



## โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ**      การพัฒนาวิธีการผลิตเซลล์โลสนาโนคริสตัลจากแบคทีเรียตกแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์  
ควอนตัมดอท  
  
Development of ZnO-Quantum-Dot-Decorated Bacterial Cellulose  
Nanocrystal Fabrication Process

**ชื่อนิสิต**            นายสุภัคพงศ์ เกียรติไพบุลย์เวช      **เลขประจำตัว** 5833102023  
**ภาควิชา**            เคมี  
**ปีการศึกษา**        2561

**คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการงานทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการงานทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

การพัฒนาวิธีการผลิตเซลลูโลสนาโนคริสตัลจากแบคทีเรียตกแต่งด้วย  
ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท

Development of ZnO-Quantum-Dot-Decorated  
Bacterial Cellulose Nanocrystal Fabrication Process

โดย

นายสุภัคพงศ์ เกียรติไพบุลย์เวช

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ชื่อโครงการ      การพัฒนาวิธีการผลิตเซลล์สุลอสนาโนคริสตัลจากแบคทีเรียตกแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์  
ควอนตัมดอท

ชื่อนิสิตในโครงการ      นายสุภักพงศ์ เกียรติไพบุลย์เวช      เลขประจำตัว 5833102023

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา      ศาสตราจารย์ ดร. สอนง เอกสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

## บทคัดย่อ

อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ มีศักยภาพในการนำไปใช้งานที่หลากหลาย เช่น เป็นตัวดูดซับแสงยูวี, เป็นสารวัตถุเจือปนอาหาร, ใช้เป็นเม็ดสี, มีคุณสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มีโอกาสเกาะรวมตัวกันและสูญเสียประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียร ผู้วิจัยจึงพัฒนาซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ ตกแต่งบนพื้นผิวของแบคทีเรียเซลล์สุลอสนาโนคริสตัล (ZnO QDs@BCNC) ด้วยขนาดที่เล็กของซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่แบคทีเรียเซลล์สุลอสนาโนคริสตัล (BCNC) ช่วยให้ ZnO QDs@BCNC มีความเสถียรมากขึ้น ในขั้นแรก BCNC ถูกเตรียมโดยกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากแบคทีเรียเซลล์สุลอสด้วยการบำบัดด้วยต่างและการฟอกสี หลังจากนั้นนำเซลล์สุลอสดังกล่าวด้วยกรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลผลิตที่ได้คือแบคทีเรียเซลล์สุลอสนาโนคริสตัลซึ่งเป็นผลึกรูปทรงเข็มที่มีความยาว  $1.60 \pm 0.61$  ไมโครเมตร และ ความกว้าง  $57.8 \pm 13.2$  นาโนเมตร จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง ATR-FTIR พบว่า BCNC แสดงลักษณะของคริสตัลไลน์เซลล์สุลอสที่มีความบริสุทธิ์ จากนั้นนำ BCNC แฉลงในเอทานอลที่มีซิงค์ไอออน ( $Zn^{2+}$ ) เพื่อสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของ  $Zn^{2+}$  กับ BCNC และหยดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในสารประกอบเชิงซ้อน  $Zn^{2+}$  กับ BCNC เพื่อเปลี่ยน  $Zn^{2+}$  ให้เป็น ZnO QDs@BCNC ผลผลิตที่ได้สามารถเรืองสีเหลืองภายใต้รังสียูวี นอกจากนี้ยังสามารถดูดซับแสงความยาวคลื่นมากที่สุด 340 นาโนเมตร เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานของแสงเพื่อหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (bandgap energy) จากผลการคำนวณพบว่า ZnO QDs@BCNC มี bandgap energy เท่ากับ 3.56 eV ในขณะที่ค่า bandgap energy ของ ZnO QDs เท่ากับ 3.65 eV เมื่อทดสอบความแข็งแรงของ ZnO QDs ที่ติดบน BCNC พบว่า ZnO QDs ติดอยู่บน BCNC อย่างแข็งแรง แม้ว่าจะสั่นด้วยคลื่นเสียง ZnO QDs ยังคงอยู่บนเส้นใยเช่นเดิม ท้ายที่สุดทดสอบสมบัติโฟโตคะตาไลติกของ ZnO QDs@BCNC โดยใช้คริสตัลไวโอเล็ต (CV) เป็นต้นแบบ พบว่าความเข้มข้นของ CV ลดลง 87.5% ในเวลา 20 นาทีภายใต้ภาวะกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 340 nm

**คำสำคัญ:** แบคทีเรียเซลล์สุลอสนาโนคริสตัล, ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน, การย่อยสลาย, โฟโตคะตาไลซิส, ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท

Project Title Development of ZnO-Quantum-Dot-Decorated Bacterial Cellulose Nanocrystal  
Fabrication Process

Student Name Mr. Supakpong Kaitphaiboonwet Student ID 5833102023

Advisor Name Professor Sanong Ekgasit, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2018

### Abstract

Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) are potent to use in a variety of applications. (e.g. UV absorber, food additive, pigment, anti-bacteria). However, ZnO NPs tend to aggregate and lost their performance. To improve performance and increase stability, we fabricated ZnO quantum dot (ZnO QDs) decorated bacterial cellulose nanocrystals (ZnO QDs@BCNC). The smaller size of ZnO QDs increases the active surface area while the BCNC improve stability of ZnO QDs@BCNC. Firstly, BCNC was prepared by eliminating the impurities from bacterial cellulose pellicle (BC) with alkali treatment and bleaching. After that, cleaned BC was hydrolyzed by hydrochloric acid (HCl) for 12 hours to form BCNC. From the TEM image, the shape of BCNC is rod shape-like nanocrystals (the length, and the width around  $1.60 \pm 0.61 \mu\text{m}$  and  $57.8 \pm 13.2 \text{ nm}$  respectively). As characterized by ATR-FTIR, BCNC shows characteristic of the crystalline-cellulose (high ordered cellulose) peak. Then, the BCNC was immersed into EtOH with  $\text{Zn}^{2+}$  to form the  $\text{Zn}^{2+}$ -BCNC complex. Next, potassium hydroxide (KOH) was dropped to  $\text{Zn}^{2+}$ -BCNC complex to convert  $\text{Zn}^{2+}$  to the ZnO-quantum-dot decorated bacterial cellulose nanocrystals (ZnO QDs@BCNC), showing yellow luminescence under UV radiation. The product is adsorbed the wavelength of 340 nm and its absorption characteristic could calculate the ZnO QDs@BCNC bandgap energy following the Tauc plot, which is the relation between the energy of the light and the quantity of  $(\alpha h\nu)^2$ , where  $\alpha$  is the absorption coefficient. The result shown that ZnO QDs@BCNC has bandgap energy at 3.56 eV while ZnO QDs has bandgap energy at 3.65 eV. Furthermore, ZnO QDs are strongly deposited on BCNC surface, even sonication cannot shake them off. To evaluate the photocatalytic activity of ZnO QDs@BCNC, Crystal Violet (CV) was used as an organic-chemical-pollutants model. It was found that the concentration of CV decreased by 87.5% in 20 minutes in the presence of 340 nm excitation.

**Keywords:** bacterial cellulose nanocrystal, bandgap energy, degradation, photocatalyst, ZnO quantum dot

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และประสิทธิ์ประสาทความรู้จาก ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ คอยให้ความรู้ คำปรึกษา ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอ็นดูโดยตลอด ตลอดจนส่งเสริมให้ประกวดในเวทีต่าง ๆ จนได้รางวัลกลับมามากมาย มากกว่านั้นยังคอยให้ข้อคิดในการดำเนินชีวิตตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

โครงการจะประสบผลสำเร็จไม่ได้เลยหากขาดคำแนะนำจาก ดร.อรรถสิทธิ์ พันธุ์ทรัพย์สกุล และ ดร.อำพัน เงินสวัสดิ์ ที่ได้แลกเปลี่ยนความรู้ในเชิงวิชาการและเป็นกำลังใจให้เสมอมา เสมือนเป็นพี่ชายพี่สาวที่คอยดูแลน้องชาย ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งงานออกมาสำเร็จเป็นรูปธรรม

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. คณศ วังษ์ระวี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พร้อมพงศ์ เพียรพินิจ ธรรม และสมาชิกหน่วยวิจัยการรับรู้ทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือสิ่งต่าง ๆ ตลอดมา

ขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. พรเทพ สมพรพิสุทธิ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ โสเวน ที่ให้เกียรติสละเวลาเป็นกรรมการสอบการวิจัยและตรวจสอบแก้ไขรายงานให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นอย่างสูง ที่ให้ความอนุเคราะห์ถ่ายทอดวิชาความรู้ และเทคนิคต่าง ๆ ให้อย่างเต็มที่อันเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยที่สำคัญยิ่ง

ผู้วิจัย

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม	1
<b>บทที่ 2 การทดลอง</b>	
2.1 สารเคมีที่ใช้	4
2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	4
2.3 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์แบบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	4
2.3.1 วิธีการสังเคราะห์แบบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	4
2.3.2 ศึกษาผลของการบำบัดด้วยต่างและการฟอกสีต่อเส้นใยเซลลูโลสก่อนการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก	6
2.3.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของแบบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก	6
2.4 วิธีสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท	6
2.5 ศึกษาการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่งบนแบบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	7
2.5.1 เตรียมแบบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลสำหรับการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่งบนแบบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	7
2.5.2 สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทบนแบบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	7

2.6 ทดสอบสมบัติโฟโตคะตาไลติกของซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่งบน แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	7
---	---

### บทที่ 3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 วิเคราะห์ผลการศึกษาวิธีการสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	8
3.2 วิเคราะห์ผลปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ช่วยลดการไฮโดรคลอริก	11
3.3 วิเคราะห์ผลการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท	14
3.4 วิเคราะห์ผลศึกษาการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทบนแบคทีเรียลเซลลูโลส นาโนคริสตัล	15
3.5 การวิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติโฟโตคะตาไลติกของซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่ง บนแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	18

### บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง

4.1 สรุปผลการทดลอง	19
4.2 งานวิจัยต่อในอนาคต	19
เอกสารอ้างอิง	20
ประวัติผู้วิจัย	22



## สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	โครงสร้างสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกสลายด้วยแสงโดยใช้ ZnO: (1) azoxystrobin, (2) hexaconazole, (3) kresoximmethyl, (4) pirimicarb, (5) propyzamide, (6) pyrimethanil, (7) tebuconazole, and (8) triadimenol	2
รูปที่ 2.1	กระบวนการสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	5
รูปที่ 3.1	ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสเมื่อผ่านกระบวนการต่าง ๆ	8
รูปที่ 3.2	ลักษณะของคอลลอยด์และเส้นใยแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลของสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลส, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยต่างและสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดด้วยต่างและการพอกขาว ก่อนนำมาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก	9
รูปที่ 3.3	สเปกตรัม FTIR ของแผ่นวุ้นแบคทีเรียลเซลลูโลส, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลส, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยต่าง, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดด้วยต่างและการพอกขาว ,และแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล	9
รูปที่ 3.4	การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเส้นใยแบคทีเรียลเซลลูโลสภายหลังถูกย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0 M, 0.1 M, 0.5 M, 1 M, 2 M และ 3 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	13
รูปที่ 3.5	การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเส้นใยแบคทีเรียลเซลลูโลสหลังถูกย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3 M ระยะเวลา 0, 2, 4, 6, 9, 12 ชั่วโมง	13
รูปที่ 3.6	(A) แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล (BCNC), (B) สมบัติไบรีฟริงเจนของ BCNC เมื่อมองผ่านแสง cross polarize, (C) ภาพ TEM ของ BCNC	14
รูปที่ 3.7	ลักษณะของ ZnO QDs ในเอทานอลภายใต้ (A) แสงขาว และ (B) แสงยูวีความยาวคลื่น 350 nm ถึง 380 nm	14
รูปที่ 3.8	ลักษณะของสารละลาย ZnO QDs และ ZnO QDs@BCNC ภายใต้ (A) แสงขาว, และ (B) แสงยูวีความยาวคลื่น 350 nm ถึง 380 nm	15
รูปที่ 3.9	สเปกตรัมแสดงผลการหาค่าความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นที่ให้ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดของ ZnO QDs@BCNC	17

- รูปที่ 3.10 (A) UV-vis spectra และ fluorescence spectra ของ ZnO QDs และ ZnO QDs@BCNC, 17  
(B) กราฟ Tauc plot ซึ่งมาจากการคำนวณโดยนำสเปกตรัม UV-vis มาคำนวณหา bandgap energy
- รูปที่ 3.11 ภาพถ่าย TEM (A) แสดงลักษณะทางกายภาพของ ZnO QDs@BCNC กำลังขยาย 17  
10,000 เท่า, และ (B) กำลังขยาย 300,000 เท่า
- รูปที่ 3.12 (A) กราฟการสอบเทียบมาตรฐาน (standard calibration curve) ของความเข้มข้น 18  
คริสตัลไวโอเลต, (B) กราฟแสดงลดลงของปริมาณคริสตัลไวโอเลตด้วยปฏิกิริยาการย่อย  
สลายด้วยแสง ของ ZnO QDs@BCNC

# บทที่ 1

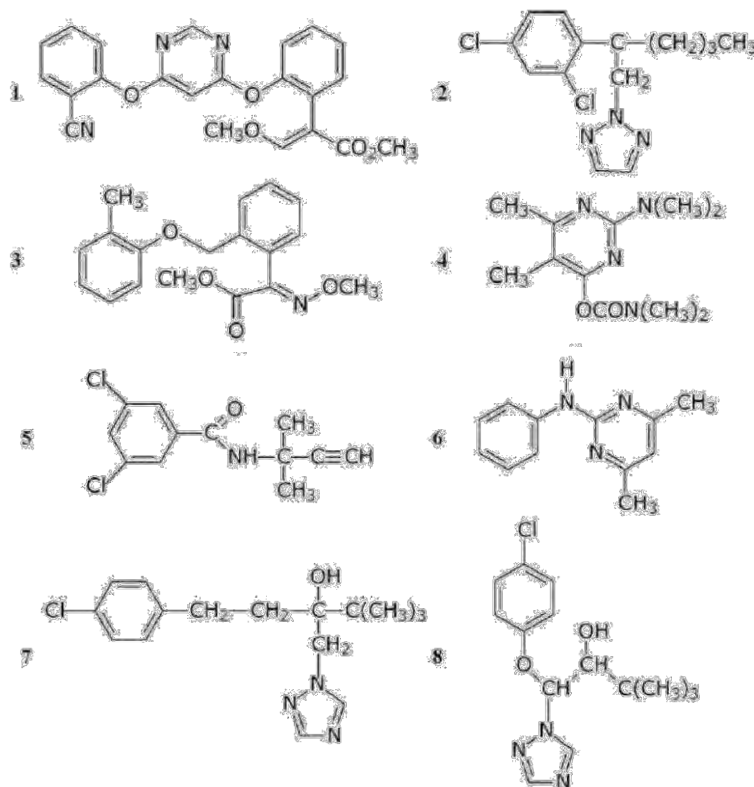
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท (ZnO QDs) เป็นสารที่มีสมบัติโฟโตคาตาไลติก (Photocatalytic property)<sup>1,2</sup> ซึ่งมีรายงานการศึกษาพบว่าซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทสามารถทำลายสารประกอบอินทรีย์เช่น สารกำจัดศัตรูพืชได้หลากหลายชนิด<sup>3,4</sup> ประกอบกับซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทมีความปลอดภัย มีการนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและในยาสำหรับป้องกันเชื้อจุลินทรีย์<sup>5</sup> แต่ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทสามารถรวมตัว (aggregation) จนมีขนาดใหญ่ขึ้น<sup>6</sup> ทำให้สูญเสียสภาพ มีระยะเวลาในการเก็บรักษา ZnO QDs สั้น และสมบัติโฟโตคาตาไลติกลดลงเนื่องจากขนาดของผิวสัมผัสลดลง เกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็วจึงมีการใช้สารป้องกันการรวมตัว แต่สารเหล่านี้จะไปบดบังผิวและลดประสิทธิภาพของ ZnO QDs ในการทำงานนี้ผู้วิจัยจึงหลีกเลี่ยงการใช้สารป้องกันการรวมตัว และได้้นำแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล (bacterial cellulose nanocrystal) มาใช้ทดแทน โดยแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลผลิตจากเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (bacterial cellulose) ที่มีความบริสุทธิ์สูง<sup>7</sup> และมีเปอร์เซ็นต์คริสตัลลิตีสูงถึงร้อยละ 80<sup>8</sup> มาใช้เป็นที่ยึดเกาะของซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท (supporter) และเป็นตัวช่วยให้ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทมีความเสถียรไม่รวมตัว

### 1.2 การทบทวนวรรณกรรม

ในปีค.ศ. 2009 Navarro และคณะ<sup>3</sup> ได้มีการทดลองนำ ZnO มาย่อยสารกำจัดศัตรูพืชสารกำจัดศัตรูพืชด้วยกระบวนการย่อยโดยมีแสงเป็นตัวเร่ง (photocatalytic degradation) ผู้วิจัยได้เสนอกลไกว่า ZnO ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เนื่องจากมีช่องว่างของแถบพลังงาน (bandgap energy) ระหว่างแถบที่มีอิเล็กตรอนในแถบพลังงานวงนอกสุด (filled valence band) กับแถบนำไฟฟ้าที่ว่างเปล่า (empty conduction band) เมื่อ ZnO ได้รับพลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการกระตุ้น (excitation) โดยมีค่าพลังงานไอออไนเซชันเท่ากับ 70 eV อิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากแถบพลังงานวงนอกสุดไปยังแถบนำไฟฟ้าทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนกับที่ว่างของอิเล็กตรอน ซึ่งสปีชีส์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับตัวรับและให้อิเล็กตรอนที่มากูดซับอยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดสารประเภท reactive oxygen species (ROS) อาทิ hydroxyl radicals ( $\cdot\text{OH}$ ) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กับสารกำจัดศัตรูพืชทั้ง 8 ชนิดดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างสารกำจัดศัตรูพืชที่ถูกสลายด้วยแสงโดยใช้ ZnO: (1) azoxystrobin, (2) hexaconazole, (3) kresoximmethyl, (4) pirimicarb, (5) propyzamide, (6) pyrimethanil, (7) tebuconazole, and (8) triadimenol.

มีรายงานในปีค.ศ. 2017 Lefatshe และคณะ<sup>9</sup> ได้ใช้เทคนิคการสังเคราะห์ ZnO in-situ ลงบน nanocellulose เพื่อเพิ่มสมบัติโฟโตคะตาไลติก, ป้องกันแบคทีเรียและนอกจากนี้ยังป้องกันการรวมตัวกันของ ZnO NPs ทำให้เพิ่มเวลาในการเก็บรักษา จากรายงานพบว่า ZnO NPs ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเท่ากับ  $14 \pm 0.2465$  nm และมี bandgap energy เท่ากับ 3.3 eV ส่วนสมบัติโฟโตคะตาไลติก ทำการทดสอบกับ methylene blue ซึ่งมีค่าคงที่การสลายตัวของ methylene blue โดย ZnO และ ZnO/BCNC เท่ากับ 0.1013 และ  $0.1174 \text{ h}^{-1}$  ตามลำดับ

ในปีค.ศ. 2018 Awan และคณะ<sup>10</sup> ได้พัฒนาการสังเคราะห์ cellulose nanocrystal-ZnO nanohybrids สำหรับสมบัติโฟโตคะตาไลติกและการป้องกันยูวีในเครื่องสำอาง ในรายงานระบุว่าสามารถใช้ เซลลูโลสนาโนคริสตัลเพื่อจัดการปัญหาการรวมตัวกันของ ZnO nanoparticles ได้ โดย ZnO NPs ที่สังเคราะห์ได้มีขนาด  $15.19 \pm 1$  nm และมี bandgap energy เท่ากับ 3.37 eV และเมื่อทดสอบสมบัติโฟโตคะตาไลติกพบว่าสามารถลดสีของ methylene blue โดยมีค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาที่  $0.0117 \text{ min}^{-1}$  และ

จากการทดสอบการดูดกลืนแสงพบว่าสามารถดูดกลืนแสงในช่วง UVA (320–400 nm) และ UVB (290–320 nm)

ในการสังเคราะห์ ZnO QDs Sahoo และคณะ<sup>11</sup> ได้ตีพิมพ์วิธีการสังเคราะห์ในวารสาร Journal of agricultural and food chemistry ในปีค.ศ. 2018 ผู้วิจัยใช้รายงานฉบับนี้เป็นโมเดลในการออกแบบวิธีการสังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายซิงค์อะซิเตทและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.1 M และ 1 M ตามลำดับ ZnO QDs ที่ได้จากรายงานฉบับนี้มีขนาด 6 nm เรืองแสงสีเหลืองเมื่ออยู่ภายใต้รังสียูวี สามารถให้สเปกตรัมที่มีความเข้มมากที่สุดที่ 525 nm เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 340 nm

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ZnO QDs สามารถใช้เป็นสารที่มีสมบัติโฟโตคะตาไลติก นอกจากนี้แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลยังเป็นสารที่ช่วยเพิ่มระยะเวลาการเก็บรักษา ป้องกันการรวมตัวกันของ ZnO QDs ได้ และยังไม่มียางานฉบับใดระบุถึงวิธีการสังเคราะห์ ZnO QDs บนเส้นใยเซลลูโลสหรือเซลลูโลสนาโนคริสตัลได้มาก่อน รายงานนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ ZnO QDs บนผิวของแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลและศึกษาสมบัติโฟโตคะตาไลติกของ ZnO QDs ที่อยู่บนแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล

## บทที่ 2

### การทดลอง

#### 2.1 สารเคมีที่ใช้

- แผ่นวุ้นแบคทีเรียเซลลูโลสจากแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* โดยบริษัท โคโค อินโนเวชัน จำกัด
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จากบริษัท Meck
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และซิงค์อะซิเตทจากบริษัท CARLO

#### 2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- กล้องจุลทรรศน์จากบริษัท Carl ZEISS รุ่น Axio
- เครื่องปั่นเหวี่ยงบริษัท Hettich รุ่น EBA 200
- เครื่องวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีด้วยเทคนิคเอทีอาร์ (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectrometer: ATR-FTIR) ของบริษัท Thermo scientific รุ่น NICOLET iS5
- เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรสโคปี (UV-visible Spectrophotometer) ของบริษัท Thermo scientific รุ่น GENESYS 10S
- เครื่องฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรสโคปี (fluorescence spectroscopy) ของบริษัท Agilent Technologies รุ่น Cary Eclipse
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JEM-2100

#### 2.3 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล

##### 2.3.1 วิธีการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล

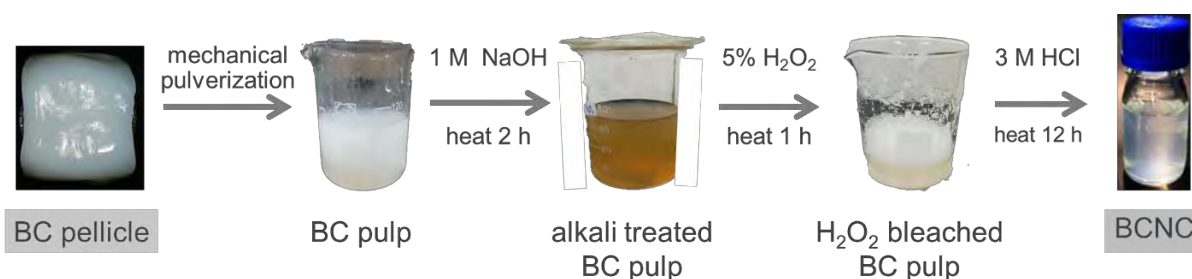
1. การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล<sup>12-14</sup> เริ่มต้นโดยนำแผ่นวุ้นแบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose pellicle: BC pellicle) มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) จนสะอาดจากนั้น

เติมน้ำปราศจากไอออนและนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียด (blender) จนกลายเป็นสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลส (BC pulp)

2. นำสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสบำบัดด้วยด่าง (alkali treatment) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในวุ้นแบคทีเรียลเซลลูโลส<sup>7</sup> ออกโดยการเติม NaOH ลงไปในสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลส ให้มีความเข้มข้น 1 M นำไปต้มเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองและล้างเส้นใยให้สะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนอย่างน้อย 3 ครั้ง จะได้สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ถูกบำบัดด้วยด่าง (alkali treated BC pulp)

3. นำสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ถูกบำบัดด้วยด่างฟอกสีของเส้นใย (bleaching) เพื่อกำจัดเม็ดสีภายในเส้นใย ทำให้เส้นใยขาวขึ้นด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 11 หลังจากนั้นเติม  $H_2O_2$  ลงไปให้มีความเข้มข้น 5% นำไปต้มเดือดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองและล้างเส้นใยจนสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมี pH เท่ากับ 7 จะได้สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านการฟอกสี (bleached BC pulp)

4. สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านการฟอกสีจะถูกย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis) จนเส้นใยมีขนาดเล็กลง โดยเติมกรด HCl จนมีความเข้มข้น 3.0 M นำไปต้มเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ถัดจากนั้นนำเส้นใยที่ได้ปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ด้วยความเร็ว 6000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที นำส่วนที่เป็นของเหลวออก จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนลงไปเพื่อเจือจางกรด นำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนกระทั่งมี pH เท่ากับ 7 จะได้สารเนื้อเดียวที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ของเซลลูโลสนาโนคริสตัล จากนั้นนำตัวอย่างของแต่ละขั้นตอนศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วย Attenuated Total Reflectance Fourier-Transform Infrared spectroscopy (ATR-FTIR)



รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล

### 2.3.2 ศึกษาผลของการบำบัดด้วยต่างและการฟอกสีเส้นใยแบบที่เรียลเซลลูโลสก่อนการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก

จากการทดลองเตรียมเซลลูโลสนาโนคริสตัล<sup>13</sup> สารแขวนลอยแบบที่เรียลเซลลูโลสกับสารแขวนลอยแบบที่เรียลเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดด้วยต่างและการฟอกสี มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นที่มาของการการศึกษาลักษณะของสารแขวนลอยแบบที่เรียลเซลลูโลสก่อนการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกและพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) กำลังขยาย 1000 เท่า ในโหมด bright field transmission เพื่อบอกการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

### 2.3.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของแบบที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก

ในการเตรียมแบบที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลนั้น การควบคุมความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในแต่ละครั้งให้คงที่เป็นไปได้ยาก เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสอุ่มน้ำ ตลอดจนมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากการให้ความร้อนทำให้ตัวละลายระเหยระหว่างการทำทดลอง ผู้วิจัยทำการศึกษาลักษณะของแบบที่เรียลเซลลูโลส โดยทดลองเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาความเข้มข้นต่ำที่สุดที่เส้นใยเริ่มถูกย่อยและแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลผลิต ซึ่งพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระยะเวลาการให้ความร้อนระหว่างการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยคาดหวังว่า ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของแบบที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีขนาดเล็กลงและให้ปริมาณแบบที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลมากขึ้น หลังจากนั้นพิสูจน์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แบบที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลแล้ว ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างแบบที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope หรือ TEM) และวัดขนาดแบบที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลด้วยโปรแกรม ImageJ ต่อไป

## 2.4 วิธีสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท

การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอททำตามวิธีที่มีการรายงานทางวิชาการของ Sahoo<sup>11</sup> ขึ้นแรกเตรียม 0.1 M ซิงค์อะซิเตต ( $Zn(CH_3COO)_2$ ) ในเอทานอล ( $CH_3CH_2OH$ ) และ 1 M โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



(KOH) ในเอทานอลแยกกัน จากนั้นหยด KOH ลงในสารละลาย  $Zn(CH_3COO)_2$  อย่างช้าๆ และคงที่จนกระทั่งได้สารละลายที่ขุ่นขึ้นเล็กน้อย คนสารละลายต่อด้วยแท่งคนแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สารละลายที่ได้จะมีลักษณะใสไม่มีสี และเรืองแสงสีเหลืองภายใต้รังสียูวี

## 2.5 ศึกษาการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่งบนแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล

2.5.1 เตรียมแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลสำหรับการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่งบนแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล

นำ 100 กรัมของแผ่นวุ้นแบคทีเรียลเซลลูโลส ผ่านกระบวนการตามสภาวะที่เหมาะสมจนกระทั่งได้แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล นำไปปั่นเหวี่ยงเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นเส้นใย ถัดมานำเส้นใยที่ได้ไปกระจายตัวในเอทานอล ให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องผสมสารละลาย

2.5.2 สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทบนแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล

นำ 10 มิลลิลิตรของแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลในเอทานอลผสมกับ 10 มิลลิลิตร 0.1 M  $Zn(CH_3COO)_2$  ในเอทานอล คนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติม KOH ในเอทานอลอย่างช้าๆ และคงที่จนกระทั่งสารละลายเรืองแสงสีเหลืองใต้หลอด UV ปั่นเหวี่ยงเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทบนแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล ( $ZnO$  QDs@BCNC) นำตัวอย่างที่ได้พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย TEM, วัดการดูดกลืนแสง, สมบัติฟลูออเรสเซนซ์และสมบัติโฟโตคาตะไลติกต่อไป

## 2.6 ทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกของออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่งบนแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล

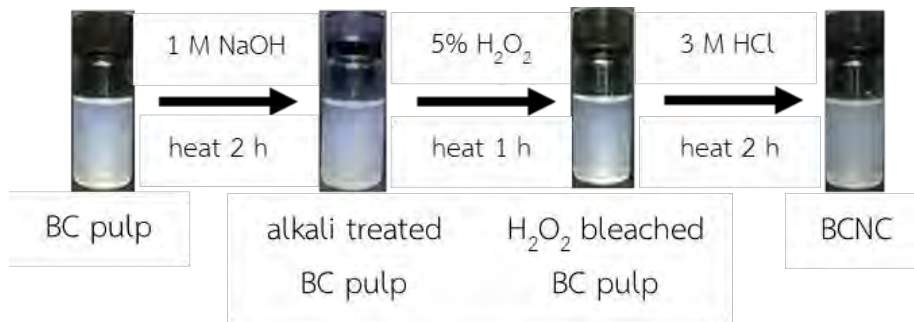
ผู้วิจัยได้ใช้ คริสตัลไวโอเลท (Crystal violet หรือ CV) เป็นตัวแทนในการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติก โดยนำ  $ZnO$  QDs@BCNC ที่สังเคราะห์ได้ความเข้มข้น 0.8% โดยมวลต่อปริมาตรผสมกับ CV ความเข้มข้น 25  $\mu$ M ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร คนด้วยแท่งคนแม่เหล็กใต้หลอดรังสี UV เก็บตัวอย่างทุกๆ 20 นาที นำไปวัดค่า absorbance เพื่อหาปริมาณ CV ที่เหลืออยู่ในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน (Standard calibration curve)

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

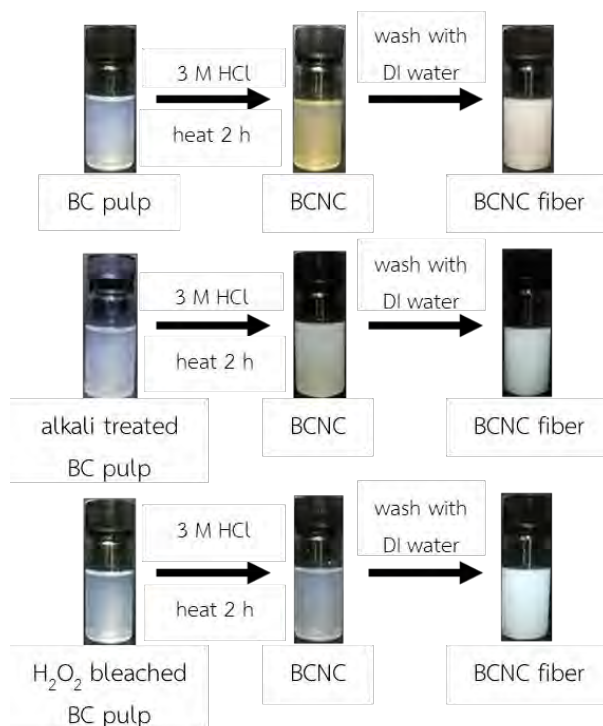
##### 3.1 วิเคราะห์ผลการศึกษาวิธีการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล

กระบวนการเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีขั้นตอนอยู่ 3 ขั้นตอนคือการบำบัดด้วยด่าง, การฟอกสีและการย่อยด้วยกรด ผู้วิจัยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละขั้นตอนโดยสังเกตลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่าและกล้องจุลทรรศน์ และทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วย ATR-FTIR ในส่วนถัดไป เมื่อนำสารแขวนลอยแบคทีเรียเซลลูโลสผ่านกระบวนการบำบัดด้วยด่างและการฟอกสีพบว่า เส้นใยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างเด่นชัด จนกระทั่งทำการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก เส้นใยเซลลูโลสที่ได้มีขนาดเล็กกลง และเปลี่ยนจากสารแขวนลอยเป็นคอลลอยด์สีขาวขุ่นดังรูปที่ 3.1

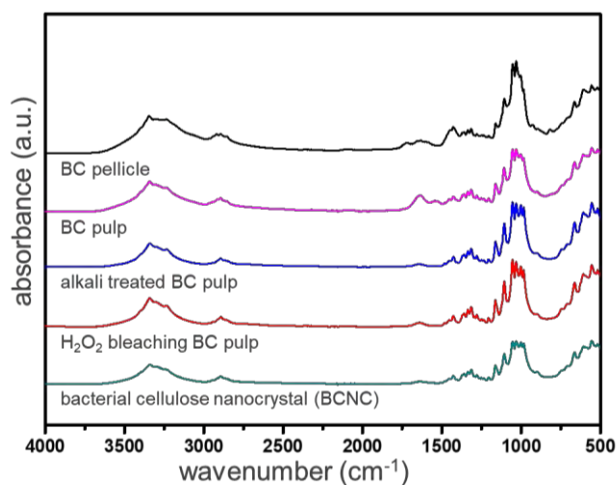


รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสเมื่อผ่านกระบวนการต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าสารละลายเยื่อเซลลูโลสเมื่อนำไปย่อยด้วยกรด 3 M ไฮโดรคลอริกทันทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้เกิดสารละลายสีเหลืองและเมื่อล้างสารละลายออกเหลือเพียงเส้นใย จะเห็นได้ว่าเส้นใยมีสีน้ำตาล ในขณะที่เมื่อนำสารแขวนลอยแบคทีเรียเซลลูโลสบำบัดด้วยด่างย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายสีเทาและเส้นใยสีเทาอ่อน ในท้ายที่สุดหากสารแขวนลอยแบคทีเรียเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดด้วยด่างและฟอกสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นคอลลอยด์สีขาว เมื่อนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีพบว่าจะได้เส้นใยขนาดเล็กสีขาวอยู่บริเวณก้นหลอด จากสีของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ผลิตได้จากการย่อยสารแขวนลอยแบคทีเรียเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดด้วยด่างและฟอกจึงมีสีขาวมากที่สุด แสดงว่ามีสิ่งเจือปนต่ำที่สุด



รูปที่ 3.2 ลักษณะของคอลลอยด์และเส้นใยแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลของสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลส, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยต่าง, และสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดด้วยต่างและการฟอกขาว ก่อนนำมาถักด้วยกรดไฮโดรคลอริก



รูปที่ 3.3 สเปกตรัม FTIR ของแผ่นวุ้นแบคทีเรียลเซลลูโลส, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลส, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยต่าง, สารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดด้วยต่างและการฟอกขาว, และแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล

ตารางที่ 3.1 FTIR band assignments ของแผ่นวุ้นแบคทีเรียลเซลลูโลส<sup>13</sup>

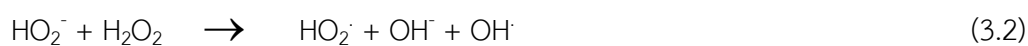
wavenumber (cm <sup>-1</sup> )	assignments
3340	$\nu$ (O-H) cellulose
2893	$\nu_a$ (CH <sub>2</sub> )
1730–1690	$\nu$ (C=O) form proteins, lipids and acetic acid
1638	O-H of absorbed water
1539	Protein amide II absorption
1425–1435	In plane $\delta$ (HCH,OCH)
1358–1375	$\delta$ (CH)
1325	in-plane $\delta$ (CH)
1160	$\nu_a$ (C-O-C) ,CH deformation
1106	$\nu$ (C-C) ring
1054	$\nu$ (C-O)
1031	$\delta$ (C-O) of the C-OH of carbohydrates
1000	$\nu$ (C3-O3)
984	$\nu$ (CH)
987	$\beta$ -1,4-glycosidic linkage
665–670	Out of plane $\delta$ (C-OH)

$\nu$  = stretching;  $\delta$  = bending;  $\nu_a$  = asymmetric stretching;

ผู้วิจัยนำตัวอย่างแต่ละชั้นตอนทดสอบด้วย ATR-FTIR พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมดังรูปที่ 3.3 และมี band assignments ดังตารางที่ 3.1 เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของแผ่นวุ้นแบคทีเรียลเซลลูโลสกับสารแขวนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสที่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมอย่างชัดเจนใน 2 บริเวณด้วยกันคือ ช่วง 1722-1425 cm<sup>-1</sup>, และ 1160-984 cm<sup>-1</sup> จากงานวิจัยของ Fuller และคณะ<sup>7</sup> ระบุว่า แบคทีเรียลเซลลูโลสมีสิ่งเจือปนเป็นตัวเซลล์ของแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังมีการเจือปนมาของอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งประกอบไปด้วย 2% กลูโคส, 0.5% เปปโตเน (โปรตีน ที่ถูกย่อยให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลง), 0.5% สารสกัดจากยีสต์, 0.27% ของ Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> และ 0.15% กรดซิตริก จากสเปกตรัมของ ATR-FTIR บริเวณ 1700-1600 cm<sup>-1</sup> เป็นการแสดงลักษณะของโปรตีนซึ่งประกอบไปด้วย C=O stretching vibration ของกลุ่ม amide คู่กับ in-phase bending ของพันธะ N—H และการ stretching พันธะ C—N<sup>15</sup> มีรายงานว่า NaOH สามารถกำจัดสิ่งตกค้างในแบคทีเรียลเซลลูโลสได้โดย NaOH จะเกิดเป็นโซเดียมไอออน (Na<sup>+</sup>) และ hydroxy ion (OH<sup>-</sup>) โดย OH<sup>-</sup> ทำปฏิกิริยา hydration กับสารประกอบอินทรีย์ที่เจือปนอยู่โดยเฉพาะสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดอินทรีย์และเอสเทอร์กลายเป็นโมโนเมอร์และถูกชะออกได้โดยง่าย<sup>16</sup> แผ่นวุ้นแบคทีเรียลเซลลูโลสเมื่อ

นำไปผ่านกระบวนการเชิงกลโดยการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นและบดด้วยต่างพบว่าบริเวณ 1500-1700  $\text{cm}^{-1}$  ได้หายไปเนื่องจากสิ่งเจือปนได้ถูกกำจัดออกไป อีกทั้งยังแสดงลักษณะของแบคทีเรียเซลลูโลสคือบริเวณ 1160  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะของ asymmetric stretching ของ C-O-C, นอกจากนี้ที่ 1106  $\text{cm}^{-1}$  (stretching ของวง C-C), 1000  $\text{cm}^{-1}$  (stretching ของ C3-O3), และ 987  $\text{cm}^{-1}$  (stretching ของ CH) มีการแสดงที่เด่นชัดขึ้น แสดงว่าแบคทีเรียเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการเชิงกลและบดด้วยต่างมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

กระบวนการฟอกสี ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กำจัดเม็ดสีออกจากเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน<sup>17</sup> เมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวในภาวะที่เป็นเบส จะเกิดไฮดรอกซีไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{HO}_2^-$ ), และไฮดรอกไซด์เรดิคัล ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระอนุพันธ์ออกซิเจนที่ว่องไว (reactive oxygen species: ROS) ดังสมการที่แสดงหลังจากนี้ อนุมูลอิสระเหล่านี้จะออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ที่ให้สีในเส้นใยทำให้เส้นใยเซลลูโลสมีสีขาว



เมื่อนำสารแขวนลอยแบคทีเรียเซลลูโลสที่ถูกบดด้วยต่างและฟอกสีมากำจัดส่วนที่ไม่เป็นระเบียบเรียกว่าส่วนอะมอร์ฟัส (amorphous region) ออกด้วยการไฮโดรไลซิสในสภาวะกรด จากผลการทดสอบด้วย ATR-FTIR พบว่าเมื่อถูกย่อยด้วยกรดแล้วพบว่าการเปลี่ยนแปลงใน spectrum น้อยมากเนื่องจากแบคทีเรียเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นระเบียบเรียกว่า ส่วนคริสตัลลีน (crystalline region) ที่สูงถึง 80%<sup>8</sup>

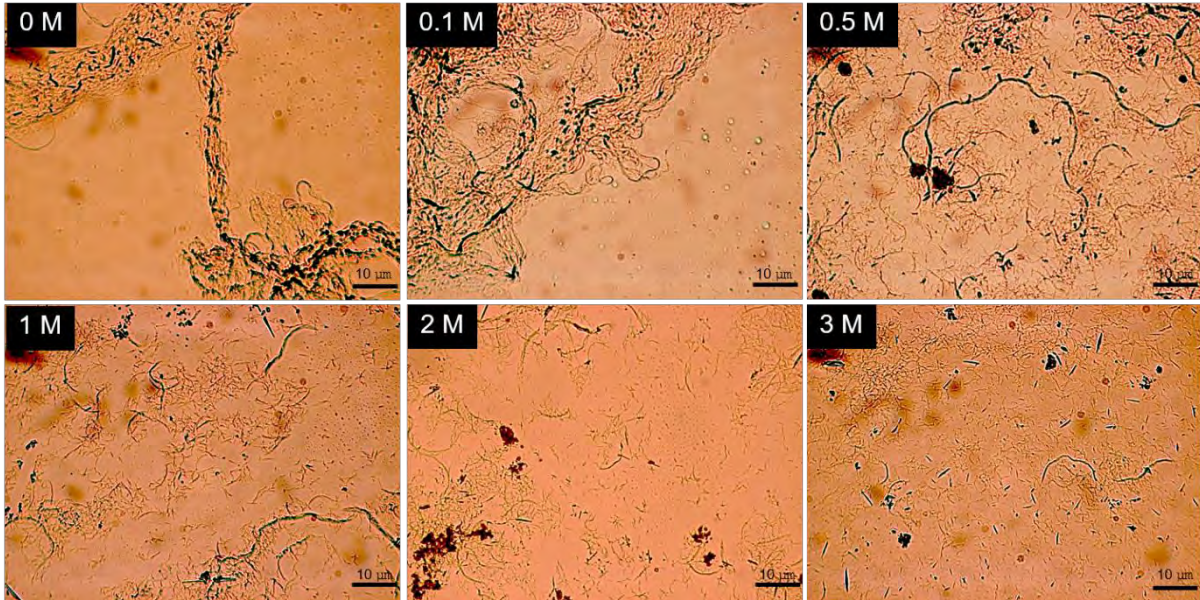
### 3.2 วิเคราะห์ผลปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก

แบคทีเรียเซลลูโลสมีความยาวของส่วนคริสตัลลีนประมาณ 1 ถึง 2 ไมครอนดังนั้นจึงสามารถสังเกตโครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงได้ ปัจจัยที่ผู้วิจัยคาดว่าส่งผลต่อรูปร่างและปริมาณของเซลลูโลสนาโนคริสตัลคือความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกและปริมาณเวลาที่ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก

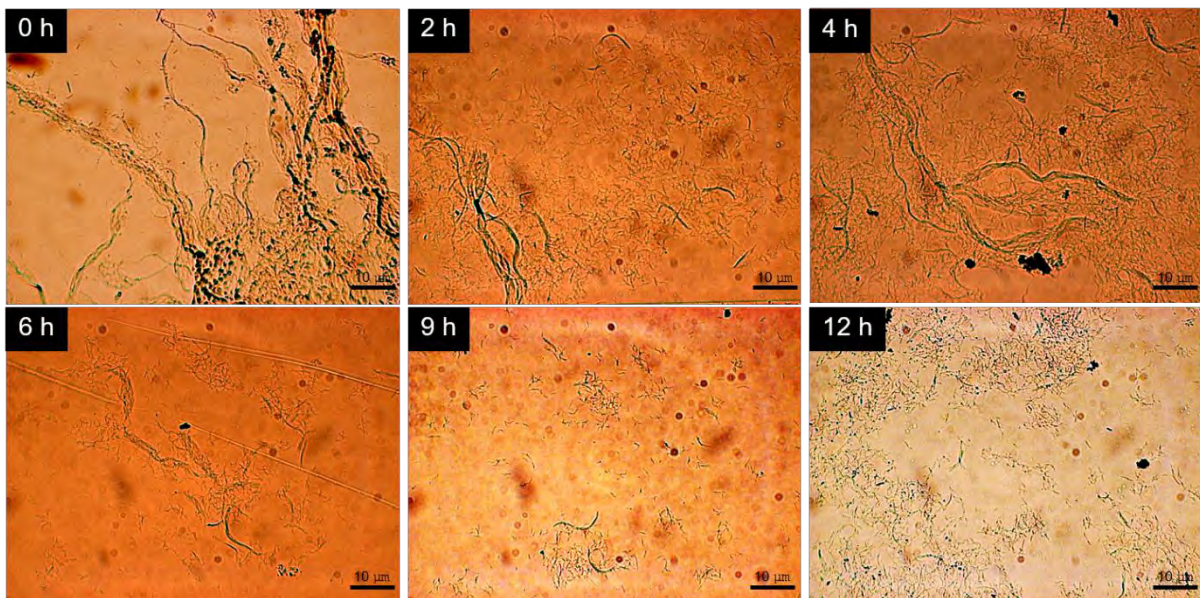
ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ทดสอบคือ 0 M, 0.1 M, 0.5 M, 1.0 M, 2.0 M และ 3.0 M จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.4 พบว่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่เริ่มย่อยแบคทีเรียเซลลูโลสได้คือ 0.5 M และการเพิ่มความเข้มข้นของกรดจะมีแนวโน้มที่เส้นใยขนาดใหญ่จะถูกย่อยกลายเป็นแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล

เพิ่มขึ้น แต่จากการสังเกตลักษณะของนาโนคริสตัลแล้วพบว่า แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของกรด ผลผลิตที่ได้มีความยาวที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นผู้วิจัยได้ทดลองเพิ่มระยะเวลาของการย่อยโดยตั้งสมมติฐานว่า เส้นใยที่ไม่ถูกย่อยด้วยกรดจะมีปริมาณลดลงเมื่อเวลาในการย่อยด้วยกรดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3.5 เป็นของผลการทดลองซึ่งสอดคล้องตามสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้น การย่อยด้วยกรดที่เวลา 9 ชั่วโมงจะเริ่มไม่พบเส้นใยขนาดใหญ่มากนักและที่ 12 ชั่วโมงจะไม่พบเส้นใยที่ไม่ถูกย่อยด้วยกรด ในขณะที่เวลาในการย่อยไม่ส่งผลต่อขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล อีกประการหนึ่งหากสังเกตรูปภาพพบว่าเส้นใยของแบคทีเรียเซลลูโลสจะเกิดการคลายเกลียวและเส้นใยเล็กๆ เหล่านั้นจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดในส่วนที่เป็นส่วนอะมอร์ฟัสเหลือเพียงส่วนคริสตัลลีนกลายเป็นแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล

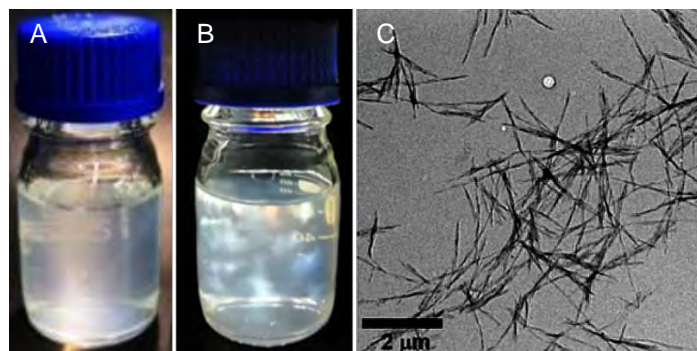
ดังนั้นวิธีการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ใช้ในการทดลองหลังจากนี้คือ สารแขวนลอยแบคทีเรียเซลลูโลสผ่านกระบวนการบำบัดด้วยต่าง, ฟอกสี และย่อยด้วยกรดความเข้มข้น 3 M เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำผลผลิตไปตรวจวิเคราะห์ด้วย TEM พบว่าขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีความยาวเฉลี่ย  $1.60 \pm 0.61 \mu\text{m}$  และ มีความกว้างเฉลี่ย  $57.8 \pm 13.2 \text{ nm}$  นอกจากนี้สมบัติอีกอย่างหนึ่งที่ช่วยยืนยันว่าผู้วิจัยสามารถสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัลได้ คือ สมบัติสมบัติไบรีฟริงเจน (birefringent) ซึ่งเกิดจากการที่มีดัชนีหักเหหลายค่าในผลึก เมื่อมองเซลลูโลสนาโนคริสตัลด้วย cross polarization จะเห็นสารละลายเป็นลวดลายเกิดขึ้น เนื่องจากแสงโพลาไรส์กระทบผลึกเกิดการหักเหและเปลี่ยนเฟสของแสง เมื่อมองผ่านโพลาไรส์เซอร์ฟิลเตอร์ที่วางทำมุมฉากกับแสงโพลาไรส์ แสงที่ไม่ผ่านผลึกจะทึบแสงในขณะที่แสงที่ผ่านผลึกจะปรากฏแสงสีรุ้งขึ้นมาดังภาพ 3.6B



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสภายหลังจากย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0 M, 0.1 M, 0.5 M, 1 M, 2 M และ 3 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



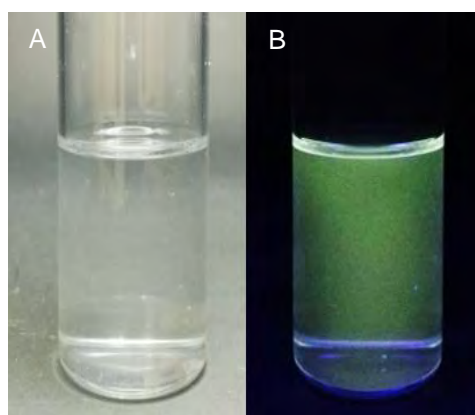
รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสหลังจากย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 M ระยะเวลา 0, 2, 4, 6, 9, 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 (A) แบทที่เรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล (BCNC), (B) สมบัติไบรีฟริงเจนของ BCNC เมื่อมองผ่านแสง cross polarize, (C) ภาพ TEM ของ BCNC

### 3.3 วิเคราะห์ผลการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอท

เมื่อสังเคราะห์ ZnO QDs ในเอทานอลด้วยวิธีของ Sahoo พบว่า ได้สารละลายใส สามารถเรืองแสงสีเหลืองใต้หลอดรังสียูวี เมื่อนำไปทดสอบการดูดกลืนแสงพบว่าสามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดที่ 330 nm และเมื่อนำไปวัดด้วยเครื่อง fluorescence spectroscopy สามารถเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 528 nm โดยใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 340 nm

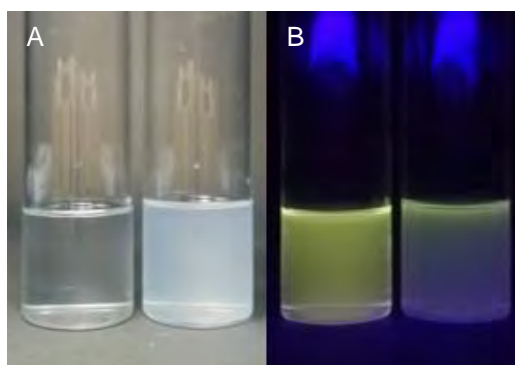


รูปที่ 3.7 ลักษณะของ ZnO QDs ในเอทานอลภายใต้ (A) แสงขาว และ (B) แสงยูวีความยาวคลื่น 350 nm ถึง 380 nm



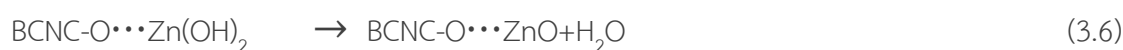
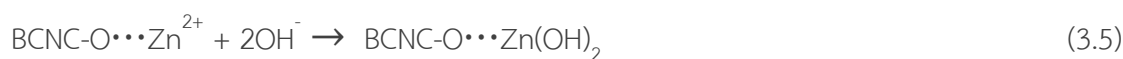
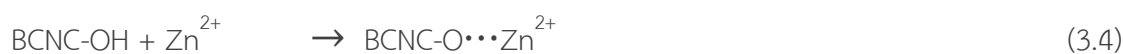
### 3.4 วิเคราะห์ผลศึกษาการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทบนแบคทีเรียเซลลูโลส นาโนคริสตัล

การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทบนแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล (ZnO QDs@BCNC) ได้ผลผลิตมีลักษณะเป็นคอลลอยด์สีขาวขุ่น เรื่องแสงภายใต้รังสียูวีแสดงว่ามี ZnO QDs อยู่ในสารละลาย จากนั้นทดสอบการติดของ ZnO QDs บน BCNC ในเบื้องต้น ล้าง BCNC ด้วยเอทานอลด้วยการปั่นเหวี่ยง จากนั้นแยกส่วนที่เป็นของแข็งมาใส่ในเอทานอล และทำให้กระจายตัวจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้ง จากการทดสอบพบว่าส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งสามารถเรืองแสงสีเหลืองภายใต้หลอดยูวี ในขณะที่ของเหลวใสด้านบนไม่ปรากฏสีเหลืองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ZnO QDs ติดอย่างแข็งแรงอยู่บนแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล



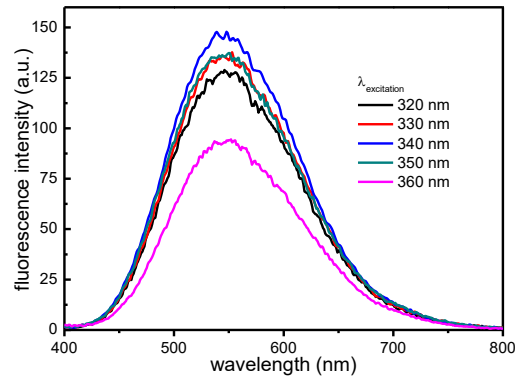
รูปที่ 3.8 ลักษณะของสารละลาย ZnO QDs และ ZnO QDs@BCNC ภายใต้ (A) แสงขาว, และ (B) แสงยูวี ความยาวคลื่น 350 nm ถึง 380 nm

จากการศึกษารายงานวิจัยพบว่า  $Zn^{2+}$  สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของกลูโคสยูนิตได้<sup>18</sup> ดังสมการที่ 3.4 เมื่อเติมเบสลงไปเพื่อเปลี่ยน  $Zn^{2+}$  กลายเป็น  $Zn(OH)_2$  ซึ่งอยู่ในระบบที่เป็นแอลกอฮอล์  $Zn(OH)_2$  จะเกิดปฏิกิริยาดังน้ำออก (dehydration) กลายเป็น ZnO QDs ตรึงอยู่ที่ผิวของแบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล<sup>19</sup> ดังสมการที่ 3.6

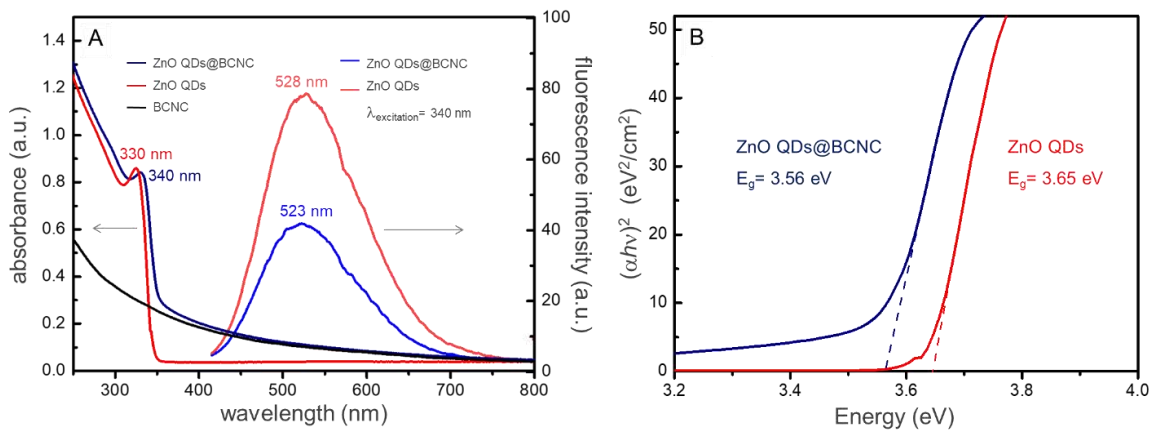


เมื่อนำ ZnO QDs @BCNC ไปวัดสมบัติเชิงแสงพบว่าความยาวคลื่นแสงที่ถูก ZnO QDs @BCNC ดูดกลืนมากที่สุดที่ 340 nm จากนั้นทดสอบหาความยาวคลื่นที่ทำให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนส์สูงสุดโดยปรับความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นตั้งแต่ 300 nm จนถึง 400 nm พบว่า ZnO QDs@BCNC ให้ความเข้มของ fluorescence สูงที่สุดเมื่อดูดกลืนแสงที่ 340 nm ดังรูปที่ 3.8 เมื่อวัดด้วย fluorescence ที่ใช้ความยาวคลื่น 340 nm เป็นความยาวคลื่นกระตุ้นพบว่า ZnO QDs @BCNC เปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 523 nm เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงแสงของ ZnO QDs และ ZnO QDs@BCNC ดังรูปที่ 3.9A จะเห็นว่า ZnO QDs เมื่อติดอยู่บนเส้นใยแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 340 nm พบว่าทั้ง ZnO QDs และ ZnO QDs@BCNC เปล่งแสงสีเหลืองซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 520 nm แต่สมบัติการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไป โดย ZnO QDs@BCNC ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นยาวขึ้นคือเพิ่มจาก 330 nm เป็น 340 nm ทำให้เมื่อคำนวณหา bandgap energy โดยสมการ Tauc equation,  $(\alpha h\nu)^2 = K(h\nu - E_g)$  โดย  $\alpha$  เป็นค่า absorbance coefficient ( $\alpha = 2.303A$ ), พลังงานแสงในการกระตุ้นในหน่วย eV ( $\text{energy} = h\nu = 1240 / \lambda$ ), และ  $E_g$  แทนค่า bandgap energy จากสมการ Tauc equation เมื่อเขียนกราฟโดยให้  $(\alpha h\nu)^2$  เป็นแกน y และให้ค่าพลังงานแสงเป็นแกน x จะได้กราฟ Tauc plot เมื่อกำหนดให้สมการ Tauc equation เสมือนเป็นสมการเส้นตรง จะได้ว่าค่าตัดแกน x เท่ากับค่า bandgap energy จากผลการคำนวณพบว่า ZnO QDs@BCNC ให้ค่า bandgap energy ที่ 3.56 eV ซึ่งต่ำกว่าของ ZnO QDs ที่มี bandgap energy ที่ 3.65 eV ดังรูปที่ 9B

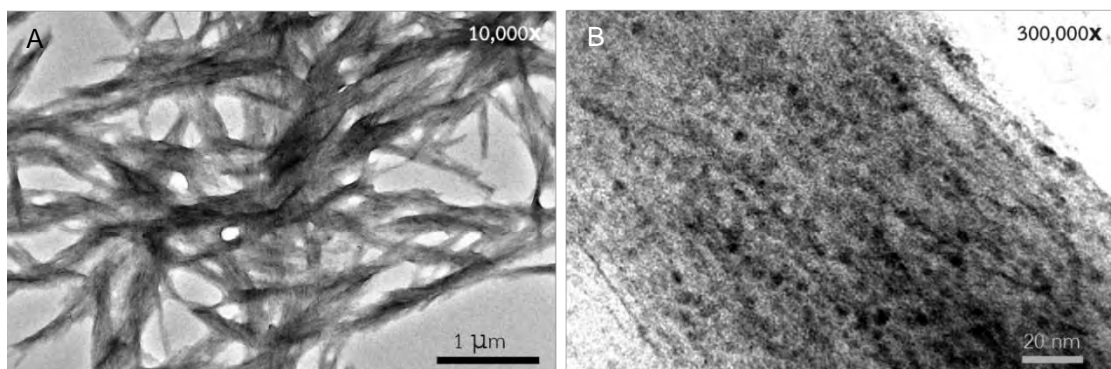
จากนั้นนำ ZnO QDs @BCNC ที่สังเคราะห์ได้ ศึกษาโครงสร้างด้วย TEM โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าลักษณะของเส้นใยของแบคทีเรียลเซลลูโลส ไม่มีเกิดการเปลี่ยนทางกายภาพที่มีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 3.10A เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 300,000 เท่า จะพบว่ามี ZnO QDs ติดอยู่บริเวณผิวของแบคทีเรียลเซลลูโลส ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลมสีดำดังปรากฏในรูป 3.10B และพบว่าขนาดของ ZnO QDs@BCNC มีค่า  $4.9 \pm 0.9$  nm



รูปที่ 3.9 สเปกตรัมแสดงผลการหาค่าความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นที่ให้ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดของ ZnO QDs@BCNC



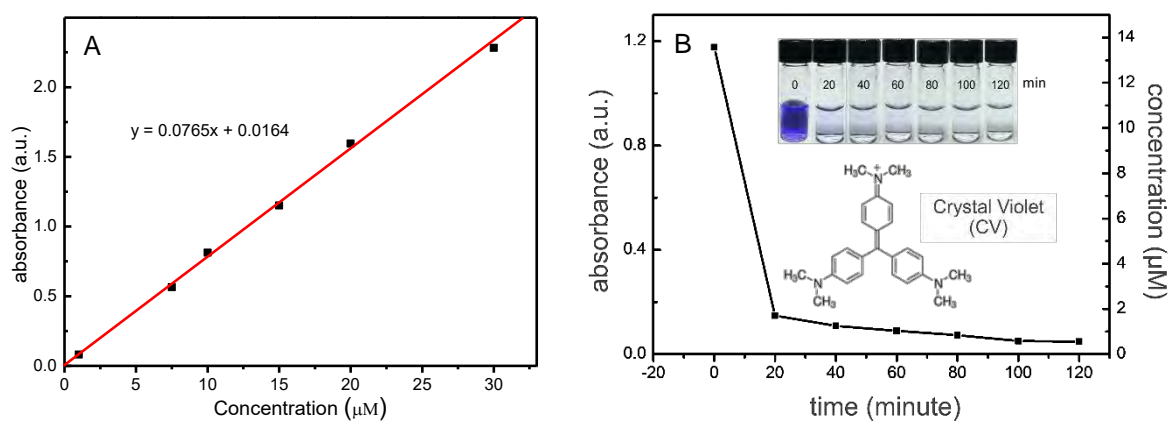
รูปที่ 3.10 (A) UV-vis spectra และ fluorescence spectra ของ ZnO QDs และ ZnO QDs@BCNC, (B) กราฟ Tauc plot ซึ่งมาจากการคำนวณโดยนำสเปกตรัม UV-vis มาคำนวณหา bandgap energy



รูป 3.11 ภาพถ่าย TEM (A) แสดงลักษณะทางกายภาพของ ZnO QDs@BCNC กำลังขยาย 10,000 เท่า, และ (B) กำลังขยาย 300,000 เท่า

### 3.5 การวิเคราะห์ผลการศึกษามสมบัติโฟโตคะตาไลติกของซิงค์ออกไซด์ควอนตัมดอทที่ตกแต่งบน แบคทีเรียเซลลูโลสนาโนคริสตัล

ZnO QDs เป็นสารกึ่งตัวนำขนาดเล็ก มีสมบัติโฟโตคะตาไลติก (photocatalytic) หรือปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation) ซึ่งสามารถทำลายสารประกอบอินทรีย์ได้ โดย ZnO QDs เมื่อถูกคลื่นแสง อิเล็กตรอนในแถบพลังงานวงนอกสุด (valenc band) จะถูกกระตุ้นไปยังแถบพลังงานนำไฟฟ้า (conduction band) ส่งผลให้แถบพลังงานวงนอกสุดเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน (hole) และแถบพลังงานนำไฟฟ้ามีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อนุพันธ์ของออกซิเจนจะเป็นตัวรับและส่งอิเล็กตรอนกับ ZnO QDs กลายเป็นอนุมูลอิสระอนุพันธ์ออกซิเจนที่ว่องไว (reactive oxygen species: ROS) สารกลุ่ม ROS ทำหน้าที่ทำลายสารประกอบอินทรีย์ให้เกิดการเสียหายได้ สำหรับการทดสอบสมบัติโฟโตคะตาไลติก ผู้วิจัยใช้คริสตัลไวโอเล็ต (crystal violet: CV) เป็นตัวแทนของสารประกอบอินทรีย์ เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และมักมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำในธรรมชาติ ในการทดสอบประสิทธิภาพของ ZnO QDs@BCNC จะเทียบปริมาณความเข้มข้นที่ลดลงของ CV โดยอ้างอิงกับกราฟการสอบเทียบมาตรฐาน (standard calibration curve) ของความเข้มข้น CV ดังรูปที่ 11A จากผลการทดสอบพบว่า CV ถูกทำให้ลดลงจาก 13.58  $\mu\text{M}$  เหลือเพียง 1.70  $\mu\text{M}$  หรือคิดเป็นร้อยละการลดลงเท่ากับ 87.5% ในเวลา 20 นาที และถูกลดลงเหลือ 0.55  $\mu\text{M}$  หรือสลายตัวร้อยละ 95.9% ในเวลา 120 นาทีดังรูปที่ 10B



รูป 3.12 (A) กราฟการสอบเทียบมาตรฐาน (standard calibration curve) ของความเข้มข้นคริสตัลไวโอเล็ต, (B) กราฟแสดงลดลงของปริมาณคริสตัลไวโอเล็ตด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง ของ ZnO QDs@BCNC

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

#### 4.1 สรุปผลการทดลอง

แบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัล สามารถสังเคราะห์ได้ด้วย 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการบำบัดด้วยต่าง ซึ่งทำหน้าที่กำจัดสิ่งตกค้างภายในแบคทีเรียลเซลลูโลส โดยนำสารแควนลอยแบคทีเรียลเซลลูโลสเติมให้ NaOH มีความเข้มข้น 1 M ให้ความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนถัดมาทำการฟอกสีเส้นใยเม็ดสีภายในเส้นใยจะถูกกำจัดออกด้วย 5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ภายใต้สภาวะที่ให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3.0 M เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลผลิตที่ได้คือแบคทีเรียลเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่มีความยาวเฉลี่ย  $1.60 \pm 0.61 \mu\text{m}$  และ มีความกว้างเฉลี่ย  $57.8 \pm 13.2 \text{ nm}$  เพื่อใช้เป็นที่ยึดเกาะและช่วยในการสังเคราะห์ ZnO QDs

ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ ZnO QDs@BCNC ได้เป็นครั้งแรก โดยเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติ ZnO QDs กับ ZnO QDs@BCNC ที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ที่คล้ายกันคือ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 340 nm จะเปล่งแสงสีเหลืองซึ่งมี  $\lambda_{\text{ex}}$  ประมาณ 520 nm ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนด้วยแสงพบว่า  $\lambda_{\text{max}}$  ของ ZnO QDs และ ZnO QDs@BCNC มีค่า 330 และ 340 nm ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลของ UV-Vis spectrum ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Tauc plot พบว่าได้ bandgap energy ของ ZnO QDs@BCNC ที่สังเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่า ZnO QDs ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.56 eV และ 3.65 eV ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำ ZnO QDs@BCNC ไปตรวจวิเคราะห์ด้วย TEM ปรากฏว่า ZnO QDs ที่อยู่บนผิวของ BCNC มีขนาด  $4.9 \pm 0.9 \text{ nm}$  ในการทดสอบสมบัติโฟโตคะตาไลติกของ ZnO QDs@BCNC กับ crystal violet (CV) พบว่า CV ถูกทำให้ลดลงจาก  $13.58 \mu\text{M}$  เหลือเพียง  $1.70 \mu\text{M}$  หรือคิดเป็นร้อยละการลดลงเท่ากับ 87.5% ในเวลา 20 นาที และถูกลดลงเหลือ  $0.55 \mu\text{M}$  หรือลดลงร้อยละ 95.9% ในเวลา 120 นาที

#### 4.2 งานวิจัยต่อในอนาคต

ZnO QDs@BCNC เป็นสารที่มีน่าสนใจและนำไปใช้งานได้หลากหลาย นอกจากสมบัติโฟโตคะตาไลติกที่ดีแล้ว ยังสามารถพัฒนาต่อยอดในนวัตกรรมด้านอื่นๆ ได้ ตัวอย่างเช่น เป็นสารเติมแต่งในเครื่องสำอางเนื่องจาก ZnO QDs@BCNC สามารถดูดกลืนแสงในช่วง UVA (320–400 nm) และ UVB (290–320 nm) ได้ มีสมบัติการป้องกันแบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่งเป็นสมบัติอีกข้อหนึ่งที่น่าสนใจ สามารถพัฒนาเป็น ZnO QDs@BCNC สำหรับพ่นบนสินค้าทางการเกษตรเพื่อป้องกันการเกิดโรคในพืชผลทางการเกษตรภายหลังเก็บเกี่ยวได้

## เอกสารอ้างอิง

1. Qi, K.; Cheng, B.; Yu, J.; Ho, W., Review on the improvement of the photocatalytic and antibacterial activities of ZnO. *Journal of Alloys and Compounds* 2017, 727, 792-820. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.142>
2. Moussavi, G.; Hossaini, H.; Jafari, S. J.; Farokhi, M., Comparing the efficacy of UVC, UVC/ZnO and VUV processes for oxidation of organophosphate pesticides in water. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2014, 290, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2014.06.010>
3. Navarro, S.; Fenoll, J.; Vela, N.; Ruiz, E.; Navarro, G., Photocatalytic degradation of eight pesticides in leaching water by use of ZnO under natural sunlight. *Journal of Hazardous Materials* 2009, 172 (2-3), 1303-1310. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.07.137
4. Shemer, H.; Linden, K. G., Degradation and by-product formation of diazinon in water during UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment. *Journal of Hazardous Materials* 2006, 136 (3), 553-559. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.12.028
5. Krol, A.; Pomastowski, P.; Rafinska, K.; Railean-Plugaru, V.; Buszewski, B., Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, antiseptic activity and toxicity mechanism. *Advances in Colloid and Interface Science* 2017, 249, 37-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.07.033>
6. Huang, W.; Bai, D.; Li, L.; Wei, H.; Shi, Z.; Cheng, H.; Li, Y., The synthesis of ultrasmall ZnO@PEG nanoparticles and its fluorescence properties. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 2015, 74 (3), 718-725. doi:10.1007/s10971-015-3653-0
7. Fuller, M. E.; Andaya, C.; McClay, K., Evaluation of ATR-FTIR for analysis of bacterial cellulose impurities. *The Journal of Microbiological Methods* 2018, 144, 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2017.10.017>
8. Singhsa, P.; Narain, R.; Manuspiya, H., Bacterial cellulose nanocrystals (BCNC) preparation and characterization from three bacterial cellulose sources and development of functionalized BCNCs as nucleic acid delivery systems. *ACS Applied Nano Materials* 2017, 1 (1), 209-221. doi: 10.1021/acsanm.7b00105
9. Lefatshe, K.; Muiva, C. M.; Kebaabetswe, L. P., Extraction of nanocellulose and in-situ casting of ZnO/cellulose nanocomposite with enhanced photocatalytic and antibacterial activity. *Carbohydrate Polymers* 2017, 164, 301-308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.02.020>

10. Awan, F.; Islam, M. S.; Ma, Y.; Yang, C.; Shi, Z.; Berry, R. M.; Tam, K. C., Cellulose nanocrystal-ZnO nanohybrids for controlling photocatalytic activity and UV protection in cosmetic formulation. *ACS Omega* 2018, 3 (10), 12403-12411. doi: 10.1021/acsomega.8b01881
11. Sahoo, D.; Mandal, A.; Mitra, T.; Chakraborty, K.; Bardhan, M.; Dasgupta, A. K., Nanosensing of pesticides by Zinc Oxide quantum dot: An optical and electrochemical approach for the detection of pesticides in water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2018, 66 (2), 414-423. doi: 10.1021/acs.jafc.7b04188
12. Kalashnikova, I.; Bizot, H.; Cathala, B.; Capron, I., New Pickering emulsions stabilized by bacterial cellulose nanocrystals. *Langmuir* 2011, 27 (12), 7471-7479. dx.doi.org/10.1021/la200971f
13. Gea, S.; Reynolds, C. T.; Roohpour, N.; Wirjosentono, B.; Soykeabkaew, N.; Bilotti, E.; Peijs, T., Investigation into the structural, morphological, mechanical and thermal behaviour of bacterial cellulose after a two-step purification process. *Bioresource Technology* 2011, 102 (19), 9105-9110. doi:10.1016/j.biortech.2011.04.077
14. Han, J.; Shim, E.; Kim, H. R., Effects of cultivation, washing, and bleaching conditions on bacterial cellulose fabric production. *Textile Research Journal* 2018, 89 (6), 1094-1104. doi: 10.1177/0040517518763989
15. Surewicz, W. K.; Mantsch, H. H.; Chapman, D., Determination of protein secondary structure by Fourier transform infrared spectroscopy: a critical assessment. *Biochemistry* 1993, 32 (2), 389-394. https://doi.org/10.1021/bi00053a001
16. Wang, F.; Zhou, S.; Yang, M.; Chen, Z.; Ran, S., Thermo-Mechanical Performance of Polylactide Composites Reinforced with Alkali-Treated Bamboo Fibers. *Polymers (Basel)* 2018, 10 (4). doi: 10.3390/polym10040401
17. Dannacher, J.; Schlenker, W., The mechanism of hydrogen peroxide bleaching. *Textile Chemist and Colorist* 1996, 28 (11), 24-28.
18. Xu, Q.; Chen, C.; Rosswurm, K.; Yao, T.; Janaswamy, S., A facile route to prepare cellulose-based films. *Carbohydrate Polymers* 2016, 149, 274-281. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.114
19. Katepetch, C.; Rujiravanit, R.; Tamura, H., Formation of nanocrystalline ZnO particles into bacterial cellulose pellicle by ultrasonic-assisted in situ synthesis. *Cellulose* 2013, 20 (3), 1275-1292. doi: 10.1007/s10570-013-9892-8

## ประวัติผู้วิจัย

นายสุภคพงศ์ เกียรติไพบุลย์เวช เกิดเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2539 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า สายการเรียนวิทย์-คณิตเมื่อปีการศึกษา 2557 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558 ได้รับรางวัลเหรียญเงิน การประกวด นวัตกรรมสาย อุดมศึกษา ประจำปี 2562 และผ่านการคัดเลือกเข้าร่วมการแข่งขัน Hitachi Trophy ในการจัดแสดงงาน science forum 2019 ณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถติดต่อได้ที่อีเมล [supakpong.k@gmail.com](mailto:supakpong.k@gmail.com)