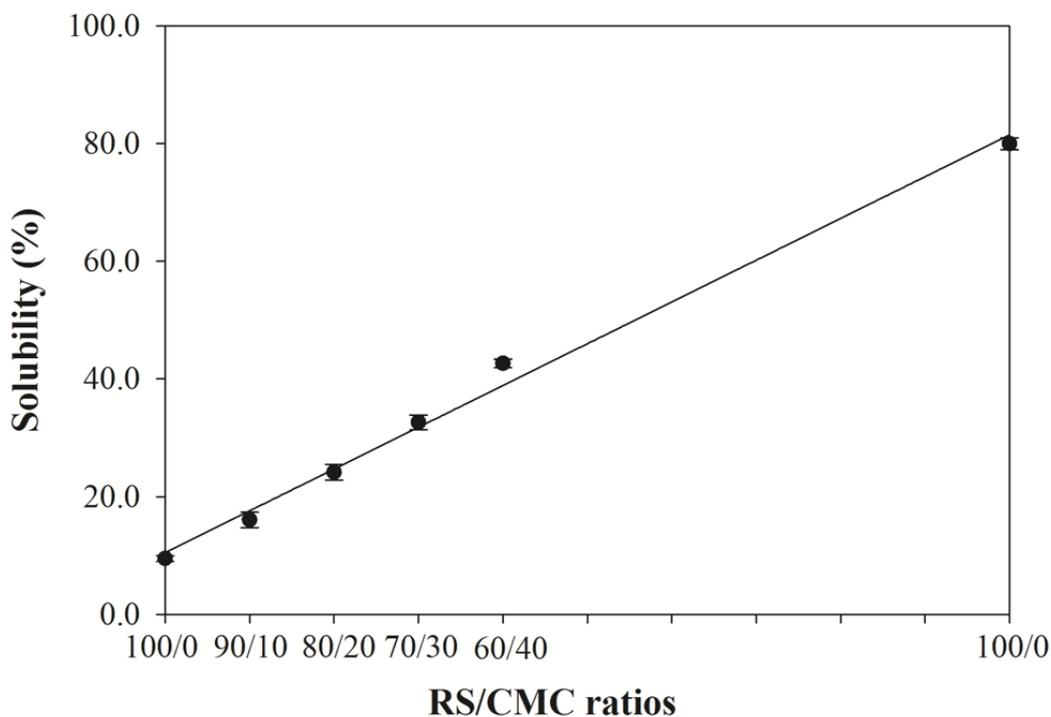
ตาราง 4.3 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ

| เวลา (min) | การละลายน้ำ (%Solubility) | | | | | |
|---------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.00±0.00 | 0.00±0.00 | 0.00±0.00 | 0.00±0.00 | 0.00±0.00 | 0.00±0.00 |
| 5 | 2.41±0.78 | 5.37±0.44 | 11.31±0.86 | 10.04±0.52 | 6.31±0.96 | 15.40±0.87 |
| 10 | 2.80±1.00 | 7.33±0.84 | 10.46±1.00 | 10.89±0.98 | 12.32±0.53 | 18.53±0.99 |
| 20 | 3.40±0.98 | 6.77±1.06 | 10.35±0.79 | 25.03±1.06 | 10.75±1.04 | 23.84±0.45 |
| 40 | 4.54±1.04 | 7.51±1.12 | 10.92±0.75 | 32.30±0.45 | 19.48±0.79 | 34.30±1.04 |
| 80 | 4.70±0.60 | 8.54±0.54 | 16.87±1.03 | 25.21±0.31 | 22.21±1.18 | 38.21±0.54 |
| 1440 | 9.47±0.50 | 16.05±1.02 | 24.12±1.08 | 32.61±1.06 | 42.63±0.72 | 76.21±1.03 |



ภาพ 4.11 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาถึงการละลายน้ำที่ 80 นาที จะพบว่าแผ่นฟิล์มแบ่งขั้วเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นแผ่นฟิล์มผสม 60/40 จะมีค่าการละลายน้ำต่ำกว่าที่อัตรา 70/30 อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิลของแบ่งขั้วเจ้าเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จึงทำให้น้ำแพร่เข้าไปในโครงสร้างได้ต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการเชื่อมโยงไว้ทางกายภาพจากเทคนิค FTIR

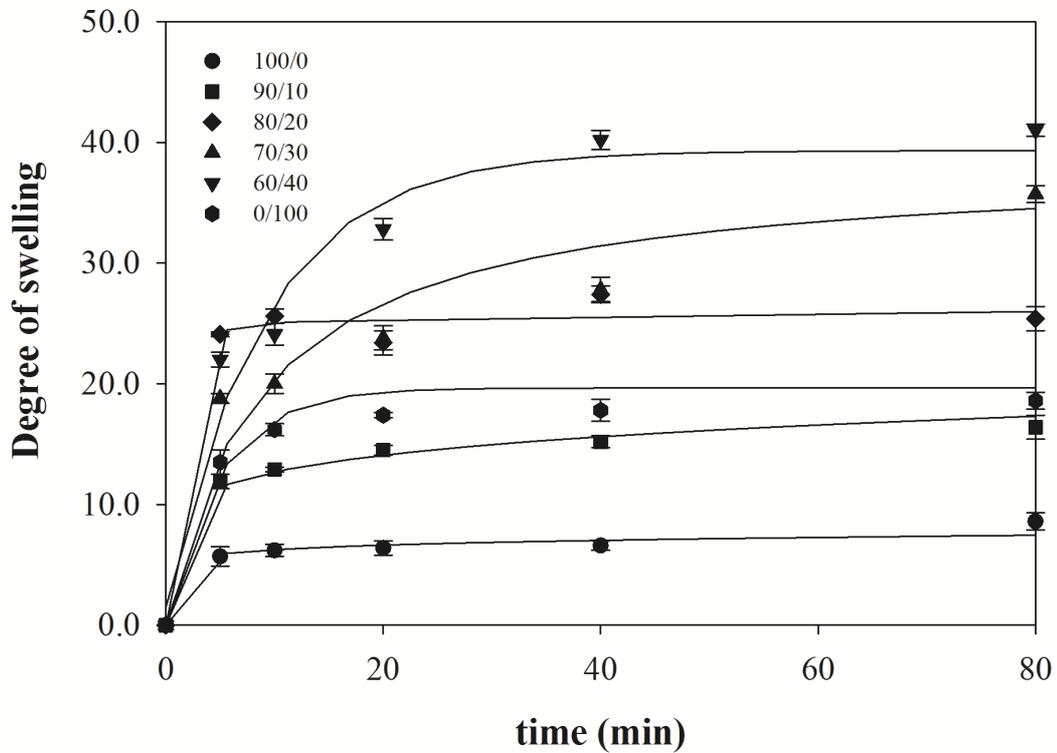


ภาพ 4.12 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h

การละลายน้ำของแผ่นฟิล์มผสมที่เวลา 24 h พบว่าแผ่นไฮโดรเจลมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติที่ชอบน้ำสูง เมื่อแช่ในน้ำนานพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้าและหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลสเกิดการสลายพันธะได้ในขณะที่ผลการละลายที่ได้ของ Tongdeesoontorn ที่ 24 h พบว่าเมื่อมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นค่าการละลายจะมีค่าลดลง น่าจะเป็นเพราะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมไขว้ทางกายภาพได้ดีกว่า

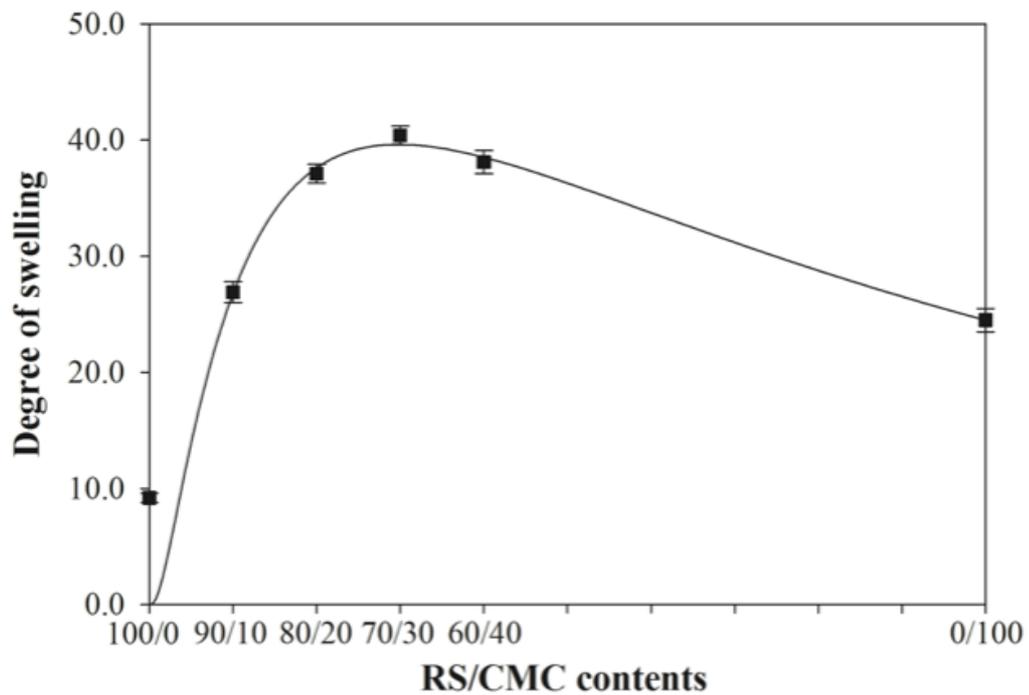
ตาราง 4.4 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ

| เวลา (min) | การพองตัว (Degree of swelling) | | | | | |
|---------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 |
| 5 | 5.7±0.8 | 11.9±0.6 | 24.1±0.2 | 18.8±0.4 | 22.0±0.6 | 13.5±1.0 |
| 10 | 6.2±0.5 | 12.9±0.2 | 25.6±0.6 | 20.0±0.8 | 24.1±0.9 | 16.2±0.5 |
| 20 | 6.4±0.6 | 14.5±0.4 | 23.4±1.0 | 23.8±1.0 | 32.8±0.9 | 17.4±0.2 |
| 40 | 6.6±0.4 | 15.2±0.5 | 27.4±0.7 | 27.8±1.0 | 40.2±0.8 | 17.8±0.9 |
| 80 | 8.6±0.7 | 16.4±1.0 | 25.4±1.0 | 35.7±0.7 | 41.0±0.5 | 18.6±0.7 |
| 1440 | 9.2±0.4 | 26.9±0.9 | 37.1±0.8 | 40.4±0.8 | 38.1±1.0 | 24.5±1.0 |



ภาพ 4.13 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

การพองตัวของไฮโดรเจลเนื้อพูนจะพบว่าเวลาที่เริ่มคั่งก็คือที่ 10 นาที ในขณะที่พองไฮโดรเจลผสม 70/30 และ 60/40 จะมีค่าค้อย ๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มากขึ้น และเมื่อพิจารณาจะพบว่าไฮโดรเจลเนื้อพูนที่ 60/40 จะมีค่าการพองตัวสูงสุด เนื่องจากผลของปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สำหรับการพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าน้อยกว่าแผ่นไฮโดรเจลผสมเนื่องมาจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีความชอบน้ำสูง (strong hydrophilicity) ทำให้ละลายน้ำได้ง่าย ในขณะที่แผ่นไฮโดรเจลผสมจะมีพันธะไฮโดรเจนมาช่วยทำให้น้ำแพร่เข้าไปในโครงสร้างได้ลำบาก

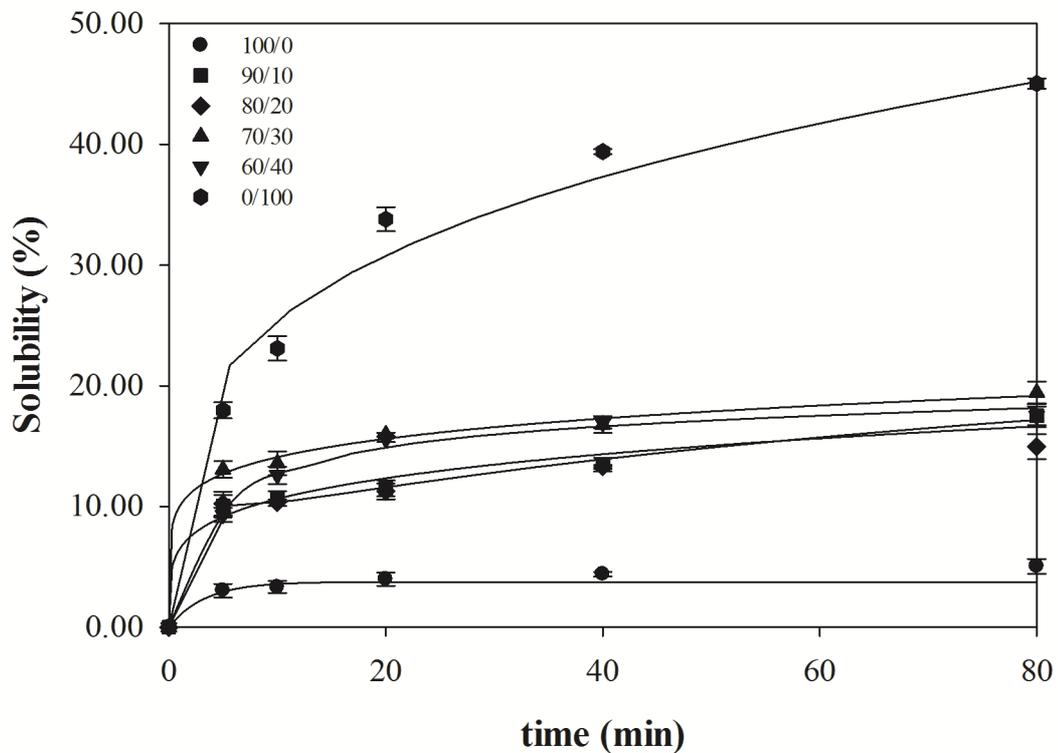


ภาพ 4.14 การพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h

ภาพ 4.14 แสดงถึงการพองตัวของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพูนที่ 24 h จะพบว่าค่าการพองตัวของแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ 70/30 จะมีค่าสูงสุด เนื่องจากสมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ชอบน้ำสูง และการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้าและหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แต่ที่อัตราส่วน 60/40 และ 0/100 จะพบว่าแผ่นฟิล์มผสมจะมีค่าการพองตัวต่ำลงเนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีในแผ่นฟิล์มเกิดการละลายออกไป ดังผลการทดลองดังหัวข้อต่อไป

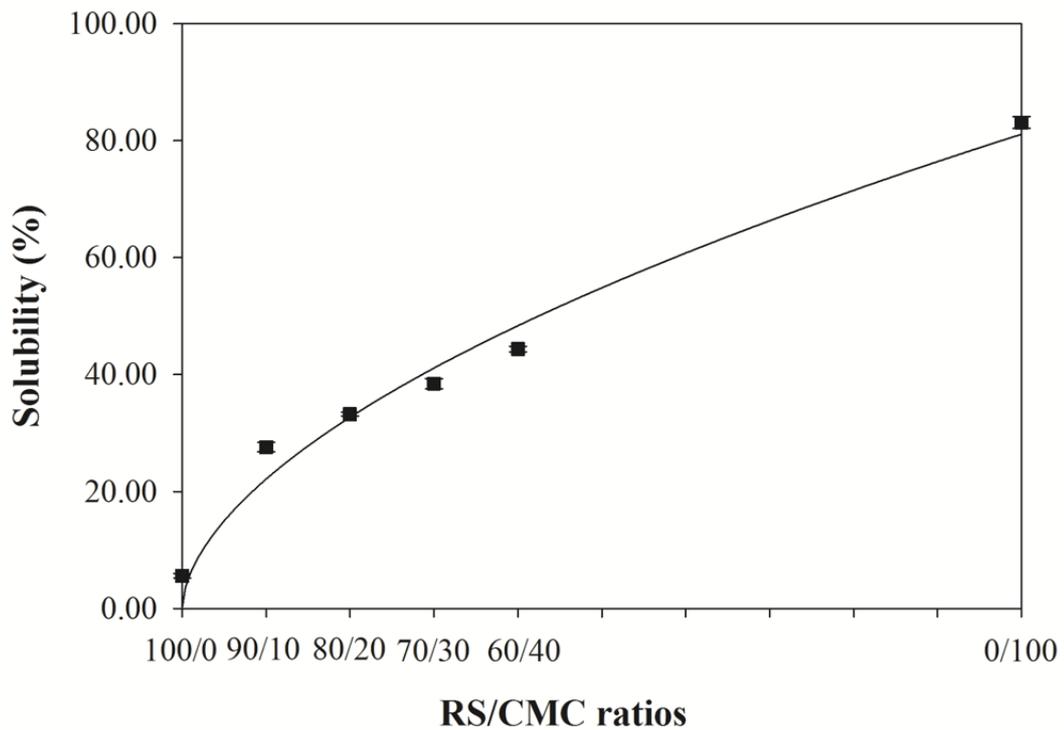
ตาราง 4.5 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุณที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ

| เวลา (min) | การละลายน้ำ (%Solubility) | | | | | |
|---------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 |
| 5 | 3.03±0.57 | 10.03±0.92 | 10.24±1.00 | 13.08±0.68 | 9.31±0.59 | 17.96±0.67 |
| 10 | 3.32±0.50 | 10.67±0.61 | 10.33±0.27 | 13.58±0.97 | 12.59±0.72 | 23.10±1.00 |
| 20 | 3.98±0.54 | 11.49±0.66 | 11.25±0.66 | 15.96±0.15 | 15.56±0.22 | 33.80±1.00 |
| 40 | 4.39±0.19 | 13.46±0.57 | 13.29±0.16 | 16.80±0.70 | 16.89±0.42 | 39.40±0.20 |
| 80 | 5.05±0.61 | 17.51±0.78 | 14.96±1.02 | 19.44±0.89 | 17.51±0.95 | 45.04±0.43 |
| 1440 | 5.60±0.40 | 27.68±0.80 | 33.21±0.32 | 38.43±0.87 | 44.35±0.47 | 83.10±0.99 |



ภาพ 4.15 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

จากภาพ 4.15 จะพบว่าแผ่นฟิล์มเนื้อพูนแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยจะพบว่าแผ่นไฮโดรเจลผสมที่ 80/20 มีปริมาณการละลายน้ำต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นไฮโดรเจลผสมทั้งหมด ซึ่งการละลายน้ำลดลงอันเป็นผลมาจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลของแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสตามลำดับ สำหรับแผ่นฟิล์มเนื้อพูนแบ่งข้าวเจ้ามีค่าการละลายน้ำต่ำที่สุด ในขณะที่แผ่นฟิล์มเนื้อพูนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าการละลายน้ำสูงสุด เนื่องจากสมบัติของแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



ภาพ 4.16 การละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h

การละลายน้ำที่ 24 h พบว่าค่าการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการละลายน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนมีค่าสูงกว่าแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่น เนื่องจากรูพรุนสามารถทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในเนื้อได้มากกว่า

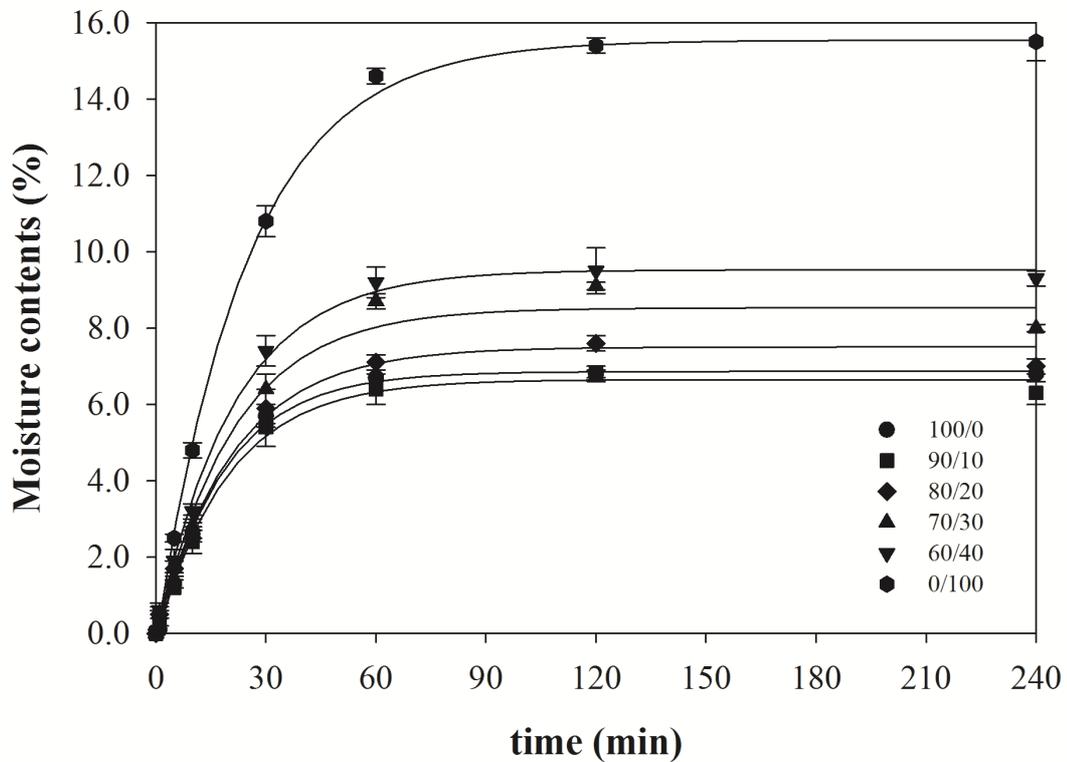
4.3.4 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นและเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

แสดงดังตาราง 4.6–4.7 และภาพ 4.16–4.17

ตาราง 4.6 ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ

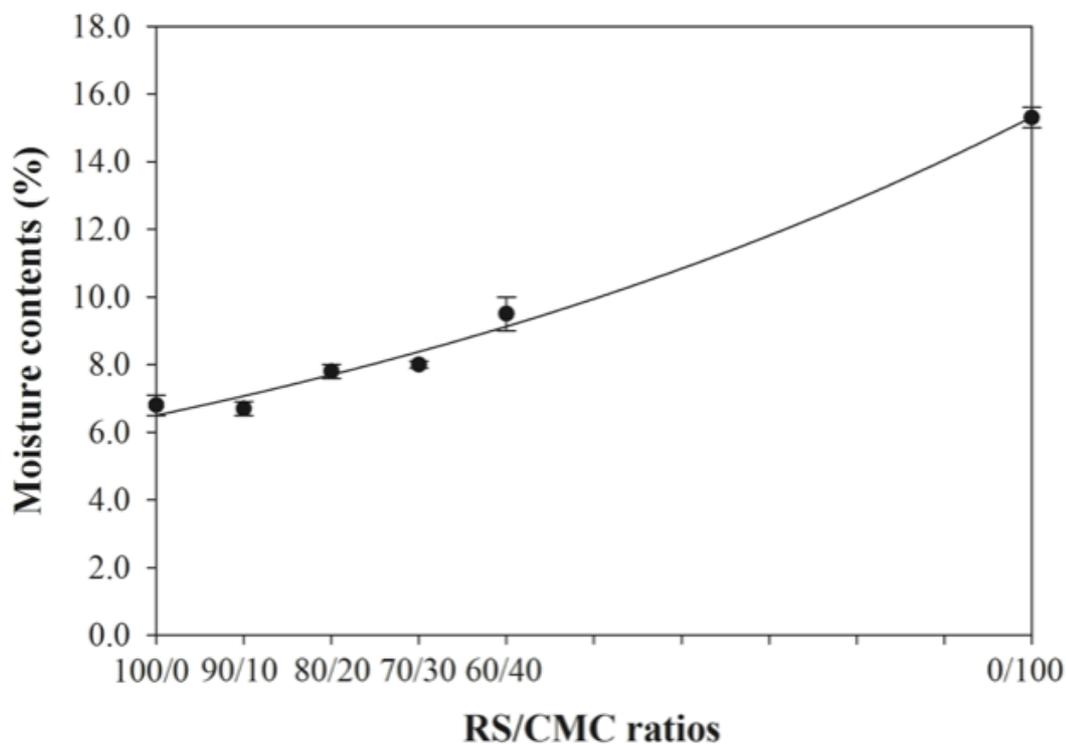
| เวลา (min) | ปริมาณความชื้น (Moisture content) | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 |
| 1 | 0.1±0.0 | 0.3±0.1 | 0.5±0.1 | 0.5±0.0 | 0.6±0.1 | 0.5±0.3 |
| 5 | 1.3±0.1 | 1.2±0.0 | 1.7±0.2 | 1.7±0.2 | 1.9±0.3 | 2.5±0.1 |
| 10 | 2.6±0.2 | 2.4±0.3 | 2.5±0.4 | 2.8±0.3 | 3.2±0.2 | 4.8±0.2 |
| 30 | 5.7±0.2 | 5.4±0.5 | 5.9±0.5 | 6.4±0.4 | 7.4±0.4 | 10.8±0.4 |
| 60 | 6.7±0.0 | 6.4±0.4 | 7.1±0.2 | 8.7±0.2 | 9.2±0.4 | 14.6±0.2 |
| 120 | 6.8±0.1 | 6.8±0.2 | 7.6±0.2 | 9.1±0.1 | 9.5±0.6 | 15.4±0.2 |
| 240 | 6.8±0.2 | 6.3±0.3 | 7.0±0.2 | 8.0±0.1 | 9.3±0.2 | 15.5±0.5 |
| 1440 | 6.8±0.3 | 6.7±0.2 | 7.8±0.2 | 8.0±0.1 | 9.5±0.5 | 15.3±0.3 |



ภาพ 4.17 การดูดซับความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

การดูดซับความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % แสดงดังภาพ 4.17 โดยจะพบว่าในช่วงแรกจะมีการดูดซับความชื้นอย่างรวดเร็วและความชื้นเริ่มคงที่ที่เวลา 60 นาที โดยแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่น 0/100 จะมีการดูดซับความชื้นได้ดีที่สุด ในขณะที่ไฮโดรเจลเนื้อแน่น 90/10 มีการดูดซับความชื้นต่ำสุด ซึ่งการดูดซับความชื้นที่ต่ำลงเพราะพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งจะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและลดการแทรกของโมเลกุลของน้ำเข้ามาจับในวัสดุผสม โดย Ghanbarzadeh [2010] ทำการศึกษาการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55 % ซึ่งพบว่าค่า

การดูดซับความชื้นของแผ่นฟิล์มผสมระหว่างแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าน้อยกว่าฟิล์มแป้ง โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะช่วยให้ปรับปรุงให้แผ่นฟิล์มต้านทานน้ำเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทำให้โครงสร้างของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทำให้สามารถลดการแพร่เข้ามาของโมเลกุลของน้ำ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Almasi [2010] ที่ศึกษาการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55 % บนฟิล์มแป้งผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและดินขนาดนาโน โดยปริมาณดินมีมากขึ้นปริมาณการดูดซับก็มีค่าลดลงอันเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของดินกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

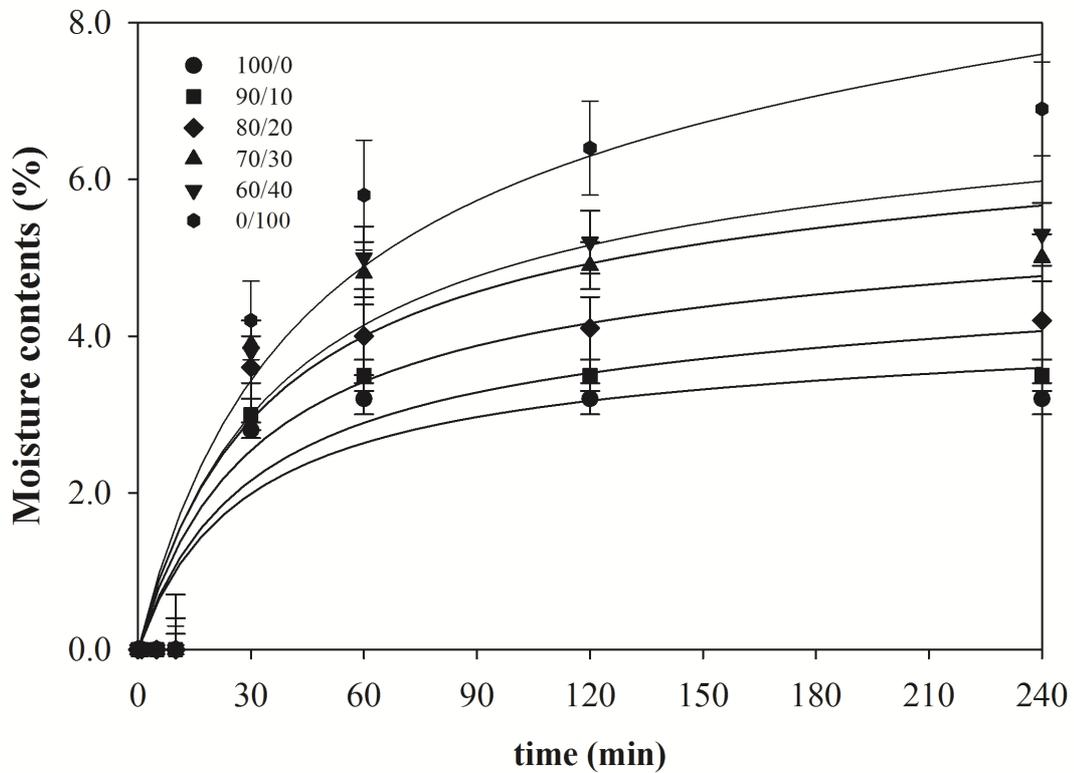


ภาพ 4.18 ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h

ภาพ 4.18 แสดงให้เห็นถึงปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับที่ 24 h โดยพบว่าแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่น 0/100 มีค่าปริมาณความชื้นสูงสุด และแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่น 90/10 มีค่าปริมาณความชื้นต่ำสุด เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่จับกับไอน้ำลดลง

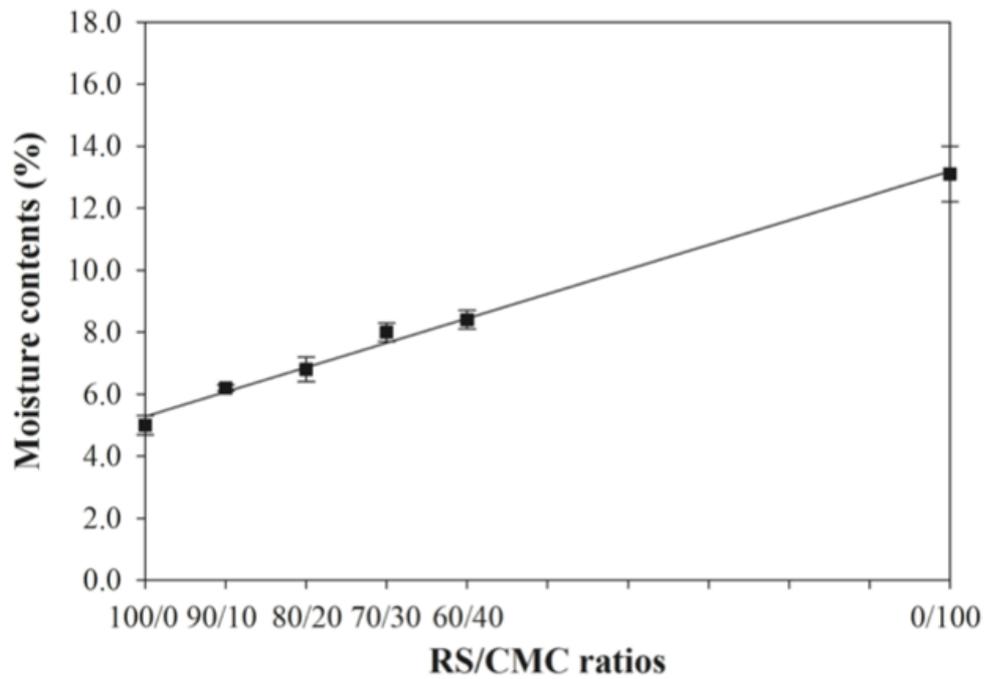
ตาราง 4.7 ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ

| เวลา (min) | ปริมาณความชื้น (Moisture content) | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 |
| 1 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 |
| 5 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 |
| 10 | 0.0±0.0 | 0.0±0.2 | 0.0±0.7 | 0.0±0.2 | 0.0±0.4 | 0.0±0.3 |
| 30 | 2.8±0.1 | 3.0±0.2 | 3.6±0.4 | 3.9±0.3 | 3.8±0.4 | 4.2±0.5 |
| 60 | 3.2±0.2 | 3.5±0.2 | 4.0±0.5 | 4.8±0.4 | 5.0±0.4 | 5.8±0.7 |
| 120 | 3.2±0.2 | 3.5±0.2 | 4.1±0.4 | 4.9±0.3 | 5.2±0.4 | 6.4±0.6 |
| 240 | 3.2±0.2 | 3.5±0.2 | 4.2±0.5 | 5.0±0.3 | 5.3±0.4 | 6.9±0.6 |
| 1440 | 5.0±0.3 | 6.2±0.1 | 6.8±0.4 | 8.0±0.3 | 8.4±0.3 | 13.1±0.9 |



ภาพ 4.19 การดูดซับความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพรุณที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

การดูดซับความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุณดังภาพ 4.19 พบว่าจะมีการดูดซับความชื้นเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที และการดูดซับจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาโดยแผ่นไฮโดรเจล 0/100 มีการดูดซับความชื้นสูงสุด และแผ่นไฮโดรเจล 100/0 มีการดูดซับความชื้นต่ำสุด โดยธรรมชาติของตัวดูดซับถ้ามีพรุณเพิ่มขึ้นและขนาดตัวดูดซับเล็กลงก็จะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่แผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุณที่ได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่น ดังนั้นพรุณที่มีอยู่ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แต่กลับทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศโดยตรงลดลง



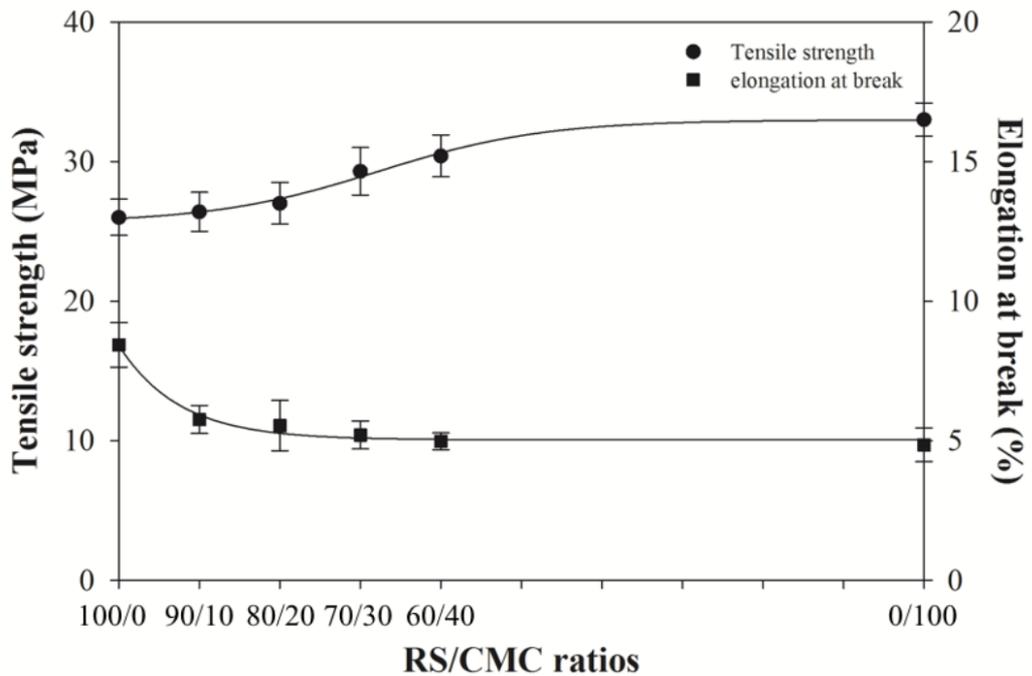
ภาพ 4.20 ปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลา 24 h

การดูค่าปริมาณความชื้นของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพูนที่ 24 h ดังภาพ 4.20 จะพบว่าความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพูน 0/100 และ 100/0 มีปริมาณความชื้นสูงสุดและต่ำสุด ตามลำดับ

4.3.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

แผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นได้นำมาทดสอบหาความเครียด (tensile strength)

และความเค้น (elongation at break) โดยผลการทดลองที่ได้ดังภาพ 4.21



ภาพ 4.21 ค่าความเครียดและความเค้นของแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูงขึ้น ค่าความเครียดและความเค้นของแผ่นไฮโดรเจลผสมจะมีค่ามากขึ้นและลดลงตามลำดับ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยที่ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular interaction) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้ากับหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยที่

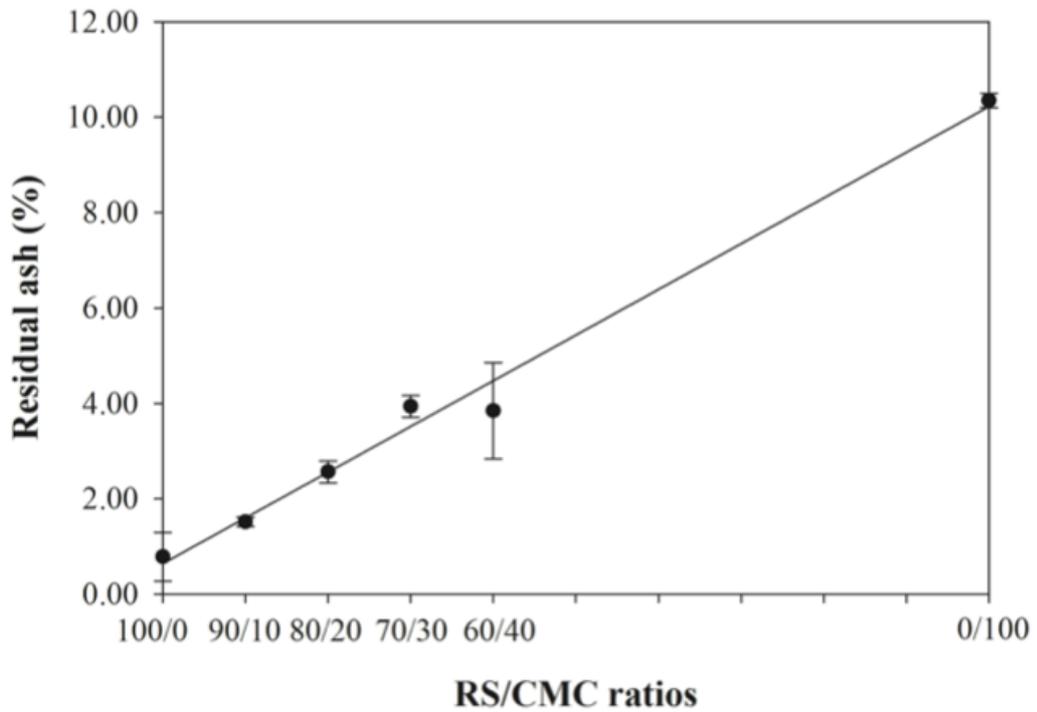
พันธะไฮโดรเจนเดิมที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง สามารถถูกแทนที่ด้วยพันธะไฮโดรเจนใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ยืนยันได้จากผล FTIR ที่กล่าวมา และสอดคล้องกับงานของ Tongdeesoontorn [2011] ที่ศึกษาแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยพบว่าค่าความเค้นและความเครียดของแผ่นฟิล์มขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีอยู่ โดยมีค่าความเครียดสูงชันและความเค้นลดลงเมื่อมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น

4.3.6 เศษเถ้า (Residual ash)

วัสดุที่ใช้ในการห้ามเลือดในร่างกายมนุษย์ตามมาตรฐานของ US pharmacopoeia ควรมีเศษเถ้าไม่เกิน 2 % เมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้ง

ตาราง 4.8 เศษเถ้าของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| RS/CMC | เปอร์เซ็นต์เศษเถ้า (%Residual ash) |
|--------|------------------------------------|
| 100/0 | 0.79±0.51 |
| 90/10 | 1.52±0.10 |
| 80/20 | 2.57±0.23 |
| 70/30 | 3.94±0.20 |
| 60/40 | 3.85±1.01 |
| 0/100 | 10.35±0.15 |

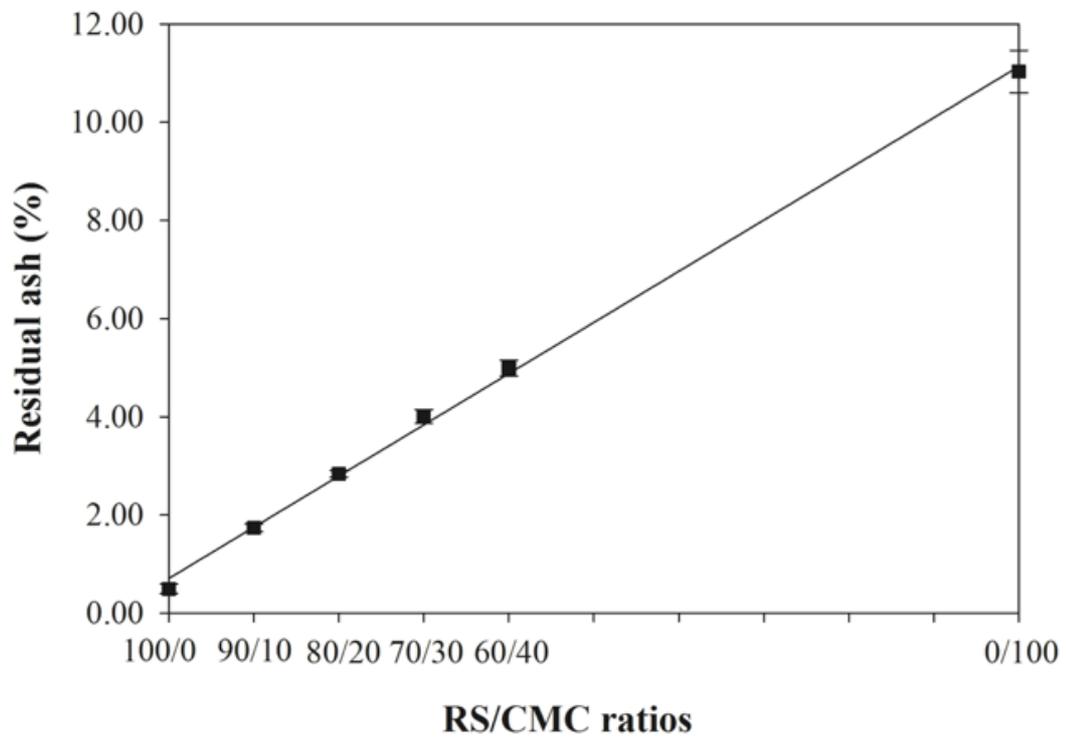


ภาพ 4.22 เศษเถ้าของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบ เนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 850 °C และที่เวลา 3 h

จากการทดลองพบว่าปริมาณเศษเถ้าจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีโซเดียมอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งโซเดียมจะมีค่าอุณหภูมิจากกลายเป็นไอ (vaporization temperature) เท่ากับ 883 °C โดย แผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่มีเศษเถ้าไม่เกินมาตรฐาน US pharmacopoeia ได้แก่ ที่อัตราส่วน 100/0 และ 90/10 โดยมีเศษเถ้า 0.79 ± 0.51 และ 1.52 ± 0.10 % w/w ตามลำดับ

ตาราง 4.9 เศษเถ้าของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุณที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| RS/CMC | เปอร์เซ็นต์เศษเถ้า (%Residual ash) |
|--------|------------------------------------|
| 100/0 | 0.50±0.10 |
| 90/10 | 1.74±0.08 |
| 80/20 | 2.84±0.07 |
| 70/30 | 4.01±0.14 |
| 60/40 | 4.99±0.16 |
| 0/100 | 11.03±0.43 |



ภาพ 4.23 เศษเถ้าของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบ เนื้อพูนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 850 °C และที่เวลา 3 h

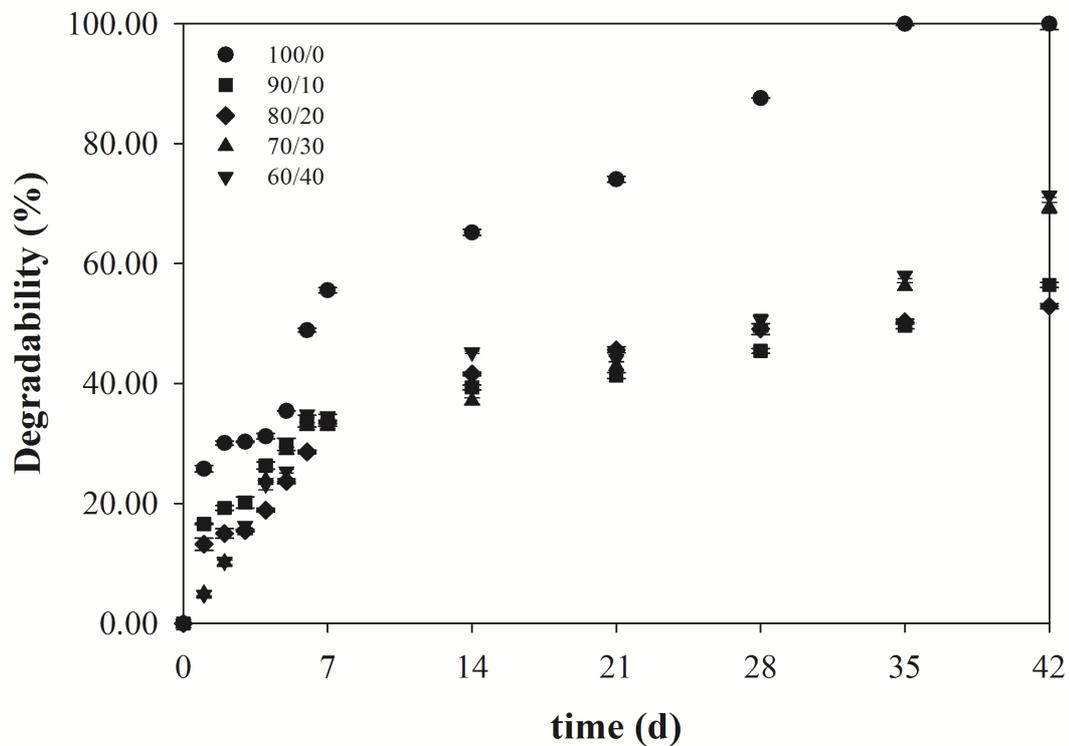
สำหรับเศษเถ้าของไฮโดรเจลเนื้อพูนก็จะมีค่ามากขึ้น เมื่อมีปริมาณ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่น โดยที่อัตราส่วน 100/0 และ 90/10 เศษเถ้าที่ได้มีค่าไม่เกินมาตรฐาน ดังแสดงดังตาราง 4.9 และภาพ 4.23

3.3.7 การย่อยสลาย (Degradation)

การย่อยสลายแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นและเนื้อพรุน ด้วยสารละลายเอ็นไซม์ แอลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M pH 7.4 อุณหภูมิ 37 °C ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 4.10–4.11 และภาพ 4.24–4.25

ตาราง 4.10 การย่อยสลายแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

| เวลา (d) | การย่อยสลาย (%Degradation) | | | | | |
|-------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | NA |
| 1 | 25.8±0.6 | 16.6±0.1 | 13.2±1.0 | 5.0±0.4 | 4.8±0.6 | NA |
| 2 | 30.1±0.3 | 19.2±0.4 | 15.0±0.8 | 10.2±0.4 | 10.3±0.5 | NA |
| 3 | 30.3±0.1 | 20.2±1.0 | 15.5±0.2 | 15.5±0.4 | 16.3±0.6 | NA |
| 4 | 31.2±0.4 | 26.4±0.6 | 18.9±0.3 | 23.9±0.3 | 23.2±0.9 | NA |
| 5 | 35.4±0.0 | 29.8±1.0 | 23.7±0.4 | 28.9±0.5 | 25.4±0.3 | NA |
| 6 | 48.9±0.3 | 33.8±1.0 | 28.6±0.3 | 32.9±0.6 | 34.9±0.6 | NA |
| 7 | 55.6±0.4 | 33.9±1.0 | 33.6±0.3 | 32.9±0.3 | 34.6±0.4 | NA |
| 14 | 65.2±0.5 | 39.4±0.4 | 41.6±0.3 | 37.1±0.5 | 45.2±0.2 | NA |
| 21 | 74.1±0.5 | 41.4±0.5 | 45.6±0.5 | 42.9±0.7 | 44.1±0.4 | NA |
| 28 | 87.6±0.0 | 45.4±0.4 | 49.1±0.9 | 49.3±0.6 | 50.6±0.9 | NA |
| 35 | 100.0±0.3 | 49.6±0.5 | 50.3±0.4 | 56.2±0.6 | 58.0±0.5 | NA |
| 42 | 100.0±1.0 | 56.4±0.4 | 52.9±0.4 | 69.3±0.9 | 71.4±0.4 | NA |



ภาพ 4.24 อัตราการย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นในสารละลายแอลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

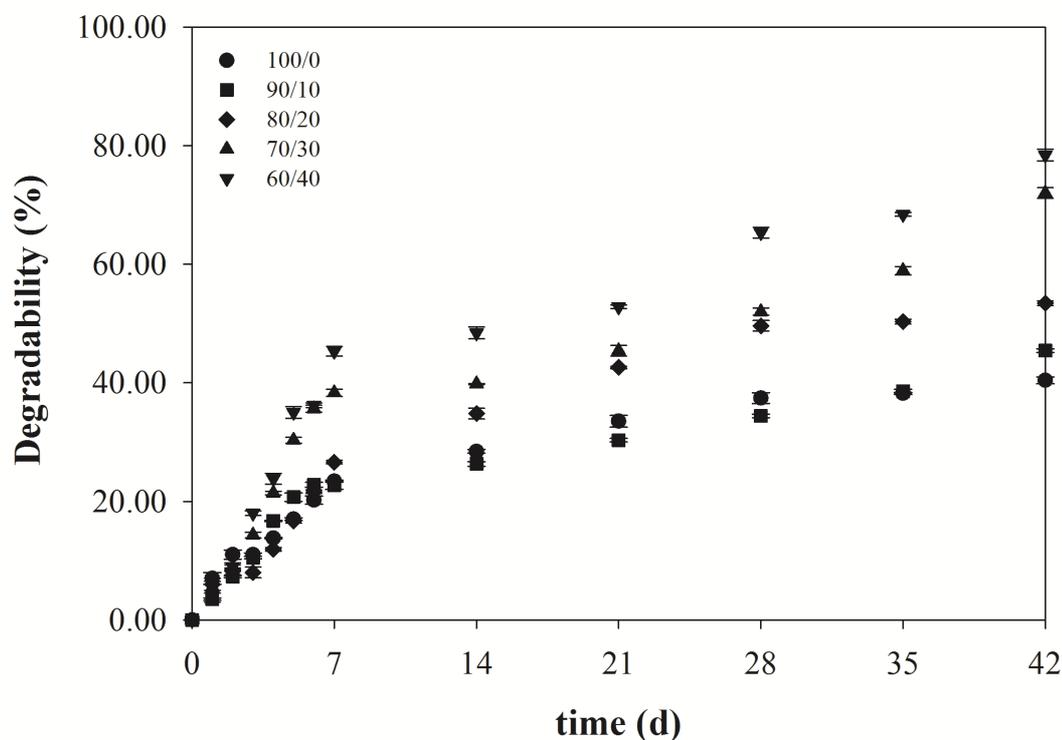
จากการทดลองพบว่าไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นที่มีแต่แบ่งข้าวเจ้าจะมีการย่อยสลายได้เร็วกว่าไฮโดรเจลผสม เนื่องจากเอ็มไซม์แอลฟาอะมิเลสมีสมบัติในการย่อยสลายอะมิโลสที่พบในแป้งได้ดี ในขณะที่ไฮโดรเจลผสมจะมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเชื่อมไขว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้ใช้เวลานานขึ้นในการย่อยสลาย โดยพบว่าที่เวลา 1 วัน แผ่นไฮโดรเจลผสมจะมีการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อผ่านไป 2 วันการย่อยสลายมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากไม่ได้เปลี่ยนสารละลายแอลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และเมื่อครบ 42 วัน แผ่นไฮโดรเจลที่ได้จากแบ่งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการย่อยสลายได้เกิน 50 %

ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนสารละลายบัฟเฟอร์ทุกวันการย่อยสลายน่าจะสามารถย่อยสลายได้ 100 % ภายในเวลาไม่เกิน 2 สัปดาห์

ตาราง 4.11 การย่อยสลายแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุณที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

| เวลา (d) | การย่อยสลาย (%Degradation) | | | | | |
|-------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| 0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | 0.0±0.0 | NA |
| 1 | 7.0±1.0 | 3.5±0.2 | 6.0±1.0 | 5.5±1.0 | 4.0±1.0 | NA |
| 2 | 11.0±0.8 | 7.3±0.2 | 8.2±0.6 | 8.9±0.4 | 9.6±0.6 | NA |
| 3 | 11.0±0.3 | 10.5±0.2 | 8.0±0.9 | 14.3±0.5 | 18.0±0.4 | NA |
| 4 | 13.8±0.1 | 16.7±0.1 | 11.9±0.3 | 21.4±0.3 | 23.8±0.9 | NA |
| 5 | 17.0±0.2 | 20.7±0.7 | 16.7±0.4 | 30.3±0.5 | 35.0±1.0 | NA |
| 6 | 20.2±0.7 | 22.8±0.4 | 21.6±0.3 | 35.6±0.6 | 36.2±0.4 | NA |
| 7 | 23.4±0.2 | 22.7±0.7 | 26.6±0.3 | 38.3±0.6 | 45.3±0.8 | NA |
| 14 | 28.4±0.3 | 26.3±0.4 | 34.8±0.9 | 39.8±0.1 | 48.4±1.0 | NA |
| 21 | 33.5±1.0 | 30.3±0.3 | 42.6±0.2 | 45.4±0.9 | 58.4±0.3 | NA |
| 28 | 37.4±0.9 | 34.4±0.3 | 49.6±0.9 | 52.0±0.6 | 65.3±0.3 | NA |
| 35 | 38.9±0.2 | 38.6±0.3 | 50.3±0.4 | 58.9±0.7 | 68.4±0.3 | NA |
| 42 | 40.4±0.6 | 45.4±0.3 | 53.4±0.4 | 72.0±0.9 | 78.2±1.0 | NA |

NA : ไม่มี



ภาพ 4.25 อัตราการย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อพูนในสารละลายแอลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ

จากภาพ 4.25 จะพบว่าอัตราการย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพูนที่การย่อยสลายอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก จากนั้นอัตราการย่อยสลายจึงลดลง โดยที่ 42 วันจะพบว่าแผ่นไฮโดรเจลผสม 80/20, 70/30 และ 60/40 ที่มีการย่อยสลายเกิน 50 %

ตาราง 4.12 สมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| สมบัติทาง กายภาพ | RS/CMC | | | | | |
|---------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 100/0 | 90/0 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| ความพรุน (%) | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| การพองตัว | 4.0±0.2 | 21.5±0.9 | 34.0±0.2 | 40.7±0.7 | 46.8±0.3 | 10.4±0.7 |
| การละลายน้ำ (%) | 9.47±0.50 | 16.05±1.02 | 24.12±1.08 | 32.61±1.06 | 42.63±0.72 | 76.21±1.03 |
| ปริมาณความชื้น (%) | 6.8±0.3 | 6.7±0.2 | 7.8±0.2 | 8.0±0.1 | 9.5±0.5 | 15.3±0.3 |
| ความเครียด (MPa) | 26.0±1.3 | 26.4±1.4 | 27.0±1.5 | 29.3±1.7 | 30.4±1.5 | 33.0±1.2 |
| ความเค้น (%) | 4.85±0.82 | 4.98±0.50 | 5.23±0.92 | 5.54±0.50 | 5.76±0.31 | 6.21±0.64 |
| เศษเถ้า (%) | 0.79±0.51 | 1.52±0.10 | 2.57±0.23 | 3.94±0.20 | 3.85±1.01 | 10.35±0.15 |
| การย่อยสลาย (%) | 100.0±1.0 | 56.4±0.4 | 52.9±0.4 | 69.3±0.9 | 71.4±0.4 | NA |

ตาราง 4.13 สมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลเนื้อพรุนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| สมบัติทาง กายภาพ | RS/CMC | | | | | |
|---------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 100/0 | 90/0 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 |
| ความพรุน (%) | 88.3±0.8 | 86.3±0.0 | 85.7±0.0 | 84.0±0.3 | 82.3±0.5 | 69.2±0.6 |
| การพองตัว | 9.2±0.4 | 26.9±0.9 | 37.1±0.8 | 40.4±0.8 | 38.1±1.0 | 24.5±1.0 |
| การละลายน้ำ (%) | 5.60±0.40 | 27.68±0.80 | 32.21±0.32 | 38.43±0.87 | 44.35±0.47 | 83.10±0.99 |
| ปริมาณความชื้น (%) | 5.0±0.3 | 6.2±0.1 | 6.8±0.4 | 8.0±0.3 | 8.4±0.3 | 13.1±0.9 |
| ความเครียด (MPa) | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| ความเค้น (%) | 0.50±0.10 | 1.74±0.08 | 2.84±0.07 | 4.01±0.14 | 4.99±0.16 | 11.03±0.43 |
| เศษเถ้า (%) | 40.4±0.6 | 45.4±0.3 | 53.4±0.4 | 72.0±0.9 | 28.4±0.3 | NA |

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

แผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีลิโซ สามารถพองได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยพบว่าโครงสร้างโมเลกุลของแผ่นฟิล์มผสมจะพบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของแป้งข้าวเจ้าเกิดการเชื่อมโซ่ทางกายภาพด้วยพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิลิก (COO^-) และไฮดรอกซิล (-OH) ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งทำให้แผ่นฟิล์มผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะพบว่า การเชื่อมโซ่ทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นได้กับแผ่นฟิล์มผสมทุกอัตราส่วน ซึ่งสังเกตได้จากค่าการพองตัว การละลายน้ำ และปริมาณความชื้น ผลการวิจัยพบว่าเศษแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การย่อยสลายของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบบเนื้อแน่นมีค่าต่ำกว่าฟิล์มข้าวเจ้า

แผ่นไฮโดรเจลแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทั้งแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุนมีความแตกต่างกันทางรูปทรงทำให้การพองตัว การละลายน้ำ และการดูดซับความชื้นนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งแผ่นไฮโดรเจลแบบเนื้อแน่นมีค่าสูงกว่าแบบเนื้อพรุน ค่าการพองตัวในน้ำที่ดีที่สุดของแผ่นไฮโดรเจลผสมแบบเนื้อแน่นและเนื้อพรุนคือที่ 60/40 และ 70/30 ตามลำดับ ในขณะที่แผ่นไฮโดรเจลเนื้อแน่นและเนื้อพรุนที่เหมาะสมซึ่งจะนำไปใช้ห้ามเลือดในร่างกายคือที่ 90/10 และมีค่าเศษแก้วไม่เกิน 2% w/w

5.2 ข้อเสนอแนะ

ถ้าต้องการให้ฟองน้ำผสมมีการพองตัวได้สูงขึ้น ควรหาตัวเชื่อมไขว้ให้กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ในขั้นตอนการศึกษากระบวนการย่อยสลายด้วยสารละลายเอ็นไซม์แอลฟาอะมิเลส-ฟอสเฟตบัฟเฟอร์นั้นควรมีการเปลี่ยนสารละลายทุกวันเพื่อให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

บรรณานุกรม

- เกศศิณี ตระกูลทิวากร. การทำฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมัน
สำปะหลัง. วารสารอาหาร, 1996, 26, 249–262.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3.
กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2002.
- นิธิยา รัตนานนท์. เคมีอาหาร. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2000.
- สันสนีย์ เหมาคม. ฟิล์มละลายน้ำจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และคาร์บอกซีเมทิล
เซลลูโลส. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 1998.
- สุคนธา สุคนธ์ธारा. การเตรียมและสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมเจลาติน.
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2002.
- Almasi, H.; Ghanbarzadeh, B.; Entezami, A. A. Physicochemical properties of starch–
CMC–nanoclay biodegradable films. *Biol. Macromol.*, 2010, 46, 1–5.
- AOAC, 1990. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical
Chemists 15th Ed. Association of Official Analytical Chemists, Inc: Arlington, VA,
USA.
- Arancibia, C.; Bayarri, S.; Costell, E. Comparing carboxymethyl cellulose and starch as
thickeners in oil/water emulsions. Implications on rheological and structural
properties. *Food. Biophysics.*, 2013, 8, 122–136.

Arvanitoyanis, I.; Psomiadou, E.; Nakayama, A.; Aiba, S.; Yamamoto, N. Edible film made from gelatin, soluble starch and poll port 3. *Food. Chem.* **1997**, *60*, 593–604.

Bhardwaj, N.; Kundu, S. C. Silk fibroin and chitosan polyelectrolyte complex porous scaffolds for tissue engineering applications. *Carbohydr. Polym.*, **2011**, *85*, 325–333.

Coran, A.Y. Compatibilization of polymer blends. Conference on polymer blends toward **2000**, 1–43.

Dulong, V.; Lack, S.; Le Cerf, D.; Picton, L.; Vannier, J. P.; Muller, G. Hyaluronan-based hydrogels particles prepared by crosslinking with trisodium trimetaphosphate. Synthesis and characterization. *Carbohydr. Polym.* **2004**, *57*, 1–6.

Feddersen, R.L.; Thorp, S.N. Sodium carboxymethyl cellulose. In Whister, R.L.; Bemiller, J.N. (Eds). Industrial gum polysaccharides and their derivatives, Academic. New York, **1993**, pp. 542–547.

Galliard, I. Starch: properties and potential, John wiley & sons, Inc., New York **1987**.

Ghanbarzadeh, B.; Almasi, H.; Entezami, A.A. Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films. *Innovat. Food Sci. Emerg. Techs.*, **2010**, *11*, 697–702.

- Glenn, I.; Klug, S.; Klug, D. Carboxymethylcellulose. In Davidson, R.L. (Ed). Handbooks of water-soluble gums and resins. McGraw-Hill New York **1980**, pp. 4.1-4.24.
- Glickmans, M. Gum technology in the food industry. Academic, New York, **1969**, pp. 412-421.
- Kaya, S.; Kaya, A. Microwave drying effects on properties of whey protein isolate edible film. *J. Food. Eng.* **2000**, *43*, 91-96.
- Kuchaiyaphum, P.; Punyodom, W.; Watanesk, S.; Watanesk, R. Composition optimization of polyvinyl alcohol/rice starch/silk fibroin-blended films for improving its eco-friendly packaging properties. *J. Appl. Polym. Sci.* **2013**, *129*, 2614-2620.
- Ma, X.; Chang, P. R.; Yu, J. Properties of biodegradable thermoplastic pea starch/carboxymethyl cellulose and pea starch/microcrystalline cellulose composites. *Carbohydr. Polym.*, **2008**, *72*, 369-375.
- Mua, C.; Guoa, J.; Lib, X.; Linc, W.; Lia, D. Preparation and properties of dialdehyde carboxymethyl cellulose crosslinked gelatin edible films. *Food Hydrocolloids*, **2012**, *27*, 22-29.
- Nie, H.; Liu, M.; Zhan, F.; Guo M. Factors on the preparation of carboxymethylcellulose hydrogel and its degradation behaviour in soil. *Carbohydr. Polym.*, **2004**, *58*, 185-189.

- Pensini, E.; Yip, C.M.; O'Carroll, D.; Sleep, B.E. Carboxymethyl cellulose binding to mineral substrates: Characterization by atomic force microscopy-based Force spectroscopy and quartz-crystal microbalance with dissipation monitoring. *J. Colloid. Interface Sci.*, **2013**, *402*, 58–67.
- Punyanitya, S.; Chaiwun, B.; Sinsuwong, N.; Pruksakorn, S.; Norasetthada, T.; Watcharasaksilp, W.; Waniyapong, T. Research and development of homeostatic gelatine made in Chiang Mai University. *Chiang Mai Med. J.*, **2008**, *47*, 1–7.
- Punyanitya, S.; Chaiwun, B.; Sinsuwong, N.; Ruksudjarit, A.; Racksanti, A.; Koonawoot, R. Hemostatic acidified rice starch : laboratory and animal tests. *Neurological Surgery*, **2013**, *4*, January – March.
- Racksanti, A.; Janhom, S.; Punyanitya, S.; Watanesk, R.; Watanesk, S. An approach for preparing and absorbable porous film of silk fibroin – rice starch modified with trisodium trimetaphosphate. *J. Appl. Polym. Sci.* **2015**, *132*, 41517.
- Ratanamanee, A.; Niamsup, H.; Srisombat, L.; Punyodom, W.; Watanesk, R.; Watanesk, S. Role of chitosan on some physical properties and the urea controlled release of the silk fibroin/gelatin hydrogel. *J. Polym. Environ.* **2015**, *23*, 334–340.
- Rodkate, N.; Wichai, U.; Boontha, B.; Rutnakompituk, M. *Carbohydr. Polym.*, **2010**, *81*, 617–625.

- Saunders, J.; Izydorczyk, M.; Levin, D. B. Limitations and challenges for wheat-based bioethanol production. In Economic effects of biofuel production, Bernardes, M.A.D.S. (Ed.) **2011**.
- Souto-Maior, J. F. A.; Reis, A. V.; Pedreiro, L. N.; Cavalcanti, O. A. Phosphate crosslinked pectin as a potential excipient for specific drug delivery: preparation and physicochemical characterization. *Polym. Int.* **2010**, *59*, 127–135.
- Shang, J.; Shao, Z.; Chen, X. Electrical behavior of natural polyelectrolyte hydrogel: chitosan/carboxymethylcellulose hydrogel. *Biomacromolecules*, **2008**, *9*, 1208–1213.
- Siritientong, T.; Aramwit, P. Characteristics of carboxymethyl cellulose/sericin hydrogels and the influence of molecular weight of carboxymethyl cellulose. *Macromol. Res.*, **2015**.
- Svihus, B.; Uhlen, A.K.; Harstad, O.M. Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.*, **2005**; *122*: 303–320.
- The United States Pharmacopoeia 26. The National Formulary 21. Absorbable gelatin sponge. Welcom limited, Canada. **2002**, p 849.
- Thomas, D.J.; Attwell, W.A. Starch Eagan handbooks series. USA: Eagan press. **1997**.

Thumthanaruk, B.; Hinthong, N. Effect of maltodextrin and carboxymethylcellulose (CMC) on qualities of orange juice with collagen. *Agricultural. Sci. J.*, **2011**, *42*, 501–504.

Tongdeesoontorn, W.; Mauer, L. J.; Wongruong, S.; Sriburi, P.; Rachtanapun, P. Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films. *Chem. Cent. J.*, **2011**, *5*, 1–8.

Yadollahi, M.; Namazi, H.; Barkhordari, S. Preparation and properties of carboxymethyl cellulose/layered double hydroxide bionanocomposite films. *Carbohydr. Polym.*, **2014**, *108*, 83–90.

<http://www.food-info.net/uk/carbs/starch.htm>

<http://www.orst.edu/instruct/nfm236/starch/index.cfm>

<http://www.poco.phy.cam.ac.uk/research/starch/whatis.htm>

<http://www.sbu.ac.uk/water/hysta.html>

<http://www.wekcelo.com/prolist2.asp?typeid=37>

ภาคผนวก ก

ตาราง IR ของหมู่ฟังก์ชันที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

| frequency, cm ⁻¹ | bond | functional group |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 3640–3610 (s, sh) | O–H stretch, free hydroxyl | alcohol, phenols |
| 3500–3200 (s, b) | O–H stretch, H-bonded | alcohol, phenols |
| 3400–3250 (m) | N–H stretch | 1°, 2° amines, amides |
| 3300–2500 (m) | O–H stretch | carboxylic acids |
| 3330–3270 (n, s) | –C≡C–H: C–H stretch | alkynes (terminal) |
| 3100–3000 (s) | C–H stretch | aromatics |
| 3000–2850 (m) | =C–H stretch | alkenes |
| 3000–2850 (m) | C–H stretch | alkanes |
| 2830–2695 (m) | H–C=O: C–H stretch | aldehydes |
| 2260–2210 (v) | C≡N stretch | nitriles |
| 2260–2100 (w) | –C≡C–stretch | alkynes |
| 1760–1655 (s) | C=O stretch | carbonyls (general) |
| 1760–1690 (s) | C=O stretch | carboxylic acids |
| 1750–1735 (s) | C=O stretch | esters, saturated aliphatic |
| 1740–1720 (s) | C=O stretch | aldehydes, saturated aliphatic |
| 1730–1715 (s) | C=O stretch | –unsaturated esters |
| 1715 (s) | C=O stretch | ketones, saturated aliphatic |
| 1710–1665 (s) | C=O stretch | –unsaturated aldehydes, ketones |
| 1680–1640 (m) | –C=C– stretch | alkenes |
| 1650–1580 (m) | N–H bend | 1° amines |
| 1600–1585 (m) | C–C stretch (in-ring) | aromatics |
| 1550–1475 (s) | N–O asymmetric stretch | nitro compounds |
| 1500–1400 (m) | C–C stretch (in-ring) | aromatics |
| 1470–1450 (m) | C–H bend | alkanes |
| 1370–1350 (m) | C–H rock | alkanes |
| 1360–1290 (m) | N–O symmetric stretch | nitro compounds |
| 1335–1250 (s) | C–N stretch | aromatic amines |
| 1320–1000 (s) | C–O stretch | alcohols, carboxylic acids, esters |
| 1300–1150 (m) | C–H wag (–CH ₂ X) | alkyl halides |
| 1250–1020 (m) | C–N stretch | aliphatic amines |
| 1000–650 (s) | =C–H bend | alkenes |
| 950–910 (m) | O–H bend | carboxylic acids |
| 910–665 (s, b) | N–H wag | 1°, 2° amines |
| 900–675 (s) | C–H “oop” | aromatics |
| 850–550 (m) | C–Cl stretch | alkyl halides |
| 725–720 (m) | C–H rock | alkanes |
| 700–610 (b, s) | –C≡–H: C–H bend | alkynes |
| 690–515 (m) | C–Br stretch | alkyl halides |

m=medium, w=weak, s=strong, n=narrow, b=broad, sh=sharp

(<http://orgchem.colorado.edu/Spectroscopy/specttutor/irchart.pdf>)

ประวัติผู้วิจัย

| | |
|-------------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล | อนุชา รักสันติ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 11 กุมภาพันธ์ 2519 |
| ประวัติการศึกษา | วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2541 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2549 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2557 |
| ประวัติการทำงาน | ผู้ช่วยนักวิจัย ส่วนส่งเสริมการวิจัย คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่ 2542-2544 นักวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เชียงใหม่ 2550-ปัจจุบัน |