

Received: April 20, 2026

Revised: June 15, 2026

Accepted: June 15, 2026

Published: June 21, 2026

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบครีมกันแดดเสริมฤทธิ์ด้วยไมโครเจลไคโตซานที่ห่อหุ้ม

สารสกัด α -แมงโกสตินจากเปลือกมังคุด

Development of a Prototype Sunscreen Cream Enhanced with Chitosan Microgel Encapsulating α -Mangostin from *Garcinia mangostana* L. Pericarp

วัชร วรรณรียกุล^{1*} สิริกร ชัสวิเศษ¹ และ รุจิเรข ปราชญากุล²

Watcharee Waratchareeyakul¹ Sirikorn Chasvised¹ and Ruchirake Prachayakul²

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

² สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

¹ Program in Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

² Program in Mathematics, Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

* watcharee.w@rbru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดและแยกสารออกฤทธิ์จากเปลือกมังคุด ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และพัฒนาไมโครเจลไคโตซานเพื่อห่อหุ้มสารสกัดสำหรับประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ครีมกันแดด ผลการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบต่อเนื่องพบว่าส่วนสกัดเมทานอลให้ผลผลิตสูงสุดและสามารถแยกสาร α -แมงโกสตินได้ โดยการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่าสารมาตรฐานวิตามินซีและ BHT มีค่า IC_{50} เท่ากับ 10.251 ± 2.458 และ 16.879 ± 2.291 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ ขณะที่สารสกัดหยาบเอทานอลจากเปลือกมังคุด มีค่า IC_{50} เท่ากับ 59.181 ± 4.051 $\mu\text{g/ml}$ แสดงว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแต่ต่ำกว่าสารมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ยืนยันว่าไมโครเจลไคโตซานสามารถห่อหุ้มสารสกัดได้โดยยังคงหมู่ฟังก์ชันไว้ และทำให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นรวมทั้งช่วยคงความเสถียรของสารออกฤทธิ์ อย่างไรก็ตาม ครีมกันแดดต้นแบบที่เติมสาร α -mangostin ในความเข้มข้น 1%, 3% และ 5% ไม่สามารถวัดค่า IC_{50} ได้ เนื่องจากส่วนประกอบของครีม (lipids, emulsifiers, thickeners) อาจกีดกันการเข้าถึงของ radical DPPH หรือทำให้เกิด scattering ในสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สรุปได้ว่า การใช้ไมโครเจลไคโตซานช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของสารสกัดจากเปลือกมังคุด แต่การประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ครีมกันแดดควรได้รับการศึกษาต่อยอดในแง่การทดสอบค่า SPF/PA เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและปลอดภัยยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ครีมกันแดด, ไมโครเจล, ต้านอนุมูลอิสระ, α -แมงโกสติน, มังคุด

Abstract

This study aimed to extract, isolate and identify bioactive compounds from mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) pericarp, evaluate their antioxidant activity, and develop chitosan microgels for encapsulation with potential application in sunscreen

formulations. Successive solvent extraction revealed that the methanol extract yielded the highest amount and allowed the isolation of α -mangostin, whose structure was confirmed by spectroscopic techniques. Antioxidant activity evaluated by the DPPH assay showed IC_{50} values of $10.251 \pm 2.458 \mu\text{g/ml}$ for vitamin C and $16.879 \pm 2.291 \mu\text{g/ml}$ for BHT, whereas the crude ethanol extract of mangosteen peel exhibited an IC_{50} of $59.181 \pm 4.051 \mu\text{g/ml}$, indicating lower antioxidant activity compared to standards. FTIR analysis confirmed successful encapsulation of the extract within chitosan microgels while preserving phenolic functional groups, which enhanced antioxidant activity and stability. However, sunscreen prototypes containing α -mangostin at 1%, 3%, and 5% concentrations did not yield measurable IC_{50} values, antioxidant activity could not be reliably determined by DPPH assay in cream matrix due to formulation interference, suggesting the need for alternative methods such as ORAC or cell-based assays. In conclusion, chitosan microgels effectively improve its efficacy and stability, though further optimization is needed for practical application in sunscreen products to ensure quality and safety.

Keywords: Sunscreen, Microgel, Antioxidant, α -Mangostin, Mangosteen

บทนำ

ความต้องการวัสดุที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มสูงขึ้น ได้กระตุ้นให้เกิดความสนใจอย่างมากในการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและทางทะเลมาใช้เป็นแหล่งทางเลือกของวัสดุเชิงหน้าที่ที่มีมูลค่าเพิ่มสูง วัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากที่เกิดจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลและผลไม้ เช่น เปลือกกุ้ง แกนหมึก และเปลือกมังคุด นอกจากจะเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นโอกาสสำคัญในการนำไปพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์ในเชิงมูลค่าเพิ่ม การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ให้เป็นวัสดุเชิงหน้าที่สอดคล้องกับแนวโน้มของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเชิงประยุกต์ในปัจจุบัน ซึ่งให้ความสำคัญกับความยั่งยืน การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการพัฒนาวัสดุที่มีความปลอดภัย

ไคตินเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีปริมาณมากที่สุดในธรรมชาติ และพบได้อย่างแพร่หลายในวัสดุเหลือทิ้งจากแหล่งทางทะเล โดยเฉพาะในเปลือกกุ้งและแกนหมึก อนุพันธ์ของไคตินคือไคโตซาน ซึ่งได้จากการบวนการดัดแปลงไคติน ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ การย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ความเป็นพิษต่ำ และสมบัติเชิงฟิสิกส์-เคมีที่หลากหลาย งานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานความสำเร็จในการสกัดไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและแกนหมึก และชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระบบอาหาร อุตสาหกรรมเภสัชกรรม และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (No & Meyers, 1995; Calvo et al., 1997)

ในบรรดาวัสดุจากแหล่งทางทะเล แกนหมึกถูกระบุว่าเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีปริมาณไคตินสูง มีสิ่งเจือปนจากแร่ธาตุต่ำ และมีรงควัตถุน้อย ทำให้ลดความจำเป็นในการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นที่ซับซ้อน นอกจากนี้แกนหมึกได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะแหล่งของ β -chitin ซึ่งมีโครงสร้างแบบขนาน (Parallel arrangement) ที่ให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายพอลิเมอร์ต่ำกว่า α -chitin ส่งผลให้มีความสามารถในการบวมน้ำ การแทรกซึม และการดัดแปลงทางเคมีได้ดีกว่า (Garcinuño et al., 2022) อีกทั้งยังมี

สิ่งเจือปนจากแร่ธาตุต่ำและสามารถให้โคโตซานที่มีระดับการดีอะซีทีเลชันสูง เหมาะสำหรับการใช้งานทางชีวการแพทย์และเครื่องสำอาง (Martins et al., 2026) นอกจากการสกัดแบบดั้งเดิมแล้ว ยังมีการพัฒนาเทคนิคการสกัดแบบสีเขียว เช่น การใช้ deep eutectic solvents ที่สามารถให้ β -chitin บริสุทธิ์สูงพร้อมคุณสมบัติเชิงโครงสร้างและความร้อนที่ดี (McReynolds et al., 2022)

แกนหมึกถูกนำไปพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพหลากหลายรูปแบบ เช่น ไมโครแคปซูลและนาโนเจลสำหรับการนำส่งสารออกฤทธิ์ โดยพบว่าสามารถเพิ่มความเสถียรและประสิทธิภาพทางชีวภาพของสารสำคัญได้อย่างมีนัยสำคัญ (Li et al., 2025) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเป็นไฮโดรเจลและระบบควบคุมการปลดปล่อยยา ซึ่งแสดงศักยภาพในการใช้เป็น Carrier สำหรับยาและสารออกฤทธิ์ในระบบ Controlled release (Garcinuño et al., 2022) รวมถึงการนำไปประยุกต์เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักและวัสดุเชิงสิ่งแวดล้อม เช่น Hydrogel beads จาก β -chitosan ที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะได้ดี (Moralez et al., 2025) นอกจากนี้ แนวคิดการแปรรูปแบบ Biorefinery ยังแสดงให้เห็นว่าแกนหมึกสามารถถูกพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เช่น โคโตซานที่มีฤทธิ์ต้านจุลชีพและผลิตภัณฑ์ชีวภาพอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Lima et al., 2025)

ขณะเดียวกัน สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ด้านเครื่องสำอาง เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana*) ซึ่งเป็นของเสียหลักจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลไม้ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสารในกลุ่มแซนโทน โดยเฉพาะสารแอลฟาแมงโกสติน (α -mangostin) งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่าแอลฟาแมงโกสตินมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง มีคุณสมบัติด้านการอักเสบ และมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตทั้งในย่าน UVB และ UVA ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพในการใช้เป็นสารออกฤทธิ์จากธรรมชาติสำหรับผลิตภัณฑ์ปกป้องผิวหน้า (Ee et al., 2006; Ahmad et al., 2013; Asasutjarit et al., 2019) นอกจากนี้ ส่วนสกัดจากเปลือกมังคุดยังแสดงฤทธิ์ในการกำจัดอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH สนับสนุนบทบาทของส่วนสกัดดังกล่าวในฐานะสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Moongkarndi et al., 2004)

แม้แอลฟาแมงโกสตินจะมีคุณสมบัติทางชีวภาพที่โดดเด่น แต่การนำไปใช้โดยตรงในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางชนิดทาบนผิวยังประสบข้อจำกัดหลายประการ เช่น การละลายน้ำได้น้อย ความไม่เสถียรภายใต้สภาวะแวดล้อม และการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในระบบสูตร ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการใช้งานจริง เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว มีการนำเสนอกลยุทธ์การห่อหุ้มสารโดยใช้พอลิเมอร์ชีวภาพเป็นพาหะ เพื่อเพิ่มความเสถียรและความเข้ากันได้ของสารออกฤทธิ์ที่มีลักษณะไม่ชอบน้ำ ไมโครเจลที่มีโคโตซานเป็นฐานซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคการเชื่อมโยงข้ามแบบไอออนิกหรือแบบอิมัลชัน ได้รับการศึกษากันอย่างแพร่หลายในฐานะระบบนำส่ง เนื่องจากสามารถตรึงสารออกฤทธิ์ไว้ได้ พร้อมทั้งใช้สภาวะการเตรียมที่อ่อนโยนและหลีกเลี่ยงการใช้สารเชื่อมโยงข้ามที่เป็นพิษ (Calvo et al., 1997; Li et al., 2008)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการสกัดโคโตซานจากวัสดุเหลือทิ้งทางทะเล และการแยกสารแอลฟาแมงโกสตินจากเปลือกมังคุดแยกจากกัน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่บูรณาการทรัพยากรเหลือทิ้งทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านเครื่องสำอางยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของวัสดุเชิงประยุกต์ การพัฒนาระบบไมโครเจลโคโตซานที่ได้จากแกนหมึก สำหรับสารออกฤทธิ์จากเปลือกมังคุด ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างครอบคลุม

ตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ครีมกันแดดประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สะท้อนความสามารถในการปกป้องรังสีอัลตราไวโอเล็ตและความคงตัวของสูตรภายใต้สภาวะแสง โดยค่า

Sun Protection Factor (SPF) เป็นตัวชี้วัดหลักสำหรับการป้องกันรังสี UVB ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดผิวไหม้แดด โดยนิยามจากอัตราส่วนของปริมาณรังสีที่ทำให้เกิด Minimal erythema dose (MED) บนผิวที่ทาครีมกันแดดต่อผิวที่ไม่ทา (Reinau et al., 2015) ขณะที่ประสิทธิภาพในการป้องกันรังสี UVA ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดริ้วรอยและการทำลายโครงสร้างผิวในระยะยาว การประเมินด้วยค่า UVA protection factor (UVA-PF) หรือระบบ PA (Protection Grade of UVA) ซึ่งอาศัยการทดสอบ Persistent pigment darkening (PPD) เพื่อวัดความสามารถในการลดการเกิดเม็ดสีเข้มหลังได้รับรังสี UVA (ISO 24443, 2021; Sciencelnsights, 2026) นอกจากนี้ Photostability ยังเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ประเมินความสามารถของสารกรองรังสีในการคงโครงสร้างและประสิทธิภาพเมื่อสัมผัสรังสี UV โดยสารกรองรังสีที่ไม่เสถียรอาจเกิดการสลายตัว (Photodegradation) ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนรังสีลดลงและประสิทธิภาพการป้องกันโดยรวมลดลง (Nash & Tanner, 2014; Romanhole et al., 2026) ดังนั้น ครีมกันแดดที่มีประสิทธิภาพควรแสดงค่า SPF และ PA/UVA-PF ที่เหมาะสมควบคู่กับความคงตัวต่อแสง เพื่อให้สามารถปกป้องผิวจากรังสี UV ได้อย่างครอบคลุมและยั่งยืนทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุที่มีความยั่งยืนและมีสมบัติการใช้งาน โดยการผสมไมโครเจลโคโตซานที่ได้จากแกนหมึกเข้ากับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สกัดจากเปลือกมังคุด โคโตซานถูกเตรียมผ่านกระบวนการขจัดแร่ธาตุ ขจัดโปรตีน และดีอะซีทิลเลชัน (Deacetylation) ก่อนนำมาสังเคราะห์เป็นไมโครเจลด้วยเทคนิคการเชื่อมโยงข้ามในระบบอิมัลชันโดยใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมโยงข้าม สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะแอลฟาแมงโกสติน ถูกสกัด แยก และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคทางสเปกโตรสโกปีก่อนนำไปตรึงบนไมโครเจลโคโตซาน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของระบบที่ได้ถูกประเมินด้วยการทดสอบการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH และได้มีการประเมินศักยภาพการใช้งานในสูตรต้นแบบครีมกันแดด

งานวิจัยนี้ผสานวัสดุเหลือทิ้งจากแหล่งทางทะเลและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นไมโครเจล ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ไมโครเจลโคโตซานจากแกนหมึกเป็นพาหะสำหรับสารต้านอนุมูลอิสระจากเปลือกมังคุด และเสนอแนวทางที่ยั่งยืนในการพัฒนาวัสดุเครื่องสำอางที่เสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ งานวิจัยนี้จึงมีส่วนช่วยต่อองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์เชิงประยุกต์ โดยเน้นย้ำศักยภาพของพอลิเมอร์ชีวภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งสำหรับการประยุกต์ใช้ในอนาคตด้านเครื่องสำอางและวัสดุเชิงหน้าที่

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสกัดและตรวจสอบคุณภาพโคโตซานจากเปลือกกุ้งและแกนหมึก
2. เพื่อสกัด แยก และทดสอบองค์ประกอบทางเคมีจากสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ มีคุณสมบัติดูดกลืนแสง และสามารถนำมาผลิตเป็นครีมกันแดดได้
3. เพื่อสังเคราะห์ไมโครเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ
4. เพื่อห่อหุ้มสารแอลฟาแมงโกสตินที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงที่สกัดจากเปลือกมังคุดด้วยไมโครเจล
5. เพื่อผลิตต้นแบบผลิตภัณฑ์ครีมกันแดดที่มีอนุภาคในระดับไมโครเมตร

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและสารเคมี

เปลือกกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) และแกนหมึก (*gladius*) ได้รับจากของเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana*) ได้จากผลสดในจังหวัดจันทบุรี และตราด สารเคมีที่ใช้ทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์ (analytical grade) ตัวทำละลายและน้ำที่ใช้เป็นน้ำกลั่น

การเตรียมและสกัดไคติน-ไคโตซาน

เปลือกกุ้งและแกนหมึกถูกล้างด้วยน้ำจนสะอาด ตากให้แห้งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C จนมีน้ำหนักคงที่ การขจัดแร่ธาตุดำเนินการโดยแช่วัตถุดิบแห้งในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1% (v/v) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองและล้างด้วยน้ำจนมีค่า pH ใกล้เคียงกลาง (pH 6.5-7.0) การขจัดโปรตีนดำเนินการโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4% (w/v) ที่อุณหภูมิ 60-90 °C จากนั้นล้างด้วยน้ำจนเป็นกลาง ไคตินจากเปลือกกุ้งผ่านขั้นตอนการฟอกสีด้วยเอทานอลเพื่อกำจัดรงควัตถุ จากนั้นนำไคตินที่ได้ไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) รุ่น Alpha บริษัท Bruker เพื่อยืนยันโครงสร้างของไคตินและไคโตซาน

การสกัดและแยกสารออกฤทธิ์จากเปลือกมังคุด

เปลือกมังคุดแห้งถูกนำไปสกัดแบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวทำละลายเรียงตามขั้ว ได้แก่ เฮกเซน ไดคลอโรมีเทน และเมทานอล ด้วยวิธีการแช่ (Maceration) สารสกัดถูกกรองและระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ สารสกัดเมทานอลถูกแยกองค์ประกอบด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี โดยใช้แผ่นทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (TLC) ในการคัดเลือกระบบตัวทำละลาย ก่อนทำการแยกด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี สารที่แยกได้ถูกตรวจสอบความบริสุทธิ์และยืนยันโครงสร้างด้วย FTIR และ ¹H-NMR spectroscopy 600 MHz บริษัท Bruker

การสังเคราะห์ไมโครเจลไคโตซาน

ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและแกนหมึกถูกละลายในกรดอะซิติก 1% (v/v) ให้ได้ความเข้มข้น 1.0 mg mL⁻¹ และปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 4.0-5.0 สารละลายดังกล่าวถูกหยดลงในเฟสน้ำมันที่มี Tween 80 ภายใต้การกวนความเร็วสูงเพื่อสร้างอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน การเชื่อมโยงข้ามแบบอิมัลชัน-ไอออนิก (emulsion-ionic gelation) ดำเนินการโดยการเติมสารละลายโซเดียมไทรโพลีฟอสเฟต (TPP) ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.3-0.5 mg mL⁻¹ ส่งผลให้เกิดไมโครเจลไคโตซาน จากนั้นไมโครเจลถูกแยก ล้าง และทำให้แห้งด้วยวิธี freeze-drying ด้วยเครื่อง FTS Systems Flexi-Dry Freeze Dryer บริษัท SP Scientific ที่อุณหภูมิ -50 °C ภายใต้ความดันประมาณ 0.1 mbar เพื่อรักษาโครงสร้างพรุนและป้องกันการยุบตัวของไมโครเจลในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

การห่อหุ้มไมโครเจลด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุด

ไมโครเจลไคโตซานถูกแขวนลอยในน้ำกลั่นและผสมกับสาร α-แมงโกสติน ที่แยกได้จากสารสกัดจากเปลือกมังคุด โดยกวนเบา ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง ไมโครเจลที่เคลือบแล้วถูกแยก ล้าง และทำให้แห้ง ก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วย FTIR ทั้งนี้ควรมีการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรึงได้ (loading capacity) และประสิทธิภาพการห่อหุ้ม (encapsulation efficiency)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดและตัวอย่างต่าง ๆ ถูกประเมินด้วยวิธีการกำจัดอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (DPPH radical scavenging assay) โดยใช้กรดแอสคอร์บิกและบิวทิลไฮดรอกซีโทลูอีน (BHT) เป็นสารควบคุมเชิงบวก สารละลายต่าง ๆ ถูกเตรียมในตัวอย่างละลายเมทานอล ได้แก่ BHT ที่ความเข้มข้น $40.8 \mu\text{g mL}^{-1}$, DPPH ที่ความเข้มข้น $120 \mu\text{g mL}^{-1}$ โดยเก็บในที่มืดเพื่อป้องกันการสลายตัวจากแสง กรดแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้น $40 \mu\text{g mL}^{-1}$ และสารตัวอย่างที่ความเข้มข้น 8.0 mg mL^{-1} จากนั้นปิเปตสารตัวอย่างลงในไมโครเพลท 96 หลุมและเติมสารละลาย DPPH เป็นขั้นตอนสุดท้าย ก่อนบ่มในที่มืดและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอ่านไมโครเพลท (microplate reader) รุ่น Accureader M965 บริษัท Metertech ที่เวลา 30 นาที และคำนวณค่าร้อยละการยับยั้ง (% Inhibition) และค่า IC_{50} ตามวิธีมาตรฐาน (Wairata et al., 2022)

การเตรียมครีมกันแดดต้นแบบ

ครีมกันแดดต้นแบบถูกเตรียมในรูปแบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (Water-in-Oil; W/O) ซึ่งมีข้อดีด้านการสร้างฟิล์มเคลือบผิวและความสามารถในการต้านน้ำสูง เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์กันแดด (Nikam et al., 2023) โดยผสมเฟสน้ำ (water phase) และเฟสน้ำมัน (oil phase) ถูกเตรียมแยกกัน โดยเฟสน้ำมันประกอบด้วยสารให้ความนุ่มผิว (emollients) และสารก่ออิมัลชันชนิด lipophilic ขณะที่เฟสน้ำประกอบด้วยน้ำกลั่นและสารให้ความชุ่มชื้น เช่น กลีเซอรอล ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวอยู่ในช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับสูตรครีมกันแดดทั่วไป (Romanhole et al., 2026) จากนั้นทั้งสองเฟสถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $70-75^\circ\text{C}$ และผสมเข้าด้วยกันภายใต้การกวนความเร็วสูงจนเกิดอิมัลชันที่มีความสม่ำเสมอ (Nikam et al., 2023)

หลังจากได้อิมัลชันค้อย ๆ ลดอุณหภูมิของระบบลงเหลือประมาณ $40-45^\circ\text{C}$ และเติมไมโครเจลไคโตซานที่เคลือบสาร α -แมงโกสติน ที่แยกได้จากสารสกัด จากนั้นปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.5–6.5 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อสภาพผิวหนังและช่วยเพิ่มเสถียรของสูตรเครื่องสำอาง (Bikaris et al., 2023) ก่อนนำไปทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ทั้งนี้ โครงสร้างอิมัลชันและองค์ประกอบของสูตรมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของครีมกันแดด ทั้งในด้านการป้องกันรังสี UV ความคงตัวของผลิตภัณฑ์ และการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ (Romanhole et al., 2026)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การเตรียมและสกัดไคติน-ไคโตซาน

กระบวนการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของการสกัดไคตินและไคโตซานในขั้นตอนถัดไป ผลการศึกษาพบว่าเปลือกกุ้งสดมีปริมาณความชื้นสูง (ตารางที่ 1) ในขณะที่แกนหมึกมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า (ตารางที่ 2) ส่งผลให้แกนหมึกให้ผลผลิตแห้งสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนถึงลักษณะโครงสร้างภายในของวัตถุดิบ โดยแกนหมึกมีโครงสร้างเส้นใยที่หนาแน่นและมีปริมาณน้ำในเนื้อวัสดุต่ำกว่า ซึ่งเอื้อต่อการกักเก็บมวลวัตถุดิบหลังการอบแห้ง และช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

ตารางที่ 1 สรุปผลการเตรียมวัตถุดิบเปลือกกุ้งขาวก่อนสกัดไคติน

ครั้งที่	น้ำหนักเปลือกกุ้ง (กรัม)		ร้อยละผลผลิต	น้ำหนักน้ำ (กรัม)	ร้อยละความชื้น
	ก่อนอบ	หลังอบ			
1	500.00	128.57	25.71	371.43	74.29
2	500.02	132.43	26.49	367.59	73.52
3	500.05	125.35	25.07	374.70	74.94
4	500.00	130.28	26.06	369.72	73.94
5	500.00	127.80	25.56	372.20	74.44
เฉลี่ย	500.00 ± 0.02	128.89 ± 2.38	25.78 ± 0.48	371.13 ± 2.39	74.23 ± 0.48

ตารางที่ 2 ผลการเตรียมวัตถุดิบแกนหมึกก่อนสกัดไคติน

ครั้งที่	น้ำหนักแกนหมึก(กรัม)		ร้อยละผลผลิต	น้ำหนักน้ำ (กรัม)	ร้อยละความชื้น
	ก่อนอบ	หลังอบ			
1	500.00	165.62	33.12	334.38	66.88
2	500.03	167.85	33.57	332.18	66.44
3	500.01	172.47	34.49	327.54	65.51
4	500.00	170.10	34.02	329.90	65.98
5	500.02	166.33	33.27	333.69	66.74
เฉลี่ย	500.01 ± 0.01	168.47 ± 2.52	33.69 ± 0.50	331.54 ± 2.52	66.31 ± 0.50

ผลการจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดอะซิติกพบว่าเปลือกกุ้งมีปริมาณองค์ประกอบแร่ธาตุที่ถูกกำจัดออกในสัดส่วนที่สูงกว่าแกนหมึก แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างเชิงองค์ประกอบของวัตถุดิบจากแหล่งทางทะเลทั้งสองชนิด ขณะที่แกนหมึกมีปริมาณแร่ธาตุต่ำกว่าโดยธรรมชาติ ส่งผลให้มีอัตราการคงเหลือของมวลวัตถุดิบหลังการจัดแร่ธาตุสูงกว่า (ตารางที่ 3 และ 4)

ในขั้นตอนการจัดโปรตีนโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดสามารถกำจัดโปรตีนออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเปลือกกุ้งมีปริมาณโปรตีนที่ถูกกำจัดออกมากกว่าแกนหมึก ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางชีวภาพของเปลือกกุ้งที่มีองค์ประกอบโปรตีนร่วมอยู่ในโครงสร้างมากกว่า อย่างไรก็ตาม แกนหมึกยังคงให้ผลผลิตสุดท้ายสูงกว่า สะท้อนถึงข้อได้เปรียบด้านองค์ประกอบและความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ (ตารางที่ 5 และ 6)

ตารางที่ 3 ผลการจัดแร่ธาตุออกจากเปลือกกุ้งขาว

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)		ร้อยละผลผลิต	น้ำหนักแร่ธาตุที่ถูกจัด (กรัม)	ร้อยละแร่ธาตุที่ถูกจัด (กรัม)
	ก่อนการจัด	หลังการจัด			
1	150.00	127.50	85.00	22.50	15.00
2	150.01	128.40	85.60	21.61	14.41
3	150.00	126.90	84.60	23.10	15.40
4	150.00	127.20	84.80	22.80	15.20
5	150.03	128.10	85.40	21.93	14.62
เฉลี่ย	150.01 ± 0.01	127.62 ± 0.56	85.08 ± 0.37	22.39 ± 0.55	14.93 ± 0.37

ตารางที่ 4 ผลการจัดแร่ธาตุออกจากแกนหมึก

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)		ร้อยละผลผลิต	น้ำหนักแร่ธาตุ ที่ถูกขจัด (กรัม)	ร้อยละแร่ธาตุ ที่ถูกขจัด (กรัม)
	ก่อนการจัด	หลังการจัด			
1	150.00	139.50	93.00	10.50	7.00
2	149.99	140.10	93.40	9.89	6.59
3	149.98	139.20	92.80	10.78	7.19
4	150.00	140.10	93.40	9.90	6.60
5	150.01	139.80	93.20	10.21	6.81
เฉลี่ย	150.00 ± 0.01	139.74 ± 0.35	93.16 ± 0.23	10.26 ± 0.35	6.84 ± 0.23

ตารางที่ 5 ผลการจัดโปรตีนออกจากเปลือกกุ้งขาว

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)		ร้อยละผลผลิต	น้ำหนักโปรตีน ที่ถูกขจัด	ร้อยละโปรตีน ที่ถูกขจัด
	ก่อนจัดโปรตีน	หลังจัดโปรตีน			
1	150.00	121.20	80.80	28.80	19.20
2	149.99	122.55	81.70	27.44	18.29
3	150.03	120.45	80.30	29.58	19.72
4	150.01	123.30	82.20	26.71	17.81
5	149.98	121.80	81.20	28.18	18.79
เฉลี่ย	150.00 ± 0.02	121.86 ± 1.00	81.24 ± 0.67	28.14 ± 1.00	18.76 ± 0.67

ตารางที่ 6 ผลการจัดโปรตีนออกจากแกนหมึก

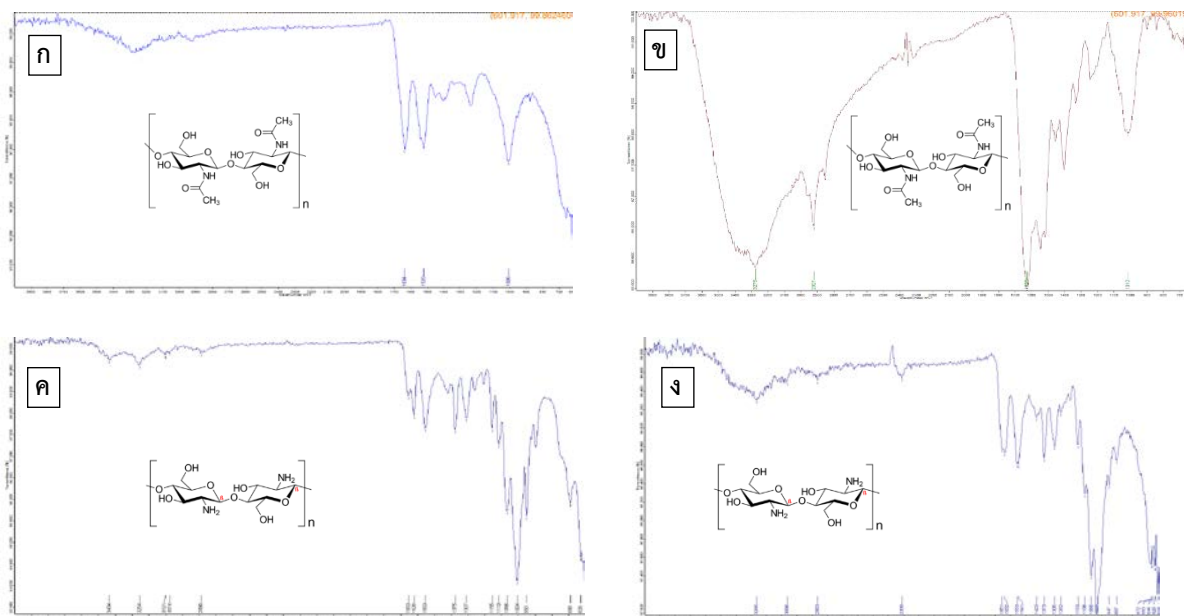
ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)		ร้อยละผลผลิต	น้ำหนักโปรตีน ที่ถูกขจัด	ร้อยละโปรตีน ที่ถูกขจัด
	ก่อนจัดโปรตีน	หลังจัดโปรตีน			
1	150.01	126.75	84.50	23.26	15.51
2	150.00	127.50	85.00	22.50	15.00
3	150.05	125.85	83.90	24.20	16.13
4	150.03	126.30	84.20	23.73	15.82
5	149.98	127.80	85.20	22.18	14.79
เฉลี่ย	150.01 ± 0.02	126.84 ± 0.73	84.56 ± 0.48	23.17 ± 0.75	15.44 ± 0.50

การฟอกสีถูกนำมาใช้เฉพาะกับไคตินที่ได้จากเปลือกกุ้ง เนื่องจากมีรงควัตถุธรรมชาติ เช่น แอสตาแซนธิน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสีและความเหมาะสมในการนำไปใช้ด้านเครื่องสำอาง การฟอกสีด้วยเอทานอลสามารถลดความเข้มของสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่พบการสูญเสียมวลวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 ผลการฟอกสีเปลือกกุ้งขาว

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)		ร้อยละผลผลิต	น้ำหนักสีที่ถูกขจัด	ร้อยละสีที่ถูกขจัด
	ก่อนฟอกสี	หลังฟอกสี			
1	150.04	148.35	98.87	1.69	1.13
2	150.02	148.2	98.79	1.82	1.21
3	150.03	147.9	98.58	2.13	1.42
4	150.00	148.05	98.70	1.95	1.30
5	149.98	148.5	99.01	1.48	0.99
เฉลี่ย	150.01 ± 0.02	148.20 ± 0.21	98.79 ± 0.15	1.81 ± 0.22	1.21 ± 0.15

การยืนยันโครงสร้างของไคตินและไคโตซานด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) แสดงสัญญาณดูดกลืนที่เป็นลักษณะเฉพาะของไคตินและไคโตซานอย่างชัดเจน (รูปที่ 1) โดยพบสัญญาณของหมู่เอไมด์ในไคติน และการลดลงของสัญญาณดังกล่าวหลังการดื้ออะซีทิเลชัน ซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นไคโตซานได้สำเร็จ ลักษณะสเปกตรัมของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและแกนหมึกมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบตั้งต้นไม่มีผลต่อโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ที่ได้

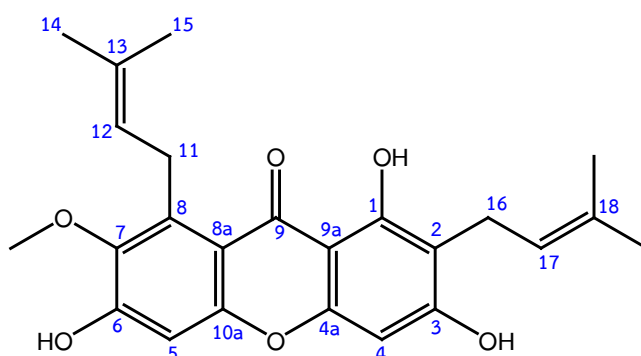


รูปที่ 1 FTIR สเปกตรัมของ (ก) ไคตินจากเปลือกกุ้ง (ข) ไคตินจากแกนหมึก
(ค) ไคโตซานที่ได้จากไคตินของเปลือกกุ้ง และ (ง) ไคโตซานที่ได้จากไคตินของแกนหมึก

การสกัดและการยืนยันสารออกฤทธิ์จากเปลือกมังคุด

การสกัดสารจากเปลือกมังคุดแบบใช้ตัวทำละลายต่อเนื่องพบว่าส่วนสกัดเมทานอลให้ผลผลิตสูงสุด สะท้อนถึงการมีอยู่ของสารออกฤทธิ์ที่มีขั้ว สารออกฤทธิ์หลักที่แยกได้ถูกยืนยันว่าเป็นแอลฟาแมงโกสทิน (รูปที่ 2) ด้วยการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี ได้แก่ $^1\text{H-NMR}$ (ตารางที่ 8), FTIR (รูปที่ 3) และ UV-Vis (รูปที่ 4)

ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงในเอกสารวิชาการ แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของโครงสร้างและความบริสุทธิ์ของสารที่แยกได้



รูปที่ 2 โครงสร้างของ MH1 หรือ แอลฟาแมงโกสติน

ตารางที่ 8 ผลการเปรียบเทียบค่าการเลื่อนทางเคมี (δ_H) ของ MH1 กับแอลฟา-แมงโกสติน

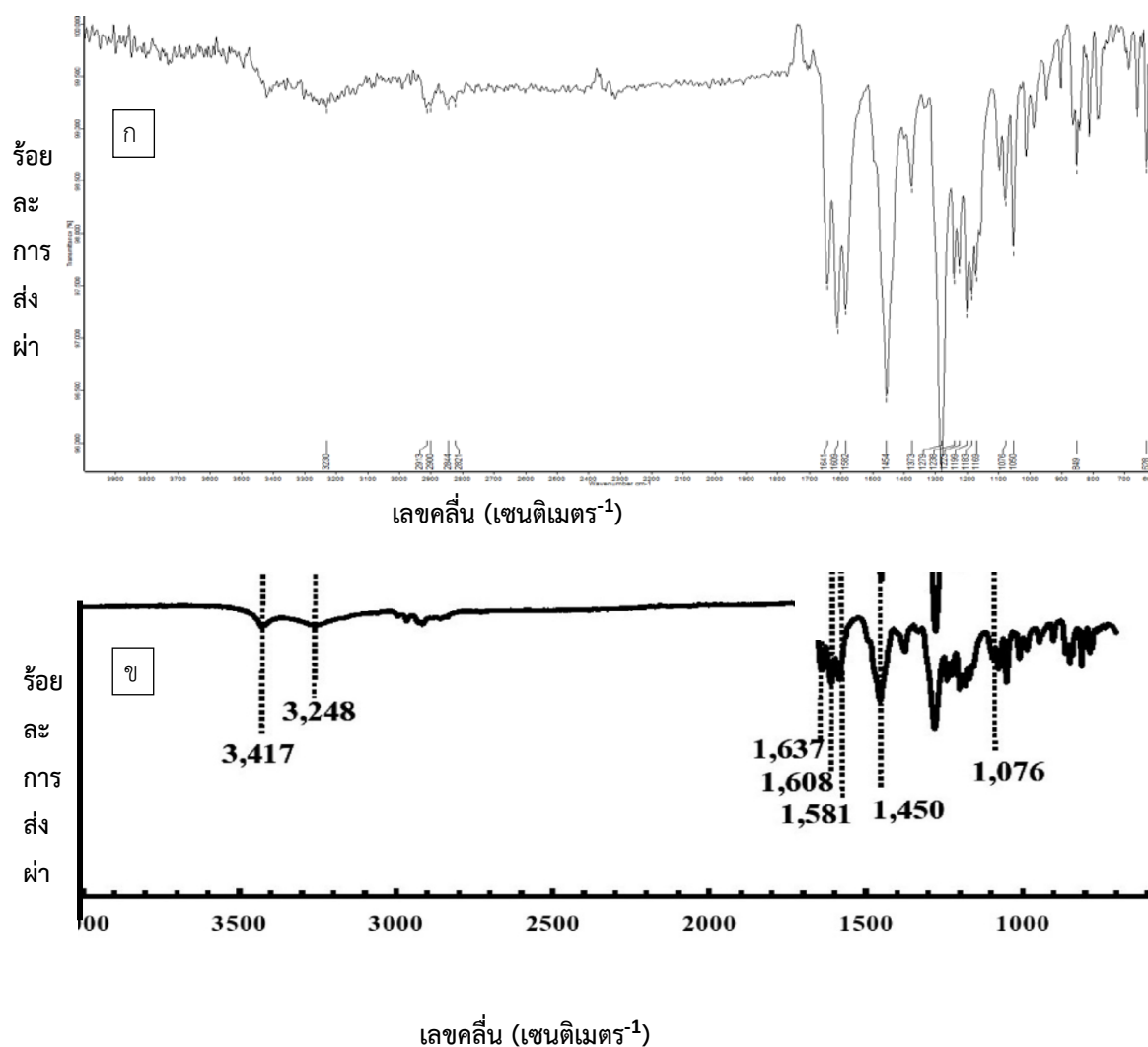
ตำแหน่ง	δ_H MH1 ใน $CDCl_3$	δ_H แอลฟา-แมงโกสติน		
		ใน $CDCl_3$ (Asasutjarit et al., 2019)	ใน CD_3OD (Ee et al., 2006)	ใน $DMSO-d_6$ (Ahmad et al., 2013)
4	6.28 (1H, s)	6.22 (1H, s)	6.25 (1H, s)	6.33 (1H, s)
5	6.80 (1H, s)	6.75 (1H, s)	6.25 (1H, s)	6.78 (1H, s)
11	4.07 (2H, d, $J = 6.5$ Hz)	3.38 (2H, d, $J = 7.3$ Hz)	4.10 (2H, d, $J = 7.3$ Hz)	2.50 (2H, d)
12	5.25 (1H, tt, $J = 6.5$ 1.5 Hz)	5.22 (1H, m)	5.26 (1H, t, $J = 7.3$ Hz)	5.13 (2H, d)
14	1.83 (3H, d, $J = 1.5$ Hz)	1.70 (3H, br s)	1.71 (3H, s)	1.59 (3H, s)
15	1.83 (3H, d, $J = 1.5$ Hz)	1.76 (3H, s)	1.82 (3H, s)	1.59 (3H, s)
16	3.42 (2H, d, $J = 7.0$ Hz)	4.01 (2H, d, $J = 7.2$ Hz)	3.37 (2H, d, $J = 7.3$ Hz)	2.50 (2H, d)
17	5.28 (1H, tt, $J = 7.0$ 1.5 Hz)	5.22 (1H, m)	5.26 (1H, t, $J = 7.3$ Hz)	N/A
19	1.75 (3H, d, $J = 1.5$ Hz)	1.77 (3H, s)	1.68 (3H, s)	1.70 (3H, s)
20	1.69 (3H, d, $J = 1.5$ Hz)	1.62 (3H, br s)	1.83 (3H, s)	1.70 (3H, s)
7-OMe	3.80 (3H, s)	3.73 (3H, s)	3.78 (3H, s)	3.18 (3H, s)
1-OH	13.74 (1H, s)	13.70 (1H, s)	13.72 (1H, s)	13.69 (3H, s)

*N/A = ไม่มีข้อมูล (Not available)

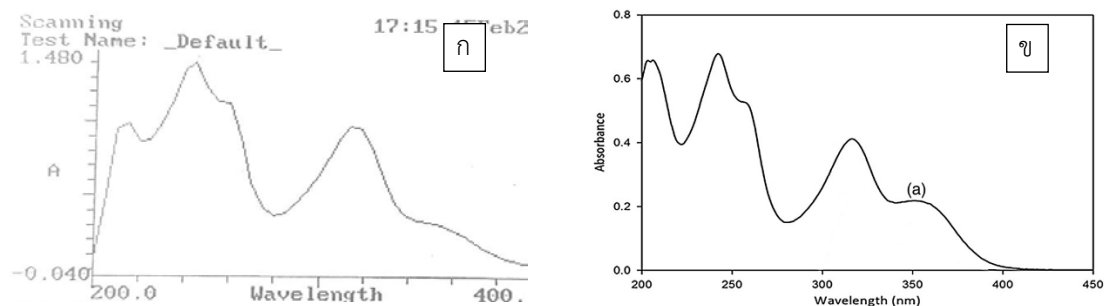
การสังเคราะห์และลักษณะของไมโครเจลโคโตซาน

ไมโครเจลโคโตซานสามารถสังเคราะห์ได้สำเร็จโดยเทคนิคการเชื่อมโยงข้ามแบบไอออนิกในระบบอิมัลชัน โดยใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมโยงข้าม ผลการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าไมโครเจลมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ การวิเคราะห์ด้วย FTIR ยืนยันการเกิดพันธะ

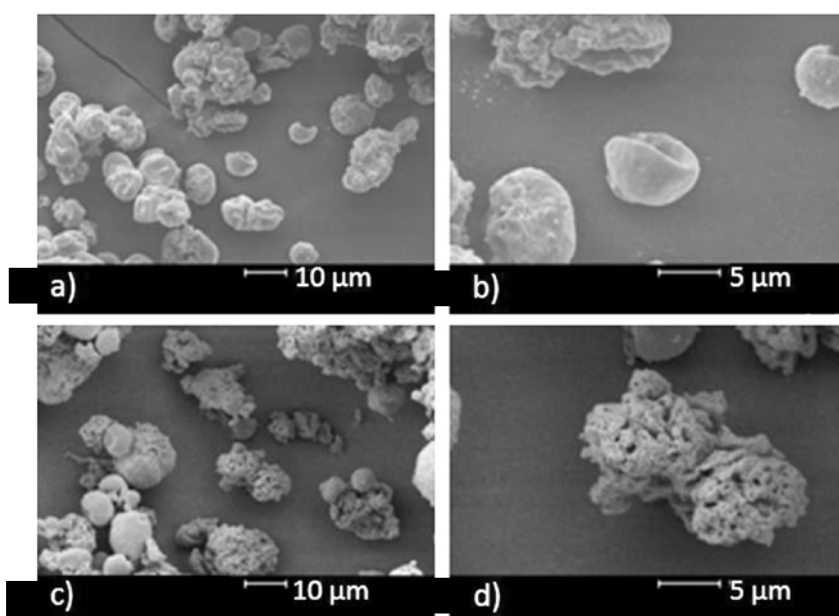
เชิงไอออนิกระหว่างหมู่เอมีโนของโคโตซานและหมู่ฟอสเฟตของสารเชื่อมโยงข้าม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Calvo et al. (1997) และ Martins et al. (2012) ที่พบว่าไมโครเจลโคโตซานที่เชื่อมโยงด้วย TPP มีลักษณะทรงกลมและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) แอลฟาแมงโกสติน (ทดลอง) (ข) แอลฟาแมงโกสติน (อ้างอิง)
 ที่มา: Asasutjarit et al. (2019)



รูปที่ 4 อัลตราไวโอเลตสเปกตรัมของ (ก) แอลฟาแมงโกสติน (ทดลอง) (ข) แอลฟาแมงโกสติน (อ้างอิง)
ที่มา: Ahmad et al. (2013)



รูปที่ 5 โครงสร้างผิวไมโครเจลไคโตซานที่เชื่อมโยงด้วยโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต
ที่มา: Martins et al. (2012)

การเคลือบไมโครเจลด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุด

การเคลือบไมโครเจลด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถดำเนินการได้โดยไม่ทำให้โครงสร้างของไมโครเจลเสียหาย FTIR แสดงสัญญาณเพิ่มเติมที่สอดคล้องกับหมู่ฟีนอลิกและหมู่คาร์บอนิล ซึ่งเกี่ยวข้องกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ แสดงให้เห็นว่าสารออกฤทธิ์ถูกตรึงอยู่กับไมโครเจลได้สำเร็จ ระบบไมโครเจลช่วยเพิ่มความเสถียรและความเข้ากันได้ของสารออกฤทธิ์

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการกำจัดอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (DPPH radical scavenging assay) พบว่า สารมาตรฐาน ได้แก่ กรดแอสคอร์บิกและบิวทิลไฮดรอกซีโทลูอีน (BHT) แสดงค่าความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระได้สูง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของสารมาตรฐานที่มีศักยภาพในการให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Gulcin & Alwasel, 2023) ขณะที่สารสกัดหยาบเอทานอลจากเปลือกมังคุดแสดงฤทธิ์ในระดับปานกลาง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่าสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีองค์ประกอบของสารฟีนอลิกและแซนโทน เช่น α -mangostin ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในลักษณะขึ้นกับความเข้มข้น (Dose-dependent) (Widayanti et al., 2024; Ngawhirunpat et al., 2010)

สำหรับระบบไมโครเจลที่เคลือบสาร α -mangostin พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตามปริมาณสารสกัดที่ใช้ (ดังตารางที่ 9 และ 10) ซึ่งอาจอธิบายได้จากบทบาทของโคโตะซานในฐานะตัวพาหะ (carrier) ที่ช่วยเพิ่มความเสถียรของสารสำคัญและส่งเสริมการปลดปล่อยแบบค่อยเป็นค่อยไป (controlled release) ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานที่พบว่าการห่อหุ้มสารสำคัญด้วยโคโตะซานสามารถเพิ่มความคงตัวและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารออกฤทธิ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Pérez-Pacheco et al., 2025; Buanasari et al., 2020)

อย่างไรก็ตาม ในสูตรครีมกันแดดต้นแบบไม่สามารถวัดค่า IC_{50} ได้อย่างชัดเจนภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ใช้ ซึ่งอาจเกิดจากผลของ Matrix effect ของระบบอิมัลชัน เช่น การรบกวนจากองค์ประกอบในครีม ได้แก่ น้ำมัน สารทำให้หนืด และสารก่ออิมัลชัน รวมถึงสีของสารสกัดที่อาจดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกับ DPPH ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนคลาดเคลื่อนและประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าความเป็นจริง (Paraskevopoulou et al., 2025; Tatarczak-Michalewska & Flieger, 2022) นอกจากนี้ วิธี DPPH ยังมีข้อจำกัดในระบบอิมัลชันเนื่องจากความขุ่นและปฏิกิริยาที่ขึ้นกับตัวทำละลายและสภาวะการทดลอง (Wotosiak et al., 2022) ดังนั้นจึงควรมีการใช้วิธีวิเคราะห์อื่นร่วม เช่น ABTS หรือ ORAC เพื่อยืนยันผลการทดสอบในระบบครีมกันแดดต่อไป

ตารางที่ 9 ค่าความเข้มข้นยับยั้งครึ่งหนึ่งของสารตัวอย่าง

ชื่อสาร	IC_{50}			ค่าเฉลี่ย
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	
สารมาตรฐานบีเอชที	13.703	17.910	19.024	16.879±2.291
กรดแอสคอร์บิก	13.425	7.437	9.892	10.251±2.458
ส่วนสกัดหยาบเอทานอลจากเปลือกมังคุด	53.454	62.163	61.925	59.181±4.051
สารแอลฟาแมงโกสติน	N/A	N/A	N/A	N/A
ครีมกันแดดต้นแบบที่ไม่ใส่สารแอลฟาแมงโกสติน	N/A	N/A	N/A	N/A
ครีมกันแดดต้นแบบที่ใส่สารแอลฟาแมงโกสตินร้อยละ 1	N/A	N/A	N/A	N/A
ครีมกันแดดต้นแบบที่ใส่สารแอลฟาแมงโกสตินร้อยละ 3	N/A	N/A	N/A	N/A
ครีมกันแดดต้นแบบที่ใส่สารแอลฟาแมงโกสตินร้อยละ 5	N/A	N/A	N/A	N/A

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการกำจัดอนุมูลอิสระดีพีพีเอชของสารต้นแบบครีมกันแดดที่แต่ละความเข้มข้น

ชื่อสาร	ร้อยละการยับยั้ง			ค่าเฉลี่ยร้อยละการยับยั้ง
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	
สารต้นแบบครีมกันแดดเข้มข้นร้อยละ 1	5.692	-1.483	5.521	3.243 ± 3.342
สารต้นแบบครีมกันแดดเข้มข้นร้อยละ 3	10.654	18.265	6.467	11.795 ± 4.884
สารต้นแบบครีมกันแดดเข้มข้นร้อยละ 5	26.252	31.140	26.425	27.939 ± 2.264

การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการผสมผสานทรัพยากรเหลือทิ้งจากทะเลและการเกษตรให้เป็นระบบวัสดุเชิงหน้าที่เดียวกัน ไมโครเจลไคโตซานจากแกนหมึกสามารถทำหน้าที่เป็นพาหะจากธรรมชาติสำหรับสารออกฤทธิ์จากเปลือกมังคุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการปรับปรุงสูตรในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความเสถียร และความเหมาะสมในการใช้งานเชิงเครื่องสำอางและเวชสำอาง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรและทรัพยากรทางทะเลมาพัฒนาเป็นวัสดุเชิงหน้าที่ โดยอาศัยการผสมระหว่างพอลิเมอร์ชีวภาพจากแกนหมึกและสารออกฤทธิ์จากเปลือกมังคุดในรูปแบบระบบไมโครเจลไคโตซาน ผลการศึกษาพบว่าแกนหมึกเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไคตินและไคโตซาน เนื่องจากให้ผลผลิตสูง มีสิ่งเจือปนต่ำ และลดขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเมื่อเทียบกับเปลือกกุ้ง โครงสร้างของไคตินและไคโตซานที่ได้ถูกยืนยันด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งแสดงรูปแบบสเปกตรัมสอดคล้องกับพอลิเมอร์มาตรฐาน สะท้อนถึงคุณภาพของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเชิงหน้าที่

การสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถแยกแอลฟาแมงโกสทินซึ่งเป็นสารสำคัญได้สำเร็จ โดยยืนยันโครงสร้างด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี และแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระดับปานกลางเมื่อประเมินด้วยวิธี DPPH สนับสนุนศักยภาพในการใช้เป็นแหล่งสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ ขณะที่การพัฒนาไมโครเจลไคโตซานด้วยเทคนิค Emulsion-ionic gelation สามารถสร้างอนุภาคที่มีความสม่ำเสมอและสามารถตรึงสารสกัดได้โดยไม่กระทบต่อโครงสร้างของพอลิเมอร์ ทั้งยังช่วยรักษาหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งบ่งชี้ถึงบทบาทของไมโครเจลในการเพิ่มความเสถียรและส่งเสริมการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าสูตรครีมกันแดดต้นแบบที่ผสมแอลฟาแมงโกสทินจะมีแนวโน้มแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ แต่ยังไม่สามารถประเมินค่า IC₅₀ ได้อย่างน่าเชื่อถือภายใต้เงื่อนไขการทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากผลของ matrix effect ในระบบอิมัลชันที่รบกวนการวัดด้วยวิธี DPPH นอกจากนี้ ครีมต้นแบบยังไม่ได้รับการประเมินค่าการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต เช่น SPF และ PA ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญของผลิตภัณฑ์กันแดด

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ สำหรับการสนับสนุนที่เอื้ออำนวยให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, M., Yamin, B. M., & Lazim, A. M. (2013). A study on dispersion and characterisation of α -mangostin loaded pH sensitive microgel systems. *Chemistry Central Journal*, 7 (1), 1-6. <https://link.springer.com/article/10.1186/1752-153x-7-85>
- Asasutjarit, R., Meesomboon, T., Adulheem, P., Kittiwisut, S., Sookdee, P., Samosornsuk, W., & Fuongfuchat, A. (2019). Physicochemical properties of alpha-mangostin loaded nanomeulsions prepared by ultrasonication technique. *Heliyon*, 5 (9), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02465>
- Bikiaris, N. D., Koumentakou, I., Hatzistamatiou, K., Lykidou, S., Barmapalexis, P., & Nikolaidis, N. (2023). Preparation and investigation of the SPF and antioxidant properties of emulsions. *Cosmetics*, 10(3), 1-14. <https://doi.org/10.3390/cosmetics10030076>
- Buanasari, Sugiyo, W. & Rustaman, H. (2020). Preparation and evaluation of plant extract microcapsules using chitosan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 755, 1-8.
- Calvo, P., Remuñán-López, C., Vila-Jato, J. L., & Alonso, M. J. (1997). Novel hydrophilic chitosan-polyethylene oxide nanoparticles as protein carriers. *Journal of Applied Polymer Science*, 63(1), 125–132. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970103\)63:1<125::AID-APP13>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970103)63:1<125::AID-APP13>3.0.CO;2-4)
- Ee, G. C. L., Daud, S., Taufiq-Yap, Y. H., Ismail, N. H., & Rahmani, M. (2006). Xanthones from *Garcinia mangostana* (Guttiferae). *Natural product research*, 20(12), 1067-1073. <https://doi.org/10.1080/14786410500463114>
- Garcinuño, S., Aranaz, I., Civera, C., Arias, C., & Acosta, N. (2022). Evaluating non-conventional chitosan sources for controlled release of risperidone. *Polymers*, 14(7), 1-15. <https://doi.org/10.3390/polym14071355>
- Gulcin, İ., & Alwasel, S. H. (2023). DPPH radical scavenging assay. *Processes*, 11(8), 1-20. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>
- International Organization for Standardization (ISO). (2021). *Cosmetics—Determination of sunscreen UVA photoprotection in vitro*. Retrieved from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75059/6a9b02bd442f427cb45ed022e45c550b/ISO-24443-2021.pdf>
- Li, P., Dai, Y. N., Zhang, J. P., Wang, A. Q., & Wei, Q. (2008). Chitosan-alginate nanoparticles as a novel drug delivery system for nifedipine. *International journal of biomedical science*, 4(3), 221–228. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3614711/>
- Li, R., Song, W., Huang, S., Liu, C., Li, M., & Sun, L. (2025). Synthesis, characterization, and preliminary analysis of squid pen chitosan microcapsules. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(7), 1-16. <https://doi.org/10.3390/ijms26072885>

- Lima, M., Pedreira, A., Sanz, N., Vázquez, J. A., García, M. R., Mergulhão, F., & Valcarcel, J. (2025). Sustainable and integral valorization of *Dosidicus gigas* pen waste. *Marine Drugs*, 23(10), 1-22. <https://doi.org/10.3390/md23100382>
- Martins, A. F., De Oliveira, D. M., Pereira, A. G., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2012). Chitosan/TPP microparticles obtained by microemulsion method applied in controlled release of heparin. *International journal of biological macromolecules*, 51(5), 1127-1133. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.08.032>
- Martins, T., Henriques, S. B., Reis, G. K. O., Amaral, M. M. S., Guimarães, M. F., Oliveira, G. L., ... Nunes, E. H. M. (2026). A novel green method for producing medical-grade chitosan from squid pens. *Journal of Applied Polymer Science*, 143(25), 1-14. <https://doi.org/10.1002/app.70790>
- McReynolds, C., Adrien, A., Brugerolle de Fraissinette, N., Olza, S., & Fernandes, S. C. M. (2022). Deep eutectic solvents for the extraction of β -chitin from *Loligo vulgaris* squid pens. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(13), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03569-9>
- Moongkarndi, P., Kosem, N., Kaslungka, S., Luanratana, O., Pongpan, N., & Neungton, N. (2004). Antiproliferation, antioxidation and induction of apoptosis by *Garcinia mangostana* (mangosteen) on SKBR3 human breast cancer cell line. *Journal of ethnopharmacology*, 90(1), 161-166. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2003.09.048>
- Moralez, L., Nakasu, P., & Hallett, J. (2025). Preparation of hybrid β -chitosan-squid pen protein hydrogel beads for heavy metal adsorption. *Soft Matter*, 21, 2480-2492. <https://doi.org/10.1039/D4SM01300J>
- Nash, J. F., & Tanner, P. R. (2014). Relevance of UV filter/sunscreen product photostability to human safety. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 30(2-3), 88-95. <https://doi.org/10.1111/phpp.12113>
- Ngawhirunpat, T., Opanasopi, P., Sukma, M., Sittisombut, C., Kat, A., & Adachi, I. (2010). Antioxidant activity of mangosteen extract. *Pharmaceutical Biology*, 48(1), 55-62. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3109/13880200903046138>
- Nikam, R., Bachhav, P., Pawar, M., Sharma, Y., & Patil, D. (2023). A review: Formulation of sunscreen. *Research & Reviews Journal of Pharmaceutical Sciences*, 12(3), 45-50. <https://www.rroij.com/open-access/a-review-formulation-of-sunscreen.pdf>
- No, H. K., & Meyers, S. P. (1995). Preparation and characterization of chitin and chitosan-A review. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 4(2), 27-52. https://doi.org/10.1300/J030v04n02_03
- Paraskevopoulou, P., Tsotsou, G., & Chourda, F. (2025). Antioxidant capacity analysis of emulsions using DPPH assay. *MethodsX*, 15, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103434>

- Pérez-Pacheco, Y., Tylkowski, B., & García-Valls, R. (2025). Chitosan micro/nanocapsules in action. *Molecules*, 30(2), 1-27. <https://doi.org/10.3390/molecules30020252>
- Reinau, D., Osterwalder, U., Stockfleth, E., & Surber, C. (2015). The meaning and implication of sun protection factor. *British Journal of Dermatology*, 173(5), 1345. <https://doi.org/10.1111/bjd.14015>
- Romanhole, R. C., dos Santos, É. M., Fava, A. L. M., Pagani, L. S., Carvalho, N. F., Lima, G. C., ... Mazzola, P. G. (2026). Influence of formulation, application, and environment on sunscreen effectiveness. *Cosmetics*, 13(3), 1-24. <https://doi.org/10.3390/cosmetics13030122>
- ScienceInsights. (2026). *What is PA in sunscreen? UVA ratings explained*. Retrieved from <https://scienceinsights.org>
- Tatarczak-Michalewska, M., & Flieger, J. (2022). Application of High-Performance Liquid Chromatography with Diode Array Detection to Simultaneous Analysis of Reference Antioxidants and 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) in Free Radical Scavenging Test. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 1-19. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148288>
- Wairata, J., Fadlan, A., Purnomo, A. S., Taher, M., & Ersam, T. (2022). Total phenolic and flavonoid contents, antioxidant, antidiabetic and antiplasmodial activities of *Garcinia forbesii* King: A correlation study. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(2), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103541>
- Widayanti, A., Jufri, M., Surini, S., & Ellya, B. (2024). Antioxidant activity of mangosteen rind extract. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 16(1), 145-148. <https://doi.org/10.22159/ijap.2024.v16s1.31>
- Wołosiak, R., Drużyńska, B., Derewiaka, D., Piecyk, M., Majewska, E., Ciecierska, M., Worobiej, E. & Pakosz, P. (2022). Verification of antioxidant activity by DPPH assay. *Molecules*, 27(1), 1-20. <https://doi.org/10.3390/molecules27010050>