

การเตรียมและสมบัติของเซลล์โอสจากผักตบชวา/ว่านทางจรเข้ไฮโดรเจล



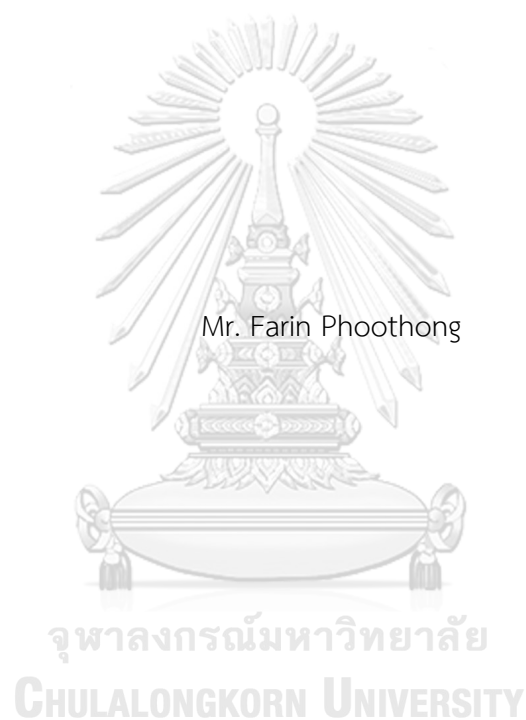
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND PROPERTIES OF CELLULOSE FROM WATER HYACINTH/ALOE VERA  
HYDROGEL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและสมบัติของเซลล์โพลีเมอร์จากผักตบชวา/ว่านหางจระเข้ไฮโดรเจล
โดย	นายเฟรินส์ ภูทอง
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภโชค ต้นพิชัย

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.นवलพรรณ จันทร์ศิริ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภโชค ต้นพิชัย)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)	

เฟรินส์ ภู่ทอง : การเตรียมและสมบัติของเซลลูโลสจากผักตบชวา/ว่านหางจระเข้ไฮโดรเจล. ( PREPARATION AND PROPERTIES OF CELLULOSE FROM WATER HYACINTH/ALOE VERA HYDROGEL) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อัญญาพร บุญมัทธิสุทธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.สุภโชค ต้นพิชัย

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมเซลลูโลสไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรียโดยใช้เซลลูโลสจากผักตบชวาที่สกัดได้จากกระบวนการทางเคมีและเพิ่มเสถียรภาพด้วยบอแรกซ์ซึ่งเป็นสารเชื่อมขวางที่สามารถละลายได้ในระบบ จากผลการทดลองพบว่าความหนืดของสารละลาย การดูดซึมน้ำ การส่องผ่านของแสง และร้อยละความเครียดจากการกดของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างความเป็นรูพรุนภายในไฮโดรเจล การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเชื่อมขวางของสายโซ่เซลลูโลสด้วยบอแรกซ์ นอกจากนี้การเติมบอแรกซ์ยังส่งผลให้ไฮโดรเจลมีสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส และเนื่องด้วยเซลลูโลสไฮโดรเจลที่เติมบอแรกซ์ปริมาณ 3 เท่า (ไฮโดรเจล 1/3) มีการดูดซึมน้ำและร้อยละความเครียดจากการกดที่เหมาะสมจึงถูกเลือกเพื่อเตรียมเซลลูโลส/ว่านหางจระเข้ไฮโดรเจลโดยการแช่ในสารละลายว่านหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 ของว่านหางจระเข้ในน้ำ พบว่าการแช่เซลลูโลสไฮโดรเจลในสารละลายว่านหางจระเข้นั้นไม่ส่งผลต่อสมบัติการดูดซึมน้ำและร้อยละความเครียดจากการกด นอกจากนี้สมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของเซลลูโลสไฮโดรเจลไม่ได้รับการปรับปรุงโดยการแช่ในสารละลายว่านหางจระเข้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2562	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6072174023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: cellulose hydrogel borax aloe vera

Farin Phoothong : PREPARATION AND PROPERTIES OF CELLULOSE FROM WATER HYACINTH/ALOE VERA HYDROGEL. Advisor: Asst. Prof. ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Supachoak Tanpichai, Ph.D.

In this research, cellulose hydrogels were successfully prepared from the sodium hydroxide/urea aqueous solution and chemically extracted water hyacinth fibers, and then improved stability by borax as a soluble cross-linking agent. The results revealed that increase in the solution viscosity and water absorption, light transmittance, and compressive strain of cellulose hydrogels was due to changes of pore structure in cellulose hydrogels. These pore changes might be affected by cross-linking between cellulose and borax. Moreover, the addition of borax was found to be effective against *Staphylococcus aureus* bacteria. According to the suitable water absorption and compressive strain, the cellulose hydrogels with 3 times of borax (1/3 hydrogel) were selected to prepare cellulose/aloe vera hydrogels by soaking in 5 and 10% aloe vera solutions. It was found that the addition of aloe vera in cellulose hydrogels did not affect the water absorption and compressive strain of the hydrogels. Moreover, the antibacterial properties of the cellulose/aloe vera hydrogels was not improved.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานวิจัยนี้เนื่องมาจากการสนับสนุนของบุคคลหลากหลายท่านเป็นทั้งผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา ผู้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภโชค ตันพิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งการให้คำปรึกษา คำชี้แนะ การแก้ปัญหา ความห่วงใย และเงินทุนสนับสนุนแต่ผู้วิจัยตลอดตั้งแต่ต้นจนงานเสร็จสมบูรณ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงงานวิจัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บุคลากรและเจ้าหน้าที่สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษาและการให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ในลำดับสุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา น้องสาว เพื่อน และคนที่รักข้าพเจ้าสำหรับทุนการศึกษา กำลังใจ การให้คำปรึกษาเพื่อให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมความรู้แก่ข้าพเจ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เฟรินส์ ภูทอง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 ไฮโดรเจล.....	3
2.1.1 การจำแนกไฮโดรเจลตามแหล่งที่มาของพอลิเมอร์.....	4
2.1.2 การละลายเซลล์ลูโลส.....	7
2.1.3 การเชื่อมขวางของเซลล์ลูโลสไฮโดรเจล.....	10
2.1.4 การเชื่อมขวางของบอแรกซ์.....	11
2.2 ผักตบชวา .....	12
2.2.1 ส่วนประกอบของผักตบชวา.....	13
2.2.1.1 เฮมิเซลล์ลูโลส.....	14
2.2.1.2 ลิกนิน.....	15
2.2.1.3 เซลล์ลูโลส.....	16
2.2.2 การสกัดเซลล์ลูโลสจากผักตบชวา.....	17

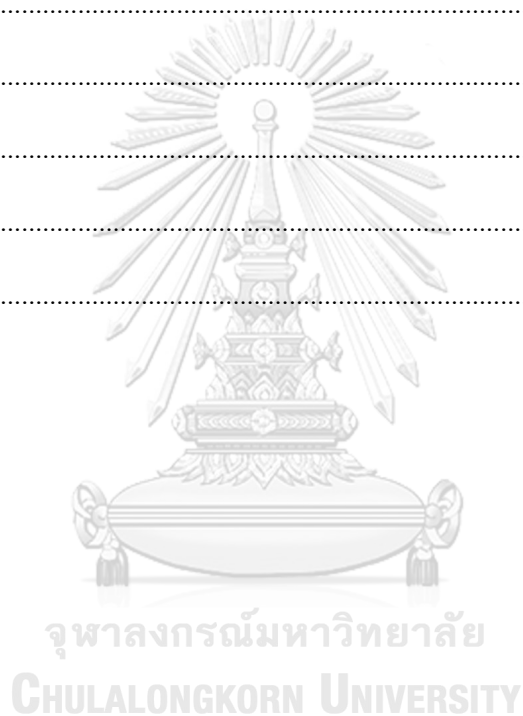
2.3	ว่านหางจระเข้.....	20
2.4	กลไกการต้านเชื้อแบคทีเรีย .....	22
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....		44
3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์สมบัติ .....	45
3.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมเซลล์ูโลสและเซลล์ูโลส/ว่านหางจระเข้ไฮโดรเจล.....	45
3.2.2	เครื่องมือวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติ .....	45
3.3	แผนผังการดำเนินงาน .....	47
3.4	วิธีการทดลอง.....	48
3.4.1	การสกัดเซลล์ูโลสจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี .....	48
3.4.2	การเตรียมสารละลายเซลล์ูโลส .....	50
3.4.3	การเตรียมไฮโดรเจลจากสารละลายเซลล์ูโลส .....	51
3.4.4	การเตรียมสารละลายว่านหางจระเข้และการเตรียมเซลล์ูโลส/ว่านหางจระเข้ไฮโดรเจล....	52
3.5.1	การวิเคราะห์ความหนืด .....	52
3.5	การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ .....	53
3.5.2	การวิเคราะห์หุ้หมู่ฟังก์ชัน.....	53
3.5.3	การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	54
3.5.4	การตรวจสอบสมบัติการบวมตัวในน้ำ ค่าปริมาณน้ำสมดุล และค่าร้อยละการเป็นเจล.....	54
3.5.5	การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสง .....	55
3.5.6	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	56
3.5.7	การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	57
3.5.8	การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	58
3.5.9	การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย .....	58





บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	59
4.1 ผลการวิเคราะห์เซลลูโลส.....	59
4.1.1 ลักษณะของเซลลูโลส.....	59
4.1.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	59
4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR.....	60
4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก .....	61
4.1.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	62
4.2 ผลการวิเคราะห์เซลลูโลสไฮโดรเจล .....	65
4.2.1 ลักษณะและความหนืดของเซลลูโลสไฮโดรเจล .....	65
4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR.....	67
4.2.3 การตรวจสอบค่าร้อยละการเป็นเจล .....	69
4.2.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	70
4.2.5 การตรวจสอบสมบัติการบวมตัวในน้ำและค่าปริมาณน้ำสมดุล .....	72
4.2.6 การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสง.....	72
4.2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก .....	73
4.2.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	75
4.2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	78
4.2.10 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย .....	79
4.3 ผลการวิเคราะห์ว่านหางจระเข้ .....	81
4.3.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....	81
4.4 ผลการวิเคราะห์เซลลูโลส/ว่านหางจระเข้ ไฮโดรเจล.....	83
4.4.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	83
4.4.2 การตรวจสอบสมบัติการบวมตัวในน้ำและค่าปริมาณน้ำสมดุล .....	83
4.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	84

4.4.4 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	73
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	74
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	85
ภาคผนวก ง.....	85
ภาคผนวก จ.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	91



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ .....	4
รูปที่ 2.2 กลไกการละลายของเซลลูโลสในสารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย .....	10
รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างบอแรกซ์, (ข) รูปสัญลักษณ์ตาม NFPA ของบอแรกซ์ .....	11
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างกาแลคโทแมนแนนและบอแรกซ์ .....	12
รูปที่ 2.5 ผักตบชวา .....	12
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของสารประกอบต่าง ๆ ในเนื้อไม้หรือพืช .....	14
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลสแต่ละชนิด .....	15
รูปที่ 2.8 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างลิกนิน .....	15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส .....	16
รูปที่ 2.10 วานหางจระเข้ .....	20
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในวานหางจระเข้ .....	21
รูปที่ 2.12 บริเวณการต้านเชื้อในจานเพาะเชื้อที่ความเข้มข้นร้อยละ 100.....	21
รูปที่ 2.13 ลักษณะผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่ย้อมติดสีแกรมบวกและลบ .....	22
รูปที่ 2.14 รูปแบบของการออกฤทธิ์ของยาต้านเชื้อแบคทีเรียบางชนิด.....	23
รูปที่ 2.15 กราฟ XRD ของ (ก) เซลลูโลสก่อนทำการละลาย และ (ข) เซลลูโลสหลังจากการละลาย .....	25
รูปที่ 2.16 กราฟ XRD ของเซลลูโลสจากการละลายด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์/เอ็นเอ็น, เอ็นเอ็นดีเมทิลแอสซีตาไมด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย-.....	26
รูปที่ 2.17 การเกิดปฏิกิริยาของบอแรกซ์ในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลส .....	26
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	47
รูปที่ 3.2 แผนผังการสกัดเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวาแห้งด้วยกระบวนการทางเคมี .....	49
รูปที่ 3.3 การติดตั้งชุดการสกัดเซลลูโลส .....	50

รูปที่ 3.4 (ก) ก่อนและ (ข) หลังละลายเซลลูโลสที่อุณหภูมิประมาณ -12 องศาเซลเซียส.....	50
รูปที่ 3.5 เซลลูโลสไฮโดรเจล .....	52
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหนืด .....	53
รูปที่ 3.7 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	53
รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	54
รูปที่ 3.9 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	56
รูปที่ 3.10 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โทรมิเตอร์.....	57
รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	57
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต.....	58
รูปที่ 4.1 ลักษณะของ (ก) เส้นใยผักตบชวาแห้ง และ (ข) เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี.....	59
รูปที่ 4.2 ภาพสัณฐานวิทยาของ (ก) เส้นใยผักตบชวา และ (ข) เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี.....	60
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วย กระบวนการทางเคมี.....	61
รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วย กระบวนการทางเคมี.....	62
รูปที่ 4.5 TG เทอร์โมแกรมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี.....	63
รูปที่ 4.6 DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี.....	63
รูปที่ 4.7 สารละลายเซลลูโลสที่มีการผสมบอแรกซ์.....	65
รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีและ เซลลูโลสไฮโดรเจลในช่วงความยาวคลื่น 4000 – 400 cm <sup>-1</sup> .....	67
รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลสไฮโดรเจลในช่วงความยาวคลื่น 1500 – 1100 cm <sup>-1</sup> .....	68
รูปที่ 4.10 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ระหว่างสายโซ่เซลลูโลส.....	69

รูปที่ 4.11 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของบอแรกซ์ต่าง ๆ.....	70
รูปที่ 4.12 รูปจำลองลักษณะของการเกิดรูพรุนจากการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสโดยมีบอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในไฮโดรเจล.....	71
รูปที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของบอแรกซ์ต่าง ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 360-750 นาโนเมตร.....	73
รูปที่ 4.14 รูปแบบ XRD ของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของบอแรกซ์ต่าง ๆ.....	74
รูปที่ 4.15 TG เทอร์โมแกรมของบอแรกซ์และไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของบอแรกซ์ต่าง ๆ .....	75
รูปที่ 4.16 DTG เทอร์โมแกรมของบอแรกซ์และไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของบอแรกซ์ต่าง ๆ.....	76
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของบอแรกซ์ต่าง ๆ.....	78
รูปที่ 4.18 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ ในไฮโดรเจล 1/3 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ข).....	80
รูปที่ 4.19 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในไฮโดรเจล 1/3 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ข).....	80
รูปที่ 4.20 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ ในสารละลายวุ้นทางจระเข้ 20% w/v ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ข).....	82
รูปที่ 4.21 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในสารละลายวุ้นทางจระเข้ 20% w/v ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ข).....	82
รูปที่ 4.22 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจล 1/3 ที่ทำการจุ่มด้วยสารละลายวุ้นทางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (ก) และ 10 (ข) โดยน้ำหนักของวุ้นทางจระเข้แห้งต่อปริมาตรของน้ำ.....	83
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของของไฮโดรเจล.....	84
รูปที่ 4.24 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายวุ้นทางจระเข้ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ข).....	86
รูปที่ 4.25 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายวุ้นทางจระเข้ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง $10^{-3}$ (ข).....	87

- รูปที่ 4.26 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหางจระเข้  
ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)  
..... 87
- รูปที่ 4.27 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหาง  
จระเข้ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  
 $10^{-3}$  (ข)..... 88



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียม .....	5
ตารางที่ 2.2 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ .....	6
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ .....	7
ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของตัวทำละลายในการละลายเซลลูโลส .....	8
ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของตัวทำละลายในการละลายเซลลูโลส .....	9
ตารางที่ 2.6 ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในแต่ละแหล่งที่มา .....	17
ตารางที่ 2.7 การศึกษาร้อยละขององค์ประกอบของผักตบชวาที่แตกต่างกันในแต่ละผู้ทำการทดลอง....	17
ตารางที่ 2.8 เทคนิคการสกัดเซลลูโลส .....	18
ตารางที่ 2.9 เทคนิคการสกัดเซลลูโลส .....	19
ตารางที่ 3.1 ปริมาณของเซลลูโลสและบอแรกซ์ในสารละลายไฮโดรอกไซด์และยูเรีย 100 มิลลิลิตร .....	51
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจาก TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี.....	64
ตารางที่ 4.2 ความหนืดของสารละลายเซลลูโลส-บอแรกซ์ ในหน่วยเซนติพอยส์ (centipoise, cP) 66	
ตารางที่ 4.3 ร้อยละการเป็นเจลของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ .....	69
ตารางที่ 4.4 ค่าการบวมตัวและค่าปริมาณน้ำสมดุลของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ.....	72
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจากรูปแบบ XRD ที่ 2 $\theta$ เท่ากับ 20 และ 15 องศา และค่าร้อยละความเป็นผลึก .....	74
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจาก TG และ DTG ของบอแรกซ์และไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ.....	76
ตารางที่ 4.7 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction .....	79
ตารางที่ 4.8 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction .....	79
ตารางที่ 4.9 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction .....	81

ตารางที่ 4.10 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction.....	81
ตารางที่ 4.11 ค่าการบวมตัวและค่าปริมาณน้ำสมดุลของเซลลูโลสไฮโดรเจลและเซลลูโลส/ว่านทาง จระเข้ไฮโดรเจล .....	84
ตารางที่ 4.12 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction.....	85
ตารางที่ 4.13 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction.....	86





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างร่างแหแบบสามมิติ จึงมีสมบัติการดูดซึมน้ำที่ดีทำให้มีการนำไฮโดรเจลไปใช้งานที่หลากหลาย เช่น งานด้านการเกษตร การแพทย์ การบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น [1] โดยไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากทั้งพอลิเมอร์ฐานปิโตรเลียม ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol)) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol)) พอลิอะคริลาไมด์ (polyacrylamide) พอลิอะคริลิกแอซิด (poly(acrylic acid)) เป็นต้น และพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ ได้แก่ ไฮยาลูโรเนต แอลจินต แบ็ง เจลาติน ไคติน ไคโตซาน เซลลูโลส เป็นต้น [2] ในปัจจุบันการเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์ฐานชีวภาพกำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากเซลลูโลสสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถสกัดเซลลูโลสได้จากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ทดแทนได้ (renewable resources) เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด ผักตบชวา เป็นต้น [3] โดยปกติแล้วการเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสนั้นจำเป็นต้องมีการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลเพื่อรักษาเสถียรภาพทางโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งการเชื่อมขวางนั้นสามารถเกิดได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ถึงแม้ว่าการเชื่อมขวางทางกายภาพจะสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมขวาง แต่การเชื่อมขวางทางกายภาพนั้นมีความสม่ำเสมอของการเชื่อมขวางและเสถียรภาพต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมขวางทางเคมี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจเตรียมเซลลูโลสไฮโดรเจลผ่านการเชื่อมขวางทางเคมี โดยใช้บอแรกซ์ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสารเชื่อมขวาง [4]

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการนำเซลลูโลสที่สกัดได้จากผักตบชวามาใช้ในการเตรียมเซลลูโลสไฮโดรเจล เนื่องจากผักตบชวาเป็นแหล่งเซลลูโลสตามธรรมชาติที่มีปริมาณของเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 18-35 และมีลิกนินอยู่น้อยที่ปริมาณร้อยละ 5-9 [5] ส่งผลให้การสกัดเซลลูโลสจากผักตบชวามีการใช้สารเคมีในการกำจัดลิกนินน้อยเมื่อเทียบกับการสกัดเซลลูโลสจากแหล่งเซลลูโลสอื่น ๆ เช่น ไม้ ซึ่งมีปริมาณลิกนินสูงถึงร้อยละ 25-30 [6] อีกทั้งผักตบชวายังหาได้ง่ายตามแหล่งน้ำทั่วไป เนื่องจากผักตบชวาสามารถขยายพันธุ์ได้ง่ายจากการแตกหน่อในแหล่งน้ำและมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงมาก โดยผักตบชวา 1 ต้น สามารถขยายพันธุ์ได้ถึง 1000 ต้น ภายในระยะเวลา 1 เดือน [7] จึง

ทำให้ผักตบชวามีปริมาณมากและราคาถูก นอกจากนี้การใช้ผักตบชวาเป็นสารตั้งต้นยังช่วยลดปัญหาระบบนิเวศทางน้ำที่เกิดจากผักตบชวา เช่น การก่อกำเนิดน้ำเน่าเสีย กีดขวางทางไหลของน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน เป็นต้น และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผักตบชวาได้อีกทางหนึ่งด้วย

นอกจากนี้การเพิ่มสมบัติเฉพาะทางให้กับไฮโดรเจลเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยทำให้ไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น การผสมว่านหางจระเข้ในไฮโดรเจลจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียให้แก่ไฮโดรเจล เนื่องจากว่านหางจระเข้มีองค์ประกอบของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลากหลายชนิดที่สามารถละลายน้ำได้ หนึ่งในสารออกฤทธิ์ชีวภาพเหล่านั้น คือ สารประกอบ ฟีนอลิก ซึ่งมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย [8] อีกทั้งยังเป็นสารละลายใสเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในวัสดุไฮโดรเจล

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการเตรียมเซลล์ูโลสไฮโดรเจลจากผักตบชวาโดยใช้สารบอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางทางเคมี และยังมีการใช้ว่านหางจระเข้ เพื่อเพิ่มสมบัติในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียให้กับเซลล์ูโลสไฮโดรเจลที่เตรียมได้สำหรับนำไปใช้งานทางด้านวัสดุชีวการแพทย์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

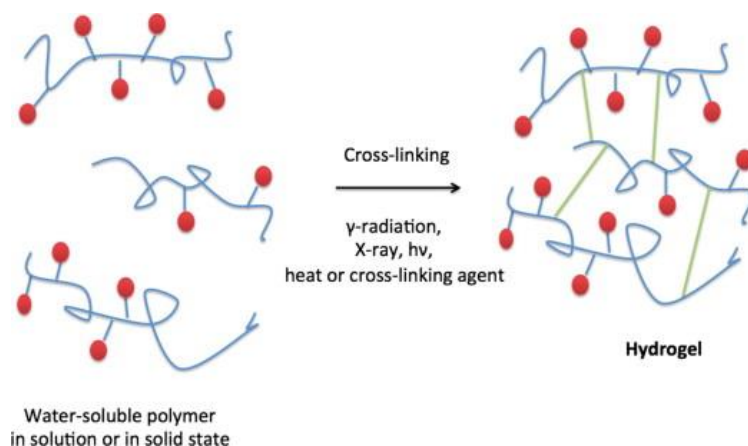
1. สกัดเส้นใยเซลล์ูโลสจากผักตบชวา
2. เตรียมไฮโดรเจลจากเส้นใยเซลล์ูโลสและว่านหางจระเข้
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติต้านทานเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจลที่เตรียมได้

## บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

### 2.1 ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีลักษณะของโครงสร้างร่างแหเป็นแบบสามมิติ สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากโดยไม่มีการสูญเสียโครงสร้างจากการเชื่อมขวางกันของพอลิเมอร์ ซึ่งมีการให้นิยามของไฮโดรเจลโดย Wichterle และ Lím [9] ว่า วัสดุไฮโดรเจลจะต้องมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่อย่างน้อยร้อยละ 10 ของปริมาณหรือปริมาตรน้ำหนักรวม ไฮโดรเจลนั้นเกิดจากการเชื่อมขวางกันของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นรูพรุน (porous) ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่นำมาเชื่อมขวางกันจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, -OH) หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group, C=O) หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxyl group, -COOH) หมู่อะมิโน (amino group, -NH<sub>2</sub>) หมู่ซัลไฟไฮดริล (sulfhydryl groups, -SH) เป็นต้น [10] โมเลกุลของน้ำจะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนที่เกิดขึ้น และเกิดพันธะกับหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำในโครงสร้างของไฮโดรเจล ทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้ในปริมาณมาก ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำในสายโซ่พอลิเมอร์ ความเป็นรูพรุน ปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นต้น [11]

ไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียมและพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ ผ่านการเชื่อมขวางกันของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยการเชื่อมขวางกันของสายโซ่พอลิเมอร์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น การเกี่ยวโยงกัน (entanglement) ของสายโซ่พอลิเมอร์ การเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ระหว่างโมเลกุล การเกิดผลึก (crystallization) การเกิดพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เป็นต้น โดยกระบวนการเชื่อมขวางไฮโดรเจลของพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้แสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นด้วยลักษณะของไฮโดรเจลที่มีความเป็นรูพรุนมากและสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากโดยไม่สูญเสียโครงสร้างหรือละลายจากการละลาย ทำให้มีการนำไฮโดรเจลไปใช้งานที่หลากหลายด้าน เช่น เกษตรกรรม เภสัชกรรม การแพทย์ วิศวกรรมเนื้อเยื่อ กำจัดของเสีย เครื่องสำอาง โดยการใช้งานไฮโดรเจลที่เราพบในชีวิตประจำวัน เช่น ดินวิทยาศาสตร์ วัุ่นผลิตภัณฑ์บำรุงผิวหน้า (face mask) ครีมบำรุงผิว (skin care) เป็นต้น [12]



รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ [13]

การจำแนกประเภทของไฮโดรเจลสามารถจำแนกได้หลากหลายวิธี โดยหลักการที่นิยมใช้ในการจำแนกไฮโดรเจล คือการจำแนกตามแหล่งที่มาของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล โดยการจำแนกตามแหล่งที่มาของพอลิเมอร์นั้นทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียเบื้องต้นของไฮโดรเจลแต่ละชนิด

### 2.1.1 การจำแนกไฮโดรเจลตามแหล่งที่มาของพอลิเมอร์

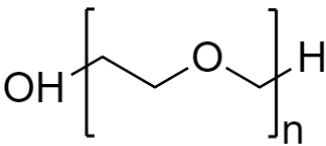
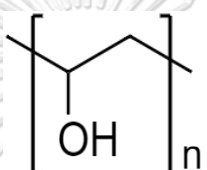
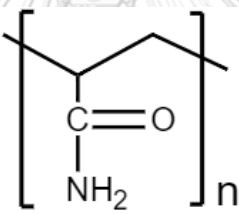
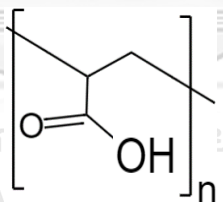
การจำแนกไฮโดรเจลตามแหล่งที่มาของพอลิเมอร์ สามารถแบ่งออกได้เป็นไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียมและไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ [12]

#### 1) ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียม

พอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียมที่นิยมนำมาใช้เตรียมเป็นไฮโดรเจลมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol)) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol)) พอลิอะคริลาไมด์ (polyacrylamide) พอลิอะคริลิกแอซิด (poly(acrylic acid)) เป็นต้น โดยโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำของพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียมนี้แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียมจะมีสมบัติที่ดี มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มาจากสารตั้งต้นปิโตรเลียมจะมีการควบคุมการผลิตให้มีโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลที่สม่ำเสมอ หากแต่พอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียมมีข้อเสีย คือ

เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป (non-renewable resources) มีความเข้ากันได้ในทางชีวภาพโดยรวมต่ำและไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเลียม [14]

ชนิดของพอลิเมอร์	โครงสร้างของพอลิเมอร์	หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ
พอลิเอทิลีนไกลคอล		หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่อีเทอร์ (-O-)
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์		หมู่ไฮดรอกซิล (-OH)
พอลิอะคริลาไมด์		หมู่เอไมด์ (-CONH <sub>2</sub> )
พอลิอะคริลิกแอซิด		หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH)

## 2) ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ

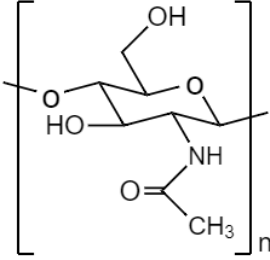
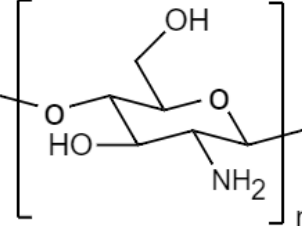
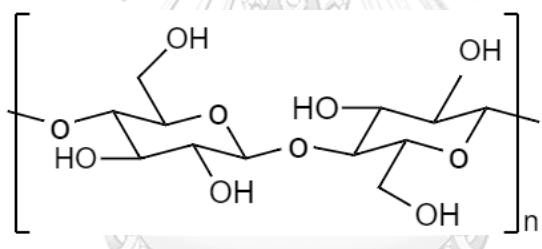
พอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้เตรียมไฮโดรเจล ได้แก่ ไฮยาลูโรเนต แอลจินต แป้ง ไคติน ไคโตซาน เซลลูโลส เป็นต้น โดยโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ฐานชีวภาพแสดงในตารางที่ 2.2 โดยในปัจจุบันการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ฐานชีวภาพกำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ฐานชีวภาพนั้นมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง มีความเป็นพิษต่ำ เป็นวัสดุหมุนเวียนที่ใช้แล้วสามารถหาทดแทนได้และมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์ฐานชีวภาพจะมีข้อดีที่หลากหลาย ข้อเสียของ

พอลิเมอร์ฐานชีวภาพ คือมีความไม่สม่ำเสมอในการกระจายตัวของสมบัติต่าง ๆ และการควบคุมสมบัติต่าง ๆ ทำได้ยาก เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง และมีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย รวมทั้งความไม่บริสุทธิ์จึงต้องทำการสกัดก่อนการเตรียมไฮโดรเจล

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ [15]

ชื่อพอลิเมอร์	โครงสร้างของพอลิเมอร์	หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ
ไฮยาลูโรเนต		หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) หมู่เอไมด์ (-CONH-) หมู่อีเทอร์ (-O-)
แอลจินเนต		หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) หมู่อีเทอร์ (-O-)
แป้ง		หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่อีเทอร์ (-O-)

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ฐานชีวภาพ (ต่อ)

ชื่อพอลิเมอร์	โครงสร้างของพอลิเมอร์	หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ
ไคติน		หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่เอไมด์ (-CONH-) หมู่อีเทอร์ (-O-)
ไคโตซาน		หมู่อะมิโน (-NH <sub>2</sub> ) หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่อีเทอร์ (-O-)
เซลลูโลส		หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่อีเทอร์ (-O-)

### 2.1.2 การละลายเซลลูโลส

ปัจจุบันการเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสกำลังได้รับความนิยม [16] เนื่องจากเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีอยู่มากในธรรมชาติ มีความเข้ากันได้ในทางชีวภาพสูง สามารถย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ และเซลลูโลสยังเป็นพอลิเมอร์ที่ส่งเสริมให้ไฮโดรเจลมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีมากขึ้นเนื่องจากความเป็นผลึกของเซลลูโลส [17] ในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลส แต่การเตรียมเซลลูโลสไฮโดรเจลนั้นต้องเตรียมจากเซลลูโลสในรูปแบบของสารละลาย เนื่องจากเซลลูโลสไม่สามารถละลายได้ในน้ำหรือสารละลายอินทรีย์ในสภาวะปกติ เพราะโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสที่ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากจึงส่งผลให้โมเลกุลเซลลูโลสแต่ละสายถูกยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ดังนั้นการละลายเซลลูโลสจึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีและสภาวะการละลายที่เหมาะสม ตัวละลายที่สามารถละลายเซลลูโลสได้นั้น ได้แก่ ของเหลวไอออนิก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายผสมระหว่าง

ลิเทียมคลอไรด์/เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลแอสีตาไมด์ (lithium chloride/ N,N-dimethylacetamide, LiCl/DMAc) สารละลายลิเทียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย (lithium hydroxide/urea, LiOH/urea) สารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย (sodium hydroxide/urea, NaOH/urea) เป็นต้น ดังแสดงข้อดีและข้อเสียของตัวทำละลายในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของตัวทำละลายในการละลายเซลลูโลส

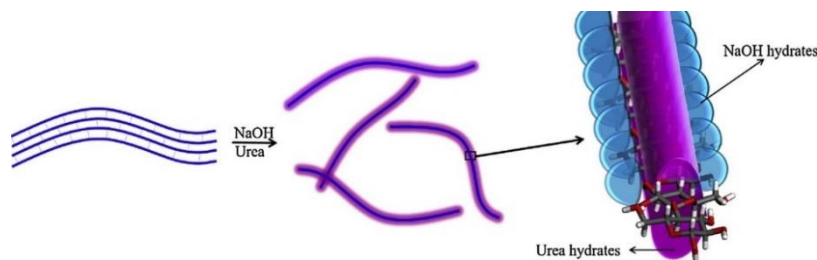
ตัวทำละลายใช้ในการละลายเซลลูโลส	ข้อดี	ข้อเสีย
ของเหลวไอออนิก [18]	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ละลายได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส</li> <li>-มีความสามารถในการละลายที่ดี</li> <li>-ความดันไอต่ำ มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีที่ดี</li> <li>-มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน</li> <li>-สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-มีความหนืดสูง</li> <li>-ความบริสุทธิ์ของเหลวไอออนิกเนื่องจากสามารถดูดความชื้นได้ดีทำให้ไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำในโครงสร้างของเซลลูโลส</li> <li>-ความคุ้มทุนในการนำกลับมาใช้ใหม่ต่ำ จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในระดับที่ใหญ่กว่าการทดลอง</li> </ul>
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ [19]	<ul style="list-style-type: none"> <li>-เป็นสารเคมีที่หาได้ง่าย มีราคาที่ไม่แพง และยังใช้งานง่าย</li> <li>-มีมลพิษต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-จำเป็นต้องทำการละลายที่อุณหภูมิต่ำ</li> <li>-ไม่สามารถละลายเซลลูโลสที่มีความวอลโมเลกุลที่สูง ๆ หรือมีความเป็นผลึกสูงได้</li> </ul>



ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของตัวทำละลายในการละลายเซลลูโลส (ต่อ)

วิธีที่ใช้ในการละลาย เซลลูโลส	ข้อดี	ข้อเสีย
สารละลายผสมระหว่าง ลิเทียมคลอไรด์/ เอ็นเอ็น-ไดเมทิลเอซี- ตาไมด์ [20]	-สามารถละลายเซลลูโลสที่มีมวล โมเลกุลและผลึกที่สูงได้ -มีความปลอดภัยในการใช้งาน เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำและม ีความเป็นพิษที่ต่ำ -มีค่าการละลายที่มากกว่า สารละลายระหว่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย	-ใช้เวลานานในการละลาย -มีปัญหาคือในขั้นตอนการ วิเคราะห์หรือการแยกด้วย เทคนิคโครมาโทกราฟี -ไม่มีเสถียรภาพต่อความชื้น
สารละลายระหว่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์/ ยูเรีย [21]	-สามารถละลายเซลลูโลสที่มีมวล โมเลกุลและผลึกที่สูงได้ -ใช้เวลาน้อยในการละลาย -มีความปลอดภัยในการใช้งาน เนื่องจากมีความเป็นพิษที่ต่ำ -ราคาถูกกว่าลิเทียมไฮดรอกไซด์	-มีค่าการละลายที่น้อยกว่า สารละลายระหว่างลิเทียม ไฮดรอกไซด์/ยูเรีย

ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยมีความสนใจในการละลายเซลลูโลสในสารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย เนื่องจากความปลอดภัยในการใช้งานที่ใช้อุณหภูมิต่ำในการละลาย มีความเป็นพิษน้อย สามารถละลายเซลลูโลสได้อย่างรวดเร็ว และสารเคมีที่ใช้มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับสารละลายชนิดอื่น โดย Liu และ Sun [22] อธิบายผลการละลายเซลลูโลสโดยใช้สารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ว่าการกระจายตัวของไอออน  $\text{Na}^+$  ที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลส ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการถ่างออกจากกัน จากนั้น ไอออน  $\text{Na}^+$  และ  $\text{OH}^-$  จะเข้าไปเกาะตัวที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซิลและไฮดรอกซีเมทิลของเซลลูโลส ในส่วนของยูเรียจะไปเกาะอยู่ที่ผิวหน้าของวงแหวนไพราโนส (pyranose) ในสายโซ่ของเซลลูโลส เพื่อรักษาเสถียรภาพของการละลายไม่ให้สายโซ่เซลลูโลสเข้ามารวมตัวกันอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการละลายของเซลลูโลสในสารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย [22]

### 2.1.3 การเชื่อมขวางของเซลลูโลสไฮโดรเจล

การเชื่อมขวางของเซลลูโลสไฮโดรเจลแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

#### 1) การเชื่อมขวางทางกายภาพ

การเชื่อมขวางทางกายภาพของเซลลูโลสสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ ได้แก่ การเชื่อมขวางโดยการเกิดผลึก การเชื่อมขวางโดยพันธะไฮโดรเจน และการเชื่อมขวางโดยการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลส โดยข้อดีของการเชื่อมขวางทางกายภาพ คือ ไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมขวาง (cross-linking agent) ส่งผลให้ไม่มีการหลงเหลือของสารเชื่อมขวางในไฮโดรเจล หากแต่ข้อเสียของการเชื่อมขวางทางกายภาพ คือ ความไม่สม่ำเสมอของการเชื่อมขวางและเสถียรภาพทางโครงสร้างที่ต่ำกว่าการเชื่อมขวางทางเคมี ซึ่งจะส่งผลต่อการควบคุมสมบัติต่าง ๆ ของเซลลูโลสไฮโดรเจล

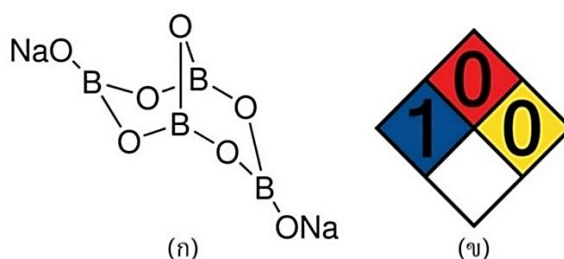
#### 2) การเชื่อมขวางทางเคมี

การเชื่อมขวางทางเคมีของเซลลูโลสเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลส โดยอาศัยสารเคมีหรือสารเชื่อมขวางในการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลส ซึ่งข้อดีของการเชื่อมขวางทางเคมี คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (cross-linking density) ได้ ทำให้การเชื่อมขวางเป็นไปได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้เราสามารถทำนายและควบคุมสมบัติต่าง ๆ ได้ดี หากแต่มีข้อเสีย คือ จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมขวาง ซึ่งจะต้องมีค่าใช้จ่ายและมีขั้นตอนเพิ่มเติม รวมถึงอาจมีการหลงเหลือของสารเชื่อมขวางในไฮโดรเจลที่จะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ โดยการเชื่อมขวางทางเคมีของเซลลูโลสได้มีการรายงานไว้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสให้เป็นเกลือโซเดียมของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (sodium salt of carboxymethylcellulose, CMCNa) ก่อนจะนำมาทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมขวางกับไดไวโนลซัลโฟน

(divinyl sulfone, DVS) [23] การเตรียมเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจลโดยใช้บอแรกซ์ เป็นสารเชื่อมขวาง [17] และการเชื่อมขวางโดยใช้สารเชื่อมขวาง เช่น กรดซิตริก (citric acid) ไกลออกซอล (glyoxal) กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) และบอแรกซ์ เป็นต้น [24]

#### 2.1.4 การเชื่อมขวางของบอแรกซ์

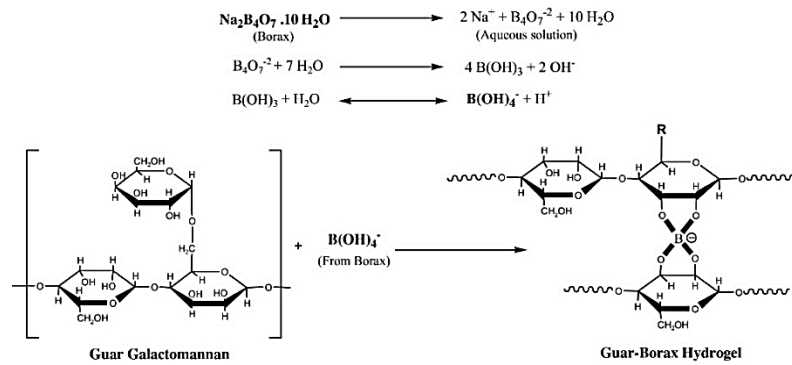
บอแรกซ์ [25] เป็นสารประกอบเกลือของโบรอน โดยมีชื่อตามระบบ IUPAC ว่า sodium tetraborate decahydrate ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ลักษณะทางกายภาพของบอแรกซ์ คือเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น และมีรสชาติขมเล็กน้อย นอกจากนี้ สมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ (National Fire Protection Association, NFPA) ของสหรัฐอเมริกา ได้ระบุว่าบอแรกซ์มีอันตรายต่อสุขภาพที่ระดับ 1 ถือว่าเป็นระดับความอันตรายต่อสุขภาพที่อาจจะก่อให้เกิดเพียงการระคายเคือง ดังแสดงรูปสัญลักษณ์ตาม NFPA ในรูปที่ 2.3 (ข) [4] ส่งผลให้ บอแรกซ์เป็นสารเคมีที่มีการใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น ในด้านของอาหาร เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมโลหะ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างบอแรกซ์, (ข) รูปสัญลักษณ์ตาม NFPA ของบอแรกซ์ [4]

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสโดยใช้ บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง เนื่องจากบอแรกซ์มีราคาถูก มีความเป็นพิษต่ำและสามารถละลายในน้ำ ได้ อีกทั้งยังมีรายงานวิจัยของ Han และคณะ [17] ที่แสดงให้เห็นว่าบอแรกซ์มีความสามารถในการ เป็นสารเชื่อมขวางระหว่างเซลลูโลสได้ หรือในรายงานวิจัยของ Thombare และคณะ [26] ที่ได้ นำเสนอถึงปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของกาแลคโทแมนแนนซึ่งเป็น

พอลิแซคคาไรด์ในกัวกัม (Guar gum) กับไอออนของเตตระไฮดรอกซีบอเรต (tetrahydroxyborate ion) ที่เกิดจากการละลายน้ำของบอแรกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างกาแลคโทแมนแนนและบอแรกซ์ [26]

## 2.2 ผักตบชวา

ผักตบชวา (water hyacinth) [27] หรือชื่อวิทยาศาสตร์ *Eichhornia crassipes* เป็นพืชล้มลุกที่พบได้ในทุกสภาพน้ำ มีแหล่งกำเนิดอยู่ที่ป่าดิบชื้นอะแมซอน (Amazon) ในทวีปอเมริกาใต้ ถูกนำเข้ามาประเทศไทยเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2444 จากประเทศอินโดนีเซีย และเกิดกันขยายพันธุ์ในลุ่มน้ำภายในประเทศอย่างรวดเร็ว ลักษณะรูปร่างของผักตบชวา ดังแสดงในรูปที่ 2.5



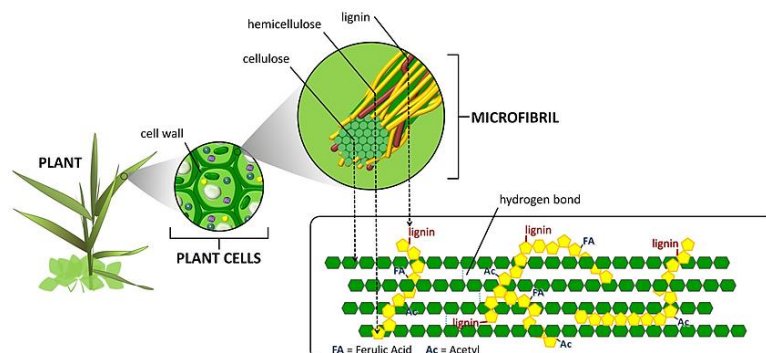
รูปที่ 2.5 ผักตบชวา [28]

ลักษณะการขยายพันธุ์ทำได้โดยการใช้เมล็ดหรือไหล (เกิดขึ้นบริเวณซอกใบ) ในสภาวะปกติ ผักตบชวาจะอาศัยการขยายพันธุ์โดยไหลเป็นหลัก นอกเสียจากเกิดภาวะน้ำแห้งการขยายพันธุ์ของ ผักตบชวาจะเป็นการขยายพันธุ์โดยเมล็ด ไหลที่เกิดขึ้นจากผักตบชวาต้นแม่จะเกิดขึ้นและเติบโต ติดกันทำให้การขยายพันธุ์ของผักตบเกิดการแผ่ออกจากต้นแม่และยึดติดกันเป็นแพลอยอยู่บนผิวน้ำ ผักตบชวาหนึ่งต้นสามารถขยายพันธุ์ได้หนึ่งพันต้นในเวลาหนึ่งเดือน ส่งผลให้เกิดมลภาวะทางน้ำต่าง ๆ มากมาย เช่น การไปกีดขวางการไหลของทางน้ำ การทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน การอุดตันของทาง ระบายน้ำ รวมถึงการทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียจากการไปบดบังแสงอาทิตย์ทำให้พืชพันธุ์ใต้น้ำไม่สามารถ สังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจนที่เพียงพอต่อสัตว์น้ำต่าง ๆ ในระบบนิเวศ [29]

ในงานวิจัยนี้ทางคณะผู้วิจัยมีความสนใจในการใช้ผักตบชวาเป็นแหล่งของเซลล์ulos เนื่อง จาก ผักตบชวามีปริมาณลิกนินอยู่น้อยเพียงร้อยละ 5-9 ทำให้ง่ายต่อการสกัดเซลล์ulos ให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ผักตบชวายังเป็นวัชพืชที่มีปริมาณมากและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับแหล่งที่มาของเซลล์ulos อื่น ๆ ซึ่งการเลือกใช้ผักตบชวาในการเป็นแหล่งที่มาของเซลล์ulosจึงเป็นการส่งเสริมให้เกิดการใช้ ประโยชน์จากผักตบชวา รวมทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผักตบชวาอีกด้วย

### 2.2.1 ส่วนประกอบของผักตบชวา

เป็นที่ทราบกันดีว่าผนังเซลล์จะพบได้เฉพาะในพืชซึ่งเป็นส่วนที่เพิ่มความแข็งแรง และช่วยในการค้ำจุนโครงสร้างของเซลล์พืช โดยผนังเซลล์พืชนั้นจะประกอบไปด้วยสารประกอบที่ สำคัญ ได้แก่ เซลลูลอส เฮมิเซลลูลอส ลิกนิน [30] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยปริมาณของสาร องค์ประกอบในเนื้อไม้หรือพืชนั้นก็แตกต่างกันไปตามแต่สายพันธุ์และแหล่งที่มาของไม้หรือพืชนั้น ๆ ผักตบชวาถือว่าเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนพืชทั่วไป โดยองค์ประกอบของ ผักตบชวาประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่สำคัญ เช่น เซลลูลอส เฮมิเซลลูลอส ลิกนิน เพกทิน และ สารประกอบอนินทรีย์ เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม ซิลิกอน เป็นต้น

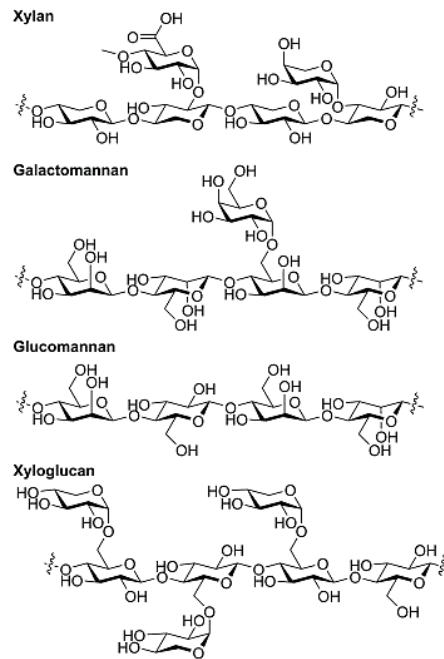


รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของสารประกอบต่าง ๆ ในเนื้อไม้หรือพืช [31]

สารประกอบที่สำคัญของผักตบชวาประกอบไปด้วย

### 2.2.1.1 เฮมิเซลลูโลส

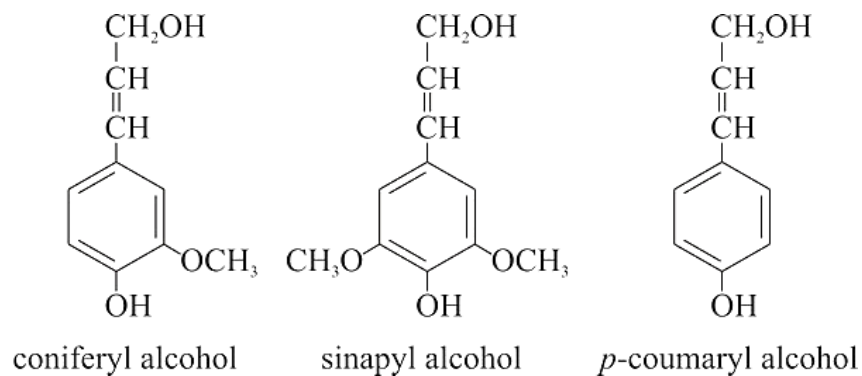
เฮมิเซลลูโลส [32] จัดเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ประเภทหนึ่ง ที่สายโซ่หลักของเฮมิเซลลูโลสประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสตั้งแต่ 50-300 โมเลกุล จัดว่าเป็นขนาดของโมเลกุลที่ไม่ใหญ่มากนักเพื่อเทียบกับโมเลกุลของเซลลูโลส (หน่วยย่อยของเซลลูโลสมีปริมาณ 500-10000) สูตรโครงสร้างอย่างง่ายคือ  $[C_5(H_2O)_4]_n$  หรือ  $[C_6(H_2O)_5]_n$  เฮมิเซลลูโลสมีความเป็นอสัณฐานมากกว่าเซลลูโลสอันเนื่องมาจากความเป็นกึ่ง ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่าเซลลูโลสรวมถึงทำให้สามารถละลายน้ำได้ที่สภาวะความเป็นด่างแบบอ่อน ๆ โดยในแต่ละโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลที่หลากหลาย ได้แก่ ไซโลส มานโนส กาแลคโตส อาราบิโนส เป็นต้น โดยตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีที่สำคัญของเฮมิเซลลูโลส ได้แก่ ไซแลน กาแลคโทแมนแนน กลูโคแมนแนนและไซโลกูแคน แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลสแต่ละชนิด [33]

### 2.2.1.2 ลิกนิน

ลิกนิน [34] คือสารประกอบเชิงซ้อนที่มีส่วนประกอบของสารที่เป็นหมู่แอโรมาติก (aromatic) โมเลกุลของลิกนินมีขนาดใหญ่มากและมีความซับซ้อนสูง สูตรอย่างง่ายของลิกนิน คือ  $(C_{10}H_{12}O_4)_n$  ลิกนินเป็นสารประกอบที่ช่วยในการยึดติดของเซลลูโลส เป็นส่วนช่วยให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ของพืช สมบัติต่าง ๆ ของลิกนิน ได้แก่ การไม่ละลายน้ำ ไม่ยืดหยุ่น มีน้ำตาล เป็นต้น สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างลิกนินทั้ง 3 ชนิด แสดงในรูปที่ 2.8

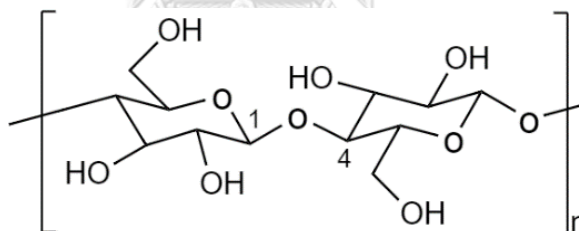


รูปที่ 2.8 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างลิกนิน [35]



### 2.2.1.3 เซลลูโลส

เซลลูโลส [36] คือ สารประกอบอินทรีย์ของพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งปีต้า-1,4 ( $\beta$  (1-4 glycosidic bond)) ของโมเลกุลกลูโคส ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยมีสูตรโครงสร้างอย่างง่ายคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  จำนวนหน่วยย่อยของเซลลูโลส (degree polymerization, DP) อยู่ในช่วง 500-10000 [37] ในหนึ่งหน่วยย่อยจะประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ส่งผลให้เซลลูโลสมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรง มีอุณหภูมิการสลายตัวสูง และไม่ละลายในสารละลายอินทรีย์ในภาวะปกติ เซลลูโลสจะพบมากในผนังเซลล์ของพืช ดังนั้นเซลลูโลสจึงเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ใช้แล้วเกิดขึ้นทดแทนได้ ในปัจจุบันปริมาณของวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งวัสดุชีวมวลเหล่านั้นนอกจากจะต้องกำจัดทิ้งหรือนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงก็ยังสามารถนำมาเป็นแหล่งในการผลิตเซลลูโลสได้ เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด กากมะพร้าว และใบสับปะรด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีวัชพืชและพืชตระกูลหญ้าอื่น ๆ ที่สามารถเป็นแหล่งชีวมวลในการผลิตเซลลูโลสได้ เช่น หญ้าคา ใบธูปฤาษี ผักตบชวา เป็นต้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในแต่ละแหล่งที่มาถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ในงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมเซลลูโลสจากผักตบชวา แม้ว่าปริมาณเซลลูโลสของผักตบชวาจะไม่สูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณเซลลูโลสจากแหล่งอื่น เช่น ไม้หรือชังข้าวโพดที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 35-50 และ 50.5 ตามลำดับ แต่ผักตบชวามีปริมาณลิกนินเพียงร้อยละ 5-9 ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่ต่ำมาก ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณสารเคมีที่มากและขั้นตอนในการสกัดที่ยุ้งยากในการสกัด โดยการสกัดเซลลูโลสจากผักตบชวาจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



ตารางที่ 2.6 ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในแต่ละแหล่งที่มา [38]

แหล่งที่มาของเซลลูโลส	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)	ลิกนิน (ร้อยละ)
ไม้	35-50	20-30	25-30
ชานอ้อย	19-24	32-48	23-32
ซังข้าวโพด	50.5	31	15
ฟางข้าว	32.1	24	18
หญ้ามิสแคนทัส	24	44	17
ผักตบชวา	18-35	18-49	5-9

### 2.2.2 การสกัดเซลลูโลสจากผักตบชวา

ในงานวิจัยนี้ต้องการเลือกสกัดเซลลูโลสจากผักตบชวา โดยการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของผักตบชวาที่มีความแตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดพันธุ์ของผักตบชวา แหล่งน้ำ สภาพแวดล้อม วิธีการสกัด [39] โดยในตารางที่ 2.5 จะแสดงถึงการศึกษาร้อยละองค์ประกอบของผักตบชวาที่แตกต่างกันในแต่ละวิธีของผู้ทำการทดลอง

ตารางที่ 2.7 การศึกษาร้อยละองค์ประกอบของผักตบชวาที่แตกต่างกันในแต่ละผู้ทำการทดลอง [40]

สารประกอบ (ร้อยละ)	ผู้ทำการทดลอง					
	Abraham & Kurup, 1996	Nigam, 2002	Gunnarsson & Petersen, 2007	Kumar et al., 2009	Sornvoraweat & Kongkiattikajorn, 2010	Reales- Alfaro, et al., 2013
เซลลูโลส	35.0	18.2	19.5	18.4	19.0	31.7
เฮมิเซลลูโลส	18.3	48.7	33.4	49.2	32.7	27.3
ลิกนิน	-	3.5	9.3	3.6	4.4	3.9

ในอดีตการสกัดเซลลูโลสทำได้โดยนำเยื่อไม้มาทำการบดและต้มกับซี้เถ้าเพื่อให้ได้เยื่อสีขาวของเซลลูโลสออกมา เมื่อเวลาผ่านไปการพัฒนาขั้นตอนการสกัดหรือสารเคมีที่ใช้ในการสกัดจึงมีหลากหลายมากขึ้น เซลลูโลสที่อยู่ในผนังเซลล์ของพืชจะอยู่ร่วมกับเพกทิน เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การทำให้เซลลูโลสบริสุทธิ์จะต้องทำการกำจัดสารจำพวกเพกทิน ไซ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารอื่น ๆ ที่ปนอยู่ในพืชออกไป การสกัดเซลลูโลสจากพืชในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การสกัดเชิงกล การสกัดเชิงเคมีกายภาพ การสกัดเชิงเคมี โดยการสกัดเซลลูโลสที่มีความนิยม ได้แก่ การสกัดด้วยกรด (hydrolysis) การสกัดด้วยด่าง (alkali extraction) การสกัดด้วยด่างและเปอร์ออกไซด์ (alkaline and peroxide extraction) การสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ (organic solvent extraction) เป็นต้น ดังแสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการสกัดเซลลูโลสในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.8 เทคนิคการสกัดเซลลูโลส [41]

เทคนิคการสกัด	ข้อดี	ข้อเสีย
การสกัดด้วยกรด (HCl)	สามารถกำจัดลิกนิน และเฮมิ-เซลลูโลสออกไปได้ดี ทำให้ได้เซลลูโลสที่บริสุทธิ์มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถเกิด ปฏิกิริยา ได้ ที่อุณหภูมิห้อง	ความแรงของกรดจะส่งผลให้เกิดการตัดสายโซ่ของเซลลูโลสบางส่วนได้ ทำให้เซลลูโลสที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง
การสกัดด้วยด่าง (NaOH)	มีความรุนแรงของปฏิกิริยาที่ไม่สูงมาก ทำให้การสกัดด้วยด่างได้เซลลูโลสที่มีปริมาณ น้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสสูง ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง	มีความสามารถในการกำจัดลิกนินต่ำ

ตารางที่ 2.9 เทคนิคการสกัดเซลลูโลส (ต่อ)

เทคนิคการสกัด	ข้อดี	ข้อเสีย
การสกัดด้วยด่างและเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )	เพิ่มความสามารถในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในไม้เนื้อแข็งได้ดี	ไม่เหมาะสำหรับไม้เนื้ออ่อน เนื่องจากจะเกิดการทำลายโครงสร้างของเซลลูโลส ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง
การสกัดด้วยด่างและสารฟอกขาว (สารฟอกขาว เช่น $NaClO$ )	เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการสกัดเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อน นอกจากจะกำจัดเฮมิเซลลูโลส หรือลิกนินได้ดีแล้ว ยังได้เซลลูโลสที่มีมวลโมเลกุลที่สูงอีกด้วย	มีความยุ่งยากรวมถึงการเพิ่มขึ้นของขั้นตอนในสกัด และปริมาณน้ำที่ใช้ในระหว่างกระบวนการเยอะ
การสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์	เป็นเทคนิคที่เกิดปฏิกิริยาไม่รุนแรงมากนัก ทั้งยังสกัดได้มวลโมเลกุลของเซลลูโลสที่สูง	การสกัดด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสกัด รวมทั้งเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดมีความบริสุทธิ์ที่ไม่สูงมากนัก

ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการสกัดด้วยด่างและใช้สารฟอกขาว เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการสกัดพืชเนื้ออ่อนอย่างผักตบชวาได้ดี อีกทั้งยังสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของเซลลูโลสทำให้น้ำหนักโมเลกุลที่สูง โดยด่างที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีราคาถูก ใช้งานง่าย และส่งผลต่อมลพิษต่ำ และใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์เป็นสารฟอกขาว เนื่องจากเป็นสารที่มีมลพิษต่ำ และยังให้ค่าความขาวที่สูงโดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของเซลลูโลส [42]

ภายหลังจากการเตรียมเซลลูโลสจากผักตบชวาเพื่อเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางแล้ว ในงานวิจัยนี้ทางคณะผู้วิจัยได้สนใจในการเพิ่มสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียให้กับไฮโดรเจลโดยใช้ว่านจระเข้ เนื่องจากว่านหางจระเข้เป็นสมุนไพรที่มีฤทธิ์ในการต่อต้านเชื้อ

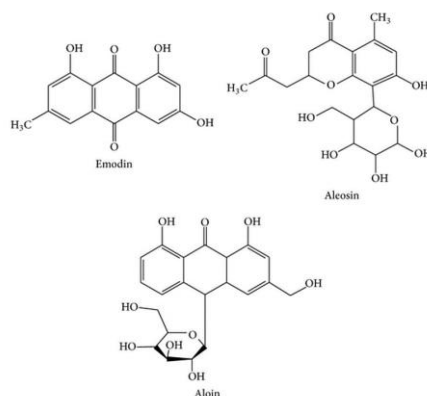
แบบที่เรีย และว่านหางจระเข้ประกอบไปด้วยสารละลายน้ำที่มีความใส ไม่มีสี จึงเหมาะต่อการดูดซึมสารละลายและไม่มีการเปลี่ยนสีของไฮโดรเจล

### 2.3 ว่านหางจระเข้

ว่านหางจระเข้ (aloe vera) [43] หรือชื่อวิทยาศาสตร์ *Aloe barbadensis* Mill ดังแสดงลักษณะในรูปที่ 2.10 เป็นไม้อวบน้ำล้มลุก ใบมีลักษณะเป็นข้อป้อม โคนใบมีขนาดใหญ่ไล่ไปแหลมที่ปลายใบ ขอบใบมี หนามแหลม ใบของต้นว่านหางจระเข้จะเป็นลักษณะเวียนรอบต้น ในใบของว่านหางจระเข้จะประกอบไปด้วยวุ้นใสที่มีน้ำเป็นปริมาณมาก ประโยชน์ของว่านหางจระเข้มีมากมาย เช่น นำมาทำเป็นอาหาร ตัวยารักษาโรค เครื่องสำอาง ใช้บรรเทาแผลไฟไหม้ เป็นต้น โดยทั่วไปว่านหางจระเข้มีสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ emodin, aloesin, aloin เป็นต้น ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบของสารฟีนอล (phenolic compounds) ดังแสดงโครงสร้างทางเคมีในรูปที่ 2.11

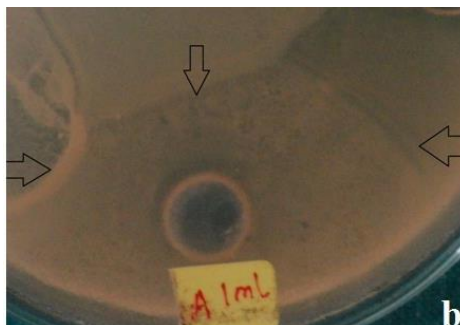


รูปที่ 2.10 ว่านหางจระเข้ [44]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในว่านหางจระเข้ [45]

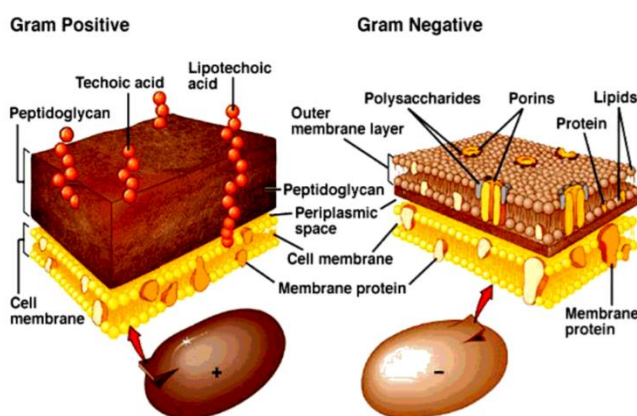
การต้านเชื้อแบคทีเรียของว่านหางจระเข้ได้มีการศึกษาและทำการวิจัยอย่างกว้างขวาง ในงานวิจัยของ Jain และคณะ [46] ได้ศึกษาการต้านเชื้อของว่านหางจระเข้โดยใช้ส่วนของเจลว่านหางจระเข้ละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide, DMSO) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าความเข้มข้นของเจลว่านหางจระเข้ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการต้านเชื้อแบคทีเรียมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 ของเจลว่านหางจระเข้ในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ พบว่ามีบริเวณในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Actinobacillus actinomycetemcomitans* อยู่ที่ 6.9 มิลลิเมตร เชื้อแบคทีเรีย *Clostridium bacilli* อยู่ที่ 6.3 มิลลิเมตร เชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* อยู่ที่ 6.8 มิลลิเมตร และเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* อยู่ที่ 6.6 มิลลิเมตร ดังแสดงบริเวณการต้านเชื้อในงานเพาะเชื้อที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 ของเจลว่านหางจระเข้ในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บริเวณการต้านเชื้อในงานเพาะเชื้อที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 ของเจลว่านหางจระเข้ในไดเมทิลซัลฟอกไซด์

## 2.4 กลไกการต้านเชื้อแบคทีเรีย

แบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สามารถเจริญเติบโตได้โดยการแบ่งตัวแบบทวิคูณ แบคทีเรียสามารถถูกจำแนกได้หลากหลายวิธี โดยที่นิยมการจำแนกแบคทีเรีย คือการจำแนกตามการย้อมติดสีแกรม (gram's stain) ซึ่งสามารถแบ่งแบคทีเรียได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียที่ย้อมติดสีแกรมบวก (gram positive) และแบคทีเรียที่ย้อมติดสีแกรมลบ (gram negative) โดยแบคทีเรียชนิดติดสีแกรมบวกจะมีผนังเซลล์ที่หนา สามารถทนความร้อน ฉายรังสี ความดันและสารเคมีได้มากกว่าแบคทีเรียย้อมติดสีแกรมลบ ดังแสดงลักษณะของผนังเซลล์ของแบคทีเรียทั้งสองชนิดในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่ย้อมติดสีแกรมบวกและลบ [47]

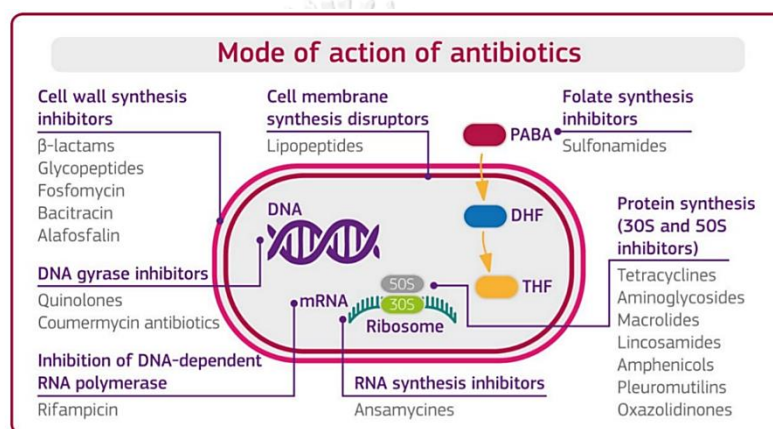
โดยกลไกการต้านเชื้อแบคทีเรียสามารถแบ่งได้ดังนี้ [47]

- 1) ควบคุมการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์หรือผนังเซลล์ โดยกลไกที่เกิดผลจากปัจจัยนี้ คือการทำให้เซลล์เกิดการแตกโดยการไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์จากเอนไซม์บางชนิด เช่น เอนไซม์ไลโซไซม์ (lysozyme) และกลไกที่มีสารเข้าไปทำปฏิกิริยากับเยื่อหุ้มเซลล์เพื่อขัดขวางการลำเลียงอาหารจากภายนอกเซลล์เข้าสู่ในตัวเซลล์ เช่น ฟิโนล
- 2) ควบคุมการทำงานของโปรตีนและไขมันภายในเซลล์ กล่าวคือ เป็นกลไกที่ทำลายโครงสร้าง ของโปรตีนหรือไขมันในเซลล์แบคทีเรียของสารเคมีจำพวกกรดหรือด่าง เช่น กรดน้ำส้มสายชู ไอออนของโลหะหนัก เช่น ไอออนของเงิน

3) การยับยั้งการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) ของทั้งกรดไรโบนิวคลีอิก (ribonucleic acid, RNA) และกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (deoxyribonucleic acid, DNA)

4) การยับยั้งการเผาผลาญกรดโฟเลต (inhibiting the folate metabolism) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์กรดเตตระไฮโดรโฟลิก (tetrahydrofolic acid, THF) และกรดไดไฮโดรโฟลิก (dihydrofolic acid, DHF) ส่งผลให้เซลล์ของแบคทีเรียหยุดการแบ่งตัว

โดยกระบวนการต้านเชื้อหรือยับยั้งแบคทีเรียขึ้นอยู่กับปัจจัยและตัวยาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [48]



รูปที่ 2.14 รูปแบบของการออกฤทธิ์ของยาต้านเชื้อแบคทีเรียบางชนิด

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ทำการศึกษากัดเซลล์โลสจากเส้นใยผักตบชวา ดังนี้

Sun และคณะ [41] เปรียบเทียบการกัดเซลล์โลสจากชานอ้อยด้วยสารละลายต่างความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) และทำการฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรต์ (sodium chlorite, NaClO<sub>2</sub>) พบว่า ความบริสุทธิ์ของเซลล์โลสที่สกัดโดยต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มีเซลล์โลสร้อยละ 96.7 เฮมิเซลล์โลสร้อยละ 3.7 และลิกนินร้อยละ 1.5) มีค่าสูงกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (มีเซลล์โลสร้อยละ 94.3 เฮมิเซลล์โลสร้อยละ 5.7 และลิกนินร้อยละ 1.6)

Goswami และคณะ [42] ศึกษาผลของการฟอกขาวของลิกนินโดยใช้สารฟอกขาวที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite, NaOCl) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และโซเดียมคลอไรต์ (sodium chlorite, NaClO<sub>2</sub>) พบว่าค่าความขาว (whiteness index) ในมาตรฐานของ Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ของสารตัวอย่างหลังกระบวนการฟอกขาวของโซเดียมไฮโปคลอไรท์มีค่าความขาวสูงที่สุด (61.27) รองลงมาคือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (49.56) และโซเดียมคลอไรต์ (43.68) ตามลำดับ

Istirokhatuna และคณะ [49] สกัดเซลลูโลสจากผักตบชวา โดยในขั้นแรกได้ทำการล้างใบหรือสารอื่น ๆ ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของผักตบชวาด้วยโทลูอีนและเอทานอลและทำการอบแห้ง ต่อมาทำการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและทำการฟอกขาวด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของเส้นใยผักตบชวาที่สกัดได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR) พบว่า พิกที่เลขคลื่น 1734 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นพิกแสดงลักษณะบ่งชี้ของหมู่เอสเทอร์ (ester functional group) ที่มีอยู่ในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสและลิกนินและพิกที่เลขคลื่น 1519 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นพิกของหมู่แอโรมาติก (aromatic C=C) ที่มีอยู่ในโครงสร้างลิกนินนั้นหายไป แสดงว่าการสกัดเซลลูโลสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และทำการฟอกขาวด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์สามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกไปจากเส้นใยได้

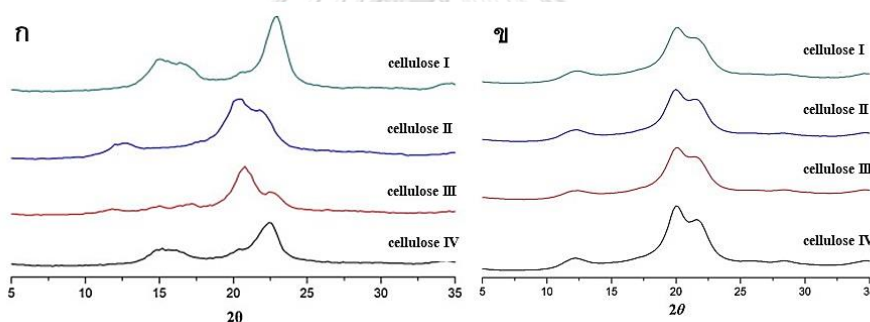
งานวิจัยที่ทำการศึกษการละลายเซลลูโลส มีดังต่อไปนี้

Qi และคณะ [50] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและผลของน้ำหนักโมเลกุลเซลลูโลสต่อความสามารถในการละลายของเซลลูโลสในสารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย พบว่าความสามารถในการละลายเซลลูโลสในสารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรียนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ โดยเซลลูโลสสามารถเริ่มละลายได้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลง และเซลลูโลสมีการละลายที่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ -12.6 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นสารละลายจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง เมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่า -12.6 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสส่งผลต่อ



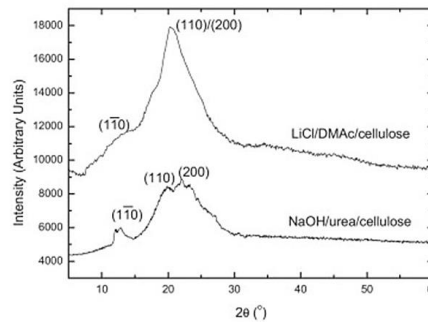
ความสามารถในการละลาย โดยความสามารถในการละลายเพิ่มมากขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ เซลลูโลสมีค่าลดลง

Chen และคณะ [51] ได้ทำการศึกษาความเป็นผลึกหลังจากการละลายของเซลลูโลสด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ที่อุณหภูมิ -12 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนร้อยละโดย น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย และน้ำ คือ 7 12 และ 81 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการ ตกตะกอนเซลลูโลสในสารละลายกลับมาอีกครั้งด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เมื่อทำการล้างและอบตะกอน พบว่าหลังจากทำการละลาย เซลลูโลสI เซลลูโลสII เซลลูโลสIII และ เซลลูโลสIV ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรียแล้ว ลักษณะผลึกของเซลลูโลสทั้งหมดจะเปลี่ยนไปคล้ายกับลักษณะผลึกของเซลลูโลสII ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เนื่องจากเซลลูโลสII มีการจัดเรียงผลึกที่เสถียรกว่าเซลลูโลสI



รูปที่ 2.15 กราฟ XRD ของ (ก) เซลลูโลสก่อนทำการละลาย และ (ข) เซลลูโลสหลังจากการละลาย ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย

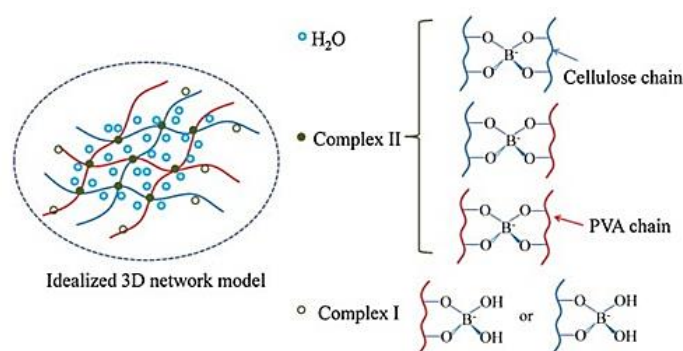
Pullawan และคณะ [52] ได้ศึกษาผลกระทบต่อความเป็นผลึกภายหลังการละลาย เซลลูโลสด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์/เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลแอสิตาไมด์ และสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากรูปที่ 2.16 รูปแบบ XRD ที่  $2\theta$  เท่ากับ  $12.1$   $19.8$  และ  $22.0^\circ$  ซึ่งเป็นระนาบของ  $(1 \bar{1} 0)$   $(1 1 0)$  และ  $(2 0 0)$  แสดงถึงลักษณะผลึกของ เซลลูโลสII ในส่วนของเซลลูโลสที่ได้จากการละลายลิเทียมคลอไรด์/เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลแอสิตาไมด์ จะพบพีกเป็นช่วงกว้างตั้งแต่  $2\theta$  เท่ากับ  $21-23^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของการเกิดพีกอันเป็นผล มาจากการใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.16 กราฟ XRD ของเซลลูโลสจากการละลายด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์/เอ็็น,เอ็็น-ไดเมทิลแอสีตาไมด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย

งานวิจัยที่ทำการศึกษการเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง ดังนี้

Han และคณะ [17] เตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้บอแรกซ์เป็นสารที่เชื่อมขวางและมีการเติมเซลลูโลสเข้าไปเป็นสารเสริมแรง จากการตรวจสอบพบลักษณะโครงสร้างโมเลกุลสองแบบ คือ บอแรกซ์เกิดปฏิกิริยาบนโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสโดยไม่เกิดการเชื่อมขวาง และบอแรกซ์เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสและเซลลูโลส, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และโซลลูโลส และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเกิดปฏิกิริยาของบอแรกซ์ในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลส

Thombare และคณะ [26] ศึกษาปริมาณของบอแรกซ์ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้มากที่สุดจากการเตรียมไฮโดรเจลจากกาแลคโตแมนแนนซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรต์ในแก้วกัมกับบอแรกซ์ โดยทำ

การไทเทรตปริมาณบอแรกซ์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก พบว่าปริมาณการเชื่อมขวางมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของบอแรกซ์ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 10 15 และ 20 ของน้ำหนักแก้ว

พัชราภรณ์ และคณะ [53] ได้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) ของแป้งข้าวเหนียวและไฮโดรเจลที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวมากกว่าของไฮโดรเจล โดยอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของแป้งข้าวเหนียวและไฮโดรเจลคือ 307 และ 299 องศาเซลเซียสตามลำดับ เนื่องจากความเป็นรูพรุนของไฮโดรเจลมีมากกว่าแป้ง ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าและมีการสลายตัวทางความร้อนได้ง่ายกว่า

งานวิจัยที่ทำการศึกษาศสมบัติวัสดุผสมกับว่านหางจระเข้ ดังนี้

Pereira และคณะ [54] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลแอลจินตและว่านหางจระเข้เพื่อใช้เป็นวัสดุในการรักษาบาดแผลรวมถึงการเป็นวัสดุช่วยในระบบการส่งยา โดยทางผู้วิจัยมีขั้นตอนในการเตรียมไฮโดรเจลผ่านสารละลายน้ำ โดยการเตรียมโซเดียมแอลจินตและว่านหางจระเข้ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมบัติที่ได้ จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมว่านหางจระเข้ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นจะมีความโปร่งใสมากขึ้น มีปริมาณการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และช่วยลดเวลาในการย่อยสลายตัวของฟิล์มไฮโดรเจล

Alemdar และ คณะ [55] ได้ทำการทดลองการต้านเชื้อแบคทีเรียของน้ำว่านหางจระเข้ โดยใช้แผ่นกระดาษที่ผ่านการฆ่าเชื้อมาจุ่มลงในน้ำว่านหางจระเข้ที่ไม่ได้ทำการเจือจาง หลังจากนั้นนำไปทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่าฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียของน้ำว่านหางจระเข้สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียต่าง ๆ ได้ โดยฤทธิ์ในการต้านเชื้อแคนดิดา อัลบิแคนส์ (*Candida albicans*, *C. albicans*) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณในการต้านเชื้อสูงสุดอยู่ที่ 30 มิลลิเมตร และฤทธิ์ในการต้านเชื้อไมโครคอคคัส ลูเทียส (*Micrococcus luteus*, *M. luteus*) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณในการต้านเชื้อต่ำสุดอยู่ที่ 9 มิลลิเมตร

Baghersad และคณะ [56] ได้ศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรียของว่านหางจระเข้ที่เติมลงในเจลาตินและพอลิคาโพรแลคโตน (poly( $\epsilon$ -caprolactone), PCL) เพื่อผลิตเป็นแผ่นเส้นใยสังเคราะห์

สำหรับใช้แทนผิวหนัง พบว่าแผ่นเส้นใยที่มีวุ้นหางจระเข้ผสมอยู่ (Gel/AV-PCL) มีบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*) อยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และมีบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli*, *E. coli*) อยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และเมื่อมีการเติมเททราไซคลิน ไฮโดรคลอไรด์ (tetracycline hydrochloride, TCH) ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะลงในเส้นใย พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดอยู่ที่ 22 มิลลิเมตร



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เส้นใยผักตบชวาแห้ง ชื่อวิทยาศาสตร์ *Eichornia crassipes* (Mart.) Solms จากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย
2. ว่านหางจระเข้ ชื่อวิทยาศาสตร์ *Aloe barbadensis* Mill. สายพันธุ์ *Barbadensis* จากจังหวัดนครปฐม ประเทศไทย
3. เอทานอล (ethanol) เกรดทางการค้า ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 จากบริษัท CT Chemical จำกัด
4. โทลูอีน (toluene) เกรดทางการค้า ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 จากบริษัท CT Chemical จำกัด
5. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) เกรดวิเคราะห์ ความเข้มข้นร้อยละ 36.5-38 จากบริษัท J.T. Baker Chemicals จำกัด
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 จากบริษัท Loba Chemie จำกัด
7. โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite, NaClO) เกรดห้องปฏิบัติการ ความเข้มข้นร้อยละของคลอรีน 4-6 จากบริษัท Loba Chemie จำกัด
8. ยูเรีย (urea) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99-100.5 จากบริษัท Ajax Finechem จำกัด
9. บอแรกซ์ (borax) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จากบริษัท Ajax Finechem จำกัด

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์สมบัติ

#### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมเซลล์และเซลล์/วางทางจระเข้ไฮโดรเจล

1. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบควบคุมด้วยระบบแอนะล็อก (stirring/temperature controlled analog hot plate) รุ่น MR Hei-Standard ของบริษัท Heidolph Instruments GmbH & Co. KG (เยอรมนี)
2. เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (electronic balance) รุ่น Pioneer Series ของบริษัท OHAUS จำกัด รุ่น (สวีตเซอร์แลนด์)
3. เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuged machine) รุ่น 2420 ของบริษัท Kubota จำกัด (ญี่ปุ่น)
4. เครื่องกรองสุญญากาศ (aspirator) รุ่น Aspirator A-2S ของบริษัท EYELA จำกัด (ญี่ปุ่น)
5. เตาอบในห้องปฏิบัติการ (lap oven) รุ่น UN55 ของบริษัท Memmert GmbH & Co. KG (เยอรมนี)
6. เครื่องวัดความหนา ขนาด 0-10 มิลลิเมตร (thickness gauge) รุ่น 7301 ของบริษัท Mitutoyo จำกัด (ญี่ปุ่น)
7. เครื่องปั่นอเนกประสงค์ (blender) รุ่น HR2118 ของบริษัท Philips จำกัด (เนเธอร์แลนด์)
8. เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dryer) รุ่น BETA 1-8 LD plus ของบริษัท Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen จำกัด (เยอรมนี)

#### 3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติ

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) Nicolet 6700 ของบริษัท Thermo Scientific จำกัด (สหรัฐอเมริกา)
2. เครื่องวัดความหนืด (viscometer) รุ่น RVDV-E จากบริษัท AMETEK Brookfield จำกัด (สหรัฐอเมริกา)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6610LV ของบริษัท JEOL จำกัด (ญี่ปุ่น)
4. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) รุ่น CE7000 ของบริษัท X-Rite จำกัด (สหรัฐอเมริกา)
5. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โทรมิเตอร์ (x-ray diffractometer, XRD) รุ่น D8 Advance ของบริษัท Bruker จำกัด (อังกฤษ)

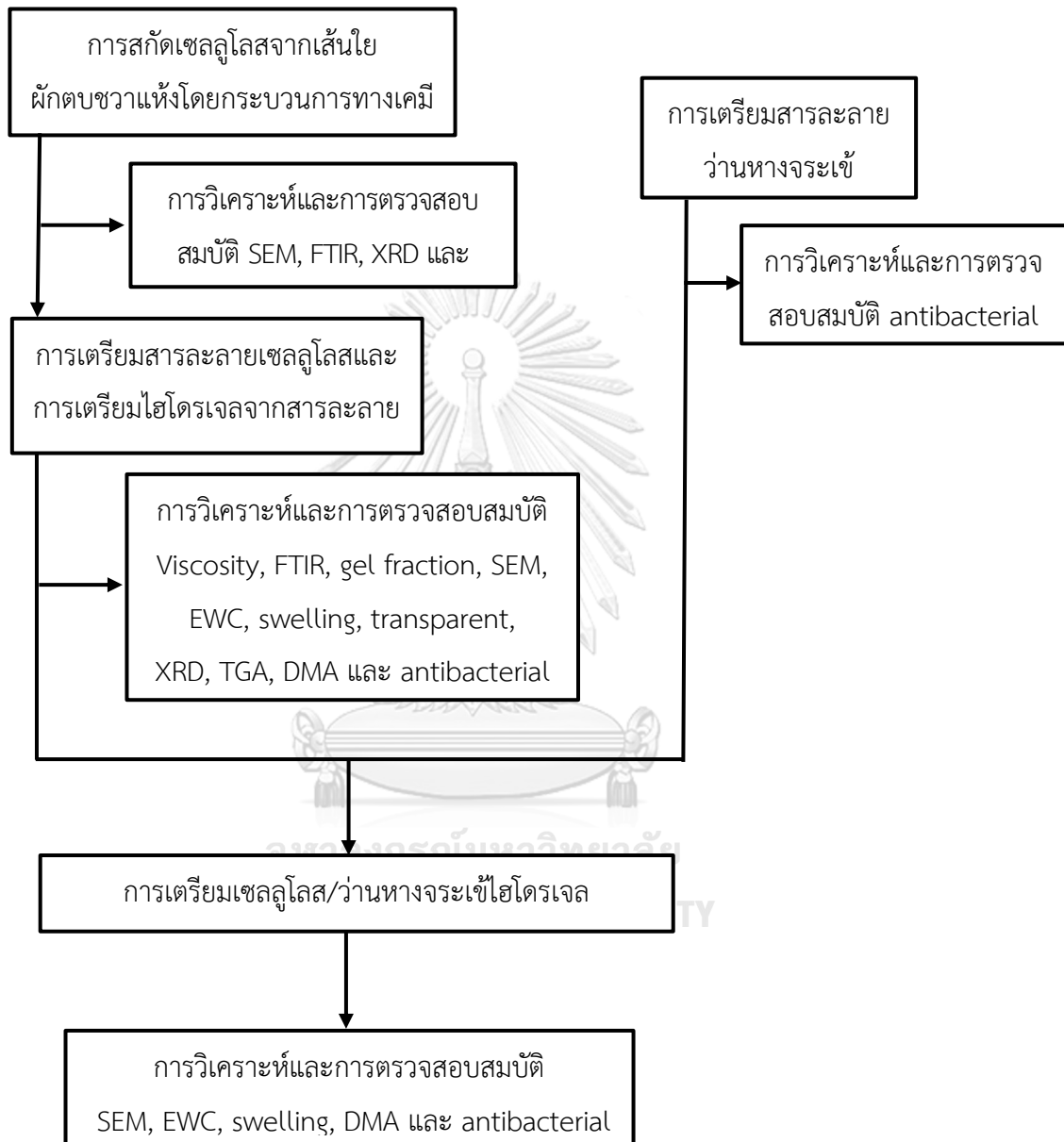
6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) รุ่น DMA861<sup>e</sup> ของบริษัท Mettler Toledo จำกัด (สหรัฐอเมริกา)

7. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น TGA/DSC<sup>3+</sup> STAR<sup>e</sup> ของบริษัท Mettler Toledo จำกัด (สหรัฐอเมริกา)



### 3.3 แผนผังการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามแผนผังดังรูปที่ 3.1



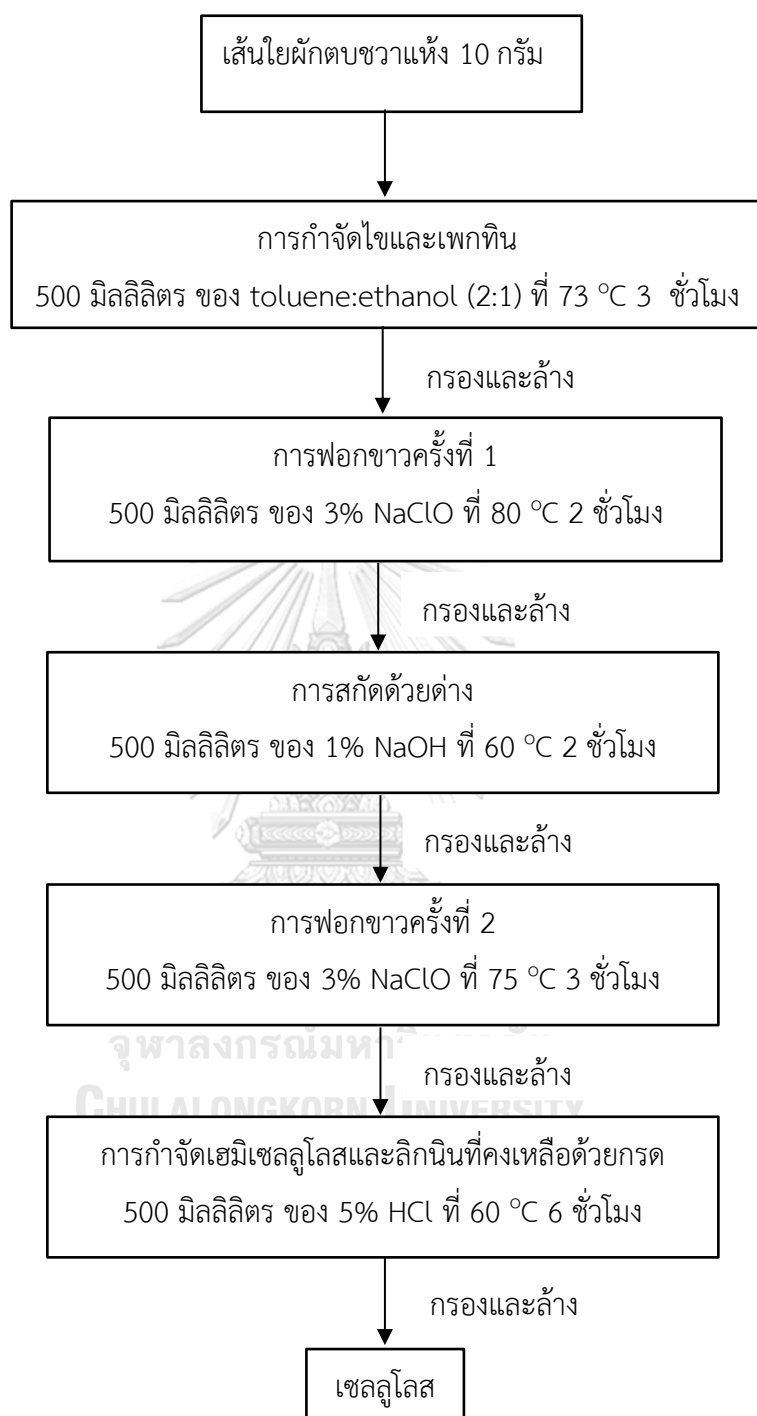
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย



### 3.4. วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การสกัดเซลลูโลสจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี

กระบวนการสกัดเซลลูโลสได้ดำเนินการตามงานวิจัยของ Sundari และคณะ [57] ภายหลังจากทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของการฟอกขาวในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด การสกัดถูกดำเนินการเพื่อกำจัดสารประกอบอื่นในเส้นใยผักตบชวาแห้ง เช่น เพกทินเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เริ่มต้นจากการนำเส้นใยผักตบชวาแห้งน้ำหนัก 10 กรัมมาทำการกำจัดไคและเพกทินด้วยสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอทานอลในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยทำการกวนที่อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการกรองเส้นใยด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ และล้างเส้นใยที่เตรียมได้ด้วยน้ำปราศจากไอออน หลังจากนั้นจึงทำการกำจัดลิกนิน โดยกระบวนการฟอกขาว (bleaching) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร และทำการกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการกรองเส้นใยด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อปรับค่าความเป็นกรด - ด่าง ให้มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6 ถึง 7 ต่อมาจึงทำการกำจัดเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งในขั้นตอนนี้ทำการกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยเส้นใยที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกกรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกระทั่งเส้นใยมีค่าความเป็นกลางทางกรด - ด่าง ต่อมาเส้นใยจะถูกนำไปฟอกขาวอีกครั้งด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร และทำการกวนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้เส้นใยจะถูกล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกระทั่งเป็นกลางและกรองเส้นใยด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ จึงนำไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร และทำการกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยเส้นใยที่เตรียมได้จะถูกกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน หลังจากนั้นจึงนำเส้นใยที่สกัดได้มาทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งสารที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นใย สีขาว โดยแผนผังการสกัดเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวาแห้งด้วยกระบวนการทางเคมีและการติดตั้งชุดการสกัดเซลลูโลสได้แสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



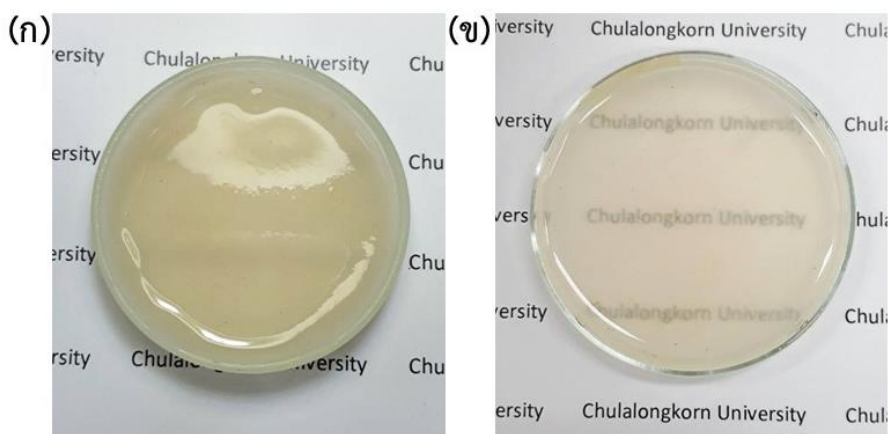
รูปที่ 3.2 แผนผังการสกัดเซลลูโลสจากเส้นใยฝักตบขาวแห้งด้วยกระบวนการทางเคมี



รูปที่ 3.3 การติดตั้งชุดการสกัดเซลลูโลส

#### 3.4.2 การเตรียมสารละลายเซลลูโลส

นำเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยกระบวนการทางเคมีปริมาณ 3 กรัมมาละลายในสารละลายผสมปริมาตร 100 กรัม โดยมีอัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์:ยูเรีย:น้ำปราศจากไอออน เท่ากับ 7:21:81 โดยน้ำหนัก [50] โดยทำการละลายที่อุณหภูมิประมาณ -12 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 นาที จะได้สารละลายที่มีลักษณะใส โดยรูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของก่อนและหลังละลายเซลลูโลสที่อุณหภูมิประมาณ -12 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 (ก) ก่อนและ (ข) หลังละลายเซลลูโลสที่อุณหภูมิประมาณ -12 องศาเซลเซียส

### 3.4.3 การเตรียมไฮโดรเจลจากสารละลายเซลลูโลส

นำสารละลายเซลลูโลสที่เตรียมได้มาผสมกับบอแรกซ์ที่อัตราส่วน 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 เท่าของน้ำหนักเซลลูโลส ดังแสดงปริมาณในตารางที่ 3.1 สารละลายเซลลูโลส-บอแรกซ์ ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ที่เตรียมได้จะถูกเทลงในจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร และทิ้งไว้เป็นระยะเวลาประมาณ 3 วัน จนกระทั่งกลายเป็นเจล ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติของเซลลูโลสไฮโดรเจล เพื่อเลือกอัตราส่วนของสารละลายบอแรกซ์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมและนำไปเตรียมเซลลูโลส/วุ้นทางจระเข้ไฮโดรเจลต่อไป

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของเซลลูโลสและบอแรกซ์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรีย 100 มิลลิลิตร

ไฮโดรเจล	เซลลูโลส (กรัม)	บอแรกซ์ (กรัม)
1/0	3	0
1/1	3	3
1/2	3	6
1/3	3	9
1/4	3	12
1/5	3	15



รูปที่ 3.5 เซลลูโลสไฮโดรเจล

#### 3.4.4 การเตรียมสารละลายวุ้นหางจระเข้และการเตรียมเซลลูโลส/วุ้นหางจระเข้ไฮโดรเจล

นำใบวุ้นหางจระเข้มาล้างด้วยน้ำเพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ติดมาจากการเพาะปลูก ต่อมาทำการลอกเปลือกวุ้นหางจระเข้ ออก ล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งก่อนนำเจลวุ้นหางจระเข้ที่ได้ไปปั่นด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ หลังจากนั้นนำวุ้นหางจระเข้ที่ปั่นแล้วทำการแยกส่วนที่ไม่ละลายออกไปด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง และนำวุ้นหางจระเข้ที่ได้จากขั้นตอนนี้ไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จนกระทั่งได้ผงวุ้นหางจระเข้

ผงวุ้นหางจระเข้ที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะถูกนำไปผสมกับน้ำปราศจากไอออนที่อัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำเซลลูโลสไฮโดรเจลที่มีสมบัติที่เหมาะสมมาแช่ในสารละลายวุ้นหางจระเข้เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ความหนืด

ทำการวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายเซลลูโลสและสารละลายเซลลูโลสที่ทำการเติมบอแรกซ์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัดความหนืด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้ความเร็วรอบในการทดสอบอยู่ที่ 1, 2, 5, 10 และ 12 รอบต่อนาที และใช้เข็มเบอร์ 5 ในการทดสอบ



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหนืด

### 3.5 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

#### 3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยผักตบชวาแห้ง เซลลูโลสสกัดด้วยกระบวนการทางเคมีและเซลลูโลสไฮโดรเจลที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยนำสารตัวอย่างที่อบแห้งแล้วมาบดเป็นผงผสมกับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ก่อนนำไปอัดเป็นแผ่นใส โดยทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่น  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.7 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

### 3.5.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใยผักตบชวาแห้งและเซลลูโลสสกัดด้วยกระบวนการทางเคมีหลังจากทำการอบเส้นใยทั้งสองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของเซลลูโลสไฮโดรเจลและเซลลูโลส/ว่านหางจระเข้ไฮโดรเจลที่ทำการหักด้วยมือหลังผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยนำชิ้นทดสอบมายึดติดบนแท่นวางชิ้นทดสอบ ทำการเคลือบทองบาง ๆ บนพื้นผิวเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับชิ้นทดสอบ แล้วทำการตรวจสอบที่พลังงานอิเล็กตรอน 5 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.5.4 การตรวจสอบสมบัติการบวมตัวในน้ำ ค่าปริมาณน้ำสมดุล และค่าร้อยละการเป็นเจล

ทำการวิเคราะห์การบวมตัวในน้ำ (swelling ratio) ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่ภาวะสมดุล (equilibrium water content, EWC) ของเซลลูโลสไฮโดรเจล และเซลลูโลส/ว่านหางจระเข้ไฮโดรเจล ทำได้โดยการนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทำแห้งโดยการแช่เยือกแข็งมาแช่ในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาประสิทธิภาพในการบวมตัวในน้ำและปริมาณ

น้ำที่ภาวะสมดุลของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 โดย  $W_s$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่บวมตัวในน้ำ และ  $W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งแล้ว

$$\text{swelling ratio (\%)} = \left( \frac{W_s - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{EWC (\%)} = \left( \frac{W_s - W_d}{W_s} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

การวิเคราะห์ร้อยละการเป็นเจล (gel fraction) ของเซลลูโลสไฮโดรเจล ทำได้โดยการนำเซลลูโลสไฮโดรเจลที่ได้จากการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งนำไปแช่ในสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์:ยูเรีย:น้ำปราศจากไอออนที่อัตราส่วน 7:12:81 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ -12 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำสารที่ได้ไปทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อทำการแยกส่วนที่ไม่ละลายออกมาและทำการอบสารที่ไม่ละลาย เพื่อทำการหาน้ำหนักร้อยละการเป็นเจลด้วยสมการที่ 3.3 โดย  $W_{\text{initial}}$  คือน้ำหนักแห้งของเซลลูโลสไฮโดรเจลตั้งต้น  $W_{\text{final}}$  คือน้ำหนักแห้งของของแข็งที่ไม่ละลายในสารละลายผสม

$$\text{gel fraction (\%)} = \frac{W_{\text{final}}}{W_{\text{initial}}} \times 100 \quad (3.3)$$

### 3.5.5 การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสง

ทำการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสง (%transmission) ของฟิล์มเซลลูโลสไฮโดรเจล ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยใช้ความยาวคลื่นของแสงในช่วง 360-750 นาโนเมตร เนื่องจากค่าความหนาของฟิล์มไฮโดรเจลไม่เท่ากันจึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าการส่องผ่านของแสงกับความหนาของแต่ละชิ้นงาน โดยการรายงานเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (absorption coefficient) ดังสมการที่ 3.4 โดย %T คือค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง และ L คือความหนาของชิ้นงานในหน่วยเซนติเมตร [58]





รูปที่ 3.9 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

$$\text{absorption coefficient} = \frac{\ln(\%T/100)}{L} \quad (3.4)$$

### 3.5.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางผลึกของเส้นใยผักตบชวาแห้ง เซลลูโลสที่สกัดด้วยกระบวนการทางเคมีและเซลลูโลสไฮโดรเจล ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โทรมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยสแกนในช่วง  $2\theta$  ระหว่าง 5 และ 60 องศา ความถี่ในการกวาดตรวจคือ 0.02 องศา ใน 0.5 วินาที โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ 1.5406 แอมแปร์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ ทำการหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ตามสมการที่ 3.5 โดย  $I_{002}$  และ  $I_{am}$  คือ ความเข้มฟลักในช่องที่  $2\theta$  มีค่าประมาณ 22 องศา และ  $2\theta$  มีค่าประมาณ 18 องศา [59]

$$\text{degree of crystallinity} = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.10 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โทรมิเตอร์

### 3.5.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเส้นใยผักตบชวาแห้ง เซลลูโลสที่สกัดด้วยกระบวนการทางเคมี และเซลลูโลสไฮโดรเจลด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ทำโดยการนำสารตัวอย่างหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุลงในภาชนะที่ทำจากอะลูมินา ทำในช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ 30 ถึง 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลด้วยอัตราเร็ว (gas flow rate) 40 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีเพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

### 3.5.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเซลลูโลสไฮโดรเจลและเซลลูโลส/วุ้นทางจระเข้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้และผ่านการแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยใช้หัวจับแบบกด (compression) เพื่อจับชิ้นทดสอบที่มีขนาดกว้าง 7 มิลลิเมตร ยาว 7 มิลลิเมตร สูง 1.5-2.5 มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้ความถี่คงที่ที่ 1 Hz ใช้แรงกด 1 นิวตัน และตรวจสอบระยะกดตั้งแต่ 0-500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาการทดสอบไฮโดรเจลที่มีสภาพเป็นอีลาสติก



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

### 3.5.9 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ทำการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*) ซึ่งเป็นตัวแทนของเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก และเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli*, *E. coli*) ซึ่งเป็นตัวแทนของเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของสารละลายวุ้นทางจระเข้ ตามมาตรฐาน ASTM E2149-10 ขณะที่เซลลูโลสไฮโดรเจลและเซลลูโลส/วุ้นทางจระเข้ไฮโดรเจล ตามมาตรฐาน AATCC 100 โดยอาศัยเทคนิคการวัดร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (percentage reduction of bacteria, R) ทำการวัดโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยค่า R สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$R = \frac{B-A \times 100}{B} \quad (3.6)$$

โดยคือ R คือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย

A คือ Log CFU per milliliter ของแบคทีเรียหลังการทดสอบ

B คือ Log CFU per milliliter ของแบคทีเรียก่อนการทดสอบ

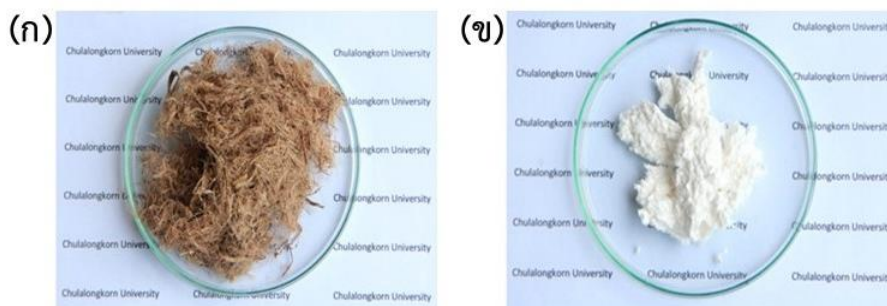
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์เซลลูโลส

##### 4.1.1 ลักษณะของเซลลูโลส

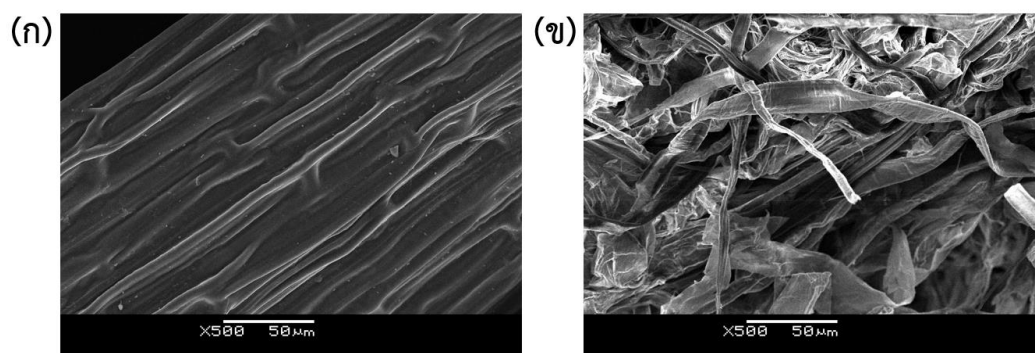
รูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของเส้นใยผักตบชวาแห้งและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการฟอกขาวด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ หลังจากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก การสกัดเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวาแห้งได้ดำเนินการตามงานวิจัยของ Sundari และคณะ [57] ภายหลังจากการทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์จากที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 3 โดยปริมาตร จากการสังเกตพบว่าเส้นใยเซลลูโลสที่ได้หลังจากการสกัดมีขนาดเล็ก และมีสีขาวกว่าเส้นใยผักตบชวาแห้ง เนื่องจากการลดลงของปริมาณลิกนินที่เป็นสารมีสีและเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสส่วนที่เป็นอสัณฐานภายในเส้นใย นอกจากนี้จากการคำนวณร้อยละผลได้เฉลี่ยของการสกัดเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวาแห้งด้วยกระบวนการทางเคมีพบว่ามีค่าเท่ากับ 42.7



รูปที่ 4.1 ลักษณะของ (ก) เส้นใยผักตบชวาแห้ง และ (ข) เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี

##### 4.1.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ภาพสัณฐานวิทยาของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

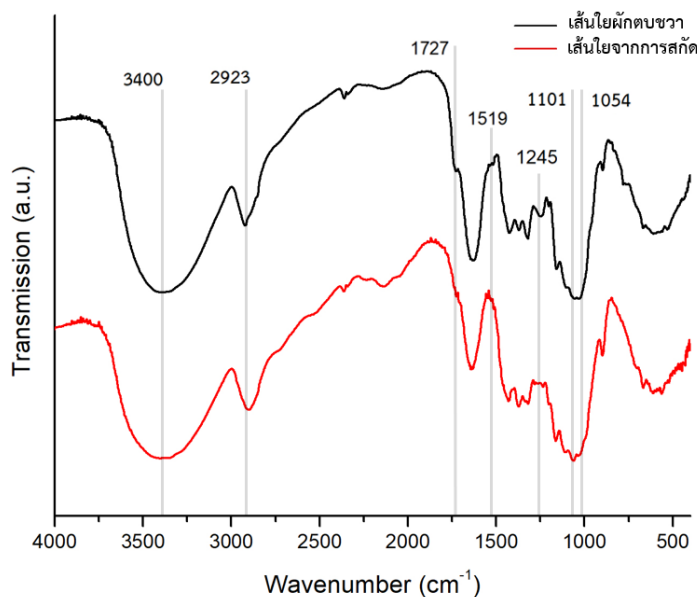


รูปที่ 4.2 ภาพสัณฐานวิทยาของ (ก) เส้นใยผักตบชวา และ (ข) เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี

จากรูป 4.2 (ก) แสดงถึงภาพสัณฐานวิทยาของเส้นใยผักตบชวาที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าเส้นใยผักตบชวามีขนาดใหญ่และมีพื้นผิวที่ขรุขระ เนื่องจากการรวมตัวกันของเส้นใยเซลลูโลส และสารยึดติด ได้แก่ เพกทิน เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ภายหลังจากการสกัดด้วยกระบวนการทางเคมีแล้ว พบว่า เส้นใยมีการกระจายตัวแยกออกจากกันในระดับไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและสารอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดการยึดติดกันของเส้นใยด้วยกระบวนการทางเคมี [60]

#### 4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR

FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากเส้นใยผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี ในช่วงความยาวคลื่น  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3

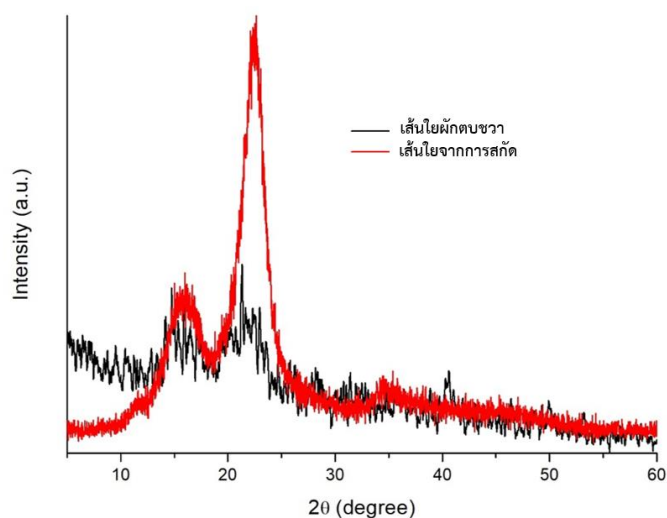


**รูปที่ 4.3** FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี

FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยผักตบชวาแสดงพิกเอกลักษณะของเซลลูโลสที่มีอยู่ในเส้นใยผักตบชวาที่ความยาวคลื่น 3400, 2923, 1101 และ 1054  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะของพันธะ O-H, C-H, C-O (secondary alcohol) และ C-O (primary alcohol) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการปรากฏของพิกที่ความยาวคลื่น 1727  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพิกของพันธะ C=O ที่สามารถพบได้ในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [57] และพิกที่ความยาวคลื่น 1519 และ 1245  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงพันธะ C=C และ C-O ของหมู่เอริล แอลคิล อีเทอร์ในโครงสร้างของลิกนินตามลำดับ [61] ในทางตรงกันข้าม FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีนั้นมีการลดลงของความเข้ม (intensity) ของพิกที่ความยาวคลื่น 1727, 1519 และ 1245  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงการลดลงของปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินจากกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการสกัดเส้นใยผักตบชวา

#### 4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

รูปแบบ XRD ของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.4



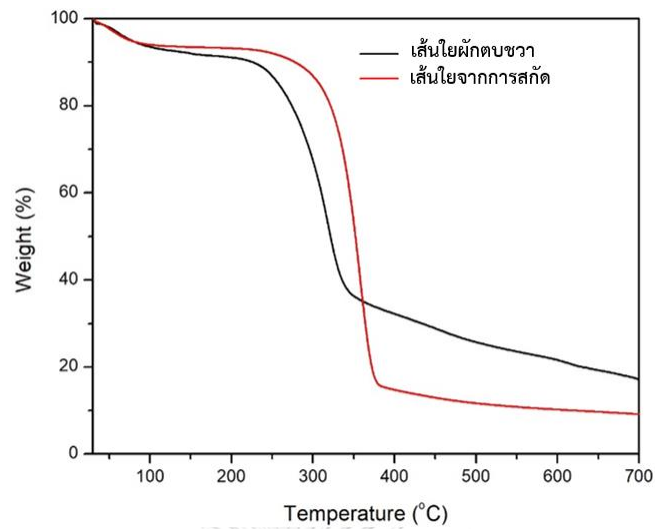
**รูปที่ 4.4** รูปแบบ XRD ของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี

รูปแบบ XRD ของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสพบพีกเอกลักษณ์ของ  $2\theta$  ที่ตำแหน่ง 16 และ 21 องศา ซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึกที่ระนาบ  $(1 \bar{1} 0)$  และ  $(2 0 0)$  ตามลำดับ นอกจากนี้ความเป็นอสัณฐานของเซลลูโลสจะอยู่ในช่วงต่ำสุดของ  $2\theta$  ที่ตำแหน่ง 18 องศา [52] ซึ่งจากการคำนวณเพื่อหาร้อยละความเป็นผลึกตามสมการที่ 3.2 พบว่ามีค่าร้อยละความเป็นผลึกของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีเท่ากับ 46.35 และ 77.07 ตามลำดับ โดยค่าร้อยละความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของปริมาณเอมิเซลลูโลสและลิกนินที่เป็นส่วนของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่ำและการทำไฮโดรไลซิสด้วยกรดอ่อนทำให้เกิดการกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐานในเส้นใยออกไป ดังนั้นเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดจึงมีความบริสุทธิ์และมีความเป็นผลึกที่สูงขึ้น

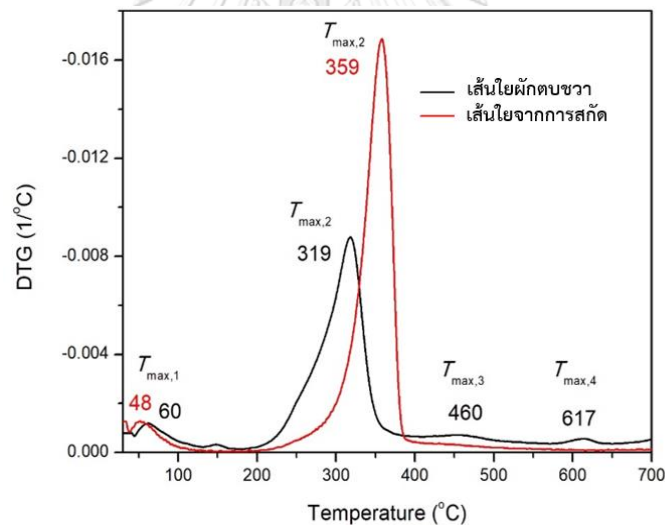
#### 4.1.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

TG และ DTG เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ 30-700 องศาเซลเซียส ของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ





รูปที่ 4.5 TG เทอร์โมแกรมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี



รูปที่ 4.6 DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการทางเคมี

อุณหภูมิเริ่มสลายตัว ( $T_{\text{onset}}$ ), อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด ( $T_{\text{max}}$ ), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{\text{endset}}$ ) และร้อยละของถ่าน ( $\% \text{ char}$ ) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี แสดงไว้ในตารางที่ 4.1



**ตารางที่ 4.1** ข้อมูลจาก TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาทดด้วยกระบวนการทางเคมี

เส้นใย	$T_{onset}$ (°C)	$T_{endset}$ (°C)	$T_{max,1}$ (°C)	$T_{max,2}$ (°C)	$T_{max,3}$ (°C)	$T_{max,4}$ (°C)	% char at 700 °C
ผักตบชวา	269	349	60	316	460	617	17.2
เซลลูโลส	326	375	48	359	-	-	9.1

จากตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดของเส้นใยผักตบชวาเท่ากับ 269 และ 349 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในขณะที่เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาทดด้วยกระบวนการทางเคมีมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดเท่ากับ 326 และ 375 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเส้นใยผักตบชวามีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดต่ำกว่าเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากมีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นอสัณฐาน เช่น เฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าเซลลูโลส นอกจากนี้พบว่าร้อยละเถ้าขารของเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาทดด้วยกระบวนการทางเคมีที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 17.2 และ 9.1 ตามลำดับ โดยเส้นใยผักตบชวามีปริมาณเถ้าขารสูงกว่าของเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากการก่อตัวของถ่านไฟโรไลติกของลิกนิน, เฮมิเซลลูโลส และสารอนินทรีย์บางชนิดที่มีอยู่ในเส้นใยผักตบชวา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากกระบวนการสกัดด้วยกระบวนการทางเคมีมีความบริสุทธิ์สูงขึ้นเนื่องจากการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน [62]

โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 4 ชั้น ในช่วงแรกจะเป็นการระเหยของความชื้นภายในเส้นใย ถัดมาเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และในช่วงที่ 3-4 เป็นช่วงการสลายตัวของลิกนิน [63] อย่างไรก็ตามช่วงการสลายตัวดังกล่าวนี้ไม่มีการแบ่งตัวกันอย่างชัดเจนใน TG เทอร์โมแกรม (รูปที่ 4.5) เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ทับซ้อนกัน ดังนั้น DTG เทอร์โมแกรม (รูปที่ 4.6) จึงถูกนำมาช่วยอธิบายช่วงการสลายตัวนี้ โดยพบว่าเส้นใยผักตบชวามีการสลายตัวของความชื้น ในช่วง 41-121 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 ( $T_{max,1}$ ) เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2 เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ในช่วง 195-387 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 2 ( $T_{max,2}$ ) เท่ากับ 316 องศาเซลเซียส ต่อมาเกิดการสลายตัวของลิกนินในช่วง 417-511 และ 577-639 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 3 ( $T_{max,3}$ ) และ 4 ( $T_{max,4}$ ) เท่ากับ 460 และ 617 องศาเซลเซียสตามลำดับ ขณะที่เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาทดด้วยกระบวนการทางเคมีนั้นพบการสลายตัวเพียง 2 ชั้น โดยชั้นแรกในช่วง 39-93 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่

1 ( $T_{max,1}$ ) เท่ากับ 48 องศาเซลเซียส และขั้นที่ 2 ในช่วง 220-402 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในขั้นที่ 2 ( $T_{max,2}$ ) เท่ากับ 359 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า การสลายตัวสูงสุดในขั้นที่ 2 ของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี (359 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าของเส้นใยผักตบชวา (316 องศาเซลเซียส) เนื่องมาจากการลดลงของเอมิเซลลูโลสและส่วนที่เป็นอสัณฐานที่มีอยู่ในเส้นใยซึ่งมีอุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำ และเมื่อพิจารณาช่วงการสลายตัวของเส้นใยเซลลูโลสพบว่า มีช่วงการสลายตัวที่แคบกว่าช่วงการสลายตัวของเส้นใยผักตบชวาดังจะสังเกตได้จากพีการสลายตัวในช่วงที่ 2 อันเนื่องมาจากการลดลงของส่วนโครงสร้างแบบกึ่ง ได้แก่ เอมิเซลลูโลส และลิกนิน และส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งมีช่วงการสลายตัวที่กว้าง [64] นอกจากนี้ยังพบว่ามี การลดลงของการสลายตัวสูงสุดในช่วงที่ 3 และ 4 จนเครื่องไม่สามารถจับสัญญาณได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดลงของปริมาณลิกนินอันเป็นผลมาจากความสำเร็จในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี

## 4.2 ผลการวิเคราะห์เซลลูโลสไฮโดรเจล

### 4.2.1 ลักษณะและความหนืดของเซลลูโลสไฮโดรเจล

หลังจากทำการละลายเซลลูโลสด้วยสารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรีย และทำการเติมบอแรกซ์ซึ่งเป็นสารเชื่อมขวางที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 พบว่า สารละลายมีสีเหลืองอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องมาจากยังมีปริมาณลิกนินที่คงเหลืออยู่เล็กน้อย (ดังจะเห็นได้จากการลดลงของความเข้มพีกที่ความยาวคลื่น 1519 และ  $1245\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของลิกนินจากกราฟ FT-IR ในรูปที่ 4.3 )



รูปที่ 4.7 สารละลายเซลลูโลสที่มีการผสมบอแรกซ์

และเมื่อทำการวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายเซลลูโลสที่มีการผสมบอแรกซ์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และทำการทดสอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่าสารละลายมีค่าความหนืดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหนืดของสารละลายเซลลูโลส-บอแรกซ์ ในหน่วยเซนติพอยส์ (centipoise, cP)

เซลลูโลส-บอแรกซ์*	ความเร็วรอบ				
	1 rpm	2 rpm	5 rpm	10 rpm	12 rpm
1/0	4800	2800	1200	440	370
1/1	5600	3200	1360	560	530
1/2	10400	4800	2080	1080	930
1/3	12000	6000	3520	1800	1430
1/4	18000	12000	7760	2560	1700
1/5	32000	27400	17600	12400	9500

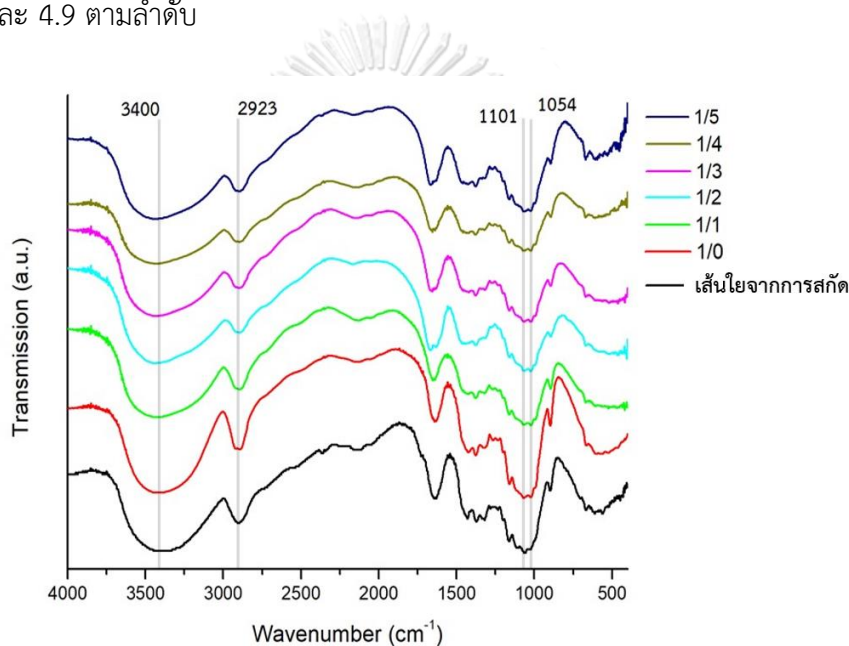
\*อัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส/บอแรกซ์

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบในการทดสอบ ความหนืดของสารละลายมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่เซลลูโลสตามแนวแรงของความเร็วรอบในการทดสอบ ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลประเภทซูโดพลาสติก (pseudoplastic fluids) และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณบอแรกซ์ในสารละลายเซลลูโลส พบว่าความหนืดที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากผลของการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสไปขัดขวางทิศทางการไหลในสารละลาย เป็นข้อบ่งชี้ถึงปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่เซลลูโลสที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณบอแรกซ์มากขึ้นเนื่องมาจากเกิดการเชื่อมขวางกันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Park และคณะ [65] ได้ศึกษาผลของความหนืดจากการเชื่อมขวางระหว่างกรดไฮยาลูโรนิกและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และโซ่บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง โดยทางผู้วิจัยพบว่าเมื่อปริมาณบอแรกซ์มากขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของสารละลายกรดไฮยาลูโรนิกและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สูงขึ้น และเพื่อเป็นการยืนยันว่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลจากการเชื่อมขวางเพียงอย่างเดียว จึงทำการทดสอบค่าความหนืดของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำการเติมบอแรกซ์ที่

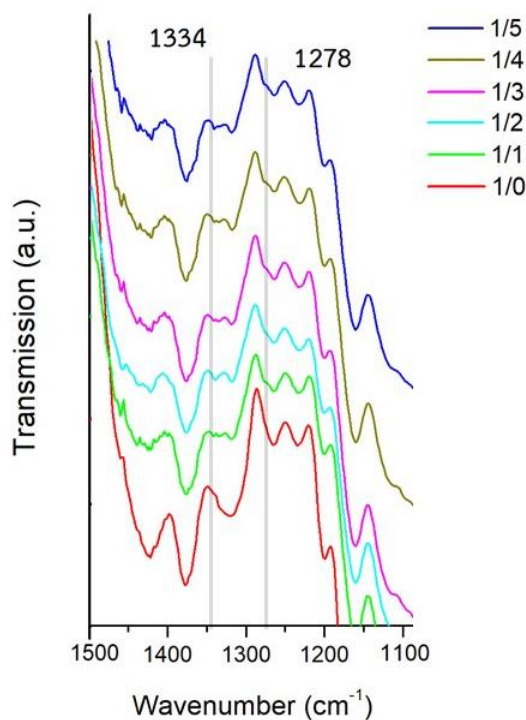
อัตราส่วน 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ที่ความเร็วรอบ 1, 2, 5, 10 และ 12 จากการทดสอบพบว่าค่าความหนืดทั้งหมดเป็น 0 เซนติพอยส์ จึงเป็นการยืนยันการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่เซลลูโลสโดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง

#### 4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR

FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลสและเซลลูโลสไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ ในช่วงความยาวคลื่น  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  และในช่วงความยาวคลื่น  $1500 - 1100 \text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

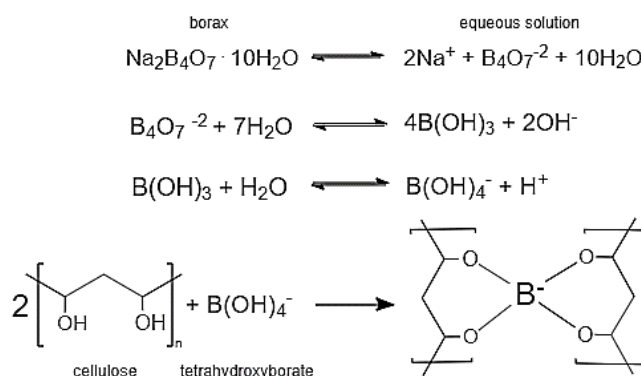


รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีและเซลลูโลสไฮโดรเจลในช่วงความยาวคลื่น  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลสไฮโดรเจลในช่วงความยาวคลื่น 1500 – 1100  $\text{cm}^{-1}$

เมื่อเปรียบเทียบ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมีและไฮโดรเจลพบว่า มีพีกเอกลักษณ์ที่เหมือนกันที่ความยาวคลื่น 3400, 2923, 1101 และ 1054  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะของพันธะ O-H, C-H, C-O (secondary alcohol) และ C-O (primary alcohol) ตามลำดับ จากพีกเอกลักษณ์ที่กล่าวมาจึงสามารถยืนยันได้ว่าการเตรียมเซลลูโลสไฮโดรเจลนั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส และเมื่อทำศึกษา FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่มีการผสมบอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่าการปรากฏพีกที่ความยาวคลื่น 1334 และ 1278  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะของพันธะ B-O-C ที่ไม่สมมาตร และพันธะ B-O-C แบบสมมาตร [66] ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ในระหว่างสายโซ่เซลลูโลส โดยมีปฏิกิริยาการเชื่อมขวางด้วยบอแรกซ์ แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยเริ่มจากการแตกตัวของบอแรกซ์ในน้ำเป็นไอออนของเตตระไฮดรอกซีบอแรกซ์ และไอออนของเตตระไฮดรอกซีบอแรกซ์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในระหว่างสายโซ่เซลลูโลสสองสาย



รูปที่ 4.10 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ระหว่างสายโซ่เซลลูโลส

#### 4.2.3 การตรวจสอบค่าร้อยละการเป็นเจล

ร้อยละการเป็นเจลของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการเป็นเจลของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ

ไฮโดรเจล	ร้อยละการเป็นเจล
1/0	2.2 ± 0.3 <sup>a</sup>
1/1	8.8 ± 0.2 <sup>b</sup>
1/2	10.3 ± 1.5 <sup>b</sup>
1/3	17.3 ± 3.1 <sup>c</sup>
1/4	18.0 ± 2.6 <sup>c</sup>
1/5	21.3 ± 0.5 <sup>d</sup>

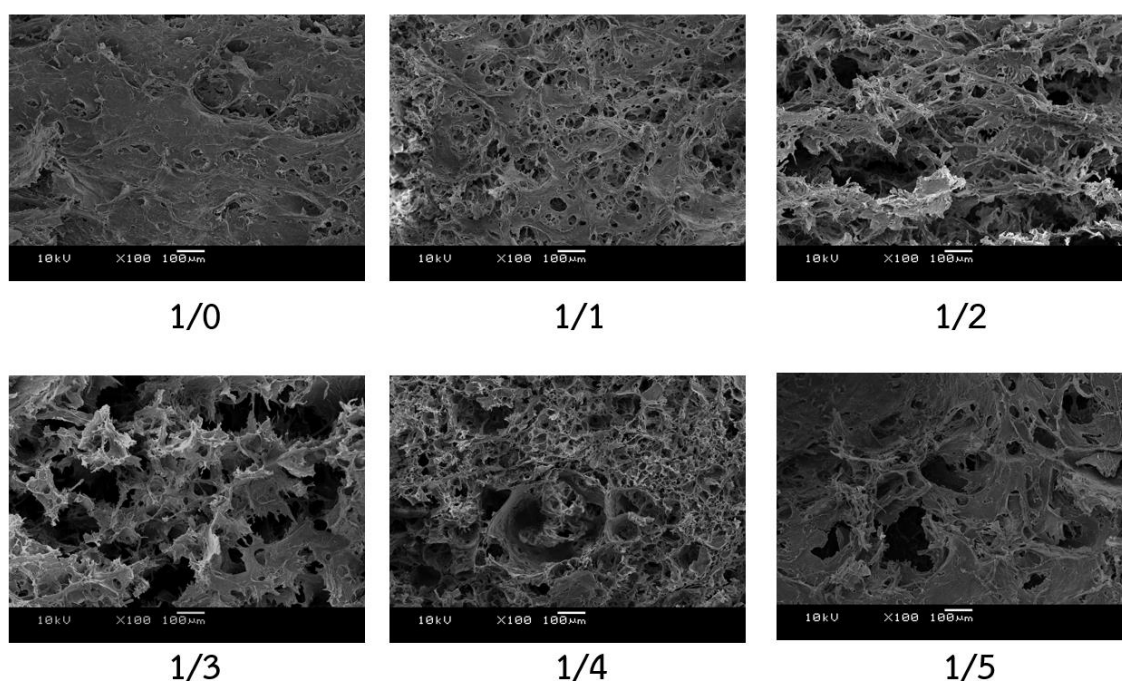
ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.3 พบว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติมบอแรกซ์ (1/0) มีค่าร้อยละการเป็นเจลเท่ากับ 2.2 อาจเนื่องมาจากการตกตะกอนของเซลลูโลสหรือสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่อยู่ในไฮโดรเจล นอกจากนี้พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณบอแรกซ์มากขึ้นในไฮโดรเจล ส่งผลให้ค่าร้อยละการเป็นเจลมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลส่งผลให้ไฮโดรเจลเกิดการละลายในสารละลาย

ระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรียได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่มีการผสมของบอแรกซ์ นอกจากนั้นพบว่าค่าร้อยละการเป็นเจลสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 21.3 ที่ไฮโดรเจล 1/5 ถึงแม้ว่าจะทำการเพิ่มปริมาณบอแรกซ์มากขึ้นถึง 5 เท่าของปริมาณเซลลูโลสแล้วการเชื่อมขวางก็ไม่สามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากไอออนของเตตระไฮดรอกซีบอแรกซ์มีโอกาสเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่เซลลูโลสเพียงสายเดียว โดยไม่เกิดการเชื่อมขวาง

#### 4.2.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

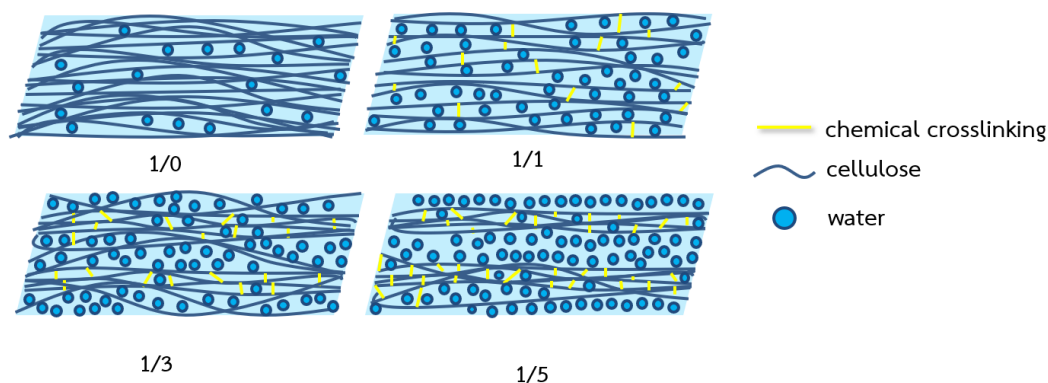


รูปที่ 4.11 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของบอแรกซ์ต่าง ๆ

จากภาพสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางในรูปที่ 4.11 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลสไฮโดรเจล จากการศึกษพบว่าที่ไฮโดรเจล 1/0 มีลักษณะโครงสร้างแบบรูพรุนน้อยและมีความเรียบแน่นของชิ้นงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลอื่น ๆ ถัดมาเมื่อทำการเชื่อมขวางด้วยบอแรกซ์พบว่าลักษณะโครงสร้างของไฮโดรเจลมีความเป็นรูพรุนมากขึ้นที่ไฮโดรเจล 1/1, 1/2 และ 1/3 เนื่องจากการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่เซลลูโลสส่งผลให้

เกิดลักษณะโครงสร้างแบบรูพรุน อย่างไรก็ตามลักษณะของการเป็นพรุนของไฮโดรเจล 1/4 และ 1/5 ไม่ได้มีความเป็นรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้นแต่เป็นลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่อาจเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของเซลลูโลสจากการเชื่อมขวางที่มากเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาพื้นที่ของรูพรุนรวมของไฮโดรเจลจากโปรแกรม imagej จากภาพสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางพบว่าไฮโดรเจล 1/0, 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 และ 1/5 มีพื้นที่ของรูพรุนรวมเท่ากับ 20481, 127232, 170917, 216368, 216597 และ 214935 ตารางไมโครเมตรตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณบอแรกซ์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลมากขึ้น พื้นที่ของรูพรุนรวมจะเพิ่มมากขึ้น จนถึงไฮโดรเจลที่ 1/3, 1/4 และ 1/5 ซึ่งมีพื้นที่ของรูพรุนรวมไม่แตกต่างกัน

ดั่งเสนอรูปลักษณะของการเกิดรูพรุนจากการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลส โดยมีบอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในไฮโดรเจลดังรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาไฮโดรเจล 1/0 ที่ไม่มีการเติมบอแรกซ์พบว่าไฮโดรเจลมีการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่เซลลูโลสส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความแน่นของโครงสร้างมากกว่าไฮโดรเจลที่มีบอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางซึ่งไปขัดขวางการจัดเรียงตัวกันของไฮโดรเจลในไฮโดรเจลที่ 1/1 และ 1/3 แต่เมื่อมีการเติมบอแรกซ์มากขึ้นในไฮโดรเจลที่ 1/5 พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมขวางมากเกินไปและเกิดการเกาะกลุ่มกันของสายโซ่เซลลูโลสและเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่



รูปที่ 4.12 รูปจำลองลักษณะของการเกิดรูพรุนจากการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสโดยมีบอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในไฮโดรเจล



#### 4.2.5 การตรวจสอบสมบัติการบวมตัวในน้ำและค่าปริมาณน้ำสมดุล

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าการบวมตัว (swelling ratio) และค่าสมดุลของน้ำ (equilibrium water content, EWC) ในเซลลูโลสไฮโดรเจลที่ใช้อย่างแรกเป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าการบวมตัวและค่าปริมาณน้ำสมดุลของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบวแรกซ์ต่าง ๆ

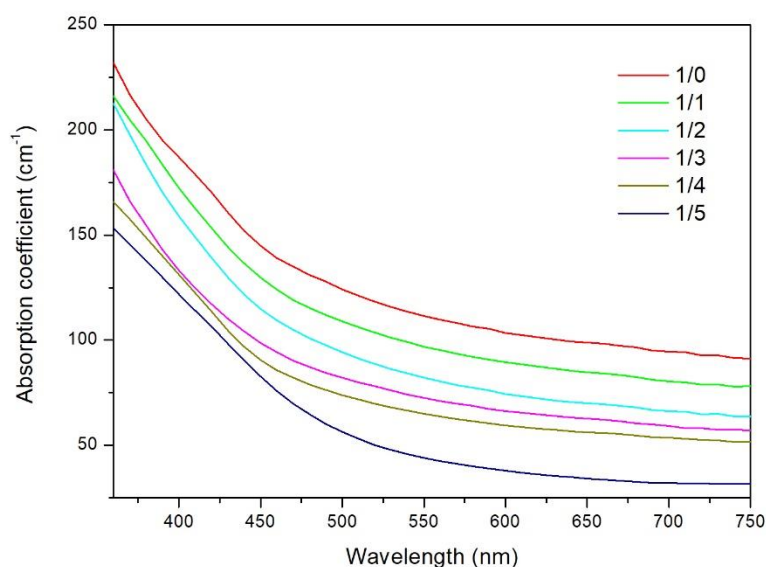
ไฮโดรเจล	ค่าการบวมตัว (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำสมดุล (ร้อยละ)
1/0	325.2±33.6 <sup>a</sup>	90.8±0.4 <sup>a</sup>
1/1	553.1±13.4 <sup>b</sup>	92.6±0.1 <sup>b</sup>
1/2	772.4±13.5 <sup>c</sup>	92.8±0.1 <sup>c</sup>
1/3	877.3±44.4 <sup>d</sup>	93.5±0.1 <sup>d</sup>
1/4	828.2±9.9 <sup>d</sup>	93.2±0.1 <sup>e</sup>
1/5	831.0±50.1 <sup>d</sup>	93.0±0.2 <sup>f</sup>

ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

จากการผลการทดลองพบว่าค่าการบวมตัวและค่าสมดุลของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณบวแรกซ์เพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากปริมาณการเชื่อมขวางของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณบวแรกซ์ และเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางโดยบวแรกซ์มากขึ้น จะไปขัดขวางการเรียงตัวของเซลลูโลสในไฮโดรเจลส่งผลให้โครงสร้างของไฮโดรเจลมีลักษณะเป็นรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้าในการตรวจสอบสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางในหัวข้อ 4.2.4 อีกทั้งเมื่อพิจารณาผลของการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนของเตตระไฮดรอกซีบอเรตกับสายโซ่เซลลูโลสเพียงสายโซ่เดียวซึ่งส่งผลให้ไฮโดรเจลมีส่วนที่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น

#### 4.2.6 การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสง

รูปที่ 4.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่น 360-750 นาโนเมตรของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่ใช้อย่างแรกเป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนต่าง ๆ

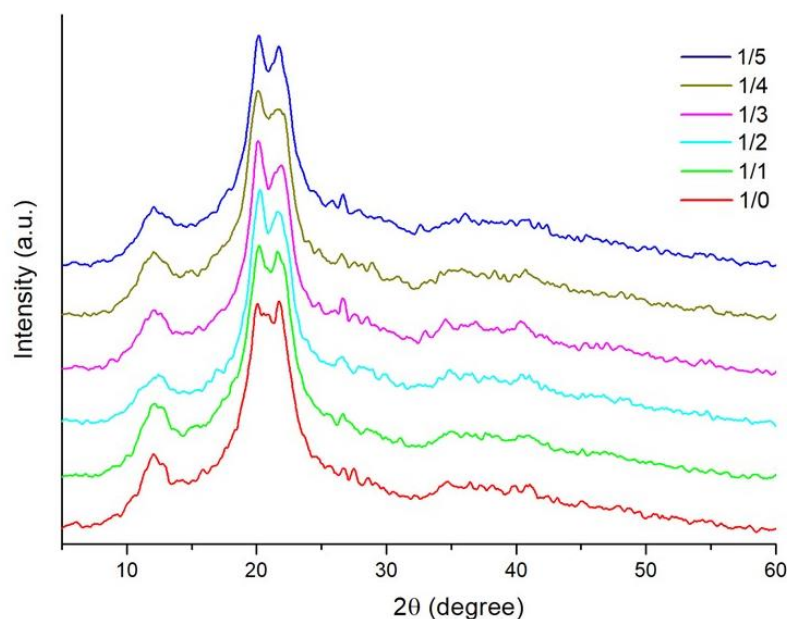


รูปที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 360-750 นาโนเมตร

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของไฮโดรเจลมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการเชื่อมขวางของบอแรกซ์เพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ในระหว่างสายโซ่เซลลูโลสจะขัดขวางการเรียงตัวของเซลลูโลสในไฮโดรเจลส่งผลให้โครงสร้างของไฮโดรเจลมีลักษณะเป็นรูพรุนจากการยืนยันด้วยผลการศึกษากาภาพสัณฐานวิทยาภาคตัดขวาง เมื่อไฮโดรเจลมีรูพรุนมากแสงจึงเกิดการส่องผ่านได้มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซับแสงจึงมีค่าลดลง

#### 4.2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

รูปแบบ XRD ของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่ใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนต่าง ๆ ในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ 5-60 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลจากรูปแบบ XRD ที่  $2\theta$  เท่ากับ 20 และ 15 องศา และค่าร้อยละความเป็นผลึกของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่ใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางที่อัตราส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 รูปแบบ XRD ของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจากรูปแบบ XRD ที่  $2\theta$  เท่ากับ 20 และ 15 องศา และค่าร้อยละความเป็นผลึก

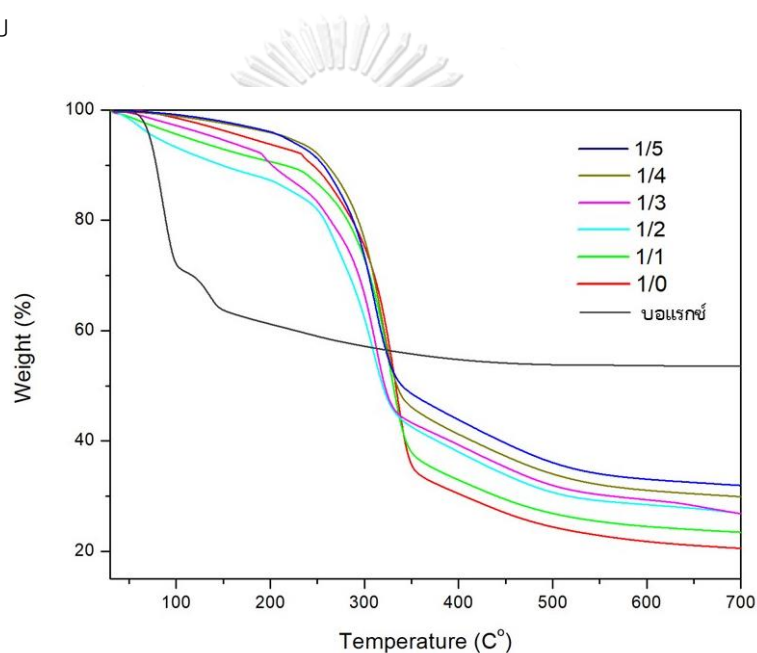
ไฮโดรเจล	$I_{\text{crystal}} 20^\circ$	$I_{\text{am}} 15^\circ$	ร้อยละความเป็นผลึก
1/0	183.7	53.2	71.1
1/1	210.3	56.7	73.0
1/2	203.8	45.1	77.9
1/3	203.5	50.7	75.1
1/4	187.4	46.9	75.0
1/5	201.8	51.4	74.5

จากรูปที่ 4.14 พบว่ารูปแบบการเป็นผลึกของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่ได้มีการเปลี่ยนไปจากการเป็นผลึกของเซลลูโลส (เอกลักษณ์ความเป็นผลึกของเซลลูโลส จะปรากฏที่  $2\theta$  ที่ตำแหน่ง 16 และ 21 องศา ซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึกที่ระนาบ  $(1 \bar{1} 0)$  และ  $(2 0 0)$  ตามลำดับ) ในรูปที่ 4.4 เปลี่ยนเป็นเซลลูโลส ซึ่งจะปรากฏลักษณะของพีกเอกลักษณ์ที่  $2\theta$  เท่ากับ 12, 20 และ 22 องศา โดยเป็นระนาบของ  $(1 \bar{1} 0)$ ,  $(1 1 0)$  และ  $(2 0 0)$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากโซเดียมไอออนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย เข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่เซลลูโลสให้เกิดการจัดเรียงแบบ

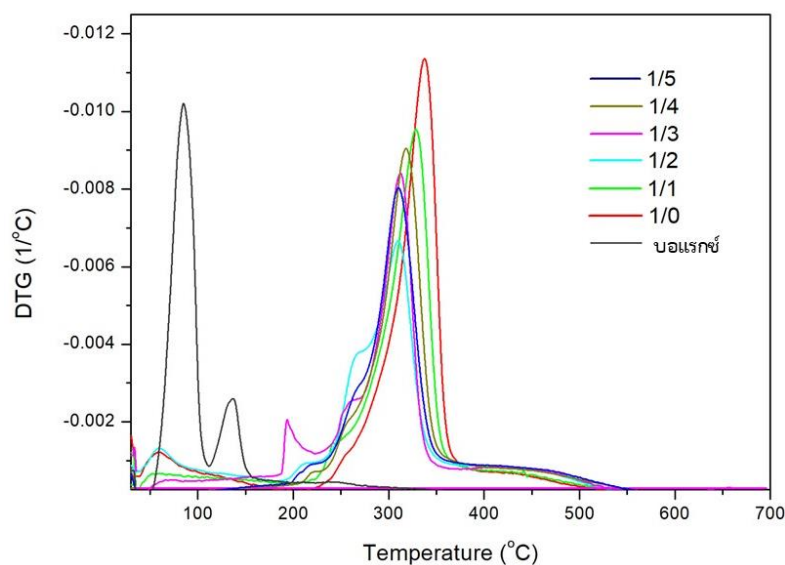
สลับซึ่งเป็นลักษณะของผลึกเซลลูโลส II ที่มีความเสถียรกว่าเซลลูโลส I [67] นอกจากนี้จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความเป็นผลึกของแต่ละไฮโดรเจลไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมขวางของสายโซ่เซลลูโลสในไฮโดรเจลไม่ได้ส่งผลต่อค่าความเป็นผลึกอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.2.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

TG และ DTG เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ 30-700 องศาเซลเซียส ของบอแรกซ์เซลลูโลสไฮโดรเจลที่ใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนต่าง ๆ ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 TG เทอร์โมแกรมของบอแรกซ์และไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.16 DTG เทอร์โมแกรมของบอแรกซ์และไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ

อุณหภูมิการสลายตัวของไฮโดรเจลที่มีการสลายตัวร้อยละ 20 ( $T_{20}$ ) และร้อยละ 60 ( $T_{60}$ ) อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด ( $T_{max}$ ), และร้อยละของถ่าน (% char) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ของบอแรกซ์และเซลลูโลสไฮโดรเจลที่ใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจาก TG และ DTG ของบอแรกซ์และไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ

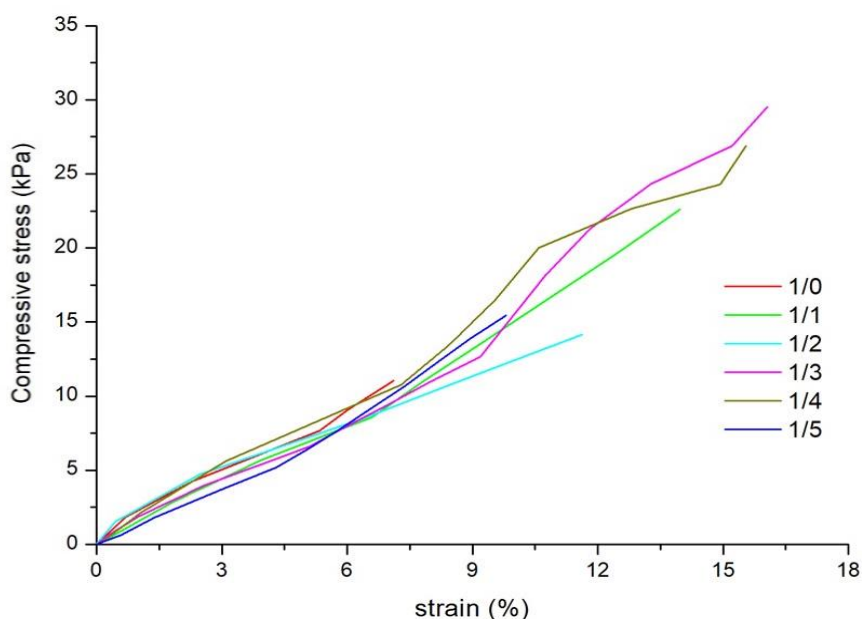
สารตัวอย่าง	$T_{20}$ (°C)	$T_{60}$ (°C)	$T_{max,1}$ (°C)	$T_{max,2}$ (°C)	$T_{max,3}$ (°C)	$T_{max,4}$ (°C)	% char at 700 °C
บอแรกซ์	88.8	-	84.5	137.0	-	-	53.6
1/0	287.0	344.0	59.9	-	-	339.9	19.6
1/1	282.0	344.0	60.8	242.1	-	330.5	23.5
1/2	257.7	377.7	55.2	210.0	263.9	311.4	27.8
1/3	263.8	391.5	59.9	194.0	258.6	314.9	26.8
1/4	287.4	415.0	54.08	205.3	261.2	310.3	29.6
1/5	293.3	445.2	36.3	218.0	254.1	309.3	31.9

จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.6 พบว่าไฮโดรเจล 1/1, 1/2 และ 1/3 มีค่า  $T_{20}$  ต่ำกว่าไฮโดรเจล 1/0 เนื่องมาจากการเหนียวนำจากการสลายตัวของบอแรกซ์ที่สามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์ที่ไฮโดรเจล 1/4 และ 1/5 พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นของการเชื่อมขวางในระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ของเซลลูโลส และเมื่อพิจารณาไฮโดรเจลที่มีการใส่บอแรกซ์นั้นมีค่า  $T_{60}$  สูงกว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติมบอแรกซ์ (1/0) และมีค่า  $T_{60}$  สูงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณบอแรกซ์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการปกคลุมผิวสารตัวอย่างด้วยซาร์ของสารประกอบโบรอนที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับปริมาณร้อยละเก้าซาร์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสของไฮโดรเจลที่มีค่ามากขึ้นตามปริมาณบอแรกซ์ที่เพิ่มมากขึ้นและสอดคล้องกับการทดลองการลามไฟของไฮโดรเจลจากภาคผนวก จ โดยจากข้อมูลค่าการลามไฟของไฮโดรเจล 1/0, 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 และ 1/5 มีค่าเท่ากับ 1.43, 0.63, 0.32, 0.30, 0.28 และ 0.25 มิลลิเมตร/วินาที ตามลำดับจะสังเกตว่าการลามไฟมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณบอแรกซ์

จากรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.6 พบว่าการสลายตัวของบอแรกซ์มีการสลายตัวสูงสุดสองตำแหน่งที่  $T_{max,1}$  และ  $T_{max,4}$  เท่ากับ 84.5 และ 137.0 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิการระเหยของความชื้นและการกำจัดโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างบอแรกซ์ [68] พบว่าไฮโดรเจล 1/0 มีการสลายตัวสูงสุดสองตำแหน่งคือ  $T_{max,1}$  และ  $T_{max,4}$  เท่ากับ 59.9 และ 339.9 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการระเหยของความชื้นและเส้นใยเซลลูโลสตามลำดับ แต่เมื่อทำการเชื่อมขวางเซลลูโลสด้วยบอแรกซ์พบว่าไฮโดรเจลมีการสลายตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากการระเหยของความชื้นและการสลายตัวของเซลลูโลส โดยในไฮโดรเจล 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 และ 1/5 พบการสลายตัวสูงสุดที่  $T_{max,2}$  เท่ากับ 242.1, 210.0, 194.0 205.3 และ 218.0 องศาเซลเซียสตามลำดับ และในการสลายตัวสูงสุดที่  $T_{max,3}$  ของไฮโดรเจล 1/2, 1/3, 1/4 และ 1/5 มีค่าเท่ากับ 263.9, 258.6, 261.2 และ 254.1 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของพันธะ B-O-C ในโครงสร้าง [69] นอกจากนี้การสลายตัวที่  $T_{max,4}$  ของไฮโดรเจล 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 และ 1/5 เท่ากับ 339.9, 330.5, 311.4, 314.9 และ 309.3 องศาเซลเซียสตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณบอแรกซ์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัวของเซลลูโลสมีค่าลดลงเนื่องจากการเหนียวนำจากการสลายตัวของพันธะ B-O-C ในโครงสร้างและความเป็นรูพรุนของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่เพิ่มมากขึ้น (ดูผล SEM ประกอบในรูปที่ 4.12) ส่งผลให้มีพื้นที่ในการรับความร้อนมากจึงเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ [53]

#### 4.2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.17 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) จากระยะยกสูงสุดที่ทำให้เกิดการเสียรูปของเซลล์โลสไฮโดรเจลที่ใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนบอแรกซ์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่าความเค้นของไฮโดรเจลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัย แต่เมื่อพิจารณาความเครียดจากระยะยกสูงสุดที่ทำให้การเสียรูปของไฮโดรเจลมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อปริมาณบอแรกซ์ที่ใช้ในการเชื่อมขวางเพิ่มมากขึ้น โดยความเครียดจากระยะยกของไฮโดรเจล 1/0, 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 และ 1/5 มีค่าเท่ากับ  $6.6 \pm 0.8$ ,  $12.5 \pm 2.0$ ,  $12.2 \pm 1.6$ ,  $16.2 \pm 2.6$ ,  $11.3 \pm 2.6$ , และ  $9.6 \pm 0.9$  ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าระยะยกที่ทำให้ไฮโดรเจลมีการเสียรูปมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูพรุนภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างรูพรุนเหล่านั้นส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นและต้องใช้ระยะยกที่มากขึ้นเพื่อให้ไฮโดรเจลเสียรูป จากการทดสอบพบว่าไฮโดรเจล 1/3 มีค่าร้อยละความเครียดจากระยะยกมากที่สุด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะนำไฮโดรเจล 1/3 ที่มีค่าการบวมตัวของน้ำมากที่สุด (จากผลของค่าร้อยละการบวมตัว) และมีค่าร้อยละความเครียดจากระยะกอดมากที่สุด เพื่อทำการจุ่มด้วยสารละลายว่านหางจระเข้และศึกษาสมบัติอื่น ๆ ต่อไป

#### 4.2.10 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ และเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส จากการทดสอบของเซลล์ไฮโดรเจลที่ใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วน 1 กรัมของเซลล์ไฮโดรเจลต่อ 3 กรัมของบอแรกซ์

ตารางที่ 4.7 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction

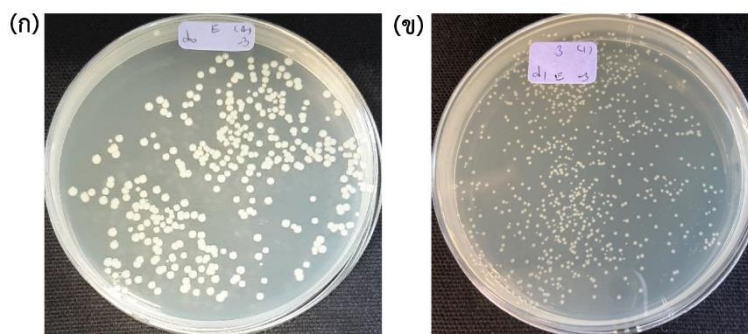
ไฮโดรเจล	<i>Escherichia coli</i>				
	CFU/ml		Log CFU/ml		% Reduction
	0h	24h	0h	24h	
1/3	$2.44 \times 10^6 \pm$ $9.29 \times 10^5$	$5.20 \times 10^6 \pm$ $5.54 \times 10^5$	$6.39 \pm 0.02$	$6.71 \pm 0.05$	-5.11

ตารางที่ 4.8 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction

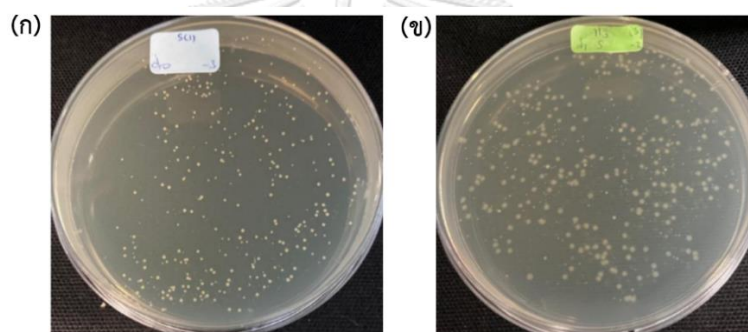
ไฮโดรเจล	<i>Staphylococcus aureus</i>				
	CFU/ml		Log CFU/ml		% Reduction
	0h	24h	0h	24h	
1/3	$2.00 \times 10^6 \pm$ $1.15 \times 10^5$	$\times 10^5 \pm$ $\times 10^5$	$6.30 \pm 0.03$	$4.50 \pm 0.06$	20.70

รูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ และเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส จากการทดสอบของเซลล์ไฮโดรเจลที่ใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางในอัตราส่วน 1 กรัมของเซลล์ไฮโดรเจลต่อ 3 กรัมของบอแรกซ์





รูปที่ 4.18 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคไล ในไฮโดรเจล 1/3 ที่เวลา 0 ชั่วโมงที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)



รูปที่ 4.19 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในไฮโดรเจล 1/3 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)

จากผลการทดลองพบว่ามีร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคไล เท่ากับ -5.11 และการต้านเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส เท่ากับ 20.70 ซึ่งแสดงให้เห็นถึง เซลลูโลสไฮโดรเจล 1/3 มีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรียแกรมบวกแต่ไม่มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ทั้งนี้ฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจลอาจมีผลเนื่องมาจากการการเชื่อมขวางที่ไม่สมบูรณ์ของบอแรกซ์ในผลการศึกษาร้อยละการเป็นเจลในหัวข้อ 4.2.3 ซึ่งมีความสอดคล้องกับ รายงานวิจัยของ Yilmaz [70] ที่ได้ศึกษาฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียของสารบอแรกซ์ โดยทาง ผู้วิจัยพบว่าความเข้มข้นของสารละลายบอแรกซ์ที่ต่ำที่สุดในการส่งผลให้เกิดการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส และเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคไล เท่ากับ 23.8 และ 47.6 มิลลิกรัม/

มิลลิลิตร ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าบอแรกซ์มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ที่ดีกว่าเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ

### 4.3 ผลการวิเคราะห์ว่านหางจระเข้

#### 4.3.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ และเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส จากการทดสอบของสารละลายว่านหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของว่านหางจระเข้แห้งต่อปริมาตรของน้ำ

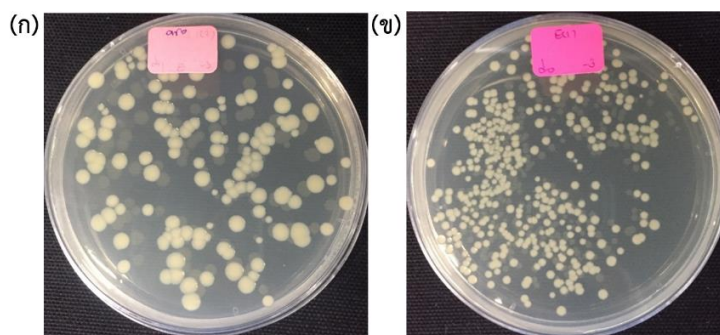
ตารางที่ 4.9 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction

สารตัวอย่าง	<i>Escherichia coli</i>				
	CFU/ml		Log CFU/ml		% Reduction
	0h	24h	0h	24h	
สารละลาย ว่านหางจระเข้ 20% w/v	$3.11 \times 10^6 \pm$ $1.15 \times 10^5$	$1.34 \times 10^6 \pm 1.4$ $8 \times 10^5$	$6.49 \pm 0.00$	$6.12 \pm 0.05$	5.68

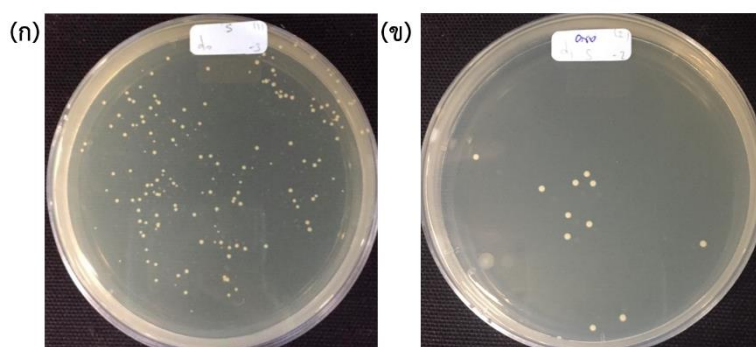
ตารางที่ 4.10 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction

สารตัวอย่าง	<i>Staphylococcus aureus</i>				
	CFU/ml		Log CFU/ml		% Reduction
	0h	24h	0h	24h	
สารละลาย ว่านหางจระเข้ 20% w/v	$1.32 \times 10^6 \pm$ $7.09 \times 10^5$	$1.60 \times 10^4 \pm$ $3.61 \times 10^3$	$6.12 \pm 0.02$	$4.20 \pm 0.09$	31.44

รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ และเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส จากการทดสอบของสารละลายว่านหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของว่านหางจระเข้แห้งต่อปริมาตรของน้ำ



รูปที่ 4.20 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ ในสารละลายว่านหางจระเข้ 20% w/v ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)



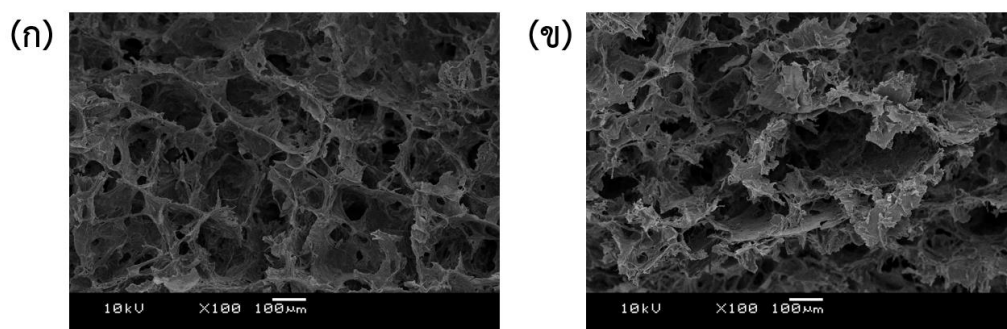
รูปที่ 4.21 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในสารละลายว่านหางจระเข้ 20% w/v ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)

จากผลการทดลองพบว่ามีร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย เอสเชอริเชีย โคลิ เท่ากับ 5.68 และการต้านเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส เท่ากับ 31.44 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Pandey และ คณะ [71] จากการศึกษาพบว่าสารละลายว่านหางจระเข้มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ และ สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส อันเนื่องมาจากสารประกอบแอนทราควิโนน (anthraquinone) ไปยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีนของแบคทีเรียโดยการปิดกั้นบริเวณไรโบโซม (ribosome) ของเชื้อแบคทีเรีย

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์เซลลูโลส/วุ้นหางจระเข้ ไฮโดรเจล

##### 4.4.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจล 1/3 ที่ทำการจุ่มด้วยสารละลายวุ้นหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของวุ้นหางจระเข้แห่งต่อปริมาตรของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจล 1/3 ที่ทำการจุ่มด้วยสารละลายวุ้นหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (ก) และ 10 (ข) โดยน้ำหนักของวุ้นหางจระเข้แห่งต่อปริมาตรของน้ำ

จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อทำการจุ่มไฮโดรเจลในสารละลายวุ้นหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 ส่งผลให้ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางไม่มีความแตกต่างไปจากไฮโดรเจล 1/3 แสดงให้เห็นว่าการจุ่มไฮโดรเจลในสารละลายวุ้นหางจระเข้ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของไฮโดรเจล

##### 4.4.2 การตรวจสอบสมบัติการบวมตัวในน้ำและค่าปริมาณน้ำสมดุล

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าร้อยละการบวมตัวของน้ำและร้อยละปริมาณน้ำสมดุลของเซลลูโลสไฮโดรเจล (1/3) และเซลลูโลส/วุ้นหางจระเข้ไฮโดรเจลที่ความเข้มข้นของวุ้นหางจระเข้ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของวุ้นหางจระเข้แห่งต่อปริมาตรของน้ำ

**ตารางที่ 4.11** ค่าการบวมตัวและค่าปริมาณน้ำสมดุลของเซลลูโลสไฮโดรเจลและเซลลูโลส/วานหาง  
จระเข้ไฮโดรเจล

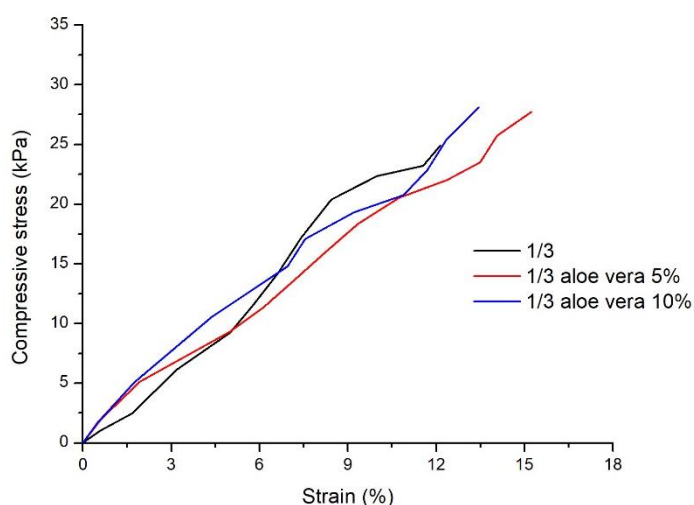
ไฮโดรเจล	ค่าการบวมตัว (%)	ปริมาณน้ำสมดุล (%)
1/3	877.26±44.4 <sup>a</sup>	93.53±0.1 <sup>b</sup>
1/3 aloe vera 5%	922.95±62.9 <sup>a</sup>	94.01±0.2 <sup>b</sup>
1/3 aloe vera 10%	942.41±52.9 <sup>a</sup>	93.65±0.3 <sup>b</sup>

ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.11 พบว่าร้อยละการบวมตัวและค่าร้อยละปริมาณน้ำสมดุลของไฮโดรเจลทั้งสามมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญอันเนื่องมาจากลักษณะความเป็นรูพรุนของไฮโดรเจลทั้งสามมีลักษณะเหมือนกัน (ดังผล SEM ในรูปที่ 4.12 และ 4.22)

#### 4.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.23 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) จากระยะกดสูงสุดที่ทำให้เกิดการเสียรูปของไฮโดรเจล 1/3 และไฮโดรเจล 1/3 ที่ทำการจุ่มด้วยสารละลายวานหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของวานหางจระเข้แห้งต่อปริมาตรของน้ำ จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต



**รูปที่ 4.23** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของไฮโดรเจล

จากรูปที่ 4.23 จากกราฟความสัมพันธ์พบว่าค่าเค้นและร้อยละความเครียดจากระยะกตสูงสุดที่ทำให้เกิดการเสีรูปของไฮโดรเจลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการจุ่มไฮโดรเจล 1/3 ลงในสารละลายว่านหางจระเข้ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อไฮโดรเจล

#### 4.4.4 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่าการทดสอบการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย เอสเชอริเชีย โคลิ และเชื้อแบคทีเรียสแตปไฟโลคอคคัส ออเรียส จากการทดสอบของไฮโดรเจล 1/3 และไฮโดรเจล 1/3 ที่ทำการจุ่มสารละลายว่านหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักว่านหางจระเข้แห้งต่อปริมาตรของน้ำ

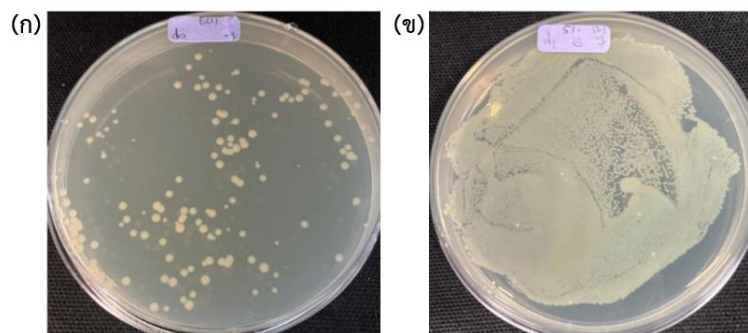
ตารางที่ 4.12 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction

ไฮโดรเจล	<i>Escherichia coli</i>				
	CFU/ml		Log CFU/ml		% Reduction
	0h	24h	0h	24h	
1/3	$2.44 \times 10^6 \pm 9.29 \times 10^5$	$5.20 \times 10^6 \pm 5.54 \times 10^5$	$6.39 \pm 0.02$	$6.71 \pm 0.05$	-5.11
1/3 aloe vera 5%	$1.03 \times 10^6 \pm 5.86 \times 10^5$	>300 โคโลนี	$6.01 \pm 0.03$	>300 โคโลนี	ไม่มีการยับยั้ง
1/3 aloe vera 10%	$1.01 \times 10^6 \pm 3.61 \times 10^5$	>300 โคโลนี	$6.00 \pm 0.02$	>300 โคโลนี	ไม่มีการยับยั้ง

ตารางที่ 4.13 การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกของผลิตภัณฑ์แบบหา % Reduction

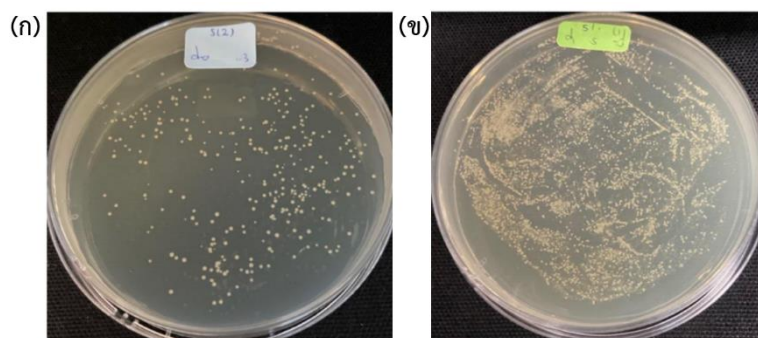
ไฮโดรเจล	<i>Staphylococcus aureus</i>				
	CFU/ml		Log CFU/ml		% Reduction
	0h	24h	0h	24h	
1/3	$2.00 \times 10^6 \pm 1.15 \times 10^5$	$\times 10^5 \pm \times 10^5$	$6.30 \pm 0.03$	$4.50 \pm 0.06$	20.70
1/3 aloe vera 5%	$2.01 \times 10^6 \pm 5.57 \times 10^5$	>300 โคโลนี	$6.30 \pm 0.01$	>300 โคโลนี	ไม่มีการยับยั้ง
1/3 aloe vera 10%	$2.15 \times 10^6 \pm 2.02 \times 10^5$	>300 โคโลนี	$6.33 \pm 0.04$	>300 โคโลนี	ไม่มีการยับยั้ง

รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ และเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส จากการทดสอบของไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหางจระเข้ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยนำหน้าว่านหางจระเข้แห้งต่อปริมาตรของน้ำ



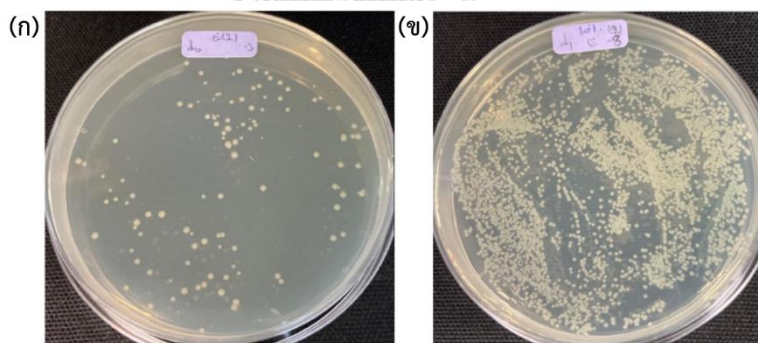
รูปที่ 4.24 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหางจระเข้ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)





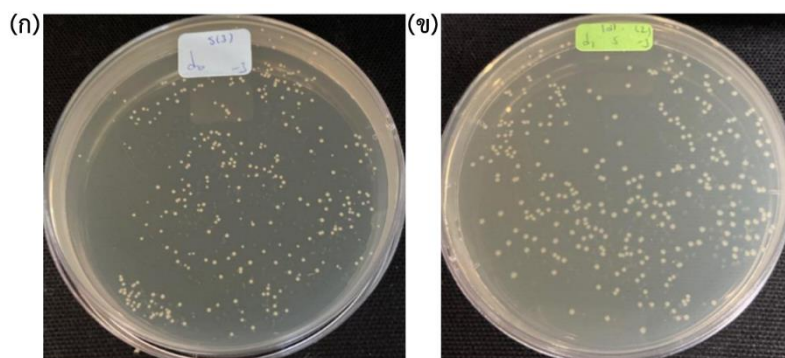
รูปที่ 4.25 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหาง  
จระเข้ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่  
การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)

รูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคไล และเชื้อ  
แบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส จากการทดสอบของไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหาง  
จระเข้ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักว่านหางจระเข้แห้งต่อปริมาตรของน้ำ



รูปที่ 4.26 จำนวนแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคไล ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหางจระเข้  
ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือ  
จาง  $10^{-3}$  (ข)





รูปที่ 4.27 จำนวนแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส ในไฮโดรเจล 1/3 ที่จุ่มสารละลายว่านหางจรเข้ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ก) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง  $10^{-3}$  (ข)

จากการศึกษาการลดลงของเชื้อแบคทีเรียพบว่าเซลล์ูโลสที่ทำให้การจุ่มสารละลายว่านหางจรเข้ไม่มีการต้านเชื้อทั้งสองชนิด ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำดั้งเดิมในไฮโดรเจลส่งผลให้เกิดการเจือจางของสารละลายว่านหางจรเข้ อีกทั้งการทดสอบการลดลงของเชื้อแบคทีเรียในมาตรฐาน AATCC 100 จะต้องมีการซับผิวของวัสดุก่อนการทดสอบซึ่งส่งผลให้สารออกฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียของว่านหางจรเข้ที่ผิวหลุดออกไปและคงไว้ด้วยสารพอลิแซคคาไรด์ต่าง ๆ จากสารละลายว่านหางจรเข้ เช่น น้ำตาล จึงส่งผลให้ไม่เกิดฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย [72]

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถสกัดเส้นใยเซลลูโลสด้วยกระบวนการทางเคมีจากเส้นใยผักตบชวาแห้ง ซึ่งร้อยละผลได้ของการสกัดมีค่าเท่ากับ 42.7

2. สามารถเตรียมเซลลูโลสไฮโดรเจลโดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง จากการศึกษาปริมาณบอแรกซ์ต่อสมบัติของไฮโดรเจล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์ส่งผลให้ความหนืดร้อยละการเป็นเจล ความเป็นรูพรุน ค่าการบวมตัวในน้ำ ปริมาณน้ำสมดุล ค่าการส่องผ่านของแสง และค่าร้อยละความเครียดจากการกดของไฮโดรเจลมีแนวโน้มมากขึ้น หากแต่ความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้พบว่าการเติมบอแรกซ์ปริมาณ 3 เท่าของเซลลูโลสมีค่าการบวมตัวในน้ำและค่าร้อยละความเครียดจากการกดของไฮโดรเจลที่เหมาะสม จึงเลือกอัตราส่วนนี้ไปเตรียมเป็นเซลลูโลส/วุ้นหางจระเข้ไฮโดรเจลต่อไป

3. จากการทดสอบสมบัติความต้านทานเชื้อแบคทีเรียของสารละลายวุ้นหางจระเข้ พบว่าสารละลายวุ้นหางจระเข้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ของปริมาณวุ้นหางจระเข้แห้งต่อปริมาตรน้ำสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและลบ โดยมีค่าร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส สูงกว่าค่าร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ

4. จากการศึกษาปริมาณวุ้นหางจระเข้ต่อสมบัติของเซลลูโลส/วุ้นหางจระเข้ไฮโดรเจล พบว่าการเติมวุ้นหางจระเข้ลงในเซลลูโลสไฮโดรเจลทุกอัตราส่วนไม่ส่งผลต่อการบวมตัวในน้ำและปริมาณน้ำสมดุลของไฮโดรเจล ค่าร้อยละความเครียดจากการกดของไฮโดรเจล และลักษณะสัญญาณวิทยาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้พบว่าไฮโดรเจล 1/3 มีสมบัติในต้านทานเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส แต่ไม่สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ อย่างไรก็ตามไฮโดรเจล 1/3 ที่ทำการจุ่มในสารละลายวุ้นหางจระเข้ร้อยละ 5 และ 10 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าไม่มีฤทธิ์ในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาการละลายเซลล์โลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรีย พบว่าสารละลายมีสีเหลืองอ่อนอาจเนื่องมาจากการเหลืออยู่เล็กน้อยของลิกันิน ดังนั้นควรศึกษาถึงวิธีการกำจัดลิกันินที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การเพิ่มจำนวนครั้งในการฟอกขาว เป็นต้น
2. จากการศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่าเซลล์โลส/วุ้นทางจระเข้ไฮโดรเจลไม่มีการต้านเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นควรศึกษามาตรฐานอื่นเพิ่มเติมในการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของเซลล์โลส/วุ้นทางจระเข้ไฮโดรเจล
3. ศึกษาการใช้สารอื่น ๆ ที่มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อที่ดีในการเพิ่มสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย เช่น สารสกัดจากขมิ้น แทนนิน ไอออนของเงิน เป็นต้น
4. ควรขยายผลในการศึกษาต่อในเรื่องของสารเคลือบวัสดุในการต้านทานการลามไฟ



## บรรณานุกรม

1. Guilherme, M.R., A.V. Reis, A.T. Paulino, T.A. Moia, L.H. Mattoso, and E.B. Tambourgi, *Pectin-based polymer hydrogel as a carrier for release of agricultural nutrients and removal of heavy metals from wastewater*. Journal of applied polymer science, 2010. **117**(6): p. 3146-3154.
2. Chang, C. and L. Zhang, *Cellulose-based hydrogels: Present status and application prospects*. Carbohydrate polymers, 2011. **84**(1): p. 40-53.
3. Sud, D., G. Mahajan, and M. Kaur, *Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions—A review*. Bioresource technology, 2008. **99**(14): p. 6017-6027.
4. Association, N.F.P., *NFPA 704, Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response*. 2016: National Fire Protection Association.
5. กิตติยา บ่อมเงิน, ประภา โฉ๊ะสลาม, and รัชพล พะวงศรัตน์ม, การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการนึ่งร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกะ. วารสารมหาวิทยาลัยรัตนราชวิทยาลัย, 2559. **8**(3): p. 129-139.
6. Jahirul, M.I., M.G. Rasul, A.A. Chowdhury, and N.J.E. Ashwath, *Biofuels production through biomass pyrolysis—a technological review*. 2012. **5**(12): p. 4952-5001.
7. ภูษิต โปธิ์แสง, ผักตบชวา พืชพิสดาร. 2560, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วท.).
8. Rahman, S., P. Carter, and N. Bhattarai, *Aloe vera for tissue engineering applications*. Journal of functional biomaterials, 2017. **8**(1): p. 6.
9. Wichterle, O. and D. Lim, *Hydrophilic gels for biological use*. Nature, 1960. **185**(4706): p. 117-118.
10. Bernkop-Schnürch, A., M.H. Hoffer, and K. Kafedjiiski, *Thiomers for oral delivery of hydrophilic macromolecular drugs*. Expert opinion on drug delivery, 2004. **1**(1): p. 87-98.
11. วารุณี ตานันต์ and สายันต์ แสงสุวรรณ, พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์การวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2557. **16**(2): p. 63-81.
12. Ullah, F., M.B.H. Othman, F. Javed, Z. Ahmad, and H.M. Akil, *Classification*,

- processing and application of hydrogels: A review*. Materials Science Engineering: C, , 2015. **57**: p. 414-433.
13. Caló, E. and V.V. Khutoryanskiy, *Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products*. European Polymer Journal, 2015. **65**: p. 252-267.
  14. Kumar, A.C. and H. Erothu, *Synthetic Polymer Hydrogels*. Biomedical applications of polymeric materials composites, 2017.
  15. Gullón, P., I. Dávila, I. Egüés, A. Martínez-Salaberria, and J. Labidi, *HYDROGELS OF NATURAL POLYMERS*. NATURAL POLYMERS: p. 95.
  16. Jin, H., C. Zha, and L. Gu, *Direct dissolution of cellulose in NaOH/thiourea/urea aqueous solution*. Carbohydrate research, 2007. **342**(6): p. 851-858.
  17. Han, J., T. Lei, and Q. Wu, *High-water-content mouldable polyvinyl alcohol-borax hydrogels reinforced by well-dispersed cellulose nanoparticles: Dynamic rheological properties and hydrogel formation mechanism*. Carbohydrate polymers, 2014. **102**: p. 306-316.
  18. Gericke, M., P. Fardim, and T. Heinze, *Ionic liquids—promising but challenging solvents for homogeneous derivatization of cellulose*. Molecules, 2012. **17**(6): p. 7458-7502.
  19. Medronho, B. and B. Lindman, *Competing forces during cellulose dissolution: from solvents to mechanisms*. Current Opinion in Colloid Interface Science, 2014. **19**(1): p. 32-40.
  20. Olsson, C. and G. Westman, *Direct dissolution of cellulose: background, means and applications*. Cellulose-Fundamental Aspects, 2013. **10**: p. 52144.
  21. Li, M.-F., S.-N. Sun, F. Xu, and R.-C. Sun, *Cold NaOH/urea aqueous dissolved cellulose for benzylation: synthesis and characterization*. European Polymer Journal, 2011. **47**(9): p. 1817-1826.
  22. Liu, G., H. Sun, G. Liu, H. Zhang, S. Yuan, and Q. Zhu, *A molecular dynamics study of cellulose inclusion complexes in NaOH/urea aqueous solution*. Carbohydrate polymers, 2018. **185**: p. 12-18.
  23. Astrini, N., L. Anah, and A. Haryono, *Crosslinking Parameter on the preparation of cellulose based hydrogel with divinylsulfone*. Procedia Chemistry, 2012. **4**: p.

- 275-281.
24. Rojas, J. and E. Azevedo, *Functionalization and crosslinking of microcrystalline cellulose in aqueous media: A safe and economic approach*. Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res, 2011. **8**(1): p. 28-36.
  25. Lide, D.R., *CRC handbook of chemistry and physics*. Vol. 85. 2004: CRC press.
  26. Thombare, N., U. Jha, S. Mishra, and M. Siddiqui, *Borax cross-linked guar gum hydrogels as potential adsorbents for water purification*. Carbohydrate polymers, 2017. **168**: p. 274-281.
  27. กิเลน ประลองเชิง, ต้นทางผักตบชวา, in "ซักรงรบ" ไทยรัฐ. 2559, ไทยรัฐ. p. 3.
  28. นัยนันท์ อริยกานนท์, ผักตบชวากับการบำบัดสารมลพิษในน้ำ. Environmental, 2561. **3**: p. 49-55.
  29. Malik, A., *Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth*. Environment international, 2007. **33**(1): p. 122-138.
  30. Sanni, K. and J. Adesina, *Response of water hyacinth manure on growth attributes and yield of Celosia argentea L (Lagos Spinach)*. Journal of Agricultural Technology, 2012. **8**(3): p. 1109-1118.
  31. Ribeiro, G., R. Gruninger, A. Badhan, and T. McAllister, *Mining the rumen for fibrolytic feed enzymes*. Animal Frontiers, 2016. **6**(2): p. 20-26.
  32. Pu, Y., D. Zhang, P.M. Singh, and A.J.J.B. Ragauskas, *The new forestry biofuels sector*. Biofuels, Bioproducts Biorefining: Innovation for a sustainable economy, 2008. **2**(1): p. 58-73.
  33. Shrotri, A., H. Kobayashi, and A. Fukuoka, *Catalytic conversion of structural carbohydrates and lignin to chemicals*, in *Advances in Catalysis*. 2017, Elsevier. p. 59-123.
  34. Vanholme, R., B. Demedts, K. Morreel, J. Ralph, and W. Boerjan, *Lignin biosynthesis and structure*. Plant physiology, 2010. **153**(3): p. 895-905.
  35. Moore, D., G.D. Robson, and A.P. Trinci, *21st century guidebook to fungi with CD*. 2011: Cambridge University Press.
  36. Stenius, P., *Forest products chemistry, papermaking science and technology*. Helsinki, Finland: Fapet OY, 2000. **2**: p. 62-78.
  37. สุภาวดี ผลประเสริฐ, การปรับสภาพวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล. Thai Science

- Technology Journal, 2014: p. 641-649.
38. Jahirul, M.I., M.G. Rasul, A.A. Chowdhury, and N. Ashwath, *Biofuels production through biomass pyrolysis—a technological review*. *Energies*, 2012. **5**(12): p. 4952-5001.
  39. Sun, R., *Cereal straw as a resource for sustainable biomaterials and biofuels: chemistry, extractives, lignins, hemicelluloses and cellulose*. 2010: Elsevier.
  40. Reales-Alfaro, J.-G., L.-T. Trujillo-Daza, G. Arzuaga-Lindado, H.-I. Castaño-Peláez, and Á.-D.J.C. Polo-Córdoba, *Acid hydrolysis of water hyacinth to obtain fermentable sugars*. *CT F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2013. **5**(2): p. 101-111.
  41. Sun, J., X. Sun, H. Zhao, and R. Sun, *Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse*. *Polymer degradation stability*, 2004. **84**(2): p. 331-339.
  42. Goswami, K. and A. Mukherjee, *Bleaching of linen (Linum usitatissimum)*. *Indian journal of fibre and textile research*, 1993. **18**: p. 82-86.
  43. Reynolds, T. and A. Dweck, *Aloe vera leaf gel: a review update*. *Journal of ethnopharmacology*, 1999. **68**(1-3): p. 3-37.
  44. Brahmachari, G., *Aloe vera: a promising hope against Buruli ulcer*, in *Discovery and Development of Therapeutics from Natural Products Against Neglected Tropical Diseases*. 2019, Elsevier. p. 373-383.
  45. Algieri, F., A. Rodriguez-Nogales, M.E. Rodriguez-Cabezas, S. Risco, M. Ocete, and J. Galvez, *Botanical drugs as an emerging strategy in inflammatory bowel disease: A review*. *Mediators of inflammation*, 2015. **2015**.
  46. Jain, S., N. Rathod, R. Nagi, J. Sur, A. Laheji, N. Gupta, P. Agrawal, and S. Prasad, *Antibacterial effect of Aloe vera gel against oral pathogens: An in-vitro study*. *Journal of clinical diagnostic research: JCDR*, 2016. **10**(11): p. ZC41.
  47. วรณพร ศรีสุคนธ์รัตน์, สารต้านเชื้อจุลินทรีย์ ที่ใช้ในบ้านเรือนหรือทางสาธารณสุข. 2558: กลุ่มพัฒนาระบบวัตถุอันตรรายสำนักควบคุมเครื่องสำอางและวัตถุอันตรราย สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข.
  48. Sanseverino, I., A.N. Cuenca, R. Loos, D. Marinov, and T. Lettieri, *State of the Art on the Contribution of Water to Antimicrobial Resistance*. 2018, Publications Office of the European Union.
  49. Istirokhatun, T., N. Rokhati, R. Rachmawaty, M. Meriyani, S. Priyanto, and H.

- Susanto, *Cellulose isolation from tropical water hyacinth for membrane preparation*. *Procedia Environmental Sciences*, 2015. **23**: p. 274-281.
50. Qi, H., C. Chang, and L. Zhang, *Effects of temperature and molecular weight on dissolution of cellulose in NaOH/urea aqueous solution*. *Cellulose*, 2008. **15**(6): p. 779-787.
51. Chen, X., J. Chen, T. You, K. Wang, and F.J.C.p. Xu, *Effects of polymorphs on dissolution of cellulose in NaOH/urea aqueous solution*. 2015. **125**: p. 85-91.
52. Pullawan, T., A.N. Wilkinson, L.N. Zhang, and S.J. Eichhorn, *Deformation micromechanics of all-cellulose nanocomposites: comparing matrix and reinforcing components*. *Carbohydrate polymers*, 2014. **100**: p. 31-39.
53. พัชรภรณ์ วุฒิจริณมงคล, ปัทมธร รุ่งรัตน์พร, and จิตนิภา รุ่งเรืองประภา, การเตรียมและคุณสมบัติของไฮโดรเจลจากแป้งสาลี แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวโพด. *วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์*, 2561. **4**: p. 3-9.
54. Pereira, R., A. Mendes, and P. Bártolo, *Alginate/Aloe vera hydrogel films for biomedical applications*. *Procedia CIRP*, 2013. **5**: p. 210-215.
55. Alemdar, S. and S. Agaoglu, *Investigation of in vitro antimicrobial activity of Aloe vera juice*. *J Anim Vet Adv*, 2009. **8**(1): p. 99-102.
56. Baghersad, S., S.H. Bahrami, M.R. Mohammadi, M.R.M. Mojtahedi, and P.B. Milan, *Development of biodegradable electrospun gelatin/aloe-vera/poly ( $\epsilon$ -caprolactone) hybrid nanofibrous scaffold for application as skin substitutes*. *Materials Science Engineering: C*, 2018. **93**: p. 367-379.
57. Sundari, M.T. and A. Ramesh, *Isolation and characterization of cellulose nanofibers from the aquatic weed water hyacinth—Eichhornia crassipes*. *Carbohydrate Polymers*, 2012. **87**(2): p. 1701-1705.
58. Castrellon-Urbe, J., M. Nicho, and G. Reyes-Merino, *Remote optical detection of low concentrations of aqueous ammonia employing conductive polymers of polyaniline*. *Sensors Actuators B: Chemical*, 2009. **141**(1): p. 40-44.
59. Ling, Z., X. Zhang, G. Yang, K. Takabe, and F. Xu, *Nanocrystals of cellulose allomorphs have different adsorption of cellulase and subsequent degradation*. *Industrial crops products*, 2018. **112**: p. 541-549.
60. Chandra, J., N. George, and S.K. Narayanankutty, *Isolation and characterization*



- of cellulose nanofibrils from arecanut husk fibre*. Carbohydrate Polymers, 2016. **142**: p. 158-166.
61. Wang, Z., Z. Yao, J. Zhou, M. He, Q. Jiang, S. Li, Y. Ma, M. Liu, and S. Luo, *Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from pueraria root residue*. International journal of biological macromolecules, 2019. **129**: p. 1081-1089.
  62. Thi, B.T.N., L.K. Ong, D.T.N. Thi, and Y.-H. Ju, *Effect of subcritical water pretreatment on cellulose recovery of water hyacinth (Eichhornia crassipe)*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017. **71**: p. 55-61.
  63. Gao, Y., X. Wang, J. Wang, X. Li, J. Cheng, H. Yang, and H. Chen, *Effect of residence time on chemical and structural properties of hydrochar obtained by hydrothermal carbonization of water hyacinth*. Energy, 2013. **58**: p. 376-383.
  64. สิริวรรณ สิริสรณ์, สมบัติของเส้นใยไบโอสปอร์ตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี. Bulletin of Applied Sciences, 2018. **7**(7): p. 25-31.
  65. Park, H.-O., J.S. Hong, K.H. Ahn, S.J. Lee, and S.J.J.K.-A.R.J. Lee, *Influence of preparation parameters on rheological behavior and microstructure of aqueous mixtures of hyaluronic acid/poly (vinyl alcohol)*. 2005. **17**(2): p. 79-85.
  66. Lim, M., H. Kwon, D. Kim, J. Seo, H. Han, and S.B. Khan, *Highly-enhanced water resistant and oxygen barrier properties of cross-linked poly (vinyl alcohol) hybrid films for packaging applications*. Progress in Organic Coatings, 2015. **85**: p. 68-75.
  67. Okano, T. and A. Sarko, *Mercerization of cellulose. II. Alkali-cellulose intermediates and a possible mercerization mechanism*. Journal of applied polymer science, 1985. **30**(1): p. 325-332.
  68. Vizhi, R.E., *Nucleation kinetics, growth and characterization of sodium tetraborate decahydrate-second harmonic generation in centrosymmetric crystal*. Journal of Crystal Growth, 2016. **452**: p. 184-188.
  69. Uner, I.H., I. Deveci, E. Baysal, T. Turkoglu, H. Toker, and H. Peker, *Thermal analysis of Oriental beech wood treated with some borates as fire retardants*. Maderas. Ciencia y tecnología, 2016. **18**(2): p. 293-304.
  70. Yilmaz, M.T., *Minimum inhibitory and minimum bactericidal concentrations of*

*boron compounds against several bacterial strains*. Turkish Journal of Medical Sciences, 2012. **42**(Sup. 2): p. 1423-1429.

71. Pandey, R. and A. Mishra, *Antibacterial activities of crude extract of Aloe barbadensis to clinically isolated bacterial pathogens*. Applied biochemistry biotechnology, 2010. **160**(5): p. 1356-1361.
72. Tummalapalli, M., M. Berthet, B. Verrier, B. Deopura, M. Alam, and B. Gupta, *Composite wound dressings of pectin and gelatin with aloe vera and curcumin as bioactive agents*. International journal of biological macromolecules, 2016. **82**: p. 104-113.



ภาคผนวก ก

ค่าการบวมตัวในน้ำ ค่าปริมาณน้ำสมดุล และค่าร้อยละการเป็นเจล

ตารางที่ ก-1 ค่าการบวมตัวในน้ำ ค่าปริมาณน้ำสมดุล และค่าร้อยละการเป็นเจล

ไฮโดรเจล	ค่าร้อยละ ความเป็นเจล	ค่าร้อยละ การบวมตัว	ค่าร้อยละ ปริมาณน้ำสมดุล
1/0	2.2	362.0	91.2
	1.8	280.7	90.3
	2.6	332.8	90.9
ค่าเฉลี่ย	2.2	325.2	90.8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4	41.2	0.5
1/1	8.8	568.0	92.8
	9.0	535.6	92.6
	8.6	555.9	92.5
ค่าเฉลี่ย	8.8	553.1	92.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2	13.4	0.1
1/2	10.7	789.1	93.0
	11.8	756.2	92.9
	8.2	771.8	92.8
ค่าเฉลี่ย	10.3	772.3	92.9
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.5	13.5	0.1
1/3	18.0	901.6	93.6
	18.0	814.9	93.5
	11.4	915.3	93.5
ค่าเฉลี่ย	15.8	877.3	93.5

ไฮโดรเจล	ค่าร้อยละ ความเป็นเจล	ค่าร้อยละ การบวมตัว	ค่าร้อยละ ปริมาณน้ำสมดุล
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.1	44.4	0.1
1/4	14.8	840.5	93.1
	19.0	817.8	93.0
	12.8	826.3	93.4
ค่าเฉลี่ย	15.5	828.2	93.2
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.6	9.3	0.1
1/5	22.0	891.3	93.2
	21.0	793.1	92.9
	20.9	778.5	92.9
ค่าเฉลี่ย	21.3	821.0	93.0
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.5	50.1	0.2
1/3 aloe vera 5%	-	846.7	94.7
	-	921.5	93.3
	-	1000.7	94.0
ค่าเฉลี่ย	-	922.9	94.0
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	62.9	0.6
1/3 aloe vera 10%	-	869.6	94.0
	-	993.5	93.7
	-	964.2	93.3
ค่าเฉลี่ย	-	942.4	93.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	52.9	0.3

**ภาคผนวก ข**  
**ค่าร้อยละความเป็นผลึก**

**ตารางที่ ข** ค่าร้อยละความเป็นผลึก

สารตัวอย่าง	$I_{002} 22^\circ$	$I_{am} 18^\circ$	ค่าร้อยละความเป็นผลึก
ผักตบชวา	9.8	5.2	46.4
เส้นใยจากการสกัด	447.7	102.7	77.1

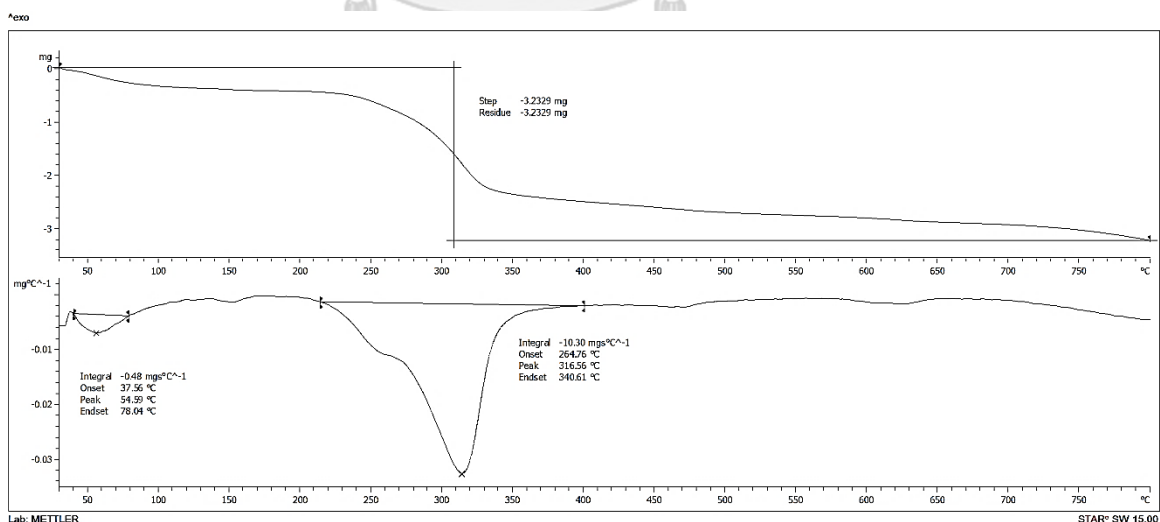
ไฮโดรเจล	$I_{002} 22^\circ$	$I_{am} 15^\circ$	ค่าร้อยละความเป็นผลึก
1/0	183.7	53.2	71.1
1/1	210.3	56.7	73.0
1/2	203.8	45.1	77.9
1/3	203.5	50.7	75.1
1/4	187.4	46.8	75.0
1/5	201.8	51.4	74.5

**ภาคผนวก ค**  
**ความขาวและความเหลืองของไฮโดรเจล**

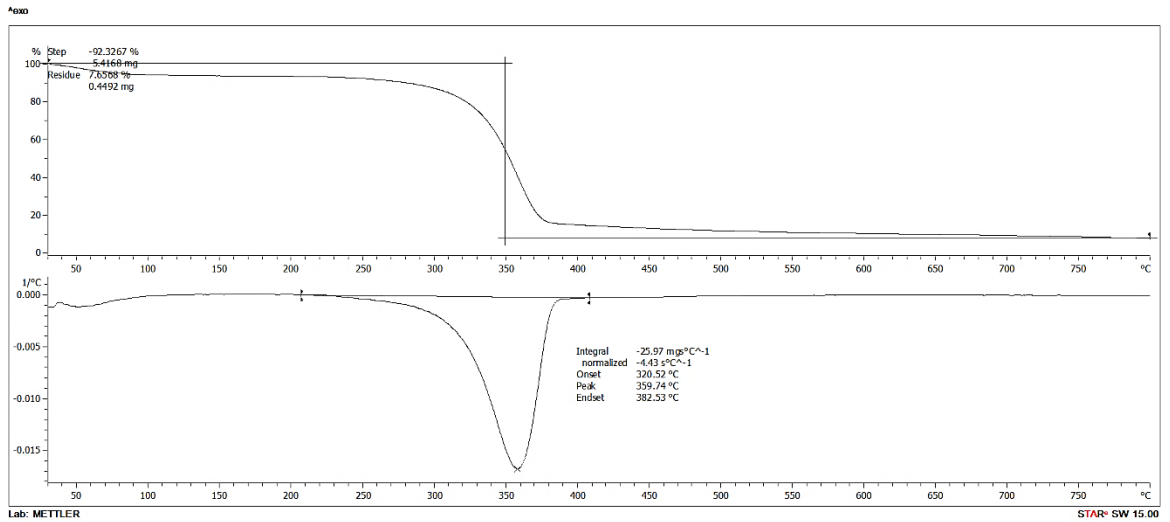
**ตารางที่ ค** ค่าความขาวและความเหลืองของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล	ค่าความขาว (WI-CIE)	ค่าความขาว (WI-ASTM)	ค่าความเหลือง (YI-E313)
1/0	-32.7	3.0	28.9
1/1	-0.5	15.7	22.0
1/2	17.9	23.9	19.8
1/3	19.7	27.8	20.8
1/4	26.4	32.0	19.7
1/5	39.7	37.7	15.7

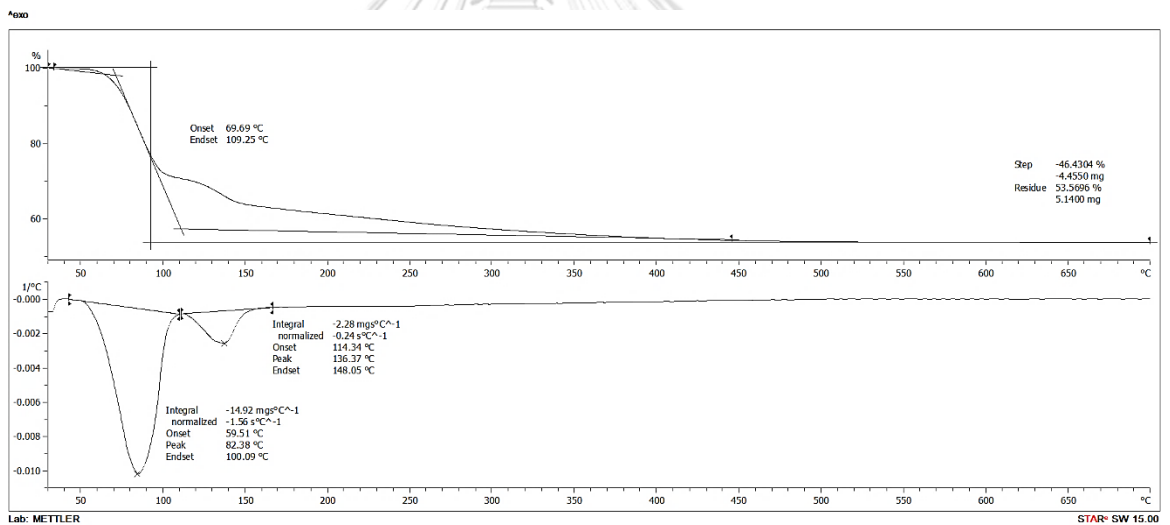
**ภาคผนวก ง**  
**เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA**



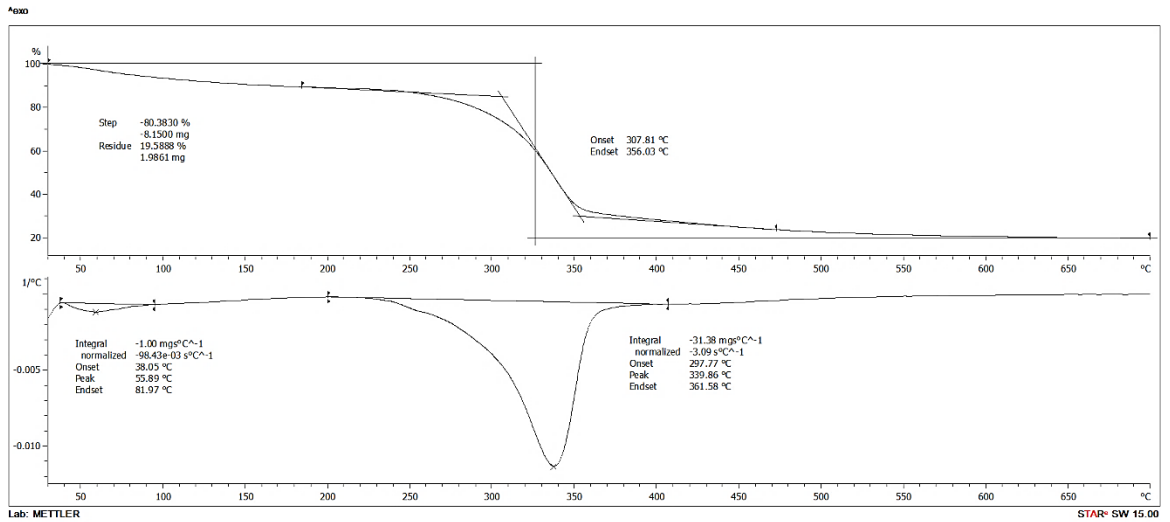
**รูปที่ ง-1** TGA เทอร์โมแกรมของผักตบชวา



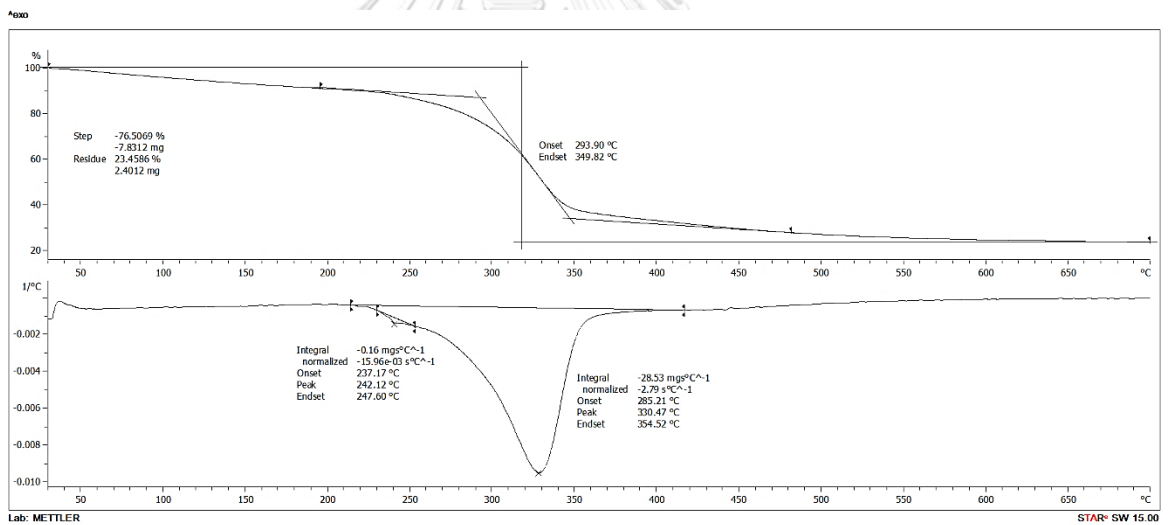
รูปที่ ง-2 TGA เทอร์โมแกรมของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาด้วยกระบวนการทางเคมี



รูปที่ ง-3 TGA เทอร์โมแกรมของบอแรกซ์

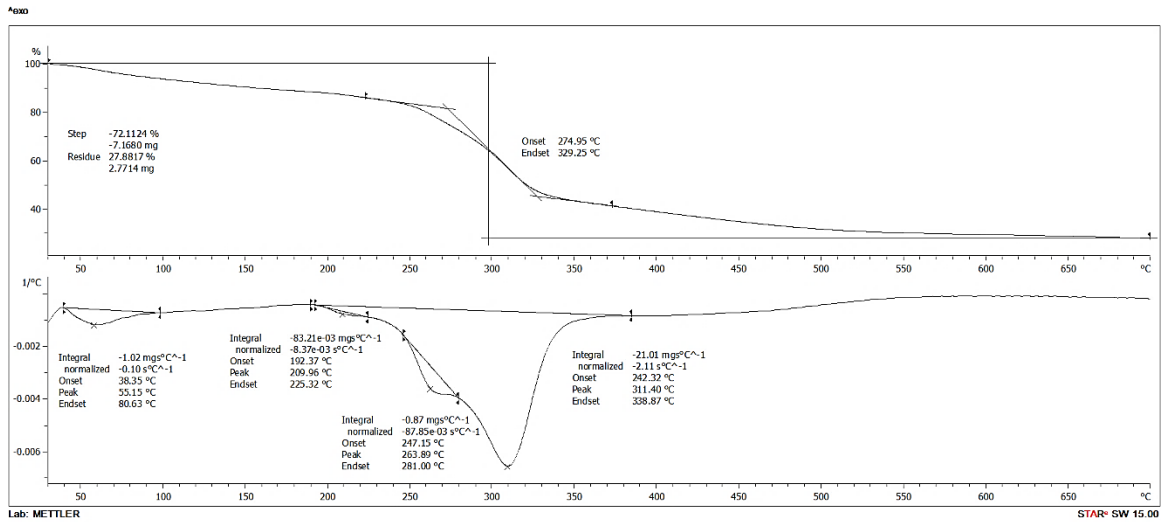


รูปที่ ง-4 TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล 1/0

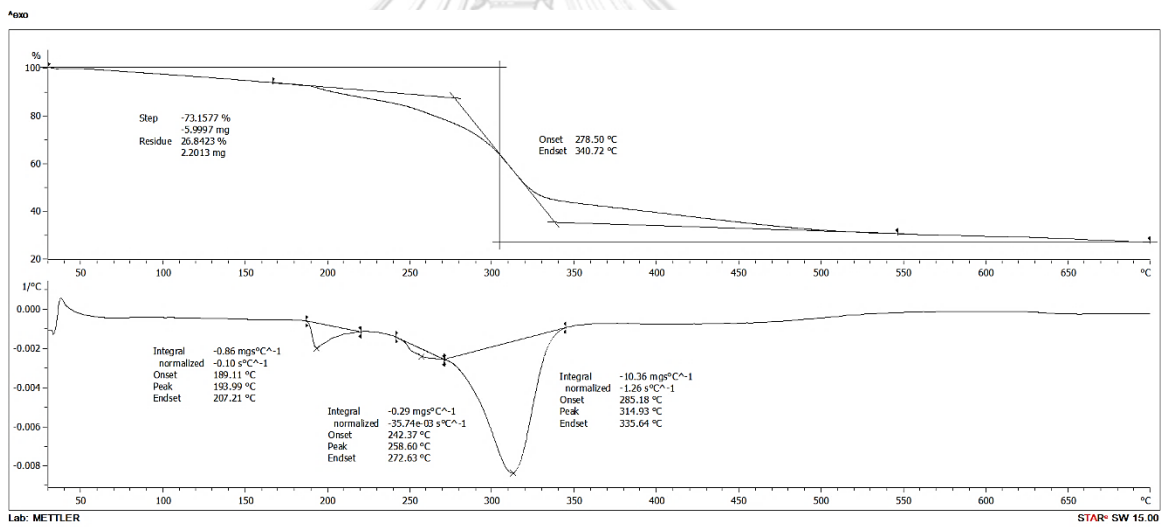


รูปที่ ง-5 TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล 1/1

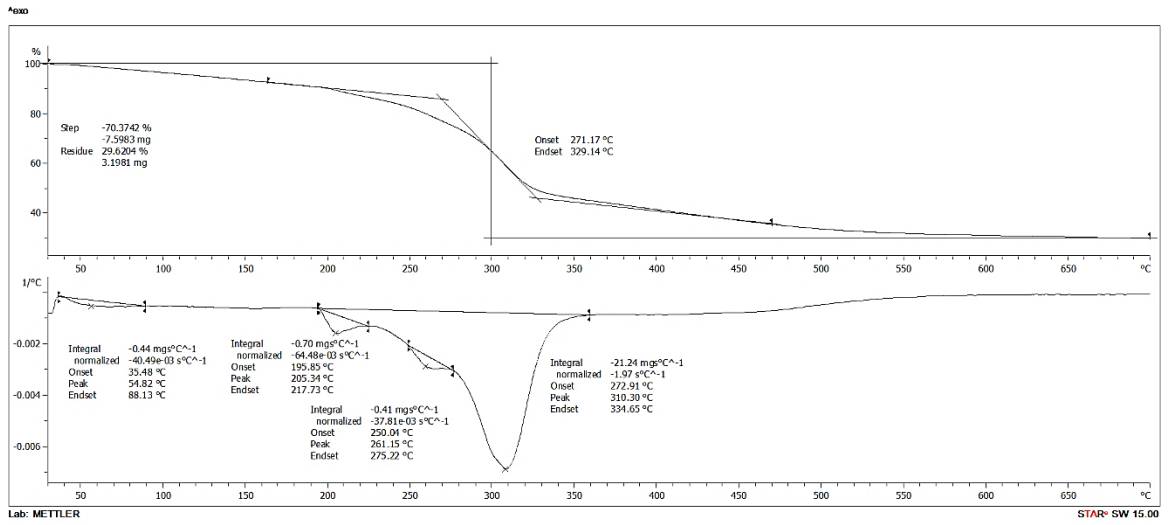




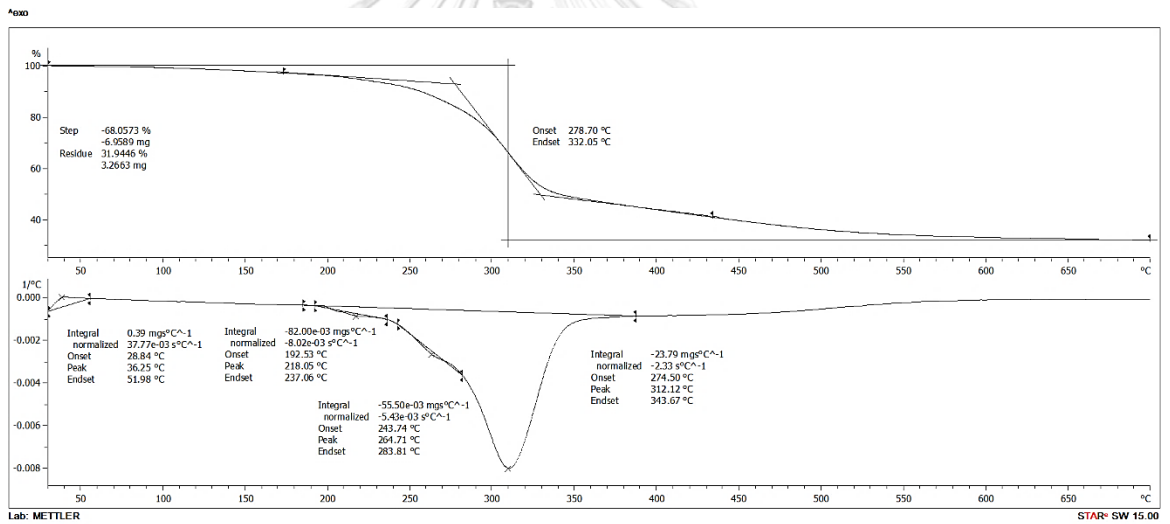
รูปที่ ง-6 TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล 1/2



รูปที่ ง-7 TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล 1/3



รูปที่ ง-8 TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล 1/4



รูปที่ ง-9 TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล 1/5

## ภาคผนวก จ

## ค่าการลามไฟ

ตารางที่ จ ค่าการลามไฟของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล	ความยาว ชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	เวลาเริ่มใน การเผา (วินาที)	เวลาสุดท้าย เผาไหม้หมด (วินาที)	เวลาที่ใช้เผา ไหม้ชิ้นงาน (วินาที)	อัตราการลามไฟ (มิลลิเมตร/วินาที)
1/0	20	8	22	14	1.43
1/1	25	3	43	40	0.63
1/2	20	2	65	63	0.32
1/3	25	3	86	83	0.30
1/4	25	3	92	89	0.28
1/5	25	3	102	99	0.25

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เฟรินส์ ภู่อทอง
วัน เดือน ปี เกิด	16 สิงหาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	82/199 ม.8 ต.อ้อมใหญ่ อ.สามพราน จ.นครปฐม 73160



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY