

ฟิล์มคอมโพสิตที่เสริมด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโน
จากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ

THE COMPOSITE FILMS REINFORCED WITH GREEN
SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE COMPOSITE FILMS REINFORCED WITH
GREEN SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN
INDUSTRIAL MICROBIOLOGY
DEPARTMENT OF BIOLOGY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของห้องเรียนเท่านั้น และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2022

หัวข้อโครงการพิเศษ फिल्मคอมโพสิตที่เสริมด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ

The Composite Films Reinforced with Green Synthesis of Silver Nanoparticles

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐนิชา จิตต์พิทักษ์ รหัสนักศึกษา 62050594

นางสาวมณีนุช แผงจะโปะ รหัสนักศึกษา 62050639

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา ชีววิทยา




คณะ วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรกฤต วรนนท์กิจ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สรัญญา พันธุ์พุกภัย ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.กานต์ วงศาริยะ กรรมการ	
ผศ.ดร.วรกฤต วรนนท์กิจ กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในชั้นเรียนที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ฟิล์มคอมโพสิตที่เสริมด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ The Composite Films Reinforced with Green Synthesis of Silver Nanoparticles
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐนิชา จิตต์พิทักษ์ รหัสนักศึกษา 62050594 นางสาวมณีนุช แผงจะโปะ รหัสนักศึกษา 62050639
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชา	ชีววิทยา
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วรภฤต วรนนท์กิจ

บทคัดย่อ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชีวภาพเป็นที่นิยมมากขึ้นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การนำอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติทางกล และมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียมาใช้ร่วมกันฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารจะทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพร่วมกับสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพ โดยทำการสกัดสาหร่ายเกลียวทองด้วยตัวทำละลายละลายน้ำกลั่นแล้วให้ความร้อน นำสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองที่ได้มาผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต เพื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนทางชีวภาพ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผลิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และวุ้น ประยุกต์ใช้ร่วมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ทางชีวภาพที่ความเข้มข้น 0-3% (W/W) โดยนำมาผสมรวมกันแล้วให้ความร้อน นำแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) และนำมาประยุกต์ใช้สำหรับห่อผลส้ม ผลการศึกษาพบว่า สีของสารละลาย AgNPs เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเหลือง แสดงว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการก่อตัวจากปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ไอออนเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 415 นาโนเมตร พบหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, C=O และ C-O-H ของพอลิแซ็กคาไรด์จากสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน สีของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ AgNPs 0, 1, 2, และ 3% (W/W) มีสีใส มีสีเหลืองเล็กน้อย มีสีเหลือง และมีสีน้ำตาลอ่อน ตามลำดับ และพบการกระจายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย

อนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่ทั่วแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต นอกจากนี้แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตยังมีแสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ และมีประสิทธิภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากลักษณะของผลส้มมีความสดและเป็นที่ยอมรับได้ เห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ทางเลือกที่สามารถนำมาใช้แทนการใช้ฟิล์มพลาสติก เพื่อลดปัญหาขยะและมลพิษในสิ่งแวดล้อมได้

คำสำคัญ : การสังเคราะห์ทางชีวภาพ, สาหร่ายเกลียวทอง, อนุภาคซิลเวอร์นาโน, เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	The Composite Films Reinforced with Green Synthesis of Silver Nanoparticles	
Students	Miss Natnicha Jitpitak	Student ID 62050594
	Miss Maneenut Fangchapo	Student ID 62050639
Degree	Bachelor of Science	
Department	Biology	
School	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2022	
Advisor	Worakrit Worananthakij	

Abstract

Bio-based packaging films are becoming increasingly popular and environmentally friendly. The introduction of nanoparticles with mechanical properties and antimicrobial effects in combination with food packaging films will enhance their effectiveness. This study focuses on the development of biosynthetic polymer nanocomposite films incorporating biosynthetic silver nanoparticles (AgNPs). *Spirulina* extract was obtained using distilled water as a solvent and subsequently heated. The extract was then mixed with a silver nitrate solution to synthesize silver nanoparticles. The characteristics of the nanoparticles were analyzed using a UV-visible spectrophotometer and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Nanocomposite films were prepared using biopolymers, including tapioca starch and agar, and were applied with biosynthetic silver nanoparticles at concentrations ranging from 0% to 3% (w/w). The mixture was then combined and heated. The nanocomposite films were characterized using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) and applied for wrapping oranges. The results showed that the color of the AgNPs solution changed to yellowish-brown, indicating the formation of silver nanoparticles through the reduction

เอกสารนี้ reaction of silver ions. The highest absorbance was observed at 415 nm. The

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

presence of O-H, C-H, C=O, and C-O-H functional groups from the polysaccharides in the *Spirulina* extract was detected, suggesting their role as reducing agents in the synthesis of silver nanoparticles. The color of the nanocomposite films varied from clear to slightly yellow, yellow, and light brown, corresponding to the concentrations of 0%, 1%, 2%, and 3% (w/w) AgNPs, respectively. The distribution of silver nanoparticles was observed throughout the nanocomposite films. Furthermore, the nanocomposite films exhibited activity against both gram-positive and gram-negative bacteria, making them suitable for use as packaging materials. Due to the fresh and acceptable nature of citrus fruits, the composite film proves to be an effective alternative packaging material that can replace plastic film, thereby reducing waste and environmental pollution.

Keywords: biosynthesis, environmentally friendly, nanocomposite film, silver nanoparticles, *Spirulina*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ในหัวข้อเรื่อง พิล์มคอมโพสิตที่เสริมด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ ซึ่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีตามเป้าหมาย เนื่องจากคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรกฤต วรรณทกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่คอยให้คำปรึกษาและให้ความรู้ในการดำเนินโครงการพิเศษ ตลอดจนถึงติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินโครงการพิเศษให้มีความเรียบร้อยสมบูรณ์และประสบความสำเร็จ นอกจากนี้ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษต้องกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สร้อยญา พันธุ์ฤกษ์ ประธานกรรมการโครงการพิเศษและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ วงศ์วิริยะ กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำ แก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องของโครงการพิเศษเล่มนี้ให้ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาคชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ นางสาวปิยพรรณ แม้นกลิ่นนิยม พี่นักศึกษาปริญญาเอก ที่ให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาของครอบครัวจิตต์พิทักษ์ และครอบครัวแพงจะโปะ เป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษ จนทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ณัฐนิชา

จิตต์พิทักษ์

มณีนุช

แพงจะโปะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	4
2.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	5
2.1.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีการทางชีวภาพโดยใช้ สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง.....	6
2.1.3 คุณสมบัติของอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	7
2.2 สาหร่ายเกลียวทอง.....	11
2.2.1 สัณฐานวิทยาของสาหร่ายเกลียวทอง.....	11
2.2.2 นิเวศวิทยาของสาหร่ายเกลียวทอง.....	13
2.2.3 วงจรชีวิตของสาหร่ายเกลียวทอง.....	14
2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเกลียวทอง.....	15
2.2.5 คุณค่าทางโภชนาการหรือองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายเกลียวทอง.....	17
2.2.6 กระบวนการเก็บเกี่ยวสาหร่ายเกลียวทอง.....	18
2.3 บรรจุภัณฑ์นาโนคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพร่วมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน..	19
2.4 แป้งมันสำปะหลัง.....	20
2.4.1 มันสำปะหลัง.....	20
2.4.2 โครงสร้างทางโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง.....	21
2.4.3 ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง.....	22
2.4.4 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัสดุดิบหลักในการแปรรูป.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถนำข้อมูลบางส่วนไปใช้ได้โดยไม่ลบลายเส้นหากไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.4.5 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบประกอบในอุตสาหกรรมอื่น	23
2.5 วัุ้น	24
2.5.1 โครงสร้างทางโมเลกุลของวัุ้น	24
2.5.2 สมบัติของวัุ้น	25
2.5.3 การละลายวัุ้น.....	26
2.5.5 การใช้ประโยชน์จากวัุ้น	27
2.6 การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้.....	
สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง	28
2.6.1 UV-visible Spectrophotometer (UV-vis)	28
2.6.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	31
2.7 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต.....	33
2.7.1 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM).....	33
2.8 การประยุกต์ใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิต	36
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	39
3.1.1 อุปกรณ์การสกัดสาหร่ายเกลียวทอง.....	39
3.1.2 อุปกรณ์การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	39
3.1.3 อุปกรณ์การทำแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต	40
3.1.4 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วย	
สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง	40
3.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต	40
3.1.6 อุปกรณ์การทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย	40
3.1.7 อุปกรณ์การประยุกต์ใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในการบรรจุผลไม้..	41
3.2 วิธีการทดลอง.....	41
3.2.1 การสกัดสาหร่ายเกลียวทอง	41
3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง	41
3.2.3 การผลิตแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต	41
3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัด	
สาหร่ายเกลียวทอง	42
3.2.5 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย.....	42
3.2.7. การประยุกต์ใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในการบรรจุผลไม้.....	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	44
4.1 ผลการสกัดสารรายเกลียวทอง.....	44
4.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารสกัดสารรายเกลียวทอง	44
4.3 ผลการผลิตแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต.....	45
4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้.....	
สารสกัดสารรายเกลียวทอง	47
4.4.1 UV-visible Spectrophotometer (UV-vis)	47
4.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	47
4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต	49
4.5.1 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM).....	49
4.6 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย.....	51
4.7 ผลการประยุกต์ใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในการบรรจุผลไม้	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของโพลีแซ็กคาไรด์ของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองและ โพลีแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายเกลียวทองที่จับกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเครื่อง..... Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	49
4.2 ความสามารถของฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนในการยับยั้งเชื้อ <i>Staphylococcus aureus</i> และ <i>Escherichia coli</i>	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อนุภาคซิลเวอร์นาโนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	4
2.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง	7
2.3 ลักษณะเชื้อ <i>Staphylococcus aureus</i>	9
2.4 ลักษณะเชื้อ <i>Escherichia coli</i>	11
2.5 สาหร่ายเกลียวทองภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	12
2.6 สาหร่ายเกลียวทองชนิดผง.....	13
2.7 โครงสร้างอะไมโลส.....	21
2.8 โครงสร้างอะไมโลเพคติน	21
2.9 แป้งมันสำปะหลัง.....	22
2.10 โครงสร้างอากาศโรส.....	25
2.11 โครงสร้างอากาศโรเพคติน.....	25
2.12 ผงวุ้น.....	28
4.1 สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง.....	44
4.2 การเปลี่ยนสีของสารละลาย AgNO ₃ เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง	45
4.3 แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) 0-3% (W/W) บนถาด	46
4.4 ลักษณะแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) 0-3% (W/W).....	46
4.5 สเปกตรัมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองในช่วง ความยาวคลื่น 300–700 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer	47
4.6 สเปกตรัมของการวิเคราะห์แสดงสเปกตรัมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สาร สกัดสาหร่ายเกลียวทองด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)..	48
4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยายสูงชนิดฟิลด์อิมิชชัน .. (Field Emission Scanning Electron Microscopy) ของลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของ ฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน	50
4.8 ภาพถ่ายโคโลนีของเชื้อ <i>Staphylococcus aureus</i> บนอาหาร Trypticase soy agar.....	52
4.9 ภาพถ่ายโคโลนีของเชื้อ <i>Escherichia coli</i> บนอาหาร Trypticase soy agar หลังจากการ	53
4.10 ภาพถ่ายลักษณะของส้อมที่ไม่ได้ห่อวัสดุบรรจุภัณฑ์ ห่อด้วยฟิล์มพลาสติกและห่อด้วย	
ฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 0-3% (W/W).....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผู้ผลิตและผู้บริโภคในอุตสาหกรรมอาหารมีความต้องการอาหารที่ปราศจากสารสังเคราะห์ และมีความกังวลเกี่ยวกับการผลิต และการนำไปใช้ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ และยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกในปริมาณมากในขั้นตอนการผลิต ซึ่งเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของโลก และยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในสิ่งแวดล้อมด้านมลภาวะทางน้ำ มลภาวะจากขยะ มลพิษทางดิน นำไปสู่การพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ชีวภาพทางเลือกที่สังเคราะห์จากสารชีวภาพ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ และโปรตีน แทนการใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียม

ตามมาตรฐาน ASTM (American Society of Testing Materials) คำว่า ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง ย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน น้ำ สารประกอบอินทรีย์ และชีวมวล รวมถึงพอลิแซ็กคาไรด์ และโปรตีน จึงมักนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งสามารถนำไปรีไซเคิลย่อยสลายได้ ปลอดภัย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอน เช่น กรดพอลิแลคติกกับพอลิเมอร์สังเคราะห์จากชีวภาพถือว่าได้ปริมาณมาก และมีราคาต่ำกว่า (Goudazi et al., 2017)

แป้งจัดเป็นกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งแบ่งที่ได้มาจากผลผลิตของเมล็ดพืช และพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง ฯลฯ เป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่ย่อยสลายได้ และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ทำหน้าที่เป็นสารให้คงตัว (Ruggero et al., 2020) แต่พอลิเมอร์ทางชีวภาพมีข้อจำกัดลักษณะทางกล โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ (Azizi-Lalabadi et al., 2020) ฟิล์มที่ทำจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพจะละลายน้ำได้ดี ดังนั้นจึงสามารถดูดซับไอน้ำได้เมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ พอลิเมอร์ทางชีวภาพสามารถปรับปรุงได้โดยการผสมผสานสารประกอบอื่น ๆ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ (Tabatabaei et al., 2018) โดยผงวุ้นเป็นสารที่เหมาะสมสำหรับการนำมาผสมกับแป้ง เนื่องจากเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงเส้นที่สร้างขึ้นจาก เบต้า 1,3 กาลแลคโตส เชื่อมกับ แอลฟา 1,4 กาลแลคโตส และยังเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สกัดได้จากสาหร่าย เช่น สาหร่ายสีแดง ซึ่งมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ (Martínez-Sanz et al., 2019)

อาหารมีความไวต่อเน่าเสีย และสามารถเสื่อมสภาพได้หลังจากขั้นตอนการผลิต จึงควร
เอกสารนี้เป็นการป้องกันการเสื่อมเสีย และการปนเปื้อนของอาหารจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการเสื่อมเสียที่มีสาเหตุ
ไม่มาจากแบคทีเรียซึ่งสามารถทำให้ก่อโรคจากการรับประทานอาหาร การนำนาโนเทคโนโลยีมาผสมกับ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารกำลังมีการศึกษาวิจัยกันอย่างมาก เนื่องจากอนุภาคนาโนเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่เสริมคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความทนทาน คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติคงตัวทางความร้อน คุณสมบัติเชื้อแบคทีเรีย คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ คุณสมบัติป้องกันรังสียูวี ฯลฯ (Dey et al., 2022; Kuorwel et al., 2015) อนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากฤทธิ์ต้านแบคทีเรียหลายชนิด มีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ และสามารถทำให้เก็บรักษาอาหารได้นานขึ้น (Hoseinnejad et al., 2018; Simbine et al., 2019)

การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีวิธีที่หลากหลาย ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งการสังเคราะห์วิธีการทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ เอนไซม์ และสารสกัดจากพืช เป็นการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Ghosh et al., 2020; Kumar et al., 2020; Simbine et al., 2019; Kopusiewicz et al., 2022) ซึ่งจุลินทรีย์ที่กำลังเป็นที่นิยม คือ สาหร่าย เนื่องจากเป็นมีสารประกอบธรรมชาติ เช่น โปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ ฟีนอลิก เอนไซม์ ฟลาเวอนอยด์ วิตามิน เทอพेอนอยด์ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ และให้ความเสถียร เพื่อใช้สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน (Eroglu et al., 2013; Kharissova et al., 2013; Mittal et al., 2013) ซึ่งสาหร่ายเกลียวทองเป็นสาหร่ายเศรษฐกิจ และเป็นแหล่งที่ให้ปริมาณโปรตีนสูงเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตเสริมด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ทางชีวภาพโดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองแล้วทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพ และนำไปใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ทางเลือกแทนฟิล์มพลาสติกในอนาคตเพื่อเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนทางชีวภาพโดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองร่วมกับการผลิตแผ่นฟิล์มคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพ
- 2) เพื่อผลิตแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตให้มีคุณสมบัติต้านแบคทีเรีย
- 3) เพื่อผลิตแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตให้มีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาอาหาร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพร่วมกับสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพ โดยทำการสกัดสาหร่ายเกลียวทองด้วยตัวทำละลายละลายน้ำกลั่นแล้วให้ความร้อน นำสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองมาผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทแล้วให้ความร้อนและกวนอย่างต่อเนื่อง เพื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนทางชีวภาพ จากนั้นนำอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านใด ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิลเวอร์นาโน และนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต ซึ่งผลิตจากการนำอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองมาประยุกต์ใช้ร่วมกับพอลิเมอร์ทางชีวภาพ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และวุ้น โดยนำแป้งมันสำปะหลัง ผงวุ้น กลีเซอรอล (พลาสติกไซเซอร์) น้ำกลั่น และอนุภาคซิลเวอร์นาโนตั้งแต่ 0-3% (W/W) มาผสมรวมกันและให้ความร้อน และจะได้แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต นำแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) นอกจากนี้ นำแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตมาทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย และนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ในการห่อผลไม้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผลิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพร่วมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ทางชีวภาพโดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 2) แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียได้
- 3) แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ทางเลือกแทนการใช้ฟิล์มพลาสติก

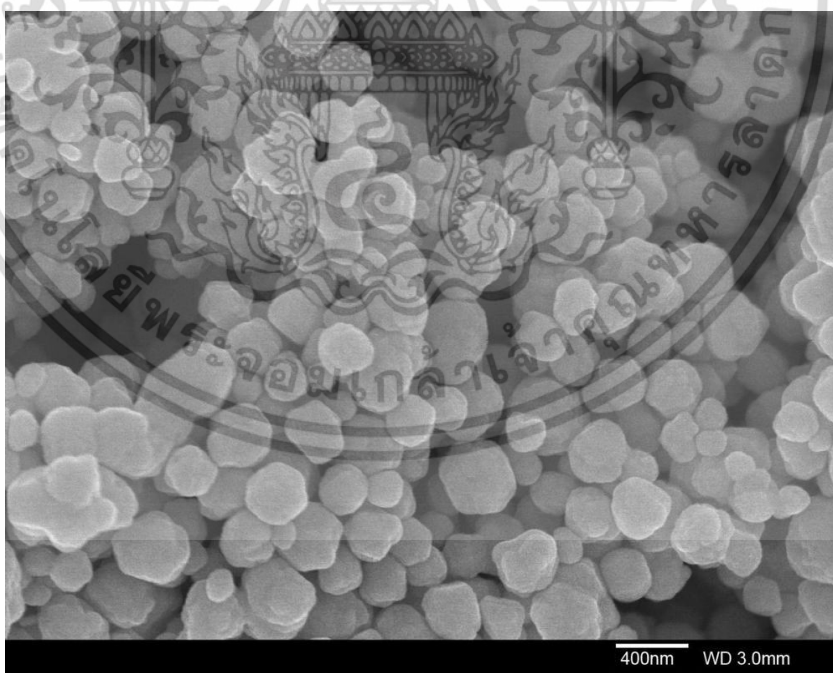
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อนุภาคซิลเวอร์นาโน

นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology, NT) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างให้มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร เพื่อเพิ่มพื้นผิวที่จะสัมผัส และด้วยความที่มีขนาดเล็กทำให้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้ถูกนิยามขึ้นครั้งแรกโดย Professor Norio Taniguchi ในปีคริสต์ศักราช 1974 และได้ถูกนำไปใช้ในการเป็นวัตถุดิบในการผลิตทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย จนถึงปัจจุบัน กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน (nanoparticles, NPs) ซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะใช้ธาตุโลหะต่าง ๆ เช่น เงิน (Ag) ทอง (Au) แพลตินัม (Pt) ซีลีเนียม (Se) เป็นต้น ขนาดของอนุภาคนาโนที่นำไปประยุกต์ใช้จะอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร และยังมีโลหะอีกหลายชนิดที่สามารถนำมาสังเคราะห์ให้ได้ขนาดนาโน เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่แตกต่างกันได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังรูปที่ 2.1 เป็นอนุภาคของโลหะเงินที่มีคุณสมบัติมากมายซึ่งคุณสมบัติแต่ละอย่างสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย ด้านตามความเหมาะสมของการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 อนุภาคซิลเวอร์นาโนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

ที่มา: <https://ssnano.com/inc/sdetail/silver-nanoparticles-nanopowder--ag--99-9--200->

เอกสารนี้ 400-nm-/5556 เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน

การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถสังเคราะห์ได้ 3 วิธี คือ วิธีการทางเคมี (Chemical approach) วิธีการทางกายภาพ (Physical approach) และวิธีการทางชีวภาพ (Biological approach)

2.1.1.1 วิธีการทางเคมี (chemical approach)

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนด้วยวิธีการทางเคมี เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก ควบคุมขนาด และรูปร่างได้ง่าย ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมีประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

- 1) เกลือของซิลเวอร์ (silver salt) ที่นิยมใช้ คือ ซิลเวอร์ไนเตรต
- 2) ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น sodium citrate, ascorbate, sodium borohydride (NaBH_4), elemental hydrogen, polyol process, Tollen's reagent, และ N, N-dimethylformamide (DMF) เป็นต้น ซึ่งตัวรีดิวซ์มีหน้าที่รีดิวซ์ Ag^+ ในสารละลายให้กลายเป็น Ag^0

- 3) สารให้ความคงตัว (stabilizer) หรือ capping agent ส่วนมากนิยมใช้สารพอลิเมอร์ เช่น poly (vinyl alcohol), polyvinylpyrrolidone, poly (ethylene glycol), poly (methacrylic acid) และ poly (methyl methacrylate) เป็นต้น ซึ่งสารให้ความคงตัวมีหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินนาโน

ตัวอย่างการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน เช่น งานวิจัยของ Zielinska et al. (2009) สังเคราะห์โดยเริ่มต้นจากการผสมซิลเวอร์ไนเตรตกับ polyvinyl pyrrolidone จากนั้นค่อย ๆ หยด sodium citrate ลงไปในสารละลายผสม กวนสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สีสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว แสดงให้เห็นว่าซิลเวอร์ไอออนถูกเปลี่ยนเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน จากนั้นทำการตกตะกอนเพื่อแยกเอาอนุภาคซิลเวอร์นาโนไปพิสูจน์เอกลักษณ์ต่อไป นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่ในขั้นตอนการสังเคราะห์ยังมีการใช้ตัวทำละลาย เช่น เอทานอล ไดเมทิล-ฟอร์มมาไมด์เอทิลีน ไกลคอล โทลูอีน และคลอโรฟอร์ม เป็นต้น (Gan and Li, 2012) จะเห็นว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ จะใช้สารเคมีค่อนข้างมาก ซึ่งสารเคมีเหล่านี้มีความเป็นพิษส่งผลให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง และยังพบว่าสารเคมีที่เป็นพิษบางชนิด มีโอกาสปนเปื้อนที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ทำให้ไม่เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านชีวการแพทย์

2.1.1.2 วิธีการทางกายภาพ (physical approach)

วิธีการทางกายภาพเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนนาโนที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง สามารถควบคุมขนาด รูปร่าง และปริมาณของอนุภาคเงินนาโนได้ง่าย แต่ข้อเสีย คือ เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์มีราคาสูง ทำให้มีต้นทุนในการเอกสารนี้ผลิตสูงตามด้วย การสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางกายภาพโดยทั่วไปจะใช้วิธีการระเหย และควบแน่นไม่ผ่านการ (evaporation-condensation) โดยใช้เตาเผาแบบหลอดแก้ว (tube furnace) ที่ความดัน

บรรยากาศ แต่ข้อเสียของการใช้เตาเผาแบบหลอดแก้ว คือ ต้องใช้พลังงานสูง และใช้เวลานานเพื่อทำให้ความเกิดความเสถียรทางความร้อน ดังนั้น จึงมีการใช้เซรามิกฮีตเตอร์ขนาดเล็ก (small ceramic heater) เนื่องจากไอที่เกิดจากการระเหยจะควบแน่นกลับมาในอัตราเร็วที่เหมาะสม ทำให้พื้นผิวของฮีตเตอร์สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่พื้นผิวของฮีตเตอร์ยังค่อนข้างคงที่ตลอดเวลาทำให้อนุภาคเงินนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็ก และมีความเข้มข้นสูง อีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้ในสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน คือ วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (laser ablation) ซึ่งสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างได้ง่ายด้วยการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความยาวคลื่นของเลเซอร์ ความเข้มของแสงเลเซอร์ และเวลาในการยิงเลเซอร์ เป็นต้น

2.1.1.3 วิธีการทางชีวภาพ (biological approach)

ปัจจุบันนักวิจัยให้ความสนใจการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีทางชีวภาพมากขึ้น เนื่องจากสามารถลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถใช้แบคทีเรีย เชื้อรา ยีสต์ และสารสกัดจากพืชในการสังเคราะห์ ซึ่งส่วนประกอบหลักในการสังเคราะห์ มี 3 ส่วน คือ

- 1) สารละลายตัวกลางในการสังเคราะห์
- 2) ตัวรีดิวซ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 3) สารให้ความคงตัวที่ไม่เป็นพิษ

ข้อดีของวิธีการสังเคราะห์ทางชีวภาพ คือ ใช้สารเคมีในปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีและทางกายภาพ เนื่องจากสารชีวโมเลกุลที่อยู่ในจุลินทรีย์ และสารสกัดจากพืชสามารถ เป็นได้ทั้งตัวรีดิวซ์และสารให้ความคงตัว ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่ข้อเสีย คือ ควบคุมขนาด รูปร่าง และความเป็นผลึกได้ยาก

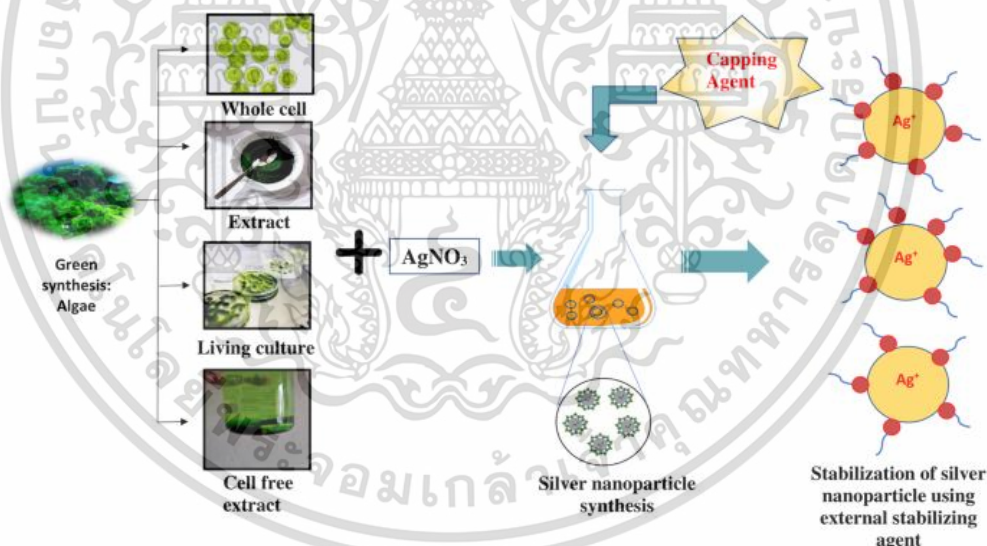
2.1.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีการทางชีวภาพโดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง

อนุภาคนาโน หรือวัสดุนาโน (NMs) หรือผลิตภัณฑ์นาโน (NPs) เป็นผลิตภัณฑ์ของนาโนเทคโนโลยีที่มีขนาดตั้งแต่ 1–100 นาโนเมตร มีความโดดเด่นในด้านความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี อนุภาคนาโนของโลหะสามารถเตรียมได้หลายวิธี นาโนเทคโนโลยีที่ถูกสังเคราะห์ทางชีวภาพเป็นวิธีทางเทคโนโลยีชีวภาพในการผลิตอนุภาคนาโนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีความเป็นพิษ (Patra and Baek, 2014) สารสกัดและสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อเป็นทางเลือกในการเตรียมอนุภาคนาโนของโลหะ

อนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นนาโนเทคโนโลยีที่น่าสนใจเนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าสูง และมีความไวต่อการดูดซับพื้นผิวโลหะมาก ดังนั้น อนุภาคซิลเวอร์นาโนจึงเป็นที่นิยมใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น การต้านแบคทีเรีย อุตสาหกรรมอาหาร มะเร็ง การฟื้นฟูบาดแผล อิเล็กทรอนิกส์ และสิ่งทอ (Fard et al., 2015) อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีการทางชีวภาพจะมีความเสถียรสูง และมีขนาดไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ทางชีวภาพ เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ เวลาสัมผัส ความดัน และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไอออน

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทางชีวภาพสามารถใช้สารสกัดจากพืช หรือสารสกัดจากจุลินทรีย์ เช่น สาหร่าย แบคทีเรีย รา ยีสต์ ซึ่งการใช้สารสกัดสาหร่าย ดังรูปที่ 2.2 ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากลักษณะของสาหร่ายที่มีความเป็นพิษต่ำ เก็บเกี่ยวง่าย เติบโตเร็วประหยัดต้นทุน และปลอดภัยกว่าในการใช้สารเคมี (AlNadhari et al., 2021) และสารประกอบทางเคมีต่าง ๆ จากเซลล์สาหร่าย เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ฟีนอลิก น้ำตาล ฟลาโวนอยด์ เอนไซม์ ฯลฯ ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งใช้สำหรับการสังเคราะห์ทางชีวภาพของอนุภาคซิลเวอร์นาโน การใช้สายพันธุ์ของสาหร่ายที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีผลทำให้ได้อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีลักษณะแตกต่างกัน (Ponnuchamy and Jacob, 2016) เนื่องจากสารรีดิวซ์ที่อยู่ในสารสกัดสาหร่าย และสารชีวภาพแต่ละชนิดจะมีการออกฤทธิ์ที่แตกต่างกัน เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ สารต้านเนื้องอกสารต้านแบคทีเรีย และสารต้านไวรัส (Liu et al., 2019; Keefe et al., 2019) มีการค้นพบผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายต่าง ๆ สามารถเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีสำหรับใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน (Yugay et al., 2020)



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารสกัดสาหร่าย

ที่มา: <https://jgeb.springeropen.com/articles/10.1186/s43141-021-00228-w>

2.1.3 คุณสมบัติของซิลเวอร์นาโน

อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีคุณสมบัติที่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ ดังนั้น จึงถูกนำไปใช้ร่วมกับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้า เช่น เสื้อผ้า ระบบกรองน้ำ เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องสำอาง อุปกรณ์ไฟฟ้าเครื่องใช้ภายในบ้าน มีสมบัติทางแสงที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานไบโอเซ็นเซอร์ มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์

อิเล็กทริก หรือนำไปใช้เป็นส่วนผสมในหมึกตัวนำ กาว และแป้งเปียก และใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสไตรีน (Sintubin et al., 2009)

นอกจากนี้ นาโนเทคโนโลยีช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนเกิดขึ้นได้จากการที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนสัมผัสกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย จะสามารถแพร่กระจายไปเกาะตามผนังเซลล์ และแทรกเข้าไปภายในเซลล์แบคทีเรีย ทำให้เกิดภาวะการรวมตัวของ DNA ภายในเซลล์ (Condensation) ซึ่งอนุภาคซิลเวอร์นาโนเมื่ออยู่ในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนของซิลเวอร์ และเกิดการออกซิเดชันที่ผิวทำให้ได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปของ Ag^+ ที่ล้อมรอบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโน และทำให้ประจุบวกของซิลเวอร์เข้าไปจับกับเอนไซม์โปรตีนเนส ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบเมตาบอลิซึมของเซลล์ และจะจับกับหมู่ซัลไฟไฮดริลของเอนไซม์ที่มีอะตอมของซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบซึ่งมีประจุเป็นลบ และทำให้กระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานจนกระทั่งเซลล์แบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพตายในที่สุด หรือกล่าวคือ ซิลเวอร์นาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ส่งผลให้มีการแตกตัวเป็นไอออนได้อย่างรวดเร็วกว่าซิลเวอร์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า รวมถึงมีความสามารถในการเป็นจุดจับสูง ดังนั้นเมื่อเข้าไปอยู่ภายในเซลล์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน และอาจรบกวนการทำงานของสารชีวโมเลกุล เช่น โปรตีน และ DNA ซึ่งขนาดรูปร่างรวมถึงสิ่งที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวของซิลเวอร์นาโนเป็นปัจจัยร่วมในการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยแบคทีเรียที่นิยมมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli*

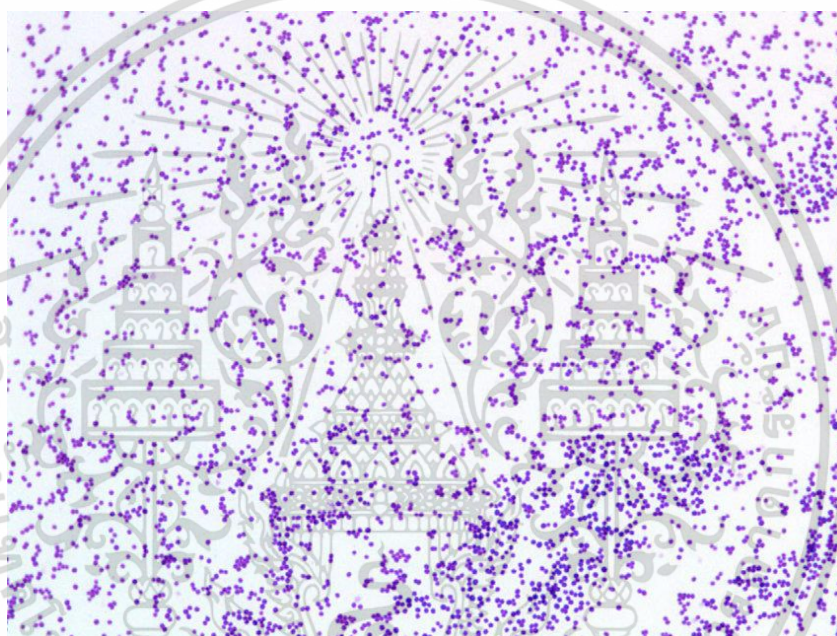
เซลล์แบคทีเรีย เป็นโปรคาริโอตซึ่งเป็นเซลล์ที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ยกเว้นผนังเซลล์ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่ายูคาริโอต โครงสร้างและหน้าที่ที่แบคทีเรียแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างภายนอก ได้แก่ ผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ และแฟลกเจลลา และโครงสร้างภายใน ได้แก่ ไซโตพลาซึม, ไรโบโซม, สปอร์ และเม็ดสี แบคทีเรียเกือบทุกชนิดเมื่อเจริญเติบโตในธรรมชาติ จะมีโครงสร้างชั้นนอกสุดของเซลล์ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปร่างไม่แน่นอน และไม่ติดสีแกรม โครงสร้างชั้นนอกสุดนี้มีชื่อหลายชื่อ เช่น แคปซูลเอนVELOP ชั้นเมือก หรือไกลโคแคลิกซ์ ขนาดของแคปซูลของแบคทีเรียแต่ละชนิดแตกต่างกัน สารที่เป็นส่วนประกอบของแคปซูลส่วนใหญ่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามส่วนประกอบและความซับซ้อน และองค์ประกอบของแคปซูลของแบคทีเรียแต่ละชนิดปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ได้แก่ อุณหภูมิโดยแบคทีเรียส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียส และความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อมมีผลต่อการเจริญของแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่เจริญได้ดีในช่วงพีเอช 6-8 เป็นต้น

2.1.3.1 แบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษา

1) *Staphylococcus aureus*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ *Staphylococcus aureus* เป็นแบคทีเรียก่อโรคที่สำคัญในอาหารแบคทีเรียไม่ว่ากรณีใดก็ตามมีรูปร่างเป็นทรงกลม อยู่รวมกันเป็นพวงคล้ายพวงองุ่น ไม่สร้างสปอร์ ส่วน

ใหญ่ไม่มีแคปซูล ให้ผลบวกในการทดสอบ catalase และในภาวะไม่มีออกซิเจนจะสลายน้ำตาล กลูโคสให้กรดอินทรีย์ จัดอยู่ในกลุ่มเจอร์มิได้ที่มีอากาศ และไม่มีอากาศ แต่เจอร์มิได้ดีกว่าในสภาวะที่มีอากาศ *Staphylococcus aureus* สร้างสารพิษชนิดเอนโทโรทอกซิน สารพิษที่สร้างมีสมบัติพิเศษคือ ทนความร้อน *Staphylococcus aureus* ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษชนิด intoxication บริโภคอาหารที่มีสารพิษเอนโทโรทอกซินที่เชื้อสร้างขึ้น ปนเปื้อนในปริมาณน้อยกว่า 1 ไมโครกรัม จะสามารถทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยได้ มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน เป็นตะคริวในช่องท้อง และอ่อนเพลีย ผู้ป่วยบางรายอาจมีอาการปวดศีรษะ เป็นตะคริวที่กล้ามเนื้อ และมีการเปลี่ยนแปลงความดันโลหิตเป็นระยะ รวมทั้งอาจมีการเต้นของชีพจรผิดปกติ



รูปที่ 2.3 ลักษณะเชื้อ *Staphylococcus aureus*

ที่มา: https://www.researchgate.net/publication/266028804_Prevalence_of_Bacterial_Contamination_when_using_a_Diversion_Pouch_during_Blood_Collection_A_Single_Center_Study_in_Malaysia

2) *Escherichia coli*

Escherichia coli เป็นแบคทีเรียแกรมลบ รูปร่างเป็นแท่ง ไม่สร้างสปอร์ เจอร์มิได้ทั้งที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจน อยู่ในวงศ์ *Enterobacteriaceae* และเป็นแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มโคลิฟอร์มประเภทฟิโคไลโคลิฟอร์ม ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้สุขภาพของอาหาร และน้ำ *Escherichia coli* ส่วนใหญ่ไม่ใช่จุลินทรีย์ก่อโรคแต่บางชนิดที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ หรือเรียกว่า *Enterovirulent Escherichia coli* group (EEC group) มี 4 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) *Enterotoxigenic Escherichia coli* (ETEC)

เป็น *Escherichia coli* ซึ่งทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ อาการทั่วไป คือ ท้องร่วง ปวดท้อง ไข้ต่ำ คลื่นไส้ และอ่อนเพลีย การติดเชื้อจะแสดงอาการต่อเมื่อได้รับเชื้อเข้าไปประมาณ 100 ล้าน ถึง 10 พันล้านเซลล์ โดยระหว่างการเจริญจะสร้างสารพิษที่ทำให้เกิดการหลั่งของของเหลว แหล่งที่พบ คือ น้ำที่ปนเปื้อน แล้วไปปนเปื้อนต่อในอาหาร หรือจากคนป่วยที่สัมผัสหรือปรุงอาหาร ปัจจุบันการวิเคราะห์เชื้อตัวนี้ในอาหารทำได้โดยใช้เวลา 3 วัน หรือใช้วิธีทดสอบสารพิษโดยทั่วไป ซึ่งใช้เวลาอย่างน้อยที่สุด 7 วัน

2) *Enteropathogenic Escherichia coli* (EPEC)

เป็น *Escherichia coli* ชนิดที่ถือว่าเป็นเชื้อโรคที่ระบาดโดยมีความรุนแรงที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการขับสารพิษทั่วไปของ EEC ชนิดอื่น EPEC แพร่ไปในคน และสัตว์หลายชนิด เช่น วัวควาย และหมู มักเป็นโรคที่เป็นกับเด็กทำให้อุจจาระร่วงเป็นน้ำหรือเป็นเลือดคล้ายกับอาการที่เกิดจากเชื้อ *Shigella* ซึ่งเรียกว่า ชิกะทอกซิน ด้วยเช่นกัน ปริมาณเชื้อที่ก่อโรคอาจในปริมาณต่ำหรือมากกว่า 10⁶ อาหารที่พบเชื่อนี้ คือ เนื้อวัว เนื้อไก่ดิบ และจากน้ำปนเปื้อนที่นำมาขนมให้เด็ก

3) *Enterohemorrhagic Escherichia coli* (EHEC) หรือ *Escherichia coli* O157:H7

พิษที่สร้างโดย *Escherichia coli* O157:H7 เป็นประเภท verotoxin ที่คล้ายกับ shigatoxin ที่สร้างโดย *Shigella dysenteriae* ทำให้เกิดความเสียหายให้แก่เยื่อของลำไส้ ความรุนแรง คือ ทำให้เกิดลำไส้ใหญ่อักเสบจนตกเลือดอาการ คือ ปวดท้องรุนแรง อุจจาระร่วงเป็นตอนแรก แต่กลายเป็นมูกเลือดต่อมา อาจมีอาการอื่นบ้าง และมีไข้ต่ำหรือไม่มี อาหารที่เกี่ยวข้องได้แก่ เนื้อสด นอกจากนี้ ยังอาจพบในน้ำผลไม้ที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ ไส้กรอกหมูปนเนื้อวัว เป็นต้น บางครั้งคนไข้มีอาการจากการมีสารในปัสสาวะปะปนในเลือดที่มีลักษณะพิเศษ คือ อาจทำให้ไตวายถาวรได้

4) *Enteroinvasive Escherichia coli* (EIEC)

ทำให้เกิดอาการคล้ายของโรคบิดจากเชื้อ *Shigella dysenteriae* หรือบิดมีตัว ทำให้ท้องร่วงโดยมีเลือด หรือมูกในอุจจาระของผู้ที่ติดเชื้อ ปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดอาการประมาณ 10 เซลล์ (เท่ากับ *Shigella*) อาหารที่เกี่ยวข้องยังไม่ชัดเจน แต่มีรายงานว่าเกี่ยวกับเนื้อแอมเบอร์เกอร์ และน้ำนมที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ เวลาฟักตัวประมาณ 12-72 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะเชื้อ *Escherichia coli*

ที่มา: https://www.researchgate.net/publication/316210773_Molecular_detection_and_characterization_of_Escherichia_coli_isolated_from_raw_milk_sold_in_different_markets_of_Bangladesh

2.2 สาหร่ายเกลียวทอง

2.2.1. ลัทธิฐานวิทยาของสาหร่ายเกลียวทอง

สาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) คือ สาหร่ายที่จัดอยู่ในกลุ่มของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เนื่องจากมีคลอโรฟิลล์ที่มีส่วนช่วยทำหน้าที่ในกระบวนการสังเคราะห์แสง สาหร่ายเกลียวทองเป็นแบคทีเรียประเภทไซยาโนแบคทีเรีย เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตประเภทโพรคาริโอต ที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส และการที่มีคลอโรฟิลล์ช่วยในการสังเคราะห์แสง อาจทำให้เกิดความเข้าใจผิดว่าสาหร่ายเกลียวทองเป็นพืช ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแท้จริงแล้วสาหร่ายชนิดนี้ยังห่างไกลจากคุณสมบัติของความเป็นพืชอยู่มาก (ยวดี, 2545) ลักษณะโดยทั่วไปของสาหร่ายเกลียวทองจะเป็นเส้นสายประกอบด้วยเซลล์หลาย ๆ เซลล์เรียงต่อกัน ไม่แตกแขนง ขนาดเซลล์มีขนาดเล็ก และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1-12 ไมครอน มีรูปร่างขดเป็นเกลียวคล้ายลวดสปริง หากนำเซลล์สาหร่ายเกลียวทองไปส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงจะเห็นเซลล์เส้นสาย ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 สาหร่ายเกลียวทองภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ที่มา: https://www.researchgate.net/publication/309209797_A_Review_on_Antioxidant_Properties_of_Spirulina

โครงสร้างเซลล์ของสาหร่ายประเภทนี้มีลักษณะของเซลล์เป็นรูปทรงกระบอกเรียงต่อกันเป็นเส้นสายตรง หรือบิดเป็นเกลียว หรือขดเป็นวง ไม่มีเซลล์แตกแขนงระหว่างเส้นสาย เรียกว่า ไตรโคม มีขนาดความยาวของเส้นสายอยู่ที่ 300-500 ไมโครเมตร ความกว้างอยู่ในช่วง 6-12 ไมโครเมตร เส้นสายไตรโคมนี้มีลักษณะการบิดที่ต่างกันไปตามสปีชีส์ และสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตของสาหร่าย ผนังเซลล์ของสาหร่ายเกลียวทองเป็นผนัง 4 ชั้น โดยผนังเซลล์ชั้นนอกสุด ประกอบด้วย สารไลโปพอลิแซ็กคาไรด์ ไม่พบสารประกอบพวกเซลล์ลูโลส เชื่อมต่อกันด้วยแคลเซียม และ แมกนีเซียม ส่วนชั้นที่สองเป็นชั้นใยของมิวโครโปรตีน สำหรับชั้นที่หนึ่งเป็นชั้นของผนังเซลล์ที่มีความแข็งแรงที่สุด ประกอบไปด้วยเปปติโดไกลแคน และชั้นในสุดมี β -1,2-กลูแคน เป็นองค์ประกอบหลัก (ราเชนทร์, 2552) ภายนอกผนังเซลล์ยังมีถุงอากาศเล็ก ๆ หรือก๊าซแวกคิวโอล ขนาดใหญ่อยู่ในไซโตพลาสซึม ทำให้สาหร่ายมีความสามารถลอยน้ำได้ดี บริเวณนิวเคลียสไม่มีเยื่อหุ้ม มีกรดนิวคลีอิกกระจายอยู่ทั่วไปในเซลล์ ไม่มีพลาสติก หรือโครมาโตเฟออร์ ทำให้รงควัตถุกระจายทั่วไปอยู่ในไซโตพลาสซึม ตัวเซลล์ไม่มีเยื่อเมือกหุ้มเหมือนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินทั่วไปทำให้ จุลินทรีย์อื่น ๆ ไม่สามารถเกาะที่ผิวของเซลล์สาหร่ายเกลียวทองได้ จึงทำให้มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ได้สูง (สุพัตรา, 2533)

การจำแนกหมวดหมู่ของสาหร่ายเกลียวทองให้อยู่ในอนุกรมวิธาน ดังนี้ Kingdom *Monera* Division *Cyanophyta* Class *Cyanophyceae* Order *Oscillatoriales* Family *Oscillatoriaceae* Genus *Spirulina* และ Species *Spirulina platensis* (Nordstedt) Geiteler (ขจรเกียรติ, 2550) ในปัจจุบันได้มีการค้นพบสาหร่ายเกลียวทองประมาณ 35 สปีชีส์ เช่น *Spirulina platensis*, *S. major*, *S. princeps*, *S. laxissima*, *S. subtilissima* เป็นต้น แต่ละสปีชีส์จะแตกต่างกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันทั้งขนาดความยาว และลักษณะของเกลียว สำหรับชนิดสายพันธุ์สาหร่ายเกลียวทองที่ได้รับการคัดเลือก และนิยมนำมาทำวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์กันมาก คือ *Spirulina platensis* เนื่องจากมีความเหมาะสมในการเพาะเลี้ยง และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรมสำหรับมนุษย์ และสัตว์ ดังรูปที่ 2.6

สาหร่ายเกลียวทองจัดเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยโปรตีน 60-70% ของน้ำหนักแห้ง (ยวดี, 2545) ในด้านคุณค่าทางโภชนาการ หรือองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ นิยมนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ส่วนผสมของเครื่องดื่มผลิตภัณฑ์เพื่อความงามยารักษาโรครวมไปถึงอาหารสัตว์ ทั้งนี้คุณค่าทางโภชนาการ หรือองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จะมีความแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมที่สาหร่ายเจริญเติบโต



รูปที่ 2.6 สาหร่ายเกลียวทองชนิดผง

ที่มา: <https://boonsom.com/>

2.2.2 นิเวศวิทยาของสาหร่ายเกลียวทอง

สาหร่ายเกลียวทองเป็นสิ่งมีชีวิตที่เจริญได้ดีในเขตร้อน พบทั้งในทวีปอเมริกา ออฟริกา และเอเชีย สามารถพบได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งที่เป็นน้ำจืด น้ำกร่อย หรือแม้กระทั่งน้ำเสียจากโรงงาน ซึ่งเป็นสภาพที่สิ่งมีชีวิตอื่นเจริญเติบโตได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีความเค็ม และความเป็นเบสค่อนข้างสูง ทั้งปริมาณ และชนิดของเกลือ มีอิทธิพลต่อชนิด และปริมาณของสาหร่าย ถ้าหากในน้ำมีปริมาณเกลือมากกว่า 30 กรัมต่อลิตร ขึ้นไปจะพบสาหร่ายเกลียวทอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจริญเติบโตอย่างหนาแน่นเพียงอย่างเดียว สำหรับประเทศไทยพบสาหร่ายเกลียวทองแพร่กระจายในแหล่งน้ำทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือมากกว่าภาคอื่น (บุญเริ่ม, 2540)

2.2.3 วงจรชีวิตของสาหร่ายเกลียวทอง

การสืบพันธุ์ของสาหร่ายชนิดนี้จะมีเฉพาะแบบไม่อาศัยเพศโดยการแตกตัว หรือแยกออก เป็นสองท่อน ไม่มีการสร้างเฮเทอโรซิสต์ และสปอร์ โดยเริ่มจากเส้นสายไตรโคมาที่โตเต็มที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเซลล์พิเศษเรียกว่า นิโครเตีย หลังจากนั้นนิโครเตียจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ หลายเส้นสาย แต่ละเส้นสายจะประกอบไปด้วย 2-4 เซลล์ จะเรียก นิโครเตียที่แตกเป็นสายนี้ว่า ฮอร์โมโกเนีย จากนั้นปลายทั้งสองด้านของฮอร์โมโกเนียจะค่อย ๆ ม้วนเป็นเกลียว โดยเซลล์จะเพิ่มจำนวนโดยวิธี cell fusion และ เจริญเติบโตเป็นไตรโคมา ลักษณะของเซลล์ฮอร์โมโกเนียจะมีสีซีด เพราะในไซโตพลาสซึมมีกรานูลน้อย เมื่อเจริญเติบโตเป็นไตรโคมาเต็มตัวกรานูลจะเพิ่มขึ้นภายในไซโตพลาสซึม ทำให้เซลล์มีสีเขียวแกมน้ำเงินมากขึ้น (สินีนาฏ, 2550) การเจริญเติบโตของสาหร่ายนี้จะแบ่งออกได้เป็น 5 ระยะ ได้แก่

2.2.3.1 ระยะปรับตัว (Lag of Inductional Phase)

เป็นระยะที่เซลล์ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ เช่น แสง อุณหภูมิ และธาตุอาหาร ฯลฯ ระยะนี้สาหร่ายไม่มีการแบ่งเซลล์ ดังนั้น การที่สาหร่ายจะปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในระยะนี้เร็วมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเซลล์ และความสมบูรณ์ของอาหารที่เลี้ยง หากสภาพทั้งสองมีความเหมาะสมสาหร่ายสามารถเข้าสู่ระยะที่ 2 ได้เร็วขึ้น

2.2.3.2 ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Phase)

เป็นระยะที่สาหร่ายเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว การเจริญเติบโตในระยะนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหาร และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมีของสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ช่วงแสงสว่างรวมทั้งผลผลิตนอกเซลล์ของสาหร่าย สภาวะรวมของสิ่งแวดล้อม ลักษณะในการเจริญเติบโตในระยะนี้จะเกิดขึ้นแบบรวดเร็ว และจะค่อย ๆ ช้าลงตามลำดับ

2.2.3.3 ระยะเฉื่อย (Phase of Declining Relative Growth)

เป็นช่วงที่เจริญเติบโตช้าลงเพราะขาดแคลนธาตุอาหาร เนื่องจากจำนวนเซลล์ที่มีความหนาแน่นมากเกินไป ทำให้เกิดการเสียสมดุลของค่าพีเอช เพราะเกิดแอมโมเนียขึ้นมาก หรือแสงสว่างลดลงเนื่องจากเซลล์เกิดการบดบังกันเอง

2.2.3.4 ระยะคงที่ (Stationary Phase)

เป็นระยะที่การเจริญเติบโตของสาหร่ายหยุดนิ่ง เนื่องจากธาตุอาหารลดน้อยลง และเกิดสารพิษจากกระบวนการเมตาบอลิซึม หรือการสลายตัวของเซลล์เพิ่มมากขึ้น

2.2.3.5 ระยะตาย (Death)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเป็นระยะที่เซลล์เกิดการเจริญเติบโตโดยสิ้นเชิง เนื่องจากธาตุอาหารหมดลงไม่ว่าเซลล์จะเริ่มตาย และอัตราการตายจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และรวดเร็วขึ้น เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเกลียวทอง

2.2.4.1 อุณหภูมิ

สาหร่ายมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา ซึ่งมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม อุณหภูมิก็มีการเปลี่ยนแปลงตามแสงแดด อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายเกลียวทอง อยู่ในช่วง 30-35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Torzillo et al. (1991) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อผลผลิตชีวมวลของ *Spirulina platensis* เลี้ยงที่สภาวะกลางแจ้งใน Photobioreactor พบว่าอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส มีผลอย่างมากต่อผลผลิตเซลล์ และองค์ประกอบทางเคมีของ *Spirulina platensis* ถึง 23% เทียบกับการเพาะเลี้ยงด้วยอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังกล่าว ยืนยันผลของอุณหภูมิในการเลี้ยง ว่ามีอิทธิพลต่อชีวมวลที่หายไปในตอนกลางคืน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ควรควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และพบว่าควรเก็บเกี่ยวสาหร่ายในเวลาเย็นจึงจะได้ผลผลิตสูง เนื่องจากมีการสูญเสีย ชีวมวลไปในตอนกลางคืน หากเก็บเกี่ยวสาหร่ายในเวลาเช้าซึ่งเซลล์ยังไม่ได้ทำการสังเคราะห์แสงเพื่อเพิ่มผลผลิต จะทำให้ได้ผลผลิตต่ำ

2.2.4.2 ความเข้มของแสง

แสงถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเจริญของสาหร่ายเกลียวทอง เนื่องจากระดับความเข้มของแสงที่สูงทำให้ปริมาณเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติการสังเคราะห์แสงของไซยาโนแบคทีเรียช่วงความเข้มของแสงที่เหมาะสมของสาหร่ายเกลียวทองอยู่ในช่วง 35,000-45,000 ลักซ์เท่านั้น (ยวดี, 2545) หากความเข้มแสงที่สูงกว่านี้อาจทำให้เซลล์เกิดการตายเนื่องจากสัมผัสแสงที่มีความเข้มสูงเป็นเวลานานเกินไปหากไม่มีการกวน จากงานวิจัยของ Richmond and Grobbelaar (1986) ได้ศึกษาปัจจัยที่จำกัดผลผลิตทางชีวมวลของการเลี้ยง *Spirulina platensis* ในสภาวะกลางแจ้ง พบว่า แสงมีผลต่อเซลล์โดยพิจารณาที่ความลึกของบ่อและความหนาแน่นเซลล์ จากผลการศึกษาความลึกบ่อต่อผลผลิตที่ได้ พบว่า ความลึกของบ่อที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ผลผลิตที่ได้รับเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าผลผลิตชีวมวลที่ได้รับนั้นไม่มากที่สุด แต่ข้อดีของการเลี้ยงในบ่อลึกน้อย คือ ช่วยเพิ่มความเข้มข้น และลดปริมาตรในการเลี้ยง จึงทำให้ใช้พลังงานในการปั๊ม เพื่อจะกวนเซลล์สาหร่ายภายในบ่อลดลงและง่ายต่อการเก็บเกี่ยวเซลล์

2.2.4.3 ความเป็นกรด-เบส

มีความสำคัญต่อการผลิตสาหร่ายเชิงการค้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากค่าความเป็นกรด-เบสที่สูง สามารถทำให้สาหร่ายชนิดอื่น ๆ ไม่สามารถเจริญเติบโต และปนเปื้อนกับสาหร่ายเกลียวทองได้ สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองนี้คือ 9.5 ± 0.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Richmond and Grobbelaar (1986) ที่ได้ศึกษาผลไม่ว่าการของความเป็นกรด-เบส ที่มีต่อผลผลิตของ *Spirulina platensis* โดยศึกษาที่ค่าความเป็นกรด-เบส

ระดับต่าง ๆ คือ 9-11 พบว่า อัตราผลผลิตไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นจาก 9.0 ถึง 10.5 แต่เมื่อความเป็นกรด-เบส มากกว่า 10.5 ผลผลิตชีวมวลลดลง

2.2.4.4 ปริมาณความหนาแน่น

ปริมาณความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสง ถ้าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายต่ำ ความเข้มแสงสูง จะทำให้เกิดอันตรายแก่เซลล์ โดยเฉพาะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน จากการวิจัยของ Abeliovich and Shilo (1972) ได้รายงานการเกิดการเจริญเติบโตของไซยาโนแบคทีเรียในบ่อเลี้ยงปลาในหน้าร้อน พบว่า น้ำในบ่อมีออกซิเจน และความเข้มแสงสูง นอกจากนี้ก่อนการตายของสาหร่ายมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ และน้ำมีความเป็นเบสสูง ถ้าปริมาณออกซิเจนในบ่อเลี้ยงสาหร่าย ถึงจุดอิ่มตัวยิ่งยวดแล้ว การป้องกันโฟโตออกซิเดชัน โดยอาศัยตัวกำจัดอนุมูลออกซิเจนอื่น เช่น แคโรทีนอยด์ อาจไม่เพียงพอ ผลรวมระหว่างออกซิเจนละลายน้ำสูง อุณหภูมิ ความเข้มของแสง ความหนาแน่นของเซลล์ ความเป็นกรด-เบส และการขาดคาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้เพิ่มการถูกทำลายโดยโฟโตออกซิเดทีฟมากขึ้น

2.2.4.5 ผลของการกวน

เป็นการป้องกันเซลล์สาหร่ายไม่ให้ตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อ ถ้าความเร็วในการกวนต่ำ หรือมากเกินไป จะทำให้เกิดฟองก๊าซซึ่งมีผลต่อการเผาผลาญอาหาร ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโต การกวนที่รุนแรงทำให้ลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง การกวนที่ดีจะต้องมีการออกแบบการกวนภายในบ่อให้เป็นแบบปั่นป่วน เนื่องจากการบดบังกันเองของสาหร่ายภายในบ่อ ทำให้เซลล์สาหร่ายที่อยู่ก้นบ่อได้รับแสงไม่ทั่วถึงในบริเวณที่เซลล์ได้รับแสงอย่างเพียงพอก็จะสามารถเกิดการสังเคราะห์แสงได้ดีกว่าบริเวณที่ได้รับแสงน้อย (Tamiya, 1957) การไหลเวียนแบบปั่นป่วนจะชักนำให้เกิดการหมุนเวียนตำแหน่งของเซลล์สาหร่ายขึ้นมารับแสงสม่ำเสมอ ทำให้เซลล์สาหร่ายภายในบ่อได้รับแสงอย่างทั่วถึง

2.2.4.6 สารอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง

สารอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงมีอยู่มากมายหลายชนิดบางชนิดเป็นสารเคมีเกรดดีที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม มีราคาสูง บางชนิดก็หาได้ง่ายตามท้องถิ่นนั้น ๆ สารอาหารมาตรฐานในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะใช้สูตรสารอาหารของ Zarrouk (Zarrouk's medium : traditional and international medium) สูตรอาหารดังกล่าว เป็นสูตรอาหารที่มีความอุดมสมบูรณ์มีผลต่อการเจริญเติบโตต่อสาหร่ายเกลียวทองเป็นอย่างดี แต่สูตรอาหารนี้มีต้นทุนสูง อาหารนี้จึงเหมาะที่จะเลี้ยงเพื่อจะเก็บไว้ใช้ต่อไป หรือเป็นเชื้อตั้งต้นสำหรับการเพาะเลี้ยงที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงเพื่อเป็นอาหารเสริมของมนุษย์ (ยุวดี, 2545) ดังนั้น จึงมีการค้นคว้าวิจัยสูตรอาหารเพื่อที่จะตัดแปลงสารอาหาร ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงให้มีต้นทุนต่ำ หรือตัดสารอาหารบางตัวที่มีความจำเป็นน้อยมาก

เอกสารนี้ออกไปสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 คุณค่าทางโภชนาการ หรือองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายเกลียวทอง

สาหร่ายเกลียวทองจัดเป็นอาหารจากธรรมชาติที่มีคุณค่าทางโภชนาการมากและเป็นแหล่งของสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายของมนุษย์ ทั้งนี้คุณค่าทางโภชนาการขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโต เช่น ธาตุอาหาร สภาพแวดล้อมในการเพาะเลี้ยง ความเป็นกรด-เบส เป็นต้น

2.2.5.1 โปรตีน

โปรตีนในสาหร่ายเกลียวทองของน้ำหนักรวมถึง 60-70% ขึ้นอยู่กับชนิดของสูตรอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง ซึ่งโปรตีนจากสาหร่ายเกลียวทองเหนือกว่าอาหารทุกชนิดแตกต่างจากโปรตีนที่ได้จากพืช คือ เป็นสารประกอบพวกกลีโคเซอแลน ซึ่งลำไส้ของมนุษย์ไม่สามารถย่อยได้นอกจากนี้ ยังอาจมีสารพิษจำพวกแทนนิน ซึ่งอาจจะไปลดอัตราการย่อยของลำไส้ แต่ในสาหร่ายเกลียวทองมีผนังเซลล์จำพวกมิวโคโพรตีน จึงไม่เป็นผลต่ออัตราการย่อยของลำไส้ (เพ็ญรัตน์ และ โฉมยงค์, 2546) คุณภาพของโปรตีนจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของสมมูลในกรดอะมิโนที่จำเป็น และความยากง่ายในการย่อย (ซินจิตต์, 2530) และเมื่อเทียบโปรตีนที่ได้จากอาหารชนิดอื่น ๆ ทั่วไปจะพบว่า โปรตีนที่ได้จากสาหร่ายสาหร่ายเกลียวทองมีมากกว่า

2.2.5.2 ไขมัน

สาหร่ายเกลียวทองถึงจะมีไขมันน้อยมาก แต่ก็ยังเป็นไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย ส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดไขมัน GLA หรือกรดแกมมาลิโนเลนิกที่มีอยู่ในกรดไขมันทั้งหมด 26-30% เป็นกรดไขมันที่มีประโยชน์ในด้านการแพทย์ และอุตสาหกรรม และชนิดที่สอง คือ กรดไขมัน LA หรือ กรดไลโนเลอิก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการยับยั้งการแข็งตัวของเลือด ลดระดับความดันโลหิต ลดปริมาณ คอเลสเตอรอลควบคุมฮอร์โมน Prostaglandin ช่วยรักษาเกี่ยวกับโรคหัวใจ และโรคภูมิแพ้ ดังนั้นกรด GLA จากสาหร่ายเกลียวทองจึงเป็นทางเลือกที่ดีในด้านคุณค่าทางโภชนาการ (จงกล, 2533)

2.2.5.3 รังควัตถุ

1) คลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์เป็นสารรงควัตถุที่มีสีเขียว พบมากในพืชคลอโรฟิลล์มีหลายชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ บี ซี และ ดี ซึ่งคลอโรฟิลล์แต่ละชนิดมีโครงสร้าง และสมบัติแตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์แต่ละชนิดในช่วงคลื่นต่าง ๆ แตกต่างกันด้วย สำหรับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ได้จากสาหร่ายเกลียวทองจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มแสง ปริมาณไนโตรเจนในอาหาร อายุเซลล์สาหร่าย และปัจจัยทางฟิสิกส์อื่น ๆ ประโยชน์ของคลอโรฟิลล์มีมากมายไม่ว่าจะเป็นในด้านการกระตุ้นการทำงานของตับให้ดีขึ้น เสริมการรอกของเซลล์ไม่ว่าจะช่วยให้การขับถ่าย และมีการใช้คลอโรฟิลล์เติมในนมสำหรับเด็กทารก และเด็กขาดสารอาหาร เพราะ

คลอโรฟิลล์มีรูปแบบเหมือนกับฮีโมโกลบิน แตกต่างกันที่สารฮีโมโกลบินมีธาตุเหล็กเป็นศูนย์กลาง ส่วนคลอโรฟิลล์มีธาตุแมกนีเซียมเป็นศูนย์กลาง คลอโรฟิลล์จัดเป็นสารที่กำจัดพิษในร่างกายได้ดี ทำให้การดูดซึมธาตุเหล็กดีขึ้น เพิ่มจำนวนเม็ดเลือดแดง ต่อต้านสารพิษที่อันตรายต่อร่างกาย (สุนีรัตน์ และคณะ, 2553)

2) ไฟโคไซยานิน (Phycocyanin)

ไฟโคไซยานินจัดเป็นสารรงควัตถุประกอบร่วมของไฟโคบิลินซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการสังเคราะห์แสง จะพบได้ในเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นในของไทลาคอยด์ เป็นสารรงควัตถุสีน้ำเงิน สามารถเรืองแสง และละลายน้ำได้ ไฟโคไซยานินจากสาหร่ายเกลียวทองมีความสามารถในการขจัดอนุมูลไฮดรอกซิล และอนุมูลเปอร์ออกไซด์โดยมีไซยาโนไบลีนทำหน้าที่ในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระรวมไปถึงป้องกันการอักเสบที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากไฟโคไซยานินในสาหร่ายเป็นโปรตีน จึงเป็นแหล่งผลิตเอนไซม์ที่สำคัญมากที่สุด เพราะเอนไซม์ทุกชนิดสร้างมาจากโปรตีน ซึ่งเอนไซม์ที่อยู่ในสาหร่ายเกลียวทองมีมากถึง 2,000 ชนิด และส่วนใหญ่จะทำหน้าที่ต้านหรือทำลายอนุมูลอิสระจึงมีการนำไฟโคไซยานินจากสาหร่ายเกลียวทองมาแปรรูปเชิงพาณิชย์ทั้งในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมอาหารในรูปแบบของผงแห้ง หรือของเหลว (ราเชนทร์, 2552)

2.2.6 กระบวนการเก็บเกี่ยวสาหร่ายเกลียวทอง

กระบวนการเก็บเกี่ยวสาหร่ายเกลียวทองจะทำได้ เมื่อสาหร่ายในบ่อมีความเข้มข้นเพียงพอแล้ว โดยวัดจากค่าความหนาแน่นของเซลล์ (Optical Density, OD) ที่ช่วงความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (OD_{560}) ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) มีค่าตั้งแต่ 1.2 ± 0.05 ขึ้นไป โดยวิธีการเก็บเกี่ยวมีหลายวิธีดังนี้

2.2.6.1 Gravity filtration

การกรองโดยใช้ผ้ากรองตาถี่ 1-2 ชั้น ซึ่งไว้กับขอบบ่อ ซึ่งขนาดของผ้ากรองจะมีตั้งแต่ 10 ไปจนถึง 120 ช่องต่อตารางนิ้ว ทำให้การเก็บเกี่ยววิธีนี้ค่อนข้างล่าช้า แต่ไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานมาก ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในระดับอุตสาหกรรมสาหร่าย ที่พยายามหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อลดต้นทุน

2.2.6.2 Plate and flame filter pressing

อุปกรณ์นี้ประกอบไปด้วยแผ่นโลหะเจาะรูขนาดเล็กทั้งแผ่นวางขนานโครงเหล็ก และมีผ้าปิดทับที่แผ่นโลหะแต่ละแผ่น วิธีการ คือ ใช้แรงดันอัดสาหร่ายจะผ่านแผ่นโลหะนี้ สาหร่ายจะติดค้างบนแผ่นโลหะ แต่ข้อเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายสูง

2.2.6.3 Centrifugation

วิธีการนี้อาศัยแรงเหวี่ยงเพื่อให้สาหร่ายตกตะกอน และแยกน้ำไว้ชั้นบน เอกสารนี้ในการผลิตแบบต่อเนื่องให้ผลผลิตมากกว่าวิธีที่ 2.2.6.2 เพียง 1% เท่านั้น จึงมักไม่เป็นที่นิยมใช้ แม้ว่าวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูง เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 บรรจุภัณฑ์นาโนคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพร่วมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

วัสดุบรรจุภัณฑ์สำหรับใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่เป็นพลาสติก ซึ่งทำจากวัสดุปิโตรเลียมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Siracusa., 2019) การนำวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากไบโอพอลิเมอร์ธรรมชาติมาใช้เป็นทางเลือกที่ปลอดภัยสำหรับพลาสติกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Morin-Crini et al., 2019) แป้ง เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติที่มีอยู่มากที่สุดแห่งหนึ่งของโลก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ราคาไม่แพง และหาได้ทั่วไป แป้งถูกใช้มากที่สุดในการเตรียมการย่อยสลายทางชีวภาพ และยังสามารถรับประทานได้ แต่ฟิล์มที่ผลิตจากแป้งมีข้อเสียหลายประการเมื่อเทียบกับวัสดุสังเคราะห์ ประการแรก แป้งแสดงความสามารถในการชอบน้ำในระดับสูง เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล ดังนั้น คุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุที่ทำจากแป้ง จึงมีความอ่อนไหวต่อความชื้น (Versino et al., 2016) ประการที่สอง แป้งไม่ใช่เทอร์โมพลาสติก ดังนั้น จึงไม่สามารถหลอมละลายได้หากไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ (Mohammadi et al., 2013) จะเห็นได้ว่า เนื่องจากคุณสมบัติทางกล และการกักน้ำไม่ดี ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งาน (Darmanin et al., 2012) การเพิ่มอนุภาคนาโน (NPs) ลงในฟิล์มบรรจุภัณฑ์สามารถปรับปรุงข้อบกพร่องของฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชีวภาพได้ อนุภาคนาโนที่ใส่ลงในเมทริกซ์ของแผ่นฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีคุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย และคุณสมบัติการทำงานอื่น ๆ ได้ดีขึ้นอีกด้วย (Qiu et al., 2018)

อนุภาคนาโนอินทรีย์หลายชนิด เช่น เงิน สังกะสี ทอง ทองแดง ฯลฯ มีการเสริมแรงเชิงกล และคุณสมบัติต้านแบคทีเรียที่เมื่อใช้ในพอลิเมอร์ทางชีวภาพ ซึ่งได้รับการวิจัยอย่างกว้างขวาง (Kanmani and Rhim, 2014) มีการรายงานกลไกการต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนอินทรีย์ ซึ่งรวมถึงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นประจุบวก หรือไอออนของโลหะอิสระ และเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีประจุ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของอนุภาคนาโน และการแยกไอออนของโลหะอิสระ (Xing et al., 2019) ในบรรดาอนุภาคนาโนต่าง ๆ อนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ระดับนาโน เนื่องจากฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย มีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาอาหารให้มีอายุมากขึ้น (Hoseinnejad et al., 2018; Simbine et al., 2019)

ข้อมูลเกี่ยวกับการย้าย หรือการปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากพอลิเมอร์ชีวภาพสู่อาหารด้วยความกังวลในความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพของมนุษย์ มีการระบุไว้ว่า พอลิเมอร์ที่ซึบอนุภาค จะไม่มีการย้ายไปสู่อาหารได้เมื่อเกิดการผสมลงในพอลิเมอร์อย่างสมบูรณ์ และพื้นผิวสัมผัสจะไม่ถูกเปลี่ยนระหว่างการใช้งาน (Stormer et al., 2017) อย่างไรก็ตาม ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของฟิล์มนาโนคอมโพสิตส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคซิลเวอร์นาโน และจุลินทรีย์ โดยการปล่อยไอออนซิลเวอร์ หรือการสัมผัสโดยตรง แม้ว่าการละลายออกซิเดชันของซิลเวอร์ส่วนใหญ่จะขับเคลื่อนกระบวนการย้ายที่พื้นผิวใกล้กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน แต่การปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนไม่ได้รับ

ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบจากการกระจายของอนุภาคซิลเวอร์นาโนภายในพอลิเมอร์ไปยังพื้นผิวอาหาร ด้วยเหตุนี้ กฎระเบียบด้านความปลอดภัยของสหภาพยุโรป จึงได้กำหนดขีดจำกัดบนสำหรับการย้ายถิ่นของ ซิลเวอร์ภายในบรรจุภัณฑ์ว่า การมีซิลเวอร์ไอออนในเมทริกซ์ที่ใช้บรรจุอาหารต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของอาหาร (European Food Safety Authority, 2011) งานวิจัยนี้จะเป็น แนวทางใหม่ในการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ย่อยสลายได้พร้อมคุณสมบัติ ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ดีที่ยั่งยืน

2.4 แป้งมันสำปะหลัง

2.4.1 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชหัวชนิดหนึ่งมีชื่อเรียกกันทั่วไปในภาษาอังกฤษว่า แคสซาวา (Cassava) หรือทาบิโอก้า ประเทศแถบแอฟริกา เรียกชื่อภาษาฝรั่งเศสว่า เมนิออก (Manioc) มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ เช่น ประเทศเปรู เม็กซิโก กัวเตมาลา ฮอนดูรัส บราซิล ซึ่งมีการปลูกมันสำปะหลังมา 3,000-7,000 ปีแล้ว ต่อมาได้ขยายไปสู่แหล่งอื่น ๆ ของโลก โดยชาว โปรตุเกส และสเปนนำมันสำปะหลังมาจากเม็กซิโกมายังฟิลิปปินส์ และชาวฮอลแลนด์นำมัน สำปะหลังไปยังอินโดนีเซีย มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มยืนต้นมีอายุอยู่ได้หลายปี การปลูกมันสำปะหลังจะ ใช้ส่วนของลำต้น ตัดเป็นท่อนปักไปในดินตรงบริเวณรอยตัดที่ปักอยู่ในดินจะแตกเป็นรากฝอย หลัง จากโตขึ้นเรียกว่า หัวมันสำปะหลัง และสามารถเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังหลังจาก 6 เดือนผ่านไป แล้ว โดยจะยืดอายุเก็บเกี่ยวไปได้ถึง 16 เดือน โดยส่วนตาทิ้งอยู่ข้างท่อนมันจะเจริญเติบโตออกมาเป็น ลำต้นต่อไป สำหรับประเทศไทยนั้นไม่มีหลักฐานแน่ชัดว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้าปลูกเมื่อใด คาดว่า มีการนำมันสำปะหลังมาจากประเทศมาเลเซียเมื่อปีพุทธศักราช 2329 โดยมีชื่อเรียกในระยะต่อมาว่า มันไม้ และมันสำโรง คำว่า สำปะหลัง ภาษามาเลเซีย และอินโดนีเซียเรียกว่า Ubikayu แปลว่า พืชที่ มีรากขยายใหญ่ และคล้ายกับภาษาชวาตะวันตกว่า สัมเปอ (Sampeu) มันสำปะหลังสามารถแบ่งได้ เป็น 2 ชนิด คือ 1) ชนิดหวาน (Sweet type) เป็นมันสำปะหลังที่ใช้เพื่อการบริโภค มีปริมาณกรดไฮ โครไซยานิกต่ำไม่มีรสขม สามารถใช้หัวสดทำอาหารได้โดยตรง เช่น นำไปนึ่ง เชื่อม หรือทอด 2) ชนิด ขม (Bitter type) เป็นมันสำปะหลังที่มีรสขม ไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์หรือใช้หัวสด เลี้ยงสัตว์โดยตรง เนื่องจากมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิดสูง มีความเป็นพิษต่อร่างกาย ต้องนำไปแปร รูปเป็นมันอัดเม็ด หรือมันเส้นแล้วจึงนำไปเลี้ยงสัตว์ได้ สำหรับมันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดขมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม โดยพันธุ์ที่ปลูกกันมาก คือ พันธุ์พื้นเมือง ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็น พันธุ์ที่มีการนำเข้ามาจากประเทศมาเลเซีย ต่อมากรมวิชาการเกษตรและมหาวิทยาลัย ได้มีการวิจัย ปรับปรุงพันธุ์นักวิทยาศาสตร์ได้จัดมันสำปะหลังไว้เป็นหมวดหมู่ ดังนี้ Order : *Geraniales* Class :

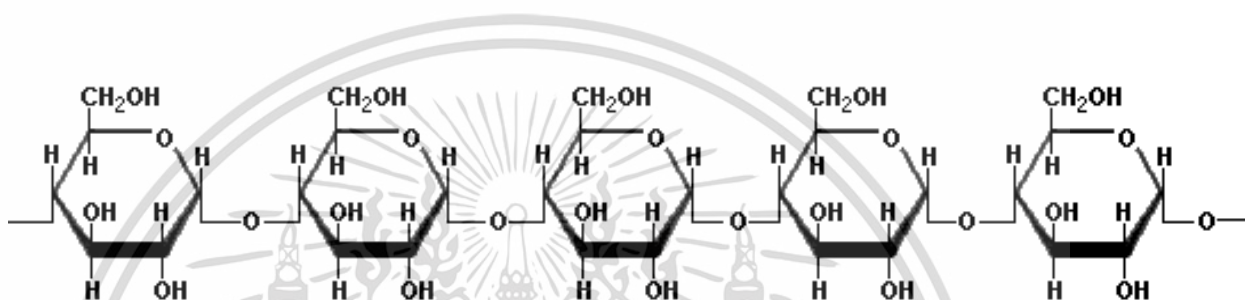
Dicotyledonea Subclass: *Archichlamydead* Family: *Eurhorbiaceae* Tribe: *Manihoteae*

Genus: *Manihot* Species: *Esculenta* (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2550)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

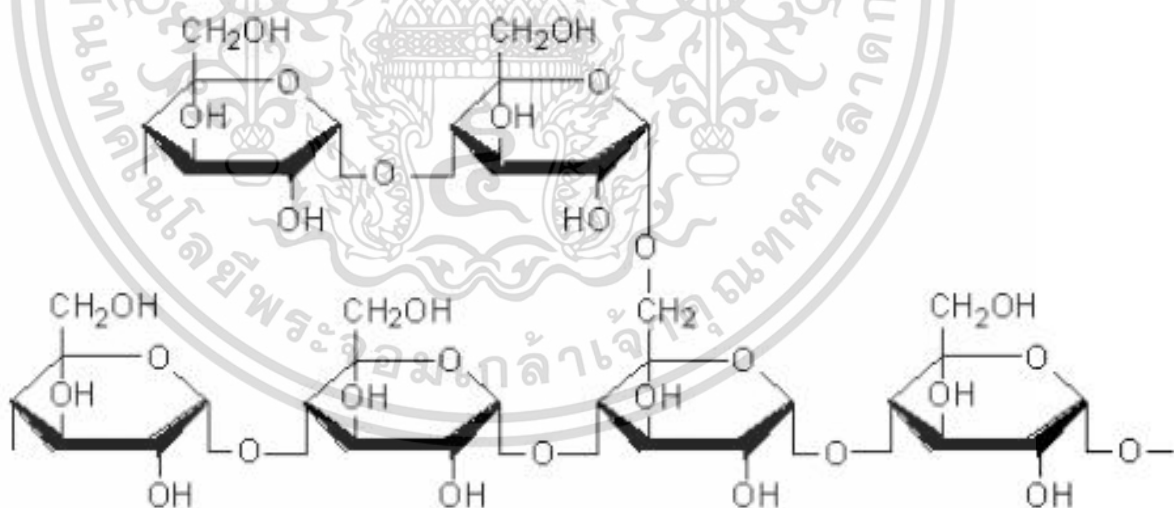
2.4.2 โครงสร้างโมเลกุลของแป้ง

แป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ภายในเม็ดแป้งจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส ดังรูปที่ 2.7 และอะไมโลเพคติน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินแตกต่างกัน ทำให้แป้งมีคุณสมบัติแตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างอะไมโลส

ที่มา: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0184/amylose>



รูปที่ 2.8 โครงสร้างอะไมโลเพคติน

ที่มา: <http://blog.bru.ac.th/wp-content/uploads/bp-attachments>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง

2.4.3.1 แป้งดิบ (Starch)

แป้งดิบที่สกัดเอาเยื่อใยออกแล้วใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารทารก เป็นเครื่องปรุงอาหารหลายชนิด ใช้ทำวุ้นเส้น ทำเป็ยร์ และใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นตัวทำให้สาร ตัดแน่นคงรูปร่าง ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมซักกรีด อุตสาหกรรมทำกระดาษ แป้งเปียก แอลกอฮอล์ อะซีโตน ยา กลูโคส และแป้งแปรรูปโดยสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการผลิตเป็น 2 ประเภท คือ

1) แป้งดิบ หรือแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch) เป็นแป้งที่ได้จากหัวมันสดด้วยขบวนการแยกกากโปรตีน ฯลฯ ปัจจุบันมีโรงงานประมาณ 85 โรง แต่ทำการผลิตจริงเพียง 49 โรงงาน กำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 2-2.5 ล้านตันต่อปี ผลผลิตเฉลี่ยทั้งอุตสาหกรรม (ผลิตได้จริง) ประมาณ 1.76 ล้านตันต่อปี

2) แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modify Starch) คือ แป้งซึ่งได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังดิบมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี หรือฟิสิกส์ เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยปกติการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูปใช้อัตราแป้งดิบ 1 กิโลกรัมต่อแป้งแปรรูป 0.93 กิโลกรัม

2.4.2.2 แป้งดิบ (Flour)

เป็นแป้งที่ไม่ได้สกัดเอาเยื่อใยออก ทำได้โดยนำหัวมันสดมาปอกเปลือกหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตากแห้งป็นให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนแป้ง จะได้แป้งดิบที่สามารถนำมาใช้ทำขนมอบชนิดต่าง ๆ ได้ ดังรูปที่ 2.9 เช่น นำมาทำเป็นเค้ก แพนเค้ก ขนมปัง คุกกี้ พาย และสามารถนำมาทดแทนแป้งสาลี แป้งข้าวเจ้าได้บางส่วนในอาหารบางชนิด



รูปที่ 2.9 แป้งมันสำปะหลัง

ที่มา: https://sonishstarch.com/th/products_th/product_tapioca_th/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูป

2.4.4.1 ผงชูรส

ผงชูรสที่ใช้ในการปรุงอาหารมีชื่อทางเคมี คือ โมโนโซเดียมกลูตาเมต เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แป้งมันสำปะหลังถึงประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณแป้งที่ผลิตได้ทั้งหมดการทำโมโนโซเดียมกลูตาเมตนั้น มีขั้นตอนการทำโดยใช้แป้ง หรือกากน้ำตาลที่เรียกว่า โมลาส จากโรงงานน้ำตาล หรือทั้งสองอย่างมาผสมกัน หลังจากนั้นเปลี่ยนย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคส โดยใส่เอนไซม์อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส หมักและใส่จุลินทรีย์ที่เป็นแบคทีเรีย คือ *Micrococcus glutamicus* หรือ *Brevibacterium* spp.) และเสริมด้วยอาหารอื่น ๆ เช่น ยูเรีย เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นกรดกลูตามิก หลังจากหมักได้ก็นำไปทำปฏิกิริยากับโซดาไฟจะได้โมโนโซเดียมกลูตาเมต ทำให้ตกผลึกซึ่งเราเรียกกันว่า ผงชูรส

2.4.4.2 น้ำเชื่อมไฮฟร็กโตส 42 เปอร์เซนต์ น้ำเชื่อมไฮฟร็กโตสให้รสหวานเร็วกว่า และจางเร็วกว่าน้ำตาลทราย ซึ่งทำให้รู้สึกใหม่สดอยู่เสมอ มีรสหวานมากขึ้นเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าหรือมีความเข้มข้นสูง หรือเมื่อใช้ร่วมกับสารให้ความหวานตัวอื่น ความหวานโดยเปรียบเทียบน้อยกว่าน้ำตาลทราย คือ 0.8 0.9 : 1 แต่สามารถหมักได้โดยตรง ขณะที่น้ำตาลทรายต้องผ่านการใช้ไฮโครไลซ์เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อน นอกจากนี้ ยังทนต่อความเป็นกรดได้ดี หัวมันสำปะหลังซึ่งมีเปอร์เซนต์แป้งประมาณ 20 เปอร์เซนต์ จำนวน 70,000-80,000 ตัน สามารถผลิตน้ำเชื่อมไฮฟร็กโตส 42 เปอร์เซนต์ ได้ประมาณ 15,000 ตัน หรือการผลิตน้ำเชื่อมไฮฟร็กโตส 1 ตัน ใช้แป้งมันสำปะหลัง 1 ตัน หรือเท่ากับใช้หัวมันสำปะหลัง 5 ตัน ประโยชน์ของน้ำเชื่อมไฮฟร็กโตส 42 เปอร์เซนต์ ปัจจุบันมีการนำน้ำเชื่อมไฮฟร็กโตส 42 เปอร์เซนต์ ไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ขนมอบ อาหารนม ขนมหวาน ท็อฟฟี่สอดไส้ อาหารสำเร็จรูป ประเภทเนื้อสัตว์ อาหารทะเล น้ำซอส และเครื่องปรุงรส ผักดองต่าง ๆ และอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

2.4.5 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบประกอบในอุตสาหกรรมอื่น

2.4.5.1 อุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นจะต้องใช้แป้งมันสำปะหลังด้วย โดยด้ายที่จะใช้ทอผ้าจะต้องผ่านการชุบแป้งก่อน ด้ายจึงจะลื่น และเรียบไม่มีขน และเป็นตัวหล่อลื่นไม่ให้เส้นด้ายติดกันระหว่างการเคลื่อนที่ของทุกทอผ้า นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้า แป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายได้สม่ำเสมอ การใช้แป้งมันสำปะหลังในการทอผ้านั้น บางโรงงานยังใช้แป้งเคมีที่สั่งเข้ามาจากต่างประเทศ เพราะคุณสมบัติเหมาะสมกว่า แต่อย่างไรก็ตามมีโรงงานในประเทศที่เริ่มผลิตแป้งเคมีจากแป้งมันสำปะหลังขึ้นแล้ว

2.4.5.2 อุตสาหกรรมไม้อัด

แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากเอกสารนี้ลักษณะการผลิตไม้อัด คือ การนำไม้มาประกบติดกันโดยใช้กาว ซึ่งแป้งมันก็ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในไม่ว่าการกาวทำกาว เพราะแป้งมันมีคุณสมบัติเป็นกาวอยู่แล้ว เพื่อให้ไม้อัดติดกันเป็นแผ่นหน้าแข็งแรง และ

ทนทาน นอกจากนี้การใช้แป้งเป็นส่วนผสมยังเป็นการลดต้นทุนการผลิต เพราะกาที่ผลิตได้นั้น ใช้แป้งเป็นส่วนผสมถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และแป้งมันสำปะหลังยังมีคุณสมบัติพิเศษกว่าแป้งประเภทอื่น ๆ คือ เนื้อแป้งมีความละเอียด ทำให้ไม่มีการตกตะกอน เมื่อนำมาใช้ผสมทำกาว นอกจากนี้ราคายัง ถูกกว่า

2.4.5.3 อุตสาหกรรมกระดาษ

การทำกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่าง ๆ เช่น ไม้ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็ก ๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่นอย่างไรก็ตาม แผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวด้วยการจากแป้งทำให้กระดาษเรียบ และยังเข้าไปอยู่ ตามรูของใยกระดาษ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึก เวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี นอกจากนี้ กาวจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น

2.4.5.4 พลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพจะมีปริมาณการใช้เพิ่มมากขึ้น ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ต่อปี มีประโยชน์ในการใช้เพื่อป้องกัน และรักษามลภาวะเป็นพิษแก่สภาวะ แวดล้อม โดยทำเป็นภาชนะใส่อาหารต่าง ๆ แทนพลาสติก การใช้ด้านเกษตรกรรม เพื่อควบคุมการ ปลูกปล่อยสารอาหาร ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืชและปุ๋ย และใช้ทางด้านการแพทย์ เพื่อควบคุมการ ปลูกปล่อยตัวยาให้มีอัตราการปลูกปล่อยช้าและคงที่ตลอดเวลา การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ นอกจากจะสามารถผลิตพลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพแล้ว ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้ด้วย เพราะปัจจุบันใช้แป้งจากข้าวโพด และมันเทศ มีต้นทุนสูงกว่าใช้มันสำปะหลัง แต่มีคุณสมบัติ เช่นเดียวกัน

2.5 วุ้น

วุ้น คือ สารไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดงที่อยู่ในไฟลัม *Rhodophyta* สาหร่ายทะเลสีแดงที่นำมาใช้ในการสกัดวุ้นส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายในกลุ่ม *Gracilaria* spp. ซึ่งพบมาก ตามชายฝั่งทะเลของประเทศญี่ปุ่น เม็กซิโก ไปรตุเกศ เคนมาร์ค และ โมร็อกโก ส่วนสาหร่ายทะเลสีแดงชนิดที่พบในเมืองไทย ได้แก่ สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*) พบมากในอ่าวปัตตานี และ ทะเลสาบสงขลา (Ruangchuay et al., 2012)

2.5.1 โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น

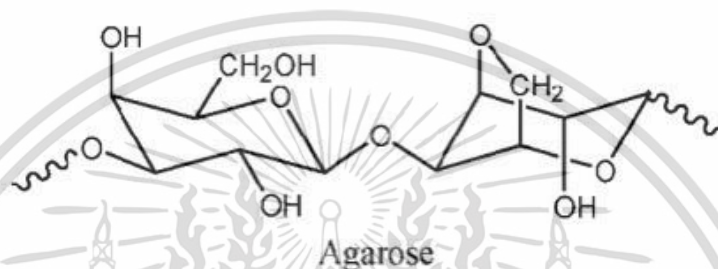
โมเลกุลของวุ้นประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญ 2 ชนิด คือ อากาโรส และ อากาโรเพคติน

อากาโรส เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกาแลคโตส โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาล โมเลกุลคู่ คือ อากาโรไบโอส ซึ่งประกอบด้วย บี-ดี-กาแลคโตส เชื่อมต่อกัน

ที่ตำแหน่ง 1 -> 3 และ 3,6-แอนไฮโดร-เอ-แอล-กาแลคโตส เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1 -> 4 โดยที่ใน

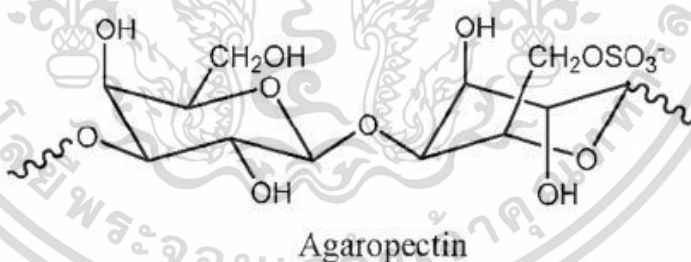
เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อวัตถุประสงค์ในการเผยแพร่ความรู้เท่านั้น หากมีการนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

แต่ละโมเลกุลมีการต่อสลับกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ค้ำอากาศก่อนข้างเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีประจุน้อยมากจึงถูกเรียกว่า non-ionic polysaccharide โครงสร้างของอากาศโรสแสดงดังรูปที่ 2.10 สำหรับอะกาโรเพคติน ดังรูปที่ 2.11 มีโครงสร้างคล้าย agarose แต่มีความซับซ้อนกว่า เนื่องจากบางโมเลกุลของ 3,6-แอลไฮโดร-เอ-แอล-กาแลคโตส จะมีอนุมูลซัลเฟตเกาะอยู่ ซึ่งถูกแทนที่ด้วยแอล-กาแลคโตสซัลเฟต และบางโมเลกุลของ ดี-กาแลคโตส ถูกแทนที่ด้วย ดี-กาแลคโตสซัลเฟต หรือมีหมู่ไพรรูเวทเกาะอยู่ (4,6-0-(1-คาร์บอกซิล เอทิลไอดีน)-ดี-กาแลคโตไพราโนส) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้มีประจุ บางครั้งจึงเรียกว่า charged agarose



รูปที่ 2.10 โครงสร้างอากาศโรส

ที่มา: https://www.researchgate.net/publication/339280653_BioBased_Polymer_Electrolytes_for_Electrochemical_Devices_Insight_into_the_Ionic_Conductivity_Performance



รูปที่ 2.11 โครงสร้างอากาศโรเพคติน

ที่มา: https://www.researchgate.net/publication/339280653_BioBased_Polymer_Electrolytes_for_Electrochemical_Devices_Insight_into_the_Ionic_Conductivity_Performance

2.5.2 สมบัติของวุ้น

สมบัติการละลาย ปกติวุ้นจะไม่ละลายน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส แต่จะละลายได้ดีในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสขึ้นไป หากใช้สารละลายวุ้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 จะต้องใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส ร่วมกับการคนสารละลายขณะให้ความร้อน จึงจะมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การละลายอย่างสมบูรณ์ หากใช้ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 5 ต้องใช้หม้อนึ่งอัดความดันช่วยในการละลาย

2.5.3 การละลายวุ้น

การละลายวุ้นจะทำให้เกิดเจลของวุ้น กลไกการเกิดเจลของวุ้นจะเกิดขึ้นเมื่อละลายผงวุ้นที่อุณหภูมิสูงถึง 95-100 องศาเซลเซียส โมเลกุลของอะกาโรสในสารละลายจะมีลักษณะเป็น random coil ซึ่งในระยะนี้โครงสร้างของโมเลกุลจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลง สายพอลิเมอร์แต่ละสายเกิดการพันกันเป็นเกลียวในลักษณะเกลียวคู่ เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงอีกปลายสายของเกลียวคู่ แต่ละคู่จะรวมตัวเข้ามาใกล้กัน และเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยจุดเชื่อมต่อนี้เรียกว่า junction zone ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจลมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติที่แข็งแรง หากนำเจลวุ้นไปให้ความร้อนอีกครั้งสารพอลิเมอร์ที่จับตัวกันเป็นเกลียวนั้น จะค่อย ๆ คลายตัวออกจากกัน เมื่อทำการให้อุณหภูมิสูงกว่า 95 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเจลจะเกิดการคลายตัวกลายเป็นสารละลายในลักษณะของ random coil อีกครั้ง ดังนั้น เจลวุ้นจึงมีสมบัติเป็น thermoreversible gel เนื่องจากโครงสร้างของเจลมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

2.5.3.1 เจลวุ้น

อุณหภูมิในการเกิดเจลของวุ้นจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการละลายมาก โดยจะเกิดการก่อเจลที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ใช้วุ้นความเข้มข้นเพียงร้อยละ 1-2 สามารถเกิดเจลได้ เจลวุ้นจะมีลักษณะเนื้อแข็ง ใส เปราะ แตกง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันของ double helices ของสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา อุณหภูมิในการหลอมเหลวของ เจลวุ้นนั้น จะสัมพันธ์กับความแข็งของเจล น้ำหนักโมเลกุลของวุ้น และระดับความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ หากวุ้นมีความแข็งของเจลสูงอุณหภูมิในการหลอมเหลวก็จะสูงขึ้นด้วย และนอกจากนี้อุณหภูมิในการหลอมเหลวจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณ 3,6-แอนไฮโดร-คิว-แอล-กาแลคโตสเพิ่มขึ้น

2.5.3.2. ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเจลวุ้น

สมบัติของเจลวุ้นจะมีความเหมือน หรือแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สาหร่ายที่ใช้ในการสกัดวุ้น วิธีการสกัด และระดับความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ในการเตรียมเจล

1) ชนิดของสาหร่าย

วุ้นที่สกัดได้จากสาหร่ายต่างชนิดกันมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ให้เอกสารนี้ สมบัติของเจลวุ้นที่ได้มีความแตกต่างกัน แม้จะใช้ที่ความเข้มข้นเท่ากัน เนื่องจากอัตราส่วนของน้ำตาลในวุ้นแต่ละชนิดต่างกัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติของเจลวุ้นแตกต่างกันไป นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของน้ำตาลในวุ้นแต่ละชนิดยังมีผลต่อสมบัติของเจลวุ้นอีกด้วย

อะกาโรส และอะกาโรเพคตินในสาหร่ายแต่ละชนิดนั้นมีปริมาณไม่เท่ากัน กล่าวคือ หากสาหร่ายชนิดใดมีอะกาโรสสูงความแข็งแรงของวุ้นจะเพิ่มขึ้น

2) แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่าย

แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่ายมีผลต่อสมบัติของเจลวุ้นเช่นกัน ถึงแม้สาหร่ายที่นำมาสกัดนั้นจะเป็นชนิดเดียวกัน และเก็บจากประเทศเดียวกันก็ตาม เนื่องจากในแต่ละพื้นที่ที่ทำการเก็บเกี่ยวสาหร่ายนั้นมีสภาวะทางด้านต่าง ๆ และอาหารสำหรับสาหร่ายที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้สาหร่ายแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้เจลของวุ้นมีสมบัติแตกต่างกัน ถึงแม้จะเก็บสาหร่ายภายในเดือนเดียวกัน

3) วิธีการสกัด

กระบวนการสกัดวุ้นนั้นจะต้องกำจัดหมู่ซัลเฟตออกโดยการแช่ในสารละลายต่าง และสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้ ล้วนส่งผลต่อคุณภาพของวุ้นที่สกัดได้ การแช่วุ้นในสารละลายต่างนั้น เป็นเทคนิคในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเจลวุ้น เนื่องจากเป็นวิธีการกำจัดหมู่ซัลเฟตออกจากโมเลกุลของวุ้น แต่การใช้ต่างที่ความเข้มข้นต่างกันจะส่งผลต่อความแข็งแรงของเจลวุ้นที่ต่างกันด้วย ซึ่งหากความเข้มข้นของสารละลายต่างเพิ่มขึ้นจะมีความแข็งแรงของเจลวุ้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายต่างที่สูงขึ้นทำให้หมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโมเลกุลของสาหร่ายถูกกำจัดออกไปเพิ่มขึ้น แต่หากใช้ความเข้มข้นของต่างที่สูงจนเกินไปก็อาจทำให้โครงสร้างของโมเลกุลถูกทำลายลงได้ส่งผลต่อคุณภาพของเจลวุ้น และขั้นตอนของการสกัดด้วยน้ำร้อนนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อความแข็งแรงของเจลวุ้นเช่นกัน ซึ่งการสกัดวุ้นโดยใช้ความร้อนควรใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสกัด หากใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการสกัด อาจส่งผลทำให้สายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์ถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของวุ้นเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ส่งผลต่อคุณภาพของเจล

4) ความเข้มข้นของวุ้น

ความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ในการเตรียมเจลจะมีผลต่อสมบัติของเจลวุ้น คือ เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของวุ้นเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงก็จะสูงขึ้น และนอกจากนี้ความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการเกิดเจล และอุณหภูมิในการหลอมเหลว กล่าวคือ เมื่อใช้วุ้นที่ความเข้มข้นสูงขึ้น อุณหภูมิในการเกิดเจล และอุณหภูมิในการหลอมเหลวก็จะสูงขึ้นเช่นกัน

5) การผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น

การผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นกับวุ้นอาจช่วยในเรื่องของการปรับปรุงให้วุ้นมีสมบัติที่ดีขึ้น เนื่องจากวุ้นมีข้อด้อย คือ เปราะและแตกง่าย ดังนั้น การผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น อาจช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของวุ้นให้ดีขึ้น

2.5.4 การใช้ประโยชน์จากวุ้น

มีการนำวุ้นมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ทางด้านจุลชีววิทยา ซึ่งมีการนำวุ้นเอกสารนี้ชนิดผง ดังรูปที่ 2.12 มาละลายแล้วมาใช้ในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและรา เนื่องจากวุ้นมีคุณสมบัติไม่ว่ากพิเศษคือเกิดเจลที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและรา ซึ่งอุณหภูมิที่

เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและรา คือ 37 องศาเซลเซียส และวันยังทนต่อการย่อยสลายให้เป็นของเหลว จึงมีการนำวุ้นมาใช้ประโยชน์ทางค่านจุลชีววิทยามากที่สุด สำหรับทางด้านอาหารนั้นมีการใช้วุ้นกันอย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมขนมหวาน ผลิตภัณฑ์นม อุตสาหกรรม เครื่องดื่ม โดยนำวุ้นมาใช้เป็นสารให้ความคงตัว เพิ่มความใสให้กับผลิตภัณฑ์นำมาใช้เป็นสารที่ทำให้ขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำวุ้นมาใช้ทางการแพทย์ ซึ่งวุ้นจะช่วยในการรวมตัวกับสารพิษต่าง ๆ แล้วขับออกมาจากร่างกาย และวุ้นเป็นอาหารที่ไม่ให้แคลอรี จึงจัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพช่วยลดน้ำหนัก



รูปที่ 2.12 ผงวุ้น

ที่มา: <https://pacificharvest.co.nz/seaweed-blog/how-to-use-agar/>

2.6 การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สาหร่ายเกลียวทอง

2.6.1 UV-visible Spectrophotometer

สเปกโทรโฟโตเมตรีเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยสมบัติการดูดแสงของสาร เทคนิคนี้จัดเป็นเทคนิคพื้นฐานที่สำคัญที่มีการใช้ในงานทางชีวเคมี เนื่องจากให้ความรวดเร็วในการวิเคราะห์ มีความแม่นยำสูง ปริมาณสารที่ใช้ในการวิเคราะห์น้อยถึงในระดับไมโครกรัม ถึงแม้ว่าสารที่ต้องการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสารละลายผสม

2.6.1.1 แสงสีและการดูดกลืนแสงของสาร (ชัยวัฒน์, 2557)

ช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (ช่วงเลขคลื่น 180-350 นาโนเมตร) และช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (ช่วงเลขคลื่น 350-780 นาโนเมตร เป็นช่วงคลื่นแสงที่มีประโยชน์สำหรับงานทางชีวเคมี แสงในช่วงคลื่นทั้งสองนี้ มีระดับพลังงานที่เพียงพอต่อการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดของโมเลกุลสารในสถานะพื้นเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะเร้า ซึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมักเป็นอิเล็กตรอนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไมออนู ใดไหนไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา พันธะคู่ และพันธะสาม สมบัติการดูดแสงของสารถูกกำหนดจากลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลสารนั้น ๆ โครงสร้างโมเลกุลที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวไม่มากนัก ทั้งที่เป็นสารประกอบ แอโรแมติกและเฮเทอโรไซคลิก เช่น กรดอะมิโนไทโรซีนเฟนิลอะลานีน และทริปโตเฟนไนโตรจีนัส เบสพิวรีน และไพริมิดีน เป็นต้น สารพวกนี้มักดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี โครงสร้างโมเลกุลมีพันธะคู่สลับเดียวกันมากขึ้น เช่น เบต้า-คาโรทีน หรือโมเลกุลที่มีไอออนของธาตุแทรนซิชันรวมอยู่ด้วย

2.6.1.2 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต

เมื่อให้ลำแสงที่เป็นความยาวคลื่นเดี่ยวส่องผ่านเข้าไปในสารละลายโมเลกุลของสารที่มีสมบัติดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่งละลายอยู่ บางส่วนของแสงจะถูกดูดกลืนไว้และแสงส่วนที่เหลือจะผ่านออกมา ดังนั้น ความเข้มของแสงที่ผ่านออกจากสารละลายมีความเข้มที่น้อยลงกว่าเดิม การดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นเป็นไปตามกฎ 2 ข้อ คือ กฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต กฎของเบียร์กล่าวว่า ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่มีสมบัติดูดกลืนแสง ส่วนกฎของแลมเบิร์ตกล่าวถึง ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนนั้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านเมื่อรวมกฎทั้ง 2 ข้อเข้าด้วยกัน เรียกว่า กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) โดยทั่วไปมักเรียกว่ากฎของเบียร์ (Beer's law) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$A = abc \text{ หรือ } A = \log_{10} I_0 / I$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดแสง (absorbance) หรืออาจเรียกในชื่อเดิม ซึ่งปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมแล้วว่า Optical density (O.D.) ค่านี้ไม่มีหน่วย

a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดแสง (extinction coefficient)

b คือ ระยะทางที่แสงส่องผ่านเป็นเซนติเมตร (path length) โดยทั่วไปเป็น 1 เซนติเมตร

c คือ ความเข้มข้น ของสารที่มีสมบัติดูดกลืนแสง

I_0 คือ ความเข้มของแสงก่อนส่องผ่านสารละลาย

I คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านออกจากสารละลาย

เมื่อความเข้มข้นมีหน่วยเป็นโมลาร์ และระยะทางที่แสงส่องผ่านเป็น 1 เซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดแสงเรียกว่า molar extinction coefficient ซึ่งมักใช้สัญลักษณ์เป็น Σ แทน a และมีหน่วยเป็น $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ในกรณีไม่ทราบน้ำหนักโมเลกุลของสารที่มีสมบัติดูดกลืนแสงได้ อาจกำหนด a เป็น $E_{1\%}^{1 \text{ cm}}$ ซึ่งก็คือค่าการดูดแสงของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารดูดกลืนแสงเป็น 1 กรัมเปอร์เซ็นต์ และความยาวของระยะทางที่แสงส่องผ่านเป็น 1 เซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดแสงเป็นค่าคงที่เฉพาะของสารแต่ละชนิด และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความยาวของสารนี้เคลื่อนหรือสภาวะอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ตัวทำละลายหรือพีเอชของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป การหาค่านี้ไม่ว่าจะสัมประสิทธิ์การดูดแสงของสารสามารถทำได้โดยวัดค่าการดูดแสงของสารละลายที่มีความเข้มข้นของ

สารเป็น 1 หน่วยความเข้มข้น และระยะทางที่แสงส่องผ่านสารละลายเป็น 1 เซนติเมตร ในทางปฏิบัติจะวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน โดยสารที่ต้องการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยสารละลายเปล่า (blank solution) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีสารทุกชนิดละลายอยู่เหมือนในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ ยกเว้นสารที่ต้องการวิเคราะห์ ปริมาณแสงที่ผ่านออกจากสารละลายเปล่าจะเทียบค่าให้เท่ากับ I_0 ปริมาณแสงที่วัดได้จากสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ให้เท่ากับ I ความส่องผ่าน(transmittance) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของอัตราส่วน ดังสมการ

$$\text{Transmittance หรือ } T = I_0 / I$$

อัตราส่วนนี้มักเปลี่ยนเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ เรียกว่า เปอร์เซ็นต์แสงส่องผ่าน (% Transmittance)

$$\% \text{ Transmittance} = I_0 / I \times 100\%$$

เมื่อความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนแสงสูงขึ้น แสงถูกดูดกลืนมากขึ้นและมีปริมาณแสงที่ผ่านออกมาได้น้อยลง (%T น้อยลง) การลดลงของเปอร์เซ็นต์แสงส่องผ่านจึงเป็นปฏิภาคผกผันเชิงลึกลับกับความเข้มข้น โดยทั่วไปเรามักนิยมแสดงเป็นค่าการดูดแสง (A) ซึ่งเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้น ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง A และ %T แสดงด้วยสมการซึ่งมีวิธีพิสูจน์

$$\begin{aligned} A &= -\log I / I_0 = -\log T = \log 1/T \\ \text{แปลง } T \text{ ให้เป็น } \%T \text{ จะได้} \quad A &= \log 1/T \times 100/100 = \log 100 / \%T \\ A &= \log 100 - \log \%T \\ A &= 2 - \log \%T \end{aligned}$$

2.6.1.3 ส่วนประกอบหลักของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1) แหล่งกำเนิดแสง (light source)

การวัดการดูดแสงในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น จะใช้ความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง โดยจะใช้ดวงไฟทังสเตนซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 340-800 นาโนเมตร ส่วนการวัดการดูดแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตจะใช้ดวงไฟไฮโดรเจนหรือดวงไฟดีวเทอเรียม ซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 200-340 นาโนเมตร

2) ตัวทำแสงความยาวคลื่นเดียว (monochromator)

ทำหน้าที่คัดกรองแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสง ให้ได้แถบแสงความยาวคลื่นเดียวตามต้องการ โดยการใช้ปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) หลอดบรรจุสารตัวอย่าง (cuvette)

ผลิตจากแก้วควอทซ์ หรือพลาสติก เช่น พอลิเมทราคลีเลติ และพอลิสไตรีน รูปทรงที่ใช้เป็นแบบหลอดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแบบหลอดทอกลง การวิเคราะห์ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นใช้หลอดที่ทำจากวัสดุชนิดใดก็ได้ แต่การวิเคราะห์ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตต้องจะใช้หลอดที่ทำจากควอทซ์เท่านั้น

4) ช่องเล็กยาว (Slit)

ที่ทำหน้าที่ปรับความเข้มของแสงก่อนส่งผ่านไปยังสารละลายให้มีความเข้มที่เหมาะสมกับความไวของหลอดรับแสง

5) อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (detector)

เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างออกมาหลอดรับแสง ทำหน้าที่วัดความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาจากสารละลาย โดยเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วส่งสัญญาณไฟฟ้านั้นต่อไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล

6) เครื่องบันทึกข้อมูล (meter หรือ recorder)

เป็นหน่วยแสดงค่าที่วัดได้ เครื่องมือบางแบบ เช่น Spcctronic 21 เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ผ่านเข้าสู่แกลแวนอมิเตอร์ให้เป็นพลังงานกลคั่นให้เข็ม บนหน้าปัดของเครื่องเคลื่อน ไปบนสเกลแบบอื่น ๆ อาจต่อกับเครื่องพิมพ์คอมพิวเตอร์พิมพ์ผลการวัด และผลวิเคราะห์ต่าง ๆ ออกมาได้ตามคำสั่ง โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้วัดการดูดแสงคลื่นแสงในช่วงวิสิเบิลมักจะรวมคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตไว้ด้วย ซึ่งนิยมเรียกว่า UV-VIS Spcctrophotometer

2.6.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

เทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี เป็นเทคนิคที่นิยมในการตรวจหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแถบพลังงานสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงอินฟราเรด จะมีเลขคลื่นในช่วง $4000-660\text{ cm}^{-1}$ หรือมีความยาวคลื่นในช่วง $15.4-2.5\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งเมื่อแสงอินฟราเรดตกกระทบ โมเลกุลสารจะเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลสารกับแสงอินฟราเรดในบางช่วง ซึ่งมีความถี่ตรงกันกับความถี่ของการสั่นของพันธะในโมเลกุลของสาร จะถูกดูดกลืนไป เรียกว่า การเกิดเรโซแนนซ์ ทำให้ความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง จึงมีความเข้มแสงลดลงในบางช่วงของความถี่ทั้งหมดของอินฟราเรด เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างกับความถี่หรือเลขคลื่น จะมีค่าเท่ากับส่วนกลับของความถี่แสงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (stretching) และแบบงอ (bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นขบวนการควันไทส์ (quantized) กล่าวคือ การที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะเท่านั้น ซึ่งมีตัวอย่างการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่แสดงรายละเอียดต่าง ๆ

ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ในช่วงเลขคลื่น 4,000-660 cm^{-1}

cm^{-1}	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3,600-3,400	O-H stretching	3650-3590 cm^{-1} (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm^{-1} (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm^{-1} (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
2,850-2,780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2,260-2,100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้
1,820-1,760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1,710 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (r) มี 2 แถบ
1,690-1,650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1,520 (s) และ 1,350 (s)	NO_2 bending	สารประกอบไนโตร
1,400-100	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1,300-1,150	$\text{CH}_2\text{-X}$	สารประกอบเฮโลเจน
1,220	C-O stretching	ฟีนอล
1,050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, $\text{R}_2\text{C}=\text{CH}_2$)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมைด์
~500อัลไคน์	C-I	สารประกอบไอโอดีน

ที่มา : วิชัย ธีวตระกูล. 2527. การประยุกต์สเปกโทรสโกปีในเคมีอินทรีย์. (กรุงเทพมหานคร:โรงพิมพ์นำอักษรการพิมพ์.)

เทคนิค FTIR เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์เพื่อการจำแนกประเภทสารอินทรีย์สารอินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุล และสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารตัวอย่างได้อีกด้วยโดยใช้การตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่มีความถี่ต่าง ๆ ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสี จำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมด โดยจะมีค่าลดลงเพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด เครื่องวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดในระบบ FTIR มีส่วนประกอบหลักคือ แหล่งกำเนิดรังสี Interferometer และเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับ FTIR คือ Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) และ Mercury Cadmium Telluride (MCT) หลักการทำงานของ FTIR รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งตัวที่นิยมใช้คือ Michelson Interferometer ประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และมีกระจกที่ติดอยู่กับที่ โดยกระจกทั้งสองจะตั้งฉากกันและมีตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง โดยส่วนมากทำมาจาก การนำฟิล์มบางของเจอร์มาเนียมวางลงบน KBr ที่เป็นตัวแยกแสง รังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปที่กระจกที่ติดอยู่กับที่ และรังสีอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปที่กระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมาวมกันที่ตัวแยกแสงเกิดการแทรกสอดขึ้นหลังจากนั้นรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่าง และในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด อย่างไรก็ตามเทคนิค FTIR นี้มีความไว และใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิค IR ชนิดอื่น

2.7 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

2.7.1 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) (วีระศักดิ์ และคณะ, 2543)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา หรือโครงสร้างจุลภาค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่มีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงมากกว่า 100,000 เท่า โดยการแจกแจงรายละเอียดของภาพมีความเป็นไปได้ถึงประมาณ 1 นาโนเมตร จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากสามารถใช้ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของชิ้นตัวอย่างในระดับเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และจำแนกรายละเอียดได้ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานทางด้าน การแพทย์ ชีววิทยา เคมี วัสดุศาสตร์ และอื่น ๆ อีกจำนวนมาก อีกทั้งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยังสามารถนำไปใช้เชื่อมโยงกับเทคนิคในการวิเคราะห์แบบอื่น ได้อีก เช่น เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS)

2.7.1.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนบนสุดของเครื่องเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ผลิตลำอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้สแกนลงบนชิ้นงานตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศ ลำอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิว หน้าของตัวอย่างซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์แรงให้เคลื่อนที่ลงมาตามแนวด้านซ้ายไปขวาโดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยช่องเปิด ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันตามลักษณะการใช้งาน โดยกลุ่มของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ กลายเป็นลำอิเล็กตรอน เลนส์คอนเดนเซอร์นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมแสงอิเล็กตรอน เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจกแหล่งกำเนิด ให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่จับโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ

2.7.1.2. หลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขณะที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่าง จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุ และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ สัญญาณภาพ จากอิเล็กตรอนกระเจิง และสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์

1) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำช่วง 3 ถึง 5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกไม่เกิน 10 นาโนเมตร โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

2) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (BEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และกระเจิงกลับออกมาซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร

3) สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (XRI) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K, L, M...) ถูกกระตุ้น หรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรทำให้อะตอมต้องรักษาสภาพสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนมีพลังงานสูงกว่าจึงต้องลดพลังงานลง โดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับ ชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณ และคุณภาพสัญญาณ ภาพจากอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพได้ โดยต้องเลือก ใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดให้ เหมาะสมกับสัญญาณภาพแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.3 วิธีการวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทคนิค

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกรณีวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า จะมีประจุลบอันเนื่องมา จากการสะสมอิเล็กตรอนบนผิวหน้า และไม่สามารถระบายออกไปได้ทำให้เกิดประจุลบสะสมอยู่บนผิวหน้าประจุเหล่านี้ จะทำให้เกิดแรงผลักต่ออิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนที่กวาดไปบนพื้นผิว ทำให้ความชัดของภาพลดลง อัตราการขยายภาพหาได้จากอัตราส่วนของภาพบนจอมอนิเตอร์ต่อความยาวของส่วนที่ถูกสแกน อาจมีค่าสูงถึงแสนเท่าสำหรับความคมชัดของภาพจะถูกจำกัด โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนที่ต้องโฟกัสให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งขนาดของลำอิเล็กตรอนก็ถูกกำหนดโดยการแผ่กระจายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยด้วยความร้อนซึ่ง จะถูกจำกัดให้มีค่าประมาณ 8 นาโนเมตร ในกรณีที่ต้องการให้มีความคมชัดที่ดีควรลดกระแสของอิเล็กตรอนลง และความลึกของสนามควมมีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตร การเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้แก่เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะทำให้สามารถได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้นและหนึ่งในจำนวนเครื่องมือที่มีประโยชน์ก็คือ เครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน โดยเมื่อลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงตกกระทบกับอะตอมของสารตัวอย่าง จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในหลุดออกจากวงโคจร และอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะมาแทนที่โดยการปล่อยรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นแสงสีเดียวคลื่นที่ปล่อยออกมาจะแสดงลักษณะเฉพาะของธาตุองค์ประกอบของตัวอย่าง ดังนั้น เครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานสามารถใช้หาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าสารโดยมักจะใช้ร่วมกับเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.7.1.4 การประยุกต์ใช้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกับเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์

- 1) การประเมินคุณลักษณะเฉพาะ (Characterization evaluation) สามารถดูได้จาก ขนาดเกรน ความขรุขระผิว ความพรุน การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ
- 2) การวิเคราะห์จุดบกพร่อง (Failure analysis) สามารถดูได้จากการปนเปื้อน เฉพาะบริเวณที่เกิดการแตกหักในระดับจุลโครงสร้าง

2.9.1.5 ลักษณะการใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในทางการปฏิบัติลักษณะการใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอาจแบ่งได้ 4 กลุ่มหลักดังนี้

- 1) High Resolution Mode สำหรับงานที่ต้องการกำลังขยายสูงจึงต้องการจุดตกกระทบขนาดเล็ก
- 2) High Depth of Mode สำหรับงานที่ต้องการความชัดลึกสูง จึงต้องการใช้มุมคอนเวอร์เจนต์ ของลำอิเล็กตรอน ที่มีขนาดเล็กๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) High Current Mode สำหรับการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้รังสีเอกซ์ต้องการปริมาณกระแสสูง ๆ เพื่อเพิ่มความไว (Sensitivity) ต่อการตรวจวัดปริมาณของธาตุ

4) Low Voltage Mode นอกเหนือไปจากการใช้งาน FE-SEM ในปัจจุบัน FE-SEM หรือ SEM บางแบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ค่าต่ำกว่า 5 กิโลโวลต์ เนื่องจากการใช้งาน SEM ลักษณะนี้จะได้พื้นผิวที่ดีขึ้น อีกทั้งยังลดปริมาณประจุสะสมบนผิว จึงทำให้สามารถศึกษาตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าโดยไม่ต้องเคลือบด้วยคาร์บอน

2.8 การประยุกต์ใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิต

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมทั้งผักและผลไม้ในทุก ๆ ฤดู ซึ่งผักและผลไม้สำหรับการบริโภควางจำหน่ายอยู่ทุกสถานที่ เช่น ตลาดนัด ห้างสรรพสินค้า เป็นต้น ผักและผลไม้ อาจมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์จากสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ทำให้ผักและผลไม้เกิดการเน่าเสียได้ โดยมีสาเหตุมาจากแหล่งที่เพาะปลูก รวมทั้งมาจากการเก็บเกี่ยวและการขนส่งสำหรับผลไม้ อาจมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บเกี่ยวหรือการเตรียม เช่น การใช้อุปกรณ์ที่ไม่สะอาด หรือโดยจากมือของมนุษย์ ทำให้เกิดการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ไปทั่วบริเวณเนื้อผลผลิตของผักและผลไม้

จุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักและผลไม้ที่สำคัญ ได้แก่ *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* และ *Staphylococcus aureus* แบคทีเรียที่ก่อโรคจากการรับประทานอาหารมักพบอยู่ตามผิวหนัง ทางเดินหายใจ บาดแผลของมนุษย์ เมื่อรับประทานอาหารที่มีเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนลงไป ในอาหาร แบคทีเรียดังกล่าวจะสร้างสารพิษทำให้ผู้บริโภคเกิดอาการเป็นพิษ หลังจากรับประทานอาหารที่มีแบคทีเรียปนเปื้อนเข้าไปประมาณ 1-6 ชั่วโมง โดยอาหารที่มีแบคทีเรียและสารพิษปนเปื้อนอยู่จะไม่มีกลิ่น สี หรือ รสชาติ คือ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง ปวดท้อง จากสารพิษ อาการมักเกิดขึ้นอย่างเฉียบพลัน ส่วนมากไม่มีไข้ ในรายรุนแรงอาจช็อคได้ หากมีการรับประทานผักหรือผลไม้ที่มีการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียอาจเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อผู้บริโภค

การใช้บรรจุภัณฑ์ในการห่อผักและผลไม้เป็นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถช่วยลดการแพร่กระจายของเชื้อแบคทีเรีย การใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิตซึ่งเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ห่อผักและผลไม้ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย และยังสามารถใช้แทนวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกเพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ameen et al. (2020) ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Spirulina platensis* และศึกษาฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่อเชื้อฉวยโอกาสเชื้อโรคนิโรในโรงพยาบาลของระบบทางเดินหายใจ โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารสกัดสำหรับเลี้ยงของ *Spirulina platensis* จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค UV-Vis โดยระบุจุดพีคของพื้นผิวพลาสมอน เรโซแนนซ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่ 417 นาโนเมตร Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ระบุการอนุภาคด้วยสารอินทรีย์ของสารสกัด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ยืนยันการก่อตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโน มีลักษณะทรงกลมด้วยค่าเฉลี่ยขนาด 13 นาโนเมตร การวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) อธิบายลักษณะผลึกของอนุภาคซิลเวอร์นาโน เฉลี่ยขนาดอนุภาค และดัชนีการกระจายตัว (PDI) ของ AgNPs เท่ากับ 74.8 นาโนเมตร และ 0.285 ตามที่บันทึกโดยไดนามิก การกระเจิงของแสง (DLS) การวิเคราะห์กราฟิเมตริกทางความร้อน (TGA) บ่งชี้ความเสถียรทางความร้อนของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ในบรรดาส่วนประกอบที่ออกฤทธิ์อื่น ๆ ของสารสกัดสำหรับ โปรตีนสามารถมีบทบาทหลักในการลด การคงตัว และการห่อหุ้มอนุภาคซิลเวอร์นาโน นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียประเมินจากแบคทีเรียก่อโรค 7 สายพันธุ์ในทางเดินหายใจ ซึ่งอนุภาคซิลเวอร์มีแนวโน้มที่จะต่อต้านเชื้อโรคนิโรที่นำมาทดสอบ

Dey et al. (2022) ทำการศึกษาวัสดุนาโนที่ใช้บรรจุภัณฑ์อาหารโดยสามารถต้านจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเป็นความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านวิทยาศาสตร์การอาหาร บรรจุภัณฑ์อาหารเป็นส่วนสำคัญของการผลิตอาหาร และอยู่ในแกนหลักของธุรกิจการผลิตอาหาร กลายเป็นนโยบายที่มีในการรับรองคุณภาพของอาหาร การหลีกเลี่ยงการสูญเสีย การลดการใช้สารกันบูด และการป้องกันการเน่าเสีย เป็นหน้าที่สำคัญของวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร การบรรจุอาหารแบบเก่าแม้ว่าจะได้รับการประกันคุณภาพที่ดีในอาหาร แต่ข้อจำกัดที่สำคัญของบรรจุอาหารแบบเก่าอยู่ที่การควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การนำวัสดุนาโนมาใช้ในฟิล์มคอมโพสิตจะทำให้บรรจุภัณฑ์สามารถบรรจุอาหารให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากวัสดุนาโนสามารถเพิ่มความทนทานเชิงกล กันความชื้น และการฉายรังสี UV เป็นต้น เนื่องจากวัสดุนาโนที่ปรับการทำงานได้นั้นต้องเป็นไปตามเกณฑ์ทั้งหมด จึงไม่สามารถมองข้ามเกณฑ์อื่น ๆ รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความยั่งยืน และความสะดวกสบายได้ ข้อกังวลด้านความปลอดภัยเบื้องต้นประการหนึ่งที่สามารถพิจารณาได้จากการใช้วัสดุนาโนที่ทำหน้าที่ได้ คือ การเคลื่อนตัวของอนุภาคนาโนเข้าสู่อาหาร และผลกระทบต่อร่างกาย ไม่ว่าจะเป็พิษ หรือไม่เป็นพิษ ยังไม่ได้รับค่าการประเมิน และข้อมูลที่เหมาะสมเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายของอนุภาคนาโนในอาหาร ดังนั้นจึงมีเหตุผลที่จะสันนิษฐานว่าการย้ายถิ่นเกิดขึ้น เป็นหน้าที่ของผู้ผลิตวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้เทคโนโลยีนาโนในการให้การรับประกัน

เอกสารนี้เกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่รับประกันการปฏิบัติตามกฎระเบียบ ตลอดจนการให้ข้อมูลที่ชัดเจน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

เกี่ยวกับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น การใช้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นเมทริกซ์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ร่วมกับอนุภาคนาโนเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารต้านแบคทีเรีย อนุภาคนาโนบางประเภท เช่น เปลือกแกนกลาง โลหะ และโลหะออกไซด์ นาโนไฮบริด และวัสดุนาโนดินเหนียว แสดงคุณสมบัติในการต้านจุลชีพหลายชนิด ดังนั้น คอมโพลีเมอร์นาโนชีวภาพจึงได้รับความนิยมมากขึ้น

Swarup and Jog-Whan (2022) ทำการศึกษาฟิล์มที่มีส่วนผสมเป็นแป้งและวุ้นผสมกับอนุภาคเงินนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้เท็ดอีโนกิสำหรับการเป็นบรรจุภัณฑ์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมีขนาดเล็ก (~10 นาโนเมตร) มีลักษณะเป็นทรงกลม และแสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียที่รุนแรงต่อแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคในอาหาร *Listeria monocytogenes* และ *Escherichia coli* อนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกกระจายทั่วแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพลีเมอร์ และการรวมกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถกั้นไอน้ำและความไม่ชอบน้ำของฟิล์มแป้งและวุ้น การเพิ่มอนุภาคซิลเวอร์นาโนไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกล และเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม ฟิล์มแป้งและวุ้นที่เติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนแสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียที่มีศักยภาพต่อเชื้อ *Listeria monocytogenes* และ *Escherichia coli* เมื่อผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในฟิล์มที่ผลิตจากแป้งและวุ้น ฟิล์มมีประสิทธิภาพดีขึ้นทางกายภาพ (ความแข็งแรงเชิงกล การกั้นไอน้ำ) และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ (ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย) คาดว่าฟิล์มคอมโพลีเมอร์นี้จะนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร

Yugay et al. (2020) ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ทางชีวภาพโดยใช้อัลจินต ฟุกคอยแดน และลามินารันจากสาหร่ายสีน้ำตาล พอลิแซ็กคาไรด์ที่อยู่ในอัลจินต, ฟุกคอยแดน และลามินารัน ถูกแยกได้จากสาหร่ายทะเล *Saccharina cichorioides* และ *Fucus evanescens* ซึ่งนำมาใช้เป็นสารรีดิวซ์ และทำให้เสถียรในการสังเคราะห์ทางชีวภาพของอนุภาคซิลเวอร์นาโน นอกจากนี้ยังประเมินคุณสมบัติความเป็นพิษต่อเซลล์ และต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผ่านการทดสอบทั้งหมดสามารถใช้เป็นตัวรีดิวซ์ได้ กิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาของสาหร่ายแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อนุภาคซิลเวอร์นาโนแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ของ Glioma C6 ของหนู และอนุภาคซิลเวอร์นาโนยังมีคุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียที่ชัดเจนกว่าในตัวอย่างที่ได้รับฟุกคอยแดน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายต่าง ๆ สามารถใช้สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่แตกต่างกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 อุปกรณ์การสกัดสำหรับยาลี่วยทอง

- 3.1.1.1 ซ้อนตักสาร
- 3.1.1.2 ถ้วยกระดาษ
- 3.1.1.3 เครื่องชั่งสาร
- 3.1.1.4 ปีกเกอร์
- 3.1.1.5 กระดาษกรองเบอร์1
- 3.1.1.6 ขวดสีชา
- 3.1.1.7 น้ำกลั่น
- 3.1.1.8 กระบอกลด
- 3.1.1.9 ผงสำหรับยาลี่วยทอง
- 3.1.1.10 แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.1.11 Hot plate
- 3.1.1.12 Thermometer
- 3.1.1.13 Centrifuge

3.1.2 อุปกรณ์การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน

- 3.1.2.1 ซิลเวอร์ไนเตรต
- 3.1.2.2 ซ้อนตักสาร
- 3.1.2.3 ถ้วยกระดาษ
- 3.1.2.4 เครื่องชั่งสาร
- 3.1.2.5 น้ำกลั่น
- 3.1.2.6 ปีกเกอร์
- 3.1.2.7 สารสกัดสำหรับยาลี่วยทอง
- 3.1.2.8 ปีเปตแก้ว
- 3.1.2.9 จุกยาง
- 3.1.2.10 แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.2.11 กระบอกลด
- 3.1.2.12 magnetic stirrer
- 3.1.2.13 magnetic bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์การทำแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

- 3.1.3.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.1.3.2 ปีกเกอร์
- 3.1.3.3 แป้งมันสำปะหลัง
- 3.1.3.4 ผงวุ้น
- 3.1.3.5 ก्लीเซอร์อล
- 3.1.3.6 น้ำกลั่น
- 3.1.3.7 ถ้วยกระดาษ
- 3.1.3.8 ซ้อนตักสาร
- 3.1.3.9 แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.3.10 ปีเปตแก้ว
- 3.1.3.11 จุกยาง
- 3.1.3.13 สารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโน
- 3.1.3.14 magnetic stirrer
- 3.1.3.15 magnetic bar
- 3.1.3.16 ภาดพลาสติกขนาด 50 x 80 ตารางเซนติเมตร

3.1.4 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายเกลือ

ทอง

- 3.1.4.1 UV-visible Spectrophotometer (UV-Vis)
- 3.1.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

3.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

- 3.1.5.1 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

3.1.6 อุปกรณ์การทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย

- 3.1.6.1 เชื้อ *Staphylococcus aureus*
- 3.1.6.2 เชื้อ *Escherichia coli*
- 3.1.6.3 Trypticase soy agar (TSA)
- 3.1.6.4 Trypticase soy broth (TSB)
- 3.1.6.5 น้ำกลั่น
- 3.1.6.6 pH meter
- 3.1.6.7 NaOH
- 3.1.6.8 HCl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก 3.1.6.9 Autoclave และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.6.10 McFarland 0.5

- 3.1.6.11 Loop
- 3.1.6.12 ตะเกียงแอลกอฮอล์
- 3.1.6.13 Auto Pipette
- 3.1.6.14 หลอดทดลอง
- 3.1.6.15 กรรไกร
- 3.1.6.16 แอลกอฮอล์ 95%
- 3.1.6.17 แท่งแก้ว
- 3.1.6.18 ฟิล์มนาโนคอมโพสิต
- 3.1.6.19 ตู้บ่มเชื้อ
- 3.1.6.20 ตู้ลาร์มินา
- 3.1.6.21 Petri dish

3.1.7 อุปกรณ์การประยุกต์ใช้นาโนฟิล์มคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในการบรรจุผลไม้

- 3.1.7.1 ส้อม
- 3.1.7.2 ฟิล์มพลาสติก
- 3.1.7.3 ฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคนาโน 0-3% (W/W)
- 3.1.7.4 ตู้เย็น

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสกัดสารห่วยเกลียวทอง

นำผงสารห่วยเกลียวทอง 5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง 9,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อขจัดเศษเซลล์

3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารสกัดสารห่วยเกลียวทอง

เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต โดยชั่งสารซิลเวอร์ไนเตรต 0.0169 กรัม ลงในปิกรเกอร์ ทำการละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารสกัดสารห่วยเกลียวทอง 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 90 มิลลิลิตร (1 มิลลิโมลาร์) กวนด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สีของสารละลายจะเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลอมเหลืองแสดงว่า มีการก่อตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

3.2.3 การผลิตแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

ผลิตฟิล์มนาโนคอมโพสิตด้วย Casting method โดยนำแป้ง 1.5 กรัม 1% (W/W) และผงวุ้น 1.5 กรัม 1% (W/W) ผสมกับน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร และกลีเซอรอล 1% (W/W) เพื่อเป็นพลาสติกไซเซอร์ ใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโน 0, 1, 2 และ 3 % (W/W) กวนด้วย magnetic stirrer ที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารละลายนาโนคอมโพสิต 120 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงบนภาตพลาสติกขนาด 50 x 80 ตารางเซนติเมตร นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สำหรับกล้วยทอง

3.2.4.1 การศึกษาด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy เพื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิสิเบิล ของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-700 นาโนเมตร จากนั้นจะทำการประมวลค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นเพื่อยืนยันสมบัติความเป็นนาโนของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่เตรียมขึ้นมา

3.2.4.2 ศึกษาการดูดกลืนอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสำหรับกล้วยทอง ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} ในโหมด transmittance

3.2.5 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

3.2.5.1 ศึกษาสัณฐาน และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวภายนอกของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตด้วย Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) ที่กำลังขยาย 2,000x 5,000x และ 10,000x

3.2.6 การทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย

ทำการทดสอบฤทธิ์การต้านแบคทีเรียของแผ่นฟิล์มกำหนด โดยใช้วิธีที่เป็นตัวแทนของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS Z 2801: 2000 โดยใช้แบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ ได้แก่ *Staphylococcus aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก และ *Escherichia coli* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ โดยเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในอาหาร Trypticase soy agar นำแบคทีเรียที่เตรียมได้จากข้างต้นมาเทียบความขุ่นให้เท่ากับสารละลายมาตรฐาน McFarland No.0.5 (1.5×10^8 CFU/ mL) ในสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 0.85% (0.85% NaCl) สารแขวนตะกอนแบคทีเรียถูกเตรียมใน Trypticase soy broth โดย *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* เตรียมที่ความเข้มข้น 1.5×10^4 CFU/ mL จากนั้นนำ Trypticase soy broth 20 ไมโครลิตร ที่มีสารแขวนลอยของแบคทีเรียหยดลงด้านบนแผ่นฟิล์มขนาด 4 x 4 ตารางเซนติเมตร ที่วางอยู่บน Petri dish ปลอดเชื้อ และถูกปิดทับด้วยแผ่นพลาสติกปลอดเชื้อขนาด 6 x 6 ตารางเซนติเมตร และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการบ่ม 20 ไมโครลิตรของ Trypticase soy broth ที่หยดบนแผ่นฟิล์มให้นำ Trypticase soy broth 20 ไมโครลิตร มาทำการชะล้างบริเวณแผ่นฟิล์ม แล้วทำการเจือจางแบบอนุกรมสิบเท่าจนถึง 10^{-2} CFU/mL จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายมาทำการ spread plate บน Tryptic soy agar และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจาก 24 ชั่วโมงทำการตรวจนับโคโลนีและคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งแบคทีเรียโดยสามารถคำนวณจากสูตร ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = (U_t - A_t) / U_t \times 100\%$$

โดย R คือ กิจกรรมการยับยั้งจุลินทรีย์

U_t คือ จำนวนโคโลนีของแบคทีเรียเป็นชุดควบคุม (cell/ mL)

A_t คือ จำนวนโคโลนีของแบคทีเรียบนเพลทอาหารเลี้ยงเชื้อที่ทดสอบฟิล์มนาโนคอมโพสิต (cell/ mL)

3.2.7 การประยุกต์ใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในการบรรจุผลไม้

เลือกผลส้มที่มีขนาด รูปร่าง ความแก่ และสีที่ใกล้เคียงกัน นำผลส้มที่ใช้ในการทดลองมาล้าง และเช็ดทำความสะอาดให้แห้ง จากนั้นนำผลส้มมาห่อด้วยแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ AgNPs 0, 1, 2 และ 3%(W/W) และใช้ฟิล์มพลาสติกเป็นตัวควบคุม ผลส้มที่ห่อถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน เพื่อทดสอบการยืดอายุการเก็บรักษาของผลส้ม สังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พร้อมถ่ายภาพของผลส้ม ในวันที่ 1 และ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการสกัดสารหทัยเกลียวทอง

จากการนำผงสารหทัยเกลียวทอง 5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทำการให้ความร้อน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง และทำการกรองด้วยกระดาษกรอง ได้สารสกัดสารหทัย โดยสารสกัดสารหทัยเกลียวทองมีสีเหลืองใส ดังรูปที่ 4.1

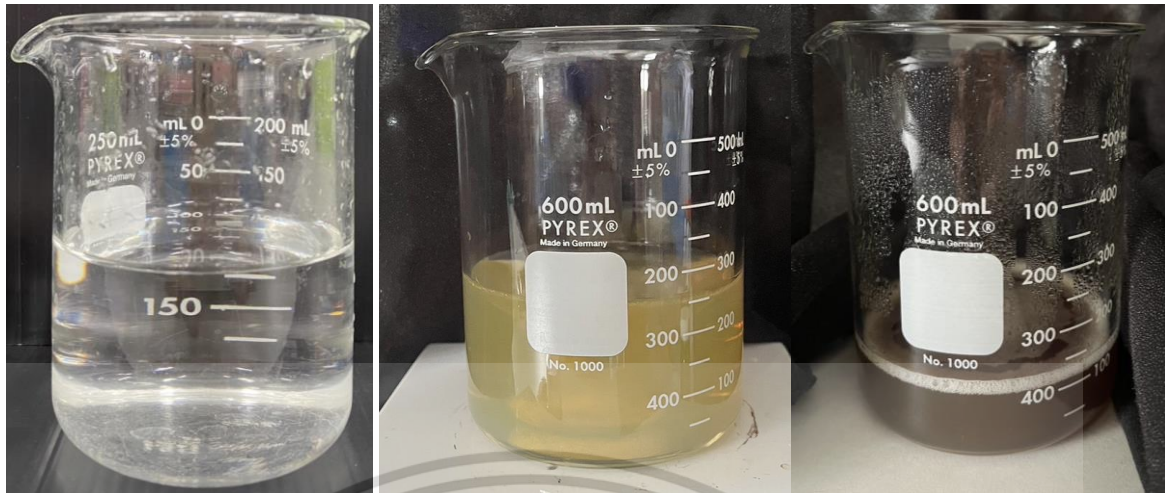


รูปที่ 4.1 สารสกัดสารหทัยเกลียวทอง

4.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารสกัดสารหทัยเกลียวทอง

จากการนำสารสกัดสารหทัยเกลียวทอง มาสังเคราะห์ทางชีวภาพของอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยนำสารสกัดสารหทัยเกลียวทองมา 10 มิลลิลิตร (สีเหลืองใส) ใส่ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 90 มิลลิลิตร (1 มิลลิโมลาร์) (สีใสไม่มีสี) จะได้เป็นสารละลายสีเหลืองอ่อนใส หลังจากนั้นให้ความร้อน และกวนสารละลายอย่างต่อเนื่อง พบว่า จากสีสารละลายสีเหลืองอ่อนใสเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเหลือง ซึ่งเป็นการก่อตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ไอออนได้เป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AgNO₃AgNO₃ + *Spirulina* extract

AgNPs

รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนสีของสารละลาย AgNO₃ เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง

4.3 ผลการผลิตแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

ผลจากการผลิตฟิล์มนาโนคอมโพสิตด้วย Casting method โดยนำแป้ง 1% (W/W) และผงวุ้น 1.5 กรัม 1% (W/W) ผสมกับน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร และกลีเซอรอล 1% (W/W) เพื่อเป็นพลาสติกไซเซออร์ ใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโน 0, 1, 2 และ 3 % (W/W) กวนด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารละลายนาโนคอมโพสิต 120 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงบนถาดพลาสติก นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำมาจากตู้อบลมร้อนออกจากถาด ได้เป็นแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่า สีของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ AgNPs 0% (W/W) มีสีใส แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ AgNPs 1% (W/W) มีสีเหลืองเล็กน้อย แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ AgNPs 2% (W/W) มีสีเหลือง และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ AgNPs 3% (W/W) มีสีน้ำตาลอมเหลือง สีของแผ่นฟิล์มเกิดขึ้นจากการใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโน เนื่องจากสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีสีน้ำตาลอมเหลือง และการที่สีของแผ่นฟิล์มที่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ใส่ลงบนแผ่นฟิล์มคอมโพสิตมีปริมาณที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AgNPs 0% (W/W) AgNPs 1% (W/W) AgNPs 2% (W/W) AgNPs 1% 3% (W/W)

รูปที่ 4.3 แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) 0-3% (W/W) บนถาด

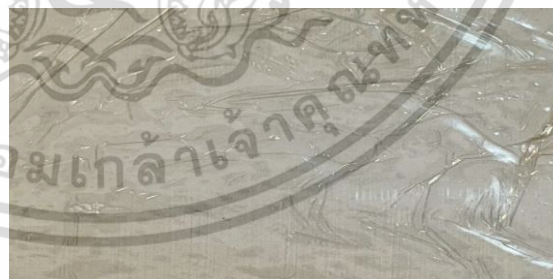
AgNPs 0% (W/W)



AgNPs 1% (W/W)



AgNPs 2% (W/W)



AgNPs 3% (W/W)

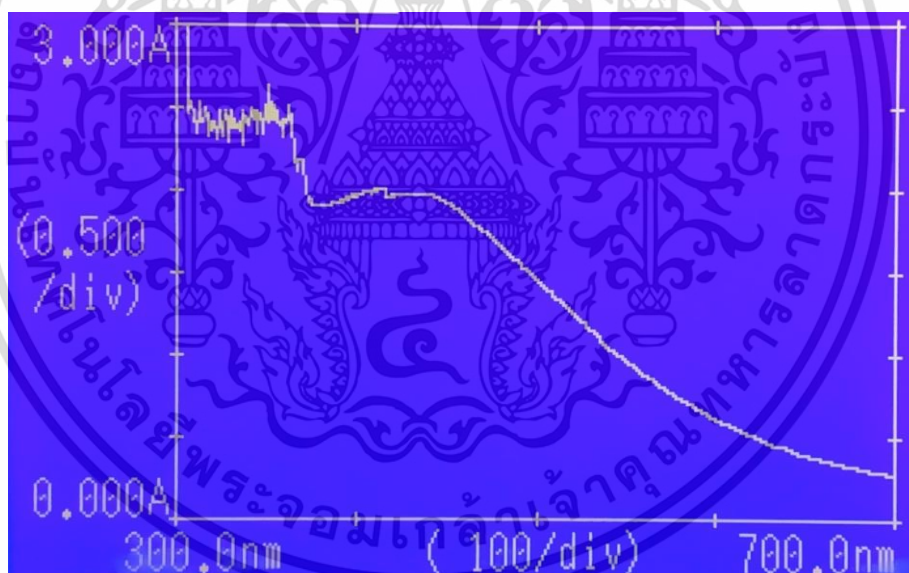


รูปที่ 4.4 ลักษณะแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) 0-3% (W/W)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้ในการพิมพ์เอกสารเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง

4.4.1 UV-Visible Spectroscopy

จากการนำสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง มาสังเคราะห์ทางชีวภาพของอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยนำสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองมา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 90 มิลลิลิตร (1 มิลลิโมลาร์) หลังจากนั้นกวนสารละลาย และให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง จะเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากสีเหลืองเป็นน้ำตาลอมเหลือง นำสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง ซึ่งใช้ช่วงความยาวคลื่น 300–700 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscopy ดังรูปที่ 4.5 พบว่า สเปกตรัมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 415 นาโนเมตร ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Ameen et al. (2020) ที่พบว่า UV-Visible สเปกตรัมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยสาหร่ายเกลียวทองมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 417 นาโนเมตร

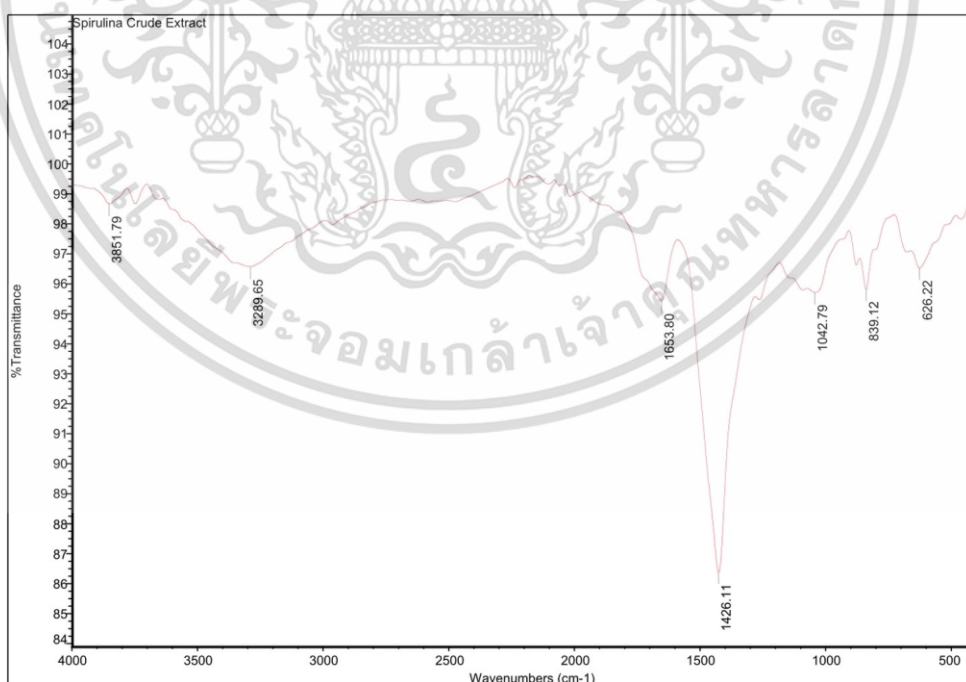


รูปที่ 4.5 UV-Visible สเปกตรัมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองในช่วงความยาวคลื่น 300–700 นาโนเมตร

4.1.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

จากการศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างเคมีของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองด้วยเทคนิค FTIR จากการกำหนดช่วงสเปกตรัมของโพลีแซ็กคาไรด์ของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง และโพลีแซ็กคาไรด์ของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองที่จับกับอนุภาคไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลเวอร์นาโน ดังตารางที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค FTIR สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันของโพลีแซ็กคาไรด์ที่อยู่ในสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองซึ่งจับกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ได้จากพีคที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยพีคที่ตำแหน่ง 3851.79 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีแบบ stretching ของพันธะ O-H แสดงการมีอยู่ของ carbohydrate amino acid พีคที่ตำแหน่ง 3289.65 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีแบบ stretching ของพันธะ O-H พีคที่ตำแหน่ง 1653.80 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีแบบ asymmetric stretching ของพันธะ O-H compounds พีคที่ตำแหน่ง 839.12 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีแบบ stretching ของพันธะ N-H แสดงการมีอยู่ของ aliphatic amines พีคที่ตำแหน่ง 626.22 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีแบบ stretching ของพันธะ C-H แสดงการมีอยู่ของ antioxidant enzyme ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้แสดงการมีอยู่ของ esters พีคที่ตำแหน่ง 1426.11 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีแบบ bending ของพันธะ CH_2 แสดงการมีอยู่ของ carbonyl compounds พีคที่ตำแหน่ง 1042.79 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีแบบ Symmetric stretching ของพันธะ O-H แสดงการมีอยู่ของ carbonyl สอดคล้องกับการศึกษาของ Mohamed และ et al. (2019) พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันของโพลีแซ็กคาไรด์ที่อยู่ในสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง ซึ่งจับกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยพบหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, C=O และ C-O-H ของโพลีแซ็กคาไรด์ ซึ่งเป็นสารประกอบของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง ซึ่งโพลีแซ็กคาไรด์ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของการวิเคราะห์แสดงสเปกตรัมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้

สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองด้วยเทคนิค FTIR นั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของโพลีแซคคาไรด์ของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง และ โพลีแซคคาไรด์ของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองที่จับกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วย เทคนิค FTIR

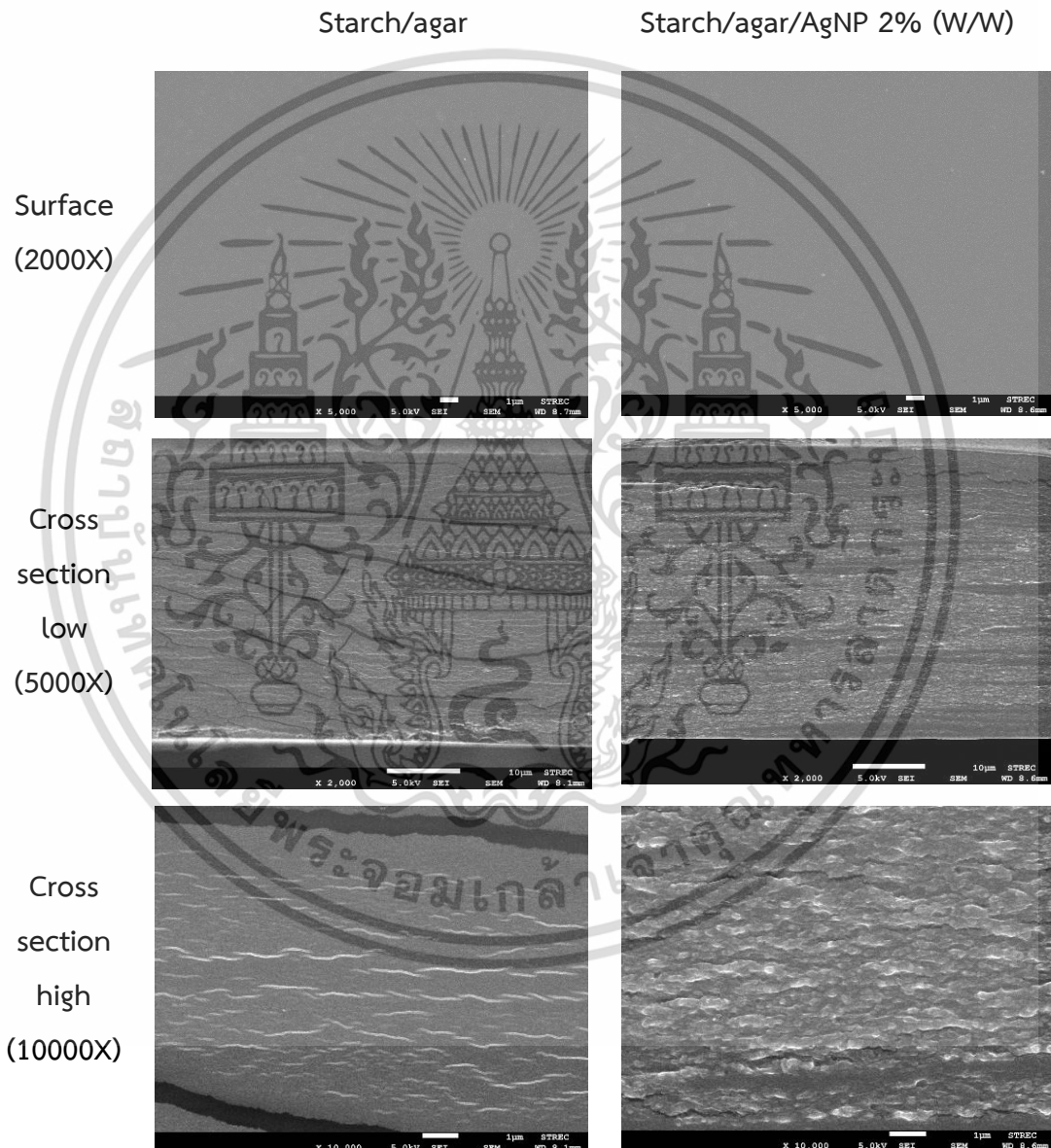
Frequency range <i>Spirulina</i> polysaccharide (cm ⁻¹)	AgNPs- <i>Spirulina</i> polysaccharide (cm ⁻¹)	Functional group
3870-3580	3851.79	O-H stretching vibration presence of carbohydrate amino acid
3300-2925	32889.65	O-H stretching vibration
1870-1650	1653.80	C=O asymmetric stretching, the presence of esters
1430-1400	1426.11	CH ₂ bending vibration CH ₂ -CO- the presence of carbonyl compounds
1115-1025	1042.79	C-O-H Symmetric stretching vibration
1000-650	839.12	N-H stretching vibration presence of aliphatic amines
700-500	626.22	C-H stretching vibration, the presence of antioxidant enzyme

4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

4.5.1 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM เพื่อดูลักษณะพื้นผิว และภาพตัดขวางในระดับจุลภาคของฟิล์มคอมโพสิต และฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังรูปที่ 4.7 พบว่าลักษณะพื้นผิวหน้าของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิดนั้นมีพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าแปรงและวุ้นที่ใช้ในการผลิตฟิล์มมีการผสมกันอย่างดี ในส่วนภาพตัดขวางที่กำลังขยายต่ำและสูง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน มีลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ขรุขระ ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นลักษณะรูปทรงกลมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของฟิล์ม และมีแสงไม่สว่างเท่าใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สว่างที่ทรงกลม เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นตัวนำไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดแสงสว่างขึ้นมา เมื่อเทียบกับฟิล์มคอมโพสิตที่ไม่ได้ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน จะมีลักษณะพื้นผิวเรียบ และไม่มีการปรากฏลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยพื้นผิวของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตจะมีความขรุขระมากขึ้นแปรผันตามอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไป เป็นผลจากการที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าไปกระจายตัวซึ่งความขรุขระที่เพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับเชื้อแบคทีเรียให้มากขึ้น ทำให้แผ่นคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยายสูงชนิดฟิลด์อิมิชชัน (FE-SEM) ของลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของฟิล์มคอมโพสิตและฟิล์มคอมโพสิตที่

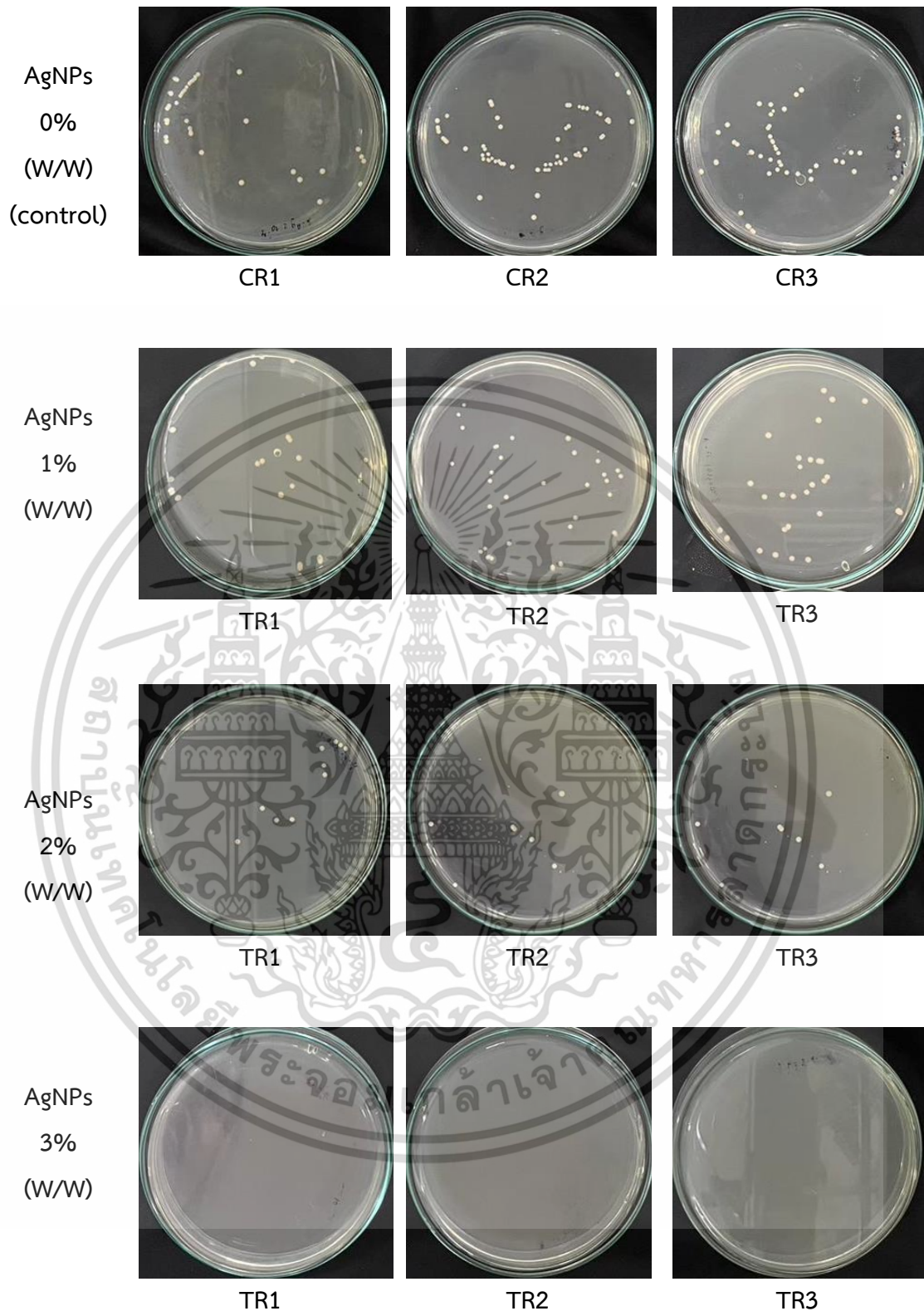
ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

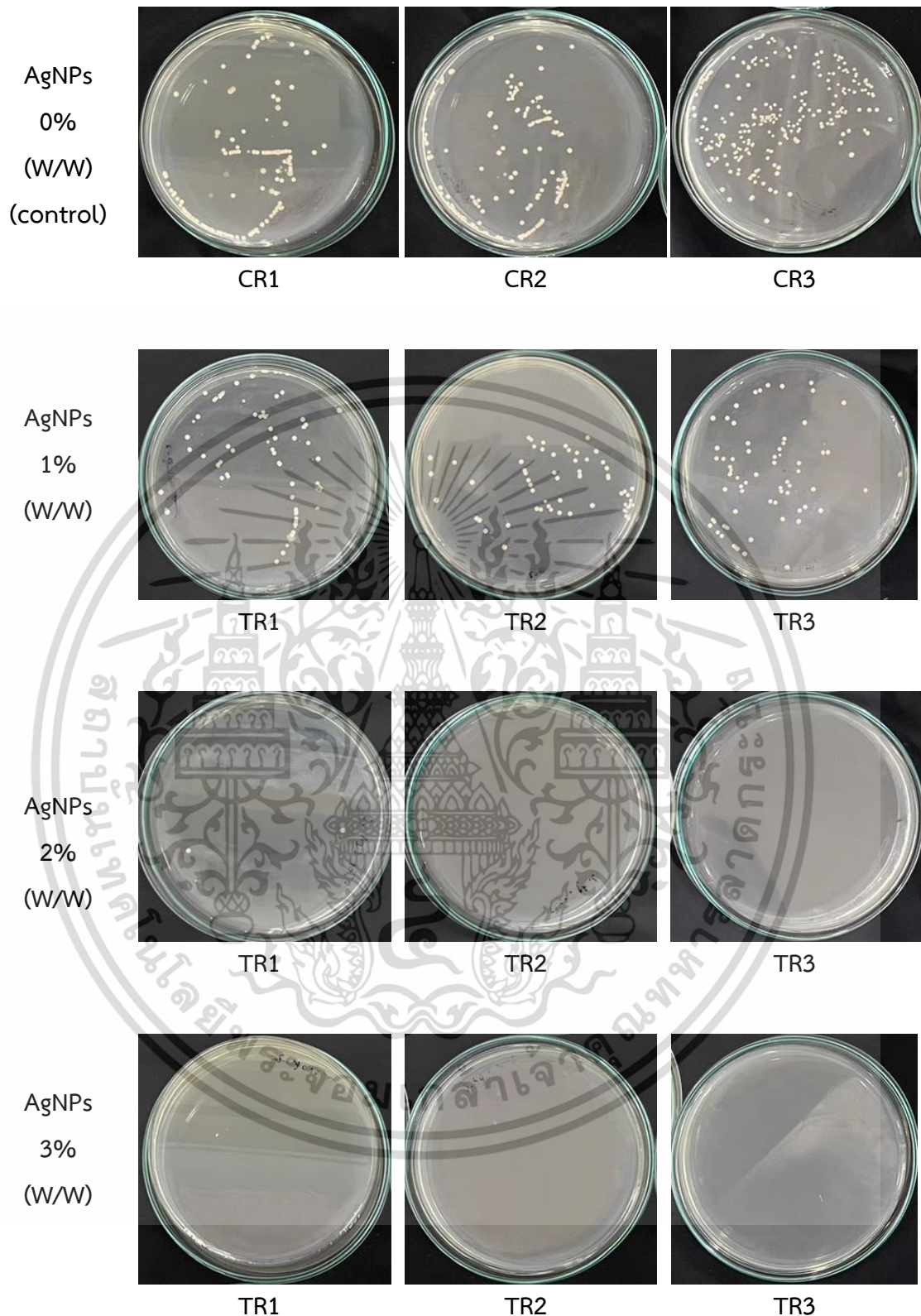
4.6 ผลการทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

จากการนำแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (ตัวควบคุม) และฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3% (W/W) ไปทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี JIS Z 2801:2000 โดยใช้แบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ ได้แก่ *Staphylococcus aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก และ *Escherichia coli* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ โดยเชื้อปริมาณเชื้อเริ่มต้นของเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* เท่ากับ 1.5×10^4 CFU/mL บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลการทดสอบจากการนับโคโลนี (cell/mL) ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากการทดสอบพบว่า แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ได้ ดังตารางที่ 4.2 โดยแผ่นฟิล์มที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 3% (W/W) มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ 100% แผ่นฟิล์มที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 2% (W/W) รองลงมาซึ่งมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus aureus* ได้ 83.06% และ *Escherichia coli* ได้ 97.36% และแผ่นฟิล์มที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 1% (W/W) มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้น้อยที่สุด ซึ่งสามารถยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus aureus* ได้ 44.90% และ *Escherichia coli* ได้ 57.14% ซึ่งแผ่นฟิล์มที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Swarup and Jog-Whan. (2022) พบว่า แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้เท็ดไดโนกิ สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบ (*Escherichia coli*) ได้มากกว่าแกรมบวก (*Listeria monocytogenes*) และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Ameen et al. (2020) พบว่า สารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบและแกรมบวกได้ ซึ่งการนำอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับฟิล์มคอมโพสิต มีผลทำให้แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตมีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรียได้เช่นเดียวกัน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า อนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นสารต้านแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการต้านแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะดูดซับบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต แล้วความชื้นที่อยู่ในอากาศ หรือในตัวของแบคทีเรียแพร่เข้าไปกระตุ้นอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่อยู่ภายในแผ่นฟิล์มคอมโพสิต จากนั้นความชื้นจะทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพื่อไปทำลายแบคทีเรียซิลเวอร์ไอออนจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ หรือผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้รับความเสียหาย ซิลเวอร์ไอออนสามารถเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียได้แล้วไปทำลายส่วนต่าง ๆ ภายในเซลล์ จนทำให้แบคทีเรียตายในที่สุด ผลการทดสอบนี้บ่งชี้ว่า อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ผสมลงไปแผ่นฟิล์มคอมโพสิตมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรียที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อลดการเน่าเสียของอาหารจากจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายโคโลนีของเชื้อ *Staphylococcus aureus* บนจาน TSA หลังจากการบ่ม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดย CR1 *S. aureus*-CR3 *S. aureus* คือ फिल्मคอมโพสิตที่ไม่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน TR1 *S. aureus* -TR3 *S. aureus* คือ फिल्मคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายโคโลนีของเชื้อ *Escherichia coli* บนจาน TSA หลังจากการบ่ม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดย CR1 *E. coli* - CR3 *E. coli* คือ พิล์มคอมโพสิตที่ไม่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน TR1 *E. coli* -TR3 *E. coli* คือ พิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรจุภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีความเหี่ยวและเป็นสีน้ำตาลเข้ม จากการทดสอบพบว่าฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนอาจเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ในการห่อส้ม การใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่เป็นไบโอโพลิเมอร์ทดแทนจะสามารถช่วยลดขยะและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่เป็นพลาสติก ซึ่งอาจได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายดิจิทัลลักษณะของส้มที่ไม่ได้ห่อวัสดุบรรจุภัณฑ์ ห่อด้วยฟิล์มพลาสติกและห่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผสมด้วยฟิล์มคอมโพสิตที่ความเข้มข้น 0-3% (W/W) ไม่นานญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเป็นการพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผลิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้ง และวุ้น เสริมด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนทำสังเคราะห์ด้วยวิธีทางชีวภาพใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิต

จากการศึกษา ทำการสกัดสาหร่ายเกลียวทองด้วยน้ำกลั่น ได้สารสกัดเป็นสีเหลืองใส จากนั้นนำไปใช้สังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่า สีของสารละลายของซิลเวอร์ไนเตรทที่มีสีใสไม่มีสีผสมกับสารสกัดสาหร่ายเกลียวทองที่มีสีเหลืองใส ได้เป็นสารละลายสีเหลืองอ่อนใส เมื่อให้ความร้อนและกวนอย่างต่อเนื่อง สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเหลือง แสดงถึงการก่อตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ไอออนได้เป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน

จากการผลิตแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่า สีของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ AgNPs 0% (W/W) ไม่มีสี ที่ AgNPs 1% (W/W) มีสีเหลืองเล็กน้อย ที่ AgNPs 2% (W/W) มีสีเหลือง และที่ AgNPs 3% (W/W) มีสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งเกิดจากปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ใส่ลงในสารละลายคอมโพสิตเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโน

วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดสาหร่ายเกลียวทองด้วยเทคนิค UV-Visible มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 415 นาโนเมตร และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบโครงสร้างเคมีด้วยเทคนิค FTIR พบหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, C=O และ C-O-H ของพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นสารประกอบของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน

ผลการตรวจวิเคราะห์แผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่า มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวอยู่ในแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยพื้นผิวของแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตจะมีความขรุขระมากขึ้นแปรผันตามอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไป เป็นผลจากการที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าไปกระจายตัวซึ่งความขรุขระที่เพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับเชื้อแบคทีเรียให้มากขึ้น ทำให้แผ่นคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีขึ้น

เมื่อทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย พบว่า แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 1 และ 2% (W/W) มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* ได้ดีกว่าเชื้อเอกซาร์นี้ *Staphylococcus aureus* เนื่องจากเปอร์ดเอ็นในการยับยั้งของเชื้อ *Staphylococcus aureus* มีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ที่น้อยกว่า และที่ 3% (W/W) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งได้ดีที่สุด

จากผลการตรวจประสิทธิภาพของฟิล์มนาโนคอมโพสิตในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์สำหรับผล ส้ม โดยนำผลส้มมาห่อด้วยฟิล์มนาโนคอมโพสิตแต่ละตัวอย่าง และฟิล์มพลาสติกเป็นตัวควบคุมเชิง บวก พบว่า ฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับฟิล์มพลาสติก

การพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพร่วมกับสังเคราะห์อนุภาคซิล เวอร์นาโน (AgNPs) ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพโดยใช้สารสกัดจากสาหร่ายเกลียวทองเป็นวัสดุบรรจุ ภัณฑ์ทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับนำมาใช้แทนการใช้ฟิล์มพลาสติก เพื่อลดปริมาณขยะ พลาสติก และทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาลักษณะ และขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อดูขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

5.2.2 การศึกษาคูณสมบัติทางกลของฟิล์มนาโนคอมโพสิต เพื่อทดสอบเนื้อสัมผัสของ ตัวอย่างด้วยเครื่อง Texture Analyzer

5.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยวิเคราะห์การฝังกลบในดินที่ ได้รับมาตรฐานเพื่อตรวจสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มนาโนคอมโพสิต

เอกสารอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ขจรเกียรติ ศรีนวลสม. 2550. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาในสูตรอาหารต้นทุนต่ำเพื่อเป็นอาหารสัตว์น้ำ. เชียงใหม่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- จกมล พรมยะ. 2533. การวิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* (Nordstedt) Geiteler. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ชัยวัฒน์ วามวรรธน์. 2557. สเปกโทรโฟโตเมตรี. [Online] เข้าถึงได้จาก <http://biochem.flas.kps.ku.ac.th/01402312/01402312lab02spectro156.pdf>.
- ชื่นจิตต์ ชื่นกมล. 2530. การเปรียบเทียบผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลีนา (*Spirulina platensis*) ในสูตรอาหารต่าง ๆ. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒบางแสน.
- บุญเริ่ม บุญวร. 2540. อิทธิพลของชนิดของอาหารและวิธีการให้อาหารที่มีต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) ที่เพาะเลี้ยงในสภาพกลางแจ้ง. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- เพ็ญรัตน์ หงส์วิทยากร และโฉมยงค์ ไชยอุบล. 2546. โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ยุวดี พิรพรพิศาล. 2545. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนา. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ราเชนทร์ ดวงศรี. 2552. การสกัดความคงตัวของของไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลีนา. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสุรนารี.
- วิชัย รุ่งตระกูล และคณะ. 2527. การประยุกต์สเปกโทรสโคปี ในเคมีอินทรีย์. กรุงเทพฯ นำอักษรกรพิมพ์.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สินีนานู อักโขสุวรรณ. 2550. ผลของการแปรรูปและอุณหภูมิของการเก็บรักษาต่อซีไฟโคไซยานินและสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*). วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์ ศักดิ์ชัย ชูโชติและปวีณา ทวีกิจการ. 2553. คุณค่าทางโภชนาการและปริมาณรงควัตถุของ *Spirulina platensis* ที่เลี้ยงในปุ๋ยผสมมูลสุกร. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการเกษตร. 4: 34-43.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุพัตรา จันทร์ศิริโพธา. 2533. คุณค่าทางโภชนาการบางอย่างของสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่เลี้ยงในน้ำกากส่าเหล้า. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Abeliovich, A. and Shilo, M. 1972. Photooxidative Death in Blue-Green Algae. American Society for Microbiology. Journal Bacteriology. 111: 682-689.

AlNadhari, S., Al-Enazi, N. M., Alshehrei, F., and Ameen, F. 2021. A review on biogenic synthesis of metal nanoparticles using marine algae and its applications. Environment Reeach. 194: 110672.

Ameen, F., Abdullah M. S. M., Al-Homaidan A. A., Al-Lohedan H. A., A. Al-Ghanayem A. A. and Almansob A. 2020. Fabrication of silver nanoparticles employing the cyanobacterium *Spirulina platensis* and its bactericidal effect against opportunistic nosocomial pathogens of the respiratory tract. Journal of Molecular Structure. 128392.

Azizi-Lalabadi, M., Alizadeh-Sani, M., Divband, B., Ehsani, A. and McClements, D. J. 2020. Nanocomposite films consisting of functional nanoparticles (TiO₂ and ZnO) embedded in 4A-Zeolite and mixed polymer matrices (gelatin and polyvinyl alcohol). Food Research International. 137: 109716.

Darmanin, T., Nativo, P., Gilliland, D., Ceccone, G., Pascual, C., De Berardis, B., Guittard, F. and Rossi, F. 2012. Microwave-assisted synthesis of silvernanoprisms / nano plates using a modified polyol process. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspecst. 395: 145–151.

Dey, A., Pandey, G., and Rawtani, D. 2022. Functionalized nanomaterials driven antimicrobial food packaging: A technological advancement in food science. Food Control. 131: 108469.

Eroglu, E., Chen, X., Bradshaw, M., Agarwal, V., Zou, J., Stewart, S.G., Duan, X., Lamb, R. N., Smith, S.M., Raston, C. L. and Iyer, K. S. 2013. Biogenic production of palladium nano-crystals using microalgae and their immobilization on chitosan nanofibers for catalytic applications. RSC Advance. 3: 1009–1012.

European Food Safety Authority EFSA. 2011. Scientific Opinion on the safetyevaluation of the substance, silver zeolite A (silver zinc sodium ammonium alumino silicate), silver content 2–5%, for use in food contact materials. EFSA Journal. 9: 1999

เอกสารนี้ Fard, J. K., Jafari, S. and Eghbal, M. A. 2015. A review of molecular mechanisms that involve in toxicity of nanoparticles. Advance Pharmaceutical Bulletin. 5: 447.

- Gan, P. P. and Li, S. F. Y. 2012. Potential of plant as a biological factory to synthesize gold and silver nanoparticles and their applications. *Reviews in Environmental Science and Biology Technology* 11: 169-206.
- Ghosh, S., Roy, S., Naskar, J. and Kole, R. K. 2020. Process optimization for biosynthesis of mono and bimetallic alloy nanoparticle catalysts for degradation of dyes in individual and ternary mixture. *Scientific Reports*. 10: 1–14.
- Goudarzi, V., Shahabi-Ghahfarrokhi, I. and Babaei-Ghazvini, A. 2017. Preparation of ecofriendly UV-protective food packaging material by starch/TiO₂ bio-nanocomposite: Characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*. 95: 306–313.
- Hoseinnejad, M., Jafari, S. M. and Katouzian, I. 2018. Inorganic and metal nanoparticles and their antimicrobial activity in food packaging applications. *Critical. Reviews in Microbiology*, 44: 2. 161–181.
- Kanmani, P. and Rhim, J. W. 2014. Physical, mechanical and antimicrobial properties of gelatin based active nanocomposite films containing AgNPs and nanoclay. *Food Hydrocolloids*. 35: 644–652.
- Keeffe, O. E., Hughes, H., Mcloughlin, P. and Sp, T. 2019. Antibacterial activity of seaweed extracts against plant pathogenic bacteria. *Annals of Microbiology*. 6: 1105.
- Kharissova, O. V., Dias, H. V. R., Kharisov, B. I., Perez, B. O. and Perez, V. M. J. 2013. The greener synthesis of nanoparticles. *Trends Biotechnol*. 31: 240–248.
- Kumar, R., Ghoshal, G., and Goyal, M. 2020. Development and characterization of cornstarch-based nanocomposite film with AgNPs and plant extract. *Materials Science for Energy Technologies*. 3: 672–678.
- Kuorwel, K. K., Cran, M. J., Orbell, J. D., Buddhadasa, S. and Bigger, S. W. 2015. Review of mechanical properties, migration, and potential applications in active food packaging systems containing nanoclays and nanosilver. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 14: 411–430.
- Liu, Z., Gao, T., Yang, Y., Meng, F., Zhan, F., Jiang, Q. and Sun, X. 2019. Anti-cancer activity of porphyran and carrageenan from red seaweeds. *Molecules* 24:

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 4286. วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Łopusiewicz, Ł., Macieja, S., S'liwin'ski, M., Bartkowiak, A., Roy, S. and Sobolewski, P. 2022. Alginate biofunctional films modified with melanin from watermelon seeds and zinc oxide/silver nanoparticles. *Materials*. 15: 2381.
- Martinez-Sanz, M., Martínez-Abad, A. and Lo'pez-Rubio, A. 2019. Cost-efficient bio-based food packaging films from unpurified agar-based extracts. *Food Packaging and Shelf Life*. 21: 100367.
- Mittal, A. K., Chisti, Y. and Banerjee, U. C. 2013. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advance*. 31: 346–356.
- Mohamed S. A., Gharieb S. E., Sherif S. S., Naglaa M. B. and Ahmed, I. E. 2019. *Spirulina platensis* Polysaccharides Promoted Green Silver Nanoparticles Production Using Gamma Radiation to Suppress the Expansion of Pear Fire Blight- Producing *Erwinia amylovora*. *Journal of Cluster Science*. 30: 919–935.
- Mohammadi N, A., Moradpour, M., Saeidi, M. and Alias, A. 2013. Thermoplastic starches: properties, challenges, and prospects. *Starch Staerke* 65: 61–72.
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G. and Crini, G. 2019. Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry. *Environmental Chemistry Letters*. 17: 1667–1692.
- Patra, J. K. and Baek, K. 2014. Green nanobiotechnology: factors affecting synthesis and characterization techniques. *Journal of Nanomaterials*. 12: 417305.
- Ponnuchamy, K. and Jacob, J. A. 2016. Metal nanoparticles from marine seaweeds-a review. *Journal Nanotechnology Reviews*. 5: 589–600.
- Qiu, C., Wang, J. P., Qin, Y., Fan, H. R., Xu, X. M. and Jin, Z. Y. 2018. Green synthesis of cyclodextrin-based metal organic frameworks through the seed-mediated method for the encapsulation of hydrophobic molecules. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 66: 4244–4250.
- Richmond, A. and Grobbelaar, J. U. 1986. Factors affecting the output rate of *Spirulina platensis* with reference to mass cultivation. *Biomass*. 10: 253-264.
- Ruangchuay, R., Dahamat S., Chirapat A. and Notoya, M. 2012. Effects of culture conditions on the growth and reproduction of Gut Weed, *Ulva intestinalis* *Linnaeus* (Ulvales, Chlorophyta). *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 34: 501-507

เอกสารนี้เป็นเอกสารTechnology. 34: 501-507เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ruggero, F., Carretti, E., Gori, R., Lotti, T. and Lubello, C. 2020. Monitoring of degradation of starch-based biopolymer film under different composting conditions, using TGA, FTIR, and SEM analysis. *Chemosphere*. 246: 125770.
- Simbine, E. O., Rodrigues, L. D. C., Lapa-Guimaraes, J., Kamimura, E. S., Corassin, C. H. and Oliveira, C. A. F. De. 2019. Application of silver nanoparticles in food packages: a review. *Food Science and Technology*. 39: 4.
- Sintubin, L., De Windt, W., Dick, J., Mast, J., van der Ha, D., Verstraete, W. and Boon, N. 2009. Lactic acid bacteria as reducing and capping agent for the fast and efficient production of silver nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology* 84: 741-749.
- Siracusa, V. 2019. Microbial degradation of synthetic biopolymers waste. *Polymers*. 11: 1066
- Stormer, A., Bott, J., Kemmer, D. and Franz, R. 2017. Critical review of the migration potential of nanoparticles in food contact plastics. *Trends in Food Science and Technology*. 63: 39–50.
- Swarup R. and Jong-Whan R. 2022. Starch/agar-based functional films integrated with enoki mushroom-mediated silver nanoparticles for active packaging applications. *Food Bioscience*. 49: 101867
- Tabatabaei, R. H., Jafari, S. M., Mirzaei, H., Nafchi, A. M. and Dehnad, D. 2018. Preparation and characterization of nano-SiO₂ reinforced gelatin-k-carrageenan biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 111: 1091–1099.
- Tamiya, H. 1957. Mass culture of algae. *Plant Physiol*. 8: 309-334.
- Torzillo, G., Sacchi, A., Materassi, R. and Richmond, A. 1991. Effect of temperature on yield and night biomass loss in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular photobioreactors. Belgium. *Journal of Applied Phycology*. 3: 103-109.
- Versino, F., Lopez, O. V., Garcia, M. A. and Zaritzky, N.E. 2016. Starch-based films and food coatings: an overview. *Starch Staerke* 68: 1026–1037.
- Xing, Y., Li, W., Wang, Q., Li, X., Xu, Q., Guo, X., Bi, X., Liu, X., Shui, Y., Lin, H. and Yang, H. 2019. Antimicrobial nanoparticles incorporated in edible coatings and films for the preservation of fruits and vegetables. *Molecules* 24: 1695.

เอกสารนี้ Yugay, Y. A., Usoltseva, R. V., Silant'ev, V. E., Egorova, A. E., Karabtsov, A. A., Kumeyko, V. คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- V., Ermakova, S.P., Bulgakov, V.P. and Shkryl, Y. N. 2020. Synthesis of bioactive silver nanoparticles using alginate, fucoidan and laminaran from brown algae as a reducing and stabilizing agent. *Carbohydrate Polymer* 245: 116547.
- Zielinska, A., Skwar E, Zaleska A., Gazda A. and Hupka, A. 2009. Preparation of silver nanoparticles with controlled particle size. *Procedia Chemistry* 1: 560–1566.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 28 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาวณัฐนิชา จิตต์พิทักษ์ รหัสประจำตัว 62050594

นางสาวมณีนุช แผงจะโปะ รหัสประจำตัว 62050639

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา จุฬชีวะวิทยาอุตสาหกรรม ภาควิชา ชีววิทยา

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย फिल्मคอมโพสิตที่เสริมด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ

ชื่อภาษาอังกฤษ The Composite Films Reinforced with Green Synthesis of Silver Nanoparticles

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 4.77%

ลงชื่อ.....ณัฐนิชา จิตต์พิทักษ์.....

(นางสาวณัฐนิชา จิตต์พิทักษ์)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....มณีนุช แผงจะโปะ.....

(นางสาวมณีนุช แผงจะโปะ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ. ดร. วรกฤต วรนนท์กิจอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบ

โครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....[ลายเซ็น].....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
(ผศ.ดร. วรกฤต วรนนท์กิจ)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจารย์ที่ปรึกษา