



การตอบสนองต่ออุณหภูมิของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจากเศษไม้ยางพารา

นางสาว นภาพรณ อินอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การตอบสนองต่ออุณหภูมิของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจากเศษไม้ยางพารา



นางสาวนภาพรรณ อินอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การตอบสนองต่ออุณหภูมิของนาโนเซลล์สุไลไฮโดรเจลจากเศษไม้ยางพารา

โดย นางสาว นภาพรณ อินอ่อน

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล พิสิฐพิพัฒน์สิน)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.จักรวาล ไม้ทิพย์)

ชื่อ : นภาพรณ อินอ่อน
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การตอบสนองต่ออุณหภูมิของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจาก
เศษไม้ยางพารา
สาขาวิชา : เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของไฮโดรเจลผสมนาโนเซลลูโลสที่ผลิตจากเศษไม้ยางพารา โดยเตรียมนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโปเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปเสริมแรงในไฮโดรเจล Poly(N-isopropylacrylamide) หรือ PNIPAM ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, FT-IR และ ESEM ของนาโนเซลลูโลสสามารถยืนยันถึงการมีอยู่ของเซลลูโลสที่มีขนาดนาโนเมตร วิเคราะห์นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลด้วยเทคนิค UV-Vis, FE-SEM และการทดสอบความแข็งแรงทางกล บ่งชี้ถึงนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10%w/v มีอัตราการส่องผ่านลดลง ลดการดูดซับน้ำ แข็งแรงมากขึ้น และมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิเข้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : นาโนเซลลูโลส ไม้ยางพารา กระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป ไฮโดรเจล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : NAWAN IN-ON
Thesis Title : Temperature response of nanocellulose hydrogel from rubber wood
Major Field : Energy Technology and Management
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor PANUPONG JAIBAN
Academic Year : 2024

Abstract

This research investigates hydrogels derived from rubber wood waste's temperature responsiveness to nanocellulose-reinforced poly(N-isopropyl acrylamide) (PNIPAM) hydrogels. Nanocellulose was prepared via TEMPO-mediated oxidation for 6 hours and subsequently incorporated into PNIPAM hydrogels. Characterization by XRD, FT-IR, and ESEM confirmed the successful preparation of the nanocellulose. Further analysis of the nanocellulose hydrogels using UV-Vis, FE-SEM, and mechanical testing indicated that incorporating 0.10% w/v nanocellulose resulted in decreased light transmittance, reduced water absorption, enhanced mechanical strength, and improved thermal stability. Moreover, the nanocellulose hydrogels exhibited excellent and repeatable temperature responsiveness.

Keyword : Nanocellulose, Rubber wood, TEMPO-Oxidation, Hydrogel

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาโดยตลอด ด้วยความรู้ความสามารถและประสบการณ์อันล้ำลึกของท่าน ทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และทรัพยากรต่างๆ ที่จำเป็นในการทำวิจัย รวมถึงคณาจารย์ บุคลากร นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนมาโดยตลอด

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา บุพการี และครอบครัว ที่ได้ให้กำลังใจ สนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถผ่านอุปสรรคต่างๆ มาได้ สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขออภัยมา ณ ที่นี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประโยชน์แก่ผู้สนใจงานวิจัยในสาขานี้ต่อไป

นภาพรรณ อินอ่อน

\

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
\.....	ฉ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัยของการวิจัย	4
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 นาโนเซลล์โลส.....	6
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของเซลล์โลส.....	6
2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์โลส.....	7
2.1.3 ลักษณะทั่วไปของนาโนเซลล์โลส	8

2.1.4 คุณสมบัติของนาโนเซลลูโลส.....	8
2.1.5 การนำไปใช้ประโยชน์ของนาโนเซลลูโลส	9
2.2 ไม้ยางพารา.....	10
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของไม้ยางพารา.....	10
2.2.2 นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา	11
2.2.3 กระบวนการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา	11
2.2.4 คุณสมบัติของนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา.....	12
2.2.5 การนำไปใช้ประโยชน์ของนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา	12
2.3 ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	13
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจล.....	13
2.3.2 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	17
2.3.3 โครงสร้างของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	17
2.3.4 กลไกการทำงานของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	17
2.3.5 ประเภทของไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ	17
2.3.6 การประยุกต์ใช้ของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย	44
3.1 สารเคมี.....	44
3.2 อุปกรณ์.....	44
3.3 เครื่องมือ.....	45
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	45
3.4.1 การสกัดเซลลูโลสจากไม้ยางพารา.....	45
3.4.2 การสกัดนาโนเซลลูโลส	48
3.4.3 การสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล.....	50

3.4.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะ	51
3.4.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์สมบัติการ เปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน	54
3.4.6 การทดสอบความทนทาน	54
3.4.7 การทดสอบการบวมน้ำ และคายน้ำ.....	55
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	56
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	56
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก	58
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา	59
4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี	61
4.5 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง.....	62
4.6 ผลการวิเคราะห์ความเสถียร	65
4.7 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์สมบัติการ เปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน	66
4.8 ผลการทดสอบความทนทาน	67
4.9 ผลการทดสอบการบวมน้ำ และคายน้ำ	69
4.10 การทดสอบการตอบสนองต่อความร้อน.....	71
4.11 การทดสอบการใช้งานจริง.....	72
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปและอภิปรายผล	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม.....	2
ประวัติผู้เขียน	6

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างไฮโดรเจลที่นิยมนำมาใช้งาน (Williams, 1981).....	14
ตารางที่ 4-1 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของไม้อย่างพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส.....	57
ตารางที่ 4-2 สัดส่วนอะตอม EDS ของโมเลกุลเซลลูโลสนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมง.....	62
ตารางที่ 4-3 อัตราการส่องผ่านของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v ที่ 600 นาโนเมตร.....	65

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	7
ภาพที่ 2-2 สารแขวนลอยนาโนเซลลูโลส (Dufresne, 2013).....	8
ภาพที่ 2-3 फिल्मคอมโพสิตจากนาโนเซลลูโลส (Nogi & Yano, 2008)	10
ภาพที่ 2-4 กลไกการเกิดไฮโดรเจล (Hoare & Kohane, 2008)	15
ภาพที่ 2-5 โครงสร้างไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ (Williams, 1981) .	16
ภาพที่ 2-6 โครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลทั่วไป (Hoare & Kohane, 2008).....	18
ภาพที่ 2-7 ผลการวิเคราะห์ DSC ของกาวยูเรีย-พอร์มัลดีไฮด์ (UF) (Kawalerczyk et al., 2024)	20
ภาพที่ 2-8 สเปกตรัม FT-IR ของ RW, RWC, Ac-RWC, RW-CNC และ Ac-RW-CNC.....	21
ภาพที่ 2-9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ RW, RWC, Ac-RWC, RW-CNC และ	22
ภาพที่ 2-10 ลักษณะเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราผ่าน (a,b) กระบวนการของเหลวไอออนิก	27
ภาพที่ 2-11 สเปกตรัม FT-IR นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราผ่านกระบวนการของเหลวไอออนิก...	27
ภาพที่ 2-12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราผ่านกระบวนการ	28
ภาพที่ 2-13 ลักษณะเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากกลบผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (Hassan 29	
ภาพที่ 2-14 ภาพถ่ายการตอบสนองต่อความร้อนของไฮโดรเจล PNIPAAm โดยใช้เซลลูโลสจากไม้	34
ภาพที่ 2-15 ผลการทดสอบ DSC ของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เติมนานเซลลูโลสที่	34
ภาพที่ 2-16 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เติมนานเซลลูโลสที่	35
ภาพที่ 2-17 ผลการทดสอบความเค้นแรงดึงของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เติมนาน...	35
ภาพที่ 2-18 อัตราการส่องผ่านของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เติมนานเซลลูโลสที่ผ่าน	36
ภาพที่ 2-19 ภาพ SEM ของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.30 และ 0.42% wt	38

ภาพที่ 2-20 ผลการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.06, 0.18,	39
ภาพที่ 2-21 ผลการทดสอบ DSC ของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.06, 0.18, 0.30 และ ..	39
ภาพที่ 2-22 ผลการทดสอบ TGA และ DTG ของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.06, 0.18, ..	40
ภาพที่ 2-23 ผลการทดสอบความทนทานของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.42% wt เป็นจำนวน	40
ภาพที่ 2-24 การตอบสนองต่อความร้อนของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm (Tian et al., 2021).....	41
ภาพที่ 2-25 ลักษณะของไฮโดรเจล PNIPAM/CNS (Guangxu Ju et al., 2024).....	42
ภาพที่ 3-1 ไม้ยางพาราแห้ง	46
ภาพที่ 3-2 การปรับสภาพไม้ยางพาราด้วยสารละลายต่าง	46
ภาพที่ 3-3 การฟอกสีไม้ยางพาราด้วยสารละลายกรด.....	47
ภาพที่ 3-4 เซลลูโลสของไม้ยางพารา.....	47
ภาพที่ 3-5 เซลลูโลสของไม้ยางพาราที่ผ่านการบดละเอียด	48
ภาพที่ 3-6 การสกัดนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยเทมโป	48
ภาพที่ 3-7 การทำให้ของผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโฮโมจีไนเซอร์.....	49
ภาพที่ 3-8 การทำให้ตัวอย่างแห้งด้วยเครื่องทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer).....	49
ภาพที่ 3-9 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล.....	50
ภาพที่ 3-10 ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	50
ภาพที่ 3-11 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ PerkinElmer (ที่มา : ห้องวิจัย 53-705.	51
ภาพที่ 3-12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Bruker (ที่มา : ห้องวิจัย 53-705 คณะ	52
ภาพที่ 3-13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม ยี่ห้อ ThermoScientific (ที่มา :	52
ภาพที่ 3-14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ HITACHI (ที่มา : ศูนย์บริการวิเคราะห์	53
ทดสอบ NSTDA Characterization and Testing Service Center (NCTC)).....	53

ภาพที่ 3-15 เครื่องสเปกโตรสโกปี ยี่ห้อ KLAB (ที่มา : ห้องวิจัย 54-417 คณะวิทยาศาสตร์ พลังงาน	53
ภาพที่ 3-16 เครื่องวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน ยี่ห้อ Shimadzu/DSC-60A Plus (ที่มา : https://www.shimadzu.com)	54
ภาพที่ 3-17 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ยี่ห้อ Shimadzu (ที่มา : ศูนย์บริการวิเคราะห์ ทดสอบ NSTDA Characterization and Testing Service Center (NCTC))	55
ภาพที่ 4-1 รูปแบบ FT-IR ของไม้ยางพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส	57
ภาพที่ 4-2 รูปแบบ FT-IR ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%	58
ภาพที่ 4-3 รูปแบบ XRD ของไม้ยางพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส	59
ภาพที่ 4-4 รูปแบบ ESEM ของนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมง	60
ภาพที่ 4-5 รูปแบบ FE-SEM ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05% และ 0.10%	61
ภาพที่ 4-6 รูปแบบ EDS-Mapping ของนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6..	62
ภาพที่ 4-7 รูปแบบ UV-Vis ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%	63
ภาพที่ 4-8 รูปแบบ UV-VIS ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%	64
ภาพที่ 4-9 รูปแบบ UV-VIS ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ทดสอบความเสถียรเป็นจำนวน	66
ภาพที่ 4-10 รูปแบบ DSC ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0% และ 0.10%	67
ภาพที่ 4-11 ผลแรงกีดขัดของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%	68
ภาพที่ 4-12 ผลการบวมน้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%	70
ภาพที่ 4-13 รูปแบบการคายน้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v	71
ภาพที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความร้อนของของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v	72

ภาพที่ 4-15 การนำไปใช้งานจริงของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ของเนื้อหมู และผักชี	73
ภาพที่ 4-16 การนำไปใช้งานจริงของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ของเนื้อไก่ ผักบุ้ง และต้นหอม	74
ภาพที่ 4-17 การนำไปใช้งานซ้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ของเนื้อหมู	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาเทคโนโลยีอย่างก้าวกระโดดส่งผลให้รูปแบบการดำเนินชีวิตของมนุษย์เปลี่ยนแปลงไปอย่างสิ้นเชิง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกัน สร้างระบบอัจฉริยะที่สามารถควบคุมและบริหารจัดการสิ่งต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในภาคการเกษตร IoT ได้ปฏิวัติวงการด้วยการสร้าง "ฟาร์มอัจฉริยะ" ที่เกษตรกรสามารถควบคุมปัจจัยการผลิตได้อย่างแม่นยำ ไม่ว่าจะเป็นการวัดความชื้นในดิน การควบคุมระบบรดน้ำ หรือการตรวจสอบสภาพอากาศ นำไปสู่การเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตที่สูงขึ้น นอกจากนี้ IoT ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและรักษาสິงแวดล้อมไปพร้อมกันอีกด้วย

เซ็นเซอร์นับเป็นองค์ประกอบหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบเทคโนโลยี IoT มีหน้าที่ในการตรวจจับและวัดค่าต่าง ๆ โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับของเซ็นเซอร์อาจแสดงผลได้ทันทีหรืออาจจำเป็นต้องส่งผ่านไปยังอุปกรณ์อื่นเพื่อทำการประมวลผลข้อมูล เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และแสงสว่าง จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์และนำไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ให้ทำงานได้อย่างอัตโนมัติ หนึ่งในตัวอย่างการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ที่น่าสนใจคือ หน้าต่างอัจฉริยะ เป็นหน้าต่างที่สามารถปรับเปลี่ยนความโปร่งใสได้ตามต้องการ โดยอาศัยหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับความร้อน เมื่ออุณหภูมิภายนอกห้องสูงขึ้น หน้าต่างปรับลดความโปร่งใสลง เพื่อลดปริมาณแสงแดดที่ส่องเข้ามา ควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่ เพิ่มความสะดวกสบายในการใช้ชีวิต และช่วยลดพลังงาน วัสดุที่นิยมใช้เป็นเซ็นเซอร์ในหน้าต่างอัจฉริยะคือไฮโดรเจล ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างคล้ายเจล สามารถดูดซับน้ำและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพเมื่อสัมผัสกับปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลได้จาก เจลลาติน (Wang et al., 2020) พอลิอะซิลาไมด์ (Chen et al., 2020) โดยเฉพาะพอลิเมอร์ชนิด Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAm) มีคุณสมบัติตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ดี โปร่งใส และมีต้นทุนต่ำ ทำให้เหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในหน้าต่างอัจฉริยะ นอกจากนี้ หน้าต่างอัจฉริยะยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาคารสูง อาคารสำนักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคารให้เหมาะสมกับการใช้งาน (Wang et al., 2022)

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่น่าสนใจเสนอผลของการนำ ไฮโดรเจล Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAm) มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะในการพัฒนา วัสดุหุ้มบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและแจ้งเตือนความร้อนในการเก็บรักษาอาหาร ไฮโดรเจลชนิดนี้มีคุณสมบัติ Thermoresponsive ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดวิกฤต ไฮโดรเจลจะเกิดการหดตัวและเปลี่ยนจากโปร่งใสเป็นขุ่น ทำให้สามารถใช้เป็น ตัวบ่งชี้อุณหภูมิ (Temperature indicator) สำหรับเฝ้าระวังสถานะที่ไม่เหมาะสมในการจัดเก็บอาหาร อีกทั้งการนำไฮโดรเจล PNIPAm มาใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารยังช่วยลดการเน่าเสียของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากสามารถควบคุมระดับความชื้นและการถ่ายเทอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาของอาหาร ไฮโดรเจลสามารถช่วย ลดการควบแน่นของไอน้ำ ภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุของการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น ตัวควบคุมการปลดปล่อยสารกันเสียหรือสารต้านจุลชีพตามอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยืดอายุอาหาร โดยเฉพาะอาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ ซึ่งมีความไวต่ออุณหภูมิและความชื้นสูง การพัฒนาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ PNIPAm จึงมีศักยภาพในการช่วยลดของเสียจากอาหารและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโลจิสติกส์ในอุตสาหกรรมอาหาร (Sun et al., 2024)

แม้ว่าไฮโดรเจลจะมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องความเสถียรของสมบัติเชิงกลเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน การเติมสารตัวเติมขนาดนาโนลงในโครงสร้างของไฮโดรเจลจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยสารตัวเติม เช่น Antimony-tin oxide (ATO) (Xu et al., 2018) และ Cesium tungsten bronze nanorods (Cs_xWO_3) (Wu, Shi, Li, & Wang, 2018) สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานให้กับไฮโดรเจลได้ อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตสารตัวเติมเหล่านี้มีความซับซ้อนและมีต้นทุนสูง นอกจากนี้ การกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์ไฮโดรเจลยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิตที่ได้ อนุภาคพอลิไดอะมีน (PDAPs) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเข้ากันได้ทางชีวภาพและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ไฮโดรเจล แต่มีข้อจำกัดในเรื่องต้นทุนที่สูง (Tian et al., 2021)

ในปัจจุบันมีงานวิจัยหลากหลายที่ใช้เซลลูโลสเติมลงไฮโดรเจลเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติไฮโดรเจล เช่น เซลลูโลสจากฝ้าย, เซลลูโลสจากต้นกล้วย (Espinosa et al., 2017) โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่พบมากที่สุดในธรรมชาติอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน มีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และมีความทนทานต่อสารเคมีหลายชนิด เมื่อนำเซลลูโลสมาแปรรูปเป็นขนาดนาโน จะได้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษที่เรียกว่า นาโนเซลลูโลส นาโนเซลลูโลสมีความโดดเด่นในเรื่องพื้นที่ผิวที่มาก ทำให้มีปฏิสัมพันธ์กับวัสดุอื่นได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางกลที่เหนือกว่าเซลลูโลสทั่วไป ทำให้นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุนาโนที่มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง สามารถเตรียมนาโนเซลลูโลสได้จากการนำเซลลูโลสมาผ่านกระบวนการได้ 2

ทาง คือทางกลและทางเคมี โดยทางกล คือกระบวนการอัลตราโซนิกความถี่สูงเพื่อให้เซลลูโลสแตกตัว และทางเคมีจะใช้กระบวนการของเหลวไอออนิก (Ionic liquid, ILs-RNC) (ได้ผลผลิต 92%) เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน, กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid hydrolysis, AH-RNC) (ได้ผลผลิต 85%) จะเกิดการเปลี่ยนสีของนาโนเซลลูโลสและกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (Tempo oxidation, TO-RNC) (ได้ผลผลิต 95%) โดยใช้ TEMPO (2,2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl) ซึ่งได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากได้ผลผลิตปริมาณมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อนาโนเซลลูโลส (Onkarappa et al., 2020)

ประเทศไทยมีการปลูกและส่งออกยางพาราจำนวนมาก ซึ่งยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจของ ไทย มีการส่งออกไปยังต่างประเทศประมาณ 80% ได้แก่ จีน, มาเลเซีย, สหรัฐอเมริกา, ญี่ปุ่น และ อินเดีย มีมูลค่าส่งออกมากกว่า 1 แสนล้านบาท และประมาณ 20% เป็นการใช้ยางพาราสำหรับเป็น วัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในประเทศ เช่น ยางรถยนต์, ยางยึด และถุงมือทางการแพทย์ เป็นต้น โดยในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพาราประมาณ 20 ล้านไร่ ครอบคลุมถึง 67 จังหวัดจาก 77 จังหวัด โดยภาคใต้เป็นภูมิภาคที่ปลูกยางพารามากที่สุด รองลงมาเป็นภาคอีสาน ปัจจุบัน อุตสาหกรรมยางพารามีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความต้องการใช้ยางพาราใน ภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มสูงขึ้น และมีการพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ ที่ใช้ยางพาราเป็นวัตถุดิบหลัก ส่งผลให้มีเศษไม้ยางพารา หรือกิ่งไม้ยางพารา ที่ร่วงหล่นจากต้นจำนวนมากล้วนเป็นของเสียทาง การเกษตรที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ กลายเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อม

จากข้อมูลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากเศษไม้ ยางพาราผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโปสำหรับเป็นสารเสริมแรงของไฮโดรเจล PNIPAm เพื่อเพิ่มความทนทานของไฮโดรเจล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 พัฒนานาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจากไม้ยางพาราสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ

1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิว พื้นระทางเคมี การส่องผ่าน การตอบสนอง ต่อความร้อน การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน ความทนทาน คุณสมบัติเชิงกล และการ บวมตัวของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจากไม้ยางพารา

1.2.3 ศึกษาการรักษาความสดของเนื้อสัตว์ และผัก

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ขนาดอนุภาคของนาโนเซลลูโลสส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล

1.3.2 ปริมาณอนุภาคนาโนเซลลูโลสย้อมแสดงลักษณะพื้นผิวไฮโดรเจลแตกต่างกัน

1.3.3 นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลสามารถใช้ตรวจจับอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียสได้เนื่องจากอุณหภูมิร่างกายของมนุษย์ที่มักอยู่ในช่วง 36-37 องศาเซลเซียส และอาจสูงขึ้นเมื่อเกิดไข้ ทำให้สามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ทางชีวภาพเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายได้ นอกจากนี้ อุณหภูมิในประเทศไทย โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนมักสูงถึง 35 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า ดังนั้นไฮโดรเจลที่เปลี่ยนสีได้ในช่วงอุณหภูมินี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นตัวบ่งชี้สภาพแวดล้อม เช่น การเฝ้าระวังความร้อนในบรรจุภัณฑ์อาหารหรือวัสดุที่ไวต่ออุณหภูมิ เพื่อช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนสูงเกินไป

1.4 ขอบเขตงานวิจัยของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำนาโนเซลลูโลสจากเศษไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการเทมโป (TEMPO, 2,2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจมาเป็นสารตัวเติมให้กับไฮโดรเจล poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAm) จากนั้นนำนาโนเซลลูโลสมาวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดลอมร่วมกับเทคนิคเปกโตรโคปีเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (ESEM-EDS) วิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) จากนั้นนำนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลมาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FE-SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) วิเคราะห์การดูดกลืนรังสีและการส่องผ่านด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิซิเบิลสเปกโตรสโกปี (UV-Vis) ที่ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) วิเคราะห์การสนองต่อความร้อนและความทนทานของไฮโดรเจลโดยการทดสอบการตอบสนองต่อความร้อนเป็นจำนวน 50 รอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analysis) และวิเคราะห์การบวมตัวของไฮโดรเจล

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

เซลลูโลส (Cellulose) คือสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ พบได้ในพืชทุกชนิด ตั้งแต่ต้นไม้อายุไปจนถึงสาหร่าย เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ในพืช ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงและรูปร่างแก่พืช พบได้ในพืชทุกชนิด ตั้งแต่ต้นไม้อายุไปจนถึงสาหร่ายประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (Glucose) เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวหลายโมเลกุล เรียงตัวกันเป็นระเบียบ ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงและเหนียวสูง

นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) คือวัสดุนวัตกรรมที่ได้จากการนำเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่มากมายในธรรมชาติ เช่น ไม้ ฝ้าย มาผ่านกระบวนการแปรรูปให้มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร (หนึ่งในพันล้านส่วนของเมตร) ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก แต่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กถึง 5 เท่า และเบากว่าถึง 5 เท่า คุณสมบัติที่โดดเด่นคือนาโนเซลลูโลสมีความยืดหยุ่น ความทนทานต่อความร้อน และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลิตมาจากวัสดุธรรมชาติ ทำให้สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล (Nanocellulose Hydrogel) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่เกิดจากการนำเอานาโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นเส้นใยขนาดเล็กมากอยู่ในระดับนาโนเมตรที่ได้จากพืช มาผสมผสานเข้ากับไฮโดรเจล ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายวุ้น สามารถดูดซับน้ำได้ดี ทำให้เกิดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น ความสามารถในการดูดน้ำสูง ความยืดหยุ่น ความแข็งแรง

พอลิเมอร์ที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Thermoresponsive polymers) คือวัสดุชนิดหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษในการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ เช่น ความหนืด การละลาย หรือการขยายตัว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นจากโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ไวต่ออุณหภูมิ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โมเลกุลของพอลิเมอร์จะเกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่า (Lower Critical Solution Temperature, LCST) : อุณหภูมิที่เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นถึงค่านี้ ไฮโดรเจลจะเริ่มหดตัวและปล่อยน้ำออก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเจลเป็นสถานะของเหลว เกิดจากการที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ในไฮโดรเจลจะเคลื่อนที่มากขึ้น ทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับโมเลกุลของน้ำอ่อนลง ส่งผลให้ไฮโดรเจลหดตัว

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.1.1. พัฒนานาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจากเศษไม้ยางพารา

1.1.2. องค์ความรู้สำหรับการนำเศษไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์

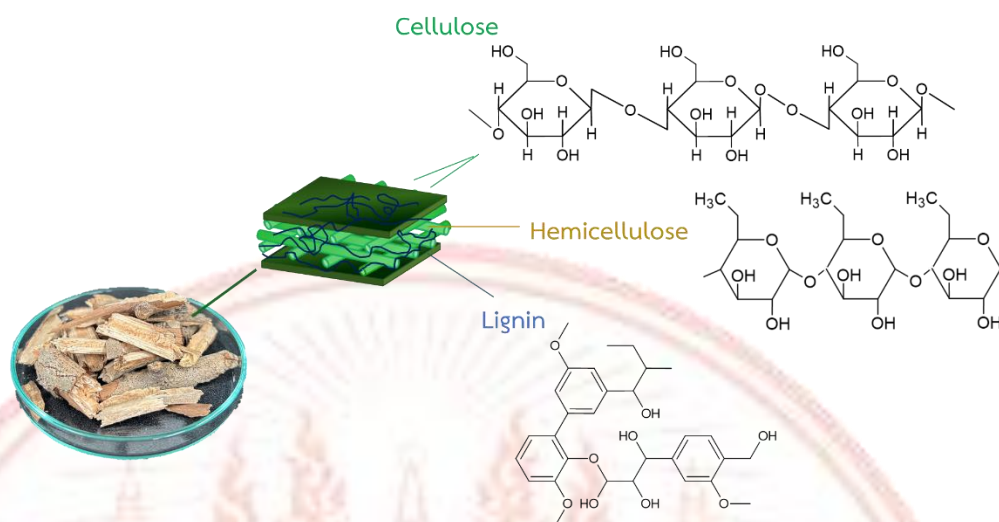
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นาโนเซลลูโลส

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของเซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดประมาณ 45% ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในธรรมชาติ ไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป มักพบมากในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงโดยเฉพาะในส่วนของลำต้น ไม้ และใบ ซึ่งเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่ให้ความแข็งแรงและโครงสร้างแก่พืช รวมถึงสาหร่ายสีเขียว รา แบคทีเรียบางชนิด และสัตว์ทะเลบางกลุ่ม เช่น เพรียงลอย และเพรียงสาย จัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ นอกจากนี้ เซลลูโลสยังเป็นแหล่งพลังงานสำคัญสำหรับสัตว์บางชนิด เช่น วัว ควาย และม้า ซึ่งมีจุลินทรีย์ในกระเพาะอาหารที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้ มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ จัดเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของ β -D-glucose ระหว่างโมเลกุลตำแหน่งคาร์บอนที่ 1 กับตำแหน่งคาร์บอนที่ 4 เป็นพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสกว่า 1,000 - 10,000 โมเลกุล จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเชื่อมต่อกันเป็นสายตรงและยาว ประกอบกันเป็นเส้นใย (Fibrils) เซลลูโลสจึงมีความแข็งแรงและทนทาน เมื่อเส้นใยอยู่รวมกันเป็นมัด เรียกว่า Fibrous bundle ซึ่งเป็นเส้นใยที่มองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนผลึก (Crystalline form) และ ส่วนอสัณฐาน (Amorphous form) โดยโมเลกุลในแต่ละหน่วยซ้ำจะพบหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) 3 หมู่จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและอีก 1 หมู่ทำพันธะกับโมเลกุลข้างเคียง ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่อยู่ในส่วนอสัณฐานจะมีความไม่เป็นระเบียบมากกว่าหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของส่วนผลึก จึงทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในบริเวณของส่วนอสัณฐานสามารถเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ดีกว่าหมู่ไฮดรอกซิลของส่วนผลึกโดยในธรรมชาติจะไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระแต่มักพบอยู่รวมกับลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และแทนนิน เป็นต้น (Klemm et al., 2005) ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของเซลลูโลส

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

คุณสมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส มีความหลากหลายและส่งผลต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเซลลูโลสมีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยสายยาวของหน่วยน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันผ่านพันธะบีตา-1,4-ไกลโคซิดิก (beta-1,4-glycosidic bond) ซึ่งส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกายภาพดังต่อไปนี้ ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength) เซลลูโลสมีความแข็งแรงเชิงกลสูง เนื่องจากสายพอลิเมอร์ตรงยาวที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เส้นใยเซลลูโลสมีความทนทานและเหนียวแน่น สามารถรับแรงดึงได้สูง นอกจากนี้ ยังเป็นโครงสร้างที่สำคัญในพืชที่ช่วยพยุงเซลล์พืชให้คงรูป (Klemm, Heublein, Fink, & Bohn, 2005) ความไม่ละลายในน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์ (Insolubility in Water and Organic Solvents) เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป เนื่องจากมีโครงสร้างที่เสถียรและพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ที่เข้มแข็ง ส่งผลให้เซลลูโลสมีความคงทนต่อการละลายในสภาพแวดล้อมต่างๆ (Klemm et al., 2005) ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Capacity) แม้ว่าเซลลูโลสจะไม่ละลายน้ำ แต่ก็มี ความสามารถในการดูดซับน้ำสูง เนื่องจากกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) บนโครงสร้างเซลลูโลสสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ (Klemm et al., 2005) ความคงตัวทางความร้อน (Thermal Stability) เซลลูโลสมีความคงตัวต่อความร้อนได้ดี โดยทั่วไปเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200–300 °C ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและระดับการประมวลผล โครงสร้างที่เป็นสายโซ่ยาวและพันธะที่แข็งแรงทำให้เซลลูโลสมีความคงทนต่อความร้อน (Matheus et al., 2013) และความเป็นผลึกและอสัณฐาน (Crystallinity and Amorphous

Regions) เซลลูโลสมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และอสัณฐาน (amorphous) โดยส่วนผลึกจะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งส่งผลให้เกิดความแข็งแรงเชิงกลที่สูงขึ้น ในขณะที่ส่วนอสัณฐานจะมีความยืดหยุ่นและสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า (French, 2017)

2.1.3 ลักษณะทั่วไปของนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) นั้นเป็นสารที่ได้จากการสกัดเซลลูโลสให้อยู่ในระดับนาโนเมตร (Nanometre, nm) โดยผ่านกระบวนการทางกายภาพและเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เซลลูโลสนาโนคริสตัล หรือ ผลึกของนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanocrystals, CNCs) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-20 นาโนเมตร ความยาวของเซลลูโลสมากกว่า 100-600 นาโนเมตร และเซลลูโลสนาโนไฟบริล หรือเส้นใยของนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanofibril, CNFs) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-30 นาโนเมตร ความยาวของเซลลูโลสมากกว่า 1 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 2-2 โดยเซลลูโลสนาโนคริสตัล (CNCs) มีรูปร่างคล้ายแท่งและมีความเป็นผลึกสูง ทำให้แข็งแรงและเปราะ ในขณะที่เซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNFs) มีลักษณะเป็นเส้นใย มีความยืดหยุ่นสูง มีความโปร่งใส น้ำหนักเบา สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ และคุณสมบัติในการต้านทานต่อจุลินทรีย์ โดยวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตนาโนเซลลูโลส เช่น ไม้ ยูคาลิปตัส ฝ้าย (Dufresne, 2013)



ภาพที่ 2-2 สารแขวนลอยนาโนเซลลูโลส (Dufresne, 2013)

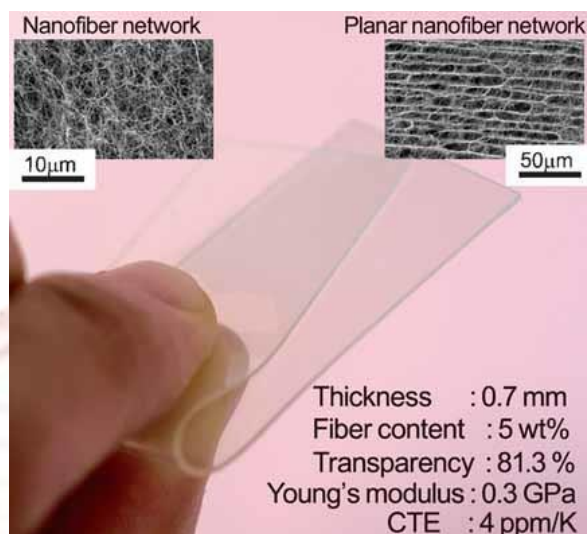
2.1.4 คุณสมบัติของนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) เป็นวัสดุที่ได้จากเซลลูโลสธรรมชาติและมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้มีคุณสมบัติที่น่าสนใจและหลากหลาย (Dufresne, 2013) เช่น ความแข็งแรงเชิงกลสูง (High Mechanical Strength) นาโนเซลลูโลสมีความแข็งแรงเชิงกลสูงมาก โดยมีค่าความ

ต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกับเส้นใยสังเคราะห์ เช่น คาร์บอนไฟเบอร์หรือเคฟลาร์ ซึ่งทำให้นาโนเซลลูโลสเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในคอมโพสิต ความโปร่งใส (Transparency) นาโนเซลลูโลสสามารถทำให้เกิดฟิล์มที่มีความโปร่งใสสูง เนื่องจากมีขนาดเล็กเกินกว่าที่จะกระจายแสง ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ น้ำหนักเบา (Lightweight) นาโนเซลลูโลสน้ำหนักเบา แต่ยังคงความแข็งแรง ทำให้สามารถใช้ในการผลิตวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงและช่วยลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้ การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) นาโนเซลลูโลสมีคุณสมบัติที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ไม่ทิ้งสารเคมีตกค้างที่เป็นอันตราย จึงเหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น บรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ และความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Capacity) นาโนเซลลูโลสมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง เนื่องจากพื้นที่ผิวมากและกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้าง จึงถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ดูดซับ เช่น ผ้าอ้อมและวัสดุปิด

2.1.5 การนำไปใช้ประโยชน์ของนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) ได้รับความสนใจอย่างมากในหลากหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความแข็งแรงเชิงกลสูง น้ำหนักเบา โปร่งใส ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีความสามารถในการดูดซับน้ำ ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ นาโนเซลลูโลสจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน เช่น วัสดุเสริมแรงในคอมโพสิต (Reinforcement in Composites) นาโนเซลลูโลสถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุ เช่น การเสริมแรงในพลาสติกชีวภาพหรือยางธรรมชาติ ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรงมากขึ้น (Dufresne, 2013) การผลิตฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ (Films and Packaging Materials) ฟิล์มนาโนเซลลูโลสมีความโปร่งใส แข็งแรง และสามารถย่อยสลายได้ ทำให้เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อแทนที่พลาสติกที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุทางการแพทย์ (Biomedical Applications) นาโนเซลลูโลสถูกใช้ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผลและวัสดุสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ (biocompatibility) และไม่ก่อให้เกิดการแพ้ การดูดซับและกรองสาร (Adsorbents and Filtration) ด้วยโครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมาก นาโนเซลลูโลสจึงสามารถใช้ในการกรองหรือดูดซับสารเคมีและมลพิษในน้ำและอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการพัฒนาวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics and Conductive Materials) นาโนเซลลูโลสสามารถใช้ในการพัฒนาวัสดุอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น เช่น จอภาพใส หรือแบตเตอรี่แบบยืดหยุ่น เนื่องจากมีความสามารถในการสร้างโครงสร้างที่บางและโปร่งใส ดังภาพที่ 2-3 (Nogi & Yano, 2008)



ภาพที่ 2-3 พิล์มคอมโพสิตจากนาโนเซลลูโลส (Nogi & Yano, 2008)

2.2 ไม้ยางพารา

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของไม้ยางพารา

ไม้ยางพารา (Rubberwood) มาจากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) มีถิ่นกำเนิดในป่าแอมะซอน ประเทศบราซิล โดยชาวพื้นเมืองเรียกว่า เกาซู (cao tchu) ซึ่งแปลว่า ต้นไม้ร้องไห้ ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2313 โจเซฟ ฟรีสเติลีย์ นักเคมีชาวอังกฤษ ได้ค้นพบว่าน้ำยางจากต้นยางสามารถถลบนรอยดินสอได้ จึงเรียกว่ายางลบหรือ Rubber ในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ยางพาราถูกนำเข้ามาปลูกในมาเลเซียเป็นครั้งแรก โดยบริษัทอังกฤษ เริ่มมีการขยายเมล็ดกล้ายางพารา จากพันธุ์ 22 ต้น นำไปปลูกในประเทศต่าง ๆ ของทวีปเอเชีย และในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 พระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) เป็นผู้เหมือนหนึ่ง "บิดาแห่งยาง" เป็นผู้ที่ได้นำต้นยางพาราดั้งแรกมาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง จากนั้นพระยารัษฎานุประดิษฐ์เล็งเห็นถึงศักยภาพของยางพารา จึงได้ส่งเจ้าเมือง นายอำเภอ กำนัน และผู้ใหญ่บ้านไปศึกษาเทคนิคการปลูกยางในประเทศมาเลเซีย เมื่อปี พ.ศ. 2444 เมื่อผู้เหล่านั้นกลับมามีได้นำความรู้ที่ได้มาถ่ายทอดให้แก่ราษฎร พร้อมทั้งแจกจ่ายพันธุ์ยาง และให้คำแนะนำในการปลูก ทำให้เกิดกระแสดความสนใจในการปลูกยางอย่างแพร่หลาย ชาวบ้านเรียกยางพาราว่า "ยางเทศา" เนื่องจากเป็นพืชที่มาจากต่างประเทศ สภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมและความต้องการยางในตลาดโลกที่สูงขึ้น ทำให้การปลูกยางขยายตัวอย่างรวดเร็วในภาคใต้ โดยเฉพาะใน 14 จังหวัด ตั้งแต่ชุมพรลงไปถึงชายแดนมาเลเซีย ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางประมาณ 12 ล้านไร่ กระจายอยู่ในภาคใต้ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังนั้นรัฐบาลจึงให้การสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมยางอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านการลงทุนโรงงานแปรรูปยาง การวิจัย

และพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จากยาง และการส่งเสริมการตลาด ทำให้ประเทศไทยกลายเป็นผู้ผลิต และส่งออกยางรายใหญ่ (เทศบาลเมืองกันตัง, 2565) อย่างไรก็ตาม หลังจากการใช้งานในภาค การเกษตรเพื่อเก็บเกี่ยวยางพาราประมาณ 25-30 ปี ต้นยางพาราจะหยุดการผลิตน้ำยางที่คุ้มค่า ต้น ยางเหล่านี้จึงถูกโค่นลงและนำมาใช้ในอุตสาหกรรมไม้แทนที่จะทิ้งให้สูญเปล่า มีคุณสมบัติที่ หลากหลายดังนี้ (Wang et al., 2021) โครงสร้างและเนื้อไม้ ไม้ยางพารามีเนื้อไม้ที่ละเอียด มีความ แข็งแรงปานกลางถึงสูง (560-640 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) สีของเนื้อไม้มีสีอ่อน ทำให้สามารถ ย้อมและเคลือบได้ง่าย เหมาะกับงานตกแต่งภายใน ความทนทานและความยืดหยุ่น ไม้ยางพารามี ความยืดหยุ่นและสามารถทนต่อแรงดึงได้ดี การบำบัดด้วยสารเคมีเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแมลงและ เชื้อรา ทำให้ไม้ชนิดนี้เหมาะสำหรับการทำเฟอร์นิเจอร์ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ และบานประตู ความยั่งยืน คงทน เนื่องด้วยการนำมาใช้แทนการเผาทำลายไม้ ไม้ยางพาราถือเป็นวัสดุยั่งยืนที่ช่วยลดผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อม โดยไม้เหล่านี้มาจากต้นยางที่หมดอายุการผลิตน้ำยาง และช่วยลดการตัดไม้จากป่า ธรรมชาติ การแปรรูป กระบวนการแปรรูปไม้ยางพาราประกอบด้วยการอบแห้งและการเคลือบเพื่อ เพิ่มความทนทานต่อความชื้นและแมลง การแปรรูปเหล่านี้ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ทำ จากไม้ยางพารา อีกทั้งไม้ยางพารามีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ วัสดุ ก่อสร้าง และยังถูกนำไปใช้ในการพัฒนาเซลล์สุริยะเพื่อนำไปผลิตวัสดุนาโนอย่าง นาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanocrystals, CNCs) ซึ่งใช้ในวัสดุคอมโพสิตและเทคโนโลยีชีวภาพ

2.2.2 นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา

นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา (Rubberwood cellulose nanocrystals, CNCs) เป็นวัสดุ ชีวภาพที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง น้ำหนักเบา และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีศักยภาพสูงใน การนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการทดแทนวัสดุสังเคราะห์ที่ เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้จากการแปรรูปเซลลูโลสในไม้ยางพาราผ่านกระบวนการทางเคมี เช่น การไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก (Wang et al., 2021) กระบวนการนี้จะสกัดเซลลูโลสออกจาก ไม้ยางพาราโดยกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส และทำให้โครงสร้างเซลลูโลสกลายเป็นอนุภาคระดับนา โน

2.2.3 กระบวนการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา

กระบวนการผลิตนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและอาศัย เทคโนโลยีที่หลากหลาย โดยมีขั้นตอนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการแยกเซลลูโลสออกจากส่วนประกอบ อื่นๆ ของไม้ยางพารา และการแปรรูปเซลลูโลสให้มีขนาดระดับนาโนเมตร ซึ่งการแยกเซลลูโลสให้ บริสุทธิ์ กำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส โดยใช้วิธีทางเคมี เช่น การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส แล้วทำการฟอกสีเพื่อขจัดสี

และสารอื่นๆ ที่ไม่ต้องการออกไป ทำให้ได้เซลลูโลสที่บริสุทธิ์มากขึ้น และการไฮโดรไลซิสด้วยกรด นาโนเซลลูโลสจะถูกสร้างขึ้นโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นสูงทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส ทำให้เกิดการย่อยสลายพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลของเซลลูโลส เพื่อให้เซลลูโลสเกิดการแยกตัวเป็นอนุภาคนาโน ผลลัพธ์คือการได้นาโนเซลลูโลสที่ได้มีขนาดเล็กและมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น อาจจะต้องควบคุมความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะส่งผลต่อขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติของนาโนเซลลูโลสที่ได้

2.2.4 คุณสมบัติของนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา

นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา (Rubberwood cellulose nanocrystals, CNCs) เป็นวัสดุนวัตกรรมที่มีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น ความแข็งแรงสูง CNCs ที่ได้จากไม้ยางพารามีความแข็งแรงเชิงกลสูง จึงเหมาะสมสำหรับการใช้ในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความยืดหยุ่น CNCs บางชนิดมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นได้ น้ำหนักเบา CNCs มีน้ำหนักเบามาก ทำให้สามารถลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ได้ ความโปร่งใส เมื่อผสมกับวัสดุอื่นๆ ในปริมาณที่เหมาะสม CNCs สามารถทำให้วัสดุมีความโปร่งใสได้ และการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ด้วยการที่ CNCs มาจากเซลลูโลสธรรมชาติ ทำให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.2.5 การนำไปใช้ประโยชน์ของนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา

นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา (Cellulose Nanocrystals, CNCs) ไม่เพียงแต่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วยคุณสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถปรับแต่งเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น วัสดุคอมโพสิต ใช้ CNCs เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทก มีน้ำหนักเบา ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลอื่นๆ เช่น ความแข็ง ความเหนียว และโมดูลัสของความยืดหยุ่น ทำให้วัสดุมีประสิทธิภาพสูงขึ้นสามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ บรรจุภัณฑ์ชีวภาพ CNCs สามารถใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ หรือฟิล์มหรือที่บางเบา แข็งแรง สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Wang et al., 2021) อีกทั้งยังมีการศึกษาวัสดุในการพัฒนาระบบนำส่งยาแบบควบคุม ซึ่งช่วยในการควบคุมการปลดปล่อยยาในร่างกาย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยาและลดผลข้างเคียงจากการปลดปล่อยยามากเกินไป นาโนเซลลูโลสมีโครงสร้างที่ละเอียดและมีพื้นผิวสูง จึงสามารถนำไปใช้ในระบบการกรองน้ำและอากาศที่ต้องการความละเอียดสูงในการกรองอนุภาคนาโน รวมถึงสารพิษหรือสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

2.3 ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ

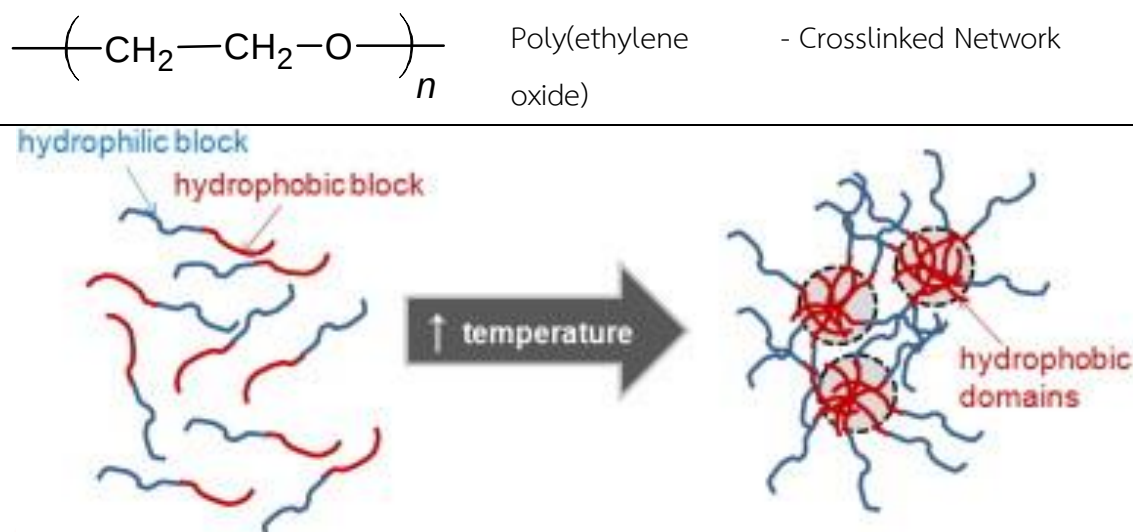
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ที่สามารถดูดซับและกักเก็บน้ำได้ปริมาณมาก โดยไม่ละลายในน้ำ มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากถึง 90% ขึ้นไป โครงสร้างของไฮโดรเจลมีความสำคัญต่อสมบัติในการดูดซับน้ำ โดยทั่วไปไฮโดรเจลจะมีโครงสร้างเป็น โครงร่างตาข่ายสามมิติ (3D network structure) คล้ายกับใยแมงมุม ซึ่งโครงร่างตาข่ายนี้ประกอบด้วยสายพอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะเคมีหรือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างๆ เช่น พันธะไฮโดรเจน หรือแรง van der Waals ที่มีความสามารถในการพองตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลแสดงดังตารางที่ 2-1 (Williams, 1981) อีกทั้งมีลักษณะทั่วไปดังนี้ การดูดซับน้ำได้ดีสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากจนกระทั่งพองตัว ทำให้สามารถกักเก็บน้ำหรือสารละลายต่าง ๆ ได้ จึงเหมาะสำหรับใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความชุ่มชื้น เช่น ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว เครื่องสำอาง และเลนส์สัมผัส ความสามารถในการปลดปล่อยสาร โดยไฮโดรเจลสามารถนำมาใช้เป็นพาหะในการนำส่งสารต่างๆ เช่น ยา หรือสารอาหาร เนื่องจากสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารเหล่านั้นได้ ความยืดหยุ่น เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง เพราะโครงสร้างพอลิเมอร์ที่สามารถขยายตัวเมื่อดูดซับน้ำ แต่ก็ยังสามารถรูปร่างได้ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการแปรสภาพตามสภาวะแวดล้อม เมื่อไฮโดรเจลดูดซับน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างวัสดุที่มีความสามารถในการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นต่างๆ เช่น อุณหภูมิ หรือค่า pH ความเป็นพิษ วัสดุที่ใช้ผลิตไฮโดรเจลมักไม่มีพิษ จึงทำให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการแพทย์ เช่น แผ่นปิดแผล ยา และวัสดุเสริมเนื้อเยื่อ ความโปร่งแสง บางชนิดมีความโปร่งใส สามารถมองเห็นได้ ซึ่งทำให้เหมาะกับการใช้งานบางอย่าง เช่น เลนส์ตา และมีสมบัติทางชีวภาพที่ดี ความเป็นมิตรต่อเนื้อเยื่อและไม่กระตุ้นการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ได้แก่ พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง และมีความเสถียรทางเคมีที่ดี พอลิไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (Polyhydroxyethyl methacrylate) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง ทำให้เหมาะสำหรับใช้ในทางการแพทย์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ และมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ทำให้ไฮโดรเจลที่ได้มีความแข็งแรงสูง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำ หรือส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH₂, -CONH- และ -SO₃H และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) เช่น หมู่ -CH₂- และ -CH₃ สาย

โซ่พอลิเมอร์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ และพันธะไฮโดรเจน ดังภาพที่ 2-4 สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทตามลักษณะการสังเคราะห์และการใช้งาน ดังนี้ (Ottenbrite et al., 1996)

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างไฮโดรเจลที่นิยมนำมาใช้งาน (Williams, 1981)

โครงสร้างทางเคมี	ชื่อ	ประเภทไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้น
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{---}(\text{CH}_2-\text{C})\text{---} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH} \end{array}$	Poly(2-hydroxyethyl methacrylate)	- Cast Film - Crosslinked Network - Surface Grafted Polymer - Interpenetrating Polymer Network, IPN
$\begin{array}{c} \text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{---}(\text{CH}_2-\text{CH})\text{---} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$	Poly(acrylamide)	- Crosslinked Network - Surface Grafted Polymer - Interpenetrating Polymer Network, IPN
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{---}(\text{CH}_2-\text{C})\text{---} \\ \\ \text{COOH} \end{array}$	Poly(methacrylic acid)	- Crosslinked Network - Surface Grafted Polymer
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{---}(\text{CH}_2-\text{C})\text{---} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{OCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2 \end{array}$	Poly(N,N-dimethylaminoethyl methacrylate)	- Crosslinked Network - Surface Grafted Polymer
$\begin{array}{c} \text{---}(\text{CH}_2-\text{CH})\text{---} \\ \\ \text{N} \\ \\ \text{C}=\text{O} \end{array}$	Poly(N-vinyl pyrrolidone)	- Crosslinked Network - Surface Grafted Polymer



ภาพที่ 2-4 กลไกการเกิดไฮโดรเจล (Hoare & Kohane, 2008)

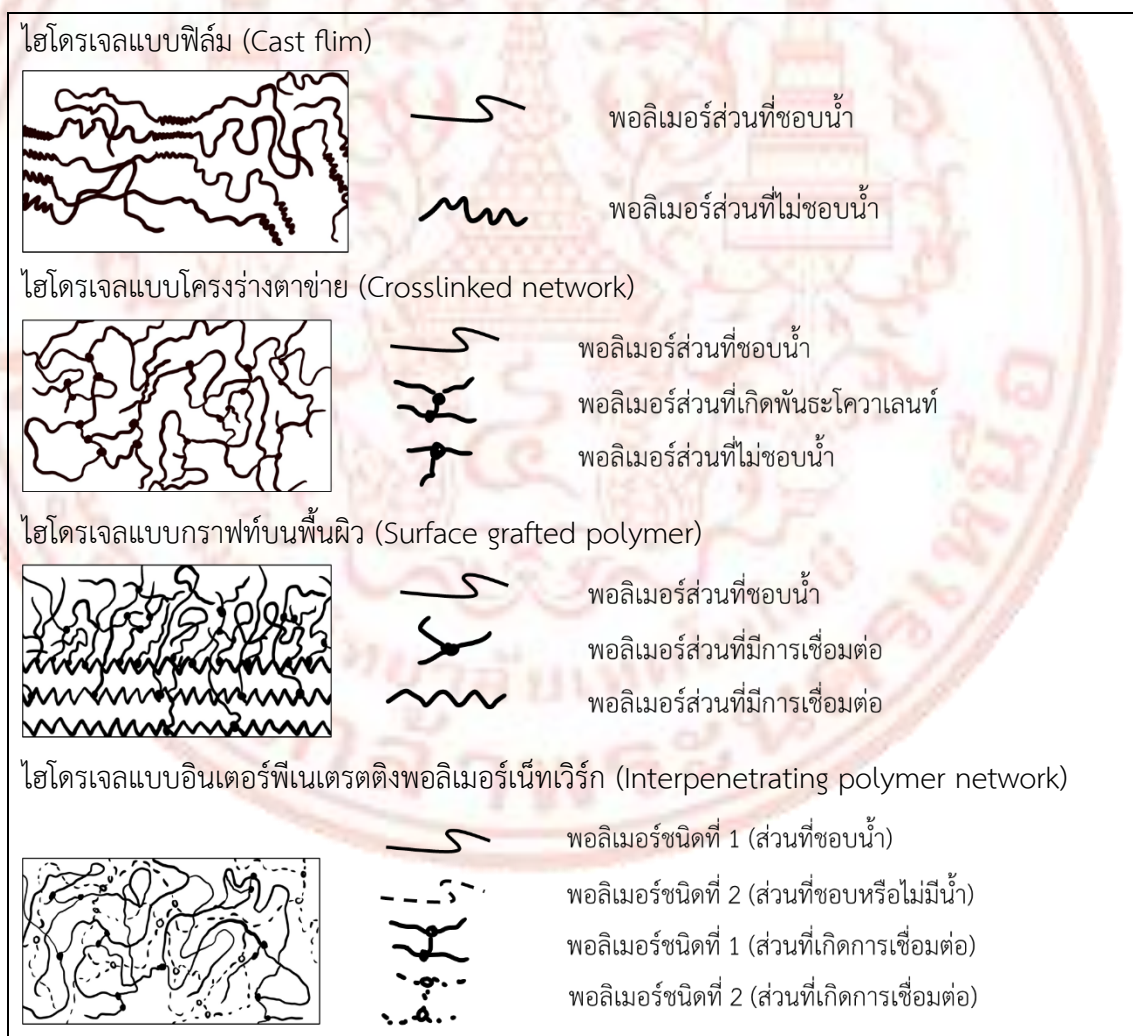
ไฮโดรเจลชนิดฟิล์มบาง (Cast Film) เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติ ประกอบด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงกันเป็นเครือข่าย ดังภาพที่ 2-5 สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก ทำให้มีลักษณะนุ่ม ชุ่มชื้น และยืดหยุ่นสูง คุณสมบัติเด่นของไฮโดรเจลชนิดฟิล์มบาง คือความสามารถในการเคลือบพื้นผิวต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุอื่นๆ เช่น เพิ่มความลื่นและลดการเสียดสี ให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย โครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลาย

ไฮโดรเจลชนิดโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network) เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงและเสถียร เนื่องจากเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายสามมิติ ดังภาพที่ 2-5 ทำให้มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างจากไฮโดรเจลชนิดอื่นๆ โดยโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีที่โมเลกุลขนาดเล็ก (มอนอเมอร์) เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว (พอลิเมอร์) และเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายสามมิติ กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีสารเคมีช่วย เช่น มอนอเมอร์ (Monomer) เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่เป็นหน่วยย่อยของพอลิเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) สารเคมีที่ช่วยเริ่มต้นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และตัวเชื่อมขวาง (Crosslinking agent) สารเคมีที่ช่วยเชื่อมโยงสายโซ่พอลิเมอร์เข้าด้วยกัน ทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย

ไฮโดรเจลชนิดกราฟต์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer) เป็นอีกหนึ่งประเภทของไฮโดรเจลที่มีความน่าสนใจและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์และวัสดุศาสตร์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดจากการนำไฮโดรเจลไปเชื่อมต่อกับ

พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ไม่ละลายน้ำ ดังภาพที่ 2-5 ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติผสมผสานกันระหว่างความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล ความแข็งแรง ทนทานของพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เพิ่มความแข็งแรงเชิงกล หรือทำให้ไฮโดรเจลที่สามารถละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่สามารถละลายน้ำได้

ไฮโดรเจลชนิดอินเตอร์เพเนตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating Polymer Network, IPN) ไฮโดรเจลชนิดนี้ประกอบด้วย 2 ชนิดหรือมากกว่า เป็นแบบโครงร่างตาข่าย แทรกซึมผ่านกันและกันอย่างใกล้ชิดไม่สามารถคัดแยกออกได้ ดังภาพที่ 2-5 จึงเกิดพันธะทางกายภาพและพันธะทางเคมีระหว่างกัน ซึ่งแตกต่างจากไฮโดรเจลทั่วไปที่มีโครงร่างตาข่ายเพียงชนิดเดียว ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงขึ้น หรือมีคุณสมบัติอื่นที่เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ (Williams, 1981)

2.3.2 ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ

ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Thermo-responsive hydrogels) เป็นวัสดุโพลีเมอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีการเปลี่ยนสถานะจากเจลเป็นของเหลวหรือจากของเหลวเป็นเจลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการยุบตัวหรือพองตัวของโครงสร้างโพลีเมอร์ภายในไฮโดรเจล โดยกระบวนการนี้ถูกขับเคลื่อนด้วยการปรับเปลี่ยนสมดุลระหว่างการดูดซับน้ำและการสลายน้ำ เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีการพัฒนาและศึกษากันอย่างกว้างขวางเนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพภายใต้การกระตุ้นจากอุณหภูมิ (Hoare & Kohane, 2008)

2.3.3 โครงสร้างของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ

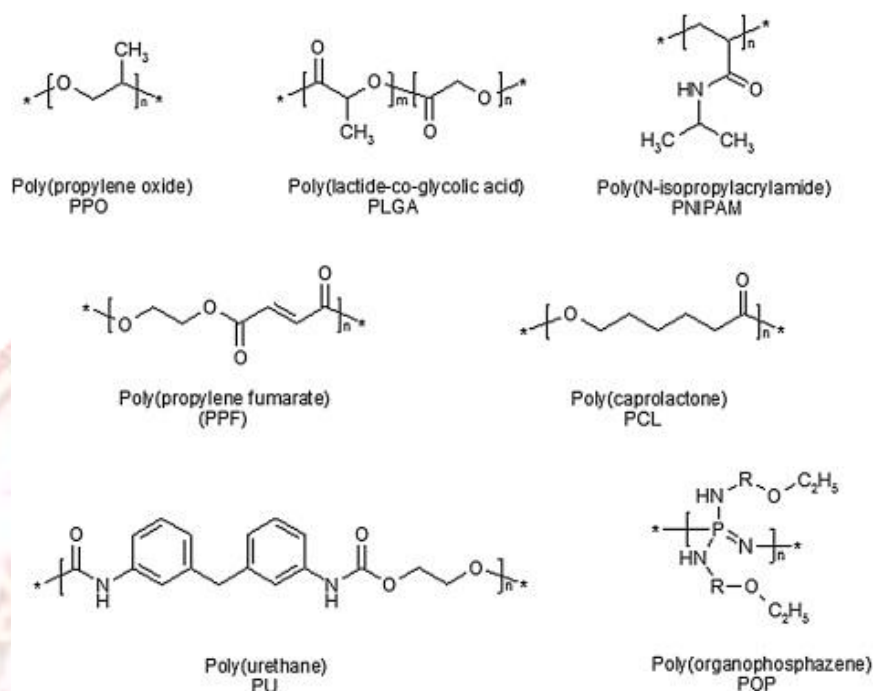
ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิจะมีโครงสร้างแบบร่างแห (network structure) ที่สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน ตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิสูง โพลีเมอร์อาจจะเกิดการยุบตัวและปล่อยน้ำออกจากโครงสร้าง ทำให้ไฮโดรเจลลดขนาดลง แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำ โพลีเมอร์จะพองตัวและดูดซับน้ำเข้ามา (Hoare & Kohane, 2008)

2.3.4 กลไกการทำงานของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ

ไฮโดรเจลเหล่านี้มักมีพฤติกรรมที่เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤตต่ำสุดของสารละลาย (Lower Critical Solution Temperature, LCST) โดยที่ LCST หมายถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า LCST ไฮโดรเจลจะพองตัวและดูดซับน้ำได้ เนื่องจากหมู่ะมิด ($-\text{CONH}_2$) ในโครงสร้าง PNIPAM สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ทำให้พอลิเมอร์อยู่ในสถานะ hydrophilic (ชอบน้ำ) และมีปฏิสัมพันธ์กับน้ำได้ดี ส่งผลให้สารละลายยังคงโปร่งใส อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า LCST พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ะมิดกับโมเลกุลน้ำจะถูกทำลาย และหมู่ไฮโดรโฟบิก ($-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$) ซึ่งเป็นหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะเริ่มรวมตัวกัน ไฮโดรเจลจะยุบตัวและน้ำจะถูกขับออก เนื่องจากหมู่ไฮโดรโฟบิกรวมตัวกัน ส่งผลให้เกิดการแยกเฟสกับน้ำ และสารละลายเปลี่ยนจากใสเป็นขุ่น (Hoare & Kohane, 2008)

2.3.5 ประเภทของไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ

Hydrogels based on synthetic polymers โพลีเมอร์สังเคราะห์เช่น Poly(N-vinylcaprolactam) และ Poly(N-isopropylacrylamide) ดังภาพที่ 2-6 ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ โพลีเมอร์เหล่านี้สามารถควบคุมการเปลี่ยนสถานะเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น Hydrogels based on natural polymers วัสดุโพลีเมอร์จากธรรมชาติ เช่น เจลาติน, ซีโตซาน (chitosan) และแอลจีเนต (alginate) ก็สามารถถูกดัดแปลงให้มีคุณสมบัติตอบสนองต่ออุณหภูมิได้เช่นกัน แต่บางครั้งอาจต้องผสมกับโพลีเมอร์สังเคราะห์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและควบคุมคุณสมบัติของเจล (Hoare & Kohane, 2008)



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลทั่วไป (Hoare & Kohane, 2008)

2.3.6 การประยุกต์ใช้ของไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ

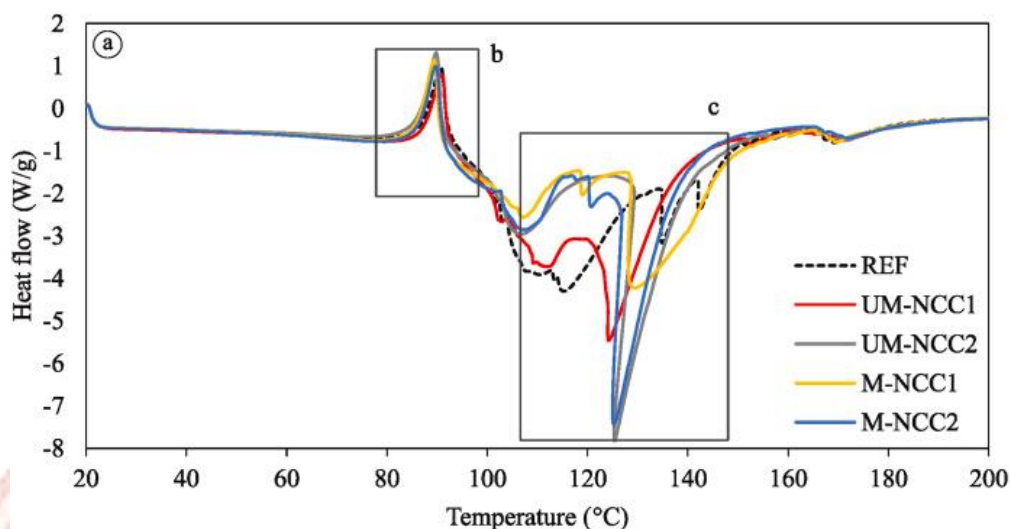
การนำส่งยา (Drug Delivery Systems) ไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการควบคุมการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ เช่น ยาหรือสารบำบัดอื่น ๆ ในร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้กับยาที่ต้องการควบคุมการปลดปล่อยตามเวลา เช่น ในผู้ป่วยที่เป็นโรคเรื้อรัง ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถถูกออกแบบให้ปล่อยยาทันทีที่อุณหภูมิในบริเวณที่มีอาการอักเสบเพิ่มขึ้น (Qiu & Park, 2001) การสร้างเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิถูกนำมาใช้ในการสร้าง scaffolds สำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์เนื้อเยื่อ การปรับคุณสมบัติเพื่อสร้างโครงสร้างที่คล้ายกับเนื้อเยื่อธรรมชาติสามารถทำได้เมื่อใช้ไฮโดรเจลประเภทนี้ เนื่องจากสามารถควบคุมการยุบตัวและพองตัวได้ตามอุณหภูมิของร่างกาย (Qiu & Park, 2001) เซนเซอร์อุณหภูมิ (Temperature Sensors) ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิถูกพัฒนามาใช้ในงานด้านการวัดอุณหภูมิหรือการตรวจสอบอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งมีการใช้ในการแพทย์อัจฉริยะ (Smart medical devices) ที่ต้องการการตรวจวัดอุณหภูมิอย่าง (Qiu & Park, 2001) และการดูแลบาดแผล (Wound Dressing) ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถใช้เป็นวัสดุปิดแผลที่มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่ออุณหภูมิของร่างกาย ช่วยให้แผลพองตัวและดูดซับสารคัดหลั่งจากแผล นอกจากนี้ ยังสามารถปรับให้

ปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ เช่น ยาฆ่าเชื้อ หรือสารบำบัดการอักเสบได้อย่างต่อเนื่อง (Qiu & Park, 2001)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rosaria Ciriminna และคณะ (2024) มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความท้าทายและโอกาสของนาโนเซลลูโลสในอุตสาหกรรม โดยวิจัยว่าการพัฒนาเทคโนโลยีนาโนเซลลูโลสยังคงเผชิญกับปัญหาการผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่ยังไม่สามารถขยายได้อย่างเต็มที่ โดยงานวิจัยชี้ให้เห็นว่านาโนเซลลูโลส ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษด้านเคมีและกายภาพ เช่น ความสามารถในการเสริมความแข็งแรง และความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม ยังคงถูกใช้ในผลิตภัณฑ์มูลค่าต่ำ เช่น กระดาษและบรรจุภัณฑ์ โดยผู้วิจัยย้ำว่ามีแนวโน้มการโฆษณาที่เกินจริงในสาขานาโนเทคโนโลยี ซึ่งทำให้ความคาดหวังไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ของนาโนเซลลูโลส เพื่อให้บรรลุศักยภาพทางอุตสาหกรรมได้อย่างแท้จริง งานวิจัยแนะนำให้ใช้วิธีการทางเคมีสีเขียว (green chemistry) เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น แทนที่จะใช้วิธีการปัจจุบันที่มีความเข้มข้นด้านพลังงานและก่อให้เกิดของเสีย งานวิจัยยังเสนอให้มีการบูรณาการความรู้จากสาขาต่าง ๆ เพื่อพัฒนานวัตกรรมนาโนเซลลูโลสให้เกิดความยั่งยืนและทำให้กระบวนการผลิตมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจ

Jakub Kawalerczyk และคณะ (2024) ศึกษาการปรับปรุงกาวยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (UF) ด้วยการใช้เซลลูโลสในระดับนาโนที่ถูกปรับแต่งด้วยไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate-functionalized nanocellulose) เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของแผ่นไม้อัด (particleboard) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มความแข็งแรงและคุณสมบัติด้านกายภาพของแผ่นไม้อัดผ่านการปรับปรุงส่วนประกอบของกาวยูรีน UF ซึ่งเป็นวัสดุสำคัญในอุตสาหกรรมไม้แปรรูปที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย จากผลการทดลองพบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับแต่งช่วยเสริมประสิทธิภาพในการยึดเกาะและเพิ่มความแข็งแรงทางกลของกาวยูรีน UF ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์ DSC พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลส (M-NCC2) จะส่งผลให้กาวยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์มีค่าเอนทัลปีที่สูงขึ้น ดังภาพที่ 2-7 นอกจากนี้ยังช่วยลดการปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์จากแผ่นไม้อัด ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในแง่ของสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า UF ที่มีการเสริมด้วยนาโนเซลลูโลสมีความสามารถในการใช้งานที่ยั่งยืนมากขึ้นและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเดิม โดยงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุนาโนในอุตสาหกรรมแผ่นไม้อัดเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้กาวยูรีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ ทั้งนี้ยังเป็นการเปิดทางให้มีการนำวัสดุนาโนเหล่านี้มาใช้ในวงกว้างมากขึ้นในอุตสาหกรรมอื่นๆ

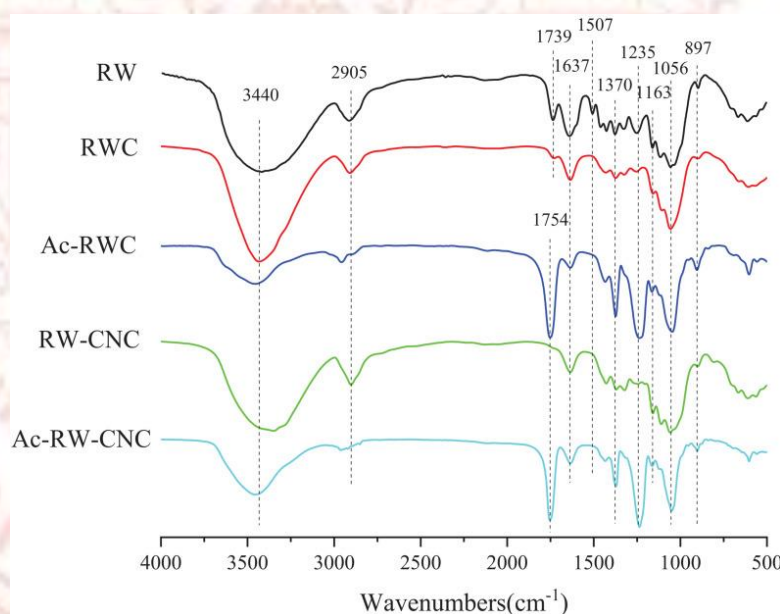


ภาพที่ 2-7 ผลการวิเคราะห์ DSC ของกายูเรีย-พอร์มัลดีไฮด์ (UF) (Kawalerczyk et al., 2024)

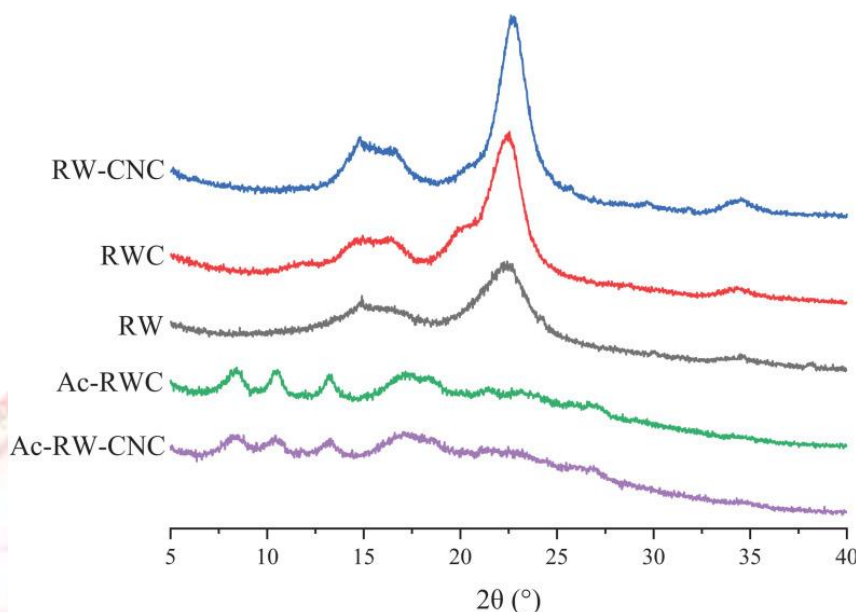
Zhenyu Huang และคณะ (2024) มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารที่ทำจากนาโนเซลลูโลสซึ่งสกัดจากไม้ไผ่ โดยออกแบบให้มีคุณสมบัติในการต้านจุลชีพแบบคู่ (dual-antimicrobial properties) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร งานวิจัยนี้ใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลส (nanocellulose fibrils) ที่สกัดจากไม้ไผ่เป็นวัสดุหลัก ซึ่งมีความแข็งแรงสูงและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ทำให้เหมาะสำหรับใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการวิจัย ทีมงานได้เสริมประสิทธิภาพการต้านจุลชีพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ด้วยการเติมอนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) และน้ำมันหอมระเหย (essential oils) ซึ่งช่วยในการกำจัดแบคทีเรียหลายชนิด เช่น *Escherichia coli* และ *Salmonella*. อนุภาคนาโนเงินมีบทบาทสำคัญในการต้านจุลชีพ ขณะที่น้ำมันหอมระเหยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านจุลชีพเพิ่มเติม ทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันการเจริญเติบโตของจุลชีพที่ทำให้อาหารเสื่อมสภาพ โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่พัฒนาขึ้นมีความแข็งแรงทางกลสูงและมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ฟิล์มนี้ยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ทำให้เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการทดแทนพลาสติกในบรรจุภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้ การเติมสารต้านจุลชีพในฟิล์มยังช่วยลดการใช้สารเคมีสังเคราะห์ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ยั่งยืนและปลอดภัยยิ่งขึ้นสำหรับอุตสาหกรรมอาหารในอนาคต

Ou และคณะ (2021) ได้ศึกษาวิธีการสกัดเซลลูโลสจากของเสียที่เกิดจากไม้ยางพาราเพื่อนำไปใช้ในการผลิตฟิล์มคอมโพสิตโดยใช้โพลีแลคติกแอซิด (PLA) เสริมความแข็งแรงด้วยเซลลูโลสไม้ยางพาราที่ผ่านการอะเซทิเลต (Ac-RWC) และนาโนคริสตัลเซลลูโลสไม้ยางพาราที่ผ่านการอะเซทิเลต

(Ac-RW-CNC) โดยเริ่มแรกการสกัดเซลลูโลสจากไม้ยางพารานั้นทำโดยการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกก่อน จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกเพื่อผลิตนาโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรงและความเสถียร ผลการวิจัยพบว่าเซลลูโลสไม้ยางพาราที่ผ่านการอะเซทิเลต (Ac-RWC) และนาโนคริสตัลเซลลูโลสไม้ยางพาราที่ผ่านการอะเซทิเลต (Ac-RW-CNC) มีสเปกตรัม FT-IR ดังภาพที่ 2-8 และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 2-9 เหมือนกับสเปกตรัมไม้ยางพารา และเซลลูโลสของไม้ยางพารา ซึ่งการใช้เซลลูโลสเป็นตัวเสริมในฟิล์มคอมโพสิตช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของฟิล์มอย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นความแข็งแรงของวัสดุ ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อแรงดึง นอกจากนี้ ฟิล์มคอมโพสิตที่ได้ยังมีความโปร่งแสงสูง ซึ่งทำให้เหมาะกับการนำไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีศักยภาพในการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากทั้ง PLA และนาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุชีวภาพที่ย่อยสลายได้ และมีโอกาสในการลดปัญหาขยะพลาสติกในอนาคต



ภาพที่ 2-8 สเปกตรัม FT-IR ของ RW, RWC, Ac-RWC, RW-CNC และ Ac-RW-CNC
(Ou et al., 2021)



ภาพที่ 2-9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ RW, RWC, Ac-RWC, RW-CNC และ Ac-RW-CNC (Ou et al., 2021)

Zheng และคณะ (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา โดยใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแยกเซลลูโลสออกเป็นนาโนคริสตัล (NCC) กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการกำจัดสารที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ออกจากไม้ยางพาราเพื่อให้ได้เซลลูโลสบริสุทธิ์ จากนั้นเซลลูโลสถูกนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นสูง ซึ่งจะทำให้เซลลูโลสถูกแยกออกเป็นอนุภาคนาโนที่มีโครงสร้างผลึก ผลจากกระบวนการนี้ทำให้นาโนเซลลูโลสที่ได้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งในด้านความแข็งแรงทางกายภาพ ความเสถียรทางเคมี และมีพื้นผิวที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมการแพทย์ เช่น การใช้ในวัสดุชีวภาพสำหรับการรักษาแผล และการนำไปใช้ในวัสดุผสม (composite materials) ที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุ ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นการเปิดทางไปสู่การใช้ประโยชน์จากของเสียจากอุตสาหกรรมไม้ยางพาราให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในการผลิตวัสดุนาโนที่มีความต้องการสูงในปัจจุบัน

Noguchi และคณะ (2024) มุ่งเน้นพัฒนาความทนทานต่อน้ำของคอมโพสิตที่ผสมระหว่างยางธรรมชาติและนาโนเซลลูโลส ซึ่งถือเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติดีในด้านความแข็งแรงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่กลับมีปัญหาด้านการดูดซึมน้ำ คอมโพสิตที่ได้จากการผสมนาโนเซลลูโลสในยางธรรมชาตินั้นให้คุณสมบัติความแข็งแรงสูง ทนทานต่อแรงดึง และเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

หลากหลาย แต่ข้อจำกัดสำคัญคือคุณสมบัติการดูดซึมน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของนาโนเซลลูโลสที่มีความชอบน้ำ ทำให้คอมโพสิตดังกล่าวมีปัญหาด้านเสถียรภาพในสภาวะเปียก โดยใช้วิธีการปรับปรุงคุณสมบัตินี้ด้วยการเพิ่มสารเคมีหรือสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เสริมความต้านทานต่อน้ำของนาโนเซลลูโลส เพื่อให้สามารถป้องกันน้ำได้ดียิ่งขึ้น แนวทางนี้ทำให้คอมโพสิตที่ได้มีความสามารถในการรักษาคุณสมบัติทางกายภาพในสภาวะที่มีน้ำหรือความชื้นได้ดียิ่งขึ้น และสามารถทนทานต่อการแช่น้ำในระยะเวลาอันยาวนานโดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งเป็นการขยายศักยภาพของคอมโพสิตจากนาโนเซลลูโลสนี้ในการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต้องการวัสดุที่ทนทานต่อความชื้น เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ วัสดุก่อสร้าง และยานยนต์ เพื่อยืนยันคุณภาพของวัสดุ นักวิจัยได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างนาโนเซลลูโลสและทดสอบสมบัติทางกายภาพในสภาวะต่างๆ เช่น การทดสอบความต้านทานแรงดึง ความคงตัวของโครงสร้างเมื่อสัมผัสกับน้ำ และการสูญเสียความแข็งแรงในสภาวะเปียก ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มสารเติมแต่งที่เหมาะสมเข้าไป คอมโพสิตสามารถทนทานต่อการดูดซึมน้ำได้ดียิ่งขึ้น และยังคงสมบัติทางกายภาพที่ดี ซึ่งเป็นการปรับปรุงที่สำคัญสำหรับการใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติการทนทานต่อการเสื่อมสภาพในระยะยาว ซึ่งคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงนี้สามารถตอบโจทย์การใช้งานในหลายอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทานในสภาพแวดล้อมเปียก เช่น วัสดุสำหรับยานยนต์ ปะเก็น และแผ่นบรรจุภัณฑ์ ซึ่งต้องเผชิญกับความชื้นและน้ำอยู่เสมอ นอกจากนี้ การพัฒนาวัสดุที่ใช้เซลลูโลสธรรมชาติยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้พลาสติกและสารเคมีที่ไม่ย่อยสลาย จึงสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืนอีกด้วย

Kawalerczyk และคณะ (2024) มุ่งเน้นการปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นชิปบอร์ดที่ใช้กาวยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ (UF) ด้วยการเติมนาโนเซลลูโลสที่มีการดัดแปลงด้วยสารไดไฮดรอกซีอะซิเตต การทดลองนี้มีเป้าหมายเพื่อลดการปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์และเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรงและทนทานต่อความชื้น ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นไม้อัดและแผ่นชิปบอร์ด นาโนเซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างระดับนาโนเมตรถูกนำมาใช้ในการเสริมสร้างโครงสร้างของกาว UF โดยเฉพาะการเพิ่มความหนาแน่นและคุณสมบัติการยึดเกาะผ่านการสร้างพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้แผ่นชิปบอร์ดที่ได้มีความทนทานมากขึ้น ทั้งในด้านความต้านทานแรงดึงและแรงกด อีกทั้งยังช่วยลดการบวมของแผ่นชิปบอร์ดเมื่อสัมผัสกับความชื้น งานวิจัยนี้ยังเน้นการควบคุมการปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์จากกาว UF โดยนาโนเซลลูโลสมีบทบาทในการดูดซับสารฟอร์มัลดีไฮด์และลดการปล่อยสารนี้สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งตอบโจทย์ด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการเสริมด้วยนาโนเซลลูโลสดัดแปลงแสดงให้เห็นว่าแผ่นชิปบอร์ดมีความทนทานและประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นชิปบอร์ดที่ใช้กาว UF แบบปกติ และยังช่วยลดความเสี่ยงของสารเคมีที่

เป็นพิษ จึงเป็นการเปิดโอกาสสำหรับการใช้งานที่ยั่งยืนในอุตสาหกรรมไม้แปรรูปและการผลิตวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ ซึ่งต้องการมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมสูงขึ้น

Junfei Xu และคณะ (2022) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและลักษณะเฉพาะของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมด้วยไมโครและนาโนเซลลูโลส ซึ่งใช้โพลีไวนิลลิเดนฟลูออไรด์ (PVDF) และผงไม้เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและความร้อนของวัสดุคอมโพสิตนี้ ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคการผสมเพื่อให้เซลลูโลสสามารถกระจายตัวได้ดีใน PVDF ด้วยการใช้สารช่วยในการกระจายตัวและพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล เทคนิคนี้ช่วยให้เกิดการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีความแข็งแรงทางกลและทนทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้ การศึกษายังวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนและโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายอย่าง เช่น การวิเคราะห์ด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการวิเคราะห์การกระจายตัวของเซลลูโลสในเมทริกซ์ของ PVDF โดยผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มไมโครและนาโนเซลลูโลสช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานทางความร้อนของคอมโพสิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และวัสดุทนไฟ

Hossen และคณะ (2024) มีเป้าหมายสังเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติของนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากเส้นใยกระเจี๊ยบเขียว (*Abelmoschus Esculentus*) ซึ่งเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้กระบวนการทางเคมีหลายขั้นตอน เช่น การฟอกด้วยสารโซเดียมคลอไรด์และการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟูริก กระบวนการเหล่านี้มีจุดมุ่งหมายในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเซลลูโลสและลดปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เส้นใยมีความเปราะ นาโนเซลลูโลสที่ได้มีลักษณะเป็นแท่งขนาดเล็ก มีโครงสร้างผลึกสูงกว่าเส้นใยดิบ การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยืนยันว่าโครงสร้างผลึกของนาโนเซลลูโลสมีเสถียรภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังใช้การวิเคราะห์ทางความร้อน (DSC และ TGA) เพื่อศึกษาความทนทานต่อความร้อน พบว่าเซลลูโลสที่ผ่านการสกัดมีความทนทานต่อความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น วัสดุกันความร้อนและวัสดุชีวภาพ ในด้านความปลอดภัย งานวิจัยได้ทดสอบการเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) และพบว่า นาโนเซลลูโลสจากกระเจี๊ยบเขียวมีระดับความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำถึงปานกลาง ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้ โดยค่า LD50 อยู่ที่ประมาณ 60.60 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งแสดงถึงความปลอดภัยในระดับที่น่าพอใจในการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการแพทย์และชีวการแพทย์ ดังนั้นนาโนเซลลูโลสจากกระเจี๊ยบเขียวมีศักยภาพในหลายด้าน เช่น บรรจุภัณฑ์ กระดาษ วัสดุคอมโพสิต และอุตสาหกรรมชีวการแพทย์ ด้วยคุณสมบัติเด่นด้านความคงตัวทาง

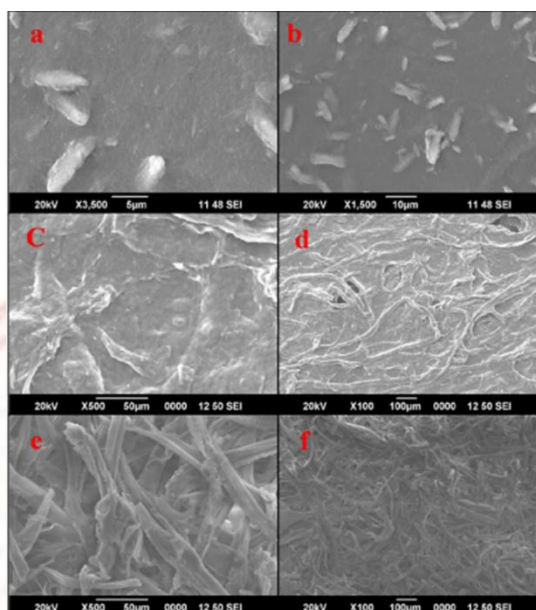
ความร้อน ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และความเป็นพิษต่ำ งานวิจัยนี้จึงเป็นก้าวสำคัญในการพัฒนานาโนเซลลูโลสจากแหล่งพืชพื้นถิ่นที่ยั่งยืนและคุ้มค่า

Wassgren และคณะ (2025) มุ่งเน้นการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของนาโนเซลลูโลสซึ่งนำมาใช้ในรูปแบบของซีโรเจล (xerogels) โดยเฉพาะผ่านการใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิไดซ์ด้วย TEMPO (2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เพิ่มประสิทธิภาพในการแยกเส้นใยและเสริมโครงสร้างในระดับนาโน โดยการออกซิไดซ์ด้วยเทมโป ทำให้เกิดกลุ่มคาร์บอกซิลบนผิวเซลลูโลส ส่งผลให้เส้นใยสามารถแยกเป็นไฟบริลล์เล็ก ๆ ได้ดีขึ้นด้วยแรงผลัทางไฟฟ้า ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนของซีโรเจลที่ได้ โดยการศึกษาเน้นที่โครงสร้างและความพรุนของซีโรเจล ซึ่งสร้างขึ้นโดยการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งทำให้โครงสร้างของวัสดุมีลักษณะพรุนและเบา นอกจากนี้ โครงสร้างที่ได้นี้ยังแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพในการรับแรงกดและสามารถฟื้นฟูรูปร่างได้เมื่อถูกบีบอัด โดยการทดสอบทางกล เช่น การบีบอัดและการทดสอบซ้ำ ๆ พบว่าซีโรเจลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใย TEMPO-oxidized นี้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านความทนทานและความสามารถในการฟื้นฟูสภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความสำคัญเพราะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีโรเจลในแอปพลิเคชันที่ต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทนแรงกระแทกและบีบอัด เช่น วัสดุกันกระแทกฉนวนกันความร้อน และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ต้องการวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ วัสดุซีโรเจลที่ผ่านการปรับปรุงนี้ยังเป็นที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานในด้านชีวการแพทย์และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อีกด้วย เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของโครงสร้างพรุนและความแข็งแรงสูงของวัสดุ

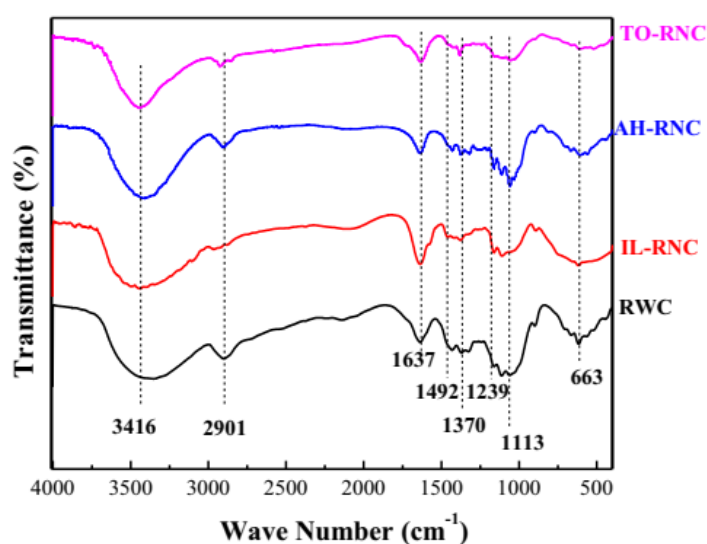
Chen และคณะ (2023) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่กินได้จากเส้นใยอาหารซึ่งเสริมด้วยนาโนเซลลูโลสจากเปลือกส้มโอที่เหลือจากกระบวนการแปรรูป ฟิล์มบรรจุภัณฑ์นี้ออกแบบมาเพื่อลดปัญหามลพิษจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกสังเคราะห์ โดยนำเปลือกส้มโอที่มีไฟเบอร์สูงมาใช้เป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งนอกจากจะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแล้วยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร โดยกระบวนการวิจัยเริ่มจากการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากเปลือกส้มโอผ่านกระบวนการทางเคมีและเชิงกลหลายขั้นตอน เช่น การฟอกและการสกัด เพื่อให้ได้นาโนเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง จากนั้นนาโนเซลลูโลสนี้ถูกผสมกับเส้นใยอาหารเพื่อสร้างฟิล์มบรรจุภัณฑ์และผ่านกระบวนการปรับปรุงสูตรคอมโพสิตให้เหมาะสม โดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการทดสอบเพื่อหาสูตรที่ให้คุณสมบัติการยึดเกาะและความยืดหยุ่นที่ดีที่สุดสำหรับฟิล์ม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เสริมด้วยนาโนเซลลูโลสมีคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อการแช่น้ำที่สูงกว่าเดิม ทำให้ฟิล์มมีความทนทานและเหมาะกับการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ฟิล์มจากเส้นใยอาหารนี้ไม่เพียงแต่เป็นวัสดุที่

เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงตอบโจทย์ด้านบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ซึ่งการศึกษานี้เป็นก้าวสำคัญในการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพืชที่มีศักยภาพในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมอาหารและการบรรจุภัณฑ์

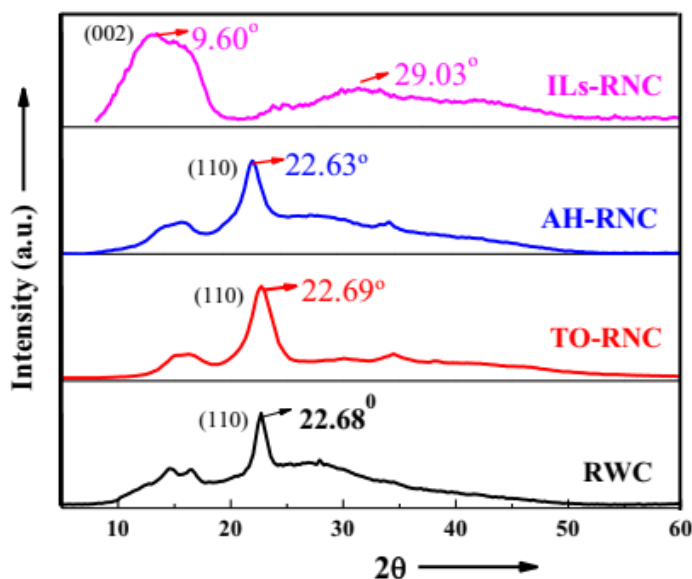
Onkarappa และคณะ (2020) มุ่งเน้นไปที่การสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากยางพารา (*Hevea brasiliensis*) โดยศึกษากระบวนการเตรียมที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของนาโนเซลลูโลส เริ่มจากการเตรียมเซลลูโลสจากไม้ยางพาราจากนั้นได้ทำการศึกษาการเตรียมนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางกระบวนการเคมี ได้แก่ กระบวนการของเหลวไอออนิก เป็นกระบวนการใช้ของเหลวไอออนิกเป็นตัวทำละลายในการแยกเส้นใยเซลลูโลสช่วยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ใช้กรดซัลฟิวริกเพื่อย่อยสลายเซลลูโลสให้มีขนาดเล็กลง ได้อนุภาคนาโนเซลลูโลสที่มีขนาดเล็กและมีประจุลบบนพื้นผิว และกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป ใช้ตัวออกซิไดซ์ TEMPO (2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl) เพื่อปรับแต่งโครงสร้างทางเคมี จะได้เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มีประจุลบสูงและกระจายตัวได้ดีในน้ำ จากนั้นทำการศึกษาผลของวิธีการเตรียมต่อรูปร่างและคุณสมบัติของนาโนเซลลูโลส เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากยางพารา และวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างทางกายภาพ ๆ ดังภาพที่ 2-10 จากนั้นศึกษาสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ดังภาพที่ 2-11 และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของนาโนเซลลูโลส ดังภาพที่ 2-12 เพื่อพัฒนาวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับการใช้งานต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากยางพารา (*Hevea brasiliensis*) สามารถควบคุมรูปร่างและคุณสมบัติได้ผ่านการเลือกใช้วิธีการเตรียมที่เหมาะสม การค้นพบนี้เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาวัสดุชีวภาพที่มีคุณสมบัติพิเศษเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น บรรจุภัณฑ์ชีวภาพ วัสดุเสริมแรงในคอมโพสิต เป็นต้น



ภาพที่ 2-10 ลักษณะเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราผ่าน (a,b) กระบวนการของเหลวไอออนิก (c,d) กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและ (e,f) กระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (Onkarappa et al., 2020)

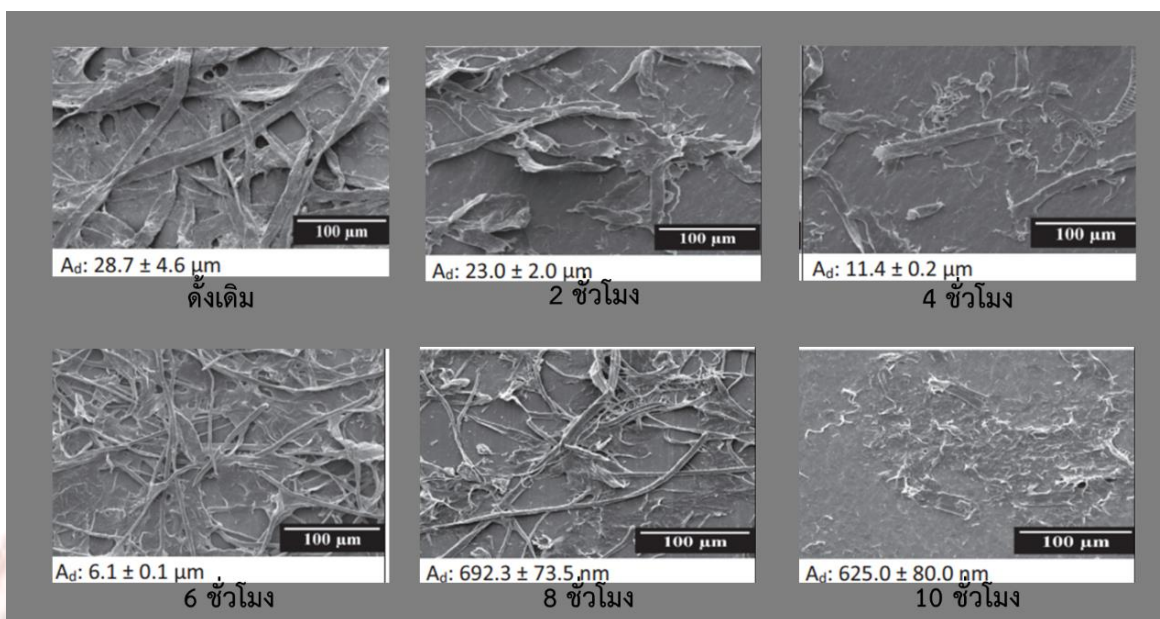


ภาพที่ 2-11 สเปกตรัม FT-IR นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราผ่านกระบวนการของเหลวไอออนิก กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด และกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (Onkarappa et al., 2020)



ภาพที่ 2-12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราผ่านกระบวนการของเหลวไอออนิก กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด และกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (Onkarappa et al., 2020)

Hassan และคณะ (2021) มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วย TEMPO (2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl) โดยสกัดจากกากมะพร้าว และวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี เชิงกล และไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้จากกากมะพร้าว โดยใช้วิธีการออกซิเดชันด้วย TEMPO ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของเซลลูโลสให้มีความสามารถในการยึดเกาะและความแข็งแรงมากขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ โดยงานวิจัยนี้แสดงถึงศักยภาพในการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติและการปรับปรุงด้วยเทคนิคทางเคมีเพื่อพัฒนาวัสดุใหม่ที่มีคุณค่าในเชิงพาณิชย์ ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ลักษณะเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากเกล็ดผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (Hassan et al., 2021)

Quan และคณะ (2024) พัฒนาไฮโดรเจลจากเซลลูโลสที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนสีเมื่อได้รับแสง (Photochromism) และสามารถเปลี่ยนกลับเป็นสีเดิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับน้ำ ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้งานหลากหลาย เช่น กระจกอัจฉริยะหรือฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนสีได้ โดยสารประกอบสำคัญที่ใช้คือ Sodium tungstate ซึ่งช่วยเสริมให้ไฮโดรเจลนี้สามารถตอบสนองต่อแสงได้อย่างรวดเร็วและมีความคงทน ไฮโดรเจลในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถเปลี่ยนสีได้ภายในเวลาเพียง 20 วินาทีเมื่อได้รับแสงจากหลอดไฟ และใช้เวลา 30 วินาทีเมื่อได้รับแสงจากดวงอาทิตย์จริง นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถลบสีออกได้เมื่อสัมผัสกับน้ำ โดยจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ภายใน 90 วินาที การออกแบบนี้อาศัยโครงสร้างแบบ Dual-network ซึ่งช่วยให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นพร้อมทั้งมีความสามารถในการฟื้นฟูสภาพเดิมได้อย่างดี นอกจากการตอบสนองต่อแสงแล้ว ทีมวิจัยยังทดสอบการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่จำลองการใช้งานจริง พบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจลนี้เป็นกระจกอัจฉริยะในอาคาร สามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคารได้ประมาณ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการลดการใช้พลังงานในการทำความร้อน นอกจากนี้ ไฮโดรเจลนี้ยังมีความทนทานต่อการพับงอและการเปลี่ยนสีที่กลับมาใช้งานได้หลายครั้ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับปัญญาประดิษฐ์และระบบแสดงผล

แบบยืดหยุ่น (Flexible Displays) ด้วยคุณสมบัติการเปลี่ยนสีและความสามารถในการลบสีอย่างรวดเร็ว จึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นวัสดุอัจฉริยะ

Hoare และ Kohane (2008) ได้ทบทวนความก้าวหน้าในการพัฒนาไฮโดรเจลเพื่อใช้ในการนำส่งยา โดยเน้นไปที่โพลิเมอร์ประเภท PNIPAAm (Poly(N-isopropylacrylamide)) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 32°C PNIPAAm จะเปลี่ยนสถานะจากการพองตัวไปสู่การยุบตัว ซึ่งส่งผลต่อการปลดปล่อยยาที่ควบคุมได้จากโครงสร้างของไฮโดรเจล ในงานวิจัยนี้ ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ PNIPAAm โดยเฉพาะในการนำส่งยารักษามะเร็ง ซึ่งไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถปลดปล่อยยาที่เหมาะสมในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง เช่น บริเวณที่เกิดการอักเสบหรือเนื้องอกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ เนื่องจากคุณสมบัติดังกล่าว PNIPAAm จึงสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการปลดปล่อยยาได้โดยอาศัยสภาพแวดล้อมที่เกิดจากการเจริญเติบโตของเนื้องอก ซึ่งช่วยให้การรักษามะเร็งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการปลดปล่อยยาจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในบริเวณที่มีการเจริญเติบโตของเนื้องอกหรือการอักเสบ ดังนั้นงานวิจัยนี้ยังได้เน้นถึงศักยภาพของไฮโดรเจลในด้านการแพทย์ที่สามารถใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยยาอย่างแม่นยำ เพิ่มประสิทธิภาพของการรักษา และลดผลข้างเคียงจากการใช้ยา เนื่องจากการควบคุมปริมาณและตำแหน่งที่มีการปลดปล่อยยาได้อย่างแม่นยำ

Zhang และคณะ (2014) ได้ศึกษาการใช้โพลิเมอร์ PNIPAAm ในการพัฒนาไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิเพื่อการนำส่งยา โดยมีการผสมสารประกอบชีวภาพอย่างชิตซาน (Chitosan) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ช่วยปรับปรุงโครงสร้างของไฮโดรเจลและเสริมประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อยยา กระบวนการนี้ทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารรักษาได้ตามเวลาที่ต้องการและขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่ผสมชิตซานสามารถควบคุมการปลดปล่อยยา Dexamethasone ซึ่งเป็นสารต้านการอักเสบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (เช่น ในสภาพที่มีการอักเสบหรือภาวะทางพยาธิสภาพที่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น) PNIPAAm จะยุบตัว ส่งผลให้ยา Dexamethasone ถูกปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วและในปริมาณที่เหมาะสม การตอบสนองที่ไวต่ออุณหภูมินี้ทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยยาตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งช่วยให้ยาถูกปล่อยออกมาในสภาพแวดล้อมที่มีความจำเพาะ เช่น บริเวณที่เกิดการอักเสบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการนำส่งยาที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยตามอุณหภูมิ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา ลดปริมาณการใช้ยา และลดผลข้างเคียงจากการปลดปล่อยยาที่ไม่จำเป็น

Shin และคณะ (2003) ได้แสดงให้เห็นว่า PNIPAAm สามารถนำมาใช้สร้างวัสดุ Scaffold ที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ ซึ่งมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ โดยเฉพาะในการสร้างเนื้อเยื่อกระดูกและกล้ามเนื้อ วัสดุ Scaffold นี้สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้ตามการเปลี่ยนแปลง

ของอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เกิดการพองตัวหรือยุบตัวของไฮโดรเจลที่ใช้ PNIPAAm เป็นโครงสร้างพื้นฐาน กระบวนการดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เนื่องจากอุณหภูมิของร่างกายสามารถควบคุมการทำงานของ Scaffold ได้โดยตรง เมื่ออยู่ในอุณหภูมิร่างกายปกติ ไฮโดรเจลจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้เซลล์สามารถเจริญเติบโต ยึดติด และแพร่กระจายบน Scaffold ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยสนับสนุนการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่า Scaffold ที่สร้างจาก PNIPAAm ไม่เพียงแต่ช่วยในการเกาะยึดและการเจริญเติบโตของเซลล์เท่านั้น แต่ยังช่วยในการจัดโครงสร้างเซลล์ให้มีรูปแบบที่เหมาะสมต่อการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ เช่น เนื้อเยื่อกระดูกและกล้ามเนื้อ นอกจากนี้ ความสามารถของ PNIPAAm ในการปรับเปลี่ยนตามอุณหภูมิทำให้ Scaffold นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูเนื้อเยื่อที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายในร่างกาย ซึ่งถือเป็นนวัตกรรมที่สำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีทางการแพทย์และการฟื้นฟูเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหาย

Zhang และคณะ (2009) ได้พัฒนาโครงร่างเซลล์ (Scaffold) สำหรับการสร้างเนื้อเยื่อกระดูก โดยใช้วัสดุที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิอย่าง PNIPAAm และมีการเสริมด้วยโมเลกุลที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของเซลล์กระดูก เช่น โปรตีนหรือสารชีวภาพที่กระตุ้นการสร้างกระดูก โครงร่างเซลล์นี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้เหมาะสมกับการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของ PNIPAAm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดย PNIPAAm มีคุณสมบัติที่สำคัญคือการเปลี่ยนสถานะจากพองตัวไปสู่การยุบตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งช่วยในการควบคุมการปลดปล่อยสารชีวภาพที่ถูกเสริมเข้าไปในโครงร่างเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษา การตอบสนองต่ออุณหภูมิของ PNIPAAm ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการปลดปล่อยสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์กระดูกในตำแหน่งที่ต้องการ เช่น บริเวณที่ต้องการฟื้นฟูเนื้อเยื่อกระดูก การปลดปล่อยสารชีวภาพในจังหวะเวลาที่เหมาะสมช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อกระดูกใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ สรุปคืองานวิจัยนี้มีความสำคัญในการพัฒนาวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก เนื่องจาก PNIPAAm ช่วยสร้างระบบที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญได้ตามสภาวะอุณหภูมิ ซึ่งไม่เพียงช่วยในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของกระดูก แต่ยังลดการใช้สารกระตุ้นที่เกินจำเป็น ทำให้การฟื้นฟูเนื้อเยื่อมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการสร้างโครงร่างที่เหมาะสมต่อการเติบโตของเซลล์ในระยะยาว

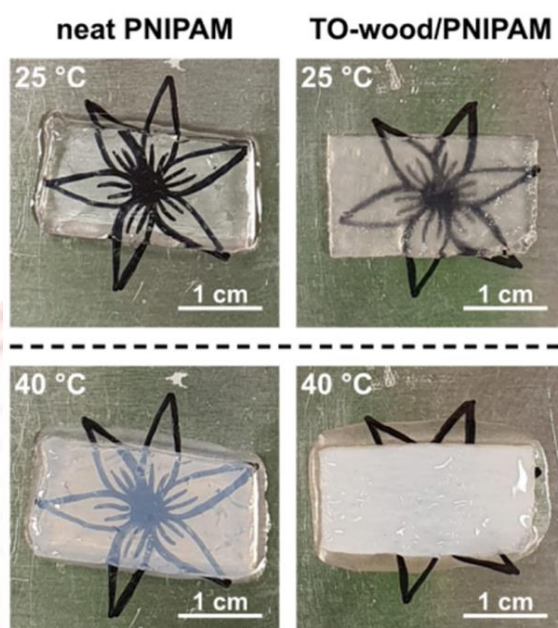
Schild (1992) เป็นการศึกษาที่สำคัญเกี่ยวกับโครงสร้างพื้นฐานและคุณสมบัติของโพลิเมอร์ PNIPAAm โดยเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงในความสามารถในการละลาย (Solubility) และสมบัติด้านความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic/Hydrophobic) ของโพลิเมอร์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง การศึกษานี้ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับ Lower Critical Solution Temperature (LCST) ซึ่งเป็นอุณหภูมิวิกฤติที่สำคัญในการทำให้ PNIPAAm เปลี่ยนสถานะ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายสูงกว่า LCST ซึ่งสำหรับ PNIPAAm อยู่ที่ประมาณ 32°C ไฮโดรเจลจะเปลี่ยนจากสภาพที่สามารถละลายใน

น้ำได้ (พองตัว) ไปเป็นสถานะไม่ละลาย (ยุบตัว) เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโมเลกุลจากการชอบน้ำไปเป็นไม่ชอบน้ำ การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นจากการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ PNIPAAm กับน้ำ ซึ่งทำให้โพลิเมอร์ไม่สามารถละลายได้อีกต่อไป ส่งผลให้ไฮโดรเจลยุบตัว ผลการศึกษานี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ PNIPAAm ในการออกแบบวัสดุที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ เช่น การใช้ในระบบนำส่งยาแบบควบคุมที่สามารถปลดปล่อยยาได้เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่กำหนด การศึกษาของ Schild ได้วางรากฐานให้กับการพัฒนาโพลิเมอร์ PNIPAAm เพื่อใช้ในหลากหลายด้าน ทั้งในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ วิศวกรรมเนื้อเยื่อ และการสร้างวัสดุที่ตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม

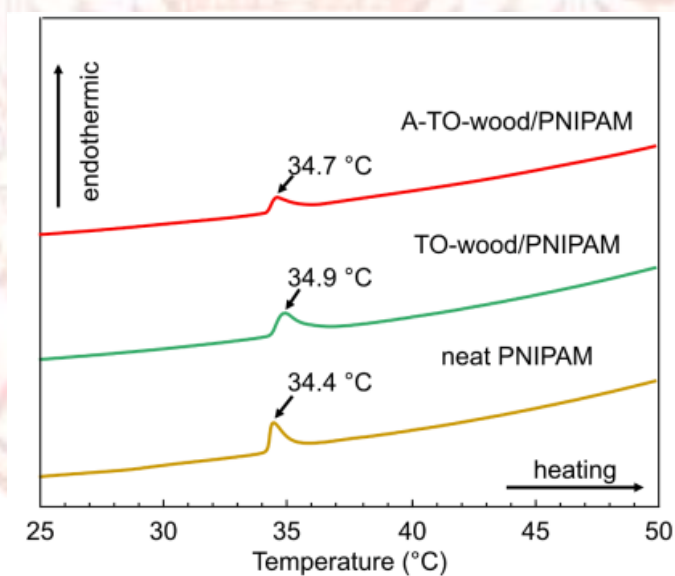
Deshmukh และคณะ (2015) มุ่งเน้นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางกลของไฮโดรเจลที่ทำจากโพลิเมอร์ PNIPAAm เมื่อมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ เช่น X-ray diffraction (XRD) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างและการเปลี่ยนสถานะของวัสดุ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเกินกว่าค่า Lower Critical Solution Temperature (LCST) ซึ่งสำหรับ PNIPAAm อยู่ที่ประมาณ 32°C ไฮโดรเจลจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลอย่างชัดเจน จากสถานะที่พองตัวและมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ไปสู่สถานะที่ยุบตัวและมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจล โดย XRD แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในระยะผลึกของวัสดุ ส่วน DSC แสดงการดูดกลืนความร้อนที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของ PNIPAAm เมื่อผ่านค่า LCST การเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนส่งผลให้สมบัติทางกลของไฮโดรเจล เช่น ความแข็งแรงและความยืดหยุ่น เปลี่ยนไปตามลักษณะการยุบตัวและพองตัวของวัสดุ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า PNIPAAm เป็นวัสดุที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลนี้ในระบบนำส่งยา วิศวกรรมเนื้อเยื่อ และการพัฒนาวัสดุอัจฉริยะ

Wang และคณะ (2022) พัฒนาไฮโดรเจลคอมโพสิตที่มีความแข็งแรง โปร่งใส และมีคุณสมบัติเทอร์โมโครมิก (เปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ) โดยใช้เซลล์ลูโลสที่สกัดจากไม้ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนสูง เนื่องจากการใช้เซลล์ลูโลสจากธรรมชาติเป็นการลดการพึ่งพาวัสดุสังเคราะห์ ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นวัสดุทดแทนที่ยั่งยืน อีกทั้งการนำเซลล์ลูโลสที่มีโครงสร้างรูพรุนสูงมาใช้เป็นโครงสร้างหลักของไฮโดรเจล ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับน้ำและสารเคมี ทำให้ไฮโดรเจลมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงขึ้น และพอลิเมอร์ PNIPAM (Poly(N-isopropylacrylamide)) เป็นวัสดุหลักในการผลิต เพื่อสร้างไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงตามอุณหภูมิที่ดี ความโปร่งใสและความแข็งแรงสูง ด้วยการ

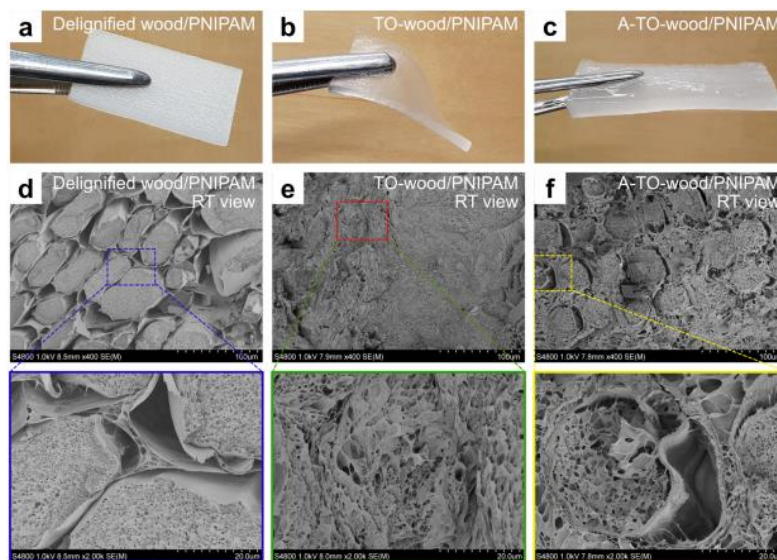
พัฒนาการผสมผสานเซลลูโลสจากธรรมชาติเปรียบเทียบกับนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโป (TO-Wood) กับนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโป แล้วนำไปแช่กรดไฮโดรคลอริกจากนั้นล้างน้ำปราศจากไอออน (A-TO-Wood) และ PNIPAM ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ดี ดังภาพที่ 2-14 ภาพถ่ายการตอบสนองต่อความร้อนของไฮโดรเจล PNIPAAm โดยใช้เซลลูโลสจากไม้ อีกทั้งการเติมนาโนเซลลูโลสยังส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความเสถียรทางความร้อนเพิ่มมากขึ้นสังเกตได้จากยอดพีคหรืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (Transition temperature) ซึ่งในที่นี้หมายถึงอุณหภูมิการแยกเฟส (Lower Critical Solution Temperature: LCST) ของผลการวิเคราะห์มีการเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่าง TO-wood กับ PNIPAM ทำให้โครงสร้างไฮโดรเจลมีเสถียรมากขึ้นและต้องการพลังงานมากขึ้นในการเปลี่ยนเฟส และมีปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่องจากพีคของผลวิเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน Differential Scanning Calorimeter (DSC) ดังภาพที่ 2-15 เมื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลชนิดต่างๆ พบว่าไฮโดรเจลที่เติมนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (TO-Wood/PNIPAM) มีลักษณะในระดับไมโครเมตรเป็นระเบียบมากกว่าไฮโดรเจลชนิดอื่นๆ ดังภาพที่ 2-16 จึงมีความแข็งแรงเชิงกลมากกว่าไฮโดรเจลชนิดอื่น สังเกตได้จากผลการทดสอบความเค้นแรงดึง ดังภาพที่ 2-17 แต่เมื่อศึกษาอัตราการส่องผ่านของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลที่ไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลสมีอัตราการส่องผ่านสูงสุด รองลงมาเป็นไฮโดรเจลที่ได้เติมนาโนเซลลูโลส TO-Wood และไฮโดรเจลที่ได้เติมนาโนเซลลูโลส A-TO-Wood มีอัตราการส่องผ่านต่ำที่สุดในชนิดของไฮโดรเจล ดังภาพที่ 2-18 ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้สะท้อนถึงศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ในเทคโนโลยีต่างๆ เช่น วัสดุหน้าต่างที่ปรับความโปร่งใสตามอุณหภูมิ หรืออุปกรณ์ควบคุมแสงและความร้อน



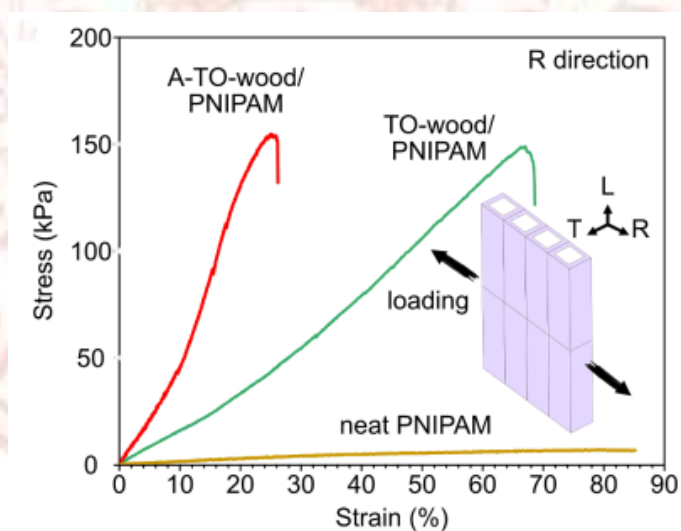
ภาพที่ 2-14 ภาพถ่ายการตอบสนองต่อความร้อนของไฮโดรเจล PNIPAAm โดยใช้เซลล์ลูโลสจากไม้ (Wang et al., 2022)



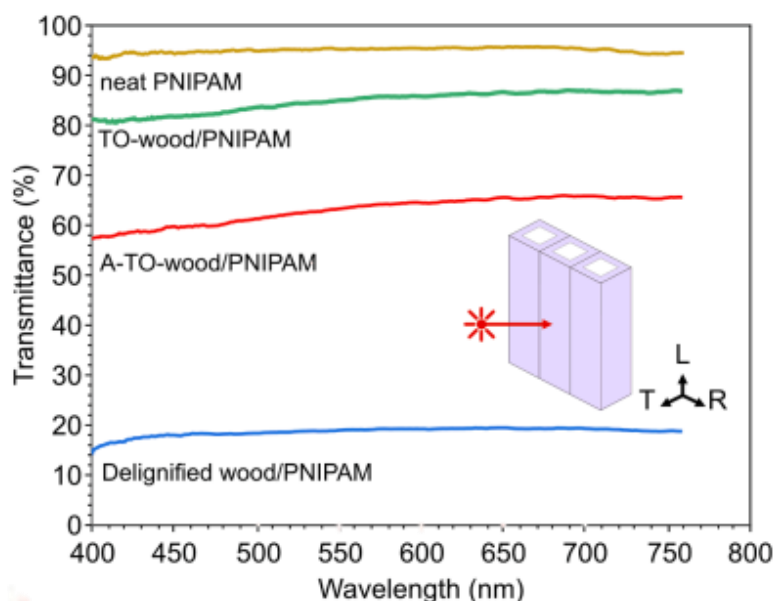
ภาพที่ 2-15 ผลการทดสอบ DSC ของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เติมนานโนเซลล์ลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโป (TO-wood/PNIPAM) และนานโนเซลล์ลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโปนำไปแช่กรดไฮโดรคลอริก (A-TO-wood/PNIPAM) (Wang et al., 2022)



ภาพที่ 2-16 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เต็มนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโป (TO-wood/PNIPAM) และนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโปนำไปแช่กรดไฮโดรคลอริก (A-TO-wood/PNIPAM) (Wang et al., 2022)



ภาพที่ 2-17 ผลการทดสอบความเค้นแรงดึงของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เต็มนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโป (TO-wood/PNIPAM) และนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโปนำไปแช่กรดไฮโดรคลอริก (A-TO-wood/PNIPAM) (Wang et al., 2022)



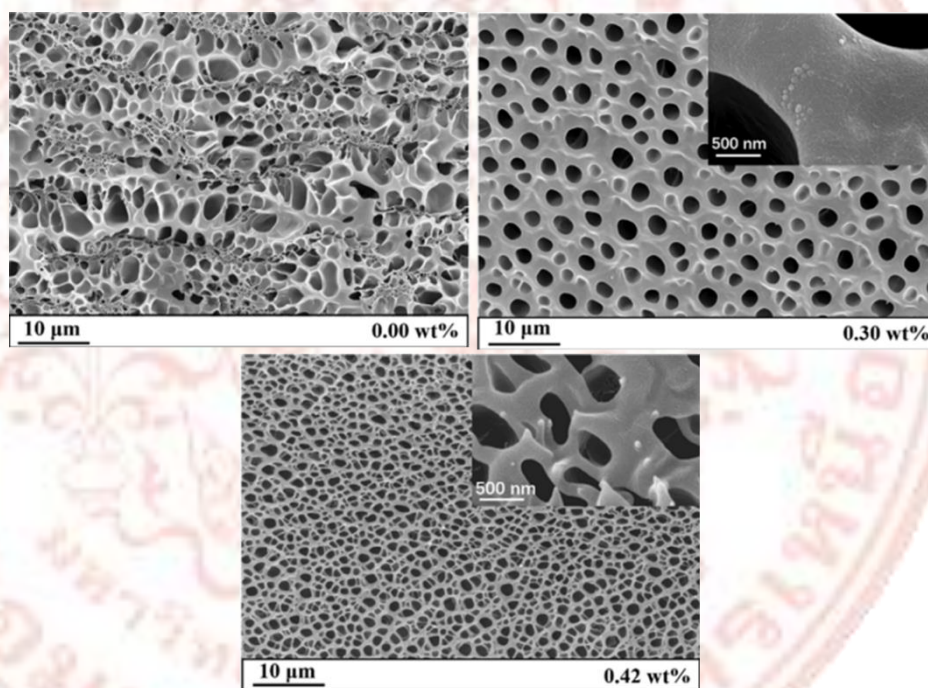
ภาพที่ 2-18 อัตราการส่องผ่านของไฮโดรเจล PNIPAAm (neat PNIPAM) เต็มนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโป (TO-wood/PNIPAM) และนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทมโปนำไปแช่กรดไฮโดรคลอริก (A-TO-wood/PNIPAM) (Wang et al., 2022)

Suzuki และคณะ (2010) ได้นำไฮโดรเจล PNIPAAm มาใช้ในการพัฒนาเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิอัจฉริยะ (smart temperature sensors) ที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไฮโดรเจลนี้มีคุณสมบัติพิเศษในการเปลี่ยนสถานะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า Lower Critical Solution Temperature (LCST) ที่ประมาณ 32°C การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น การนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และคุณสมบัติทางแสง (optical properties) เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ไฮโดรเจล PNIPAAm ถูกใช้เป็นวัสดุหลักในเซ็นเซอร์ เนื่องจากมีความสามารถในการยุบตัวหรือพองตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าและการผ่านของแสงของวัสดุ เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับอุณหภูมิได้โดยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าหรือทางแสง ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในระบบที่ต้องการการตรวจสอบหรือควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเซ็นเซอร์อัจฉริยะที่พัฒนาจากไฮโดรเจล PNIPAAm มีศักยภาพสูงในการนำไปใช้ในหลากหลายด้าน เช่น การแพทย์และอุตสาหกรรม ที่ต้องการการวัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการความแม่นยำและการตอบสนองที่รวดเร็ว เซ็นเซอร์ชนิดนี้ไม่เพียงแต่ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิร่างกาย แต่ยังสามารถปรับแต่งให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ได้เช่นกัน

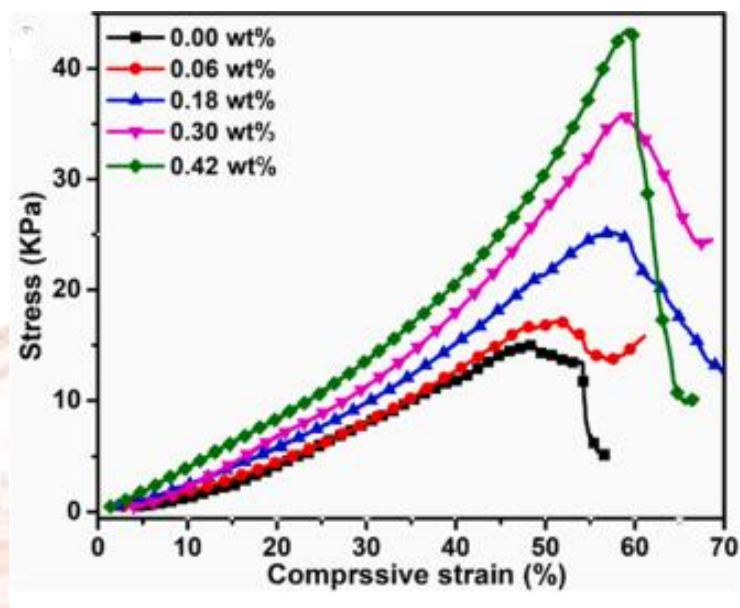
Yaping Zhang และคณะ (2018) ได้พัฒนาไฮโดรเจลนาโนคอมโพสิตที่ประกอบด้วย โครงสร้างชั้นคู่ของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (Layered Double Hydroxide, LDH) และ Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAAm) โดยมีคุณสมบัติเด่นทั้งด้านกลไกและการตอบสนองต่อ อุณหภูมิที่ยอดเยี่ยม ในการศึกษา นักวิจัยได้ใช้ LDH แบบชั้นเดียวที่มีประจุบวก (Single-layer nanosheets, SLNSs) ซึ่งถูกสังเคราะห์ผ่านกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยไม่ใช้ตัวทำ ละลายอินทรีย์หรือสารปรับแต่งใดๆ โครงสร้างไฮโดรเจลที่พัฒนาขึ้นถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM), Transmission electron microscopy (TEM), และ Differential scanning calorimetry (DSC) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงกล ผลการทดลองพบว่า ไฮโดรเจล LDH/PNIPAAm มีโครงสร้างที่แตกต่างกันใน แนวราบและแนวตั้ง โดยโครงสร้างในแนวราบมีลักษณะเป็นฟองน้ำละเอียด ส่วนโครงสร้างในแนวตั้ง มีลักษณะเป็นชั้นหลายชั้น การเพิ่ม LDH ในปริมาณต่างๆ ส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลของไฮโดรเจล เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เช่น ความแข็งแรงในการรับแรงดึงและแรงกดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ LDH ที่ใช้ โดย ความยืดหยุ่นและการยืดตัวสูงสุดยังคงอยู่ในระดับที่เหนือกว่าไฮโดรเจลที่ใช้ดินเหนียวเชิงลบ (Negatively charged clay/PNIPAAm) โดยงานวิจัยนี้ถือเป็นครั้งแรกที่มีการพัฒนาไฮโดรเจล LDH/PNIPAAm ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น วิศวกรรม เนื้อเยื่อ ยานำส่งยา และตัวดูดซับ (Sorbents) ทั้งนี้ยังเป็นการเปิดทางสู่การสังเคราะห์ที่เป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อมสำหรับการผลิตไฮโดรเจลที่มี LDH รวมอยู่ด้วย

Tian และคณะ (2021) นำเสนอการพัฒนาไฮโดรเจลไฮบริดชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนสี เมื่อได้รับแสงแดด (Photo-thermochromic) โดยมีการตอบสนองที่รวดเร็วและทนทาน เพื่อใช้ใน เทคโนโลยีหน้าต่างอัจฉริยะ (Smart windows) ที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน โดยการ วิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาไฮโดรเจลที่สามารถเปลี่ยนสีได้อย่างรวดเร็วและทนทานเมื่อได้รับ แสงแดด ใช้เทคโนโลยี Photo-thermochromic ซึ่งรวมทั้งการตอบสนองต่อแสงและอุณหภูมิ เพื่อให้สามารถใช้ในการควบคุมปริมาณแสงและความร้อนที่เข้ามาภายในอาคาร ซึ่งช่วยลดการใช้ พลังงานในการทำ ความเย็นและทำความร้อน เริ่มจากการนำอนุภาคโดพามีนปริมาณ 0, 0.06, 0.18, 0.30, 0.42% wt เติมลงในไฮโดรเจล PNIPAAm (PDAPs/PNIPAAm) จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของการ เติมอนุภาคโดพามีน ดังภาพที่ 2-19 พบว่าการเติมอนุภาคโดพามีนนั้นได้เข้าไปเชื่อม PNIPAAm ส่งผลให้ภายในโครงสร้าง PNIPAAm เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น จากนั้นทำการศึกษาผลของปริมาณ อนุภาคโดพามีนต่อความแข็งแรงเชิงกล ดังภาพที่ 2-20 พบว่าการเติมอนุภาคโดพามีนส่งผลให้ ไฮโดรเจล PNIPAAm มีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น ต่อมาคณะวิจัยได้ทำการทดสอบวิเคราะห์สมบัติ การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน (DSC) ดังภาพที่ 2-21 พบว่าการเติมอนุภาคโดพามีน ส่งผลต่อไฮโดรเจล PNIPAAm เนื่องจากพีคของผลการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส

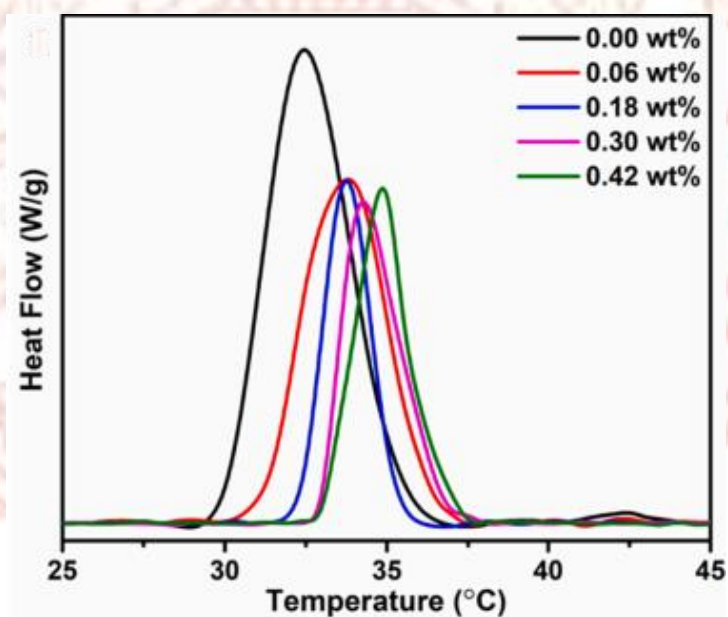
เป็น 35 องศาเซลเซียส อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) และอัตราการลดลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (DTG) ดังภาพที่ 2-22 พบว่าไฮโดรเจลทุกสภาวะจะเกิดการหลอมสลายในช่วงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความทนทานของไฮโดรเจล 0.42% wt เป็นจำนวน 100 รอบ พบว่าไฮโดรเจลยังสามารถส่องผ่าน (%T) ได้เท่าเดิม แสดงถึงความสามารถความทนทานของไฮโดรเจล ดังภาพที่ 2-23 ซึ่งงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาไฮโดรเจล Photo-thermochromic ที่สามารถตอบสนองต่อแสงแดดได้อย่างรวดเร็ว มีความทนทานสูง และมีศักยภาพในการใช้งานเชิงพาณิชย์สำหรับหน้าต่างอัจฉริยะเพื่อประหยัดพลังงาน งานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างของการพัฒนาวัสดุที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในอาคาร ดังภาพที่ 2-24



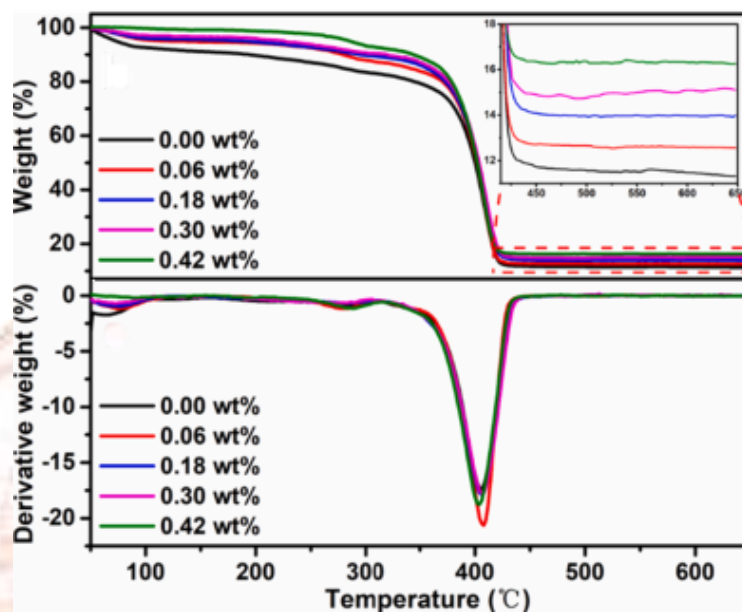
ภาพที่ 2-19 ภาพ SEM ของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.30 และ 0.42% wt
(Tian et al., 2021)



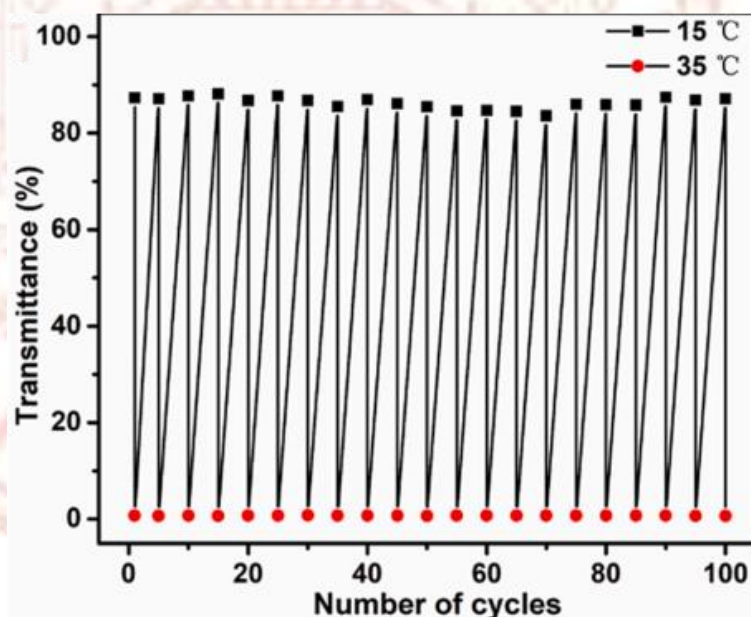
ภาพที่ 2-20 ผลการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.06, 0.18, 0.30 และ 0.42% wt (Tian et al., 2021)



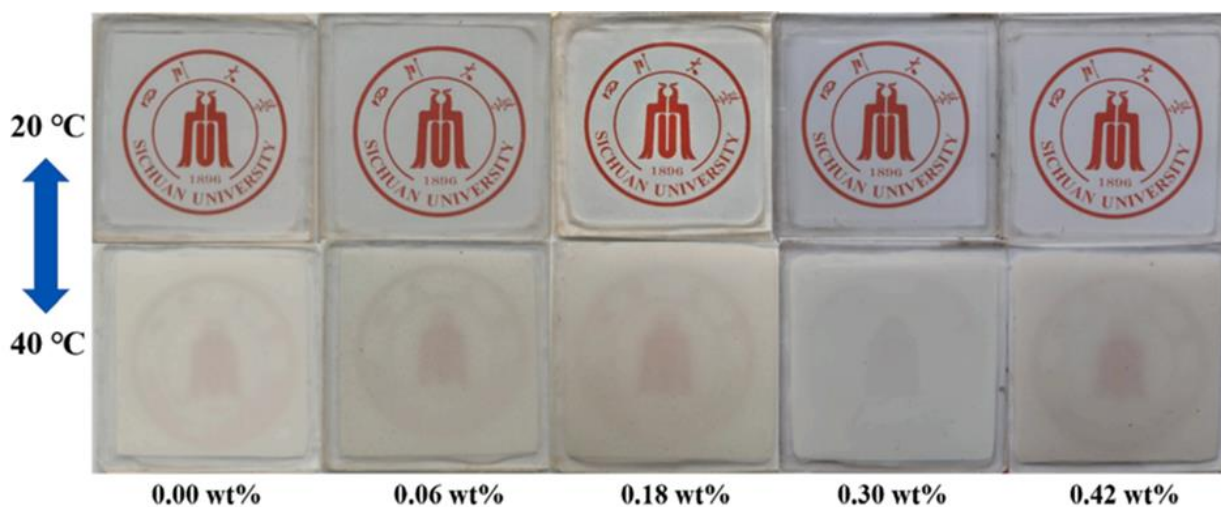
ภาพที่ 2-21 ผลการทดสอบ DSC ของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.06, 0.18, 0.30 และ 0.42% wt (Tian et al., 2021)



ภาพที่ 2-22 ผลการทดสอบ TGA และ DTG ของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.00, 0.06, 0.18, 0.30 และ 0.42% wt (Tian et al., 2021)

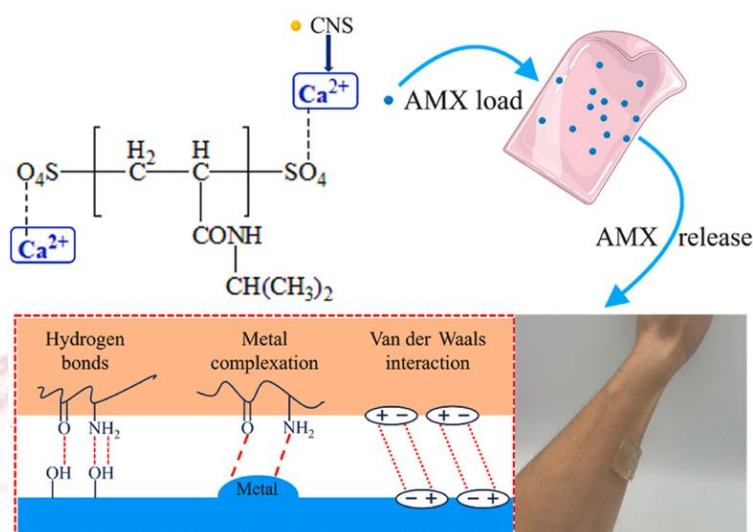


ภาพที่ 2-23 ผลการทดสอบความทนทานของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm 0.42% wt เป็นจำนวน 100 รอบ (Tian et al., 2021)



ภาพที่ 2-24 การตอบสนองต่อความร้อนของไฮโดรเจล PDAPs/PNIPAm (Tian et al., 2021)

Guangxu Ju และคณะ (2024) นำเสนอการพัฒนาไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติโดดเด่นทั้งในด้านความแข็งแรง การยึดติด และการตอบสนองต่ออุณหภูมิ โดยใช้โพลี (N-isopropylacrylamide) (PNIPAM) ผสมกับนาโนสเฟอรูลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CNS) ที่ใช้เป็นสารข้ามสายโซ่เพื่อสร้างโครงสร้างที่ทนทานและยืดหยุ่นสูง โดยไฮโดรเจลที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้อย่างดีในช่วง 0 ถึง 100°C และยังคงคุณสมบัติทางความร้อนที่เสถียรหลังผ่านการทดลองพองตัวและหดตัวถึง 10 รอบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความแข็งแรงทางกลสูง โดยมีความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดถึง 82.05 กิโลปาสกาล และมีการยืดตัวสูงถึง 3200% ขณะที่ยังสามารถคืนรูปได้ถึง 88% หลังจากรับน้ำหนักแรงกด 16.17 เมกะปาสกาล นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการยึดติดกับพื้นผิวต่างๆ ได้ดี เช่น ยางลาเท็กซ์ โดยมีความแข็งแรงของการยึดติดถึง 32.45 กิโลปาสกาล นอกจากคุณสมบัติด้านกลไกที่ยืดหยุ่นแล้ว ไฮโดรเจลนี้ยังมีศักยภาพในการนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น การนำส่งยา การรักษาบาดแผล และการประยุกต์ใช้ในวัสดุทางชีวภาพอื่น ๆ โดยมีความสามารถในการเก็บและปล่อยสารอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การบรรจุยา Amoxicillin ในปริมาณสูงสุดที่ 18.488 มิลลิกรัมต่อกรัมของไฮโดรเจล ซึ่งแสดงถึงศักยภาพที่ดีในด้านการใช้งานทางการแพทย์ ดังภาพที่ 2-25 และอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2-25 ลักษณะของไฮโดรเจล PNIPAM/CNS (Guangxu Ju et al., 2024)

Chenglin Zhang และคณะ (2024) ได้เน้นไปที่การพัฒนาไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ โดยใช้โพลี (N-isopropylacrylamide) หรือ PNIPAM ร่วมกับองค์ประกอบไอออนิก ซึ่งช่วยเสริมสมบัติในการควบคุมแสงและความยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น สมาร์ทวินโดวส์และเซ็นเซอร์แบบยืดหยุ่น งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการโพลีเมอเรชันแบบ in-situ ภายใต้ตัวทำละลายผสมระหว่างเอทิลีนไกลคอลและน้ำ เพื่อสร้างโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติในการปรับการส่งผ่านของแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จุดเด่นสำคัญ ของไฮโดรเจลที่พัฒนาขึ้นคือความสามารถในการควบคุมระดับการมองเห็นผ่านหน้าต่างตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งช่วยเพิ่มความเป็นส่วนตัวและลดการใช้พลังงานในอาคาร ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในสมาร์ทวินโดวส์นั้นช่วยในการจัดการการส่งผ่านแสงแดด ทำให้สามารถลดภาระการใช้เครื่องปรับอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานโดยรวมของอาคารได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังแสดงศักยภาพที่โดดเด่นในฐานะเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่ยืดหยุ่น ด้วยความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบตรวจจับสภาพแวดล้อมหรือระบบสมาร์ทโฮม โดยเทคโนโลยีนี้สามารถช่วยให้บ้านอัจฉริยะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การปรับระบบทำความร้อนหรือระบบระบายอากาศโดยอัตโนมัติ

Sun และคณะ (2024) ได้ศึกษาการใช้ไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Thermoresponsive hydrogel) เพื่อควบคุมอุณหภูมิและแจ้งเตือนความร้อนในการเก็บรักษาผลไม้และผักสด โดยเฉพาะพริกและกล้วย ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ไฮโดรเจลที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย poly(N-isopropylacrylamide-co-acrylamide) (P(NIPAM-

co-AM)) ผสมกับ NaCl และ Sodium dodecyl sulfate (SDS) micelles ซึ่งทำให้เกิดคุณสมบัติเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 14°C ไฮโดรเจลจะมีสภาพทึบแสง อุณหภูมิระหว่าง 14-37°C ไฮโดรเจลจะโปร่งแสง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 37°C ไฮโดรเจลจะกลับมาทึบแสงอีกครั้ง คุณสมบัตินี้ช่วยให้ไฮโดรเจลสามารถบล็อกพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และควบคุมการระเหยของความชื้นเพื่อรักษาอุณหภูมิของผักและผลไม้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ในการทดลองพบว่า ไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้น NaCl 8% (Gel-8 wt%-NaCl) สามารถลดอุณหภูมิของพริกที่สัมผัสกับแสงแดดโดยตรงได้ถึง 7.3°C ซึ่งช่วยป้องกัน sunburn damage และช่วยรักษาความชื้น ลดอัตราการหายใจของพริก ทำให้พริกเสื่อมสภาพช้าลงและคงคุณภาพให้ใกล้เคียงกับของสดใหม่ นอกจากนี้ ไฮโดรเจลยังสามารถทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ โดยเปลี่ยนจากโปร่งแสงเป็นทึบแสงเมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป ซึ่งช่วยแจ้งเตือนผู้บริโภคหรือผู้ขนส่งถึงสภาพอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม โดยพบว่า ที่อุณหภูมิ 4°C ไฮโดรเจลยังคงทึบแสง แสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมเย็นเกินไป ขณะที่ที่อุณหภูมิ 38°C ไฮโดรเจลเปลี่ยนเป็นทึบแสง แสดงว่าอุณหภูมิสูงเกินไป โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิสามารถช่วยควบคุมอุณหภูมิการเก็บรักษาอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้พลังงาน ซึ่งเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Fuciños และคณะ (2014) ได้ศึกษาการใช้ไฮโดรเจลนาโนที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิและค่า pH สำหรับการประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยการสังเคราะห์ นาโนไฮโดรเจลของ poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPA) ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบนาโนอิมัลชันในระบบน้ำในน้ำมัน (water-in-oil) เพื่อสร้างวัสดุที่สามารถควบคุมการบวมและหดตัวของไฮโดรเจลได้ตามอุณหภูมิและสภาพแวดล้อม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า PNIPA สามารถนำมาใช้เป็นระบบนำส่งสารออกฤทธิ์อัจฉริยะในบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมการบวมและหดตัวของไฮโดรเจลถูกตรวจวัดผ่านเทคนิค UV-visible spectroscopy และวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงจากการวิเคราะห์แบบ Van't Hoff ผลการศึกษาพบว่า ไฮโดรเจล PNIPA ที่ได้รับการปรับแต่งด้วยกรดอะคริลิกสามารถปรับแต่งอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Lower Critical Solution Temperature, LCST) ได้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะบวมและหดตัวที่สามารถควบคุมได้ นอกจากนี้ ไฮโดรเจลยังสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH และความเข้มข้นของตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมการปล่อยสารออกฤทธิ์ในระบบบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ การศึกษานี้ยังเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถคาดการณ์พฤติกรรมของไฮโดรเจลในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยใช้การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์เพื่อประเมินค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของไฮโดรเจล ซึ่งช่วยให้สามารถออกแบบระบบนำส่งสารออกฤทธิ์ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการควบคุมการปล่อยสารกันเสียหรือสารชีวภาพต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ (NaOH, ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (H₂O₂, ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
- 2,2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl (TEMPO ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
- โซเดียมโบไมด์ (NaBr บริษัท Tokyo chemical industry)
- โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaClO ยี่ห้อ Loba chemie)
- Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAm ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
- N, N'-Methylenebisacrylamide (BIS ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
- Ammonium peroxydisulfate (APS ยี่ห้อ Loba chemie)
- N,N,N',N'-Tetramethylethylenediamine (TEMED บริษัท PanReac Applichem)
- น้ำกลั่น (H₂O, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง)

3.2 อุปกรณ์

- ปีกเกอร์ ขนาด 1000 และ 50 ml (Beaker, ยี่ห้อ Duran)
- ช้อนตักสารเคมี (Spatula)
- แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic)
- แท่งแก้วกวนสาร (Glass stirring rod)
- ไมโครปิเปต (Micropipette ยี่ห้อ Eppendorf Research plus)
- ถุงกรองสาร (Heat seal)
- แผ่นวัดความเป็นกรด-เบส (pH paper indicator strips, ยี่ห้อ Merck, Germany)
- อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil, ยี่ห้อ Diamond)
- ถาดอลูมิเนียมสำหรับอบสาร (Aluminum tray)
- กระบอกตวง ขนาด 100 และ 50 ml (Cylinder Glass, ยี่ห้อ Isolab, Germany)
- ครกสำหรับบดสาร
- ถุงมือ (Medical gloves, ยี่ห้อ ศรีตรังโกลฟส์)
- จานเพาะเชื้อ (Petri dish, ยี่ห้อ Anumbra, Czech)

3.3 เครื่องมือ

- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น MS1003TS/00)
- เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hotplate Stirrer, ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7 digital และยี่ห้อ M-TOPS รุ่น HS Series-MS300HS)
- ตู้อบลมร้อน (Drying Oven, ยี่ห้อ Pol-Eko Aparatura รุ่น SLW 115)
- เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer, ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI98501)
- เครื่องโฮโมจีไนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Homogenizer ยี่ห้อ Bueno biotech รุ่น BEM-900A with Touch Screen Control)
- เครื่องทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer บริษัท Gold sim cellular science llc)
- เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น FT-NIR)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (Environmental scanning electron microscope, ESEM ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Quattro S)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope ,FE-SEM ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU 8230)
- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 ADVANCE FAMILY)
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer, UV-VIS ยี่ห้อ K LAB รุ่น POP)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU5000)
- เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น EZ test)

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

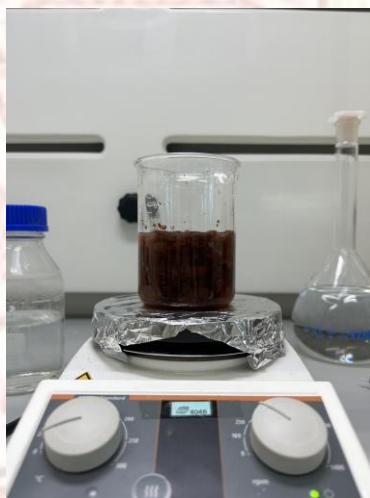
3.4.1 การสกัดเซลล์ลูโลสจากไม้อย่างพารา

- 1) นำไม้อย่างพารามาล้างทำความสะอาด แล้วอบให้แห้ง ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ขมิ้นแห้ง

2) นำขมิ้นมาบดด้วยต่างเพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสด้วยไฮโดรอกไซด์ 1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นปรับค่า pH เท่ากับ 7 ดังภาพที่ 3-2



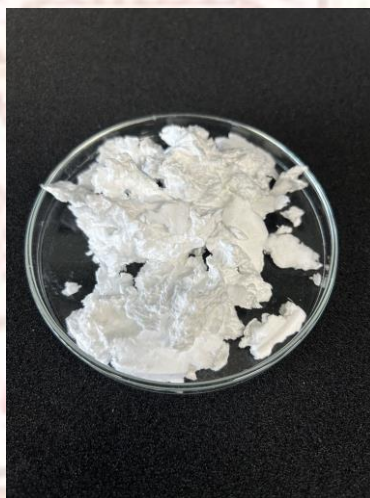
ภาพที่ 3-2 การปรับสภาพขมิ้นด้วยสารละลายต่าง

3) นำขมิ้นที่ผ่านการบดต่างมาฟอกสีเพื่อกำจัดลิกนินออกจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่สารละลายไว้เป็นเวลา 1 คืน ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 การฟอกสีไม้ยางพาราด้วยสารละลายกรด

4) ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7 แล้วนำเข้าอบในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 1 คืน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 เซลลูโลสของไม้ยางพารา

5) บดละเอียดให้เซลลูโลสจากไม้ยางพารามีขนาดระดับไมโครเมตร ดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 เซลลูโลสของไม้ยางพาราที่ผ่านการบดละเอียด

3.4.2 การสกัดนาโนเซลลูโลส

1) นำเซลลูโลส 1 กรัม ผสมกับ TEMPO (2,2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl) 0.06 กรัม และโซเดียมโบไมด์ (NaBr) 0.1 กรัม ลงในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เติมนโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaClO) ความเข้มข้น 4% พร้อมปั่นจนเป็นเวลา 6 และ 8 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 การสกัดนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยเทมโป

2) ทำให้ของผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโฮโมจิไนเซอร์เป็นเวลา 30 นาที ดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 การทำให้ของผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโฮโมจิไนเซอร์

3) ทำให้ตัวอย่างแห้งด้วยเครื่องทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer) จะได้นาโนเซลลูโลส ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 การทำให้ตัวอย่างแห้งด้วยเครื่องทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer)

3.4.3 การสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล

1) ผสม Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAm), N, N'- Methylenebisacrylamide (BIS), Ammonium peroxydisulfate (APS) และนาโนเซลลูโลสปริมาณ 0% wt, 0.05% wt, 0.10% wt, 0.20% wt และ 0.30% wt กรัมลงในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติม N,N,N',N'- Tetramethylethylenediamine (TEMED) ผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล

2) นำแท่งแม่เหล็กกวนสารออกแล้วรอเวลา 5 นาที จึงจะได้ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ ดังภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 ไฮโดรเจลตอบสนองต่ออุณหภูมิ

3.4.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะ

1) การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในไม้อย่างพารา, เซลลูโลส, นานเซลลูโลส และไฮโดรเจลทั้งหมด โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการชั่งสารที่ต้องการวิเคราะห์มาที่น้ำหนัก 2-3 มิลลิกรัม โดยศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่ช่วงเลขคลื่น $4000-500\text{ cm}^{-1}$ ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ PerkinElmer (ที่มา : ห้องวิจัย 53-705 คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง)

2) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกของไม้อย่างพารา, เซลลูโลส และนานเซลลูโลสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบผลึกของสารตัวอย่าง มุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 10° ถึง 60° ด้วยอัตราเร็ว 0.5 องศาเซลเซียส/นาที ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Bruker (ที่มา : ห้องวิจัย 53-705 คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง)

3) การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและธาตุองค์ประกอบทางเคมี
วิเคราะห์ขนาด และธาตุองค์ประกอบทางเคมีของนาโนเซลลูโลสด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม ดังภาพที่ 3-13 และภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม ยี่ห้อ ThermoFisher (ที่มา : ศูนย์บริการวิเคราะห์ ทดสอบ NSTDA Characterization and Testing Service Center (NCTC))



ภาพที่ 3-14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ HITACHI (ที่มา : ศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ NSTDA Characterization and Testing Service Center (NCTC))

4) การวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของไฮโดรเจลทั้งหมดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปี ทำการเตรียมตัวอย่างความหนา 0.2 - 0.3 mm โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 เครื่องสเปกโตรสโคปี ยี่ห้อ KLAB (ที่มา : ห้องวิจัย 54-417 คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง)

5) การวิเคราะห์การสนองต่อความร้อน

วิเคราะห์การตอบสนองต่อความร้อนของไฮโดรเจลโดยการให้ความร้อนแก่ไฮโดรเจลด้วย
ตู้อบลมร้อน ตั้งแต่ 25 - 35 องศาเซลเซียสในการวิเคราะห์

3.4.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์สมบัติการ เปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์สมบัติการ
เปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน (DSC) ที่อุณหภูมิ 25 - 45 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความ
ร้อน 1 องศาเซลเซียส/นาที ดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 เครื่องวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน ยี่ห้อ

Shimadzu/DSC-60A Plus (ที่มา : <https://www.shimadzu.com>)

3.4.6 การทดสอบความทนทาน

ไฮโดรเจลทั้งหมดถูกทดสอบความทนทานในด้านแรงกดอัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส
ทำการเตรียมไฮโดรเจลขนาด 1x1x1 เซนติเมตร โดยกำหนดแรงกด 1 มิลลิเมตรต่อนาที ความดัน
0-250 kPa ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ยี่ห้อ Shimadzu (ที่มา : ศูนย์บริการวิเคราะห์ ทดสอบ NSTDA Characterization and Testing Service Center (NCTC))

3.4.7 การทดสอบการบวมน้ำ และคายน้ำ

ไฮโดรเจลทั้งหมดถูกทดสอบการบวมน้ำโดยการนำไฮโดรเจลแห้งแช่น้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุกชั่วโมง เพื่อหาอัตราการบวมน้ำ ตามสมการที่ 1 และทดสอบการคายน้ำโดยการนำไฮโดรเจลที่บวมน้ำทั้งหมดทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักที่หายไปทุกชั่วโมง

$$\text{อัตราการบวมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจล ณ เวลาใดๆ} - \text{น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

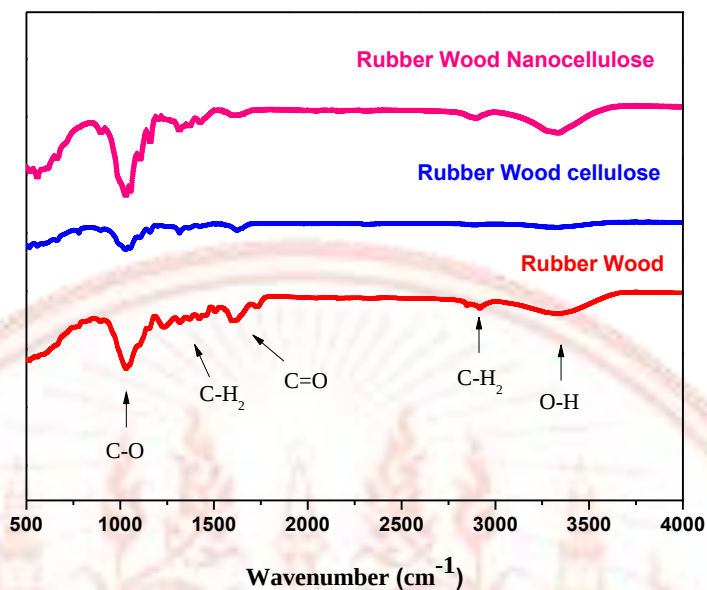
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไม้ยางพารา เซลลูโลส นานโนเซลลูโลส และนานโนเซลลูโลสไฮโดรเจลโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 500 ถึง 4000 cm^{-1}

ภาพที่ 4-1 แสดงสเปกตรัม FT-IR ของไม้ยางพารา เซลลูโลส และนานโนเซลลูโลส จากผลการวิเคราะห์พบพันธะเคมีหลายพันธะในตัวอย่าง โดยพิกแรกที่ตำแหน่ง 3416 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH Stretching) และพิกที่สองที่ตำแหน่ง 2927 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของกลุ่มไฮโดรคาร์บอน (C-H, CH_2 Stretching) และส่วนอื่นๆ ปรากฏที่ตำแหน่ง 1605 cm^{-1} , 1313 cm^{-1} และ 1027 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนแบบยืดของกลุ่มคาร์บอกซิลิก (C=O Stretching), การสั่นแบบงอของหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$ Scissoring) และการสั่นแบบยืดของกลุ่มอีเธอร์ (-O- Stretching) ตามลำดับ **ตารางที่ 4-1** พิกที่สังเกตได้ทั้งหมดสะท้อนถึงพันธะเคมีในโครงสร้างเซลลูโลส โดยในเซลลูโลสพิกลดลงเนื่องจากการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์พืช ส่งผลให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีความบริสุทธิ์มากขึ้น และทำให้สัญญาณ FT-IR ในช่วง (C-O stretching) ซึ่งแสดงถึงการสั่นสะเทือนของพันธะ C-O ในเซลลูโลสลดลง เนื่องจากจำนวนพันธะ C-O ที่เกี่ยวข้องกับลิกนินและเฮมิเซลลูโลสลดลง ในขณะที่นานโนเซลลูโลสซึ่งผ่านกระบวนการลดขนาดโครงสร้าง เช่น การใช้กระบวนการทางกลหรือทางเคมี พบว่าสัญญาณ FT-IR ในช่วง C-O stretching กลับเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสที่เป็นระเบียบมากขึ้นหลังจากการลดขนาดโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มของพันธะ C-O และทำให้สัญญาณ FT-IR ในช่วงดังกล่าวมีความเข้มข้นมากขึ้น เช่นเดียวกับช่วงตำแหน่ง 3416 cm^{-1} ของ (-OH Stretching) ที่เพิ่มขึ้นจากพื้นที่ผิวที่สูงขึ้นของนานโนเซลลูโลส ซึ่งทำให้จำนวนพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้สัญญาณ FT-IR มีความเข้มข้นสูงขึ้น



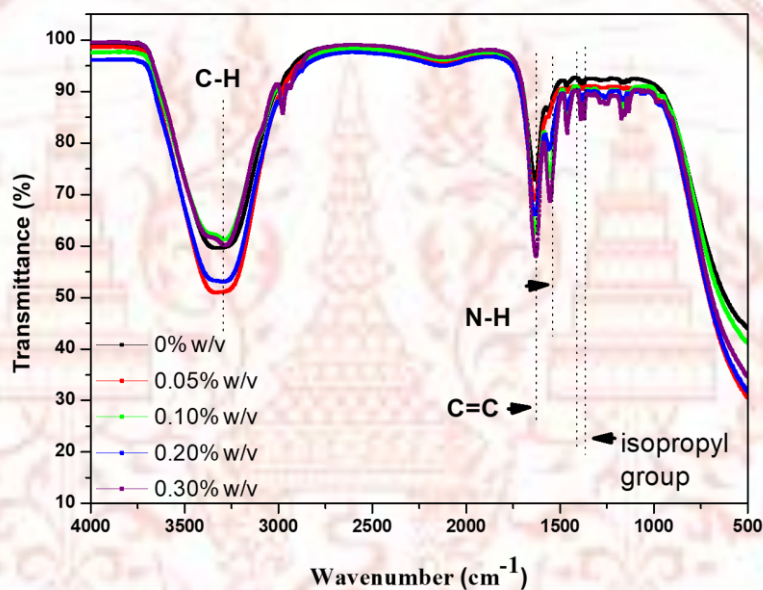
ภาพที่ 4-1 รูปแบบ FT-IR ของไม้ยางพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส

ตารางที่ 4-1 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของไม้ยางพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส

เลขคลื่น (ซม ⁻¹) (Wavenumbers)	พันธะเคมี (Chemical bonding)
3416	OH Stretching
2927	C-H, CH ₂ Stretching
1605	C=O Stretching
1313	CH ₂ Scissoring
1027	-O- Stretching

ถัดมา ภาพที่ 4-2 แสดงสเปกตรัม FT-IR ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v จากผลการวิเคราะห์พบพันธะเคมีหลายพันธะในตัวอย่างโดยปรากฏที่ตำแหน่ง 1366 และ 1385 cm⁻¹ สัมพันธ์กับกลุ่มของ isopropyl ตำแหน่ง 1540 สัมพันธ์กับหมู่เอไมด์ (N-H) ที่มีอยู่ใน Poly(N-isopropylacrylamide) หรือ (PNIPAm) ซึ่งเป็นหลักฐานยืนยันการมีอยู่ของ PNIPAm ในโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล นอกจากนี้ตำแหน่ง 1621 และตำแหน่ง 3300 สัมพันธ์กับพันธะคาร์บอนจับกับคาร์บอน (C=C) และพันธะคาร์บอนจับกับไฮโดรเจน (C-H) ตามลำดับ ซึ่งเป็นพันธะที่พบได้ทั่วไปในโครงสร้างของโมเลกุลอินทรีย์ การมีอยู่ของ PNIPAm ใน

โครงสร้างของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ เช่น ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของพีคที่สัมพันธ์กับ PNIPAm ในสเปกตรัมของตัวอย่างต่างๆ พบว่าความเข้มของพีคเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของนาโนเซลลูโลส ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณของ PNIPAm ในโครงสร้างของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของนาโนเซลลูโลสที่เติมลงไป การเปลี่ยนแปลงนี้บ่งชี้ว่าการเพิ่มปริมาณของนาโนเซลลูโลสมีผลต่อการกระจายตัวของ PNIPAm ในโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ



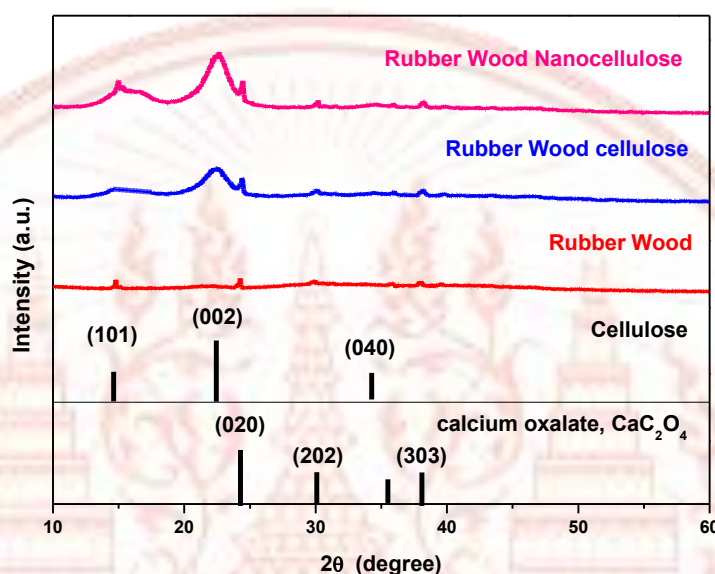
ภาพที่ 4-2 รูปแบบ FT-IR ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%

4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของไม้อย่างพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลสโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ที่ 2θ ในช่วงมุมเลี้ยวเบนระหว่าง 10° ถึง 60°

จากภาพที่ 4-3 แสดงถึงการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของไม้อย่างพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส พบพีคที่ตำแหน่ง 14° , 22° และ 34° สอดคล้องกับระนาบ 111, 002 และ 040 ตามลำดับ บ่งบอกถึงเซลลูโลส โดยพีคที่ตำแหน่ง 22° (ระนาบ 002) ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างโซ่พอลิเมอร์เซลลูโลส มีความเข้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกิดจากการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออก ทำให้โซ่พอลิเมอร์เซลลูโลสจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบมากขึ้น นอกจากนี้สเปกตรัมของไม้อย่างพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส ยังแสดงพีคที่ตำแหน่ง 24° , 30° , 35° และ 38° สอดคล้องกับระนาบ 020, 202, 040 และ 303 ตามลำดับ บ่งบอกถึงแคลเซียมออกซาลาต (CaC₂O₄) ซึ่งเป็น

สารประกอบที่พบได้ตามธรรมชาติในเนื้อไม้ การมีอยู่ของแคลเซียมออกซาลาเลทอาจมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ การเปรียบเทียบสเปกตรัม XRD ของตัวอย่างต่างๆ ช่วยให้เข้าใจถึงโครงสร้างผลึกของนาโนเซลลูโลส และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกกับสมบัติของวัสดุ

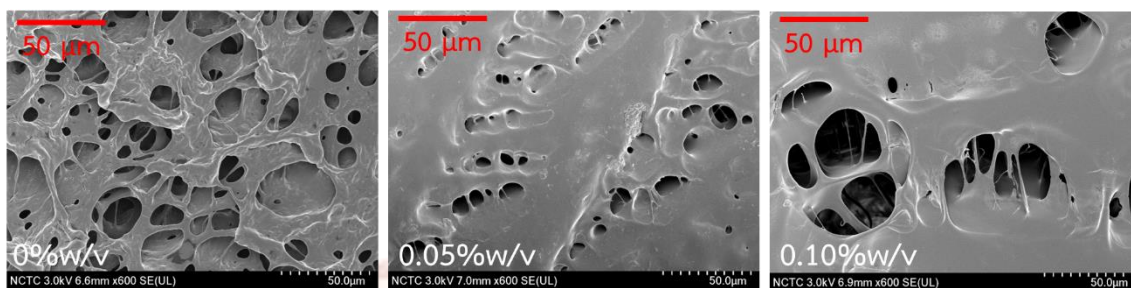


ภาพที่ 4-3 รูปแบบ XRD ของไม้ยางพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส

4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 และ 8 ชั่วโมงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสิ่งแวดล้อม (ESEM)

ภาพที่ 4-4 แสดงภาพ ESEM ของนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง โดยนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมงเผยให้เห็นโครงสร้างเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่สานตัวกันอย่างละเอียด มีขนาดเฉลี่ย 23 นาโนเมตร และนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 8 ชั่วโมง เผยให้เห็นโครงสร้างเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เกาะกลุ่มกันอย่างละเอียด มีเส้นใยนาโนเซลลูโลสขนาด 19 นาโนเมตร การใช้เวลา 8 ชั่วโมง ในการเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป ส่งผลให้เส้นใยนาโนเซลลูโลสมีขนาดเล็กกว่า (19 นาโนเมตร) เมื่อเทียบกับการใช้เวลา 6 ชั่วโมง (23 นาโนเมตร) แต่มีแนวโน้มที่จะจับกลุ่มกันเอง ส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นใยไม่ดีเท่าเส้นใยนาโนเซลลูโลสขนาดใหญ่ (23 นาโนเมตร) อย่างไรก็ตามเส้นใยนาโนเซลลูโลสขนาดใหญ่ (23 นาโนเมตร) แม้จะมีขนาดใหญ่กว่า แต่มีโครงสร้างที่สานตัวกันดี ส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นใยดีกว่า

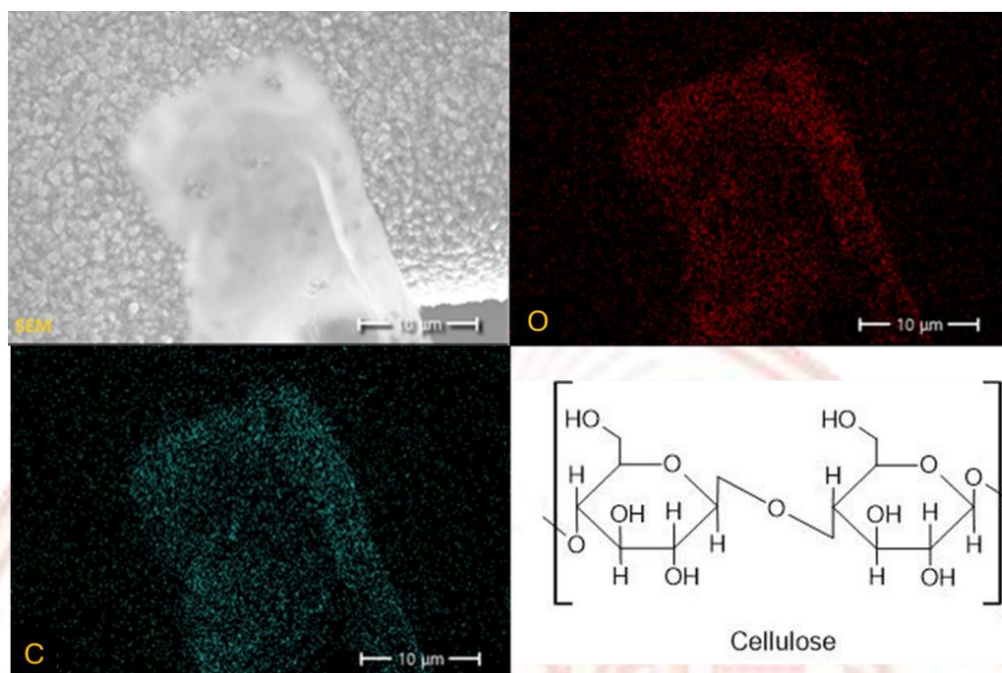


ภาพที่ 4-5 รูปแบบ FE-SEM ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05% และ 0.10%

4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี

ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาพบว่านาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจึงทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมงโดยเทคนิคสเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS-Mapping)

ภาพที่ 4-6 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน (C) สีฟ้า มีสัดส่วน 31.12% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1 และอะตอมออกซิเจน (O) สีดำ มีสัดส่วน 68.88% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.4 ของโมเลกุลเซลลูโลส สาเหตุที่อะตอมออกซิเจนมีปริมาณมาก เนื่องจากอะตอมออกซิเจนจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตสามารถเข้าจับกับโครงสร้างของเซลลูโลสได้ ส่งผลให้สัดส่วนของออกซิเจนในองค์ประกอบโดยรวมสูงขึ้น แสดงในตารางที่ 4-2 ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสบริสุทธิ์ โดยทั้งสองธาตุล้วนเป็นธาตุหลักของเซลลูโลส โดยโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ตามแนวโซ่ ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลเซลลูโลสอื่นๆ ทำให้โครงสร้างเซลลูโลสมีความแข็งแรง ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่ากระบวนการออกซิเดชันไม่ได้นำไปสู่การปนเปื้อนของธาตุอื่นๆ และรักษาโครงสร้างพื้นฐานของเซลลูโลสเอาไว้ การมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากในเซลลูโลสทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีความแข็งแรงและเสถียร ผลการวิเคราะห์ EDS สอดคล้องกับการวิเคราะห์ FT-IR ซึ่งพบพีคที่บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล



ภาพที่ 4-6 รูปแบบ EDS-Mapping ของนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-2 สัดส่วนอะตอม EDS ของโมเลกุลเซลลูโลสนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป 6 ชั่วโมง

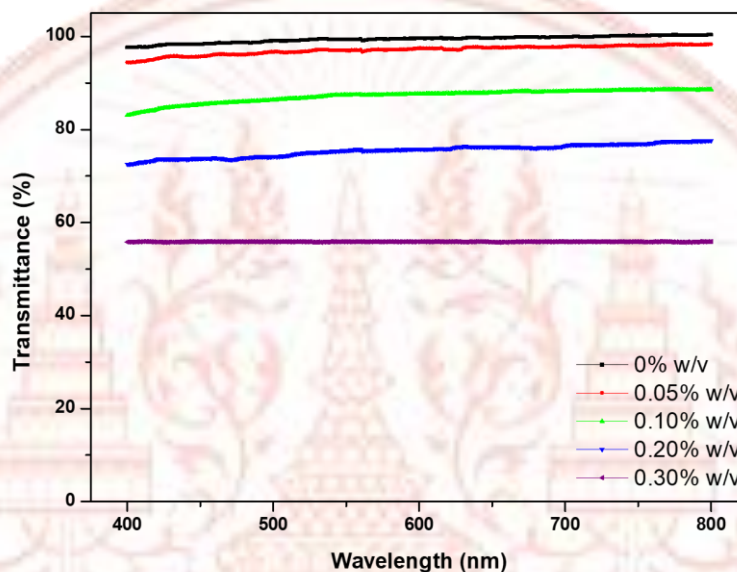
ลำดับ	ธาตุ	สัดส่วน (%)	SD (%)
1	คาร์บอน	31.12	0.1
2	ออกซิเจน	68.88	0.4

4.5 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v โดยเครื่องสเปกโตรสโคปี (UV-Vis) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร

ภาพที่ 4-7 แสดงรูปแบบ UV-VIS ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v โดยมีอัตราการส่องผ่านเท่ากับ 97.65%, 94.47%, 83.08%, 75.78% และ 65.30% ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ UV-Vis พบว่านาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลมีความโปร่งใส โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้นต่ำ ค่าการส่องผ่านแสงที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนาโน

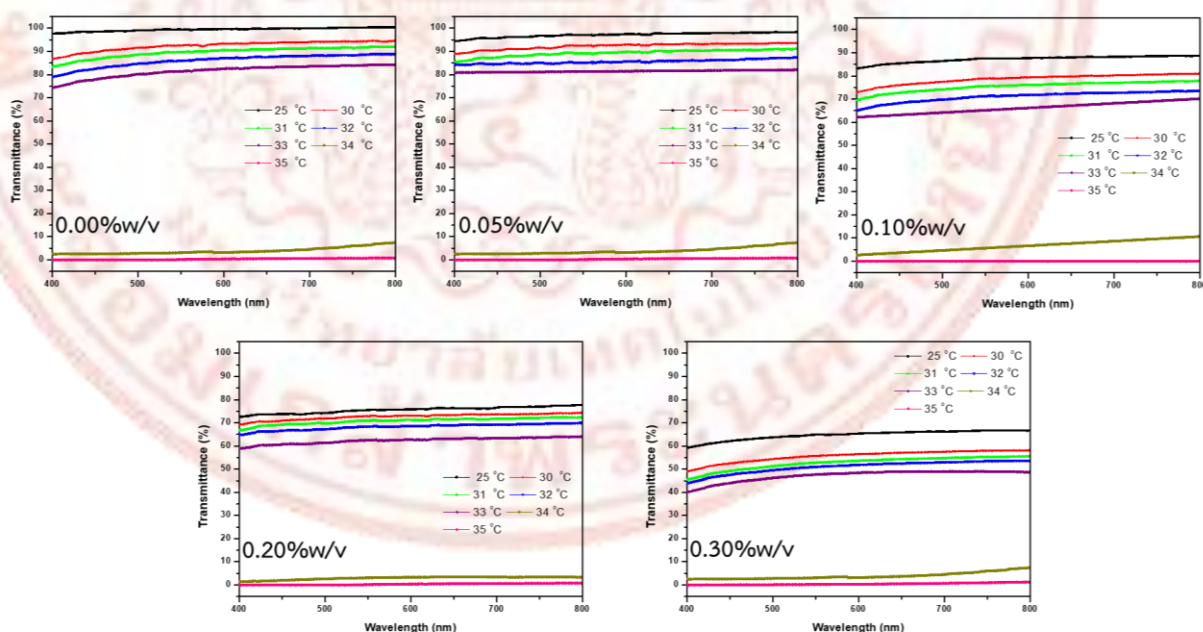
เซลล์โลสเป็นผลมาจากการกระเจิงของแสงโดยอนุภาคของนาโนเซลล์โลส ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ FE-SEM ที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างรูพรุน ความโปร่งใสของนาโนเซลล์โลสไฮโดรเจลทำให้มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งใสและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 4-7 รูปแบบ UV-Vis ของนาโนเซลล์โลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%

ต่อมาภาพที่ 4-8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่องผ่านของนาโนเซลล์โลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v ที่อุณหภูมิ 25, 30, 31, 32, 33, 34 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่าไฮโดรเจลทั้งหมดจะมีอัตราการส่องผ่านลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยนาโนเซลล์โลสไฮโดรเจล 0% w/v ที่อุณหภูมิ 30, 31, 32, 33, 34 และ 35 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการส่องผ่านเท่ากับ 93.02, 90.2, 86.82, 82.17, 3.21 และ 0.40 ตามลำดับ นาโนเซลล์โลสไฮโดรเจล 0.05% w/v ที่อุณหภูมิ 30, 31, 32, 33, 34 และ 35 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการส่องผ่านเท่ากับ 92.87, 89.71, 85.78, 81.40, 3.20 และ 0.40 ตามลำดับ นาโนเซลล์โลสไฮโดรเจล 0.10% w/v ที่อุณหภูมิ 30, 31, 32, 33, 34 และ 35 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการส่องผ่านเท่ากับ 79.28, 75.99, 71.9, 66.14, 6.65 และ 0.20 ตามลำดับ นาโนเซลล์โลสไฮโดรเจล 0.20% w/v ที่อุณหภูมิ 30, 31, 32, 33, 34 และ 35 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการส่องผ่านเท่ากับ 73.04, 71.17, 68.64, 62.64, 3.35 และ 0.40 ตามลำดับ นาโนเซลล์โลสไฮโดรเจล 0.30% w/v ที่อุณหภูมิ 30, 31, 32, 33, 34 และ 35 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการส่องผ่านเท่ากับ 56.45, 53.54, 51.94, 48.41, 3.20 และ 0.36 ตามลำดับ

ดังตารางที่ 4-3 โดยอัตราการส่องผ่านของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยอัตราการส่องผ่านของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 32 องศาเซลเซียส ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไฮโดรเจล การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลส โดยไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการส่องผ่านที่รวดเร็วกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาคของนาโนเซลลูโลสมีปฏิสัมพันธ์กันมากขึ้นและเกิดการรวมตัวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของไฮโดรเจลได้ การลดลงของอัตราการส่องผ่านเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระเจิงของแสงมากขึ้น หรืออาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหของตัวกลาง อย่างไรก็ตาม ไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสสูงจะมีอัตราการส่องผ่านลดลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาคของนาโนเซลลูโลสมีปฏิสัมพันธ์กันมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคและเพิ่มการกระเจิงของแสง



ภาพที่ 4-8 รูปแบบ UV-VIS ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%

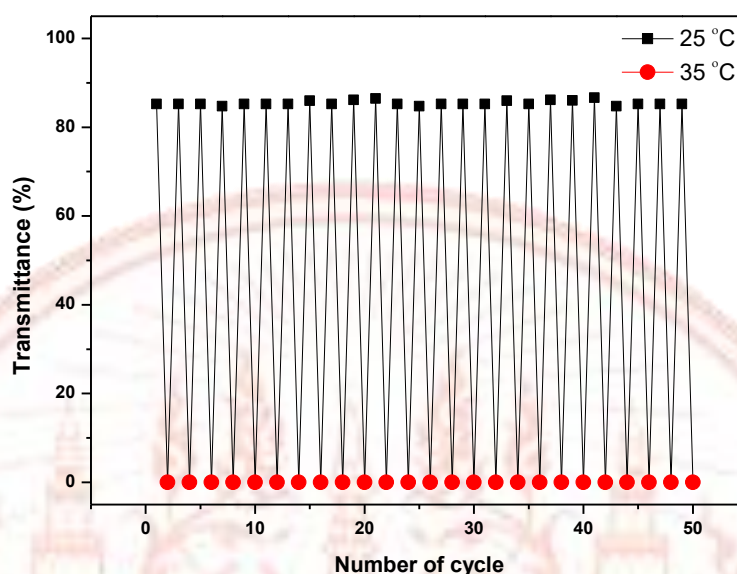
ตารางที่ 4-3 อัตราการส่องผ่านของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v ที่ 600 นาโนเมตร

นาโนเซลลูโลส ไฮโดรเจล	25 °C (%)	30 °C (%)	31 °C (%)	32 °C (%)	33 °C (%)	34 °C (%)	35 °C (%)
0%	97.65	93.02	90.2	86.82	82.17	3.21	0.40
0.05%	94.47	92.87	89.71	85.78	81.40	3.20	0.40
0.10%	83.08	79.28	75.99	71.9	66.14	6.65	0.20
0.20%	75.78	73.04	71.17	68.64	62.64	3.35	0.40
0.30%	65.30	56.45	53.54	51.94	48.41	3.20	0.36

4.6 ผลการวิเคราะห์ความเสถียร

จากการวิเคราะห์ความเสถียรนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v โดยเครื่องสเปกโตรสโคปี (UV-Vis) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 600 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สลับกับอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นจำนวน 50 รอบ

การทดสอบดำเนินการในช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่สารละลายไม่ดูดกลืนแสง เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากตัวกลาง และทำการสลับอุณหภูมิระหว่าง 25 และ 35 องศาเซลเซียส เพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสถียรของไฮโดรเจล โดยภาพที่ 4-9 แสดงผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v ยังคงมีความเสถียรสูงหลังจากผ่านการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซ้ำ ๆ จำนวน 50 รอบ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการส่องผ่าน ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างของไฮโดรเจลยังคงรักษาสภาพเดิมได้เป็นอย่างดี แม้จะอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง



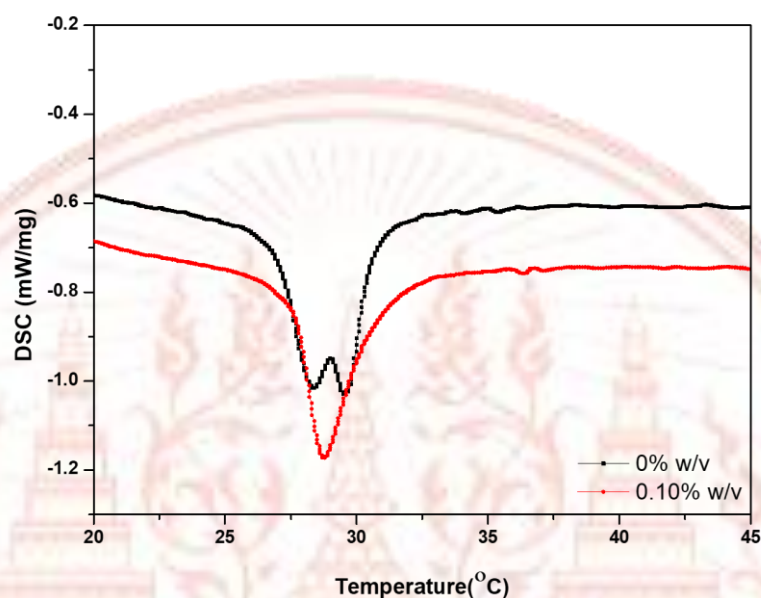
ภาพที่ 4-9 รูปแบบ UV-VIS ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ทดสอบความเสถียรเป็นจำนวน 50 รอบ

4.7 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อนของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0% w/v, และ 0.10% w/v โดยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน (DSC)

ภาพที่ 4-10 แสดงนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0% และ 0.10% w/v มีการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (Melting) เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว โดยการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (Melting) ที่เกิดขึ้นคือการเปลี่ยนแปลงสถานะจากเจล (gel) เป็นของเหลว (sol) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจล ซึ่งนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0% w/v T_m ที่ 28.37 และ 29.58 °C ซึ่งอาจบ่งบอกถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างไฮโดรเจล ในขณะที่นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v T_m ที่ 28.78 °C ซึ่งมีค่า T_m เพียงค่าเดียวและอยู่ระหว่างค่า T_m ของไฮโดรเจล 0% w/v ทั้งสองจุด อาจสันนิษฐานได้นาโนเซลลูโลสได้เข้าไปทำหน้าที่เชื่อมต่อโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลให้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างนาโนเซลลูโลสกับโมเลกุลของน้ำเพิ่มความเสถียรส่งผลให้โครงสร้างของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลมีความเป็นเอกภาพมากขึ้น และมีความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดจาก

การเพิ่มนาโนเซลลูโลสส่งผลต่อสมบัติทางกลของไฮโดรเจลด้วย เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อแรงกระแทก



ภาพที่ 4-10 รูปแบบ DSC ของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0% และ 0.10%

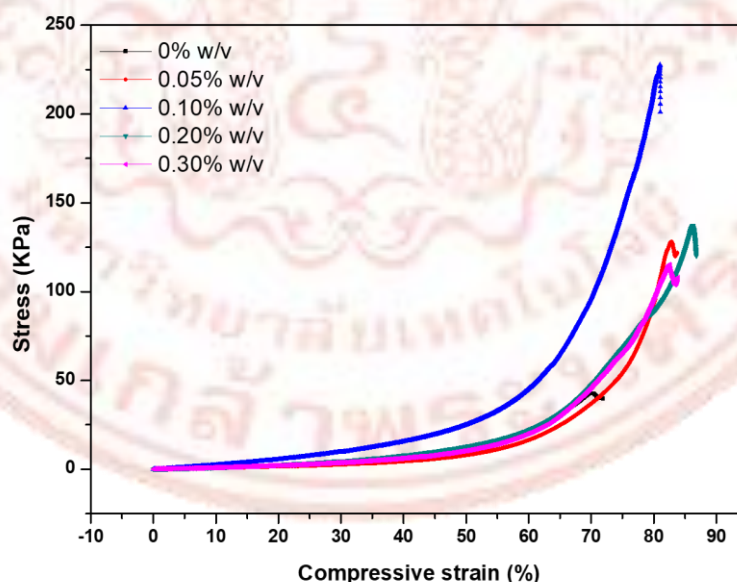
4.8 ผลการทดสอบความทนทาน

จากการวิเคราะห์ความทนทานของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v โดยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis) โหมดแรงกดอัด

การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสในโหมดแรงกดอัดนั้นใช้เพื่อประเมินความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของโครงสร้างนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล โดยการวัดค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress) ความเครียดการกดอัดสูงสุด (maximum strain) และค่ามอดูลัส (modulus) ในที่นี้จะใช้หน่วยกิโลปาสกาล (kPa) ซึ่งหาได้จากค่าความเค้นสูงสุด (σ) ในหน่วยกิโลปาสกาล (kPa) ส่วนความเครียดการกดอัดสูงสุด (ϵ) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) โดยค่าเหล่านี้บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานแรงกดและการเปลี่ยนรูปของตัวอย่าง

โดยภาพที่ 4-11 แสดงผลการวิเคราะห์การกดอัดนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v พบว่านาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0% w/v มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 43.65 kPa ความเครียดการกดอัดสูงสุดเท่ากับ 70.57 % และค่ามอดูลัสเท่ากับ 61.86 kPa นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.05% w/v ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 128.23 kPa ความเครียดการกดอัดสูงสุดเท่ากับ 82.85 % และค่ามอดูลัสเท่ากับ 154.77 kPa นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v ค่า

ความเค้นสูงสุดเท่ากับ 227.82 kPa ความเครียดการกดอัดสูงสุดเท่ากับ 81.00 % และค่ามอดูลัสเท่ากับ 281.24 kPa นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.20% w/v ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 137.86 kPa ความเครียดการกดอัดสูงสุดเท่ากับ 86.47 % และค่ามอดูลัสเท่ากับ 159.43 kPa นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.30% w/v ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 115.25 kPa ความเครียดการกดอัดสูงสุดเท่ากับ 82.49 % และค่ามอดูลัสเท่ากับ 139.70 kPa ดังตารางที่ 4-4 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าต่าง ๆ พบว่าค่าความเค้นสูงสุด ค่าความเครียดการกดอัดสูงสุด และค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสขึ้นถึงระดับหนึ่ง (0.10% w/v) หลังจากนั้นค่าความเค้นสูงสุดและมอดูลัสกลับลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคถึงจุดที่เหมาะสม หากมากกว่านี้จะถึงจุดมากเกินไป ทำให้โครงสร้างของไฮโดรเจลไม่เสถียร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ SEM ที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของไฮโดรเจลมีความหนาแน่นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นสูงเกินไป ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่มากเกินไป ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าความเข้มข้นของพอลิเมอร์มีผลต่อสมบัติทางกลของไฮโดรเจล โดยผลการทดสอบความแข็งแรงสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ SEM ที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของไฮโดรเจลมีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนเซลลูโลส ซึ่งบ่งชี้ว่านาโนเซลลูโลสเข้าไปเสริมสร้างโครงสร้างของไฮโดรเจล



ภาพที่ 4-11 ผลแรงกดอัดของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%

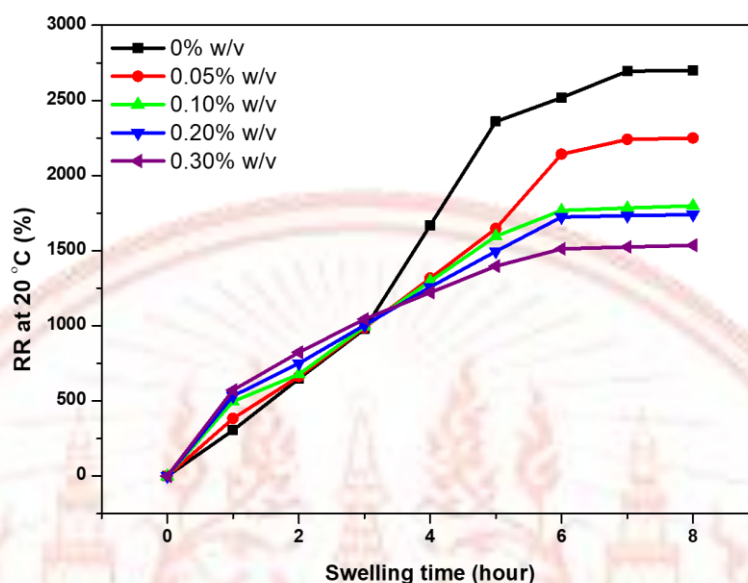
ตารางที่ 4-4 ค่าความเค้น ความเครียดการกดอัด และค่ามอดูลัสของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v

ตัวอย่าง	ความเค้น (kPa)	ความเครียดการกดอัด (%)	มอดูลัส
0%	43.65	70.57	61.86
0.05%	128.23	82.85	154.77
0.10%	227.82	81.00	281.24
0.20%	137.86	86.47	159.43
0.30%	115.25	82.49	139.70

4.9 ผลการทดสอบการบวมน้ำ และคายน้ำ

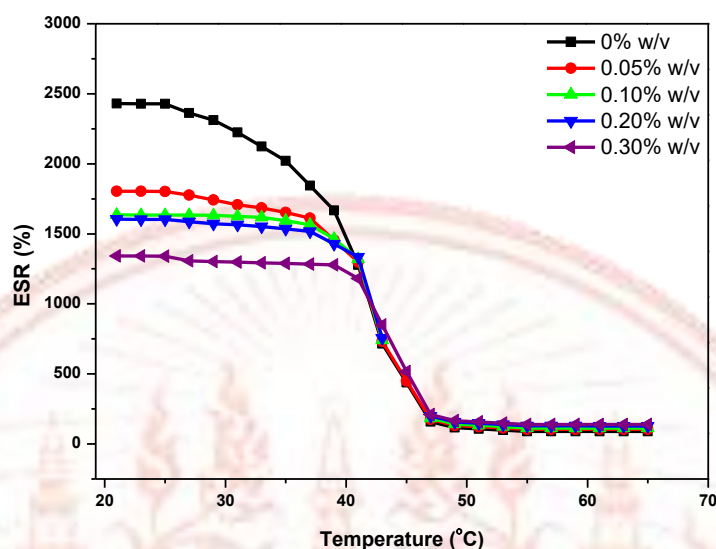
จากการทดสอบการบวมน้ำและคายน้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v โดยการนำไฮโดรเจลแห้งแช่น้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุกชั่วโมง เพื่อหาอัตราการบวมน้ำ และทดสอบการคายน้ำโดยการนำไฮโดรเจลที่บวมน้ำทั้งหมดทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักที่หายไปทุกชั่วโมง

ภาพที่ 4-12 แสดงผลการทดสอบการบวมน้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v พบว่าไฮโดรเจลที่หัดตัวสามารถดูดซับน้ำใหม่ได้อีก แต่การวิเคราะห์การดูดซับน้ำบ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมนาโนเซลลูโลสลงในไฮโดรเจลไม่ได้ส่งผลต่อความเร็วในการดูดซับน้ำ แต่กลับส่งผลต่อปริมาณน้ำสูงสุดที่ไฮโดรเจลสามารถดูดซับได้ โดยไฮโดรเจลที่ไม่มีนาโนเซลลูโลสสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าไฮโดรเจลที่ผสมนาโนเซลลูโลส ซึ่งจุดสมดุลของปริมาณน้ำสูงสุดที่ไฮโดรเจลสามารถดูดซับได้จะใช้เวลา 7 ชั่วโมง ซึ่งการเติมนาโนเซลลูโลสเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจลอาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และอนุภาคของนาโนเซลลูโลสมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของไฮโดรเจลมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีรูพรุนที่เล็กลง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง



ภาพที่ 4-12 ผลการบวมน้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30%

ภาพที่ 4-13 แสดงผลการทดสอบการคายน้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v พบว่านาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจะเริ่มคายน้ำหลังอุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป โดยปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นตามปริมาณนาโนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บน้ำในไฮโดรเจลที่เติมนานาโนเซลลูโลส และนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลทั้งหมดจะเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การที่ไฮโดรเจลเริ่มคายน้ำหลังอุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส บ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ พันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโครงสร้างของไฮโดรเจลมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะกักเก็บน้ำไว้ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานความร้อนจะทำให้พันธะเหล่านี้ขาดออก ทำให้น้ำระเหยออกไป การที่นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลทั้งหมดเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส บ่งชี้ว่าที่อุณหภูมินี้ น้ำส่วนใหญ่ได้ระเหยออกไปจากไฮโดรเจลแล้ว และโครงสร้างของไฮโดรเจลมีความเสถียร

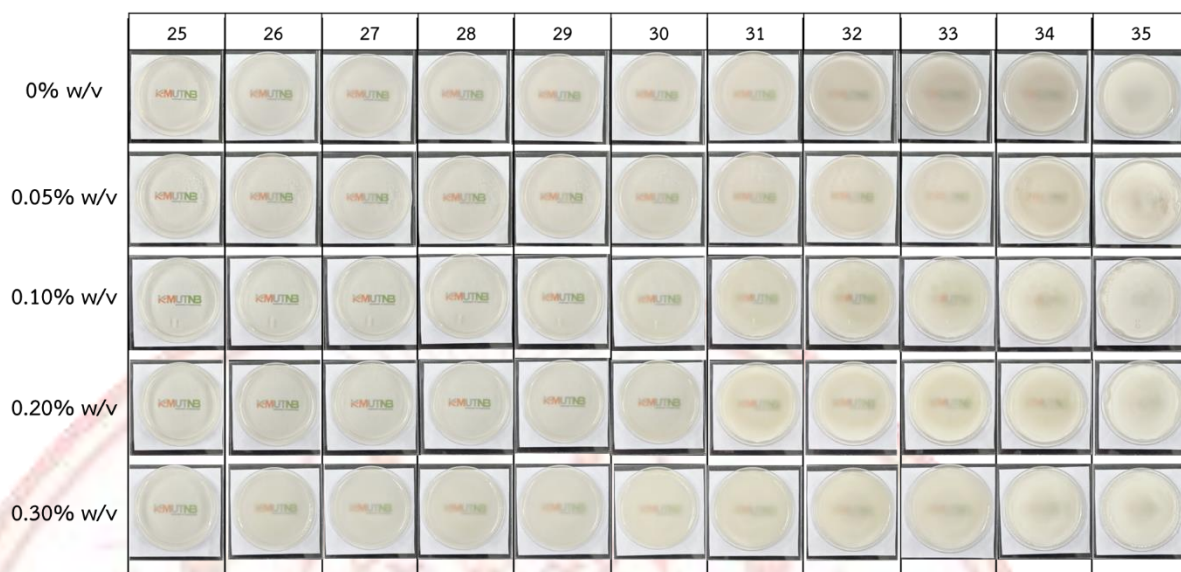


ภาพที่ 4-13 รูปแบบการคายน้ำของนาโนเซลล์ูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v

4.10 การทดสอบการตอบสนองต่อความร้อน

จากการทดสอบการตอบสนองต่อความร้อนโดยการให้ความร้อนต่อนาโนเซลล์ูโลสไฮโดรเจลที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4-14 แสดงการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความร้อนของของนาโนเซลล์ูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจลมีลักษณะเป็นสีใส เริ่มมีจุดขุ่นที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ไฮโดรเจลจะมีความขุ่นมากขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจลเปลี่ยนเป็นสีทึบ โดยการเติมนาโนเซลล์ูโลสลงในนาโนเซลล์ูโลสไฮโดรเจลไม่ได้ชะลอการตอบสนองต่ออุณหภูมิ

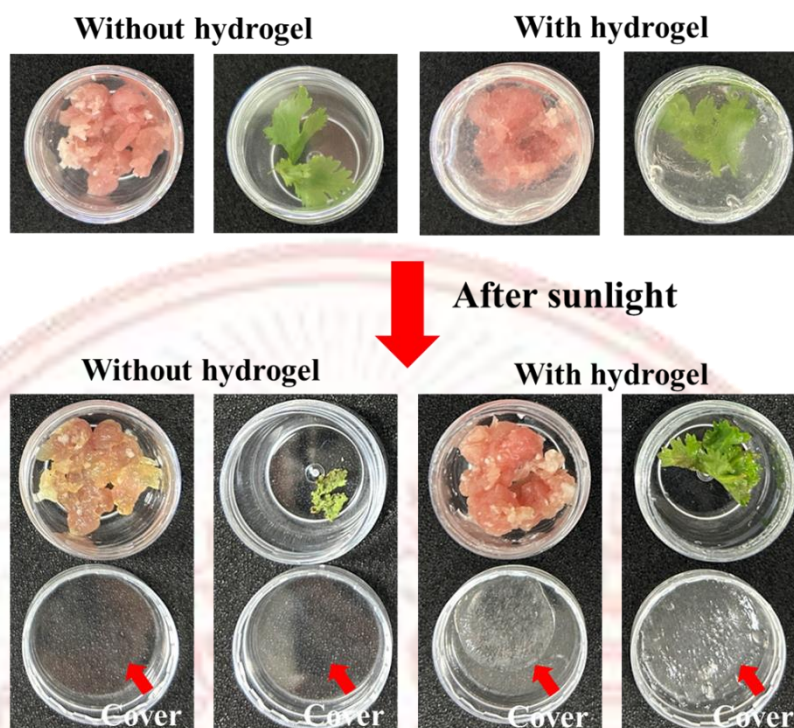


ภาพที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความร้อนของของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.30% w/v

4.11 การทดสอบการใช้งานจริง

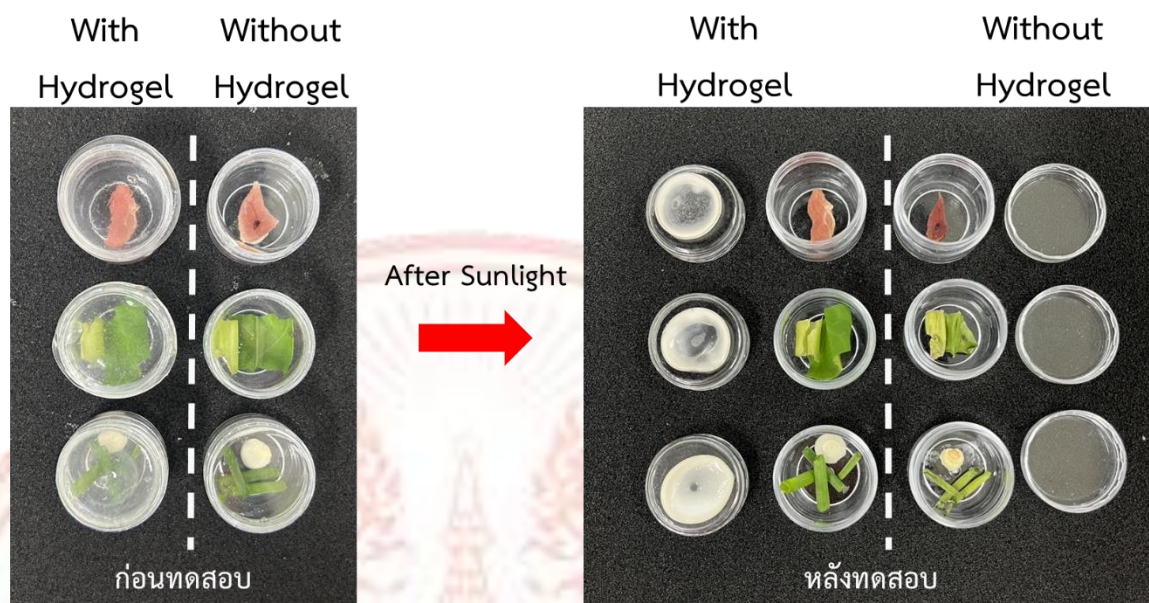
จากการทดสอบการใช้งานจริงของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v โดยการนำนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v ประกอบเข้ากับฝากล่องอาหารที่มีเนื้อหมูกับผักชี ฝากล่องอาหารทั้งหมดไปตากแดดเป็นเวลา 1 วัน เพื่อการเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับกล่องอาหารที่ไม่มีนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลอยู่บนฝากล่องอาหาร

ภาพที่ 4-15 แสดงการทดสอบการนำไปใช้จริงของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v พบว่าหลังจากผ่านไป 1 วัน กล่องอาหารที่ไม่มีไฮโดรเจลหมูเริ่มมีลักษณะสีเขียว แห้ง และมีกลิ่นผักชีหืดตัวอย่างเห็นได้ชัด ส่วนกล่องอาหารที่มีไฮโดรเจลหมูยังคงความชุ่มชื้น มีสีใกล้เคียงกับตอนเริ่มทดสอบ ผักชีหืดตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ที่แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดี สามารถช่วยรักษาความสดของอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชะลอการสูญเสีย น้ำ การเปลี่ยนแปลงของสี และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งบ่งชี้ว่านาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารที่ยืดอายุการเก็บรักษาได้



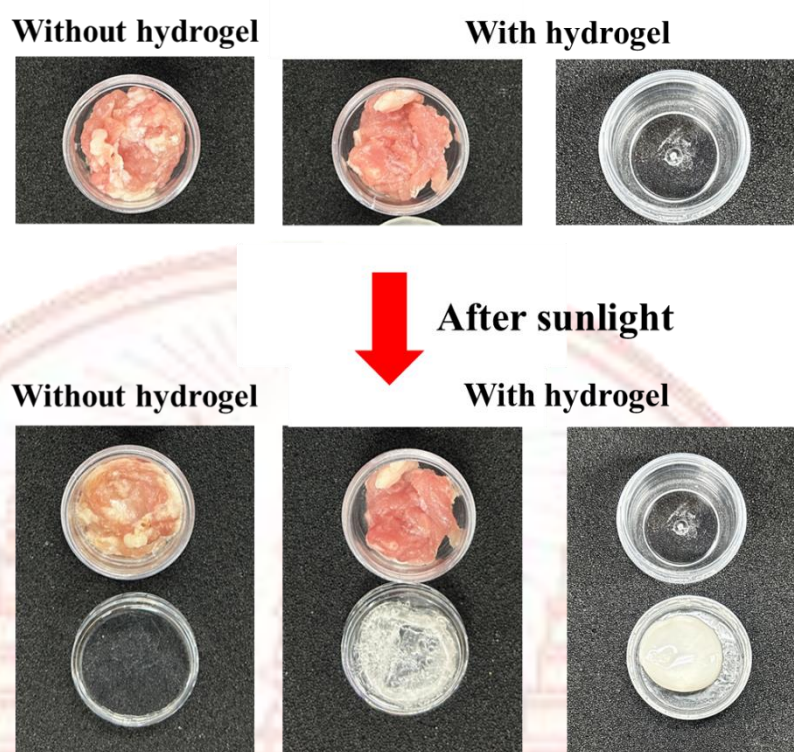
ภาพที่ 4-15 การนำไปใช้งานจริงของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ของเนื้อหมู และผักชี

เมื่อทดสอบกับเนื้อไก่ ผักบุ้ง และต้นหอม ดังภาพที่ 4-16 แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v มีศักยภาพในการรักษาความสดของอาหารหลากหลายชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชะลอการเสื่อมสภาพของอาหารทั้งในแง่ของความสดใหม่ สี และกลิ่น ซึ่งบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ในการนำนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารที่ยั่งยืนและปลอดภัยสามารถ ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างกว้างขวาง



ภาพที่ 4-16 การนำไปใช้งานจริงของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ของเนื้อไก่ ผักบุ้ง และต้นหอม

จากนั้นได้ทำการทดสอบฟากกล่องอาหารนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v อีกครั้ง โดยหลังจากการทดสอบไปแล้ว 2 ครั้ง ได้นำฟากกล่องอาหารนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v เก็บรักษาไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือน แล้วจึงนำออกมาทดสอบกับอาหารอีกครั้ง พบว่าฟากกล่องอาหารนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v ยังคงประสิทธิภาพเดิมสามารถรักษาความสดของเนื้อหมูไว้ได้เช่นเดิม ดังภาพที่ 4-17 แสดงให้เห็นถึงข้อดีหลายประการ เช่น ความคงทนสามารถใช้งานซ้ำได้หลายครั้งโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการรักษาความสดของอาหาร ศักยภาพในการใช้งานจริงสนับสนุนการนำนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในเชิงพาณิชย์ได้จริง เนื่องจากสามารถลดการสูญเสียอาหารและยืดอายุการเก็บรักษาได้



ภาพที่ 4-17 การนำไปใช้งานซ้ำของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% ของเนื้อหมู

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจากเศษไม้ยางพาราที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสต่างกัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลในตัวอย่างไม้ยางพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส ซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างของเซลลูโลส นอกจากนี้ ยังพบกลุ่ม isopropyl และหมู่เอไมด์ใน PNIPAm สารตั้งต้นของไฮโดรเจล
- 2) จากการวิเคราะห์ XRD พบว่าทั้งไม้ยางพารา เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส มีเฟสหลักเป็นเซลลูโลส การปรับสภาพไม้ยางพาราทำให้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเอมิเซลลูโลสและลิกนินถูกกำจัดออกไป ทำให้ฟีดของเซลลูโลสเด่นชัดมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบเฟสของแคลเซียมออกซาเลต ซึ่งเป็นสารประกอบที่พบได้ตามธรรมชาติในเนื้อไม้
- 3) ผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ESEM) พบว่านาโนเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วย TEMPO นาน 6 ชั่วโมง มีเส้นใยขนาดนาโนและกระจายตัวได้ดี
- 4) ผลการศึกษาโครงสร้างของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พบว่า
 - นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0% w/v มีรูพรุนจำนวนมาก ทำให้ดูดซับน้ำได้ดีที่สุด แต่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด โดยมีค่ามอดูลัสเพียง 61.86 kPa ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีอัตราการส่องผ่านสูงสุดที่ 93.02% แสดงลักษณะสีใส สามารถมองผ่านได้
 - นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.05% w/v จำนวนรูพรุนลดลงเล็กน้อย ทำให้ดูดซับน้ำได้น้อยลง แต่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามอดูลัส 154.77 kPa และอัตราการส่องผ่าน 92.87% แสดงลักษณะสีใส สามารถมองผ่านได้
 - นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v จำนวนรูพรุนลดลงและขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้ดูดซับน้ำได้น้อยที่สุดในสามตัวอย่าง แต่มีความแข็งแรงมากที่สุด โดยมีค่ามอดูลัส 281.24 kPa และอัตราการส่องผ่านลดลงเหลือ 79.28% แสดงลักษณะสีใส สามารถมองผ่านได้

นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 35 องศาเซลเซียส นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลทุกชนิดมีอัตราการส่องผ่านลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ แสดงลักษณะสีขุ่นทึบ

5) ผลการวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน การเติมนาโนเซลลูโลส ในปริมาณ 0.10% w/v ลงในไฮโดรเจล ส่งผลให้โครงสร้างของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลมีความเป็น เนื้อเดียวกันมากขึ้น เพิ่มความเสถียร และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนเพียงจุดเดียว ซึ่งบ่งชี้ถึงความเป็นเอกภาพของโครงสร้างไฮโดรเจลที่มากขึ้น

6) ผลการทดสอบความเสถียรระยะยาว 50 รอบยืนยันว่าอัตราการส่องผ่านของนาโน เซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v ไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการรักษาอัตราการ ส่องผ่านที่คงที่ แม้จะผ่านการใช้งานซ้ำหลายครั้ง

7) นาโนเซลลูโลสไฮโดรเจล 0.10% w/v มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเคลือบ ฝากล่องอาหาร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและคงความสดของอาหาร เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sun และคณะ (2024) แต่มีการทดสอบกับอาหารที่หลากหลายกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ขยายขอบเขตการทดสอบไปยังอาหารชนิดอื่นๆ ที่มีความหลากหลาย เพื่อประเมิน ประสิทธิภาพของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลในสภาวะที่แตกต่างกัน

2) ศึกษาอายุการใช้งานของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่าง กัน เพื่อประเมินความเสถียรของวัสดุ

บรรณานุกรม

- Chen, C., Wang, Y., Wu, Q., Wan, Z., Li, D., & Jin, Y. (2020). Highly strong and flexible composite hydrogel reinforced by aligned wood cellulose skeleton via alkali treatment for muscle-like sensors. *Chemical Engineering Journal*, 400, 125876. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125876>
- Chen, L., Jiang, X., Sun, Y., Gan, D., Liu, W., Wu, Y., & Hao, X. (2023). Composite optimization and characterization of dietary fiber-based edible packaging film reinforced by nanocellulose from grapefruit peel pomace. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127655. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127655>
- Ciriminna, R., Angellotti, G., Luque, R., Formenti, M., Della Pina, C., & Pagliaro, M. (2024). Learning from hype en route to fulfill the industrial potential of nanocellulose. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 7, 100512. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100512>
- Deshmukh, A. S., Murgia, M., Nagaraj, N., Treebak, J. T., Cox, J., & Mann, M. (2015). Deep Proteomics of Mouse Skeletal Muscle Enables Quantitation of Protein Isoforms, Metabolic Pathways, and Transcription Factors*, [S]. *Molecular & Cellular Proteomics*, 14(4), 841-853. doi:<https://doi.org/10.1074/mcp.M114.044222>
- Dufresne, A. (2013). Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. *Materials Today*, 16(6), 220-227. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.06.004>
- Espinosa, E., Sánchez, R., Otero, R., Domínguez-Robles, J., & Rodríguez, A. (2017). A comparative study of the suitability of different cereal straws for lignocellulose nanofibers isolation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 103, 990-999. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.156>
- French, A. D. (2017). Glucose, not cellobiose, is the repeating unit of cellulose and why that is important. *Cellulose*, 24(11), 4605-4609. doi:10.1007/s10570-017-1450-3
- Fuciños, C., Fuciños, P., Míguez, M., Katime, I. A., Pastrana, L. M., & Rúa, M. L. (2014). Temperature- and pH-Sensitive Nanohydrogels of Poly(N-Isopropylacrylamide) for Food Packaging Applications: Modelling the Swelling-Collapse Behaviour.

PLoS ONE, 9.

- Hassan, S. H., Velayutham, T. S., Chen, Y. W., & Lee, H. V. (2021). TEMPO-oxidized nanocellulose films derived from coconut residues: Physicochemical, mechanical and electrical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 180, 392-402. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.066>
- Hoare, T. R., & Kohane, D. S. (2008). Hydrogels in drug delivery: Progress and challenges. *Polymer*, 49(8), 1993-2007. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.01.027>
- Hossen, M. T., Kundu, C. K., Pranto, B. M. R. R., Rahi, M. S., Chanda, R., Mollick, S., . . . Begum, H. A. (2024). Synthesis, characterization, and cytotoxicity studies of nanocellulose extracted from okra (*Abelmoschus Esculentus*) fiber. *Heliyon*, 10(3), e25270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25270>
- Johar, N., Ahmad, I., & Dufresne, A. (2012). Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 93-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.016>
- Kawalerczyk, J., Dziurka, D., Dukarska, D., Woźniak, M., Walkiewicz, J., & Mirski, R. (2024). The effect of urea-formaldehyde adhesive modification with diisocyanate-functionalized nanocellulose on the properties of particleboard. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 135, 103850. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103850>
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358-3393. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.200460587>
- Nogi, M., & Yano, H. (2008). Transparent Nanocomposites Based on Cellulose Produced by Bacteria Offer Potential Innovation in the Electronics Device Industry. *Advanced Materials*, 20(10), 1849-1852. doi:<https://doi.org/10.1002/adma.200702559>
- Onkarappa, H. S., Prakash, G. K., Pujar, G. H., Rajith Kumar, C. R., Latha, M. S., & Betageri, V. S. (2020). Hevea brasiliensis mediated synthesis of nanocellulose: Effect of preparation methods on morphology and properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 160, 1021-1028.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.188>

Ou, Z., Zhou, Q., Rao, X., Yang, H., Huo, C., & Du, X. (2021). Cellulose Isolated From Waste Rubber Wood and Its Application in PLA Based Composite Films. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. doi:10.3389/fbioe.2021.666399

Qiu, Y., & Park, K. (2001). Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 53(3), 321-339. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(01\)00203-4](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(01)00203-4)

Sun, L., Sun, D.-W., Xu, L., Tian, Y., & Zhu, Z. (2024). Tunable thermoresponsive hydrogels for temperature regulation and warning in fruit and vegetables preservation. *Food Chemistry*, 456, 139962. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139962>

Tian, J., Gu, J., Peng, H., Wang, H., Du, Z., Cheng, X., & Du, X. (2021). Sunlight-driven photo-thermochromic hybrid hydrogel with fast responsiveness and durability for energy efficient smart windows. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 149, 106538. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106538>

Wang, H., Du, H., Liu, K., Liu, H., Xu, T., Zhang, S., . . . Si, C. (2021). Sustainable preparation of bifunctional cellulose nanocrystals via mixed H₂SO₄/formic acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 266, 118107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118107>

Wu, M., Shi, Y., Li, R., & Wang, P. (2018). Spectrally Selective Smart Window with High Near-Infrared Light Shielding and Controllable Visible Light Transmittance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(46), 39819-39827. doi:10.1021/acsami.8b15574

Xu, Z., Wang, S., Hu, X.-Y., Jiang, J., Sun, X., & Wang, L. (2018). Sunlight-Induced Photo-Thermochromic Supramolecular Nanocomposite Hydrogel Film for Energy-Saving Smart Window. *Solar RRL*, 2(11), 1800204. doi:<https://doi.org/10.1002/solr.201800204>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นภาพรณ อินอ่อน

ชื่อวิทยานิพนธ์

การตอบสนองต่ออุณหภูมิของนาโนเซลลูโลสไฮโดรเจลจากเศษไม้ยางพารา

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

ประวัติ

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2565 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาการกระบวนการ
อุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตีพิมพ์วารสาร

นภาพรณ อินอ่อน (2567) "ลักษณะเฉพาะนาโนเซลลูโลสจากเศษไม้
ยางพาราด้วยกระบวนการทางเคมี" วารสารการประชุมวิชาการระดับชาติ
เทคโนโลยีเชิงสร้างสรรค์ ราชชมงคลกรุงเทพ วิชาการ 2567 ครั้งที่ 9

