

กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์
สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร
Bioactive Paper Coated with Green Synthesized Silver/iron Oxide
for Food Packaging

รวิชญ์ จิตธรรม และ พรนภา เกษมศิริ*

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Rawit Jittham and Pornnapa Kasemsiri*

Division of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
123 Village No.16, Mittraphap Rd., Naimuang, Muand District, Khon Kaen, Thailand, 40000

*Corresponding author Email: pornkas@kku.ac.th

(Received: April 17, 2024; Revised: May 28, 2024 ; Accepted: May 30, 2024)

บทคัดย่อ

การใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อรักษาคุณภาพและยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหาร ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนากระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ กล่าวคือ อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ (Ag/Fe_3O_4) แป้งของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรม และกรดแทนนิกถูกนำมาใช้เป็นสารรีดิวซ์ทางธรรมชาติในการสังเคราะห์ Ag/Fe_3O_4 โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่ร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นกรดแทนนิกในการเคลือบกระดาษ ส่งผลให้การต้านทานแรงดึง สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ และความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียชนิด สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus: S.aureus*) และเอชเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli: E.coli*) เพิ่มขึ้น การเคลือบกระดาษด้วย Ag/Fe_3O_4 ที่กรดแทนนิกที่ร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร สามารถช่วยเก็บรักษาวิตามินซีในผลมะเขือเทศ และชะลอการสุกของผลมะเขือเทศได้ ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ในงานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับรักษาคุณภาพและยืดอายุอาหาร

คำสำคัญ: กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ชีวภาพ แป้งที่เป็นของเสีย อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ กรดแทนนิก

ABSTRACT

Utilization of antibacterial packaging is an approach to maintain and extend shelf-life of foods. This research aims to develop the bioactive composite paper coating with bioactive compound viz, silver-iron oxide particles (Ag/Fe_3O_4). Starch waste from cassava starch industry and tannic acid are used as bio reducing agents for synthesis of Ag/Fe_3O_4 . The effect of tannic acid concentration at 0-3 %w/v is studied. Based on the study, the increase of tannic acid concentration for coating of paper enhances

tensile strength, water resistance and antibacterial activities i.e. *Staphylococcus aureus*: *S.aureus* and *Escherichia coli*: *E.coli*. The coated paper with Ag/Fe₃O₄ at 3% w/v of tannic acid could maintain vitamin C and delay the ripening of tomatoes. Therefore, the obtained packaging had potential to apply as bioactive packaging to maintain food quality and prolong the shelf-life.

Keyword: Bioactive paper coated, Starch waste, Silver/iron oxide, Tannic acid.

1. บทนำ

กระดาษเป็นหนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่นำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้านและในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ได้อย่างหมุนเวียน และต้นทุนต่ำ [1] หนึ่งในงานอุตสาหกรรมที่นำกระดาษมาประยุกต์ใช้งานคือ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหาร ซึ่งเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการพัฒนาวัสดุต่าง ๆ เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพและยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหาร [1] อย่างไรก็ตามนอกจากคุณสมบัติที่ดีของกระดาษที่กล่าวถึงข้างต้น กระดาษยังมีข้อจำกัดบางประการด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานความชื้นต่ำ [2] ทำให้บรรจุภัณฑ์กระดาษมีความสามารถการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารลดลง ดังนั้นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์กระดาษ การศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงเป็นแนวทางการพัฒนาที่ได้รับความสนใจและนิยมมากขึ้น แป้งของเสียว (Cassava starch waste) หรือ ซีเอสดับเบิลยู (CSW) คือ แป้งที่ได้จากกระบวนการล้างและสกัดแป้งมันสำปะหลัง เป็นแป้งผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรมเกษตรที่ยังมีองค์ประกอบของแป้งสูงถึงร้อยละ 73 [3] การนำแป้งของเสียวมาประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุตั้งต้นในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าและเพิ่มทางเลือกการใช้งานให้กับผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางเกษตร สมบัติที่สำคัญของบรรจุภัณฑ์กระดาษคือ สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [4] การนำอนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver Nanoparticles) มาประยุกต์ใช้กับงานบรรจุภัณฑ์อาหารเป็นที่นิยมและแพร่หลาย เนื่องจาก

อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้อย่างโดดเด่น [5] อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีทางธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ศรีชาวและคณะ (2023) [5] ศึกษาการเคลือบอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลงบนกระดาษสำหรับการใช้งานด้านเชื้อแบคทีเรียและไวรัส โดยศึกษาการเตรียมบรรจุภัณฑ์โดยวิธีการเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรด (Silver nitrate) แตกต่างกันได้แก่ 50, 100, 150 และ 200 มิลลิโมลาร์ ด้วยวิธีทางธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุดเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ทางธรรมชาติ ในการทดสอบสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่าตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรด 150 มิลลิโมลาร์ มีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียสูงสุดทั้งเชื้อเอชเชอริเชีย โคลิ และสแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส นอกจากนี้อนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์ (Fe₃O₄) เป็นอนุภาคนาโนที่ได้รับการศึกษาว่าไม่มีความเป็นพิษและสามารถประยุกต์ใช้ในอาหารและยาได้ จึงเป็นที่น่าสนใจในปัจจุบันเพื่อนำไปเป็นตัวรองรับให้กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน เพื่อลดการเกาะกลุ่มของอนุภาค [1] Srichiangsa และคณะ (2022) [1] ศึกษาการเตรียมบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ตกแต่งบนอนุภาคแม่เหล็ก (Ag@Fe₃O₄) ด้วยวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้สารสกัดจากกากกาแฟ ในการทดสอบสมบัติพบว่าสมบัติโดยรวมของกระดาษเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ Ag@Fe₃O₄ เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.15 โดยมวลต่อปริมาตร รวมถึงสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งเอชเชอริเชีย โคลิ และสแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส การ

สังเคราะห์อนุภาคนาโนที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้สารประกอบ สเตียรอยด์ (Steroid) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) สโปนินส์ (Saponins) และอัลคาลอยด์ (Alkaloid) ที่ได้จากพืชเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยลดความเป็นพิษและลดการใช้สารเคมีเป็นสารรีดิวซ์ [6] กรดแทนนิกเป็นสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic) ที่ได้จากพืช นิยมนำมาใช้เป็นสารรีดิวซ์สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโน สารให้เสถียรภาพแก่อนุภาคโลหะนาโน และยังมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ [7]

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนากระบวนการออกฤทธิ์ทางชีวภาพเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ประกอบด้วย อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ แป้งของเสียวที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรม และกรดแทนนิกเป็นสารรีดิวซ์ทางธรรมชาติ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นที่แตกต่างกันของกรดแทนนิกที่ร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษเคลือบ ได้แก่ ความสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ความสามารถต้านทานน้ำ คุณสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังใช้กระดาษเคลือบเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลไม้เพื่อศึกษาคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็งในบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบระหว่างการเก็บรักษา

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

แป้งมันสำปะหลังที่เป็นของเสียวจากบริษัท แก่นเจริญ จำกัด ไอร์รอนซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต (Iron (II) sulfate Heptahydrate : $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จากยี่ห้อ Analytical Reagent KEMAUS ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate ; AgNO_3) จากยี่ห้อ RCI Labscan กรดแทนนิก (Tannic Acid) จากยี่ห้อ Sigma-Aldrich กลีเซอรอล จากยี่ห้อ Analytical Reagent KEMAUS โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate: Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.8%

จากบริษัท Ajax Fine Chemicals และน้ำปราศจากประจุ (Deionized Water: DI)

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมอนุภาคอนุภาคเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4)

การเตรียม Fe_3O_4 เพื่อเป็นตัวรองรับ เริ่มจาก นำ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารผสมให้เข้ากัน 10 นาทีจากนั้นปรับ pH ด้วย Na_2CO_3 (1 โมลาร์) ให้ได้ค่า pH เท่ากับ 9 ซึ่งเป็นค่า pH ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ [8] นำสารผสมที่ปรับ pH แล้วให้ความร้อนและปั่นกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจะได้ Fe_3O_4

2.2.2 การเตรียม $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$

การเตรียม $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ด้วยวิธีทางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เริ่มจากเติมสารละลาย AgNO_3 ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ลงใน Fe_3O_4 ที่ได้จากข้อ 2.2.1 ปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 30 นาที ด้วยกำลังไฟต่ำสุด เมื่อครบเวลาจะได้ $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$

2.2.3 การเตรียมสารเคลือบกระดาษและวิธีการเคลือบกระดาษ

แป้งของเสียว 2.25 กรัม ละลายในน้ำ DI 25 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นเติมแป้งที่ละลายแล้วลงในสารที่มี $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ที่ได้ทั้งหมดจากข้อ 2.2.2 ปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นให้ความร้อนให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาที นำออกจากไมโครเวฟเติมกลีเซอรอล 1 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบเวลา ได้สารเคลือบกระดาษที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เคลือบบนกระดาษขนาด 7x7 เซนติเมตร โดยใช้ปริมาณสารเคลือบ 50 มิลลิลิตร ทำการเคลือบด้วย Doctor blade ระยะห่างเท่ากับ 200 ไมโครเมตร นำกระดาษเคลือบด้วยสารเคลือบอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนกระทั่ง

กระดาษแห้ง จึงได้กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพ กระดาษที่เคลือบด้วย Ag/Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์จากกรดแทนนิกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันจะใช้ตัวย่อ ดังนี้ TA0%w/v, TA1%w/v และ TA3%w/v

2.3 การทดสอบสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกระดาษเคลือบ

2.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกันร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 200-500 นาโนเมตร

2.3.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

กระดาษเคลือบขนาด 2 x 2 เซนติเมตร วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วย SmartLab X-ray diffractometer (XRD) ที่มุม $2\theta = 20-80^\circ$

2.3.3 การทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของกระดาษเคลือบ

ทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของกระดาษเคลือบด้วยวิธี Agar disk diffusion โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ คือ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส และเอชเชอริเชีย โคลิ ทำการเตรียมด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Brain heart infusion broth ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเชื้อที่ได้ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร วางบนจานเลี้ยงเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Muller Hinton agar และตรวจนับเชื้อให้ปริมาณ 10^8 CFU/mL กระดาษเคลือบขนาด 1x1 เซนติเมตร วางลงบนจานเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ จากนั้นนำบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้ววัดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

2.3.4 การทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของกระดาษเคลือบ

กระดาษเคลือบขนาด 25x 80 x 0.3 มิลลิเมตร ทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงโดยใช้ Universal testing

machine, UTM (Instron, Model 5567) ตามมาตรฐาน ASTM 882-10 ระยะจับชิ้นงาน 50 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 25 มิลลิเมตรต่อนาที และทำการทดสอบด้วยอย่างละ 3 ซ้ำ

2.3.5 การทดสอบการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาษเคลือบ

การทดสอบการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ เพื่อวัดความไม่ชอบน้ำของกระดาษเคลือบ สามารถวิเคราะห์ได้จากค่ามุมสัมผัสน้ำ (water contact angle : WCA) โดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัสแบบออปติคัล (OCA 15EC) ด้วยหยดน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดสอบด้วยอย่างละ 3 ซ้ำ

2.3.6 การทดสอบการใช้งานบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพในการเก็บรักษามะเขือเทศ

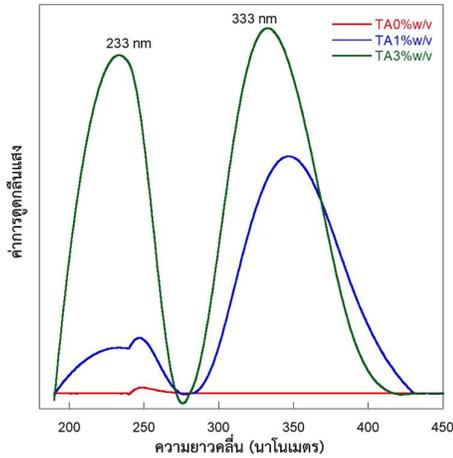
ทดสอบโดยการนำกล่องกระดาษเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ 4 ชนิด ชนิดละ 3 กล่อง ได้แก่ กล่องกระดาษเปล่าที่ไม่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และกล่องกระดาษเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร บรรจุผลมะเขือเทศที่คัดขนาดและมีน้ำหนักใกล้เคียงกัน ทำการเก็บวิเคราะห์ผลในวันที่ 3 5 และ 7 และวัดค่าการเปลี่ยนแปลงวิตามินซีของมะเขือเทศโดยใช้วิธีการไตเตรทด้วยสารละลายไอโอดีน (Iodine Titration)

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกันร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy แสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่า สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิก ร้อยละ 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ปรากฏพีคในช่วง 233-245 นาโนเมตร และ 333-345 นาโนเมตร แสดงถึงการเกิดขึ้นของ Ag/Fe_3O_4 อีกทั้งการที่พีคของ

กราฟสูงชันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร แสดงให้เห็นถึงการเกิดที่เพิ่มมากขึ้นของอนุภาค Ag/Fe_3O_4 นอกจากนี้การเลื่อนตำแหน่งของพีคยังแสดงถึงขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน [5,9-11]

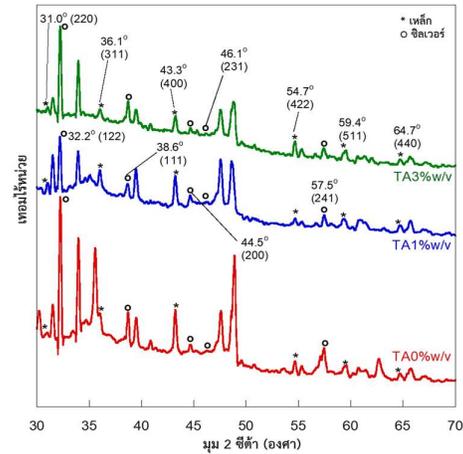


รูปที่ 1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยมีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่แตกต่างกัน

3.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2 อนุภาค Fe_3O_4 พบพีคที่ตำแหน่ง 31.0° , 36.1° , 43.3° , 54.7° , 59.4° และ 64.7° แสดงถึงระนาบ (220), (311), (400), (422), (511) และ (440) ตามลำดับ บ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (FCC) [1, 9, 12, 13] เมื่อทำการสังเคราะห์ให้เป็นอนุภาค Ag/Fe_3O_4 พบตำแหน่งพีคของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 38.6° , 44.5° และ 57.5° แสดงถึงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ FCC [12-14] นอกจากนี้ในรูปที่ 2 ไม่พบพีคของเหล็กออกไซด์ชนิดอื่น สามารถยืนยันได้ว่า อนุภาคเหล็กออกไซด์ไม่เกิดการออกซิไดซ์ระหว่างการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจากผลการศึกษา ลักษณะโครงสร้างผลึก แสดงให้เห็นว่ากรดแทนนิก

สามารถใช้เป็นสารรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาค Ag/Fe_3O_4 ได้ด้วยวิธีธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

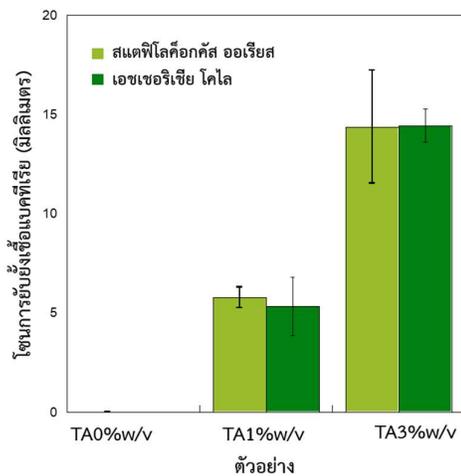


รูปที่ 2 กราฟ XRD กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของกระดาษเคลือบ

กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน ทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ สแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส และเอชเชอริเชีย โคไล โดยวิธี Agar disk diffusion พบว่ากระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีกรดแทนนิก มีสมบัตียับยั้งแบคทีเรียชนิด สแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส และเอชเชอริเชีย โคไล สามารถวัดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ในช่วง 5.32-14.44 มิลลิเมตร และ 5.78-14.36 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยกระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร แสดงรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ชนิดสแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส และเอชเชอริเชีย โคไล มากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3 การมีกรดแทนนิกเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณสารออกฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรียที่มากขึ้น โดยกรดแทนนิกสามารถผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ ขัดขวางการทำงานภายในเซลล์ และทำให้เซลล์เกิดความเสียหาย นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ

กรดแทนนิกที่ทำหน้าเป็นสารรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ ส่งผลให้มีปริมาณอนุภาคโลหะที่เพิ่มมากขึ้นและเกิดการทำงานร่วมกันระหว่างกรดแทนนิก ทำให้การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [11] นอกจากนี้ยังพบว่า มีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (สแตฟีโลค็อกคัส) ได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (เอชเชอริเชีย โคลิ) สำหรับแบคทีเรียแกรมบวก มีโครงสร้างของผนังเซลล์ ชั้นเปปทิโดไกลแคน (peptidoglycan) และมีรูพรุนที่สามารถให้ออกอนของโลหะแพร่ผ่านได้ [15, 16]

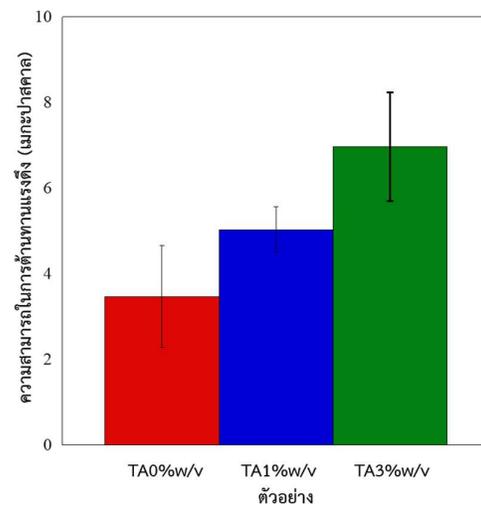


รูปที่ 3 รัศมีการยับยั้งแบคทีเรียของกระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.4 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของกระดาษเคลือบ

ในการรักษาความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษาของบรรจุภัณฑ์กระดาษ ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ คุณสมบัติการต้านทานแรงดึง [17] จากการทดสอบค่าการต้านทานแรงดึงของกระดาษเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับเคลือบบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีค่ามุมสัมผัสน้ำแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบพบว่าค่าการต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแทนนิก ค่าการต้านทานแรงดึงของ

กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับเคลือบบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีค่าเท่ากับ 3.47 ± 1.2 , 5.03 ± 0.5 และ 6.97 ± 1.3 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Srichiangsa และคณะ (2022) [1] พบว่าการเพิ่มปริมาณ อนุภาค $Ag@Fe_3O_4$ ในสัดส่วนที่เหมาะสมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดแรงกระทำของพันธะไฮโดรเจนกับกระดาษ ทำให้มีแรงยึดระหว่างผิวที่ดี ส่งผลให้กระดาษที่มีการเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น

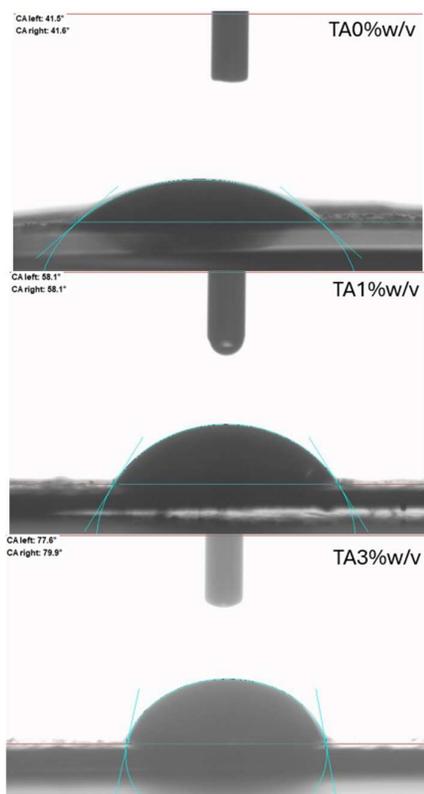


รูปที่ 4 ค่าการต้านทานแรงดึงของกระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.5 ผลการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาษเคลือบ

การทดสอบความไม่ชอบน้ำของกระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสามารถวิเคราะห์ได้จากค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle : WCA) ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลการทดสอบพบว่า กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิก ร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีค่ามุมสัมผัสน้ำเท่ากับ 43.9, 52.8 และ 76.1 ตามลำดับ จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรด

แทนนิกในสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนี้ ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกรดแทนนิกส่งผลให้มีการเกิดอนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในผล UV-vis spectroscopy ซึ่งอนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์จะทำให้กระดาษเคลือบมีพื้นผิวขรุขระ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Cassie ที่อธิบายไว้ว่า ความขรุขระบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นโครงสร้างพีระมิด ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องว่างของโครงสร้างพีระมิดนี้ เป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปในพื้นที่ผิวของกระดาษเคลือบ [1, 18]

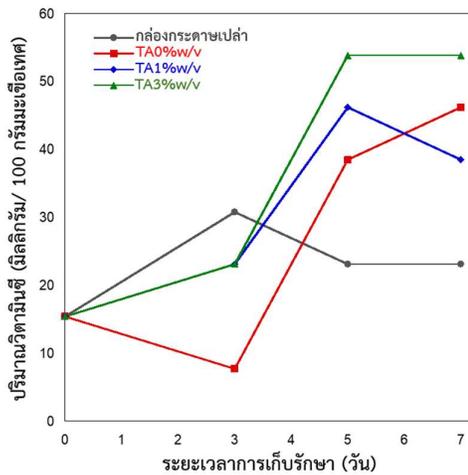


รูปที่ 5 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.6 ผลการทดสอบการใช้งานบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพในการเก็บรักษามะเขือเทศ

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงวิตามินซีของมะเขือเทศแสดงดังรูปที่ 6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงนี้ใช้เวลาในการทดสอบทั้ง 7 วัน ผลการทดสอบที่ได้พบว่า กระดาษที่ไม่มีการเคลือบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีปริมาณวิตามินซีเพิ่มขึ้นในช่วง 3 วันแรก และปริมาณวิตามินซีลดลงจนถึงวันสุดท้ายของการทดสอบ ในขณะที่กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีปริมาณวิตามินซีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณวิตามินซีมากที่สุดในวันสุดท้ายของการทดสอบ มะเขือเทศมีการสุกอย่างต่อเนื่องระหว่างการทดสอบส่งผลให้ค่าวิตามินซีเพิ่มสูงขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าวิตามินซีลดลงเกิดจากการมีอัตราหายใจของผลมะเขือเทศที่ต่ำลง [19] และการเกิดออกซิเดชันจากสภาพแวดล้อมภายนอก [20] อีกทั้งกระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิก ร้อยละ 0 และ 1 โดยมวลต่อปริมาตร ซึ่งการที่พบปริมาณวิตามินซีสูงนี้ แสดงถึงความสามารถในการชะลอการสุกของผลมะเขือเทศ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 7 แสดงลักษณะของมะเขือเทศที่เก็บในกล่องกระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่แตกต่างกัน โดยพบว่ามะเขือเทศที่อยู่ในกล่องกระดาษที่ผ่านการเคลือบจะมีการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยกว่ามะเขือเทศที่อยู่ในกล่องกระดาษเปล่าที่ไม่มีการเคลือบ ดังนั้นการใช้กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพตามที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร จึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในการรักษาคุณภาพและคุณประโยชน์ที่สำคัญของอาหาร อย่างไรก็ตามการใช้กรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ยังคงให้ผลทั้งการยับยั้งแบคทีเรียและความต้านทานแรงดึงที่ดี ซึ่งหากเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกเพิ่มขึ้นอาจส่งผลที่ดีต่อสมบัติโดยรวม อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยของ Jarensungnen และคณะ (2023) พบว่าการเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกในการ

สังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ เมื่อเพิ่มปริมาณกรดแทน- นิกถึงร้อยละ 7 โดยมวลต่อปริมาตร ทำให้เกิดการรวมกลุ่มของ อนุภาคซิลเวอร์ส่งผลให้สมบัติทางกลและทางกายภาพของนาโนคอมพอสิต ลดลง [11]



รูปที่ 6 ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศในกล่องกระดาษเคลือบที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	วันเริ่มต้น (DAY 0)	วันสิ้นสุด (DAY 7)
กล่องกระดาษเปล่า		
TA0%w/v		
TA1% w/v		
TA3% w/v		

รูปที่ 7 ลักษณะของมะเขือเทศที่เก็บในกล่องกระดาษเคลือบที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่แตกต่างกัน

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนากระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่

ประกอบด้วย อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ แป้งของเสียวที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรม และกรดแทนนิกเป็นสารรีดิวซ์ทางธรรมชาติ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากระดาษเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน สามารถเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานแรงดึง สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ และสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียชนิด สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (แกรมบวก) และเอชเชอริเชีย โคลิ (แกรมลบ) ได้ และเมื่อนำสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนี้เคลือบลงบนกล่องกระดาษและประยุกต์ใช้ในการเก็บรักษาผลมะเขือเทศ พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตรสามารถช่วยเก็บรักษาวิตามินซีในเมื่อเขือเทศ และชะลอการสุกของผลมะเขือเทศได้ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนี้จึงเหมาะสมแก่การนำมาเคลือบลงบนกระดาษหรือกล่องกระดาษ เพื่อประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับชะลอการสุกของผลไม้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณ สนับสนุนจากทุนวิจัยสำหรับคณาจารย์บัณฑิตศึกษา เพื่อให้สามารถรับนักศึกษาที่มีความสามารถและศักยภาพสูงเข้าศึกษาในหลักสูตรและทำวิจัยในสาขาที่อาจารย์มีความเชี่ยวชาญ ประจำปีการศึกษา 2565 รหัสทุน 651T111

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Srichiangsa, A. Ounkaew, P. Kasemsiri, M. Okhawilaj, H. Hiziroglu, S. Theerakulpisit and P. Chindapasirt, "Facile fabrication of green synthesized silver-decorated magnetic particles for coating of bioactive packaging," *Cellulose*, vol. 29, no. 10, pp. 5853-5868, May. 2022.

- [2] S. Tanpichai, Y. Srimarut, W. Woraprayote, and Y. Malila, "Chitosan coating for the preparation of multilayer coated paper for food-contact packaging: wettability, mechanical properties, and overall migration," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 213, pp. 534-545, Jul. 2022.
- [3] I. Prasertsung, K. Aroonraj, K. Kamwilaisak, N. Saito and S. Damrongsakkul, "Production of reducing sugar from cassava starch waste (CSW) using solution plasma process (SPP)," *Carbohydr. Polym.*, vol. 205, pp. 472-479, Feb. 2019.
- [4] A. Bahrami, R. Delshadi, E. Assadpour, S. M. Jafari and L. Williams, "Antimicrobial-loaded nanocarriers for food packaging applications," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 278, article no. 102140, Apr. 2020.
- [5] N. Srikhao, A. Ounkaew, N. Srichiangsa, S. Phanthanawiboon, T. Boonmars, A. Artchayasawat, S. Theerakulpisut, M. Okhawilai and P. Kasemsiri, "Green-synthesized silver nanoparticle coating on paper for antibacterial and antiviral applications," *Polym. Bull.*, vol. 80, no. 9, pp. 9651-9668, Oct. 2023.
- [6] M. Ehsan, A. Waheed, A. Ullah, A. Kazmi, A. Ali, N. Raja, Z. Mashwani, T. Sultana, N. Mustafa, M. Ikram and H. Li, "Plant-based bimetallic silver-zinc oxide nanoparticles: a comprehensive perspective of synthesis, biomedical applications, and future trends," *BioMed Res. Int.*, vol. 2022, article no. 1215183, Apr. 2022.
- [7] A. Ounkaew, C. Jarensungnen, N. Jaroenthai, T. Boonmars, A. Artchayasawat, R. Narain, P. Chindaprasirt and P. Kasemsiri, "Fabrication of hydrogel-nano silver based on aloe vera/carboxymethyl cellulose/tannic acid for antibacterial and pH-responsive applications," *J. Polym. Environ.*, vol. 31, no. 1, pp. 50-63, Oct. 2023.
- [8] A. Miranda, T. Akpobolokemi, E. Chung, G. Ren and B. T. Raimi-Abraham, "pH alteration in plant-mediated green synthesis and its resultant impact on antimicrobial properties of silver nanoparticles (AgNPs)," *Antibiotics*, vol. 11, no. 11, article no. 1592, Nov. 2022.
- [9] V. A. Niraimathee, V. Subha, R. S. E. Ravindran and S. Renganathan, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles from Mimosa pudica root extract," *Int. J. Environ. Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 3, pp. 227-240, Jun. 2016.
- [10] R. Sandupatla, A. Dongamanti and R. Koyyati, "Antimicrobial and antioxidant activities of phytosynthesized Ag, Fe and bimetallic Fe-Ag nanoparticles using Passiflora edulis: a comparative study," *Mater. Today: Proc.*, vol. 44, pp. 2665-2673, Feb. 2021.
- [11] C. Jarensungnen, K. Jetsrisuparb, S. Phanthanawiboon, S. Theerakulpisut, S. Hiziroglu, J. Knijnenburg, M. Okhawilai and P. Kasemsiri, "Development of eco-friendly antifungal and antibacterial adhesive derived from modified cassava starch waste/polyvinyl alcohol containing green synthesized nano-silver," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, article no. 13355, Aug. 2023.

- [12] Y. Yew, K. Shameli, M. Miyake, N. Kuwano, N. Khairudin, S. Mohamad and K. Lee "Green synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles using seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) extract," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 1, p. 276, Jun. 2016.
- [13] M. Chang, W.-S. Lin, W. Xiao and Y.-N. Chen, "Antibacterial effects of magnetically-controlled $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanoparticles," *Materials*, vol. 11, no. 5. pp. 659, Apr. 2018.
- [14] Y. Meng, "A sustainable approach to fabricating Ag nanoparticles/PVA hybrid nanofiber and its catalytic activity," *Nanomaterials*, vol. 5, no. 2, pp. 1124-1135, Jun. 2015.
- [15] C. López-de-Dicastillo, J. Gómez-Estaca, R. Catalá, R. Gavara and P. Hernández-Muñoz, "Active antioxidant packaging films: development and effect on lipid stability of brined sardines," *Food Chem.*, vol. 131, no. 4, pp. 1376-1384, Apr. 2012.
- [16] L. Wang, C. Hu and L. Shao, "The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future," *Int. J. Nanomed.*, vol. 12, pp. 1227-1249, Feb. 2017.
- [17] X. Li, Y. Qu, X. Wang, H. Bian, W. Wu and H. Dai, "Flexible graphene/silver nanoparticles/aluminum film paper for high-performance electromagnetic interference shielding," *Materials & Design*, vol. 213, article no. 110296, Jan. 2022.
- [18] D. Kansal, S. S. Hamdani, R. Ping and M. Rabnawaz, "Starch and zein biopolymers as a sustainable replacement for PFAS, silicone oil, and plastic-coated paper," *Ind. amp; Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 26, pp. 12075-12084, Jun. 2020.
- [19] I. M. Brasil, C. Gomes, A. Puerta-Gomez, M. E. Castell-Perez and R. G. Moreira, "Polysaccharide-based multilayered antimicrobial edible coating enhances quality of fresh-cut papaya," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 39-45, Jun. 2012.
- [20] Y. He, H. Li, X. Fei and L. Peng, "Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications," *Carbohydr. Polym.*, vol. 252, article no. 117156, Jan. 2021.