การพัฒนาสเปรย์ดักจับฝุ่นขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตรจากสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลส

นางสาวเบญญาภา เขียวมณีย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การพัฒนาสเปรย์ดักจับฝุ่นขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตรจากสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลส

นางสาวเบญญาภา เขียวมณีย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ใบรับรองโครงร่างวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การพัฒนาสเปรย์ดักจับฝุ่นขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตรจากสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลส

โดย นางสาวเบญญาภา เขียวมณีย์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.คเณศ วงษ์ระวี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวารักษ์ ปานกลาง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิกานต์ ซ่อนกลิ่น)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร รัตนะ)

ชื่อ : นางสาวเบญญาภา เขียวมณีย์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การพัฒนาสเปรย์ดักจับฝุ่นขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร จากสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลส
สาขาวิชา : เคมีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวารักษ์ ปานกลาง
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

อนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก วัดค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index; AQI) ได้ในระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอยู่เสมอ ในงานวิจัยนี้ จึงเสนอแนวคิดในการลดปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ ในระดับชุมชนหรือพื้นที่กว้างด้วยสเปรย์จากสารแขวนของผลึกผลึกนาโนเซลลูโลส (BCNC) ที่สกัดจากวุ้นมะพร้าวโดยใช้วิธีการแยกสลายด้วยกรดซัลฟิวริก ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของ BCNC ด้วยเทคนิคเอฟที-ไออาร์สเปกโทรสโกปีพบว่า ผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้มีหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายคลึงกับเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ตรวจสอบลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและการหาขนาดอนุภาคด้วยการกระเจิงแสงพบว่า ผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้มีสัณฐานวิทยารูปทรงคล้ายเข็ม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค 10–100 nm มีความยาวประมาณ 200–400 nm ค่าศักย์ซีต้าของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้เท่ากับ −56.41 mV เมื่อทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าค่าดัชนีความเป็นผลึกของ BCNC มีค่าเท่ากับ 73.9% การหาปริมาณประจุลบบนพื้นผิวของผลึก BCNC เปรียบเทียบกับผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) ในรูปแบบหมู่ซัลเฟตมีค่าเท่ากับ 87.72 ± 14.32 และ 252.3 ± 49.7 mmol/kg เซลลูโลส ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นของสเปรย์สารแขวนลอย BCNC เปรียบเทียบกับ CelluForce พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันที่ 86.5–91.0% สามารถใช้ผลึกนาโนเซลลูโลสจากอุตสาหกรรมในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ทดแทนได้ ที่ความเข้มข้น 1.0–2.0% (w/v) ของ CelluForce ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ใกล้เคียงกันที่ 91.6–93.1% ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ละอองน้ำเพียงอย่างเดียวถึง 23.2%

(มีจำนวนทั้งสิ้น 53 หน้า)

คำสำคัญ : ผลึกนาโนเซลลูโลส, ฝุ่น, $PM_{2.5}$, วุ้นมะพร้าว

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Miss Benyapha Kheawmanee
Thesis Title : Development of Colloidal Cellulose Nanocrystal Suspension as a Sprayable $PM_{2.5}$ Remover
Major Field : Industrial Chemistry
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Tewaruk Parnklang, Ph.D.
Academic Year : 2024

ABSTRACT

$PM_{2.5}$ dust particles, with diameters no larger than 2.5 micrometers, significantly impact human health and daily life. The Air Quality Index (AQI) frequently reaches levels harmful to health. This research proposes a method to mitigate $PM_{2.5}$ dust problems at the community level or across broader areas using a spray derived from a suspension of bacterial cellulose nanocrystals (BCNC) extracted from coconut jelly via the sulfuric acid decomposition method. The characteristics of BCNC were analyzed using FT-IR spectroscopy, revealing functional groups similar to those of pure cellulose used as a precursor. Transmission electron microscopy and particle size analysis by light scattering showed that the extracted nanocellulose crystals had a needle-like morphology, with particle diameters ranging from 10 to 100 nm and lengths of approximately 200 to 400 nm. The zeta potential of BCNC obtained was −56.41 mV. X-ray diffraction analysis indicated that the crystallinity index of BCNC was 73.9%. The surface charge of BCNC, compared to industrial nanocellulose crystals (CelluForce) in sulfate group form, was quantified at 87.72 ± 14.32 mmol/kg cellulose and 252.3 ± 49.7 mmol/kg cellulose, respectively. The $PM_{2.5}$ removal efficiency of the BCNC suspension spray, tested using a custom-designed device, showed comparable results to CelluForce, with efficiencies ranging from 86.5%–91.0%. Industrial cellulose nanocrystals were also found to be effective for $PM_{2.5}$ removal. At concentrations of 1.0–2.0% (w/v),

CelluForce achieved $PM_{2.5}$ removal efficiencies of 91.6–93.1%, which is 23.2% higher than that achieved by water droplets.

(Total 53 Pages)

Keywords: Cellulose nanocrystals, $PM_{2.5}$, Nata de coco

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนจาก ผศ.ดร. เทวารักษ์ ปานกลาง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะ รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนสถานที่ทดลอง อุปกรณ์การทดลอง สารเคมี และเครื่องมือวิเคราะห์จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร และอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนการให้บริการเครื่องปั่นเหวี่ยงจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวและทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนตลอดมาจนสำเร็จศึกษา

เบญญาภา เขียวมณีย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ซ

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ฎ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.5 สถานที่ทำวิจัย 3

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 Particulate Matter (PM) 4

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ 5

2.3 Cellulose 12

2.4 นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) 14

2.5 ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด (Acid Hydrolysis) 15

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลส 16

2.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของนาโนเซลลูโลส 19

2.8 ความปลอดภัยของนาโนเซลลูโลส 23

วิธีดำเนินการวิจัย 25

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี 25
3.2 เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเครื่องมือวิเคราะห์ 25
3.3 วิธีการทดลอง 26
3.3.1 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก 26
3.3.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M 26
3.3.3 การเตรียมผลึกนาโนเซลลูโลส 26
3.3.4 การทำให้ผลึกนาโนเซลลูโลสบริสุทธิ์ 27
3.3.5 การเตรียมผลึกนาโนเซลลูโลสในรูปแบบผง 27
3.3.6 การทดสอบลักษณะเฉพาะของผลึกนาโนเซลลูโลส 27
ผลการวิจัย 33
4.1 การสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลส 33
4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering 35
4.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) 37
4.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy 37
4.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) 39
4.6 การหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลส 40
4.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ของผลึกนาโนเซลลูโลส 42
บรรณานุกรม 47
ประวัติผู้เขียน 56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การทดสอบการกำจัดฝุ่น PM ต่าง ๆ ด้วยการพ่นละอองลอย	9
2.2 โครงสร้างของเซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรียสายพันธุ์ต่าง ๆ	14
2.3 ชนิดของนาโนเซลลูโลสและสมบัติทางกายภาพ	14
2.4 การสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด	18
2.5 หมู่ฟังก์ชันของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ตรวจสอบได้จากเทคนิค FT-IR Spectroscopy	20
4.1 การอุณหภูมิของปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลส	34
4.2 ขนาดอนุภาค, Polydispersity Index, ค่า Zeta Potentials และ Conductivity ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้และผลึกที่ได้จากอุตสาหกรรม	36
4.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นกับแบคทีเรียเซลลูโลสเริ่มต้นและผลิตภัณฑ์ผลึกนาโนเซลลูโลสจากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด	39
4.4 มุมหักเห ค่าความเข้มของพีค ณ มุมหักเห ค่าดัชนีความเป็นผลึกของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสและผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากทางการค้า	40

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1 การเปรียบเทียบขนาดของ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} กับขนาดของเส้นผมมนุษย์ประมาณ 50–70 ไมโครเมตร และเม็ดทรายทะเลที่มีขนาดประมาณ 90 ไมโครเมตร 4

2.2 ภาพ SEM ของเส้นใย PAN, PVP, PS, PVA, และ PP (Before) ก่อนการกรอง และ (After) หลังการกรอง PM Scale Bar ของทุกรูป = 5 μm 6

2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด PM ระหว่างตัวกรอง PAN, PVP, PS, PVA, PP, คาร์บอนและทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน Error Bar แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดซ้ำสามครั้ง 6

2.4 แสดงองค์ประกอบของอนุภาค PM ที่มีหมู่ฟังก์ชันไม่มีขั้วอยู่บริเวณแกนกลาง (C–C, C–H และ C=C) และหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว (C=O, C–O และ C–N) อยู่บริเวณพื้นผิว 6

2.5 ประสิทธิภาพการกรอง $PM_{2.5}$ ที่ได้จากเมมเบรน (PVA/GA/CNC) 7

2.6 ภาพ SEM ของตัวกรอง PVA/CNC-20-2 (a) ก่อนและ (b) หลังการจับอนุภาค PVA/CNC-20-2 แสดงถึงตัวกรองที่สร้างขึ้นโดยสารแขวนลอยของ PVA/CNC พร้อมด้วย CNC 20% และเวลา อิเล็กโทรสปินนิ่งคือ 2 นาที 8

2.7 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นโดยการฉีดพ่นโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 8

2.8 กลไกของการกำจัดอนุภาคฝุ่นด้วยละอองน้ำ 11

2.9 แผนผังการตั้งค่าการทดลองสำหรับการควบคุมหยดน้ำและการวัดความเข้มข้นของอนุภาคในห้องปิด (a) โมดูล Ultrasonic Atomizer ทำงานที่ความถี่ 1.7 MHz ด้วยกำลังไฟ 15 W (b) ไมโคร พินโฮลที่ใช้ในการทดลองนี้ รูเข็มถูกรวมเข้ากับโมดูลเครื่องฉีดน้ำอัลตราโซนิกโดยตรง และ (c) ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบความเข้มข้นของ PM ระบบการแสดงภาพประกอบด้วยเลเซอร์ไฟเบอร์แบบต่อเนื่อง (CW Laser), เลนส์ออปติคัล, กล้องความเร็วสูงและระบบเก็บข้อมูลสำหรับการจัดเก็บและประมวลผลภาพ ฝุ่นแอริโซนาถูกใช้เป็นอนุภาค PM 12

2.10 ภาพแสดงขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสในหน่วยต่าง ๆ 13

2.11 SEM Micrograph ของแบคทีเรียเซลลูโลส (A) และ (B), และโครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลส (C) 13
2.12 ลักษณะเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสหลังจากแยกสลายด้วยกรด 15
2.13 แสดงตัวอย่างบางส่วนของ Functional Groups ที่ผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการแยกสลายด้วยกรดชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (A), กรดไฮโดรคลอริกหรือกรดไฮโดรโบรมิก (B), กรดฟอสฟอริก (C), กรดซัลฟิวริกแล้วตามด้วย Surface Cationization และกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดไฮโดรโบรมิกตามด้วย TEMPO-oxidation (D) 16
2.14 กระบวนการสกัดแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส 17
2.15 FT-IR Spectra ของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าว (BC), ผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสสกัดโดยวิธี Acid Hydrolysis ด้วยกรดซัลฟิวริก (BCNC-1) และสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (BCNC-3/HCl) 19
2.16 TEM Micrographs ของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการย่อยสลายด้วยกรด ผลึกที่พบมีรูปร่างคล้ายเข็มหรือรูปแท่ง 20
2.17 XRD Patterns ของเส้นใยแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส (F) และผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส หลัง HCl Hydrolysis 21
2.18 การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส 22
2.19 กราฟการไทเทรตด้วยวิธีการนำไฟฟ้าของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 23
3.1 การไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส 30
3.2 แผนผังระบบการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วยผลึกนาโน เซลลูโลส 31
4.1 กลไกระดับโมเลกุลของกระบวนการย่อยสลายด้วยกรดซัลฟิวริก 35
4.2 ขนาดผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 50°C (A), 60°C (B) และ 70°C (C) 36
4.3 TEM Micrographs ของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากวุ้นมะพร้าว (A) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (B) 37

4.4 FT-IR Spectra ของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าว (BC) และผลึกนาโนเซลลูโลส (BCNC) ที่สังเคราะห์ได้จากวุ้นมะพร้าว 38

4.5 X-ray Diffraction Patterns ของวุ้นมะพร้าว (BC) (A) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากวุ้นมะพร้าว (BCNC) (B) และผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) (C) 39

4.6 การไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (A) และการหาจุดสมมูล (B) และ การหาจุดสมมูลของผลึกนาโนเซลลูโลสจากอุตสาหกรรม (C) 41

4.7 กราฟแสดงเวลาในการทดสอบระยะเวลาในการกักเก็บฝุ่น $PM_{2.5}$ จากควันธูปที่ 90, 105 และ 120 วินาที (A) และกราฟอนุพันธ์ของผลการทดสอบระยะเวลาในการกักเก็บฝุ่น (B) 43

4.8 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ เปรียบเทียบระหว่างน้ำกลั่น (DI Water) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ (BCNC) และผลึกนาโนเซลลูโลสจากอุตสาหกรรม (CelluForce) (A) และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่วัดได้ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส (B) 43

4.9 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ เปรียบเทียบระหว่างน้ำกลั่น (DI Water) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (A) และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่วัดได้ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้น
ต่าง ๆ (B) 44

4.10 กราฟการกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคจากการพ่นละอองของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ (A) และน้ำกลั่น (C) และไมโครกราฟการกระเจิงแสงด้วยแสงเลเซอร์ที่สเกลบาร์ = 1 mm ของละอองสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส (B) และละอองน้ำกลั่น (D) 45

4.11 ภาพ FE-SEM ของอนุภาคฝุ่นที่ได้จากควันธูป (A,B) และอนุภาคฝุ่นหลังจากการฉีดพ่นสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส CelluForce (C–F) และสารแขวนลอย BCNC (G,H) ที่เวลาต่างกัน

4.12 กลไกการกำจัด $PM_{2.5}$ โดยใช้สารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส 46

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยประสบปัญหากับฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่มีอัตราเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปี จนได้รับการยกระดับให้เป็นวาระแห่งชาติ นับว่าเป็นระยะเวลาที่นานจนก่อให้เกิดผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ทั้งกิจกรรมในร่มและกลางแจ้ง รวมไปถึงผลกระทบทางด้านร่างกายที่มาจากการสัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ สะสม อนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ คือฝุ่นละอองขนาดเล็กขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ กระแสเลือดและอวัยวะต่าง ๆ ได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นตัวนำพาสารพิษอื่นเข้ามาด้วย เช่น ปรอท แคดเมียม โลหะหนักและสารก่อมะเร็ง [1] ส่งผลให้เกิดการระคายเคืองตา คอ ทำให้แน่นหน้าอกและอาจก่อให้เกิดโรคทางเดินหายใจต่าง ๆ เช่น โรคหอบหืด โรคมะเร็งปอด โรคปอดอักเสบ เยื่อบุผนังหลอดลมบวม เป็นต้น [2] มีการรายงานเกี่ยวกับการเสียชีวิตของคนไทยจากฝุ่น $PM_{2.5}$ สูงถึงประมาณ 70,000 คนต่อปี องค์การอนามัยโลกยังระบุอีกว่าประเทศไทยมีผู้เสียชีวิตจากการสัมผัส $PM_{2.5}$ สูงเป็น 4 เท่าของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุจราจรทางบก [3] เหตุที่ทำให้ฝุ่น $PM_{2.5}$ ยังคงส่งผลกระทบต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน คือ การมีแหล่งที่สร้างมลพิษทางอากาศที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เช่น การคมนาคมขนส่ง การก่อสร้าง การเผาชีวมวล เป็นต้น [4] ในกรุงเทพมหานครฝุ่น $PM_{2.5}$ เกิดจากการคมนาคมและการก่อสร้างเป็นส่วนใหญ่ ในจังหวัดเชียงใหม่พบการเผาพื้นที่เกษตรกรรมหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ประเทศไทยประสบปัญหากับฝุ่น $PM_{2.5}$ และมีคุณภาพอากาศอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ กล่าวคือ ดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index, AQI) อยู่ในช่วง 100–200 [5] วิธีการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ในปัจจุบันมีอยู่อย่างจำกัดเฉพาะการใช้งานส่วนบุคคลหรือระดับครัวเรือนเท่านั้น เช่น การใช้หน้ากากอนามัยและเครื่องฟอกอากาศ แผ่นกรองอากาศ (Air Filter) ต้องมีการเปลี่ยนตามระยะเวลาการใช้งาน เนื่องจากความสามารถในการส่งผ่านอากาศจะลดลงตามระยะเวลาที่อนุภาคเข้าจับกับเส้นใยและอุดในช่องว่างของไส้กรอง ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองและสร้างขยะในปริมาณมาก การกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ในระดับพื้นที่ชุมชนนิยมการใช้ละอองน้ำในการกำจัดฝุ่น อย่างไรก็ตามการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอที่จะลดค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI ให้อยู่ในระดับไม่เป็นอันตรายได้ เนื่องจากต้องใช้น้ำปริมาณมากและละอองน้ำต้องมีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนจึงจะสามารถกำจัดฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6]

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ในอากาศด้วยวิธีการใช้ละอองน้ำที่เสริมประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยผลึกนาโนเซลลูโลสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีสมมติฐาน คือ เมื่อฉีดพ่นสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วย Nebulizer ผลึกนาโนเซลลูโลสจะช่วยให้ละอองน้ำมีขนาดอยู่ในระดับ Microdroplets ช่วยเป็นตัวกลางในการเกาะรวมตัวของฝุ่น $PM_{2.5}$ ให้มีขนาด

ใหญ่มากพอและตกลงสู่พื้นด้วยแรงโน้มถ่วง และอีกสมมติฐานมาจากสมบัติของผลึกนาโนเซลลูโลสที่มีประจุลบอยู่บนพื้นผิวในรูปแบบของหมู่ Sulfate Half-Ester หลังจากผ่านการแยกสลายด้วยกรด (Acid Hydrolysis) จะสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของฝุ่น $PM_{2.5}$ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว [7] ส่งเสริมให้เกิดการเหนี่ยวนำอนุภาคฝุ่นมาเกาะที่ตัวผลึกและก่อให้เกิดการรวมตัวกันของฝุ่น $PM_{2.5}$ เป็นอนุภาคขนาดใหญ่และตกลงสู่พื้นด้วยแรงโน้มถ่วง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการสกัดผลึกนาโนเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าว (Nata De Coco) ด้วยวิธีการทางเคมี
2. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ–เคมีของผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้จากวุ้นมะพร้าว
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ผลึกนาโนเซลลูโลส เมื่อใช้ในรูปแบบของละอองลอย (Aerosolized Suspensions)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. สกัดผลึกนาโนเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าวด้วยวิธีการแยกสลายด้วยกรดซัลฟิวริก
2. วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลึกนาโนเซลลูโลส เช่น สัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ
3. สารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสจะใช้ตัวกลางที่เป็นน้ำ
4. ศึกษาความสามารถในการดักจับฝุ่นของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้น
5. ศึกษาตัวแปรของการทดลองที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ของผลึกนาโนเซลลูโลสในรูปแบบละอองลอย ได้แก่ ความเข้มข้นของผลึกนาโนเซลลูโลส สมบัติทางสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงพื้นผิว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้ผลึกนาโนเซลลูโลสในรูปแบบสเปรย์เป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่กว้างได้
2. สเปรย์ของสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลสช่วยลดผลกระทบที่เป็นอันตรายของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในอากาศ เพิ่มคุณภาพและความปลอดภัยอากาศ เป็นส่วนหนึ่งในการสร้างเมืองและชุมชนที่ยั่งยืนตามเป้าหมายของการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals) ข้อที่ 11

3. สามารถลดระยะเวลาและลดปริมาณการใช้น้ำในการทำให้ผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากกรดซัลฟิวริกมีความบริสุทธิ์ เพื่อรองรับต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและการใช้งานในเชิงสาธารณะได้

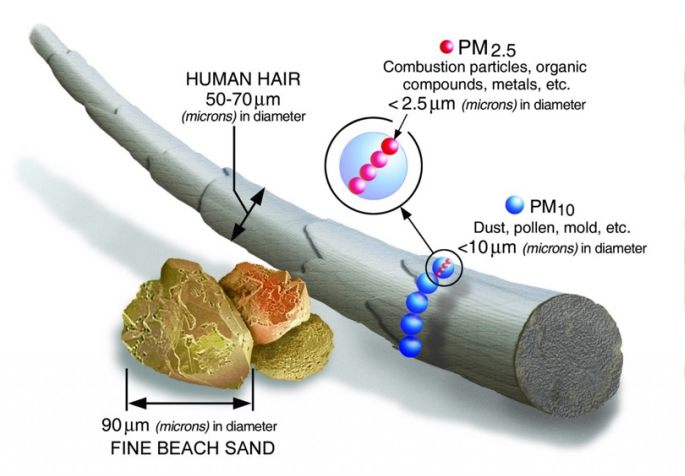
1.5 สถานที่ทำวิจัย

ห้อง 825 ชั้น 8 ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม ตึก 78 คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Particulate Matter (PM)

PM ย่อมาจาก Particulate Matter คือ สารผสมของอนุภาคของแข็งและหยดน้ำที่พบในอากาศ องค์ประกอบของ PM ในส่วนที่เป็นอนุภาคของแข็ง ได้แก่ ธาตุ สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ ซิลิเกต (SiO_2) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรต (NO^{3-}) และโลหะ ขนาดของฝุ่น PM ที่พบส่วนใหญ่คือมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมโครเมตร เรียกว่า PM_{10} ถ้ามีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 ไมโครเมตรจะเรียกว่า $PM_{2.5}$ [8]



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบขนาดของ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} กับขนาดของเส้นผมมนุษย์ประมาณ 50–70 ไมโครเมตร และเม็ดทรายทะเลที่มีขนาดประมาณ 90 ไมโครเมตร [9]

PM อาจจำแนกได้ตามแหล่งกำเนิด ได้แก่ ฝุ่นที่มาจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น ฝุ่นดิน ทราย และฝุ่นละอองซึ่งเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น การรวมตัวด้วยแรงทางกายภาพ ปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemical Reaction) และฝุ่นที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ไฟป่า ควันดำจากท่อไอเสียรถยนต์ และฝุ่นจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีชื่อเรียกต่างกันไปตามลักษณะการรวมตัวของอนุภาคฝุ่นเช่น ควัน (Smoke), ฟูม (fume) และหมอกน้ำค้าง (mist) ฝุ่นละอองบริเวณที่พักอาศัยที่อยู่ใกล้กับถนน 70–90% พบว่าปนเปื้อนด้วยสารตะกั่ว และเมื่อแยกตามขนาดพบว่า 60% โดยประมาณจะเป็นฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน หรือ $PM_{2.5}$ ฝุ่น $PM_{2.5}$ มีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและถุงลมปอดของมนุษย์ ส่งผลให้เกิดโรคทางเดินหายใจ

โรคปอดต่าง ๆ เกิดการระคายเคือง และทำลายเยื่อหุ้มปอด [8] นอกจากนี้ $PM_{2.5}$ อาจแขวนลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานานในระดับปีอีกด้วย

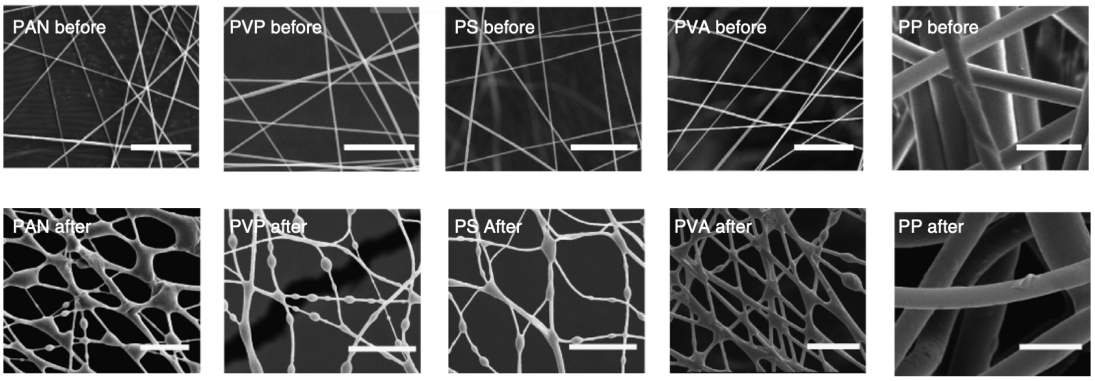
มีการรายงานว่า เมื่อหลายปีที่ผ่านมามีการพัฒนาเมืองอย่างรวดเร็ว มลพิษทางอากาศจึงแย่ลง และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์มากขึ้น โดยทั่วไปอนุภาคละเอียดที่พบมักมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 ไมโครเมตร เรียกว่า $PM_{2.5}$ ไปจนถึง 10 ไมโครเมตร จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์ทางระบาดวิทยาด้านความสำคัญระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับการเจ็บป่วยของระบบทางเดินหายใจมนุษย์ แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะนำไปสู่ความเจ็บป่วยและการเสียชีวิตที่เพิ่มขึ้นโดยตรงในประเทศในยุโรป [10] $PM_{2.5}$ สามารถลดอายุขัยเฉลี่ยได้ถึง 8.6 เดือน พบอัตราการเสียชีวิตเนื่องจากระบบทางเดินหายใจเพิ่มขึ้น 0.58% ทุก ๆ การเพิ่มขึ้น 10 $\mu g/cm^3$ ของ PM_{10} และอัตราการรักษาในโรงพยาบาลเพิ่มขึ้นถึง 8% ทุก ๆ การเพิ่มขึ้น 10 $\mu g/cm^3$ ของ $PM_{2.5}$ โดยกลไกความเสียหายของ $PM_{2.5}$ ที่มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น การได้รับผลกระทบจากอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบอินทรีย์ของ $PM_{2.5}$ นอกจากนี้พื้นผิว $PM_{2.5}$ ยังประกอบไปด้วยธาตุเหล็ก ทองแดง สังกะสีและแมงกานีส และองค์ประกอบอื่น ๆ สามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระในปอดเป็นสาเหตุการก่อมะเร็งได้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$

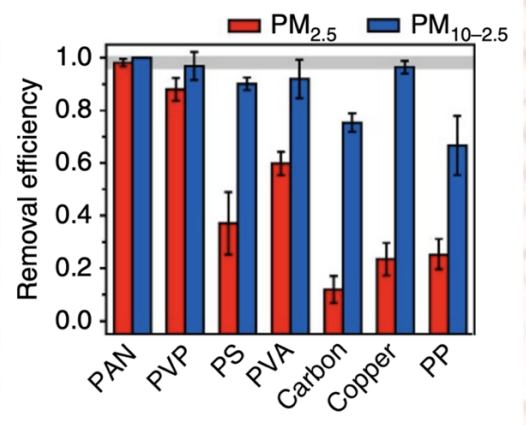
การกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่เกิดขึ้นทั้งภายในและนอกอาคาร มีวิธีที่แตกต่างกันออกไป โดยภายในอาคารมักนิยมใช้เครื่องฟอกอากาศหรือระบบปรับอากาศที่ติดตั้งตัวกรองที่มีรูพรุน สามารถลดความเข้มข้นของอนุภาคได้ เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากการอุดตันของรูพรุนแผ่นกรอง อาจต้องมีการเปลี่ยนทดแทน และการกำจัดฝุ่นภายนอกอาคารหรือพื้นที่กว้าง มักใช้การฉีดพ่นละอองน้ำด้วยแรงดันสูง หรือ เติมสารลดแรงตึงผิวเข้าไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ เช่น

Chong Liu และคณะ [7] ศึกษาเรื่องการดักจับฝุ่นระหว่างแผ่นกรองอากาศกับฝุ่น $PM_{2.5}$ และ PM_{10} โดยใช้หลักการที่ว่า แผ่นกรองอากาศจากพอลิเมอร์ต่างชนิดกันขึ้นอยู่กับความมีขั้วของหมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ ได้แก่ Polyacrylonitrile (PAN), Polyvinylpyrrolidone (PVP), Polystyrene (PS), Polyvinyl alcohol (PVA) และ Polypropylene (PP) ซึ่งมีค่า Dipole moment เป็น 3.6, 2.3, 0.7, 1.2 และ 0.6 D ตามลำดับ รูปที่ 2.2 รูปจากเทคนิค SEM ของแผ่นกรองพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ หลังจากกรองแสดงให้เห็นว่าปริมาณ PM ที่เกาะอยู่บนแผ่นกรอง PAN มีมากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ โดยประสิทธิภาพในการกำจัด PM เพิ่มขึ้นตามค่า Dipole moment ของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น PM ได้ดีที่สุดคือ PAN มีประสิทธิภาพสูงถึง 95% ดังรูปที่ 2.3 PAN ที่มีค่า Dipole moment ที่สูง เมื่อสัมผัส PM ที่มี

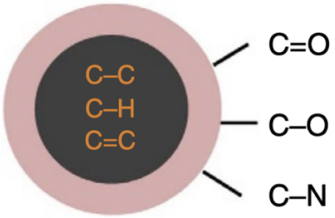
หมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น C-O, C=O และ C-N อยู่ที่ผิวด้านนนอกของอนุภาค ดังรูปที่ 2.4 จึงสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับ PM ได้ดี



รูปที่ 2.2 ภาพ SEM ของเส้นใย PAN, PVP, PS, PVA, และ PP (Before) ก่อนการกรอง และ (After) หลังการกรอง PM Scale Bar ของทุกรูป = 5 μm [7]

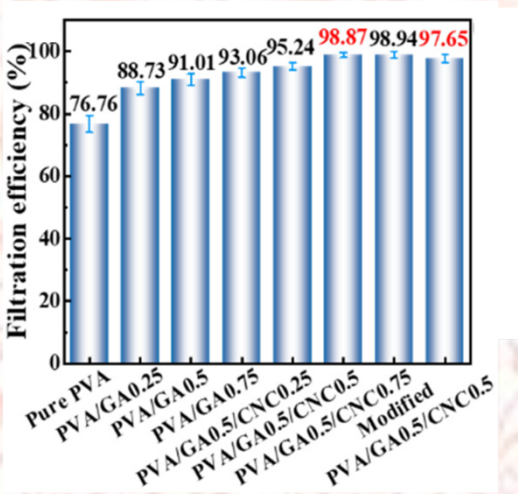


รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด PM ระหว่างตัวกรอง PAN, PVP, PS, PVA, PP, คาร์บอนและทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน Error Bar แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดซ้ำสามครั้ง [7]



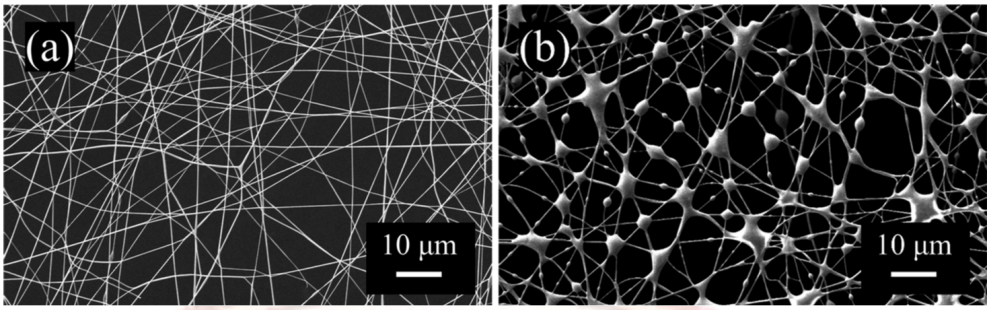
รูปที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของอนุภาค PM ที่มีหมู่ฟังก์ชันไม่มีขั้วอยู่บริเวณแกนกลาง (C-C, C-H และ C=C) และหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว (C=O, C-O และ C-N) อยู่บริเวณพื้นผิว [7]

Yang และคณะ [11] สร้างเมมเบรนกรองอากาศ โดยใช้การผสมระหว่างโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เจลาติน (GA) และผลึกนาโนเซลลูโลส (CNC) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง (Electrospinning) เพื่อสร้างโครงสร้างเมมเบรนแบบสามมิติ และปรับปรุงผิวให้กันน้ำด้วยการเคลือบ MTMS เมมเบรนที่สร้างขึ้น (PVA/GA/CNC) สามารถกรองฝุ่น $PM_{2.5}$ ได้สูงถึง 97.65% ดังรูปที่ 2.5 โดยมีกลไกโครงข่ายสามมิติที่มีรูพรุนขนาดเล็กสามารถกรองอนุภาคได้ และเสริมด้วย CNC ที่มีประจุลบจากหมู่ $-HSO_3$ ที่ได้มาจากกระบวนการผลิต และมีศักย์ซีต้าเป็นลบอยู่ที่ −38 mV มีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต ช่วยดึงดูดอนุภาค $PM_{2.5}$ ที่มีประจุบวกไว้ได้ เมมเบรนที่สร้างขึ้นจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคฝุ่น



รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพการกรอง $PM_{2.5}$ ที่ได้จากเมมเบรน (PVA/GA/CNC)

Zhang และคณะ [12] ผลิตตัวกรองเส้นใยนาโนคอมโพสิตไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และผลึกนาโนเซลลูโลส (CNC) โดยใช้อิเล็กโทรสปินนิ่ง (Electrospinning) เพื่อให้มีศักยภาพสูงในการใช้งานกรองอากาศภายในอาคาร โดย CNC จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของสารละลายที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลง ช่วยลดแรงดันตก (Pressure Drop) และเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด PM หลังจากทดสอบการจับอนุภาคของตัวกรอง PVA/CNC ยืนยันด้วยภาพถ่าย SEM (รูปที่ 2.6) โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด $PM_{2.5}$ สูงถึง 99.1% ภายใต้ภาวะมลพิษสูง (>500 $\mu g/m^3$) ที่แรงดันตกต่ำ (91 Pa) ด้วยความเร็วลม 0.2 m/s



รูปที่ 2.6 ภาพ SEM ของตัวกรอง PVA/CNC-20-2 (a) ก่อนและ (b) หลังการจับอนุภาค PVA/CNC-20-2 แสดงถึงตัวกรองที่สร้างขึ้นโดยสารแขวนลอยของ PVA/CNC พร้อมด้วย CNC 20% และเวลาอิเล็กโทรสปินนิ่งคือ 2 นาที

Borowski และคณะ [13] ทดสอบการลดปริมาณฝุ่น PM_{10} จากอุตสาหกรรมเหมืองถ่านหินโดยการฉีดพ่นโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethylcellulose) ที่ปริมาณต่างกันเป็น 0.05%, 0.1%, 0.2% และ 0.4% การทดสอบประสิทธิภาพจากการนำผงถ่านหินแห้งมากระจายตัวในลักษณะสี่เหลี่ยมขนาด 250×250 มิลลิเมตรตรงกลางของอุปกรณ์ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบประกอบไปด้วยกล่องโปร่งใสปิดผนึกขนาด 100×120×115 เซนติเมตร เครื่องเป่าลม และเครื่องวัดความเข้มข้นฝุ่น ดังรูปที่ 2.7 ทดสอบโดยปล่อยลมเข้าอุปกรณ์เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างถ่านหินวางกึ่งกลางของอุปกรณ์ ปล่อยลมสู่อุปกรณ์อีกครั้ง วัดผ่านรูตรงกลางของกล่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทดลองซ้ำ 5 ครั้ง มีการฉีดน้ำและสารละลายเพื่อกำจัดฝุ่น ผลการทดสอบพบว่า สารละลายที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 0.1% มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้สูงสุดที่ 99.19%

รูปที่ 2.7 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นโดยการฉีดพ่นโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [13]

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบลดปริมาณฝุ่นในระดับอุตสาหกรรม พบว่ามีการใช้สารที่ใช้ในการฉีดพ่นเพื่อกำจัดอนุภาคฝุ่นแตกต่างกันออกไป ตัวอย่างของงานวิจัยที่มีการกำจัดฝุ่น PM ด้วยวิธีการฉีดพ่นละอองลอยของน้ำและสารผสมของน้ำและสารลดแรงตึงผิว แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การทดสอบการกำจัดฝุ่น PM ต่าง ๆ ด้วยการพ่นละอองลอย

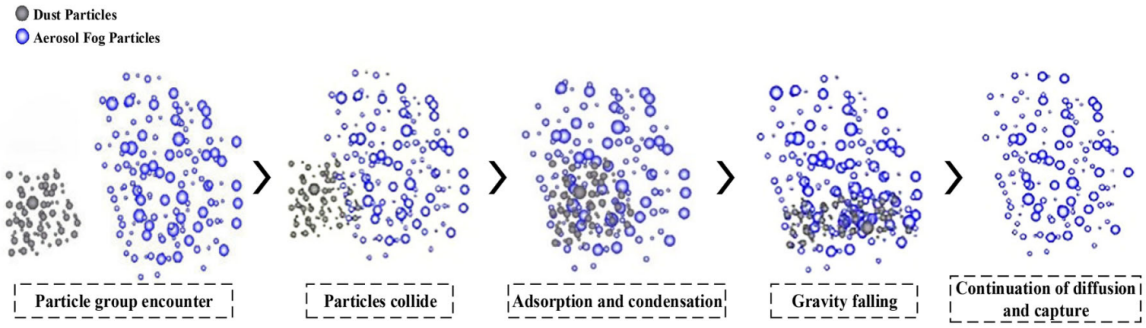
ลำดับที่	แหล่งที่มาของอนุภาคฝุ่น	วิธีการกำจัดอนุภาคฝุ่น	สารที่ใช้ในการกำจัด	ประสิทธิภาพในการกำจัด	อ้างอิง
1	ฝุ่นถ่านหิน (PM_{10})	ฉีดพ่นด้วยหัวฉีด spiral-apertured pressure ใช้แรงดัน 0.5–2.0 MPa	น้ำ	80.0–86.0%	[14]
2	ฝุ่นถ่านหิน (PM_{10})	ฉีดพ่นด้วยเซอร์โวเครนพอทัล (Portal-crane servo-spraying) ใช้แรงดัน 1 MPa	น้ำ 10 ตัน ขนาดหยดต่ำกว่า 10 μm	72.7–97.8%	[15]
3	ฝุ่นถ่านหิน	ฉีดพ่นด้วยหัวฉีดแบบน้ำวน และใช้แรงดัน 6 MPa	ไฮดรอกซีโพรพิลกัวกัม (hydroxypropyl guar gum) และสารลดแรงตึงผิว	65.52–84.08%	[16]
4	ฝุ่นถ่านหิน (PM_{10})	ฉีดพ่นภายใต้ภาวะที่มีแรงลม	โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (sodium carboxymethylcellulose)	99.19%	[13]
5	ฝุ่นแอริโซนา	สร้างละอองน้ำด้วยโมดูลอัลตราโซนิก	น้ำ ขนาดหยด 2 μm	56.2% ($PM_{2.5}$) 73.9% (PM_{10})	[6]

6	ธูป	สร้างละอองน้ำด้วย Ultrasound atomizer ขนาดไมโครเมตรและฉีดพ่นภายในห้องทดสอบแบบปิด	น้ำ ขนาดหยด 5 μm	1. $PM_{2.5}$ ถูกกำจัด 23.7% 2. กำจัด PM_{10}ได้เพิ่มขึ้น 39.8%	[17]
7	$PM_{2.5}$ และ PM_{10}	พ่นน้ำแรงดันสูงเกิดเป็นหมอกละอองน้ำขนาดเล็กด้วยสปริงเกอร์ภายใต้แรงลม	น้ำ ขนาดหยด 10–50 μm	76.9% ($PM_{2.5}$) 77.9% (PM_{10})	[18]
8	ถ่านหิน	ฉีดพ่นผ่านหัวฉีดไอพ่น โดยมีการดึงอากาศโดยรอบและสารเกิดฟองเข้าไปผสมก่อนฉีด	น้ำและสารเกิดฟอง	85.9-87.3%	[19]

การกำจัดฝุ่นในพื้นที่กว้างมักใช้วิธีการฉีดพ่นด้วยน้ำแรงดันสูงเพื่อให้ขนาดของละอองน้ำมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับอนุภาคฝุ่น เกิดการชนกันระหว่างสองอนุภาค หลังจากนั้นอนุภาคฝุ่นจะเกิดการเปียกซึมและรวมตัวกันระหว่างอนุภาคฝุ่นกันเองหรืออนุภาคฝุ่นกับน้ำ ควบแน่น จนอนุภาคมีขนาดใหญ่ แล้วจึงตกลงสู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง

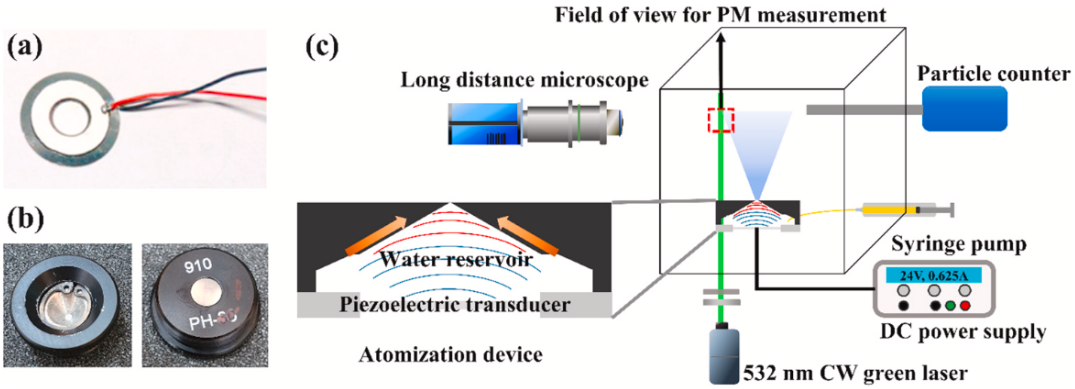
จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการกำจัดฝุ่น PM ต่าง ๆ โดยทดสอบกับอนุภาคฝุ่นถ่านหิน ขนาด $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ที่มีการดูดซึมน้ำได้ดี สามารถเปียกง่ายด้วยน้ำ จึงใช้วิธีการกำจัดฝุ่นด้วยระบบฉีดพ่นน้ำเพื่อให้ฝุ่นเกิดการเปียกและสามารถกำจัดได้ครอบคลุมกับพื้นที่กว้าง โดยใช้หลักการสร้างละอองน้ำให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับอนุภาคฝุ่น และปล่อยละอองหมอกในอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร เมื่อฝุ่นลอยผ่านจุดที่มีหมอกน้ำกระจายอยู่อย่างหนาแน่น จะก่อให้เกิดการชนกันระหว่างหมอกน้ำกับอนุภาคฝุ่น ฝุ่นจะถูกดักจับด้วยละอองน้ำหลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การชน การสกัดกั้น การดูดซับ การรวมตัว การควบแน่น และการแพร่กระจาย ทำให้ฝุ่นควบแน่นและเพิ่มขนาดอนุภาคของฝุ่นได้ หลังจากนั้นจึงตกลงสู่ด้านล่างทำให้อากาศบริสุทธิ์ (รูปที่ 2.8) [15] ขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้น มีน้ำหนักมากขึ้นอาจทำให้ตกลงสู่พื้นอย่างรวดเร็ว ในอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจะมีความเฉื่อยต่ำทำให้เคลื่อนที่ผ่านหยดน้ำได้บางส่วน จึงไม่สามารถสัมผัสกับขอบของหยดน้ำได้ ความน่าจะเป็นที่จะสัมผัสอนุภาคฝุ่นกับหยดน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อ

ขนาดของหยดน้ำลดลง การลดขนาดของหยดน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น [6]



รูปที่ 2.8 กลไกของการกำจัดอนุภาคฝุ่นด้วยละอองน้ำ

การสร้างละอองด้วยคลื่นอัลตราโซนิกส์สามารถสร้างหยดน้ำขนาดเล็กระดับไมโครเมตรและแพร่กระจายได้ โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ DC ทำงานด้วยความถี่ 1.7 MHz และมีการปรับเส้นผ่าศูนย์กลางของรูไมโครพินเป็น 1, 5, และ 10 ไมโครเมตร อัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 0.02 mL/min ทดสอบการกำจัดฝุ่นในห้องปิดที่มีขนาด 0.027 m^3 ดังรูปที่ 2.9 ประสิทธิภาพในการใช้ละอองน้ำระดับไมโครเมตรกำจัด $PM_{2.5}$ อยู่ที่ 56.2% และประสิทธิภาพกำจัด PM_{10} อยู่ที่ 73.9% [6] สารกำจัดฝุ่นที่ปรับปรุงสมบัติเพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น เช่น ไฮดรอกซีโพรพิลกัวกัม (Hydroxy Propyl Guargum) มีหลักการในการดักจับด้วยการลดแรงตึงผิวเพื่อลดความต้านทานของละอองน้ำจากการชนกับละอองฝุ่นถ่านหิน ซึ่งอนุภาคฝุ่นจะแทรกซึมเข้าไปในละอองและเกิดการเพิ่มความชุ่มชื้นของฝุ่น จากนั้นเกิดการรวมตัวระหว่างฝุ่นและละอองที่ฉีด และจับตัวกันเป็นก้อนเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ตกลงสู่ด้านล่าง ทดสอบร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 7 ชนิด ได้แก่ Sodium dodecyl sulfate (SDS), Sodium α-alkenylsulfonate (AOS), Fatty alcohol polyoxy ethylene ether (AEO), Polyoxyethylene sorbitan monooleate (TWE-80), Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), Cocamidopropyl betain (CAB-35) และ Dodecyl dimethyl betain (BS-12) การจำลองการลดฝุ่นด้วยสเปรย์ประกอบด้วยกล่องทดสอบสี่เหลี่ยมด้านขนาน จากการทดสอบพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวช่วยลดความต้านทานระหว่างละอองน้ำกับอนุภาคฝุ่นถ่านหิน เมื่อมีการฉีดพ่นเพื่อลดฝุ่น พบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคฝุ่นและเกาะติดกันจนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนอนุภาคขนาดใหญ่ตกลงสู่ด้านล่างได้ [16]



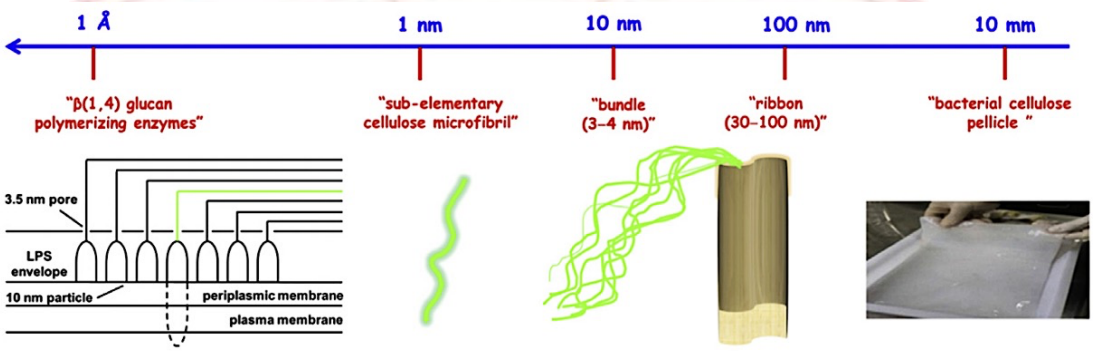
รูปที่ 2.9 แผนผังการตั้งค่าการทดลองสำหรับการควบคุมหยดน้ำและการวัดความเข้มข้นของอนุภาคในห้องปิด (a) โมดูล Ultrasonic Atomizer ทำงานที่ความถี่ 1.7 MHz ด้วยกำลังไฟ 15 W (b) ไมโคร พินโฮลที่ใช้ในการทดลองนี้ รูเข็มถูกรวมเข้ากับโมดูลเครื่องฉีดน้ำอัลตราโซนิกโดยตรง และ (c) ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบความเข้มข้นของ PM ระบบการแสดงภาพประกอบด้วยเลเซอร์ไฟเบอร์แบบต่อเนื่อง (CW Laser), เลนส์ออปติคัล, กล้องความเร็วสูงและระบบเก็บข้อมูลสำหรับการจัดเก็บและประมวลผลภาพ ฝุ่นแอริโซนาถูกใช้เป็นอนุภาค PM

2.3 Cellulose

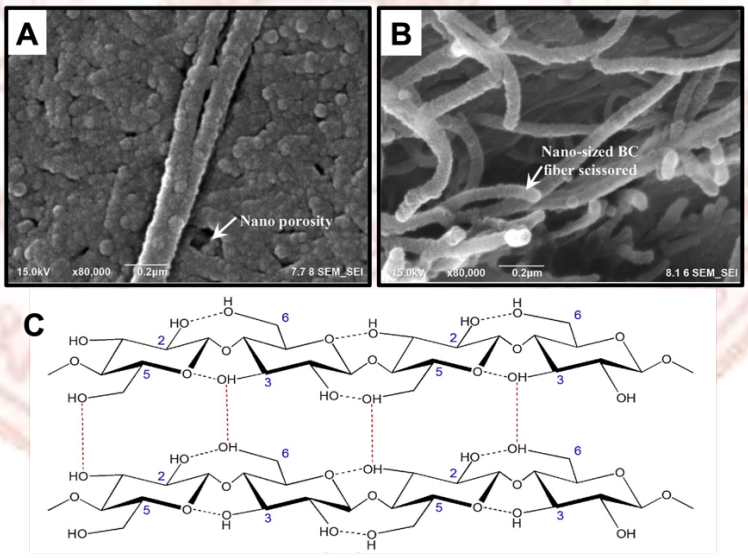
เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สามารถพบได้ในเซลล์พืชและแบคทีเรีย เซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial Cellulose; BC) คือเซลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรียจำพวก Gluconacetobacter (เดิมเรียกว่า Acetobacter), Aerobacter, Achromobacter, Azotobacter, Rhizobium, Agrobacterium, Rhodobacter และ Sarcina แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดโฮโมพอลิแซคคาไรด์เชิงเส้นที่ไม่มีกิ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลูโคสเชื่อมต่อด้วยพันธะบีตา (1⟶4) ไกลโคซิดิก แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์ ปราศจากลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส มีความเป็นผลึกสูง มีระดับความเป็นพอลิเมอร์สูง มีโครงสร้างเส้นใยพื้นฐานระดับนาโน มีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ประมาณ 30–40% มีประสิทธิภาพในการอุ้มน้ำ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [20]

โครงสร้างของแบคทีเรียเซลลูโลสตามระดับความยาวแสดงดังรูปที่ 2.10 โครงสร้างของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสเกิดจากการรวมตัวกันเองของโครงสร้างพื้นฐาน (Self-Assembly) ตามระดับความยาวต่าง ๆ โดยเริ่มต้นจาก Sub-Elementary Cellulose Microfibril มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับ 1 nm [21,22] Microfibrils นี้จะรวมตัวในขั้นถัดมาเป็น Bundle ที่มีขนาด 3–4 nm และ Bundle จะรวมตัวกันเกิดเป็น Ribbon ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 30–100 nm โครงสร้างของแบคทีเรียเซลลูโลสที่เป็นแผ่นขนาดใหญ่ในระดับ 10 mm คือ Bacterial Cellulose Pellicle เกิด

จากการรวมตัวกันของ Ribbons รูปที่ 2.11A และ 2.11B แสดง Ribbons ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและรูพรุนระดับนาโนเมตร (Nano Porosity) ของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ถ่ายได้จาก Scanning Electron Microscope อันตรกิริยาหลักที่ทำให้โครงสร้างพื้นฐานของแบคทีเรียเซลลูโลสเกิดการรวมตัวกันเองได้ คือ พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุล (รูปที่ 2.11C) โครงสร้างและระดับความเป็นผลึก (Crystallinity) ของแบคทีเรียเซลลูโลสมีความแตกต่างกัน ขึ้นกับการสังเคราะห์และกลไกการควบคุมของแบคทีเรียแต่ละชนิด (ตารางที่ 2.2) นอกจากนี้แบคทีเรียเซลลูโลสยังถูกจัดเป็นนาโนเซลลูโลส (Nanocellulose; NC) กลุ่มหนึ่งอีกด้วย



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสในหน่วยต่าง ๆ [21]



รูปที่ 2.11 SEM Micrograph ของแบคทีเรียเซลลูโลส (A) และ (B), และโครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลส (C) [22]

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรียสายพันธุ์ต่าง ๆ [23]

สกุล	โครงสร้างของเซลลูโลส
Acetobacter	แผ่นฝ้าเคลือบเซลล์ประกอบด้วยเส้นใยคล้ายริบบิ้น
Achromobacter	เส้นใย
Aerobacter	เส้นใย
Agrobacterium	เส้นใยขนาดสั้น
Alcaligenes	เส้นใย
Rhizobium	เส้นใยขนาดสั้น
Sarcina	อสัณฐาน

2.4 นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose)

นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose; NC) สามารถสกัดได้จากแหล่งธรรมชาติหลายแหล่ง เช่น แบคทีเรีย พืช สาหร่ายและสัตว์ ส่งผลให้คุณสมบัติแตกต่างกันออกไป นาโนเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรียจะมีความบริสุทธิ์ เนื่องจากไม่มีลิกนิน เพคตินและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ [22] จึงนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตนาโนเซลลูโลสต่อไป

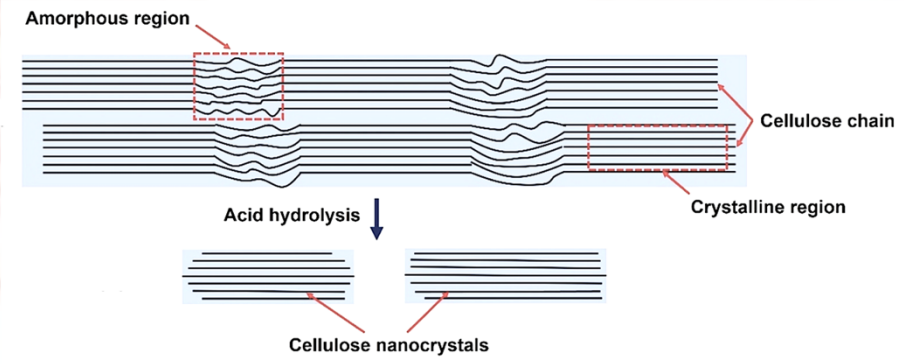
นาโนเซลลูโลสถูกจัดกลุ่มตามสัณฐานวิทยา สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เซลลูโลสนาโนไฟบริล เซลลูโลสนาโนคริสตัล และแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดของนาโนเซลลูโลสและสมบัติทางกายภาพ [24,25]

ชนิดของ NC	ชื่อสามัญ	ขนาด	ความยาวสายโซ่
Nano fibrillar Cellulose (NFC)	Micro fibrillated Cellulose (MFC), Nanofibrils, Microfibrils, Nano fibrillated Cellulose	เส้นผ่านศูนย์กลาง 5–60 nm ความยาวระดับไมโครเมตร	≥ 500
Nanocrystalline Cellulose (NCC)	Cellulose Nanocrystals (NC), Crystallites, Whiskers, Rodlike Cellulose Micro crystals	เส้นผ่านศูนย์กลาง 5–70 nm ความยาว 100–250 nm (พืช); 100 นาโนเมตร ไปจนถึง ไมโครเมตร (สาหร่ายแบคทีเรีย)	500–15,000

Bacterial Nanocellulose (BNC)	Bacterial Cellulose (BC), Microbial Cellulose, Bio Cellulose	เส้นผ่านศูนย์กลาง 5–70 nm	4000–10,000

การสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลสในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการแยกสลายด้วยกรด (Acid Hydrolysis) กรดจะทำลายส่วนที่เป็นอสัณฐานและยังคงส่วนที่เป็นผลึกไว้ (รูปที่ 2.12) ตัวแปรสำคัญในปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสและกรด ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา หลังจากการการทำปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรดและผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของอนุภาคผลึกมีลักษณะคล้ายแท่งแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ [26]



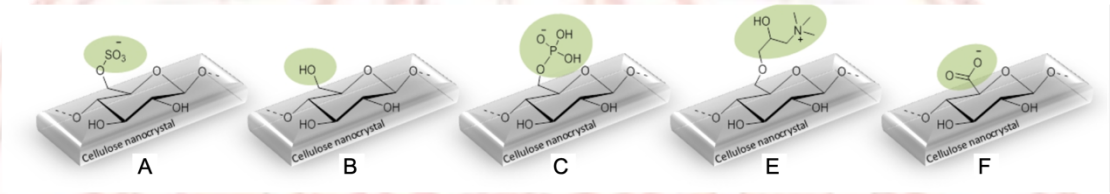
รูปที่ 2.12 ลักษณะเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสหลังจากแยกสลายด้วยกรด [27]

2.5 ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด (Acid Hydrolysis)

ปฏิกิริยาแยกสลายด้วยกรด (Acid Hydrolysis) ที่ใช้ในการสกัดผลึกนาโนเซลลูโลสจะเริ่มต้นจากการเสื่อมสภาพของเส้นใยเซลลูโลส การแยกสลายเส้นใยในส่วนที่เข้าถึงได้มากที่สุด ตามด้วยส่วน Reducing End Groups และพื้นผิวของผลึก ตัวแปรสำคัญในการควบคุมการแยกสลายด้วยกรด ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด เวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาที่สั้นเกินไปทำให้กรดไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนอสัณฐานได้มากพอ เนื่องจากเส้นยังไม่กระจายตัวออกจากการแทรกตัวของกรด ทำให้ Degree of Polymerization (DP) มีค่าสูง บ่งบอกว่าส่วนอสัณฐานยังคงมีอยู่ และส่งผลให้ขนาดของผลึกมีขนาดใหญ่ และหากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปจะทำให้ผลึกนาโนเซลลูโลสถูกไฮโดรไลซ์ได้ อุณหภูมิและเวลาของปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กัน หาก

อุณหภูมิสูงจะทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นลง หลังจากการแยกสลายด้วยกรดและผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว จะได้เป็นอนุภาคผลึกมีลักษณะคล้ายเข็มขนาดเล็กอยู่ในสารแขวนลอยที่เป็นน้ำ

กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นกรดที่นิยมใช้ในการเตรียมผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีการแยกสลายด้วยกรด กรดอื่น ๆ เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไฮโดรโบรมิก (HBr) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) สามารถนำมาใช้ในการสกัดผลึกนาโนเซลลูโลสได้เช่นกัน ประจุบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสจะเกิดขึ้นเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริกและกรดไฮโดรโบรมิกจะไม่สร้างประจุบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลส (รูปที่ 2.13) กรดซัลฟิวริกจึงเป็นทางเลือกในเหมาะสมกว่ากรดชนิดอื่น [28]



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างบางส่วนของ Functional Groups ที่ผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการแยกสลายด้วยกรดชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (A), กรดไฮโดรคลอริกหรือกรดไฮโดรโบรมิก (B), กรดฟอสฟอริก (C), กรดซัลฟิวริกแล้วตามด้วย Surface Cationization และกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดไฮโดรโบรมิกตามด้วย TEMPO-Oxidation (D) [28]

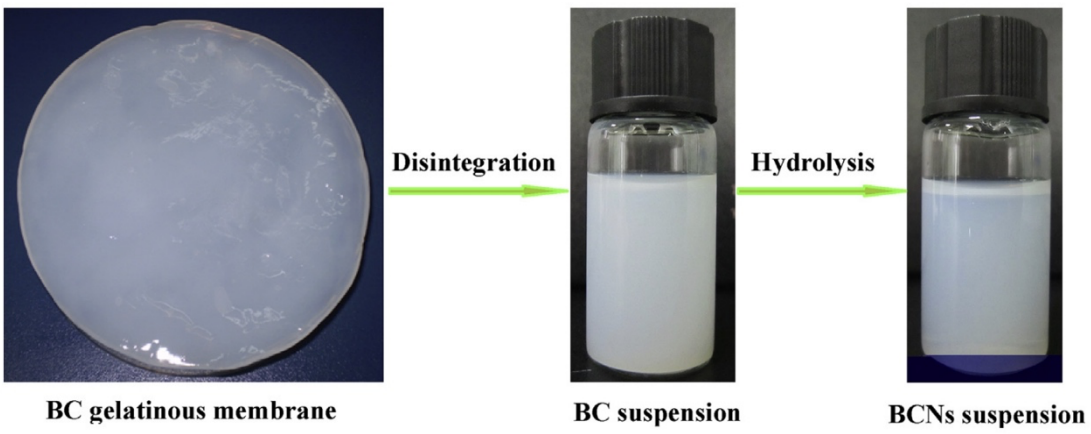
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลส

Ajkidkarn และคณะ [29] สกัดผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าว (Nata De Coco) โดยใช้วิธีการแยกสลายด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 60% (w/w) ในอัตราส่วนผงแบคทีเรียเซลลูโลส:กรดเป็น 1:20 g/mL ภายใต้การกวนแบบแรงที่อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นหยุดปฏิกิริยาด้วยน้ำเย็น DI และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 12000 รอบ/นาทีที่ 4°C เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อให้เกิดการตกตะกอน การทำให้สารผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ใช้วิธี Dialysis (MWCO>12000) ในน้ำ DI จนกระทั่งมีค่า pH เท่ากับ 7.0 จะได้สารแขวนลอยของแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล (Bacterial Cellulose Nanocrystal; BCNC) ตรวจสอบลักษณะเชิงพื้นที่ผิวของเซลลูโลสในขั้นตอนต่าง ๆ ด้วยเทคนิค SEM วัดการกระจายของอนุภาคด้วยเทคนิค DLS และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึกนาโนเซลลูโลสศึกษาผ่านเทคนิค TEM จากการทดสอบพบว่าผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสมีลักษณะเหมือนแท่งหรือคล้ายเข็มและมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 1512 นาโนเมตร

Vasconcelos และคณะ [30] สกัดผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส โดยนำเยื่อแบคทีเรียเซลลูโลสหรือ Nata De Coco มาแช่ไว้ใน 0.4% (w/v) NaOH ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลาง นำมาตัดให้มีขนาด 5×5 มิลลิเมตร และนำไปปั่นใน

เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่ 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ได้เนื้อเซลลูโลสขนาดเล็กลง นำไปกรองผ่านกระดาษกรองและทำให้แห้งจึงเข้าสู่กระบวนการสกัดผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีการ Acid Hydrolysis ด้วยกรด H_2SO_4 และ HCl ที่อัตราส่วนต่างกัน โดยใช้แบคทีเรียเซลลูโลส 0.6 กรัมในสารละลายกรด 60 mL กวนผสมที่อุณหภูมิ 45°C ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที หยุดปฏิกิริยาด้วยน้ำปราศจากไอออนเย็นเจือจางที่ 15 เท่า หมุนเหวี่ยงที่ 13000 รอบ/นาทีที่ 20°C เพื่อให้เกิดการตกตะกอน หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้มา Ultrasonicated เป็นเวลา 3 นาที Dialysis ด้วยน้ำปราศจากไอออนจนค่า pH เป็นกลาง จะได้ความเข้มข้นสุดท้ายประมาณ 1% (w/v) ผลึกที่ได้มีความยาวเฉลี่ย 1322 ± 189 นาโนเมตรและความกว้างเฉลี่ย 44.3 ± 18 นาโนเมตร

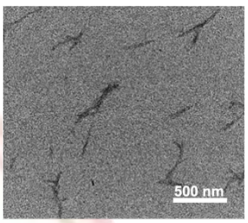
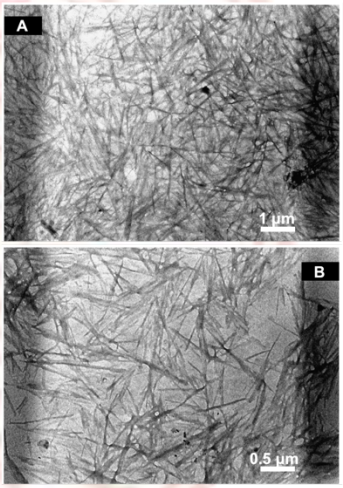
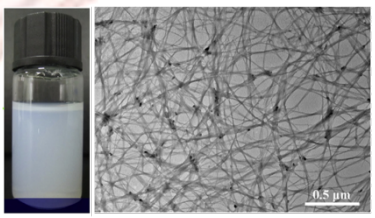
Yan และคณะ [31] นำเอาแผ่นเยื่อแบคทีเรียเซลลูโลสที่หมักจากน้ำมะพร้าวผสมกับแบคทีเรียสานพันธุ์ *Acetobacter xylinum* เพื่อให้เกิดแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีลักษณะสีขาวขุ่น หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วนำไปต้มด้วย 0.1 M NaOH ที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อกำจัดเซลล์ที่เหลืออยู่ ล้างจนกว่ามีค่า pH เป็นกลาง บดให้เป็นชิ้นเล็ก นำไปทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยโฮโมจีไนเซอร์จึงได้สารแขวนลอยของแบคทีเรียเซลลูโลส จากนั้นแยกสลายด้วยกรดเพื่อผลิตผลึกแบคทีเรียเซลลูโลส โดยใช้แบคทีเรียเซลลูโลส 5 กรัมต่อกรด 50%wt H_2SO_4 80 mL ที่อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาในน้ำเจือจาง 5 เท่า เติม 30%wt H_2O_2 8.0 mL นำไปหมุนเหวี่ยงที่ 9000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที เพื่อแยกผลึกและอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที Dialysis ด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 8 วัน เพื่อกำจัดกรดซัลฟิวริกที่เจือปนอยู่ในสารแขวนลอย จะได้ผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส ดังรูปที่ 2.14 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 256.6 nm

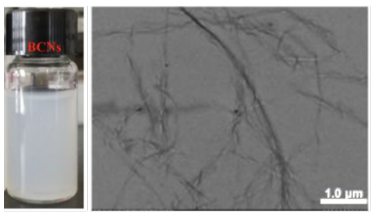
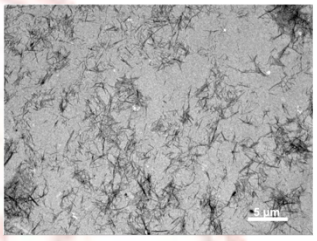


รูปที่ 2.14 กระบวนการสกัดแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส [31]

การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยกรดแสดงไว้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด

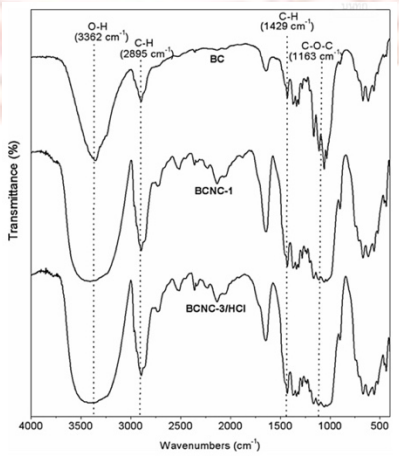
แหล่งแบคทีเรียเซลลูโลส	**กรดและความเข้มข้น**	**อุณหภูมิ (°C)**	**เวลา (นาที)**	**วิธีการกำจัดกรด**	**แรงทางกล**	**ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (TEM Micrographs)**	**อ้างอิง**
Acetobacter xylinum	กรดซัลฟิวริก 60% (w/w)	45	120	Centrifuge 12000 rpm ที่ 4°C 10 นาทีและ Dialysis	-	 ผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสขนาด 200–500 nm ความยาวและกว้าง 10–30 nm	[29]
Acetobacter xylinum	กรดซัลฟิวริก 34% (w/w) และกรดไฮโดรคลอริก 24% (w/w)	45	60	Centrifuge 13000 rpm 10 นาทีและ Dialysis	Ultrasonication 3 นาที	 ผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสความยาวเฉลี่ย 1322 ± 189	[30]
Acetobacter xylinum	กรดซัลฟิวริก 60% (w/w)	45	180	Centrifuge 9000 rpm 15 นาที	Ultrasonication 15 นาที	 ผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 256.6 nm	[31]

Komagataeibacter xylinum	กรดไฮโดรคลอริก 3 M	70	240	Centrifuge 10,000 g 10 นาที	-	 ผลึกมีความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 221.36 ± 20.23 nm	[32]
Komagataeibacter xylinum	กรดซัลฟิวริก 60% (v/v) และกรดไฮโดรคลอริก 35% (v/v)	45	60	Centrifuge ที่ 15.64 g 15 นาทีและ 20°C	Ultrasonication	 เส้นใยที่มีความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 1469 ± 362 nm และความกว้างเท่ากับ 70 ± 20 nm	[33]

2.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของนาโนเซลลูโลส

2.7.1 Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy

การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วย FT-IR Spectroscopy ใช้สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส ค่าเลขคลื่นที่ใช้จะอยู่ในช่วง 4000–500 cm^{-1} และ Resolution อยู่ที่ 4 cm^{-1} การเตรียมสารตัวอย่างทำได้โดยนำสารตัวอย่างที่แห้ง บดเป็นผงและอัดเม็ดรวมกับ KBr จากกราฟการตรวจสอบเอกลักษณ์จาก FT-IR (รูปที่ 2.15) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสเมื่อถูกเปลี่ยนเป็นผลึกนาโนเซลลูโลสแล้วยังคงมีองค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสตามเดิม [30]



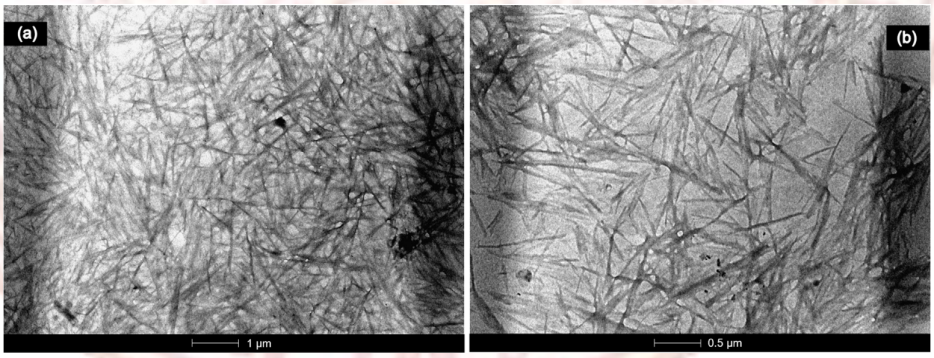
รูปที่ 2.15 FT-IR Spectra ของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าว (BC), ผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสสกัดโดยวิธี Acid hydrolysis ด้วยกรดซัลฟิวริก (BCNC-1) และสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (BCNC-3/HCl) [30]

ตารางที่ 2.5 หมู่ฟังก์ชันของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ตรวจสอบได้จากเทคนิค FT-IR Spectroscopy

เลขคลื่น (cm^{-1})	**หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส**
3362	O-H stretching vibrations ของ CH_2-OH (ไฮดรอกซิล) ในเซลลูโลส
2895	C-H stretching vibrations ในเซลลูโลส
1429	C-H bonds ของการเปลี่ยนรูปเชิงมุมไม่สมมาตร
1163	C-O-C glycoside bonds

2.7.2 Transmission Electron Microscopy (TEM)

Transmission Electron Microscopy ให้ข้อมูลทางด้านสัณฐานวิทยา ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อตรวจสอบเอกลักษณ์ของแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน สามารถทำได้ด้วยการหยดสารแขวนลอยของนาโนเซลลูโลสที่กระจายตัวดีแล้วลงบน Grid ของ TEM ค้างไว้ 10 วินาทีและทำให้แห้งด้วยสุญญากาศ 24 ชั่วโมง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนเซลลูโลสสามารถวัดได้จาก TEM Micrographs โดยตัวอย่าง TEM Micrographs ของผลึกนาโนเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 TEM Micrographs ของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการย่อยสลายด้วยกรด ผลึกที่พบมีรูปร่างคล้ายเข็มหรือรูปแท่ง [30]

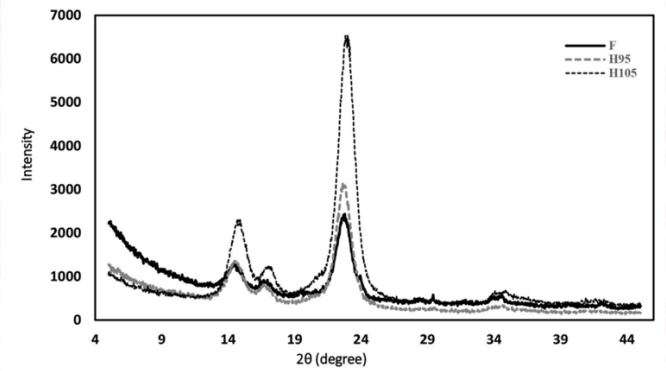
2.7.3 X-ray Diffraction Analysis (XRD)

X-ray Diffraction Analysis (XRD) ใช้เพื่อตรวจสอบระดับความเป็นผลึกของแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส สารตัวอย่างที่ใช้เป็นแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสหรือผลึกนาโนเซลลูโลสแบบผงอบแห้ง โดยมี

เงื่อนไขในการวิเคราะห์คือ Cu-Kα Source มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5405 A°, ความต่างศักย์ 45 kV และกระแสไฟฟ้า 40 mA วัดค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ช่วง 2θ จาก 5 ถึง 45° ตัวอย่าง X-ray Diffraction Patterns ของผลึกและเส้นใยแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.17 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าดัชนีความเข้มของผลึก (Crystallinity Index) ของสารตัวอย่าง โดยใช้สมการดังนี้

$$CI\% = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \times 100$$

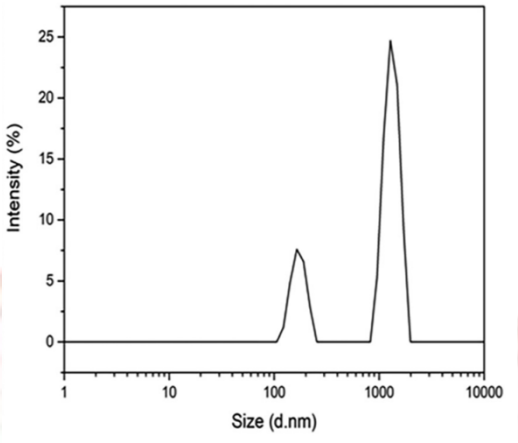
โดยที่ I_{200} คือค่าความเข้มของ Diffraction peak ของส่วนผลึกที่ประมาณ 2θ = 22.5° และ I_{am} คือความเข้มสูงของ Diffraction peak ที่ 2θ = 16.6° หมายถึงส่วนที่เป็นอสัณฐาน [34]



รูปที่ 2.17 XRD Patterns ของเส้นใยแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส (F) และผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสหลัง HCl Hydrolysis [34]

2.7.4 Dynamic Light Scattering (DLS)

Dynamic Light Scattering (DLS) ใช้เพื่อตรวจวัด Hydrodynamic Diameter และค่าศักย์ซีต้า (Zeta Potential) ของสารแขวนลอยของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส [29] โดยให้การวิเคราะห์ไฟฟ้าซีตามุมต่ำผ่านการกระเจิงของแสงโฟโตอิเล็กโตรโฟเรติก (Electrophoretic) เป็นเวลา 120 วินาที ที่ 25°C ค่าที่รายงานจะอยู่ในรูป ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอย่างผลของ Dynamic Light Scattering Analysis แสดงดังรูปที่ 2.18 พบการกระจายขนาดของสารแขวนลอยผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสอยู่ที่ 110.4 และ 1854.4 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับขนาดเฉลี่ยที่ 1512 นาโนเมตรที่มีค่า Polydisperse Index (PDI) อยู่ที่ 0.92



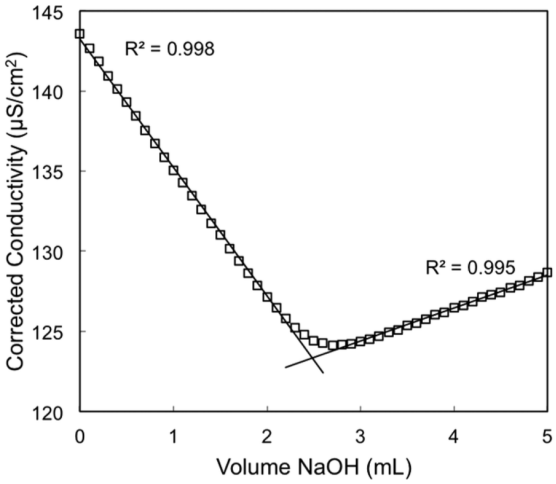
รูปที่ 2.18 การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส [29]

2.7.5 การไทเทรตคอนดักโตเมตริก (Conductometric Titration)

การพัฒนาสเปรย์ดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ จากสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลส เมื่อฉีดละอองของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส ผลึกนาโนเซลลูโลสที่มีประจุลบจากหมู่ซัลเฟตอยู่บนพื้นผิวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ วิธีการ Conductometric titration เป็นวิธีการหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลส ในรูปแบบของซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ (Sulfate half-ester groups; $-OSO_3^-$) โดยไทเทรตระหว่างสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางและวัดค่าการนำไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องในหน่วย mS/cm ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเกิดจากโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ถูกใช้ไปและแทนที่ด้วยโซเดียมไอออน และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมเข้าไปเกินปริมาณที่จำเป็นสำหรับการทำให้เป็นกลาง จุดสมดุลของกราฟที่ได้จากการพล็อตระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางที่ใช้ สัมพันธ์กับปริมาณประจุบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลส [35] ตัวอย่างผลที่ได้จากการไทเทรตแสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณประจุลบบนพื้นผิวในรูปแบบหมู่ซัลเฟตของสารตัวอย่าง โดยใช้สมการดังนี้

$$S = \frac{\Delta V_{NaOH} C_{NaOH}}{m_{susp} C_{susp}} \quad (2.1)$$

โดยที่ ΔV_{NaOH} คือผลต่างของปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ระหว่างจุดตัดแรกและจุดตัดที่สอง C_{NaOH} คือความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ m_{susp} คือมวลของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสและ C_{susp} คือความเข้มข้นของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส [36]



รูปที่ 2.19 กราฟการไทเทรตด้วยวิธีการนำไฟฟ้าของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ [37]

2.8 ความปลอดภัยของนาโนเซลลูโลส

Endes และคณะ [38] ศึกษาผลของละอองผลึกนาโนเซลลูโลสที่เกาะอยู่พื้นผิวของเซลล์ปอดในหลอดทดลอง ผลึกนาโนเซลลูโลสสกัดจากกระดาษกรอง Whatman No.1 (c-CNC) ติดฉลากฟลูออเรสเซนต์ของ CNC ด้วย Rhodamine B Isothiocyanate (RBITC) เพื่อง่ายต่อการมองเห็นกระจายตัวให้เป็นเนื้อเดียวกันในน้ำบริสุทธิ์ ทดลองด้วยระบบการสัมผัสเซลล์แบบ Air Liquid Interface หรือระบบ ALICE ในหลอดทดลองโดยใช้แบบจำลองการเพาะเลี้ยงร่วมกันของผนังกั้นทางเดินหายใจของเยื่อบุผิวในปอดของมนุษย์ เซลล์จะถูกตรึงไว้ในช่วงเวลาการฟัก ได้แก่ 0, 1, 24 และ 48 ชั่วโมง หลังจากการพ่นละออง 0.1 µg/mL พบว่า c-CNC ถูกกำจัดออก 1 ชั่วโมงจากพื้นผิวชั้นเซลล์ จึงไม่เกิดการสะสมในปอดจากการสูดดมเข้าไป

Kovacs และคณะ [39] ศึกษาผลึกนาโนเซลลูโลสที่ใช้เป็นองค์ประกอบของการพัฒนาการประเมินความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดขึ้น โดยผลึกนาโนเซลลูโลสแทนวัสดุเซลลูโลส ใช้ในการประเมินพิษวิทยานิเวศ เกี่ยวข้องกับการทดสอบความเป็นพิษกับเซลล์ตับต่อปลาเทราต์สายรุ้งและสัตว์น้ำเก้าชนิด แต่ผลึกนาโนเซลลูโลสไม่ส่งผลกระทบต่อพันธุกรรม และในการทดสอบกับสัตว์น้ำเก้าชนิดพบว่า ผลึกนาโนเซลลูโลสส่งผลกระทบต่อการสืบพันธุ์ของปลาชิวหัวโตที่ 0.29 กรัม/ลิตร แต่ไม่มีผลกระทบอื่น ๆ เช่น การอยู่รอด การเจริญเติบโต ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 กรัม/ลิตร จากลักษณะเฉพาะทางพิษวิทยานิเวศ พบว่าผลึกนาโนเซลลูโลสมีความเป็นพิษต่ำและมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Ni และคณะ [40] ศึกษาผลกระทบของนาโนเซลลูโลสที่มีต่อเซลล์ L929 หรือเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของหนู สกัดนาโนเซลลูโลสจากสาหร่ายก้อนด้วยกรดซัลฟิวริก โดยประเมินเบื้องต้นจากการ

กระจายตัวของนาโนเซลลูโลสในจานเพาะเลี้ยงเซลล์ เพาะเลี้ยงเซลล์ในจานเพาะเลี้ยงที่ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อาหารที่ให้ต่อเซลล์จะถูกแทนที่ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการกระจายตัวของนาโนเซลลูโลสปนอยู่ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน 0.01%, 0.2% และ 1% หลังจากนั้น 24 ชั่วโมง บ่มบัดเซลล์ด้วย 3-[4,5-dimethyl-2-thiazoly 1]-2,5-diphenyl-2H-tetrazolium bromide (MTT) บ่มต่อเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และกำจัดออกด้วยไดเมทิลซัลฟอกไซด์ เขย่าเบา ๆ 10–15 นาที จากการทดสอบพบว่านาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 0.01% และ 0.2% มีความเป็นพิษต่ำต่อเซลล์ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 1% พบว่ามีผลกระทบทำให้ความหนาแน่นของเซลล์ลดลง

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 600 และ 2000 มิลลิลิตร
2. แท่งแก้วคนสาร
3. ช้อนตักสาร
4. ขวดแก้วพร้อมฝาปิด
5. แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Bar)
6. เทอร์โมมิเตอร์
7. ชุดขาตั้งและตัวหนีบยึด (Stand and Clamp)
8. หลอดเซนตริฟิวจ์ขนาด 50 มิลลิลิตร
9. จานเพาะเชื้อ
10. วุ้นมะพร้าว (Nata De Coco, Nakhonpathom, Thailand)
11. กระบอกตวงขนาด 25, 50 และ 100 มิลลิลิตร
12. ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 และ 1000 มิลลิลิตร
13. ถุงมือยาง
14. ถุงไดอะไลซิส (Dialysis)
15. โกร่งบดสาร
16. Carbon-Coated Copper Grid (300 Mesh)
17. กระดาษวัด pH (pH Paper, pH range 0-14, Merck)
18. แม่พิมพ์สำหรับเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR Spectroscopy
19. กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% (AR Grade, Merck)
20. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (AR Grade, Merck)
21. น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง (Ultrapure Water)

3.2 เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง (METTLER TOLEDO รุ่น ME303E)
2. ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Hot air oven FD115 Binder)
3. ตู้ดูดควัน (Easy Lab®, S.K.POWERABLE CO.,LTD.)

4. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Magnetic Hotplate Stirrer)
5. เครื่องเซนตริฟิวจ์ (Tomy MX-300 High Speed Refrigerated Micro Centrifuge)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Hitachi HT7800 Transmission electron microscope)
7. เครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrophotometer (Nicolet iS5 (Thermo Scientific))
8. เครื่อง Nanoparticle Size Analyzer (HoribaNanoparticaSZ-100V2)
9. เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)
10. เครื่องอัลตร้าโซนิกส์ Sonics VibraCell (Sonic & Materials, Inc.)
11. ชุดทดสอบโพลาไรเซอร์
12. เครื่องวัด pH (Mettler Toledo รุ่น F20 FiveEasy^{TM})
13. เครื่อง Ultrasonic Probe 750 watt

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ตวงสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยมวลปริมาตร 50 มิลลิลิตรค่อย ๆ เทในบีกเกอร์ขนาด 250 mL ที่มีน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงปริมาตร 100 mL บรรจุอยู่ นำไปกวนบนเครื่องกวนสารละลายจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องและตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนจึงนำไปใช้ได้ ทุกขั้นตอนต้องดำเนินการในตู้ดูดควันเท่านั้น เพื่อป้องกันไอของกรดที่มีความอันตราย

3.3.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ละลายในน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง 500 mL และปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 mL

3.3.3 การเตรียมผลึกนาโนเซลลูโลส

1. นำวุ้นมะพร้าวมาทำความสะอาดด้วยสารละลาย NaOH ที่อุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 70–80°C เป็นเวลา 1–2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนและเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในเยื่อวุ้นมะพร้าว จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหรือน้ำกลั่นจนเป็นกลางและนำไปทำให้ขนาดเล็กลงด้วยเครื่องปั่น จากนั้นซับน้ำจนแห้งก่อนนำไปทดลอง

2. เตรียมชามสแตนเลสใส่น้ำจนถึงขีดเซนเซอร์ของเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำ ใส่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 10 mL ลงในบีกเกอร์ จากนั้นใส่แท่งแม่เหล็กกวนแล้วปิดด้วยกระจกนาฬิกา กวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน ปรับอุณหภูมิของเครื่องให้ความร้อน (Hot Plate) จนสารในบีกเกอร์มีอุณหภูมิอยู่ที่ 60°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
3. เมื่ออุณหภูมิสารละลายกรดซัลฟิวริกในบีกเกอร์เท่ากับ 60°C ใส่วุ้นมะพร้าวบดและปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นเวลา 105 นาที เมื่อครบเวลาให้หยุดปฏิกิริยาโดยการเทสารในบีกเกอร์ลงในน้ำเย็น 0°C เพราะปฏิกิริยาแยกสลายด้วยกรดจะถูกหน่วงหรือหยุดดำเนินไปที่อุณหภูมิต่ำ

3.3.4 การทำให้ผลึกนาโนเซลลูโลสบริสุทธิ์

1. นำผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ไปทำปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8500 rpm เป็นเวลา 60 นาที เพื่อทำให้ผลึกนาโนเซลลูโลสตกตะกอนแยกออกมาจากสารละลายที่ทำปฏิกิริยาและกำจัดกรดออกไปบางส่วน เมื่อครบเวลาเทส่วนใสด้านบนออกให้เหลือแต่ตะกอนของสารแทนที่สารละลายที่เทออกด้วยน้ำกลั่นและนำไปปั่นเหวี่ยงซ้ำ เมื่อวัดค่า pH ของสารละลายส่วนใสได้ประมาณ 2 จากนั้นนำสารแขวนลอยไปไดอะไลซิส (Dialysis) เป็นเวลา 7 วัน โดยเปลี่ยนน้ำกลั่นในภาชนะทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดกรดส่วนที่เหลือในผลึกนาโนเซลลูโลส เมื่อครบเวลานำไปวัดค่า pH ให้ผลึกนาโนเซลลูโลสมีค่า pH เป็นกลางอยู่ที่ประมาณ 6–7
2. นำสารที่ได้ไปทดสอบความเป็นผลึกนาโนเซลลูโลสเบื้องต้นด้วยชุดทดสอบโพลาไรเซอร์ ถ้าหากมีผลึกนาโนเซลลูโลสอยู่ในสารแขวนลอย จะสังเกตเห็นริ้วของอนุภาคจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนว (Birefringence)
3. เก็บรักษาผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้โดยการเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5°C

3.3.5 การเตรียมผลึกนาโนเซลลูโลสในรูปแบบผง

นำผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้ใส่จานเพาะเชื้อ แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1–2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่อยู่ในผลึกนาโนเซลลูโลส

3.3.6 การทดสอบลักษณะเฉพาะของผลึกนาโนเซลลูโลส

3.3.6.1 การทดสอบขนาดอนุภาคของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS)

1. เปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 15–30 นาที เพื่อให้ความเข้มของเลเซอร์และอุณหภูมิบริเวณช่องใส่ตัวอย่างเสถียร เพราะค่าดัชนีหักเหของสารตัวอย่างและตัวกลางจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ
2. ตรวจสอบการกระเจิงแสงพื้นหลังจากตัวกลาง โดยต้องมีค่าอยู่ภายในช่วงที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้ และบันทึกค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มข้นของแสงกระเจิง
3. นำตัวอย่างสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลสที่แห้งใส่ในช่องใส่ตัวอย่าง และทิ้งให้อุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและช่องใส่ตัวอย่างสมดุล อุณหภูมิควรควบคุมไว้ที่ ±0.3°C จากนั้นตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศในตัวอย่าง เพื่อไม่ให้สัญญาณการกระเจิงของแสงเลเซอร์ที่มาจากฟองอากาศถูกบันทึกไปเป็นขนาดของอนุภาคในสารตัวอย่าง
4. บันทึกรายละเอียดของตัวอย่าง เวลาที่วัด ระยะเวลาที่ใช้ในการวัด อุณหภูมิ ดัชนีการหักเหของแสง ความหนืดของตัวอย่าง ความเข้มของอนุภาค ความยาวคลื่นของเลเซอร์ และมุมกระเจิง เพราะจะต้องนำค่าเหล่านี้ไปใช้ในการคำนวณขนาดของอนุภาค
5. ตรวจสอบความเข้มเฉลี่ยของแสงกระเจิงของตัวอย่างโดยควรมีค่าสูงกว่าความเข้มเฉลี่ยของแสงกระเจิงตัวกลาง วัดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งและบันทึกผล
6. บันทึกค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค และค่า Zeta Potential

3.3.6.2 การทดสอบหมู่ฟังก์ชันของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy

1. วัด Background Spectrum ของ FT-IR Spectrophotometer
2. บดผลึกนาโนเซลลูโลสให้ละเอียดและนำไปวางบน Laminate-Diamond Crystal
3. กดสารตัวอย่างให้แนบสนิทกับ Laminate-Diamond Crystal ด้วยหัวกดควบคุมความดัน
4. วัด Sample Spectrum ในช่วง 4000–500 cm^{-1} โดยใช้ 32 Co-Addition Scans เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงโมเลกุลที่มีอัตราส่วนของ Signal-to-Noise Ratio ที่เหมาะสม
5. เมื่อเสร็จแล้วทำความสะอาด Laminate-Diamond Crystal ด้วยอะซิโตนแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

3.3.6.3 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM)

1. ปรับความเข้มข้นของสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลสให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้ผลึกนาโนเซลลูโลสเกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) เมื่อสารตัวอย่างแห้งอยู่บน Carbon-Coated Copper grid
2. นำสารแขวนลอยที่ปรับความเข้มข้นแล้วไปหยดลงบน Carbon-Coated Copper grid จากนั้นทำให้แห้งใน Desiccator อย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนนำไปวิเคราะห์ เพื่อไม่ให้ความชื้นรบกวนการถ่ายภาพด้วย Transmission Electron Microscopy

3.3.6.4 การทดสอบความเป็นผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ความเป็นผลึกของสารตัวอย่างจะวัดด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction โดยใช้เครื่อง Bruker AXS Model D8 Discover X-Ray Diffractometer แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube) คือ Cu Kα ที่มีความยาวคลื่น 0.1545 nm ความต่างศักย์อยู่ที่ 40 kV และ กระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 40 mA กำหนดความกว้างของ Slit คงที่ที่ 0.2 mm ตัวตรวจวัด (Detector) จะใช้ Eiger_2R 250K การวัดสารตัวอย่างที่เป็นผงแห้งของผลึกนาโนเซลลูโลสและแบคทีเรียเซลลูโลสเริ่มต้นจะใช้มุมหักเห (2θ) ในช่วง 3– 60° โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.02000°C ค่าดัชนีความเป็นผลึกจะคำนวณจากโปรแกรม DIFFRAC.EVA (Version 6.0.0.7), Bruker AXS โดยใช้สมการทางด้านล่าง

$$\text{Crystallinity (\%)} = \frac{\text{Crystalline Area} \times 100\%}{\text{Total Area}}$$

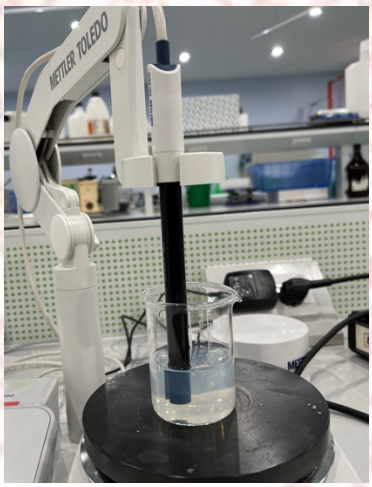
โดยที่ Crystallinity (%) คือ ค่าดัชนีความเป็นผลึก

Crystalline area คือพื้นที่ใต้พีค ณ ตำแหน่ง 2θ = 22.5-22.8° ที่แสดงถึงระนาบการหักเห [200] ของผลึกเซลลูโลส [34]

Total Area คือ พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดที่เกิดใน Diffractogram

3.3.6.5 การหาปริมาณประจุลบบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสในรูปแบบหมู่ซัลเฟตด้วยวิธีการไทเทรตด้วยไฟฟ้า (Conductometric Titration)

1. ชั่งผลึกนาโนเซลลูโลสในรูปแบบผง 0.5 g เติมน้ำปราศจากไอออน 30 mL ใส่แท่งแม่เหล็กและกวนเป็นเวลา 5 นาที นำไป Sonicated Probe 750 watt ต่อเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของผลึกนาโนเซลลูโลสในน้ำ
2. เติมสารละลาย 20 mM HCl ปริมาตร 15 mL กวนเป็นเวลา 5 นาที เพื่อเติมโปรตรอนให้กับหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์อิสระที่อาจมีอยู่บนผลึกนาโนเซลลูโลส และนำไปกระจายตัวใน Sonicated Bath ความถี่ 37 kHz เป็นเวลา 10 นาที
3. ไทเทรตด้วยวิธี Conductometric Titration โดยกวนสารแขวนลอยตลอดเวลา วัดค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น เติม 20 mM NaOH ครั้งละ 0.5 mL จนปริมาตรที่ใช้ทั้งหมดเป็น 11 mL หลังจากนั้นเติม 20 mM NaOH ครั้งละ 0.1 mL เพื่อหาจุด Neutralization จนปริมาตรสุดท้ายของ 20 mM NaOH เป็น 20 mL



รูปที่ 3.1 การไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส

4. คำนวณหาปริมาณหมู่ซัลเฟต โดยใช้สมการ 3.1

$$S = \frac{\Delta V_{NaOH} C_{NaOH}}{m_{susp} C_{susp}} \qquad (3.1)$$

โดย S = ปริมาณหมู่ซัลเฟต (mmol/kg Cellulose)

ΔV_{NaOH} = ผลต่างของปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ระหว่างจุดตัดแรกและจุดตัดที่สอง

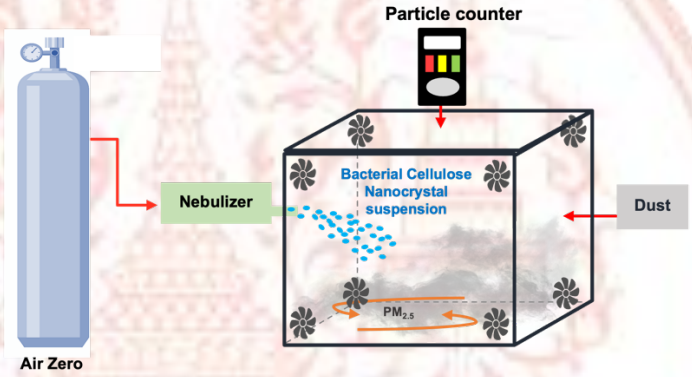
C_{NaOH} = ความเข้มข้นของ NaOH ที่ใช้ (mM)

m_{susp} = มวลของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส (kg)

C_{susp} = ความเข้มข้นของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส

3.3.6.6 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส

การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสจะใช้วิธีการฉีดพ่นแบบสเปรย์ ระบบการทดสอบประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังระบบการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วยผลึกนาโนเซลลูโลส

ระบบการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ มีองค์ประกอบดังนี้คือ

1. **ถังแก๊ส Air Zero** ใช้เป็นอากาศสะอาดในการสร้างละอองของสารแขวนลอยด้วย Nebulizer
2. **Test Chamber** เป็นกล่องในการกักเก็บฝุ่น $PM_{2.5}$ เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่มีความเข้มข้นและสัณฐานวิทยาแตกต่างกัน ฝุ่น $PM_{2.5}$ สร้างขึ้นจากควันธูปเนื่องจากมี $PM_{2.5}$ เป็นองค์ประกอบสูงถึง 99.88% [41] Test Chamber เป็นกล่องอะคริลิกสี่เหลี่ยมขนาด 40×40×40 cm^3 มีฝาเปิดด้านหน้ากล่องเพื่อกำจัดฝุ่นออกหลังจากทดสอบเสร็จในแต่ละครั้ง ภายในกล่องมีการติดตั้งพัดลมจำนวน 8 ตัว เพื่อช่วยในการไหลเวียนของอากาศระหว่างการทดสอบและมีการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วย Particle Counter
3. **Nebulizer** ทำหน้าที่ฉีดพ่นละอองฝอย โดยใช้ VIXONE™ Nebulizer Mask Kit เป็นตัวสร้างละอองฝอยที่มีขนาดละอองฝอยโดยเฉลี่ย 2.4 ไมโครเมตร [42]

4. **เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle counter)** ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ภายใน Test Chamber

ขั้นตอนในการทดสอบ PM Removal Efficiency (%) ของผลึกนาโนเซลลูโลส มีดังนี้

1. วัดปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ของอากาศก่อนการทดสอบภายใน Test Chamber เพื่อวัดปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่เป็นพื้นหลัง (Background) ของการทดสอบ การวัดจะทำทั้งหมด 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย

2. ทำให้ Test Chamber เป็นระบบปิด พร้อมกับเปิดพัดลมตลอดเวลาเพื่อช่วยการกระจายตัวของฝุ่น และสร้างฝุ่น $PM_{2.5}$ จากการจุดธูป 1 ดอกเป็นเวลา 100–105 วินาที ในการทดลองจะควบคุมความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 250.5–300 $\mu g/m^3$ เพื่อให้คุณภาพอากาศอยู่ในระดับ Hazardous ตามมาตรฐานของ US AQI [43]

3. สร้างละอองฝอยของสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยการเปิด Air Zero ผ่าน Nebulizer ที่มีสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลสที่มี Solid Content เท่ากับ 8.13 g/L หรือ 0.81% (w/v) ปริมาตร 2 mL บรรจุอยู่ ควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ 5 L min^{-1} อัตราการสร้างละออง (Nebulization Rate) อยู่ที่ 0.4 mL/min ระยะเวลาการฉีดละอองฝอยอยู่ที่ 5 นาที ปล่อยละอองฝอยให้อยู่ใน Test Chamber เป็นเวลา 10 นาที และวัดความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ภายใน Test Chamber ด้วย Particle Counter เป็นเวลาอีก 5 นาที

4. สามารถคำนวณ PM Removal Efficiency (%E) ได้จากสมการ

$$\%E = \frac{[PM_{2.5}\,(\text{Before})\text{-Background } PM_{2.5}]-[PM_{2.5}(\text{After})\text{-Background } PM_{2.5}]}{[PM_{2.5}(\text{Before})\text{-Background } PM_{2.5}]} \times 100\% \quad (3.2)$$

โดยที่ %E คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของผลึกนาโนเซลลูโลส

$PM_{2.5}$ (Before) คือ ปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ใน Test Chamber ก่อนฉีดสเปรย์ที่มีสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส ในหน่วย $\mu g/m^3$

$PM_{2.5}$ (After) คือ ปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ใน Test Chamber หลังฉีดสเปรย์ที่มีสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส ในหน่วย $\mu g/m^3$

Background $PM_{2.5}$ คือ ปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ในอากาศปกติก่อนการทดสอบ ในหน่วย $\mu g/m^3$

บทที่ 4
ผลการวิจัย

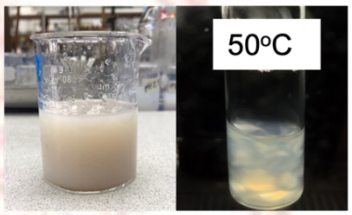
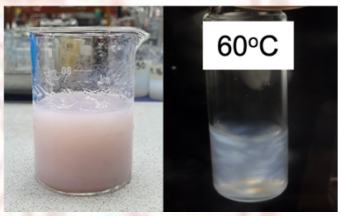
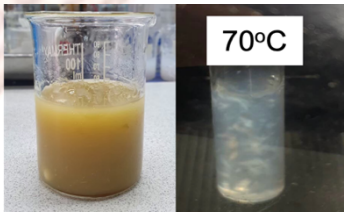
4.1 การสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลส

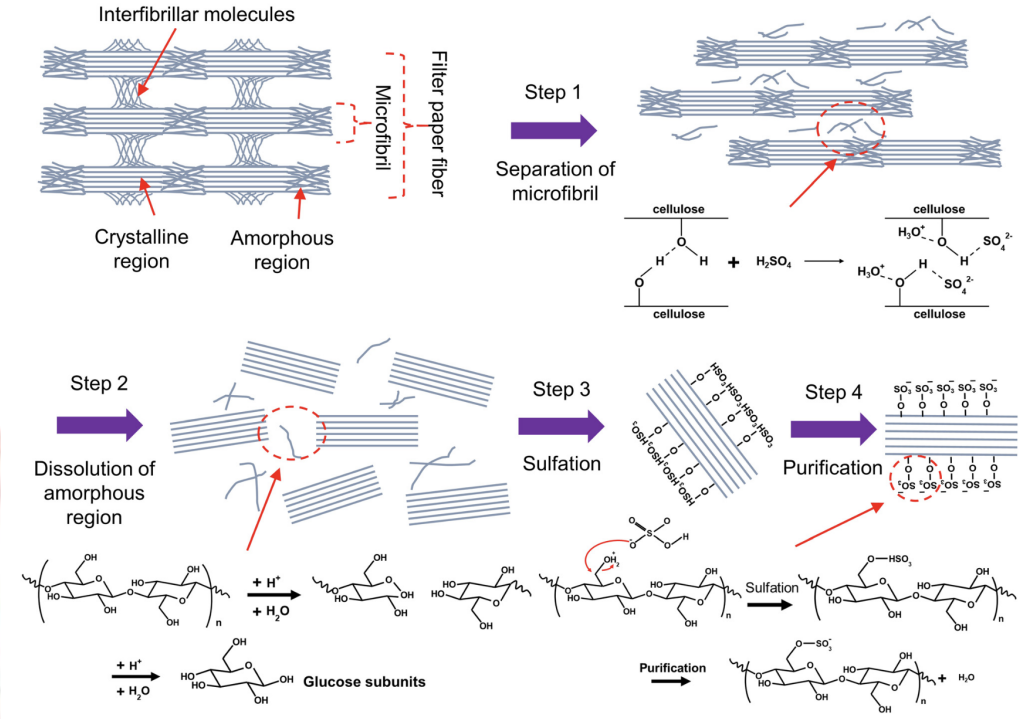
กระบวนการสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าวจะใช้วิธีการแยกสลายด้วยกรดซัลฟิวริก ทดลองปรับอุณหภูมิในการสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลสเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ในช่วง 50–70°C โดยกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวุ้นมะพร้าวที่ซับให้แห้งและปริมาตรของกรดซัลฟิวริกให้คงตัวอยู่ที่ 1:10 ความเข้มข้นของกรดคงตัวที่ 50% (w/v) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคงตัวที่ 105 นาที เงื่อนไขที่เหมาะสมจะพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของสารผลิตภัณฑ์หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50°C สามารถย่อยวุ้นมะพร้าวเป็นผลึกนาโนเซลลูโลสได้เป็นบางส่วน สังเกตได้จากการเกิดริ้วของอนุภาคภายใต้แสงโพลาไรซ์ แต่ยังมีวุ้นมะพร้าวขนาดใหญ่หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ และมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 60°C หลังหยุดปฏิกิริยาด้วยน้ำเย็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีขาวขุ่น และสังเกตเห็นริ้วของอนุภาคในสารแขวนลอยเมื่อส่องผ่านด้วยแสงโพลาไรซ์ ริ้วของอนุภาคเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการหักเหสองแนว (Birefringence) สามารถบ่งบอกเบื้องต้นได้ว่าอนุภาคที่ได้เป็นผลึกนาโนเซลลูโลส [44] อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากหยุดปฏิกิริยาด้วยน้ำเย็นสังเกตเห็นริ้วของอนุภาคหรือปรากฏการณ์หักเหสองแนวเช่นเดียวกัน แต่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะสีน้ำตาลขุ่น สันนิษฐานว่าแบคทีเรียเซลลูโลสถูกย่อยด้วยกรดที่มากเกินไป อาจเกิดการก่อตัวของโอลิโกแซคคาไรด์ [45] , กลูโคส [46] และอนุพันธ์ของออกซิเดชันกลูโคส [47]

กลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาแยกสลายด้วยกรด (Acid Hydrolysis) ของเส้นใยเซลลูโลสเป็นผลึกนาโนเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 4.1 ในขั้นแรก H^+ และ SO_4^{2-} จากกรดจะแทรกเข้าสู่เส้นใยของเซลลูโลสบริเวณ Interfibrillar Molecules พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลระหว่างสายโซ่เซลลูโลสจะถูกทำลาย เส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสจะถูกแยกออกเป็น Microfibrils ถ้าหากไม่เกิดการแยกของ Microfibrils ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรดจะเกิดขึ้นบนผิวด้านนอกของมัดเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น [48] ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการย่อยสายโซ่เซลลูโลสที่เป็นสายยาวให้มีขนาดสายโซ่ที่สั้นลง กรดจะเลือกเข้าทำปฏิกิริยาในส่วนที่เป็นอสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสก่อน [28] ออกซิเจนบริเวณพันธะ β-1,4-Glycosidic Bonds จะให้คู่อิเล็กตรอนแก่โปรตอน (H^+) เกิดการแยกสลายของพันธะ C-O และได้สารมัธยันตร์เป็น Cyclic Carbonium Ion ซึ่งมีโครงสร้างแบบ

Half-Chair ในขั้นตอนสุดท้ายน้ำตาลอิสระและโปรตรอนถูกปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วหลังจากมีการเติมน้ำ [49]

ตารางที่ 4.1 การปรับอุณหภูมิของปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผลึกนาโนเซลลูโลส

ครั้งที่	ความเข้มข้นของ H_2SO_4 (% (w/v))	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ลักษณะทางกายภาพ	ภาพแสดงตัวอย่างหลังจากการแยกสลายด้วยกรด
1	50	50	105	วุ้นมะพร้าวย่อยไม่หมดบางส่วน มีขนาดใหญ่ สีเป็นสีขาวขุ่น เห็นเป็นริ้วของอนุภาค	
2	50	60	105	สารแขวนลอยที่ได้มีลักษณะขาวขุ่นแต่เมื่อหยุดปฏิกิริยาด้วยน้ำเย็น จะได้สารแขวนลอยสีขุ่นมีมีขนาดของวุ่นมะพร้าวที่ละเอียด และสังเกตเห็นริ้วของอนุภาค	
3	50	70	105	ของเหลวที่ได้มีลักษณะสีน้ำตาลขุ่นแต่เมื่อหยุดปฏิกิริยาด้วยน้ำเย็น จะได้ของเหลวสีขาวออกน้ำตาลใส วุ้นมะพร้าวบางส่วนย่อยเป็นน้ำตาลและเห็นริ้วของอนุภาค	



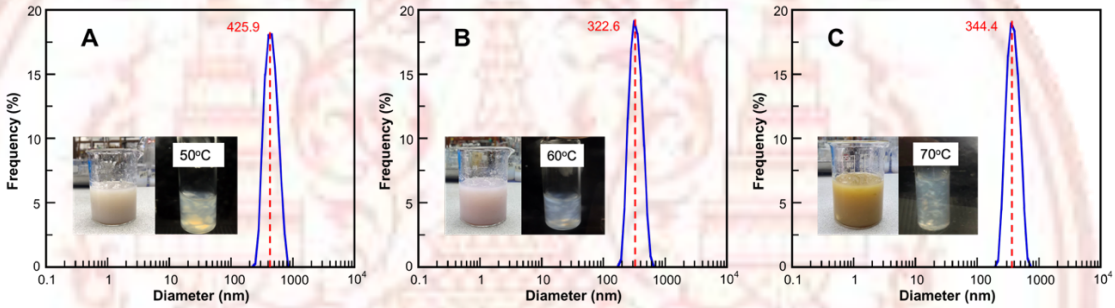
รูปที่ 4.1 กลไกระดับโมเลกุลของกระบวนการย่อยสลายด้วยกรดซัลฟิวริก [50]

4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering ผลที่ได้ พบว่าผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C และ 70°C มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 425.9 ± 17.52, 322.6 ± 9.73, และ 344.4 ± 17.63 nm ตามลำดับ ผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิ 50°C มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (รูปที่ 4.2A) คาดว่ามีเยื่อวุ้นมะพร้าวบางส่วนยังย่อยสลายไม่หมด ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60°C มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xichuan Zhai และคณะ [32] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 70°C ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าอนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60°C คาดว่าเยื่อเซลลูโลสถูกย่อยด้วยกรดที่มากเกินไป อาจเกิดการก่อตัวของโอลิโกแซคคาไรด์ [45] , กลูโคส [46] และอนุพันธ์ของออกซิเดชันกลูโคส [47]

การทดสอบประจุบนพื้นผิวด้วยเทคนิค Zeta Potential Analysis ของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60°C (BCNC) เปรียบเทียบกับผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) แสดงดังตารางที่ 4.2 BCNC มีค่า Zeta Potential โดยเฉลี่ยเท่ากับ −56.41 ± 1.92 mV สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vasconcelos และคณะ [30] ประจุลบบนผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการแยกสลายด้วยกรดซัลฟิวริกอาจเกิดจากหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ ($-O-SO_3^-$) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลส [51] หรือ Sulfation (รูปที่ 4.1) ระหว่างกรด

ซัลฟิวริกและหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลส ค่า Zeta Potentials ของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรมเฉลี่ยเท่ากับ −39.97 ± 3.04 mV ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า Zeta Potentials ที่ได้จาก BCNC เนื่องจาก ในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ของ CelluForce จะทำให้อยู่ในรูปแบบของโซเดียมฟอร์มก่อนถูกทำให้อยู่ในรูปแบบของผงแห้งด้วยกระบวนการพ่นแห้ง (Spray Drying) จึงทำให้ได้ค่า Zeta Potential ที่สูงกว่า สอดคล้องกับค่า Conductivity ที่วัดได้ของ CelluForce เท่ากับ 0.279 mS/cm ค่า Polydispersity Index ของ CelluForce ที่วัดได้มีค่าสูงบ่งบอกถึงการกระจายตัวของขนาดที่กว้าง มีความหลากหลายของขนาด เมื่อเปรียบเทียบกับ BCNC ที่มีค่า Polydispersity Index วัดได้เท่ากับ 0.268 ± 0.018 บ่งบอกถึงการกระจายตัวของขนาดที่แคบ อนุภาคที่ได้มีขนาดสม่ำเสมอ เป็นผลมาจากวิธีการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์ของตัวอย่างที่แตกต่างกัน



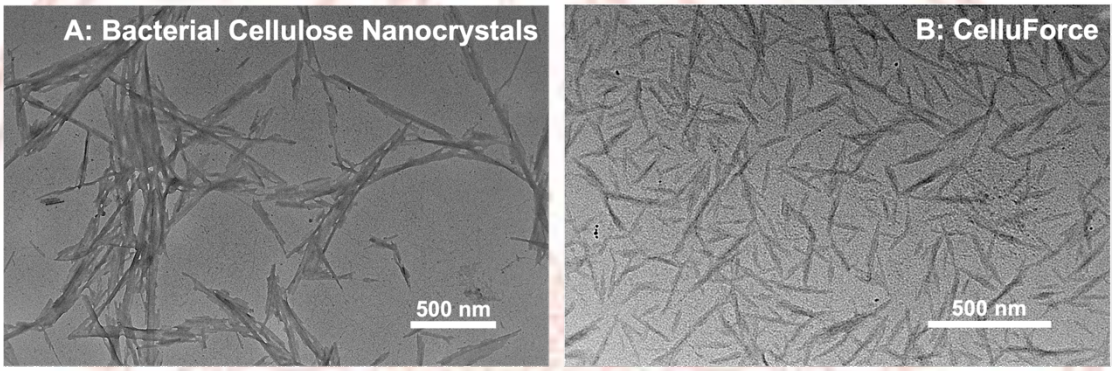
รูปที่ 4.2 ขนาดผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 50°C (A), 60°C (B) และ 70°C (C)

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาค, Polydispersity Index, ค่า Zeta Potentials และ Conductivity ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้และผลึกที่ได้จากอุตสาหกรรม

Type of Cellulose	Particle Size (nm)	Polydispersity Index	Zeta Potential (mV)	Conductivity (mS/cm)
Bacterial Cellulose Nanocrystal	342.0±6.55	0.268±0.018	−56.41±1.92	0.001
CelluForce	195.03±3.00	0.475±0.03	−39.97±3.04	0.279

4.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM)

สัณฐานวิทยาของผลึกนาโนเซลลูโลสสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค TEM ภาพจากเทคนิค TEM แสดงให้เห็นถึงขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคผลึกนาโนเซลลูโลส BCNC และผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 ผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้มีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเข็ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vasconcelos และคณะ [30] ที่ผลิตผลึกนาโนเซลลูโลสจากเยื่อวุ้นมะพร้าว ผลึกนาโนเซลลูโลสจากอุตสาหกรรมมีลักษณะรูปทรงคล้ายเข็มเช่นเดียวกันและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

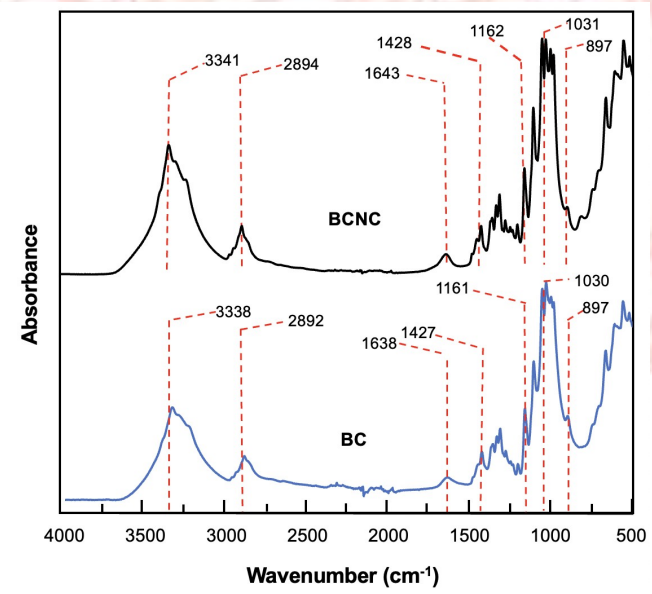


รูปที่ 4.3 TEM Micrographs ของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากวุ้นมะพร้าว (A) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (B)

4.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy

การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วย FT-IR Spectroscopy ใช้สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันของแบคทีเรียเซลลูโลสเริ่มต้น (BC) และผลึกนาโนเซลลูโลสจากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด (BCNC) แสดงดังรูปที่ 4.4 และหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสสรุปไว้ในตารางที่ 4.3 FT-IR Spectra ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 3341 cm^{-1} และ 3338 cm^{-1} สำหรับ BCNC และ BC ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึง O–H stretching vibrations ของหมู่ฟังก์ชัน CH_2–OH (ไฮดรอกซิล) ในเซลลูโลส FT-IR Spectrum ของ BCNC แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงที่มีความเข้มสูงกว่าเมื่อเทียบกับ BC อาจเป็นเพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงของ BCNC มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวที่เปิดออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอกเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้นี้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยก่อนหน้า [30] ค่าการดูดกลืนแสงที่ 2892–2894 cm^{-1} แสดงถึง C–H stretching vibrations สาเหตุที่ค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งนี้ของ BCNC สูงกว่า BC เนื่องจาก

สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสถูกตัดทำให้ C–H ที่อยู่ในโครงสร้างเปิดออก ความเข้มของค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งนี้จึงเพิ่มสูงขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงที่ 1643 และ 1638 cm^{-1} แสดงถึง O–H bending ซึ่งมาจากโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับอยู่ภายในโมเลกุลของเซลลูโลส [52] ค่าการดูดกลืนแสง ณ 1427–1428 cm^{-1} คือ C–H bending vibrations [30, 52] ค่าการดูดกลืนแสง ณ 1161–1162 cm^{-1} คือ C–O–C stretching vibrations ในโครงสร้างสายโซ่เซลลูโลส [53] ค่าการดูดกลืนแสง ณ 1030–1031 cm^{-1} แสดงถึง C–H stretching และ C–O stretching vibrations ในวงของโพลีแซคคาไรด์ [52,54] ค่าการดูดกลืนแสงที่ 897 cm^{-1} แสดงถึง β-1,4-glycosidic linkages ระหว่าง glucose units ในเซลลูโลสซึ่งแสดงใน FT-IR Spectra ของทั้ง BC และ BCNC ค่าการดูดกลืนแสงที่ปรากฏในผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [30, 52-54] สำหรับหมู่ซัลเฟตที่ไม่สามารถแสดงได้ในแถบการดูดกลืนแสงของผลึกนาโนเซลลูโลส เนื่องจากถูกบดบังด้วยค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชัน C–O stretching และ C–H rocking vibrations ของวง pyranose ณ ตำแหน่ง 1050 cm^{-1} โดยหมู่ซัลเฟตแสดงค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดที่ค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 1000–900 cm^{-1} ซึ่งเป็น Asymmetric Stretching Vibrations ของหมู่ซัลเฟต เช่น S=O stretching และ S–O bending [51-56] FT-IR Spectra ของตัวอย่างทั้งสองมีรูปแบบของค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากวุ้นมะพร้าวยังคงรักษาองค์ประกอบของเซลลูโลสไว้ได้อยู่ แม้ว่าจะผ่านปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรดแล้วก็ตาม



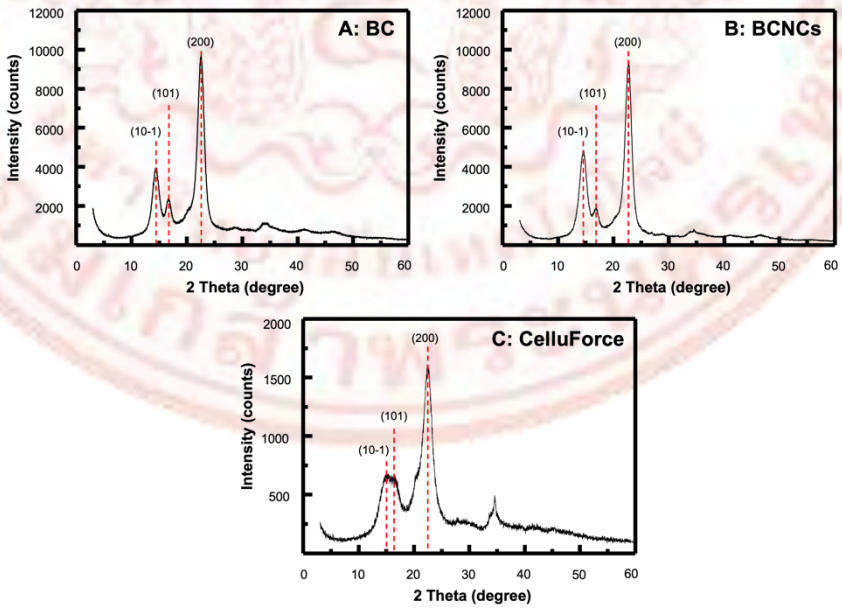
รูปที่ 4.4 FT-IR Spectra ของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าว (BC) และผลึกนาโนเซลลูโลส (BCNC) ที่สังเคราะห์ได้จากวุ้นมะพร้าว

ตารางที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นกับแบคทีเรียเซลลูโลสเริ่มต้นและผลิตภัณฑ์ผลึกนาโนเซลลูโลสจากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยกรด

Wavenumber (cm^{-1})		หมู่ฟังก์ชัน
BC	BCNC	
3338	3341	O–H stretching vibrations ของ CH_2–OH (ไฮดรอกซิล) ในเซลลูโลส
2892	2894	C–H stretching vibrations ในเซลลูโลส
1638	1643	O–H bending vibrations
1427	1428	C–H bending
1161	1162	C–O–C stretching
1030	1031	C–O stretching และ C–H rocking vibrations
897	897	C–O–C glycosidic bonds

4.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

เทคนิค X-ray Diffraction หรือ XRD ใช้สำหรับตรวจสอบระดับความเป็นผลึกของผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้จากวุ้นมะพร้าวเปรียบเทียบกับผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.5 X-ray Diffraction Patterns ของวุ้นมะพร้าว (BC) (A) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากวุ้นมะพร้าว (BCNC) (B) และผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) (C)

ตารางที่ 4.4 มุมหักเห ค่าความเข้มของพีค ณ มุมหักเห ค่าดัชนีความเป็นผลึกของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสและผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากทางการค้า

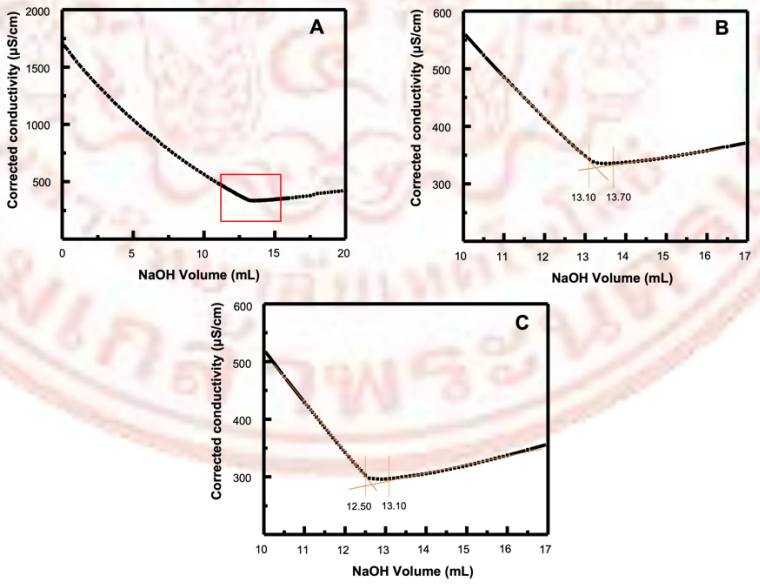
Sample	(2θ, Intensity (Counts)			Crystallinity (%)	Amorphous (%)
	(10–1)	(101)	(200)		
BC	(14.46, 3931)	(16.75, 2369)	(22.53, 9673)	56.0	44.0
BCNCs	(14.47, 3986)	(16.63, 1405)	(22.62, 7540)	73.9	26.1
CelluForce	(15.04, 671)	(16.46, 658)	(22.40, 1601)	48.6	51.4

X-ray Diffraction Patterns ของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส (BCNCs) ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวุ้นมะพร้าวพบการเลี้ยวเบนที่ 2θ เท่ากับ 14.47°, 16.63°, 22.62° ซึ่งเป็นของระนาบ (10-1), (101), และ (200) ตามลำดับ [34] ที่ระนาบ (10-1) และ (101) แสดงส่วนอสัณฐานของเซลลูโลส ระนาบ (200) แสดงส่วนที่เป็นผลึกของเซลลูโลส หลังจากที่วุ้นมะพร้าวผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยกรดซัลฟิวริกได้เป็นผลึกนาโนเซลลูโลสแล้ว พบว่า ค่าร้อยละของส่วนอสัณฐานลดลงจาก 44.0% เป็น 26.1% บ่งบอกถึงส่วนอสัณฐานของวุ้นมะพร้าวถูกทำลายออกไปในระหว่างกระบวนการแยกสลายด้วยกรด เมื่อคำนวณดัชนีความเป็นผลึกของผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากวุ้นมะพร้าว พบว่า ดัชนีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นจาก 56.0% เป็น 73.9% บ่งบอกถึงการมีสัดส่วนของผลึกเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ ค่าดัชนีความเป็นผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) เท่ากับ 48.6% ซึ่งมีค่าดัชนีความเป็นผลึกน้อยกว่าผลึกนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้ อาจเกิดจากการทำให้อยู่ในรูปแบบของผงด้วยวิธีการพ่นแห้ง ทำให้ผลึกไม่ได้เกิดการเรียงตัวอย่างช้า ๆ มีผลึกบางส่วนที่เกิดการจับตัวกัน [57] ค่าดัชนีความเป็นผลึกที่วัดได้จึงมีค่าน้อย

4.6 การหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลส

การหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสในรูปแบบของ Sulfate Half-Ester Groups ($-OSO_3^-$) ด้วยวิธีการไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้า (Conductometric Titration) โดยหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติเป็นกรดเทียบกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง กราฟที่ได้จากวิธีการไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้าของผลึกนาโนเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 4.6 จะสังเกตเห็นค่าการนำไฟฟ้าลดลงในช่วงแรกที่ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0 ถึง 10 mL เกิดจากโปรตอนส่วนเกินที่ไม่ถูกเข้าคู่กับหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ถูกใช้ไป เมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ลดลงเล็กน้อยบ่งบอกถึงการเข้าสู่จุดสมมูล ณ บริเวณที่ใกล้จุดสมมูลนี้ โปรตรอนจากหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ที่อยู่บนพื้นผิวของผลึก

นาโนเซลลูโลสจะถูกดึงออกมาสะเทินกับไฮดรอกไซด์ไอออน โปรตรอนที่ถูกใช้ไปจะถูกแทนที่ด้วยโซเดียมไอออน หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติม NaOH เข้าไปมากเกินพอ ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากโซเดียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนที่มีปริมาณมากเกินพอ [35] ผลของวิธีการไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้าจะให้ข้อมูลประจุที่พื้นผิวในรูปแบบปริมาณหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ต่อหน่วยน้ำหนักของผลึกนาโนเซลลูโลส ผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการหาปริมาณหมู่ซัลเฟต (รูปที่ 4.6B) พบว่ามีประจุลบบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) ในรูปแบบหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ เฉลี่ยเท่ากับ 252.3 ± 49.7 mmol/kg เซลลูโลส ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้า [37] ดังนั้นวิธีการหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีการไทเทรตด้วยไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลส (BCNCs) ในรูปแบบของหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ได้ หลังจากการไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้าพบว่า ผลึกแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสมีปริมาณประจุลบบนพื้นผิวในรูปซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์ เฉลี่ยเท่ากับ 87.72 ± 14.32 mmol/kg เซลลูโลส สอดคล้องกับงานวิจัย [58] ปริมาณหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์บนพื้นผิวผลึกนาโนเซลลูโลสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกระบวนการสกัดและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสกัด เช่น ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแยกสลายด้วยกรด และอัตราส่วนระหว่างกรดซัลฟิวริกต่อเซลลูโลส เป็นต้น ทำให้ได้ปริมาณปริมาณหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์บนพื้นผิวที่ต่างกัน



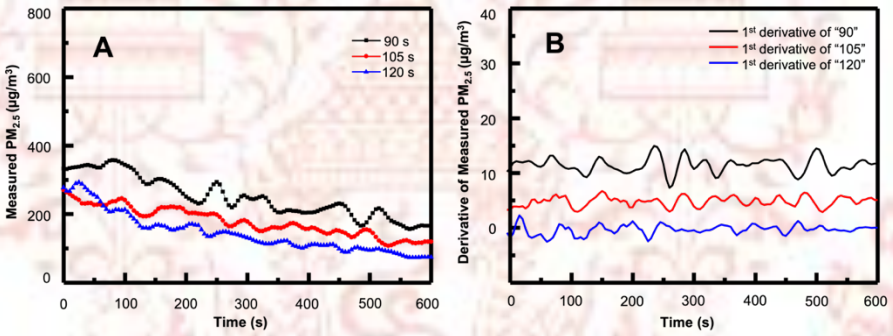
รูปที่ 4.6 การไทเทรตด้วยค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (A) และการหาจุดสมมูล (B) และ การหาจุดสมมูลของผลึกนาโนเซลลูโลสจากอุตสาหกรรม (C)

4.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ของผลึกนาโนเซลลูโลส

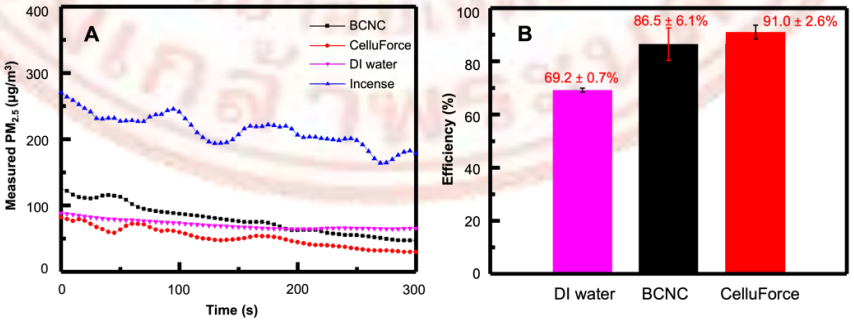
การทดสอบความสามารถในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส โดยการฉีดสเปรย์ละอองฝอยของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส และวัดประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในรูปแบบของ %Efficiency หรือ %E ในขั้นตอนแรกจะหาภาวะในการกักเก็บฝุ่นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของฝุ่นภายในกล่องทดสอบอยู่ในช่วง 200–350 $\mu g/m^3$ ที่อยู่ในระดับอันตรายต่อสุขภาพ (Unhealthy) ตามมาตรฐาน US-AQI [43] โดยกำหนดระยะเวลาในการกักเก็บฝุ่น $PM_{2.5}$ จากควันธูปเป็น 90, 105, และ 120 วินาที ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 กราฟความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่วัดได้มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง เป็นผลมาจากการไหลเวียนของอากาศที่อยู่ภายในกล่องทดสอบเข้าไปยังตัววัด หรือ Particle Counter ไม่สม่ำเสมอ ค่าความเข้มข้นฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงอย่างคงที่อาจเกิดจากอนุภาคฝุ่นสามารถกระจายตัวอยู่ในอากาศได้ดีมากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการกักเก็บฝุ่นเพิ่มขึ้นเป็น 120 วินาที มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุดจากกราฟ Derivative ในรูป 4.7B เมื่อสังเกตค่าความเข้มข้นที่วัดได้เส้นสีน้ำเงินในรูป 4.7A จะพบว่ามีการลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเกิดจากการมีอนุภาคฝุ่นมากขึ้น ทำให้มีโอกาสที่จะชนกันและเกาะที่ผนังกล่องทดสอบ และเป็นตัวเริ่มต้นให้อนุภาคฝุ่นอื่นๆ มาเกาะต่อไป จึงเลือกใช้ภาวะกักเก็บฝุ่นที่ระยะเวลา 105 วินาทีซึ่งมีกราฟ Derivative เป็นเส้นที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงคงที่ บ่งบอกถึงการกระจายตัวของฝุ่นที่สม่ำเสมอ และมีความเข้มข้นของค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่วัดได้อยู่ในช่วงที่ต้องการ เมื่อได้ระยะเวลาในการกักเก็บฝุ่นที่เหมาะสมจึงทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ จากสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน โดยใช้สารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดจากวุ้นมะพร้าว (BCNC) ด้วยวิธีการแยกสลายด้วยกรด เปรียบเทียบกับสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่มาจากอุตสาหกรรม (CelluForce) ที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ 1.0% (w/v) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อทดสอบทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ โดยใช้การฉีดด้วยน้ำกลั่น ค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่วัดได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ลดลงเล็กน้อยอย่างคงที่ เกิดจากการที่ยังมีอนุภาคฝุ่นกระจายตัวภายในอากาศ คำนวณประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 65.76 ± 0.8% เมื่อทดลองเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วยการฉีดสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส BCNC และ CelluForce ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 86.5 ± 6.1% และ 91.0 ± 2.6% ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95% ของประสิทธิภาพที่ได้ด้วยการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ρ<0.05) ดังนั้นจึงสามารถใช้ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรมทดแทนได้

ทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ โดยการฉีดพ่นผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรมเพิ่มเติมที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 1%, 2%, และ 4% (w/v) ที่ภาวะการทดลองเดียวกัน ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพที่ได้จากการฉีดสเปรย์สารแขวนลอย

CelluForce ที่ความเข้มข้น 1%, 2% และ 4% (w/v) ที่วัดได้เท่ากับ 91.6 ± 1.6%, 93.1 ± 2.7% และ 85.0 ± 2.5% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95% ของประสิทธิภาพที่ได้ข้างต้นด้วยการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของข้อมูล (ρ>0.05) จึงวิเคราะห์ผลความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของข้อมูล 2 กลุ่มเปรียบเทียบกัน พบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการฉีดพ่น CelluForce ที่ความเข้มข้น 1% (w/v) และ 2% (w/v) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ρ<0.05) บ่งบอกถึงสามารถใช้ CelluForce ที่ความเข้มข้น 1% (w/v) หรือ 2% (w/v) ทดแทนกันได้ เป็นผลมาจากปริมาณของผลึกในสารแขวนลอยมีใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการกระจายตัวของผลึกในหยดน้ำคล้ายคลึงกัน ขนาดของละอองใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของผลึกนาโนเซลลูโลสเป็น 4% (w/v) พบว่า ประสิทธิภาพที่ได้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ρ>0.05) กับ 1% และ 2% (w/v) อาจเกิดจากปริมาณผลึกที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สารแขวนลอยมีความหนืดเล็กน้อย ผลึกนาโนเซลลูโลสกระจายตัวในหยดน้ำได้ไม่ดี ประสิทธิภาพที่วัดได้จึงลดลง

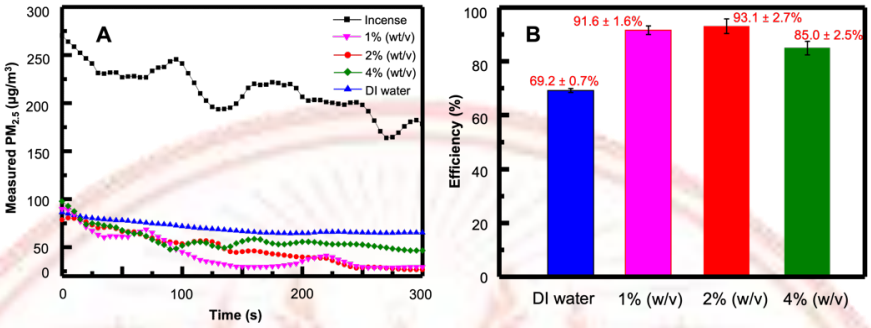


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงเวลาในการทดสอบระยะเวลาในการกักเก็บฝุ่น $PM_{2.5}$ จากควันธูปที่ 90, 105 และ 120 วินาที (A) และกราฟอนุพันธ์ของผลการทดสอบระยะเวลาในการกักเก็บฝุ่น (B)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ เปรียบเทียบระหว่างน้ำกลั่น (DI Water) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ (BCNC) และผลึกนาโนเซลลูโลสจากอุตสาหกรรม

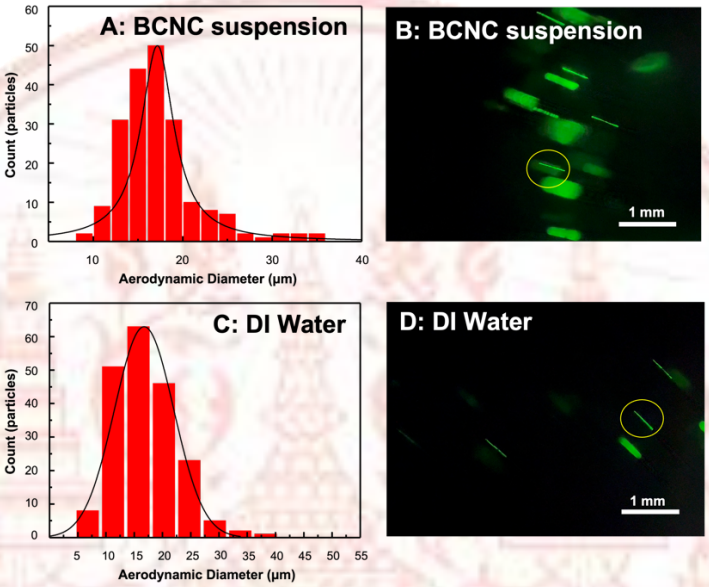
(CelluForce) (A) และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่วัดได้ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส (B)



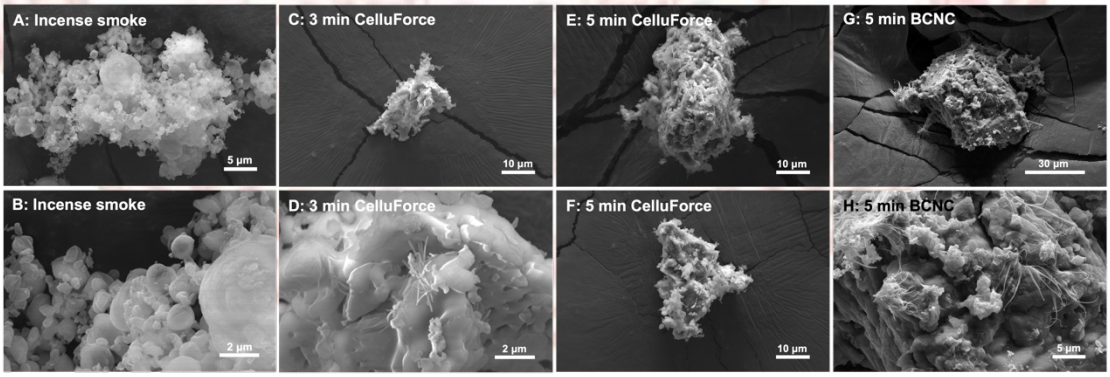
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ เปรียบเทียบระหว่างน้ำกลั่น (DI Water) ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จากอุตสาหกรรม (CelluForce) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (A) และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่วัดได้ของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (B)

ประสิทธิภาพที่ได้จากการฉีดสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสมากกว่าการฉีดด้วยน้ำกลั่นในทุกความเข้มข้น คาดว่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากผลึกนาโนเซลลูโลส เกิดจากกลไกการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่อาศัยขนาดของละอองฝอยและอันตรกิริยาระหว่างประจุลบของหมู่ซัลเฟตฮาล์ฟเอสเทอร์บนพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสและพื้นผิวของอนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น C=O, C–O และ C–N [7] จากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของละอองสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสมีขนาดประมาณ 16.0 μm ด้วยเทคนิค Optical Laser Scattering (รูปที่ 4.10) และอนุภาคฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 μm และพิสูจน์กลไกการดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ทางกายภาพเพิ่มเติมด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) หลังจากฉีดพ่นสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่มีฝุ่น $PM_{2.5}$ กระจายอยู่ในกล่องทดสอบ (รูปที่ 4.11) พบอนุภาคระดับไมโครเมตร มีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [59] และมีบริเวณที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวปะปนอยู่ คล้ายกับลักษณะของผลึกนาโนเซลลูโลสอยู่บริเวณด้านนอกของอนุภาค อาจเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคฝุ่นกับผลึกนาโนเซลลูโลสในอากาศซ้ำ ๆ จนกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ และสามารถเห็นพฤติกรรมนี้ได้ทั้งการฉีดพ่นด้วยสารแขวนลอย CelluForce (รูป 4.11D) และสารแขวนลอย BCNC (รูป 4.11H) ดังนั้นกลไกที่น่าจะเป็นไปได้หลังจากการฉีดละอองฝอยดังรูปที่ 4.12 เมื่อละอองน้ำขนาดระดับไมโครเมตรที่มีอนุภาคผลึกนาโนเซลลูโลสกระจายตัวอยู่ ถูกฉีดพ่นเข้าไปในกล่องทดสอบและเกิดการกระจายตัว อนุภาคจะเข้าไปชนกับฝุ่น $PM_{2.5}$ ในรูปแบบสุ่ม ขั้นแรกเกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคผ่านการชนกันด้วยแรงเฉื่อย และการผลักกันของอนุภาค BCNC

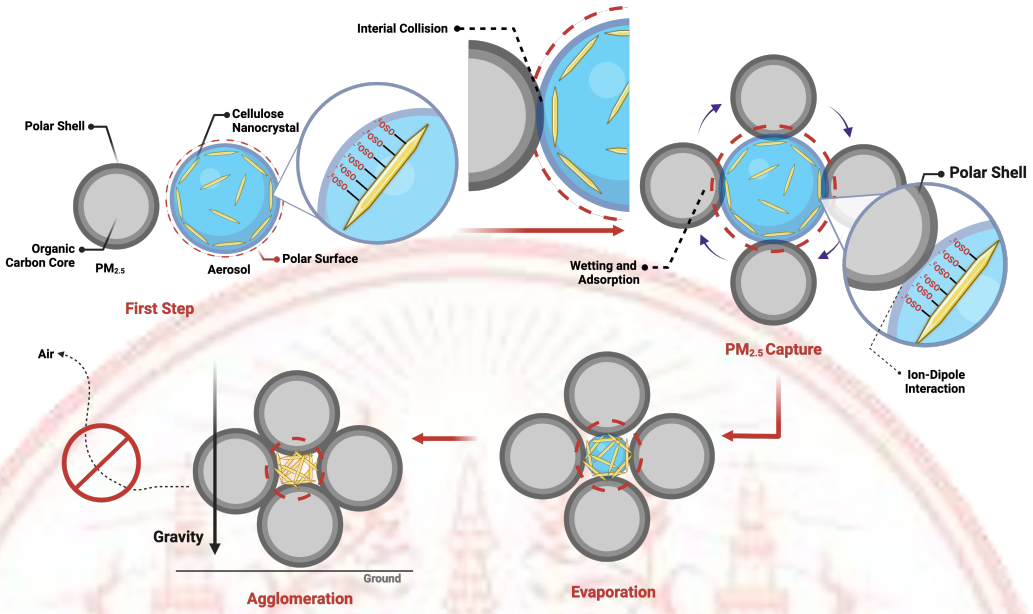
ภายในหยดทำให้เกิดพื้นผิวที่เป็นประจุลบกระจายตัวอยู่บริเวณขอบของหยดน้ำ [60] ช่วยเพิ่มการยึดเกาะทางกายภาพของพื้นผิวระหว่างหยดน้ำกับอนุภาค $PM_{2.5}$ ด้วยแรงไอออน–ไดโพล (Ion–Dipole Interaction) [61] เมื่ออนุภาค BCNC ที่มีประจุลบชนกับอนุภาค $PM_{2.5}$ อย่างต่อเนื่อง เกิดการเกาะติดบนพื้นผิวของหยดน้ำมากขึ้น เกิดการรวมตัวกันและตกลงสู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 4.10 กราฟการกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคจากการพ่นละอองของสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ (A) และน้ำกลั่น (C) และไมโครกราฟการกระเจิงแสงเลเซอร์ที่สเกลบาร์ = 1 mm ของละอองสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส (B) และละอองน้ำกลั่น (D)



รูปที่ 4.11 ภาพ FE-SEM ของอนุภาคฝุ่นที่ได้จากควันธูป (A,B) และอนุภาคฝุ่นหลังจากการฉีดพ่นสารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส CelluForce (C–F) และสารแขวนลอย BCNC (G,H) ที่เวลาต่างกัน



รูปที่ 4.12 กลไกการกำจัด $PM_{2.5}$ โดยใช้สารแขวนลอยผลึกนาโนเซลลูโลส

บรรณานุกรม

1. Greenpeace มลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ของเมืองในประเทศไทย ช่วงเดือนมกราคม-มิถุนายน พ.ศ.2560.

2. อินทรกำแหง, อ. ง. น. น., การจัดทำสถานการณ์ความรอบรู้ด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมในการป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพจากฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ของอาสาสมัครสาธารณสุขประจำหมู่บ้าน (อสม.) ในพื้นที่เมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ. **2563**.

3. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ ฝุ่น PM2.5 เป็นสารก่อมะเร็ง เสี่ยงเสียชีวิตสูงตายปีละ 7 หมื่นคน. https://resourcecenter.thaihealth.or.th.

4. กรมควบคุมมลพิษ, โครงการศึกษาแหล่งกeเนิดและแนวทางการจัดการฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล. **2561**.

5. กรมควบคุมมลพิษ ประกาศดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย พ.ศ.2566 ปรับค่าสารมลพิษเข้มข้นขึ้น ลงประกาศในราชกิจจานุเบกษาแล้ว. https://www.pcd.go.th/pcd_news/30028.

6 Kim, D.; Lee, S. J., Effect of water microdroplet size on the removal of indoor particulate matter. *Building and Environment* **2020,** *181*, 107097.

7. Liu, C.; Hsu, P.-C.; Lee, H.-W.; Ye, M.; Zheng, G.; Liu, N.; Li, W.; Cui, Y., Transparent air filter for high-efficiency PM2.5 capture. *Nature Communications* **2015,** *6* (1), 6205.

8. เขียวหวาน, ศ. ภ., การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณฝุ่นละอองเชิงมวล pm2.5 และ pm10 ในแนวดิ่งภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร. **2562**.

9. Agency, U. S. E. P. Particulate Matter (PM) Basics. https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics.

10. Xing, Y. F.; Xu, Y. H.; Shi, M. H.; Lian, Y. X., The impact of PM2.5 on the human respiratory system. *J Thorac Dis* **2016,** *8* (1), E69-74.

11. He, Y.; Liu, H.; Ying, W., Constructing Stable Polyvinyl Alcohol/Gelatin/Cellulose Nanocrystals Composite Electrospun Membrane with Excellent Filtration Efficiency for PM2.5. *Polymers* **2024,** *16*, 1656.

12. Zhang, Q.; Li, Q.; Young, T.; Harper, D.; Wang, S., A Novel Method for Fabricating an Electrospun Poly(Vinyl Alcohol)/Cellulose Nanocrystals Composite Nanofibrous Filter with Low Air Resistance for High-Efficiency Filtration of Particulate Matter. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2019,** *7*.

13. Borowski, G.; Smirnov, Y.; Ivanov, A.; Danilov, A., Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* **2022,** *42* (8), 2345-2356.

14. Wang, P.; Tan, X.; Zhang, L.; Li, Y.; Liu, R., Influence of particle diameter on the wettability of coal dust and the dust suppression efficiency via spraying. *Process Safety and Environmental Protection* **2019,** *132*, 189-199.

15. Wang, W.; Huang, F.; Li, X., Development of a portal-crane servo-spraying suppression system to reduce dust production at bulk cargo wharf. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* **2022,** *13* (3), 1151-1161.

16. Zhang, H.; Nie, W.; Yan, J.; Bao, Q.; Wang, H.; Jin, H.; Peng, H.; Chen, D.; Liu, Z.; Liu, Q., Preparation and performance study of a novel polymeric spraying dust suppression agent with enhanced wetting and coagulation properties for coal mine. *Powder Technology* **2020,** *364*, 901-914.

17. Kim, J.; Kim, J. J.; Lee, S. J., Efficient removal of indoor particulate matter using water microdroplets generated by a MHz-frequency ultrasonic atomizer. *Building and Environment* **2020,** *175*, 106797.

18. Lee, Y.-Y.; Yuan, C.-S.; Yen, P.-H.; Mutuku, J. K.; Huang, C.-E.; Wu, C.-C.; Huang, P.-J., Suppression Efficiency for Dust from an Iron Ore Pile Using a

Conventional Sprinkler and a Water Mist Generator. *Aerosol and Air Quality Research* **2022,** *22* (2), 210320.

19. Wang, Q.; Wang, D.; Wang, H.; Han, F.; Zhu, X.; Tang, Y.; Si, W., Optimization and implementation of a foam system to suppress dust in coal mine excavation face. *Process Safety and Environmental Protection* **2015,** *96*, 184-190.

20. Bhat, A. H.; Dasan, Y. K.; Khan, I.; Soleimani, H.; Usmani, A., 9 - Application of nanocrystalline cellulose: Processing and biomedical applications. In *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites*, Jawaid, M.; Boufi, S.; H.P.S, A. K., Eds. Woodhead Publishing: 2017; pp 215-240.

21. Sulaeva, I.; Henniges, U.; Rosenau, T.; Potthast, A., Bacterial cellulose as a material for wound treatment: Properties and modifications. A review. *Biotechnology Advances* **2015,** *33* (8), 1547-1571.

22. SUDYING, P.; JATURAPIREE, P., Production and characterization of nano bacterial cellulose from Komagataeibacter nataicola using water from washing rice. **2560,** (17).

23. เขมาชีวะกลุ, จ. ผ. ก., การผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสสายพันธุ์ Acetobacter xylinum และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. **2016**, 25-33.

24. Salimi, S.; Sotudeh-Gharebagh, R.; Zarghami, R.; Chan, S. Y.; Yuen, K. H., Production of Nanocellulose and Its Applications in Drug Delivery: A Critical Review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2019,** *7* (19), 15800-15827.

25. วิญญูประสิทธิ์, ธ. ญ. น.; สหัสกุล, ย. ร.; รุ่งเรือง, น.ำ. ง., นาโนเซลลูโลส:การประยุกต์ใช้ในอาหารและความปลอดภัยอาหาร. *วารสารพิษวิทยาไทย* **2560,** *32* (1), 67-79.

26. Choi, S. M.; Shin, E. J. The Nanofication and Functionalization of Bacterial Cellulose and Its Applications *Nanomaterials* [Online], **2020**.

27. Zhong, T.; Jian, G.; Chen, Z.; Wolcott, M.; Nassiri, S.; Fernandez, C., Interfacial interactions and reinforcing mechanisms of cellulose and chitin nanomaterials and starch derivatives for cement and concrete strength and durability enhancement: A review. *Nanotechnology Reviews* **2022,** *11*, 2673-2713.

28. Börjesson, M.; Westman, G., Crystalline Nanocellulose — Preparation, Modification, and Properties. 2015; pp 159-191.

29. Ajkidkarn, P.; Manuspiya, H., Novel bacterial cellulose nanocrystals/polyether block amide microporous membranes as separators for lithium-ion batteries. *International Journal of Biological Macromolecules* **2020,** *164*, 3580-3588.

30. Vasconcelos, N. F.; Feitosa, J. P. A.; da Gama, F. M. P.; Morais, J. P. S.; Andrade, F. K.; de Souza Filho, M. d. S. M.; Rosa, M. d. F., Bacterial cellulose nanocrystals produced under different hydrolysis conditions: Properties and morphological features. *Carbohydrate Polymers* **2017,** *155*, 425-431.

31. Yan, H.; Chen, X.; Song, H.; Li, J.; Feng, Y.; Shi, Z.; Wang, X.; Lin, Q., Synthesis of bacterial cellulose and bacterial cellulose nanocrystals for their applications in the stabilization of olive oil pickering emulsion. *Food Hydrocolloids* **2017,** *72*, 127-135.

32. Zhai, X.; Lin, D.; Li, W.; Yang, X., Improved characterization of nanofibers from bacterial cellulose and its potential application in fresh-cut apples. *International Journal of Biological Macromolecules* **2020,** *149*, 178-186.

33. Nascimento, E. S.; Barros, M. O.; Cerqueira, M. A.; Lima, H. L.; Borges, M. d. F.; Pastrana, L. M.; Gama, F. M.; Rosa, M. F.; Azeredo, H. M. C.; Gonçalves, C., All-cellulose nanocomposite films based on bacterial cellulose nanofibrils and nanocrystals. *Food Packaging and Shelf Life* **2021,** *29*, 100715.

34. Arserim-Uçar, D. K.; Korel, F.; Liu, L.; Yam, K. L., Characterization of bacterial cellulose nanocrystals: Effect of acid treatments and neutralization. *Food Chemistry* **2021,** *336*, 127597.

35. Abitbol, T.; Kloser, E.; Gray, D. G., Estimation of the surface sulfur content of cellulose nanocrystals prepared by sulfuric acid hydrolysis. *Cellulose* **2013,** *20* (2), 785-794.

36. Romdhane, A.; Aurousseau, M.; Guillet, A.; Mauret, E., Effect of pH and ionic strength on the electrical charge and particle size distribution of starch nanocrystal suspensions. *Starch - Stärke* **2015,** *67* (3-4), 319-327.

37. Reid, M. S.; Villalobos, M.; Cranston, E. D., Benchmarking Cellulose Nanocrystals: From the Laboratory to Industrial Production. *Langmuir* **2017,** *33* (7), 1583-1598.

38. Endes, C.; Mueller, S.; Kinnear, C.; Vanhecke, D.; Foster, E. J.; Petri-Fink, A.; Weder, C.; Clift, M. J. D.; Rothen-Rutishauser, B., Fate of Cellulose Nanocrystal Aerosols Deposited on the Lung Cell Surface In Vitro. *Biomacromolecules* **2015,** *16* (4), 1267-1275.

39. Yanamala, N.; Farcas, M. T.; Hatfield, M. K.; Kisin, E. R.; Kagan, V. E.; Geraci, C. L.; Shvedova, A. A., In Vivo Evaluation of the Pulmonary Toxicity of Cellulose Nanocrystals: A Renewable and Sustainable Nanomaterial of the Future. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2014,** *2* (7), 1691-1698.

40. Ni, H.; Zeng, S.; Wu, J.; Cheng, X.; Luo, T.; Wang, W.; Zeng, W.; Chen, Y., Cellulose nanowhiskers: preparation, characterization and cytotoxicity evaluation. *Biomed Mater Eng* **2012,** *22* (1-3), 121-7.

41. Zhang, R.; Liu, C.; Zhou, G.; Sun, J.; Liu, N.; Hsu, P.-C.; Wang, H.; Qiu, Y.; Zhao, J.; Wu, T.; Zhao, W.; Cui, Y., Morphology and property investigation of

primary particulate matter particles from different sources. *Nano Research* **2018,** *11* (6), 3182-3192.

42. Schüepp, K. G.; Jauernig, J.; Janssens, H. M.; Tiddens, H. A.; Straub, D. A.; Stangl, R.; Keller, M.; Wildhaber, J. H., In vitro determination of the optimal particle size for nebulized aerosol delivery to infants. *J Aerosol Med* **2005,** *18* (2), 225-35.

43. Gadekar, C. S., Air Quality Index (AQI) Basics. *International Journal of Research Publication and Reviews* **2022,** *3*, 805-807.

44. Habibi, Y.; Lucia, L. A.; Rojas, O. J., Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications. *Chemical Reviews* **2010,** *110* (6), 3479-3500.

45. Bouchard, J.; Méthot, M.; Fraschini, C.; Beck, S., Effect of oligosaccharide deposition on the surface of cellulose nanocrystals as a function of acid hydrolysis temperature. *Cellulose* **2016,** *23* (6), 3555-3567.

46. Blanco, P. H.; Lad, J. B.; Bridgwater, A. V.; Holm, M. S., Production of Glucose from the Acid Hydrolysis of Anhydrosugars. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2018,** *6* (10), 12872-12883.

47. Fachri, B. A.; Abdilla, R. M.; Bovenkamp, H. H. v. d.; Rasrendra, C. B.; Heeres, H. J., Experimental and Kinetic Modeling Studies on the Sulfuric Acid Catalyzed Conversion of d-Fructose to 5-Hydroxymethylfurfural and Levulinic Acid in Water. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2015,** *3* (12), 3024-3034.

48. Kong-Win Chang, J.; Duret, X.; Berberi, V.; Zahedi-Niaki, H.; Lavoie, J. M., Two-Step Thermochemical Cellulose Hydrolysis With Partial Neutralization for Glucose Production. *Front Chem* **2018,** *6*, 117.

49. Sasmal, S.; Mohanty, K., Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Toward Biofuel Production. In *Biorefining of Biomass to Biofuels: Opportunities and*

Perception, Kumar, S.; Sani, R. K., Eds. Springer International Publishing: Cham, 2018; pp 203-221.

50. Udomsri, C.; Sapcharoenkun, C.; Ekgasit, S.; Parnklang, T., Cellulose nanocrystals as renewable materials for suppressing hazardous PM2.5 pollution. *New Journal of Chemistry* **2023,** *47* (7), 3591-3605.

51. Yang, J., Manufacturing of nanocrystalline cellulose. **2017**, 70+2.

52. Mandal, A.; Chakrabarty, D., Isolation of nanocellulose from waste sugarcane bagasse (SCB) and its characterization. *Carbohydrate Polymers* **2011,** *86* (3), 1291-1299.

53. Yan, M.; Li, S.; Zhang, M.; Li, C.; Dong, F.; Li, W., Characterization of Surface Acetylated Nanocrystalline Cellulose by Single-Step Method. *BioResources* **2013,** *8*.

54. Jordan, J. H.; Easson, M. W.; Dien, B.; Thompson, S.; Condon, B. D., Extraction and characterization of nanocellulose crystals from cotton gin motes and cotton gin waste. *Cellulose* **2019,** *26* (10), 5959-5979.

55. Hamad, W.; Hu, T., Structure–process–yield interrelations in nanocrystalline cellulose extraction. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* **2010,** *88*, 392-402.

56. Wahlqvist, M.; Shchukarev, A., XPS spectra and electronic structure of Group IA sulfates. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **2007,** *156-158*, 310-314.

57. Khoshkava, V.; Kamal, M. R., Effect of drying conditions on cellulose nanocrystal (CNC) agglomerate porosity and dispersibility in polymer nanocomposites. *Powder Technology* **2014,** *261*, 288-298.

58. Camarero Espinosa, S.; Kuhnt, T.; Foster, E. J.; Weder, C., Isolation of Thermally Stable Cellulose Nanocrystals by Phosphoric Acid Hydrolysis. *Biomacromolecules* **2013,** *14* (4), 1223-1230.

59. Jativa, F.; Schütz, C.; Bergström, L.; Zhang, X.; Wicklein, B., Confined self-assembly of cellulose nanocrystals in a shrinking droplet. *Soft Matter* **2015,** *11* (26), 5374-5380.

60. Li, S.; Yang, Y.; Liu, K., Biocompatible Polymers for the Synthesis of Nanosalts via Supramolecular Ion–Dipole Interaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **2019,** *67* (23), 6569-6573.

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	น.ส.เบญญาภา เขียวมณีย์
ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาสเปรย์ดักจับฝุ่นขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตรจากสารแขวนลอยของผลึกนาโนเซลลูโลส
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ประวัติ	มัธยมต้น โรงเรียนพิชัย
	มัธยมปลาย โรงเรียนพิชัย
	ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ