

การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮโดรเจล
ที่ทำจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

SYNTHESIS AND PHYSICAL CHARACTERIZATION OF CARBOXYMETHYL
CELLULOSE HYDROGELS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS AND PHYSICAL CHARACTERIZATION OF
CARBOXYMETHYL CELLULOSE HYDROGELS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIALS ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮโดรเจล
ที่ทำจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

Special Project Title Synthesis and Physical Characterization of Carboxymethyl
Cellulose Hydrogels

นักศึกษา นายศิริวัฒน์ วงษ์ขวัญ

รหัสประจำตัว 56110043

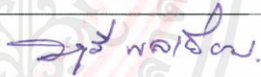


ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชัดติยา ชลาพัฒน์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร. มยุรี พลเยี่ยม	
ดร. นงลักษณ์ หวงกำแหง	
ดร. ชัดติยา ชลาพัฒน์	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูติไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่.....๖..... เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮโดรเจล ที่ทำจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
นักศึกษา	นายศิริวัฒน์ วงษ์ขวัญ
รหัสประจำตัว	56110043
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ชัดติยา ชลาพัฒน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮโดรเจลที่ทำจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้วิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ ชนิดของสารเชื่อมขวางที่ใช้ได้แก่อะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่สัดส่วนของอะลูมิเนียมคลอไรด์ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสคิดเป็น 10, 30, 50, และ 100% ในวิธีการสังเคราะห์ทำได้โดย เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับความเข้มข้น 1, 3, และ 5% โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นผสมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ ได้เป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล และจึงนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ ไปทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ โดยใช้เวลาในการดูดซับน้ำ 30 นาที เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล ที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำที่ดีที่สุด เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้ว จึงได้ทำการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปในช่วงตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปทีละสัดส่วน 0.5, 1, 2, 5, และ 10% โดยมวลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากผลการทดลองพบว่า ที่สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 5% และการเชื่อมขวางด้วยสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่สัดส่วน 10% เป็นเงื่อนไขที่ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ดีที่สุด และจากการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปพบว่า เส้นใยนาโนเซลลูโลสนั้นช่วยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเพิ่มสูงขึ้น

Special Project Title	Synthesis and physical characterization of Carboxymethyl cellulose hydrogels
Student	Mister Siriwat Wongkhwan
Student ID	56110043
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterials Engineering
Year	2016
Special Project Advisor	Dr. Khattiya Chalapat

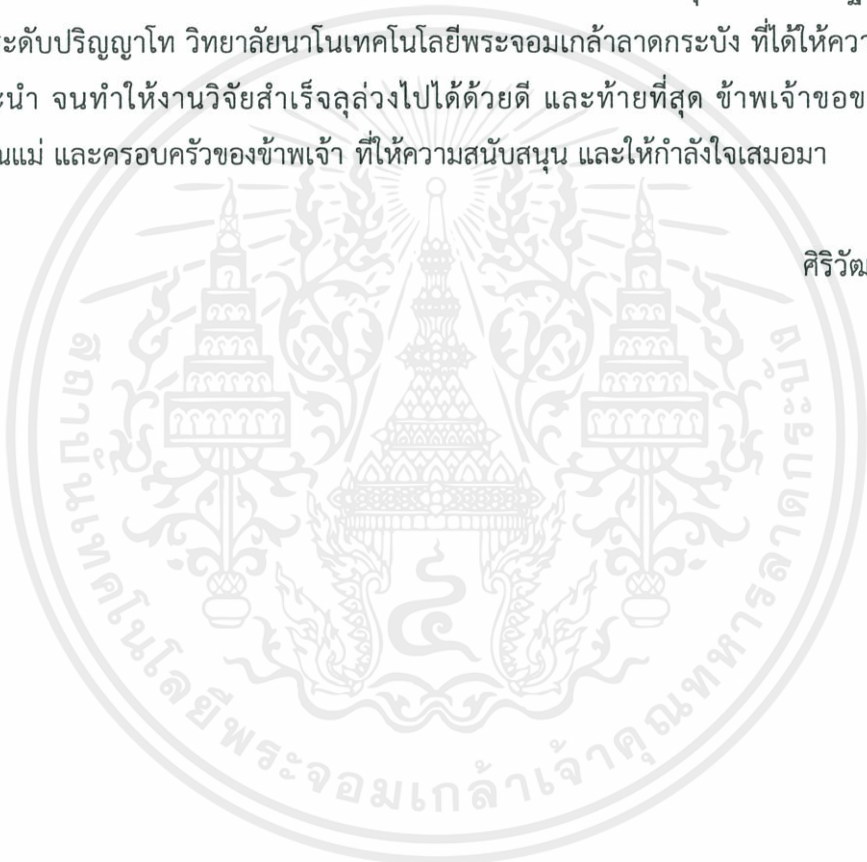
Abstract

This research studied on synthesis and physical characterization of Carboxymethyl cellulose hydrogels via physical crosslinking methods by using Aluminum Chloride as crosslinking agents. The Carboxymethyl cellulose hydrogel with 5, 10, 30, 50, and 100% of Aluminum Chloride to Carboxymethyl cellulose were prepared. In the preparation method, the Carboxymethyl cellulose solution was mixed with the Aluminum chloride crosslinking agent creating the Carboxymethyl cellulose hydrogel. The Carboxymethyl cellulose hydrogel were tested to absorb water. The adsorption was performed for 30 minutes to find the best condition of synthesizing the Carboxymethyl cellulose hydrogel. The next step, 0.5, 1, 2, 5, and 10% of nanocellulose fiber were mixed into the Carboxymethyl cellulose solution to study effect of nanocellulose fiber to adsorption properties of hydrogels. As a result, 5% Carboxymethyl cellulose solution and 10% crosslinking Aluminum chloride solution was the best condition for adsorption properties of hydrogels and nanocellulose fiber effect more adsorption capacity of hydrogels.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากการให้คำปรึกษาและชี้แนะจากหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชัตติยา ชลาพัฒน์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ คอยชี้แนะตลอดระยะเวลาในการทำงาน ทำให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้ที่มีประโยชน์มากมาย ขอขอบพระคุณ ดร.กฤษณา ศิริเลิศมุกุล สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และความเอื้อเฟื้อ สำหรับวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณ นางสาวณัฐธยาน์ สุขกร นักศึกษาระดับปริญญาโท วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และท้ายที่สุด ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ความสนับสนุน และให้กำลังใจเสมอมา

ศิริวัฒน์ วงษ์ขวัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไฮโดรเจล.....	3
2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	9
2.3 สารเชื่อมขวาง.....	13
2.4 แรงดันออสโมติก.....	14
2.5 เครื่องมือวิเคราะห์.....	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.3 วิธีการทดลอง.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	26
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล.....	26
4.2 ผลการเชื่อมขวางของไฮโดรเจล.....	27
4.3 สมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล.....	30
4.4 การศึกษาผลของการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	35
บรรณานุกรม.....	36
ประวัติผู้เขียน.....	39



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอะลูมิเนียมคลอไรด์.....	13
3.1 ตัวอย่างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล ที่สภาวะในการสังเคราะห์ต่างๆ.....	25
4.1 ค่าเลขคลื่น (Wavenumber) ของหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	28
4.2 อัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling ratio) ที่ไฮโดรเจลเงื่อนไขต่างๆ.....	30
4.3 อัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling ratio) ที่ปริมาณความเข้มข้นของ เส้นใยนาโนเซลลูโลสเงื่อนไขต่างๆ.....	33



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กลไกการดูดซับน้ำของ พอลิ(ไซเตียม อะคริเลต) ไฮโดรเจล.....	3
2.2 กราฟความเค้น-ความเครียดในทางทฤษฎีและในการทดลองของไฮโดรเจล.....	4
2.3 โครงสร้างมอนอเมอร์ของพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล).....	5
2.4 โครงสร้างของพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล)-พอลิ(คาโพรแลกโตน)-พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล).....	6
2.5 โครงสร้างแบบอินเตอร์เพเนตรตึงเน็ตเวิร์กและเคมี-อินเตอร์เพเนตรตึงเน็ตเวิร์ก.....	6
2.6 ชนิดของตัวกระตุ้นที่มีผลต่อการตอบสนองของไฮโดรเจล.....	8
2.7 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	9
2.8 โครงสร้างโมเลกุลของอะลูมิเนียมคลอไรด์.....	14
2.9 การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัว โดยมีการแพร่ผ่านโมเลกุลของน้ำเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจล.....	15
2.10 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	16
2.11 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	17
2.12 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	18
2.13 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	19
4.1 การเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจล ก่อนและหลังการดูดซับน้ำ.....	26
4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	27
4.3 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม (FTIR Spectra) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	28
4.4 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกตรัม (X-ray Diffraction Spectra) จากการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	29
4.5 ค่าอัตราการบวมตัว (swelling ratio) ของไฮโดรเจล ที่ปริมาณความเข้มข้นของ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสัดส่วนการเชื่อมขวางไฮโดรเจลที่ค่าต่างๆ.....	31
4.6 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส ที่เตรียมอยู่ในรูปของสารละลาย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	32
4.7 ค่าอัตราการบวมตัว (swelling ratio) ของไฮโดรเจล ที่ปริมาณความเข้มข้นของ เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เติมลงไปเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, และ 10% โดยมวล.....	34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่เกิดจากการเชื่อมขวาง (crosslink) ของพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ เป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ การเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ภายในไฮโดรเจลอาจเกิดผ่านพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) หรืออันตรกิริยาอื่นๆ เช่น พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) หรืออันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals interaction) เป็นต้น ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการกักเก็บหรือดูดซับน้ำไว้ในตัวเองได้ปริมาณมาก และคงรูปร่างไม่เกิดการละลายน้ำ ทำให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวและการหดตัวในลักษณะที่ย้อนกลับไป-มาได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไฮโดรเจลถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ด้านเกษตรกรรม และด้านการแพทย์ เป็นต้น [1]

ไฮโดรเจลสามารถสังเคราะห์ได้จากทั้งพอลิเมอร์จากธรรมชาติ (natural polymer) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) ซึ่งการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นมียอดดีในการที่สามารถควบคุมโครงสร้างทางเคมีได้อย่างแม่นยำ และปรับแต่งคุณสมบัติได้หลากหลายตามความต้องการ แต่ทว่าการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นอาจทำให้เกิดสารที่เป็นพิษขึ้น และการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้อาจกลายเป็นขยะหลงเหลืออยู่ในสิ่งแวดล้อม [2] จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้กลุ่มวิจัยต่างๆ ได้มีการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดต่างๆ อาทิเช่น แป้ง คอลลาเจน ไคโตซาน เซลลูโลส และอัลจินेट เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose) เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ไม่มีความเป็นพิษ ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดี และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงไม่ก่อให้เกิดเป็นขยะในสิ่งแวดล้อม โดยวิธีการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ วิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ (physical crosslink) ซึ่งจะมีการใช้สารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) เป็นตัวกลางในการเชื่อมสายโซ่พอลิเมอร์สองสายเข้าด้วยกัน ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติที่แข็งแรง นอกจากนี้ยังศึกษาประสิทธิภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลในการดูดซับน้ำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่ทำให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำที่มีประสิทธิภาพ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาค่าสัดส่วนร้อยละที่เหมาะสมของสารเชื่อมขวาง ที่ทำให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำที่มีประสิทธิภาพ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส ต่อคุณสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สูงขึ้นมีผลทำให้ไฮโดรเจลมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำที่ดีขึ้น
- 1.3.2 สัดส่วนร้อยละของสารเชื่อมขวางที่สูงขึ้นมีผลทำให้ไฮโดรเจลมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำที่ดีขึ้น
- 1.3.3 การเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีผลทำให้ไฮโดรเจลมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำที่ดีขึ้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เท่ากับ 27 องศาเซลเซียส
- 1.4.2 ชนิดของสารเชื่อมขวางที่ใช้ ได้แก่ สารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์
- 1.4.3 สัดส่วนของสารเชื่อมขวางที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เท่ากับ 10, 30, 50 และ 100% โดยมวลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
- 1.4.4 การตรวจวิเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่
 - 1.4.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด
 - 1.4.4.2 พูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี
 - 1.4.4.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม
 - 1.4.4.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

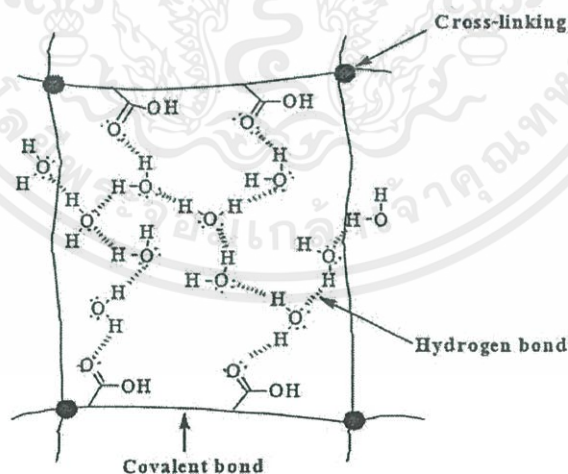
2.1 ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นวัสดุที่เกิดจากสายโซ่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ โดยระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือการเชื่อมต่อทางกายภาพต่างๆ ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับน้ำ และสามารถพองตัวได้ในน้ำโดยที่ไม่ละลายหรือสลายตัว [1]

2.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล

2.1.1.1 สมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาหรืออันตรกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ กับโมเลกุลของน้ำ และในระหว่างการดูดซับน้ำ ไฮโดรเจลสามารถที่จะคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงร่างตาข่าย แสดงดังภาพที่ 2.1



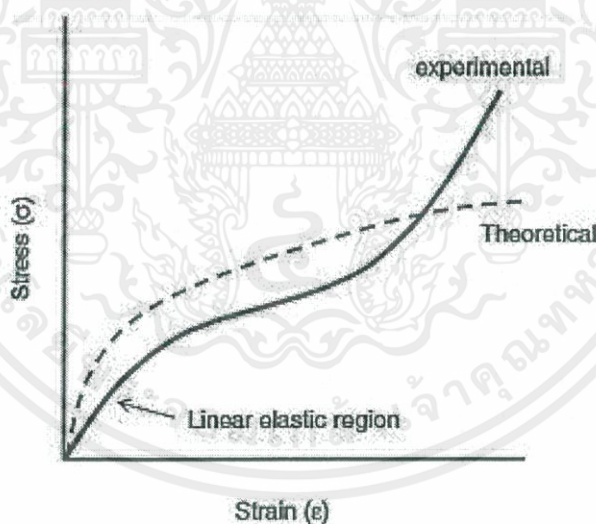
ภาพที่ 2.1 กลไกการดูดซับน้ำของ พอลิ(โซเดียม อะคริเลต) ไฮโดรเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.1 แสดงตัวอย่างกลไกการดูดซับน้ำของ พอลิ(ไซเตียม อะคริเลต) ไฮโดรเจล โดยการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลสามารถเกิดขึ้นได้โดยการเกิดปฏิกิริยา หรือการสร้างพันธะระหว่าง โมเลกุลของน้ำกับคู่อิเล็กตรอนโดดเดี่ยวของอะตอมออกซิเจน ในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของน้ำจะดึงดูน้ำโมเลกุลอื่นๆ เข้ามาเก็บไว้ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจล โดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง [3]

2.1.1.2 สมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล

คุณสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้าง ประสิทธิภาพเชิงกลของไฮโดรเจลทั่วไปสามารถแสดงในรูปของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ซึ่งสามารถหาได้จากความชันของกราฟที่แสดงพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบไฮโดรเจล ดังภาพที่ 2.2 โดยค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเจลจะมีค่าอยู่ในช่วง กิโลปาสคาล จนถึง เมกะปาสคาล ตัวอย่างเช่น เจลาติน และ อะกาโรสเจล



ภาพที่ 2.2 กราฟความเค้น-ความเครียดในทางทฤษฎีและในการทดลองของไฮโดรเจล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจะใช้วิธีตัดเฉือนและวิธีบีบอัด โดยจะไม่ใช่วิธียืดหรือดึง เนื่องจากไฮโดรเจลมีคุณสมบัติทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ต่ำ ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล ได้แก่ องค์ประกอบของโมโนเมอร์, ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และ อัตราการพองตัวของเจล เป็นต้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การแบ่งประเภทของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งประเภทตามเกณฑ์ต่างๆได้ดังต่อไปนี้ [5]

2.1.2.1 การแบ่งประเภทตามแหล่งที่มา

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งประเภทตามแหล่งที่มาของพอลิเมอร์ได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ [6]

2.1.2.1.1 ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer hydrogel)

ตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เช่น พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล), พอลิ(แลกติก แอซิด), พอลิ(ไวนิล แอลกอฮอล์), และ พอลิ(ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต) เป็นต้น ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์มีคุณสมบัติที่ดีในเรื่องของความแข็งแรงเชิงกล และการควบคุมโครงสร้างทางเคมีได้อย่างแม่นยำ

2.1.2.1.2 ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer hydrogel)

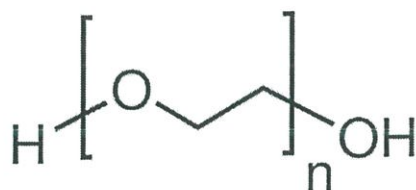
ตัวอย่างพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เช่น คอลลาเจน, เจลาติน, ไคโตซาน, เซลลูโลส, และอัลจิเนต เป็นต้น ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นพิษ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.1.2.2 การแบ่งประเภทตามกระบวนการในการเตรียมไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งประเภทตามกระบวนการในการเตรียมได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ [7]

2.1.2.2.1 โฮโมพอลิเมอร์ไฮโดรเจล

โฮโมพอลิเมอร์ไฮโดรเจล (Homo-polymer hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำเพียงชนิดเดียว ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ ได้แก่ พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) ไฮโดรเจล

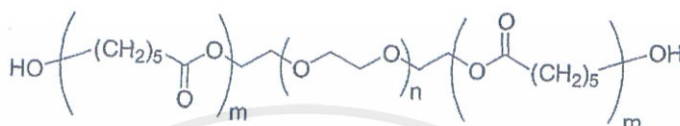


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างมอนอเมอร์ของพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2.2 โคพอลิเมอร์ไฮโดรเจล

โคพอลิเมอร์ไฮโดรเจล (Co-polymer hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายของมอนอเมอร์สองชนิดขึ้นไป โดยจะต้องมีมอนอเมอร์อย่างน้อยหนึ่งชนิดที่มีสมบัติชอบน้ำ ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ได้แก่ พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล)-พอลิ(คาโพรแลกโตน)-พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) ไฮโดรเจล



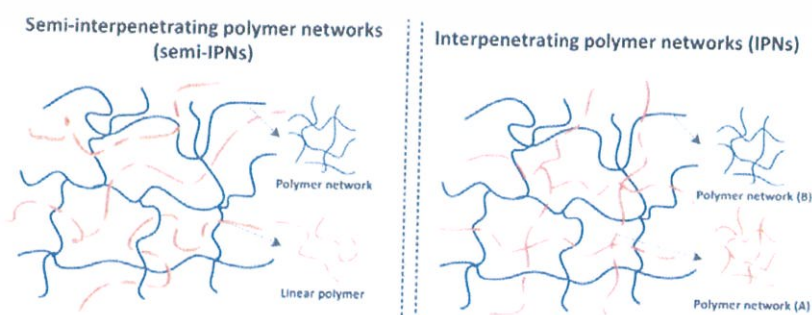
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล)-พอลิ(คาโพรแลกโตน)-พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล)

2.1.2.2.3 อินเตอร์เพเนตเรตติ้งเน็ตเวิร์กไฮโดรเจล

อินเตอร์เพเนตเรตติ้งเน็ตเวิร์กไฮโดรเจล (Interpenetrating network hydrogel, IPN) เป็นไฮโดรเจลที่เกิดจากแทรกสอดของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายสองชนิด โดยอย่างน้อยจะต้องมีโครงร่างตาข่ายหนึ่งเกิดขึ้นมาก่อนหรือถูกสังเคราะห์ขึ้นมาก่อน แล้วจากนั้นสายโซ่ของพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งจะเข้าไปแทรกสอดแล้วสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายอีกอันขึ้นมา

2.1.2.2.4 เซมิ-อินเตอร์เพเนตเรตติ้งเน็ตเวิร์กไฮโดรเจล

เซมิ-อินเตอร์เพเนตเรตติ้งเน็ตเวิร์กไฮโดรเจล (Semi-interpenetrating network hydrogel, semi-IPN) เป็นไฮโดรเจลที่เกิดจากแทรกสอดของพอลิเมอร์สองชนิด คล้ายกับแบบ IPN แต่สำหรับ semi-IPN นั้น พอลิเมอร์ที่เป็นตัวแทรกสอดจะไม่มีโครงสร้างแบบโครงร่างตาข่าย (เป็นโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรงหรือโซ่กึ่ง) แทรกสอดอยู่ในพอลิเมอร์ที่เป็นโครงร่างตาข่ายอีกชนิดหนึ่ง



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างแบบอินเตอร์เพเนตเรตติ้งเน็ตเวิร์ก และเซมิ-อินเตอร์เพเนตเรตติ้งเน็ตเวิร์ก [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 การแบ่งประเภทตามโครงสร้างของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งประเภทตามโครงสร้างทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีได้เป็น 3 ประเภท คือ ไฮโดรเจลอสัญฐาน (Amorphous) ไฮโดรเจลกึ่งผลึก (Semicrystalline) และ ไฮโดรเจลผลึก (Crystalline) [5]

2.1.2.4 การแบ่งประเภทตามลักษณะของการเชื่อมขวาง (Crosslinking)

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของการเชื่อมขวางได้เป็น 2 ประเภท คือ การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical Crosslinking) และการเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical Crosslinking)

2.1.2.4.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical Crosslinking)

โครงสร้างภายในไฮโดรเจลมีการเชื่อมต่อทางกายภาพ เช่น พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond), อันตรกิริยาระหว่างประจุ (charge interaction), อันตรกิริยาของความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) และอันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals interaction) เป็นต้น [5]

2.1.2.4.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical Crosslinking)

โครงสร้างภายในไฮโดรเจลมีการเชื่อมต่อทางเคมี เช่น พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) และมีการเติมสารเชื่อมขวาง (crosslink agent) เพื่อเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์สองสายโซ่ [3]

2.1.2.5 การแบ่งประเภทตามลักษณะการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม

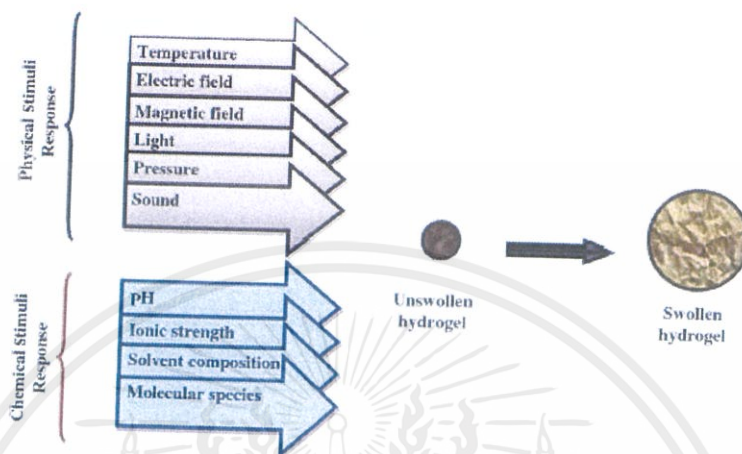
ไฮโดรเจลสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมได้เป็น 2 ประเภท คือ การตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ (Physical stimuli response) และการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมทางเคมี (Chemical stimuli response)

2.1.2.5.1 การตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ

ไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ จะตอบสนองต่อตัวกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก แสง เสียง และความดัน เป็นต้น

2.1.2.5.2 การตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมทางเคมี

ไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมทางเคมี จะตอบสนองต่อตัวกระตุ้นทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความแรงไอออน องค์ประกอบของสารละลาย และชนิดของโมเลกุล เป็นต้น



ภาพที่ 2.6 ชนิดของตัวกระตุ้นที่มีผลต่อการตอบสนองของไฮโดรเจล [5]

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจล [7]

2.1.3.1 การใช้งานทางด้านชีวการแพทย์

ความสามารถของไฮโดรเจลในการเลียนแบบพฤติกรรมอวัยวะของมนุษย์ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิ และสนามไฟฟ้า ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นชิ้นส่วนอวัยวะเทียม หรือนำไปเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น สายสวนปัสสาวะ แผ่นปิดรักษาบาดแผล เป็นต้น

2.1.3.2 การใช้งานทางด้านเภสัชกรรม

การประยุกต์ใช้งานทางด้านเภสัชกรรมที่สำคัญ คือ ระบบขนส่งและควบคุมการปลดปล่อยยา เนื่องจากไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ และไม่เป็นพิษต่อเซลล์ และยังมีคุณสมบัติในการดูดซับของเหลวได้ดี จึงมีแนวคิดให้ไฮโดรเจลนั้นดูดซับยาเก็บไว้แล้วปลดปล่อยยาออกมาในปริมาณและตามสภาวะที่ต้องการได้ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 การใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม

ไฮโดรเจลเป็นอีกหนึ่งวัสดุทางเลือกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหามลพิษทางน้ำ อาทิเช่น การดูดซับโลหะหนัก หรือการดูดซับสีย้อมที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ เป็นสาเหตุที่ทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย เป็นต้น

2.1.3.4 การใช้งานทางการเกษตร

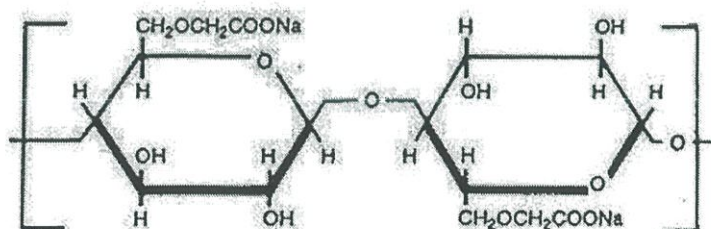
ในปัจจุบันมีการศึกษาไฮโดรเจลสำหรับการนำมาใช้งานทางการเกษตร เช่น การควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารในปุ๋ยให้แก่พืช การกักเก็บน้ำและรักษาความชื้นในดิน รวมถึงเพิ่มความเป็นรูปพรุนให้กับดิน

2.1.3.5 การใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์

แนวโน้มการใช้งานของไฮโดรเจลในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การปรับปรุงบรรจุภัณฑ์ในเรื่องของการป้องกันอากาศและความชื้น, บรรจุภัณฑ์ป้องกันแบคทีเรีย, การตรวจสอบสภาพของผลิตภัณฑ์ภายใน, การใส่สารเติมแต่งในระดับนาโน, การเพิ่มอายุการเก็บรักษาให้ได้นานขึ้น และป้องกันการเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น

2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (Carboxymethyl cellulose, CMC) หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose) เป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) คือพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่เป็นคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดนี้ เป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่ตัดแปรจากสารที่ได้จากธรรมชาติ เกิดจากการแปรหรือปรับปรุงคุณสมบัติของเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช ให้เกิดการแทนที่โครงสร้างเดิมด้วยหมู่เมทิลและหมู่คาร์บอกซีเมทิล ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุล ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยทั่วไป จะมีลักษณะเป็นผงหรือเป็นอนุภาคสีขาวหรือสีนํ้านม ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสชาติ ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม [10]

2.2.2 คุณสมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

2.2.2.1 สมบัติการละลาย (Solubility)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีคุณสมบัติในการละลายน้ำที่ดี แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล เอทานอล อะซิโตน คลอโรฟอร์ม และเบนซีน คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น เมื่อละลายในน้ำจะเกิดเป็นสารละลายหนืดใส และไม่มีกลิ่น [10]

2.2.2.2 สมบัติความหนืด (Viscosity)

สมบัติความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายจะเป็นผลให้ความหนืดเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ที่สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้นร้อยละ 1 (โดยมวลต่อปริมาตร) จะมีค่าความหนืดสูงสุดและมีความเสถียรที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 6.0-9.0 และจะไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างยังคงอยู่ในช่วง 9.0-11.0 แต่ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายลดลงต่ำกว่า 6.0 ความหนืดของสารละลายจะค่อยๆ ลดลง และจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็น กรดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จนกระทั่งมีความหนืดเสถียรที่ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 2.5 ในขณะที่เดียวกันถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเพิ่มขึ้นมากกว่า 9.0 ความหนืดของสารละลายจะค่อยๆ ลดลงเช่นกัน และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 11.5 ขึ้นไป [10]

2.2.2.3 สมบัติการดูดซับความชื้น (Hygroscopicity)

ค่าความชื้นสมดุล (Balance Moisture) ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้องที่มีค่าความชื้นในอากาศเฉลี่ยประมาณร้อยละ 80-85 จะมีค่าความชื้นสมดุลสูงขึ้นประมาณร้อยละ 26 แต่ค่าความชื้นภายในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 10 ซึ่งต่ำกว่าค่าความชื้นสมดุล อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าความชื้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 สารจะเริ่มมีความหนืดเกิดขึ้นซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [9]

ในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยทั่วไปจะต้องใช้เยื่อเซลลูโลสที่มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (Alpha cellulose) หรือที่เรียกกันว่า เซลลูโลสคุณภาพสูง ซึ่งเซลลูโลสคุณภาพสูงนี้อาจเตรียมได้จากวัตถุดิบและวิธีการทางเคมีที่แตกต่างกันไป ซึ่งในต่างประเทศส่วนใหญ่ผลิตเซลลูโลสดังกล่าวได้จากไม้ยืนต้นจำพวกสนและยูคาลิปตัส เป็นต้น แต่ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการนำเอาพืชไร่หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลากหลายชนิดมาทดลองผลิตเป็นเซลลูโลสคุณภาพสูง ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุจากธรรมชาติ มีราคาต้นทุนต่ำ และหาได้ง่าย จึงถือว่าเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหล่านี้ ตัวอย่างการผลิตเซลลูโลสคุณภาพสูงจากวัสดุที่น่าสนใจ ได้แก่

2.2.3.1 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน

เปลือกทุเรียนซึ่งเป็นของเหลือทิ้ง มีส่วนประกอบที่เป็นเส้นใยค่อนข้างมาก โดยประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเยื่อเซลลูโลสคุณภาพสูงถึงร้อยละ 30 ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการเตรียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เกณฑ์ขั้นต่ำของคุณภาพทางเคมีสำหรับวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้เตรียมเซลลูโลสคุณภาพสูงนั้น จะต้องมีแอลฟาเซลลูโลสไม่ต่ำกว่าร้อยละ 29 มีลิกนินไม่เกินร้อยละ 22 มีเถ้าไม่เกินร้อยละ 9 และมีเพนโตแซน (Pentosans) ไม่เกินร้อยละ 32 ซึ่งจากงานวิจัยถึงส่วนประกอบทางเคมีของเปลือกทุเรียนพบว่า เปลือกทุเรียนมีคุณภาพทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำมาใช้เตรียมเยื่อเซลลูโลสคุณภาพสูงได้ [12]

2.2.3.2 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากขานอ้อย

จากการศึกษาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืช พบว่าขานอ้อย มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 41 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20 และมีปริมาณลิกนินร้อยละ 22 ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่า ขานอ้อยนี้มีปริมาณเซลลูโลสสูงที่สุด จึงเหมาะที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อนำไปผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพที่มีคุณภาพดีต่อไป [13]

2.2.3.3 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเยื่อฟางข้าว

ในเยื่อฟางข้าวมีปริมาณเซลลูโลสเพียงพอในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จึงได้มีงานวิจัยที่ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเยื่อฟางข้าวในรูปแบบของฟิล์มเคลือบผิวผลไม้ ซึ่งฟิล์มจากเยื่อฟางข้าวที่ได้จะมีลักษณะใส ละลายน้ำได้ง่าย และที่สำคัญคือไม่มีสารพิษตกค้างถึงผู้บริโภคอีกด้วย [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การใช้ประโยชน์จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [15]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ อาทิเช่น

- อุตสาหกรรมอาหาร
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสถูกนำมาใช้เป็นสารคงตัว (Stabilizer) และสารเพิ่มความข้นหนืด (Thickener) ในอาหารประเภทไอศกรีม เนยแข็ง แยม อาหารกระป๋อง รวมไปถึงเครื่องดื่ม เช่น นม น้ำอัดลม และเบียร์
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสถูกนำมาใช้เป็นสารกันซึม (Sizing agent) สำหรับเคลือบเส้นใยผ้า ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานในระหว่างกระบวนการทอผ้า เช่น ผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าจากเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น
- อุตสาหกรรมเหมืองแร่
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสถูกนำมาใช้เป็นสารแขวนตะกอน (Suspending agent) เพื่อทำหน้าที่ในการคัดแยกแร่และโลหะที่เราต้องการออกจากสารปนเปื้อนหรือสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ปนอยู่ในสายแร่
- อุตสาหกรรมกระดาษ
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความนุ่ม (Smoothing agent) และสารกันซึม (Sizing agent) การใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 0.1-0.3 ลงไปผสมกับเยื่อกระดาษจะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ได้ถึงร้อยละ 40-50 จะทำให้กระดาษนั้นทน เหนียว และไม่ขาดง่าย
- อุตสาหกรรมเคมี
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสถูกนำมาใช้เป็นสารดูดซับสิ่งสกปรก (Dirt absorbent) ผสมอยู่ในสารเคมีต่างๆ ได้แก่ ผงซักฟอก และยาสีฟัน เป็นต้น

2.3 สารเชื่อมขวาง (Crosslink agent)

การเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล (Crosslinking) คือกระบวนการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะเคมี สามารถจำแนกประเภทในการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลได้เป็น

(i) การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking) เป็นการเชื่อมขวางด้วยพันธะโควาเลนต์ มีความแข็งแรง และให้โครงสร้างเสถียรที่สุด

(ii) การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking) เป็นการเชื่อมขวางด้วยพันธะอื่นๆ ทางกายภาพ เช่น พันธะไฮโดรเจน, อันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ เป็นต้น

สารเชื่อมขวางจะทำหน้าที่ในการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ในรูปแบบโครงข่ายสามมิติ โดยโมเลกุลที่จะเกิดการเชื่อมขวางจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา เช่น หมู่เอมีน หมู่ซัลไฟด์ หมู่คาร์บอนิล เป็นต้น บริเวณส่วนท้ายของโครงสร้างทางเคมีบนโมเลกุลหรือโปรตีนชนิดต่างๆ ซึ่งจะต้องประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันอย่างน้อย 2 หมู่ [16]

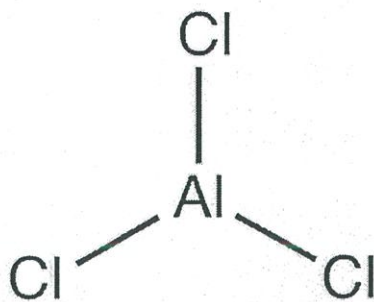
2.3.1 อะลูมิเนียมคลอไรด์

อะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminum chloride, $AlCl_3$) เป็นสารประกอบระหว่างอะลูมิเนียมและคลอรีน มีลักษณะเป็นผลึกใส ไม่มีสี (หรืออาจมองเป็นสีขาว) มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวต่ำ ในปัจจุบันอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกนำไปใช้งานในทางการแพทย์ โดยใช้เป็นยาทารงับเหงื่อ (Antiperspirants) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอะลูมิเนียมคลอไรด์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอะลูมิเนียมคลอไรด์ [17]

สมบัติของสาร	อะลูมิเนียมคลอไรด์
ชื่อทางเคมี	Aluminum Chloride
ชื่อพ้องอื่นๆ	Aluminum trichloride
สูตรโมเลกุล	$AlCl_3$
สถานะ	ของแข็ง ผลึกใส ไม่มีสี-สีขาว
กลิ่น	มีกลิ่นฉุน
น้ำหนักโมเลกุล	133.332 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	192.6 องศาเซลเซียส
การละลาย	ละลายในน้ำ เอทานอล และคลอโรฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ [17]

เมื่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายในน้ำ จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกของโซเดียม และ ไอออนลบของหมู่คาร์บอกซีเมทิล จากนั้นไอออนลบของหมู่คาร์บอกซีเมทิลจะไปจับกับไอออนบวกของอะลูมิเนียม ที่ได้จากการแตกตัวของอะลูมิเนียมคลอไรด์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในลักษณะ โครงข่ายร่างแหเกิดขึ้น

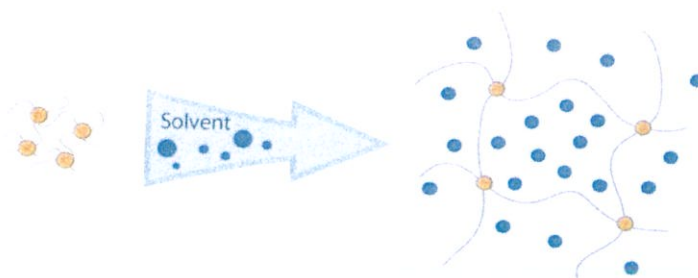
2.4 แรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure)

ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการที่สามารถพองตัวได้ในน้ำแต่ไม่ละลายน้ำ สาเหตุเป็นเพราะ ไฮโดรเจลนั้นมีส่วนประกอบทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่ในน้ำ โมเลกุลของน้ำจึงสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่บริเวณช่องว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้าง แบบตาข่ายสามมิติของไฮโดรเจลได้

แรงดันออสโมติก เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจล เนื่องจากปริมาณน้ำภายใน และภายนอกไฮโดรเจลนั้นมีไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก น้ำจาก ภายนอกจะเกิดการแพร่เข้าไปภายในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลเพื่อให้เกิดความสมดุลกัน ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำจากภายนอกก็จะแพร่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น โมเลกุลน้ำ บางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวหรือ พองตัวขึ้นนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม เมื่อไฮโดรเจลขยายตัวหรือพองตัวได้เต็มที่แล้ว จะไม่เกิดการขาดหรือแยกออก จากกัน เนื่องจากโครงสร้างภายในของไฮโดรเจลนั้นประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัด และยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรง โดยมีสารเชื่อมขวางเป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายโซ่ พอลิเมอร์ไว้ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



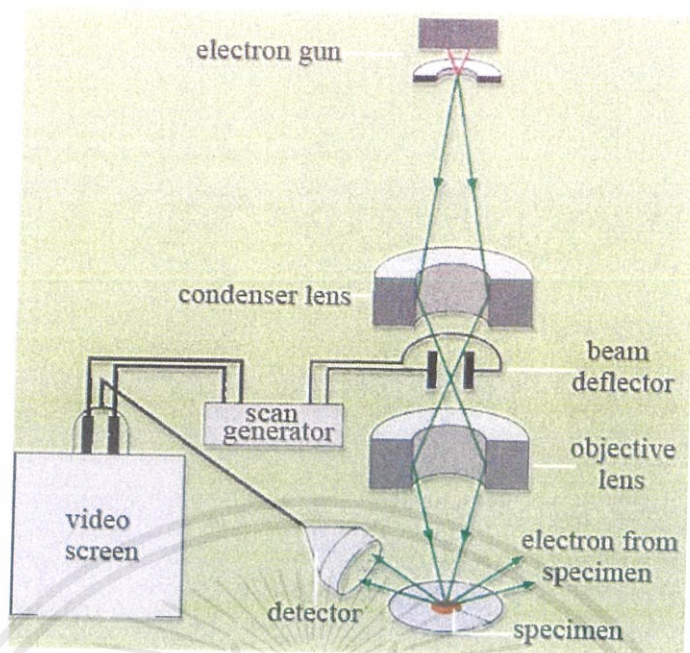
ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัว โดยมีการแพร่ผ่านโมเลกุลของน้ำเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจล [19]

2.5 เครื่องมือวิเคราะห์

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 นาโนเมตร ภาพที่ได้จะเป็นลักษณะของภาพ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป



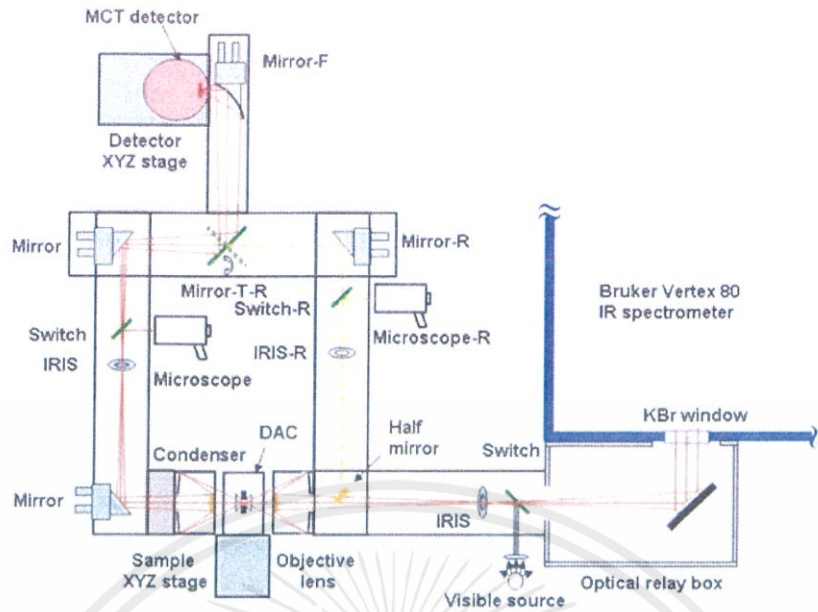
ภาพที่ 2.10 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [20]

2.5.2 พูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารทางคุณภาพ (Qualitative Analysis) ใช้หาหรือพิสูจน์เกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ต่างๆ ซึ่งจะปรากฏออกมาที่ความถี่ต่างๆกัน

ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีมีหลักการการทำงานคือ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพโมมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็น beam splitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ beam splitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงสแกนของกระจก โดยที่อัตราการสุมวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่ โดยเราเรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He - Ne Laser ว่า Internal Reference Laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โพแกรมถูกเก็บไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี [21]

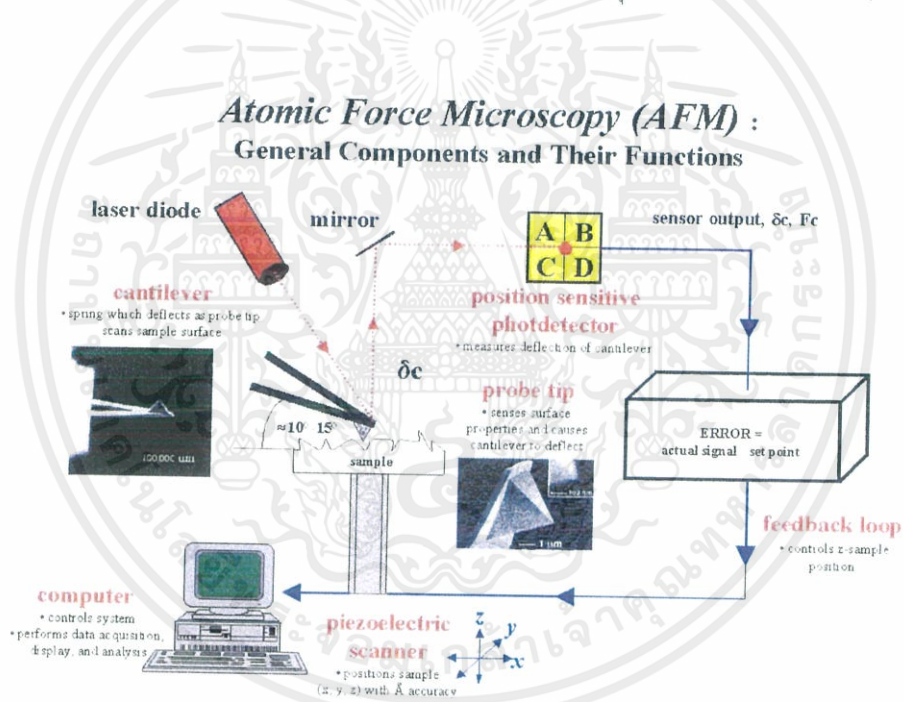
2.5.3 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม หรือ AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนโดยเฉพาะเช่นเดียวกับ STM แต่เครื่อง AFM ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากเครื่อง STM และสร้างขึ้นมาด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกันกับเครื่อง STM โดยเครื่อง AFM จะสามารถทำงานได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก (เหมือนกันกับเครื่อง STM) ซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) ที่สามารถโค้งงอตัวได้เคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ (ซึ่งสามารถที่จะวัดแรงกระทำที่ปลายแหลมของโพรบได้แม้ว่าจะมีขนาดน้อยมากในระดับนาโนก็ตาม) และคุณสมบัติของเครื่อง AFM ที่มีมากกว่าเครื่อง STM ก็คือ สามารถที่จะตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวโพลีเมอร์ เซรามิก คอมโพสิต กระจกหรือแก้ว หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่าง ๆ ก็ สามารถที่จะวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม จะทำการผ่านแสงเลเซอร์ไปที่กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอนิเตอร์เช่นเดียวกันกับเครื่อง STM (และโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลัก เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วย)



ภาพที่ 2.12 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม [22]

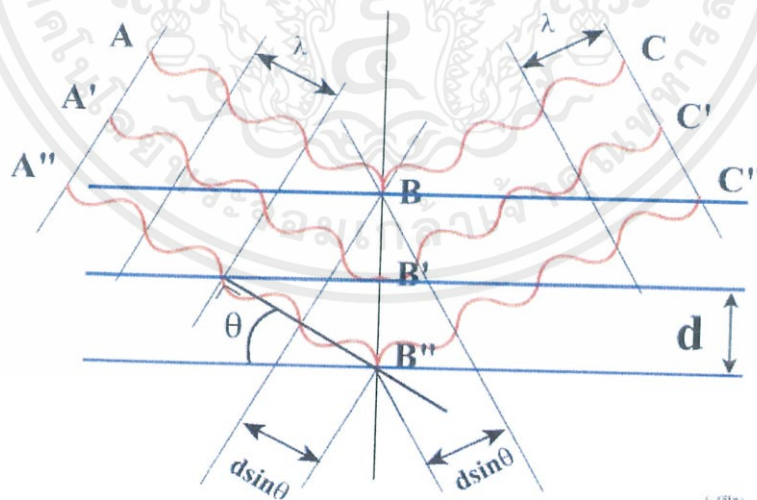
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้

ในผลึกของสารตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ



ภาพที่ 2.13 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Lee, K. Y. และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรเจลสำหรับการใช้งานทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) ซึ่งได้จำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามแหล่งที่มา ได้แก่ ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น พอลิ(อะคริลิก แอซิด), พอลิ(เอทิลีน ออกไซด์), พอลิ(ไวนิล แอลกอฮอล์), และ พอลิเอปไทด์ และไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น คอลลาเจน, เจลาติน, อัลจิเนต และไคโตซาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์มีข้อดีในเรื่องของการเตรียมเจลที่สามารถควบคุมโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันได้แม่นยำกว่า อย่างไรก็ตาม ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนมากไม่ย่อยสลายในสภาวะปกติ และยังมีการใช้สารเคมีที่มีความเป็นพิษหรือเป็นอันตรายในกระบวนการสังเคราะห์อยู่ ในขณะที่ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาตินั้นมีข้อดีในเรื่องของความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ และไม่เป็นพิษ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องคุณสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นไฮโดรเจลที่มาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์หรือพอลิเมอร์ธรรมชาติต่างก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย จึงอยู่ที่การเลือกใช้ให้เหมาะสมและตอบสนองกับความต้องการมากที่สุด

จากงานวิจัยของ Moura, M. J. และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากไคโตซาน และใช้สารเชื่อมขวางเป็นสารเจนิพิน (genipin) ซึ่งทั้งไคโตซานและเจนิพินต่างก็เป็นสารที่มาจากธรรมชาติ ในการทดลองจะเริ่มจากการเตรียมสารละลายไคโตซานในน้ำกลั่น จากนั้นจึงเติมสารละลายกลีเซอรอล-ฟอสเฟตลงไป เพื่อควบคุมค่าพีเอชของสารละลายไคโตซานให้เป็นกลาง แล้วจึงใส่สารเจนิพินลงไปทีละปริมาณต่างกัน (0, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2% โดยมวล) จากการศึกษาพบว่า ในสารละลายไคโตซานนั้นมีการเชื่อมขวางกันแบบพันธะไอออนิก ซึ่งเกิดจากสารละลายกลีเซอรอล-ฟอสเฟตที่ใส่ลงไปก่อน เมื่อทำการใส่สารเจนิพินตามลงไปทำให้เกิดการเชื่อมขวางแบบพันธะโคเวเลนต์ขึ้น ทำให้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้นมีการเชื่อมขวางแบบผสมระหว่างพันธะไอออนิกและพันธะโคเวเลนต์ร่วมกัน ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบหาค่าปริมาณน้ำสมดุลพบว่า ตัวอย่างไฮโดรเจลที่ไม่มีการใส่สารเจนิพิน (เป็นพันธะไอออนิกเพียงอย่างเดียว) ให้ค่าปริมาณน้ำสมดุลที่สูงที่สุด ซึ่งค่าจะลดลงเมื่อใส่สารเจนิพินปริมาณมากขึ้นตามลำดับ รวมถึงยังใช้เวลาในการย่อยสลายเร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตาม การใส่สารเจนิพินก็ทำให้ไฮโดรเจลนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น

จากงานวิจัยของ Chang, C. และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ผสมกับเซลลูโลส โดยมีสารละลายอีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) เป็นสารเชื่อมขวาง ในการทดลองได้ทำการเตรียมสารละลายเซลลูโลส และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 3% โดยมวล ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย แล้วนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายทั้งสองชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส:เซลลูโลส เท่ากับ 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, และ 9:1 แล้วจึงใส่สารอีพิคลอโรไฮดรินลงไปทำการเชื่อมขวาง จากการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส:เซลลูโลสเท่ากับ 9:1 ให้ปริมาณในการดูดซับน้ำที่สูงที่สุด และค่าลดลงเมื่อลดปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงตามลำดับ

จากงานวิจัยของ Barbucci, R. และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้สาร 2-คลอโร-1-เมทิลไพริดีเนียม ไอโอไดด์ (2-chloro-1-methylpyridinium iodide, CMPJ) เป็นสารเชื่อมขวาง โดยกำหนดปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใส่ลงไปเป็นสัดส่วนเท่ากับ 2.5, 25, 50, และ 100% เมื่อนำไฮโดรเจลจากการสังเคราะห์ทั้ง 4 ตัวอย่างไปวัดค่าการดูดซับน้ำ พบว่า ที่สัดส่วนการเชื่อมขวางเท่ากับ 2.5, 25, และ 50% ค่าการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลจะมีค่าลดลงตามลำดับ แต่ที่ 100% ไฮโดรเจลมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นและเป็นค่าที่มากที่สุด

จากงานวิจัยของ Yang, S. และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเม็ดบิทจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้สารอีพิคลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวาง สำหรับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก การทดลองเริ่มจากการเตรียมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 5% ในน้ำกลั่น จากนั้น ผสมสารละลายอีพิคลอโรไฮดรินความเข้มข้น 10% ลงไปในสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อทำการเชื่อมขวางเกิดเป็นไฮโดรเจล จากนั้นนำสารผสมที่เตรียมได้ไปใส่ลงในแว็กซ์เหลว (fluid wax) 1,000 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงนำเม็ดบิทไฮโดรเจลที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตนเพื่อกำจัดส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาและล้างแว็กซ์ออกจนหมด นำไปเก็บแช่แข็งไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้พบว่า ลักษณะของเม็ดบิทไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม เป็นเม็ดใส และมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 4 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบการดูดซับโลหะหนักพบว่า สามารถดูดซับโลหะหนักได้จริง โดยปัจจัยที่จะทำให้สามารถดูดซับได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับโครงสร้างความเป็นรูพรุนภายในเม็ดบิทไฮโดรเจล, ความเข้มข้น รวมถึงค่าความเป็นกรด-ด่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโลหะหนักที่จะทำการดูดซับ นั้นหมายถึงถ้าโลหะหนักที่ต่างชนิดกัน ประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดบีดไฮโดรเจลก็จะแตกต่างกันออกไป โดยในการทดลองนี้ได้ใช้ตัวอย่างของโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Copper, Cu), นิกเกิล (Nickel, Ni), และตะกั่ว (Lead, Pb) ผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซับโลหะหนักที่ได้อยู่ที่ประมาณ 6.49, 4.06, และ 5.15 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) บริษัท Sigma-Aldrich เกรตวิเคราะห์
- 3.1.2 อะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminium chloride, $AlCl_3$) บริษัท Univar เกรตวิเคราะห์
- 3.1.3 เส้นใยนาโนเซลลูโลส (Nanocellulose fiber)
- 3.1.4 เอทานอล (Ethanol, C_2H_5OH) บริษัท Carlo Erba เกรตวิเคราะห์
- 3.1.5 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท A&D รุ่น GR-200
- 3.2.2 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot Plate Stirrer) บริษัท IKA รุ่น C-MAG HS 7
- 3.2.3 เครื่องปั่นเอนกประสงค์ บริษัท Bosch รุ่น MMB12P4R
- 3.2.4 กระดาษกรอง เบอร์ 1 ขนาด 150 มิลลิเมตร บริษัท Whatman
- 3.2.5 ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
- 3.2.6 ปีกเกอร์
- 3.2.7 กระบอกตวง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 3.2.8 จานเพาะเชื้อ (Petri-dish) ขนาด 25x150 มิลลิเมตร
- 3.2.9 กระซอนพลาสติก
- 3.2.10 แท่งแม่เหล็กสำหรับปั่นกวน
- 3.2.11 ซ้อนตักสาร
- 3.2.12 อลูมิเนียมฟอยล์

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล

ตอนที่ 1 : คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไฮโดรเจล

1. เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่ความเข้มข้น 1, 3, และ 5% โดยมวลต่อปริมาตร ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ แล้วกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot Plate Stirrer)
2. เตรียมสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ปริมาณ 10, 30, 50, และ 100% โดยมวลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร
3. นำสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทผสมกับสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะได้เป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล
4. นำไฮโดรเจลที่ได้มากรองด้วยกระชอนพลาสติก และทำการล้างไฮโดรเจลโดยใช้เอทานอล
5. รอให้ไฮโดรเจลระเหยจนแห้ง แล้วจึงนำไปดัดโดยใช้เครื่องปั่น จะได้เป็นผงไฮโดรเจล
6. นำไฮโดรเจลที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ เพื่อหาเงื่อนไขที่ดูดซับน้ำที่ดีที่สุด

ตอนที่ 2 : คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไฮโดรเจล ผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

1. หลังจากได้เงื่อนไขที่ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ดีที่สุดแล้ว ให้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลอีกครั้งด้วยเงื่อนไขดังกล่าว และเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไป ที่ปริมาณ 0.5, 1, 2, 5, และ 10% โดยมวลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
2. ทำการทดสอบคุณสมบัติในการดูดซับน้ำซ้ำอีกครั้งตามขั้นตอนเดิม เพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นเมื่อใส่เส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไป

3.3.2 การทดสอบการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

1. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้นก่อนดูดซับน้ำทั้ง 12 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 0.2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์
2. ใส่น้ำกลั่นลงในตัวอย่างไฮโดรเจลที่เตรียมไว้ ตัวอย่างละ 5 กรัม แล้วปิดฝาบีกเกอร์ด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์
3. เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ให้นำตัวอย่างไฮโดรเจลมากรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ
4. นำค่าน้ำหนักของไฮโดรเจลก่อนและหลังดูดซับน้ำมาคำนวณหาค่าอัตราการบวมตัวของ

ไฮโดรเจล (swelling ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{อัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล (g/g)} = \left[\frac{\text{น้ำหนักหลังดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนดูดซับน้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนดูดซับน้ำ}} \right] \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล ที่สภาวะในการสังเคราะห์ต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลาย CMC (%(w/v))	สัดส่วนสารเชื่อมขวาง (%)
CMC/AlCl ₃ 1:10	1	10
CMC/AlCl ₃ 1:30	1	30
CMC/AlCl ₃ 1:50	1	50
CMC/AlCl ₃ 1:100	1	100
CMC/AlCl ₃ 3:10	3	10
CMC/AlCl ₃ 3:30	3	30
CMC/AlCl ₃ 3:50	3	50
CMC/AlCl ₃ 3:100	3	100
CMC/AlCl ₃ 5:10	5	10
CMC/AlCl ₃ 5:30	5	30
CMC/AlCl ₃ 5:50	5	50
CMC/AlCl ₃ 5:100	5	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล

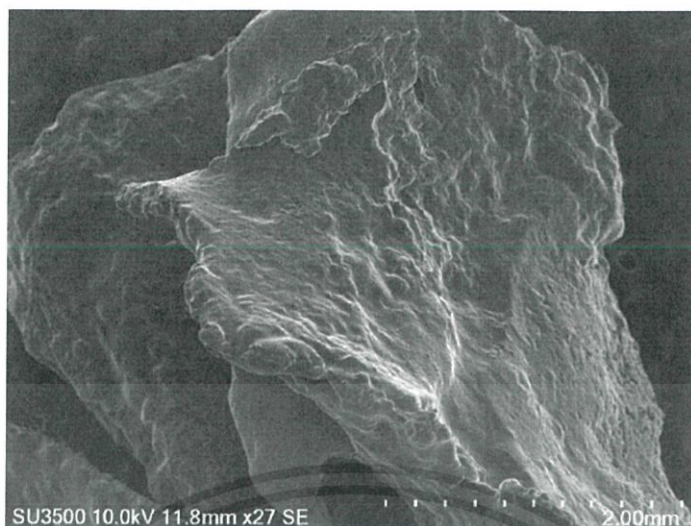
จากการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 1, 3, และ 5% โดยมวลต่อปริมาตร และใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมขวาง ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 30, 50, และ 100% โดยมวลของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่า ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นก้อนเจลสีขาวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเมื่อนำเอาไฮโดรเจลไปอบเพื่อไล่ความชื้น และนำไปบดให้อยู่ในรูปของผงไฮโดรเจล พบว่า ไฮโดรเจลที่แห้งแล้ว จะกลายเป็นสีขาวขุ่นไปจนถึงสีเหลือง เมื่อทำไปทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล พบว่า ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ และเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่บวมตัวขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจล ก่อนและหลังการดูดซับน้ำ

จากนั้น เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา จึงได้นำไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงดังภาพที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



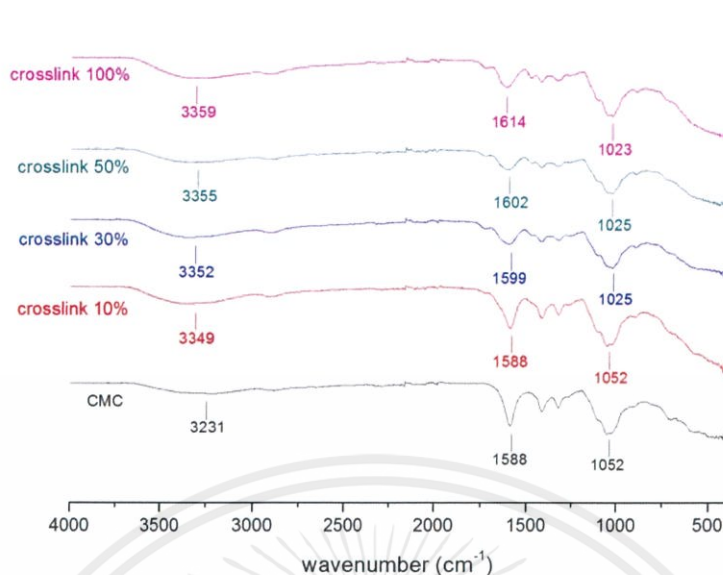
ภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้นมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ ไม่พบรูพรุนที่บริเวณพื้นผิว และมีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ซึ่งทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในตัวเองได้

4.2 ผลการเชื่อมขวางของไฮโดรเจล

4.2.1 การศึกษาผลการเชื่อมขวางของไฮโดรเจล โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี

จากการศึกษาองค์ประกอบของสารภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) แสดงผลดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 พูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม (FTIR Spectra) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค พูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

จากผลฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม เปรียบเทียบระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (CMC Hydrogel) ที่สัดส่วนการเชื่อมขวาง 10, 30, 50, และ 100% สามารถสรุปพิกัดของหมู่ฟังก์ชันที่พบ แสดงดังตารางที่ 4.1

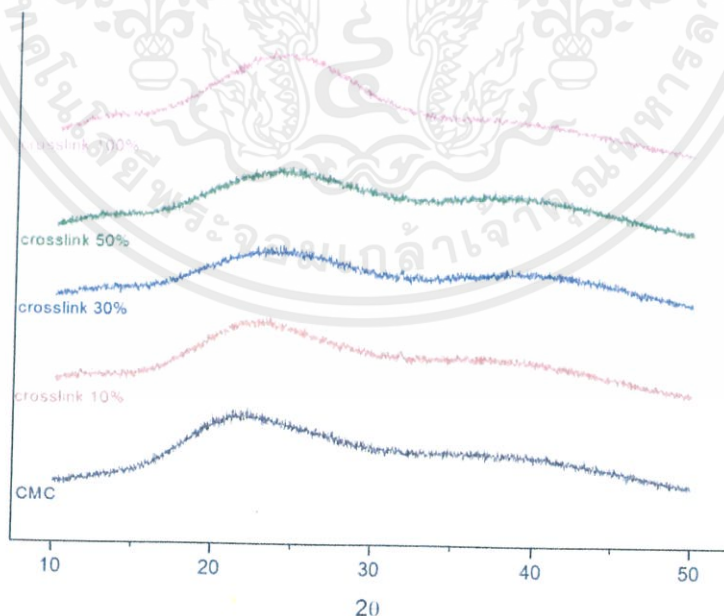
ตารางที่ 4.1 ค่าเลขคลื่น (Wavenumber) ของหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

หมู่ฟังก์ชัน	รูปแบบการสั่น	เลขคลื่น (cm^{-1})
-COOH	C-O stretching	1020-1300
	COO ⁻ stretching	1550-1760
	O-H stretching	3200-3400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาที่สเปกตรของทั้ง CMC และ CMC Hydrogel จะพบว่า พีคที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการสั่นของพันธะของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบที่พบในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยที่พีค 1052 cm^{-1} ของ CMC ซึ่งแสดงถึงพันธะ C-O stretching นั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ CMC Hydrogel ที่มีสัดส่วนการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น พบว่าพีคที่เกิดขึ้นจะมีค่าเลขคลื่นที่ลดลงตามลำดับ ในขณะที่พีค 1588 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ COO⁻ stretching และพีค 3231 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ O-H stretching นั้น เลขคลื่นของพีคที่พบจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีสัดส่วนการเชื่อมขวางไฮโดรเจลมากขึ้นตามลำดับ โดยเป็นผลมาจากการใส่สารอะลูมิเนียมคลอไรด์ลงไปในช่วงขั้นตอนการเชื่อมขวางเพื่อทำให้เกิดเป็นไฮโดรเจล อะลูมิเนียมคลอไรด์จะเข้าไปจับกับประจุลบของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้พีคที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน ยังมีสัดส่วนการเชื่อมขวางมาก พีคที่เกิดขึ้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง

4.2.2 การศึกษาผลการเชื่อมขวางของไฮโดรเจล โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การศึกษาลักษณะความเป็นผลึกและอสัณฐานของไฮโดรเจล โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) แสดงผลดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันสเปกตรา (X-ray Diffraction Spectra) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เปรียบเทียบระหว่าง CMC และ CMC Hydrogel ที่สัดส่วนการเชื่อมขวางเท่ากับ 10, 30, 50, และ 100% พบว่า ลักษณะของพีคที่ได้เป็นพีคกว้าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) มากกว่าความเป็นผลึก (Crystalline) ทั้งนี้ พีคที่เกิดขึ้นของ CMC Hydrogel ที่สัดส่วนการเชื่อมขวาง 10% พบว่ายังไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากพีคของ CMC มากนัก แต่พีคจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อทำการเชื่อมขวางที่สัดส่วน 30, 50, และ 100% ตามลำดับ จากข้อมูลที่ได้จึงทำให้สรุปว่า การเชื่อมขวางจะทำให้ไฮโดรเจลมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการเชื่อมขวางที่ต่างกันพบว่า ยิ่งทำการเชื่อมขวางไฮโดรเจลในสัดส่วนที่มากขึ้น จะยิ่งเพิ่มความเป็นอสัณฐานให้กับไฮโดรเจลมากขึ้นด้วยเช่นกัน

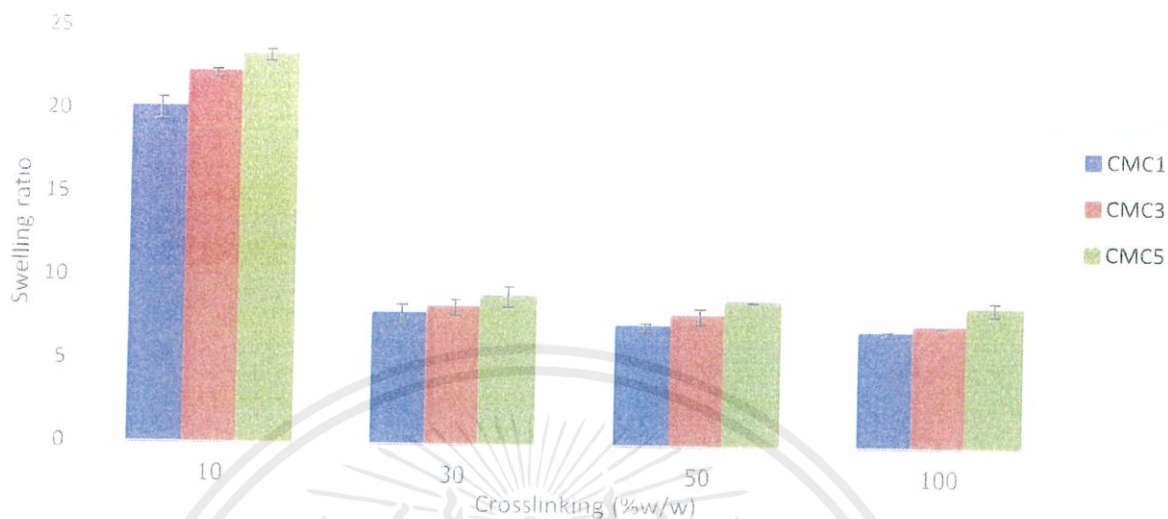
4.3 สมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

จากการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจล โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 1, 3, และ 5% โดยมวลต่อปริมาตร และใช้สารอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมขวางที่สัดส่วนการเชื่อมขวาง เท่ากับ 10, 30, 50, และ 100% นำไปคำนวณตามสมการที่ 3.1 เพื่อหาอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling ratio) แสดงค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling ratio) ที่ไฮโดรเจลเงื่อนไขต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลาย CMC (%(w/v))	สัดส่วนสารเชื่อมขวาง (%)	อัตราการบวมตัว (Swelling ratio)
CMC/AlCl ₃ 1:10	1	10	20.05
CMC/AlCl ₃ 1:30	1	30	7.77
CMC/AlCl ₃ 1:50	1	50	7.11
CMC/AlCl ₃ 1:100	1	100	6.79
CMC/AlCl ₃ 3:10	3	10	22.16
CMC/AlCl ₃ 3:30	3	30	8.19
CMC/AlCl ₃ 3:50	3	50	7.76
CMC/AlCl ₃ 3:100	3	100	7.17
CMC/AlCl ₃ 5:10	5	10	23.26
CMC/AlCl ₃ 5:30	5	30	8.86
CMC/AlCl ₃ 5:50	5	50	8.64
CMC/AlCl ₃ 5:100	5	100	8.32

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางมาทำการพล็อตกราฟ แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ค่าอัตราการบวมตัว (swelling ratio) ของไฮโดรเจล ที่ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสัดส่วนการเชื่อมขวางไฮโดรเจลที่ค่าต่างๆ

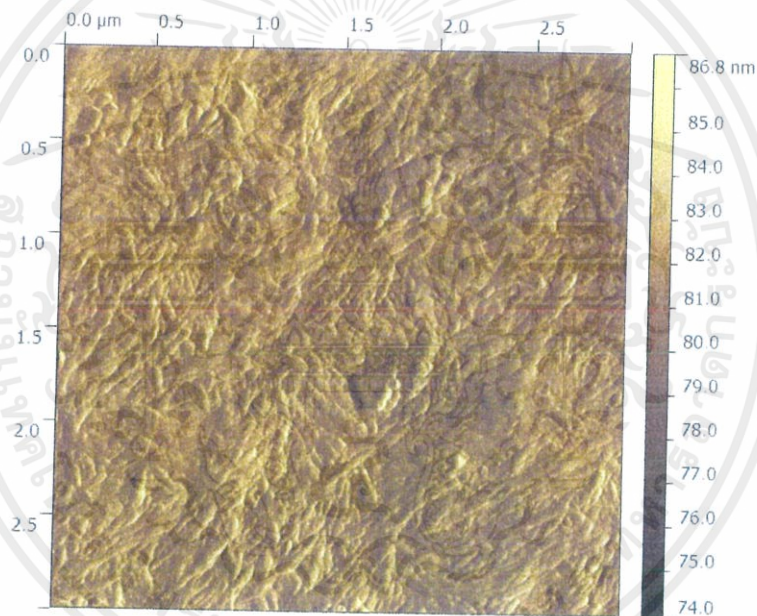
จากค่าอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจลที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 พบว่า การใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้มากขึ้น โดยไฮโดรเจลที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 5% โดยมีผลต่อปริมาตร ให้ค่าอัตราการบวมตัวสูงสุด รองลงมาคือ ไฮโดรเจลที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 3% และ 1% ตามลำดับ ในขณะที่ผลของการเชื่อมขวางไฮโดรเจลโดยใช้สารอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าการเติมสารเชื่อมขวางในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ลดลง โดยไฮโดรเจลที่สัดส่วนการเชื่อมขวาง 10% จะให้ค่าอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจลสูงสุด รองลงมาคือที่สัดส่วนการเชื่อมขวาง 30, 50, และ 100% ตามลำดับ จากผลที่ได้จึงทำให้สรุปว่า การเติมสารเชื่อมขวางในสัดส่วนที่มากขึ้น จะทำให้โครงสร้างภายในไฮโดรเจลระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและอะลูมิเนียมไอออน เกิดการเชื่อมขวางกันมากขึ้นเช่นกัน จึงทำให้โครงสร้างภายในไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางกันอย่างหนาแน่น ส่งผลให้ไฮโดรเจลสามารถบวมตัวได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาผลของการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

4.4.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนาโนเซลลูโลส

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำให้กับไฮโดรเจล เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้ทำการเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) พบว่า เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่สังเกตได้มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็ก กระจายตัวกันอย่างหนาแน่น มีพื้นผิวเรียบ และมีขนาดอยู่ในช่วง 0.05 - 0.1 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส ที่เตรียมอยู่ในรูปของสารละลาย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

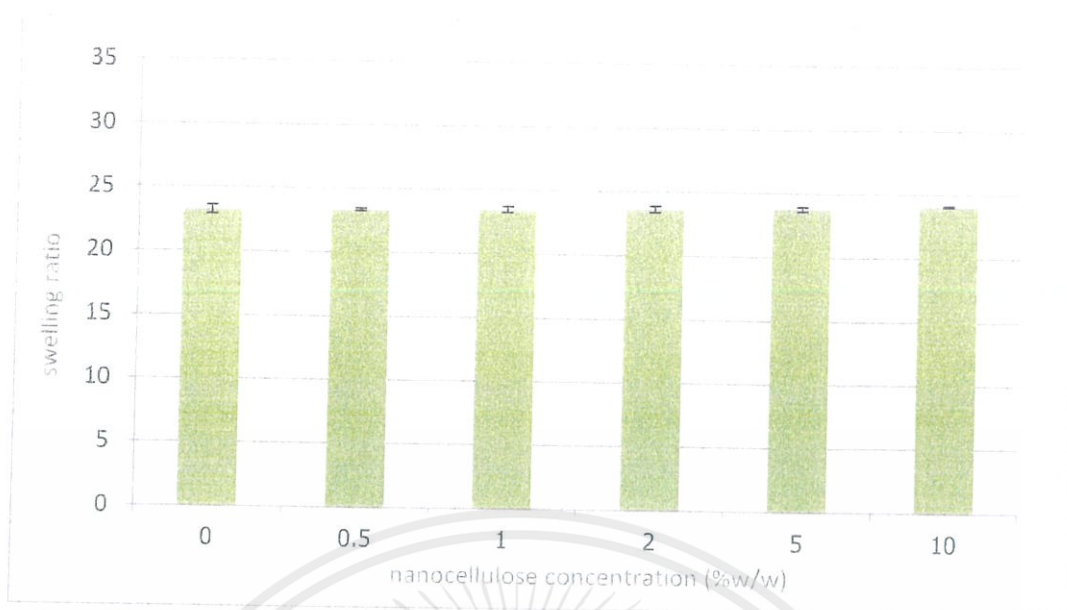
4.4.2 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลที่เติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

จากการศึกษาความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและสัดส่วนสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อคุณสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล พบว่า การสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ความเข้มข้น 5% โดยมวลต่อปริมาตร และใช้สารอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมขวางที่สัดส่วน 10% โดยมวลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นเงื่อนไขที่ทำให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุด จึงได้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้เงื่อนไขดังกล่าว และทำการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส ผสมลงไปในไฮโดรเจล ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 5, และ 10% โดยมวล และจึงนำไฮโดรเจลไปทำการทดสอบคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ โดยการคำนวณเพื่อหาอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling ratio) แสดงค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราการบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling ratio) ที่ปริมาณความเข้มข้นของเส้นใยนาโนเซลลูโลสเงื่อนไขต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลาย CMC (%(w/v))	สัดส่วนของสารเชื่อมขวาง (%)	ความเข้มข้นของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (%(w/w))	อัตราการบวมตัว (Swelling ratio)
CMC/AlCl ₃ /NCF 5:10:0	5	10	0	23.26
CMC/AlCl ₃ /NCF 5:10:0.5	5	10	0.5	23.35
CMC/AlCl ₃ /NCF 5:10:1	5	10	1	23.46
CMC/AlCl ₃ /NCF 5:10:2	5	10	2	23.62
CMC/AlCl ₃ /NCF 5:10:5	5	10	5	23.77
CMC/AlCl ₃ /NCF 5:10:10	5	10	10	24.05

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางมาทำการพล็อตกราฟ แสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ค่าอัตราการบวมตัว (swelling ratio) ของไฮโดรเจล ที่ปริมาณความเข้มข้นของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เติมลงไปเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, และ 10% โดยมวล

จากค่าอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจลที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 พบว่า ไฮโดรเจลที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปปริมาณ 10% ให้ค่าอัตราการบวมตัวที่สูงที่สุด คือ 24.05 เท่า ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่ได้มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสเข้าไป พบว่า ค่าอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 1.03 เท่า รองลงมาคือ ไฮโดรเจลที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปปริมาณ 5, 2, 1, และ 0.5% ตามลำดับ จากผลการศึกษาที่ได้จึงทำให้สรุปว่า ไฮโดรเจลที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปนั้นจะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีมากขึ้น และการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีมากขึ้นด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้สารอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมขวาง และทำการวิเคราะห์สมบัติในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล โดยศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้นต่างๆ การใส่สารเชื่อมขวางที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ และการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปไฮโดรเจล

จากการศึกษาได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1) การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบหลัก และใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมขวาง ใช้วิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ ทำให้ได้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้

2) การใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณมากขึ้น จะทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลดีขึ้น เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) อยู่ในตัว

3) การใส่อะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เป็นสารเชื่อมขวางลงไปปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลลดลง เนื่องจากการใส่สารเชื่อมขวางในปริมาณที่มาก จะทำให้โครงสร้างภายในของไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางกันแน่นเกินไป ทำให้ไฮโดรเจลไม่สามารถบวมตัวได้มากเท่าที่ควรจะเป็น ซึ่งส่งผลให้สามารถดูดซับน้ำเข้าไปได้น้อยลงเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม การใส่สารเชื่อมขวางนั้นต้องใส่ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะหากใส่ในปริมาณที่น้อยเกินไปอาจทำให้ไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางที่ไม่สมบูรณ์ได้

4) การใส่เส้นใยนาโนเซลลูโลสผสมลงไปไฮโดรเจล จะทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลดีขึ้น เพราะนาโนเซลลูโลสนั้นมีคุณสมบัติช่วยในเรื่องของการดูดซับ รวมถึงเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจล แต่หากใส่เส้นใยนาโนเซลลูโลสในปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้ไฮโดรเจลดูดซับน้ำได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสจะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างไฮโดรเจลจนอัดแน่น ทำให้ความเป็นรูพรุนของไฮโดรเจลลดลง ส่งผลถึงสมบัติในการดูดซับน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Laftah, W. A., Hashim, S., Ibrahim, A. N. 2011. "Polymer Hydrogels: A Review." *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 50(14) : 1475-1486.
- [2] Paleos, G. A. 2012. **What are hydrogels.** [Online]. Available : <http://pittsburghplastics.com/assets/files/What%20Are%20Hydrogels.pdf>
- [3] วารุณี ตานันต์ และสายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. "พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้." *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 16(2) : 63-81.
- [4] Ebara, M., Kotsuchibashi, Y., Narain, R., Idota, N., Kim, Y. J., Hoffman, J. M., Uto, K., Aoyagi, T. 2014. *Smart Biomaterials*. Tokyo : Springer.
- [5] Ahmed, E. M. 2013. "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review." *Journal of Advanced Research*. 6 : 105-121.
- [6] Zhao, W., Jin, X., Cong, Y., Liu, Y., Fu, J. 2012. "Degradable natural polymer hydrogels for articular cartilage tissue engineering." *J Chem Technol Biotechnol*. 88 : 327-339.
- [7] Ullah, F., Othman, M. B. H., Javed, F., Ahmad, Z., Akil, H. M. 2015. "Classification, processing and application of hydrogels: A review." *Materials Science and Engineering C*. 57 : 414-433.
- [8] Ye, Y. S., Rick, J., Hwang, B. J. 2012. "Water Soluble Polymers as Proton Exchange Membranes for Fuel Cells" *Polymers*. 4(2) : 913-963.
- [9] ปิยพร ร่มแสง, มัตติกา ไชยลังกา, รังสรรค์ กุณสะนา, วิชชากร กันทรธัญ, อนุวัฒน์ โรจน์สินทรัพย์ และนพพล เล็กสวัสดิ์. 2555. CMC biopolymer. [Online]. Available : <http://www.agro.cmu.ac.th/absc/data/56/No07.pdf>.
- [10] Sidley Chemical. 2013. **Sodium Carboxymethyl Cellulose Properties.** [Online]. Available : <http://celluloseether.com/carboxymethyl-cellulose-properties-cmc-viscosity/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Sidley Chemical. 2013. Properties of Sodium Carboxymethyl Cellulose. [Online]. Available : <http://celluloseether.com/properties-of-cmc-carboxymethylcellulose/>.
- [12] กฤษณา ศิริเลิศมุกุล. 2547. เซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน. [Online]. Available : <http://www.material.chula.ac.th/RADIO47/September/radio9-4.htm>.
- [13] วิทวัส จิรัฐพงศ์ และกฤษณเวช ทรงธนศักดิ์. 2554. “การศึกษาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืชเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพ.” หน้า 1-4. ใน การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [14] สุนทร ตรีนันทวัน. 2555. ฟิล์มเคลือบผลไม้จากเยื่อฟางข้าว. [Online]. Available : <http://edtech.ipst.ac.th/?p=974>.
- [15] SINOCMC. 2011. Main Application of Carboxymethyl cellulose in the industry. [Online]. Available : http://www.sino-cmc.com/html_news/Main-Application-of-Carboxymethyl-cellulose-in-the-industry-2.html.
- [16] ศุกลวัฒน์ เชาวนดี. 2558. “การเตรียมวัสดุประกอบนาโนโคโตซาน/ขมิ้นชัน.” วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] Pubchem. 2016. Aluminum Chloride. [Online]. Available : https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/aluminum_chloride#section=Top.
- [18] สุนทรี นาคแท้. 2557. “การควบคุมการปลดปล่อยยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดจากพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลโดยใช้ไฟฟ้าเป็นตัวควบคุม เพื่อใช้เป็นแผ่นแปะยาสำหรับลูกสุกร.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [19] Imran, A. B., Takeoka, Y. 2015. The development of novel “stimuli-sensitive” hydrogels for various applications. [Online]. Available : http://www.aip.nagoya-u.ac.jp/en/public/nu_research/highlights/detail/0001878.html.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2550. เทคโนโลยีการสร้างระดับนาโน. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.
- [21] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2556. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). [Online]. Available : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/chemistry/23-2013-09-04-02-40-21>.
- [22] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2555. Atomic Force Microscope (AFM). [Online]. Available : <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/219-atomic-force-microscope-afm-.html>
- [23] เกียรติพงษ์ ได้การ. 2555. X-ray Diffractometer XRD. [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87> เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์-xrd.html
- [24] Lee, K. Y., Mooney, D. J. 2001. "Hydrogels for Tissue Engineering." *Chemical Reviews*. 101(7) : 1869-1879.
- [25] Moura, M. J., Faneca, H., Lima, M. P., Gil, M. H., Figueiredo, M. M. 2011. "In Situ Forming Chitosan Hydrogels Prepared via Ionic/Covalent Co-Cross-Linking." *Biomacromolecules*. 12 : 3275-3284.
- [26] Chang, C., Duan, B., Cai, J., Zhang, L. 2009. "Superabsorbent hydrogels based on cellulose for smart swelling and controllable delivery." *European Polymer Journal*. 46 : 92-100.
- [27] Barbucci, R., Magnani, A., Consumi, M. 2000. "Swelling Behavior of Carboxymethylcellulose Hydrogels in Relation to Cross-Linking, pH, and Charge Density" *Macromolecules*. 33 : 7475-7480.
- [28] Yang, S., Fu, S., Liu, H., Zhou, Y., Li, X. 2010. "Hydrogel Beads Based on Carboxymethyl Cellulose for Removal Heavy Metal Ions" *Journal of Applied Polymer Science*. 119 : 1204-1210.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายศิริวัฒน์ วงษ์ขวัญ

วัน เดือน ปีเกิด 17 ตุลาคม พ.ศ. 2537

ที่อยู่ปัจจุบัน 59 ม. 6 ซ.ประชาราษฎร์ 10/1 ถ.ประชาราษฎร์ ต.ตลาดขวัญ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

การติดต่อ เบอร์โทรศัพท์ 087-352-3226
อีเมลแอดเดรส swongkhwan@gmail.com

ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนวัดลานนาบุญ จังหวัดนนทบุรี
ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนรัตนธิเบศร์ จังหวัดนนทบุรี
ระดับชั้นอุดมศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติด้านการทำงานวิจัย พ.ศ. 2559 เข้าฝึกงานในงานวิจัยทางด้านพอลิเมอร์ ที่สถาบันวิจัยโลหะ
และวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้