

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ด้วยระบบ
โซนิเคชันที่ต่างกันเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับไทมอลในการป้องกันโรคไหม้ข้าว
**Structural Comparison of Nanocellulose from Varied sonication for Thymol Adsorption
against Rice Blast Disease**

พิชาพัตร จารุทัศน์โรจน์¹

วิภาวี ศรีหานนท์¹ พงษ์ธนวัฒน์ เข้มทอง² จักรภพ พันธศรี³ ปณต ศรีกระโทก⁴ อิศราภรณ์ รักษาม⁵

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย ลพบุรี, ตำบลห้วยโป่ง, อำเภอโคกสำโรง, จังหวัดลพบุรี 15120, ประเทศไทย

²ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, ตำบลคลองหนึ่ง, อำเภอลองหลวง, จังหวัดปทุมธานี 12120, ประเทศไทย

*อีเมลล์: wipawee@pccl.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาแบบไหลย้อน (Reflux) ร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน (Sonication) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างระหว่างระบบ Bath Sonication และระบบ Probe Sonication ด้วยเทคนิค XRD และ FTIR เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารไทมอลในการป้องกันโรคไหม้ข้าว ผลการศึกษาจาก XRD พบว่าที่ระนาบผลึก (110), (110), (200) และ (004) วัสดุจากทั้งสองระบบสามารถลดขนาดโครงสร้างเซลลูโลสสู่ระดับนาโนเมตร โดยยังคงรักษาลักษณะ Cellulose I ไว้ได้ และจากผล FTIR พบเกิดการดูดกลืนแสงของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ช่วง 3,000-3,600 cm⁻¹ และพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ช่วง 2,899-2,940 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการคงอยู่ของหมู่ฟังก์ชันเซลลูโลสดั้งเดิมอย่างสมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างพบว่านาโนเซลลูโลสที่ผ่านระบบ Probe Sonication มีประสิทธิภาพโดดเด่นที่สุดในทุกมิติ ทั้งในด้านการย่อยขนาดอนุภาค โดยพิจารณาจากปรากฏการณ์ฐานฟีด XRD ที่ขยายกว้างขึ้นเด่นชัดที่สุด ร่วมกับการลดลงของความเข้มฟีดคาร์บอนิล (C=O) ที่ 1,719 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงพื้นผิวเคมีอย่างเหมาะสม โดยยังคงรักษาความพร้อมของหมู่ไฮดรอกซิลได้อย่างดีเยี่ยมที่สุด ซึ่งเอื้อต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจนร่วมกับโมเลกุลของไทมอล โครงการนี้จึงเป็นแนวทางเบื้องต้นในการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับชีวภาพทางการเกษตรที่มีประสิทธิภาพสูงในอนาคต

คำสำคัญ: nanocellulose, Bath Sonication, Probe Sonication

1. บทนำ

การทำนาในประเทศไทยมักประสบปัญหาการระบาดของโรคไหม้ข้าวที่เกิดจากเชื้อรา *Pyricularia grisea* (Sacc.) ซึ่งพบการแพร่กระจายในทุกภูมิภาคและสร้างความเสียหายอย่างรุนแรงต่อผลผลิตข้าวอย่างมาก แม้ในปัจจุบันจะมีการป้องกันด้วยการใช้สารเคมีสังเคราะห์หรือการปรับปรุงพันธุ์ข้าวต้านทาน แต่ยังคงพบข้อจำกัดทางกายภาพ

มากมาย เช่น การตกค้างของสารเคมีจนก่อให้เกิดความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อม การกลายพันธุ์และดื้อยาของเชื้อรา ตลอดจนภาระต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น รวมถึงความเสื่อมถอยของสุขภาพของเกษตรกรไทยจากการสัมผัสสารเคมีเป็นประจำ

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว ในปัจจุบันจึงมีการศึกษาอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับการพัฒนาสารประกอบธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพสูงในการ

ออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราเพื่อใช้เป็นทางเลือกใหม่ ซึ่งหนึ่งในสารที่ได้รับความสนใจ คือ ไทมอล (Thymol) สารประกอบธรรมชาติจากต้นไทม์ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นในการยับยั้งและทำลายโครงสร้างเซลล์ของเชื้อรามาประยุกต์ใช้แทนสารเคมีอันตราย แต่กลับพบข้อจำกัด คือ จุดเดือดต่ำและมีอัตราการระเหยที่รวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศและแสงแดด ส่งผลให้ระยะเวลาในการออกฤทธิ์สั้น ไม่ต่อเนื่อง จึงต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดนี้ ผู้จัดทำจึงเลือกใช้เซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีหมู่ฟังก์ชันที่พร้อมเกิดพันธะเคมี นำมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อกักเก็บและชะลอการระเหยของไทมอล โดยผ่านปฏิกิริยาแบบไหลย้อน (Reflux) ร่วมกับการกระบวนการโซนิเคชัน (Sonication) ทั้งระบบ Bath Sonication และระบบ Probe Sonication ซึ่งแตกต่างกันในการกระจายตัวและลดขนาดอนุภาค ความสมบูรณ์ของระนาบผลึก ตลอดจนการเปิดพื้นที่ผิวเคมีและหมู่ฟังก์ชันอย่างมีนัยสำคัญ และวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสในการเป็นวัสดุดูดซับอนุภาคนาโนที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและมีรูพรุน สามารถกักเก็บโมเลกุลของไทมอลไว้ภายในโครงสร้างได้อย่างหนาแน่นและช่วยป้องกันการระเหยของไทมอล ทำให้สามารถออกฤทธิ์ได้อย่างเต็มที่และต่อเนื่องในสถานะที่เหมาะสม

ด้วยเหตุนี้ ผู้จัดทำจึงนำเซลลูโลสมาผ่านกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นนาโนเซลลูโลส โดยผ่านระบบ Bath Sonication และระบบ Probe Sonication และวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงโครงสร้าง เพื่อเป็นแนวทางพัฒนาวัสดุดูดซับชีวภาพที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของไทมอลและเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโรคไหม้ข้าว โดยลดการสะสมของสารเคมีในแปลงนาข้าว ลดอันตรายต่อสุขภาพเกษตรกร และลดภาระต้นทุนในการผลิตข้าวในไทยอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การเตรียมนาโนเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาแบบไหลย้อน (Reflux)

เตรียมสารละลายลายกรด โดยผสมน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 20 มิลลิลิตร, กรดอะซิติก 70 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริก 10 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม จากนั้นเติมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสปริมาณ 3 กรัม ในสารละลายกรด แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการปฏิกิริยาแบบไหลย้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พร้อมกวนผสมด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งกระบวนการทั้งหมดถูกดำเนินการสังเคราะห์แบบคู่ขนาน (Parallel synthesis) จำนวน 2 ชุดการทดลอง ภายใต้การควบคุมตัวแปรทั้งสัดส่วนสารเคมี อุณหภูมิ และเวลาเดียวกัน

2.2 การกระจายอนุภาคนาโนด้วยกระบวนการ Sonication

นำสารละลายจากปฏิกิริยาแบบไหลย้อนเข้าสู่กระบวนการ Sonication ที่แตกต่างกัน ซึ่งใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมงเท่ากัน โดยชุดการทดลองแรกถูกนำเข้าสู่ระบบ Bath Sonication ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชุดการทดลองที่สองถูกนำเข้าสู่ระบบ Probe Sonication โดยใช้หัวโพรบขนาด 6 มิลลิเมตร ที่กำลังไฟ 130 วัตต์ (คิดเป็น 30% ของกำลังไฟสูงสุด) ณ ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และตั้งค่าการทำงานแบบเป็นจังหวะ (Pulse mode) สลับเปิด-ปิดในทุก ๆ 5 วินาที

2.3 การแยกสารตกตะกอนด้วย Centrifugation

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ Sonication นำสารละลายทั้งสองชุดการทดลองปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที ครั้งละ 5 นาที จำนวน 6 รอบ โดยเปลี่ยนน้ำปราศจากไอออนในแต่ละรอบเพื่อล้างกรดออกจากวัสดุจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-เบส (pH) อยู่ในระดับ 5 จากนั้นนำสารตกตะกอนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

แล้วจึงบดให้เป็นผงละเอียดด้วยโกร่งบดสารเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์

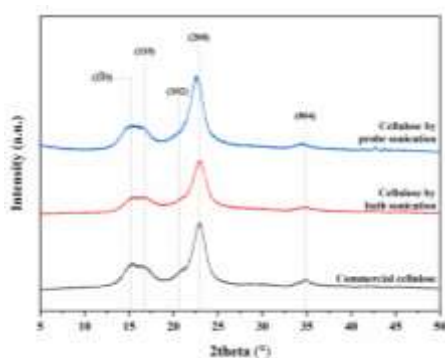
2.4 การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

โดยศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction : XRD) เพื่อวิเคราะห์ระดับความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้หลอดรังสีเอกซ์ชนิดเป้าทองแดง λ ความยาวคลื่น (λ) 1.5418 Å เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ดำเนินการที่แรงดันไฟฟ้า 40 kV, กระแสไฟฟ้า 40 mA และตรวจวัดรังสีชนิด LYNXEYE ในโหมดการทำงานแบบหนึ่งมิติ (1D Mode)

และศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิววัสดุด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและยืนยันความสมบูรณ์ของหมู่ฟังก์ชันสำคัญก่อนและหลังกระบวนการปรับปรุงโครงสร้าง โดยใช้ซอฟต์แวร์ควบคุม OMNIC กำหนดสภาวะในการทดสอบที่ค่าความละเอียด (Resolution) 4 cm^{-1} และทำการสแกนซ้ำจำนวน 64 ครั้ง พร้อมทั้งใช้ระบบ Automatic atmospheric suppression เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนจากสภาวะแวดล้อม

3. ผลและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD



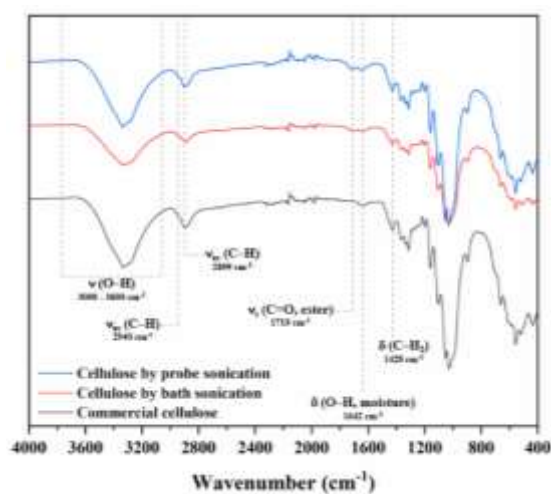
รูปที่ 1 กราฟแสดงการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกระหว่างไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสและนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ด้วยระบบ Sonication ที่แตกต่างกัน พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุทั้งสามเงื่อนไขมีความสอดคล้องกัน โดยปรากฏพีคการเลี้ยวเบนที่เด่นชัด ณ มุม 2θ ประมาณ 14.8° , 16.5° , 20.5° , 22.7° และ 34.5° ซึ่งตรงกับระนาบผลึก (110), (110), (102), (200) และ (004) ตามลำดับ ผลการทดลองนี้ยืนยันว่านาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากทั้งระบบ Bath Sonication และระบบ Probe Sonication ยังคงรักษาโครงสร้างผลึกดั้งเดิมของ Cellulose I ไว้ได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปโครงสร้างผลึกไปเป็น Cellulose II และไม่ปรากฏพีคของสิ่งเจือปนอื่นแปลกปลอมในโครงสร้าง ซึ่งระนาบผลึก (110) และ (110) ที่เกิดขึ้นนั้น สะท้อนถึงการจัดเรียงตัวของแผ่นโมเลกุลเซลลูโลสในทิศทางที่แตกต่างกัน แต่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกันภายในโครงสร้างผลึกแบบเชิงเดี่ยว (Monoclinic unit cell) ปังชี้ถึงความเสถียรและความแข็งแรงของโครงสร้างหลักดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบระหว่างระบบอัลตราโซนิกทั้งสองรูปแบบ พบว่านาโนเซลลูโลสจากทุกสภาวะยังคงให้ค่าความเข้มของพีคที่ระนาบผลึก (200) สูงที่สุด ซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกแข็ง (Crystalline region) อย่างไรก็ตาม ในตัวอย่างนาโนเซลลูโลสที่ผ่านระบบ Probe Sonication ปรากฏลักษณะการขยายตัวของฐานพีค (Peak broadening) ที่เด่นชัดและกว้างขวางที่สุดในทุกระนาบผลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงมุม 2θ ระหว่าง $14^\circ - 18^\circ$ (ระนาบ (110) และ (110)) ที่พีคมีความแบนกว้างและหลอมรวมเข้าหากันมากกว่าระบบ Bath Sonication และเซลลูโลสดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด ปรากฏการณ์การแผ่กว้างของพีคเลี้ยวเบนนี้ เป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Scherrer's equation) ที่บ่งชี้ถึงการลดขนาดของขนาดเกรนผลึก (Crystallite size) และลดขนาดอนุภาคของวัสดุ

จากระดับไมโครเมตรเข้าสู่ระดับนาโนเมตรได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากระบบ Probe Sonication สามารถปลดปล่อยพลังงานกลและความเค้นเฉือนประสิทธิภาพสูงเข้าสู่เนื้อสารโดยตรง ส่งผลให้เกิดการแยกและแตกตัวของเส้นใยเซลลูโลสได้อย่างทรงพลังมากกว่าระบบ Bath Sonication ในระยะเวลาที่เท่ากัน

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและชนิดของสารด้วยเทคนิค FTIR



รูปที่ 2 กราฟแสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและชนิดของสารด้วยเทคนิค FTIR

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมี สเปกตรัมที่ได้ถูกแสดงผลในรูปแบบร้อยละการส่องผ่านในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4000-400 cm^{-1} ซึ่งจากการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบกับนาโนเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการทางกายภาพและเคมีพบว่าวัสดุในทุกเงื่อนไขยังคงปรากฏหมู่ฟังก์ชันหลักที่สำคัญสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์และสะท้อนถึงการคงอยู่ของโครงสร้างหลักดั้งเดิมของเซลลูโลสอย่างครบถ้วน โดยปรากฏแถบการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงความยาวคลื่น 3000 - 3600 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของหมู่ไฮดรอกซิล (ν (O-H) stretching) พีกที่ตำแหน่ง 2899 cm^{-1} และ 2940 cm^{-1} ของหมู่แอลเคน (ν_{as} (C-H) stretching) พีกที่ตำแหน่ง 1642 cm^{-1}

ซึ่งเกิดจากการดูดซับความชื้นของโมเลกุลน้ำ (δ (O-H) bending) และพีกที่ตำแหน่ง 1428 cm^{-1} ของหมู่ CH_2 (δ (C-H₂) bending)

เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างระบบอัลตราโซนิกทั้งสองรูปแบบ พบจุดเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนพื้นผิวที่น่าสนใจ ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 1719 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (ν_s (C=O) stretching) ของพันธะเอสเทอร์ โดยสเปกตรัมของนาโนเซลลูโลสจากทั้งสองระบบมีความเข้มของพีกนี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยปฏิกิริยาแบบไหลย้อน (Reflux) ร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและการจัดเรียงตัวบนพื้นผิวของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ Probe Sonication ที่พบว่าความเข้มของพีกคาร์บอนิลลดลงอย่างเด่นชัดและเหมาะสมที่สุดบ่งชี้ถึงการปรับปรุงพื้นผิวเคมีที่มีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการดังกล่าวไม่ทำลายหรือส่งผลกระทบเชิงลบต่อโครงสร้างแกนหลักของเซลลูโลส

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความสมบูรณ์ของหมู่ฟังก์ชัน พบว่านาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ด้วยระบบ Probe Sonication สามารถรักษาความพร้อมและสัญญาณความเข้มของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ในช่วง 3000-3600 cm^{-1} ไว้ได้อย่างดีเยี่ยมที่สุดควบคู่ไปกับการปรากฏลักษณะพีกที่แยกออกจากกันอย่างเด่นชัด (Well-resolved peaks) ในช่วงลายนิ้วมือ (Fingerprint region) ซึ่งการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีที่เป็นระเบียบและความพร้อมของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของระบบ Probe Sonication นี้ถือเป็นปัจจัยเชิงบวกที่สำคัญยิ่งในการเอื้อต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ร่วมกับโมเลกุลของสารออกฤทธิ์อย่างไทมอล (Thymol) ได้อย่างหนาแน่นและมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับชีวภาพสำหรับการควบคุมโรคพืชในขั้นต่อไป

4.สรุปผล

4.1 อภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาแบบไหลย้อน (Reflux) ร่วมกับระบบโซนิเคชันที่แตกต่างกัน ผลการทดลองจากเทคนิค XRD และ FTIR ชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างและเคมีพื้นผิวที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับชีวภาพ แม้ว่าวัสดุจากทั้งสองระบบจะยังคงรักษาโครงสร้างผลึกหลักแบบ Cellulose I และหมู่ฟังก์ชันจำเพาะดั้งเดิมไว้ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ระดับพลังงานกลและความเค้นเฉือนที่แตกต่างกันระหว่างระบบ Bath Sonication และระบบ Probe Sonication ส่งผลให้คุณลักษณะเชิงลึกของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาความสอดคล้องกันของทั้งสองเทคนิค พบว่าระบบ Probe Sonication มีประสิทธิภาพโดดเด่นที่สุดในทุกมิติ โดยผลจาก XRD ปรากฏลักษณะฐานพิคที่ขยายกว้างขวางที่สุด (Peak Broadening) ในทุกระนาบผลึก โดยเฉพาะระนาบ (110) และ (110) ซึ่งยืนยันตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ว่าวัสดุเกิดการย่อยขนาดเกรนผลึกเข้าสู่ระดับนาโนเมตรได้อย่างทรงพลังที่สุด สอดรับกับผลการวิเคราะห์จาก FTIR ที่พบว่าการปรับปรุงเคมีบนพื้นผิวได้อย่างเหมาะสมที่สุด พิจารณาจากการลดลงของความเข้มพีดคาร์บอนิล (V_S ($C=O$, ester)) ที่ตำแหน่ง 1719 cm^{-1} โดยที่กระบวนการดังกล่าวไม่ทำลายโครงสร้างผลึกส่วนที่แข็งแรง (Crystalline region) ในระนาบ (200) ของ XRD และยังคงรักษาความพร้อมของสัญญาณหมู่ไฮดรอกซิล ($O-H$) ในช่วงเลข $3000-3600\text{ cm}^{-1}$ ของ FTIR ไว้ได้อย่างดีเยี่ยมที่สุด

ผลลัพธ์ดังกล่าวพิสูจน์ให้เห็นว่า โครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ร่วมกับพื้นผิวเคมีที่ได้รับการปรับปรุงและคงความอุดมสมบูรณ์ของหมู่ไฮดรอกซิล ($O-H$) ของนาโนเซลลูโลสจากระบบ Probe Sonication เป็นคุณลักษณะในอุดมคติที่เอื้อต่อการเกิดพันธะ

ไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ร่วมกับโมเลกุลของสารออกฤทธิ์อย่างไทมอล (Thymol) โครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์และเป็นระเบียบนี้ (Well-resolved peaks) จึงสามารถกักเก็บโมเลกุลไทมอลไว้ภายในได้อย่างหนาแน่น ทำหน้าที่วัสดุดูดซับชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมอัตราการปลดปล่อยและหน่วงการระเหยของไทมอลในสภาวะแวดล้อม ส่งผลให้สารสกัดธรรมชาติสามารถออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราก่อโรคใหม่ข้าวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและต่อเนื่องยาวนาน

4.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์นวัตกรรมวัสดุดูดซับชีวภาพนาโนเซลลูโลสผ่านปฏิกิริยาแบบไหลย้อน (Reflux) ร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเชิงเปรียบเทียบพิสูจน์ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากทั้งระบบ Bath Sonication และระบบ Probe Sonication ยังคงรักษาโครงสร้างผลึกแกนหลักดั้งเดิมประเภทที่ 1 (Cellulose I) และหมู่ฟังก์ชันจำเพาะของเซลลูโลสไว้ได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปโครงสร้างผลึกและปราศจากสิ่งเจือปนแปลกปลอมใด ๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในมิติของระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงโครงสร้าง พบว่าระบบ Probe Sonication มีขีดความสามารถที่โดดเด่นที่สุด โดยสามารถย่อยขนาดอนุภาคเกรนผลึกให้ลดขนาดจากระดับไมโครเมตรเข้าสู่ระดับนาโนเมตรได้อย่างทรงพลังที่สุด ซึ่งยืนยันจากปรากฏการณ์การแผ่กว้างของฐานพิค (Peak Broadening) ในผล XRD ควบคู่ไปกับการเกิดปฏิสัมพันธ์บนพื้นผิวเคมีที่เหมาะสมจากการตรึงตัวของความเข้มพีดคาร์บอนิลในผล FTIR ยิ่งไปกว่านั้น ระบบหัวโพรบยังสามารถรักษาความพร้อมและเสถียรภาพของหมู่ไฮดรอกซิล ($O-H$) บนพื้นผิววัสดุไว้ได้อย่างดีเยี่ยมที่สุด ซึ่งคุณลักษณะจำเพาะเชิงโครงสร้างและเคมีพื้นผิวที่สมบูรณ์ของนาโนเซลลูโลสจากระบบหัวโพรบนี้ ถือเป็นปัจจัยขับเคลื่อนสำคัญในการสร้างพันธะทางเคมีที่แข็งแรง

ร่วมกับโมเลกุลของไทมอล (Thymol) ส่งผลให้วัสดุมีประสิทธิภาพสูงในการกักเก็บ เชลล และควบคุมอัตราการระเหยของสารออกฤทธิ์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ องค์ความรู้ที่ค้นพบจากการวิจัยครั้งนี้จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับวัสดุชีวภาพทางการแพทย์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นระบบนำส่งสารสัณฐานชาติในการควบคุมและป้องกันโรคใหม่ ตัวอย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และยั่งยืนต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในมิติของการประเมินประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยของโมเลกุลไทมอลบนนาโนเซลลูโลสที่สังเคราะห์จากระบบ Probe Sonication เพื่อหาอัตราส่วนและสภาวะในการกักเก็บสารที่คุ้มค่าที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นควรขยายผลการทดลองไปสู่การทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อรา *Pyricularia grisea* และการทดลองจำลองในแปลงนาจริง เพื่อประเมินความคงทนต่อสภาพแวดล้อมทางกายภาพ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาอย่างยั้งจากคุณครูวิภาวี ศรีหานนท์ คุณครูที่ปรึกษาหลัก และคณะที่ปรึกษาพิเศษ ได้แก่ ดร.พงษ์ธนวัฒน์ เข้มทอง, ดร.จักรภพ พันธศรี, ดร.ปณต ศรีกระโทก และดร.อิสราภรณ์ รักษาม และได้รับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูง และสถานที่ในการทำปฏิบัติการวิจัยจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) รวมถึงได้รับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในทุก ๆ ด้านจากโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย ลพบุรี ผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2557). การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการทางเคมี. วิทยานิพนธ์ (สาขาวิชาฟิสิกส์). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2569, สืบค้นจาก https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2557/aphys50657jnd_ch2.pdf
- ศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดพิษณุโลก. (2563). โรคไหม้ข้าว (Rice Blast Disease). สืบค้นเมื่อ 5 มกราคม 2569, จาก <https://shorturl.asia/odfQO>
- Gobi, N., et al. (2018). **Nanocellulose and its applications: A review. Sustainable Materials and Technologies**. Retrieved January 10, 2026, from [com/science/article/pii/S2588913318300036?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=9bf6b166ec63fdcf](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588913318300036?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=9bf6b166ec63fdcf)
- International Journal of Biological Macromolecules. (2021). **Surface Modification of Nanocellulose for Enhanced Adsorption Capacity**. International Journal of Biological Macromolecules. Retrieved January 10, 2026, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813021010941>
- International Journal of Biological Macromolecules. (2025). **Synthesis and Characterization of Nanocellulose via Advanced Sonication Methods**. International Journal of Biological Macromolecules. Retrieved January 10, 2026, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813025022639>