

การศึกษาสมบัติของสารเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยเปลือกส้ม เพื่อนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์คุกกี้

Study of the Encapsulated Orange Peel Essential Oil Properties for Application in Cookie Production

กรณรัตน์ สกุลนามรัตน์^{1*} ทรงยศ กิตติชนม์ธวัช¹ ชไมพร บุญวัฒน์¹
และ วิลินุช โพธิระหงษ์¹
Karunrat Sakulnarmrat^{1*}, Songyot Kittichonthawat¹,
Chamaiporn Boonwat¹ and Wilainuch Phothirahong¹

Received: 25 April 2025
Revised: 12 September 2025
Accepted: 23 January 2026

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้ม 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ส้มอันนี่ สายน้ำผึ้ง และ สีทอง ในรูปแบบสดและแบบแห้งด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ พบว่าเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งให้ผลผลิตน้ำมันสูงที่สุดเท่ากับ 3.47% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสดและสายพันธุ์อื่น เมื่อนำมาเอนแคปซูลร่วมกับสารห่อหุ้มแบบผสม 3 ชนิด ได้แก่ มอลโตเด็คซ์ตรินผสมกับอะราบิก (MD10:GA) มอลโตเด็คซ์ตรินผสมกับโปรตีนไอโซเลต (MD10:SPI) และมอลโตเด็คซ์ตรินผสมกับเวย์โปรตีนไอโซเลต (MD20:WPI) อัตราส่วน 1:1 ผสมกับน้ำมันหอมระเหยในอัตราส่วน 4:1 และทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะได้เอนแคปซูล MD10:GA มีประสิทธิภาพการเอนแคปซูลสูงที่สุดเท่ากับ 84.90% ($p < 0.05$) ปริมาณน้ำอิสระ 0.27 ความหนาแน่นรวม 0.24 g/cm³ และความหนาแน่นแบบอัดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 0.32 g/cm³ ปริมาณน้ำมันในเอนแคปซูลสูงที่สุด 0.74 g/100 g ($p < 0.05$) นำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ พบว่าคะแนนด้านสี กลิ่น และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม ในขณะที่คะแนนลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเอนแคปซูล (สูตรที่ 3) เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด การศึกษาความคงตัวของเอนแคปซูลระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 สัปดาห์ พบว่าปริมาณน้ำมันลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำอิสระและค่าความเป็นกรด (acid value) เพิ่มขึ้น

¹ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ สุรินทร์ ประเทศไทย 32000

¹ Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin campus, Surin, Thailand 32000

* ผู้เขียนที่ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: karunrat.sa@rmuti.ac.th.

อย่างต่อเนื่อง โดยอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การเสื่อมคุณภาพเกิดได้เร็วกว่าที่ 25 องศาเซลเซียส การเสริมเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยลงในผลิตภัณฑ์คุกกี้ 5 ระดับ ได้แก่ สูตร CK1 (สูตรควบคุม ไม่เสริมเอนแคปซูล) สูตร CK2 (เสริมเปลือกส้มสด) สูตร CK3 (เอนแคปซูล 5 กรัมต่อคุกกี้ 100 กรัม) สูตร CK4 (เอนแคปซูล 10 กรัมต่อคุกกี้ 100 กรัม) และ สูตร CK5 (เอนแคปซูล 15 กรัมต่อคุกกี้ 100 กรัม) เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์พลาสติกโพลีเอทิลีนภายในถุงออลูมิเนียมฟอยล์แบบซิปปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 3 สัปดาห์ พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ความเป็นสีแดง (a^*) ความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสัปดาห์แรก ค่าความแข็งและค่าการแตกออกจากกันเพิ่มขึ้นตามปริมาณเอนแคปซูลที่เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา คุกกี้สูตร CK5 มี TBA ต่ำที่สุด เท่ากับ 13.72 ± 0.19 mg MDA/100 g ในสัปดาห์ที่ 3 ตรงข้ามกับสูตร CK1 ที่มีแนวโน้มเหม็นหืนสูงที่สุดระหว่างการเก็บรักษา แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเอนแคปซูลสูงสุดจะสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเหม็นหืน (lipid peroxidation) ได้ดีที่สุด อีกทั้งไม่พบการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในสัปดาห์สุดท้าย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้น้ำมันหอมระเหยเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งในรูปแบบเอนแคปซูลในการพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้

คำสำคัญ: เปลือกส้ม น้ำมันหอมระเหย เอนแคปซูลชั้น คุกกี้เพื่อสุขภาพ ความยั่งยืน

ABSTRACT

This study aimed to extract essential oils from the peels of three citrus cultivars – Murcott mandarin, Honey mandarin, and Sri Thong in both fresh and dried forms using steam distillation. The highest oil yield was obtained from fried Murcott Mandarin peel, reaching 3.47%, compared with the fresh samples and other cultivars. The extracted oil was encapsulated using three combinations of wall materials: maltodextrin with gum Arabic (MD10:GA), maltodextrin with soy protein isolate (MD10:SPI), and maltodextrin with whey protein isolate (MD10:WPI), all at a 1:1 ratio. The encapsulated oil was then blended with essential oil at a 4:1 ratio and subsequently freeze-dried. Among these, the MD10:GA formulation exhibited the highest encapsulation efficiency of 84.90% ($p < 0.05$), with a water activity of 0.27, bulk density of 0.24 g/cm³, the lowest tapped density of 0.33 g/cm³, and the highest oil retention of 0.74 g/100 g ($p < 0.05$). The stability of the encapsulated powders was further evaluated under storage at 25°C and 35°C for 4 weeks. Results showed a decline in oil content, accompanied by an increase in water activity and acid value, with accelerated deterioration at 35°C. Encapsulated essential oils were incorporated into cookies at five levels: CK1 (control, without encapsulates), CK2 (fresh peel), CK3 (5 g encapsulates/100 g cookie), CK4 (10 g encapsulates/100 g cookie), and CK5 (15 g encapsulates/100 g cookie). Cookies were stored in polyethylene bags placed inside aluminium foil zipper pouches at 25°C for 3 weeks. Over storage, lightness (L^*), redness (a^*), and yellowness (b^*) decreased compared with week zero, while hardness and fracturability increased with higher levels of encapsulates and gradually declined over time. Notably, CK5 cookies showed the lowest

TBA value of 13.72 ± 0.19 mg MDA/100 g at week 3, in contrast with CK1, which exhibited the highest rancidity, indicating that higher levels of encapsulates effectively delayed lipid peroxidation. No microbial contamination was detected throughout storage. Overall, these findings highlight the potential of dried Sai Nam Phueng orange peel essential oil, when encapsulated, as a functional ingredient for developing bakery products, such as cookies.

Keywords: Orange Peel; Essential Oil; Encapsulation; Functional Cookies; Sustainability

บทนำ

ปัจจุบันแนวคิดด้านการพัฒนาอย่างยั่งยืน (sustainable development) และเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ได้รับการผลักดันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อลดปริมาณของเสียและเพิ่มมูลค่าผลพลอยได้จากวัตถุดิบการเกษตร [1] ส้มเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมทั่วโลกด้วยรสชาติหวานอมเปรี้ยวที่เป็นเอกลักษณ์และคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมด้วยน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ เส้นใยอาหาร วิตามิน แร่ธาตุ รวมถึงสารพฤกษเคมีที่มีบทบาทด้านสุขภาพ เช่น ฟลาโวนอยด์และเทอร์ปีนอยด์ [2] ส้มมีจำหน่ายตลอดทั้งปีในราคาที่เข้าถึงได้ง่าย จึงเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมอาหารโดยเฉพาะน้ำผลไม้

เปลือกส้มมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ น้ำมันหอมระเหยที่อุดมด้วยสารซีตรัลเจอร์รานีออล และสารไอโนอาออล รวมถึงแร่ธาตุที่จำเป็น เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และวิตามินบี 2 [2] ทั้งนี้พบว่าแคลเซียมในเปลือกส้มมีปริมาณสูงกว่าในเนื้อส้มถึง 4 เท่า นอกจากนี้ เปลือกส้มเป็นแหล่งของเพคตินที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ [3] อย่างไรก็ตาม เปลือกส้มซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกลับถูกทิ้งอย่างสูญเปล่าในปริมาณมหาศาล การกำจัดเปลือกส้มที่ไม่ได้รับการใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพก่อให้เกิดปริมาณของเสียกว่า 10 – 20 ล้านตันต่อปีทั่วโลก [1] เพื่อเป็นการสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่ผ่านมาจึงมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีสีเขียวในการสกัดสารสำคัญจากผลพลอยได้เหล่านี้ เทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยม คือ การสกัดด้วยไอน้ำ (steam distillation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปลอดภัย ปราศจากสารเคมี และช่วยรักษาคุณภาพของน้ำมันหอมระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มด้วยวิธีนี้ไม่เพียงช่วยลดการสูญเสียของทรัพยากร แต่ยังเป็นการสร้างแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติที่สามารถทดแทนสารแต่งกลิ่นสังเคราะห์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้อีกด้วย

การเอนแคปซูเลชันเป็นเทคนิคที่ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการกักเก็บสารออกฤทธิ์ภายในโครงสร้าง เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพจากปัจจัยภายนอก เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความร้อน และแสง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเสถียรและยืดอายุการใช้งานของสารออกฤทธิ์ รวมถึงการคงไว้ซึ่งคุณสมบัติการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ [4, 5] การพัฒนาเอนแคปซูเลชันจากน้ำมันหอมระเหยเปลือกส้มจึงถือเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการสร้างผลิตภัณฑ์อาหารที่มีสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) ควบคู่กับการเสริมคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยในเปลือกส้มประกอบด้วยวิตามินและสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ เช่น ฟลาโวนอยด์ และเทอร์ปีนอยด์ มีบทบาทในการลดความเสี่ยงต่อโรคเรื้อรังและส่งเสริมการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพโดยรวมของผู้บริโภค [6, 7] นอกจากนี้ เอนแคปซูเลชันยังมีเสถียรภาพที่ดีและสอดคล้องกับแนวโน้มการบริโภคอาหารธรรมชาติ (clean label) ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน การ

ประยุกต์ใช้น้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มที่ผ่านการเอนแคปซูเลชันในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่อย่างคุกกี้ [4] ไม่เพียงช่วยเพิ่มคุณลักษณะด้านกลิ่นรสจากธรรมชาติ แต่ยังอาจเสริมศักยภาพด้านสุขภาพ เช่น การสนับสนุนการทำงานของระบบย่อยอาหารและการช่วยปรับสมดุลอารมณ์ [8] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในลักษณะนี้จึงไม่เพียงตอบสนอง ความต้องการของผู้บริโภคยุคใหม่ แต่ยังเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มมูลค่าและส่งเสริมความยั่งยืนของผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตร [5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเอนแคปซูลสารออกฤทธิ์สำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ ได้แก่ การพัฒนาไมโครเอนแคปซูเลชันน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มโดยใช้สารห่อหุ้มผสมระหว่างกัมอะราบิกและแป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 2:1 ถึง 4:1 ทำแห้งแบบพ่นฝอย ส่งผลให้ได้เอนแคปซูลที่มีความคงตัวสูงขึ้น ควบคุมการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ดี และยืดอายุการเก็บรักษา [9] นอกจากนี้ การใช้โปรตีนถั่วเหลืองห่อหุ้มน้ำมันปลาโดยเทคนิคอิมัลซิฟิเคชันและการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าอัตราส่วนระหว่างโปรตีนและน้ำมันส่งผลต่อขนาดหยดน้ำมันและสมบัติทางกายภาพของเอนแคปซูล โดยการเพิ่มสัดส่วนโปรตีนช่วยลดกลิ่นเฉพาะตัวและปรับปรุงเนื้อสัมผัสของน้ำมันปลาได้อย่างมีนัยสำคัญ [9] ในทำนองเดียวกันการพัฒนาไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้ม โดยเปรียบเทียบการใช้โปรตีนถั่วลันเตาเข้มข้น (PPC) และขอยโปรตีนไอโซเลท (SPI) เป็นสารห่อหุ้มพบว่าเอนแคปซูลที่ใช้ SPI มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าและประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันสูงถึงร้อยละ 84.1 เนื่องจากความสามารถในการละลายของ SPI ที่ดีกว่า [10] อีกทั้งการพัฒนาไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากจูนิเปอร์เบอร์รี่ (juniper berry) โดยใช้สารห่อหุ้มเดี่ยวและผสมระหว่างกัมอะราบิกกับมอลโตเดกซ์ตริน (GA:MD; 1:1) พบว่าการใช้สารห่อหุ้มผสม GA:MD ให้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงสุดที่ร้อยละ 70.07 รองลงมา ได้แก่ กัมอะราบิก (GA - 64.16%) เวย์โปรตีนเข้มข้น (WPC - 45.40%) และโซเดียมอัลจิเนต (9.71%) [11]

การพัฒนาเอนแคปซูเลชันของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มในผลิตภัณฑ์คุกกี้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบไขมันและโปรตีนที่เสื่อมสภาพจากการออกซิเดชันได้ง่ายระหว่างการเก็บรักษา ถือเป็นแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพในการชะลอการเสื่อมคุณภาพด้านกลิ่นและรสชาติ รวมถึงลดความเสี่ยงต่อการเกิดสารออกซิเดชันที่นำไปสู่รสขมและกลิ่นไม่พึงประสงค์ นอกจากนี้ คุกกี้สูตรทั่วไปมักมีสารอาหารเชิงหน้าที่ในระดับต่ำ การเสริมน้ำมันหอมระเหยที่ผ่านการเอนแคปซูเลชันจึงมีเป้าหมายเพื่อยกระดับคุณค่าทางโภชนาการ โดยน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบ ขณะเดียวกันโครงสร้างเอนแคปซูลยังทำหน้าที่ปกป้องสารออกฤทธิ์จากปัจจัยภายนอก ช่วยคงคุณภาพและความคงตัวของรสชาติในระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์คุกกี้มีความน่าสนใจยิ่งขึ้น และสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มุ่งเน้นผลิตภัณฑ์อาหารคุณภาพสูงและดีต่อสุขภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [12]

แนวทางการใช้เอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่นี้สอดคล้องกับความพยายามในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารอย่างยั่งยืน โดยมุ่งลดการสูญเสียทรัพยากรและเพิ่มมูลค่าผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของเปลือกส้มที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยเทคนิคการกลั่นด้วยไอน้ำ จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการเอนแคปซูเลชัน ศึกษาสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ของเอนแคปซูลที่ได้ และประเมินการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อเสริมสร้างผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการและเชิงหน้าที่ มีสารต้านอนุมูลอิสระจากน้ำมันหอมระเหยที่คงตัวมากขึ้น รวมถึง

ศักยภาพในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียร และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในยุคใหม่ที่เน้นความยั่งยืนและความเป็นธรรมชาติ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี

สารเคมี ได้แก่ เอทานอล (Honeywell International) กรดไฮโดรคลอริก เมทานอล เฮกเซน (QReC, New Zealand) มาลอนอัลดีไฮด์ บิส (ไคเมทิลอะซิเตต) (Hangzhou Keying Chem Co., Ltd.) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (UNIVAR, Ajax Finechem Pty. Ltd), plate count agar, potato dextrose agar (HiMedia Laboratories Pvt. Ltd.) เป็นสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ สำหรับสารห่อหุ้ม ได้แก่ มอลโตเด็กซ์ทริน เด็กซ์โตรสอิกวาลีน 10 กัมอะราบิก ซอยโปรตีนไอโซเลต และเวย์โปรตีนไอโซเลต (Union Science, Thailand) เป็นวัสดุเกรตอาหาร

2. วิธีการทดลอง

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำเปลือกส้มอันนี้ สายน้ำผึ้ง และ สีทอง มาล้างทำความสะอาด ผึ่งให้สะเด็ดน้ำและคัดแยกเอาเส้นใยออก หั่นให้ได้ขนาดชิ้นเล็กประมาณ 1 เซนติเมตร นำมาอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven, FD115 Binder, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 23 ชั่วโมง ให้มีความชื้นประมาณร้อยละ 7 แล้วนำมาบดให้ละเอียด จากนั้นนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช บรรจุลงถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบซิปล็อคและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

2.2 การสกัดน้ำมันหอมระเหย

นำตัวอย่างเปลือกส้มจากข้อ 2.1 มาสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยใช้ตัวอย่างเปลือกส้ม 60 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 350 มิลลิลิตร จากนั้นทำการสกัดด้วยเครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหย (Clevenger apparatus, Pyrex®, Corning Inc., USA) นาน 2 ชั่วโมง นำสารที่สกัดได้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วทำการวัดปริมาตรน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้ด้วยกรวยแยก (Separatory funnel) [13] จะได้สารสกัดน้ำมันหอมระเหยเข้มข้น เพื่อใช้ในการเอนแคปซูเลชันในขั้นตอนต่อไปโดยคำนวณร้อยละผลได้ของน้ำมันหอมระเหย (% Yield) จากสมการ:

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{น้ำมันหอมระเหยที่ได้ (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักของเปลือกส้ม (g)}}$$

นำน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้มาทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น และความชอบโดยรวมตามวิธีดำเนินการมาตรฐาน (Standard Operating Procedures) โดยยึดหลักการคุ้มครองสิทธิ์และสวัสดิภาพของอาสาสมัคร มีการชี้แจงรายละเอียดของการทดลองต่อผู้เข้าร่วม ให้สิทธิ์ในการตัดสินใจเข้าร่วมหรือถอนตัวได้ตลอดเวลา และได้รับความยินยอมก่อนเข้าร่วมการวิจัย ทั้งนี้ได้ยึดถือหลักการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ตามแนวทางสากลเป็นสำคัญ โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน และเกณฑ์การให้คะแนนแบบ 9-Point hedonic scaling เพื่อเลือกน้ำมันหอมระเหยที่มีคะแนนความชอบมากที่สุดโดยเกณฑ์คะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด

2.3 การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของเอนแคปซูล

2.3.1 การเตรียมสารห่อหุ้ม

เตรียมสารห่อหุ้มแบบผสม จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ มอลโตเด็กซ์ทรินผสมกัมอะราบิก (MD10:GA) และมอลโตเด็กซ์ทรินผสมซอโยโปรตีนไอโซเลต (MD10:SPI) และมอลโตเด็กซ์ทรินผสมเวย์โปรตีนไอโซเลต

(MD10:WPI) เช่นเดียวกันในอัตราส่วน 1:1 [11] ปริมาณ 100 กรัม จากนั้นนำไปผสมน้ำกลั่นด้วยเครื่องผสมแบบแม่เหล็ก (Hot-plate 135 mm, Heildolph, Schwabach, Germany) ด้วยความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที นาน 20 นาที เมื่อละลายเป็นเนื้อเดียวกันให้นำสารห่อหุ้ม 100 กรัม มาผสมกับน้ำมันหอมระเหย 25 กรัม (อัตราส่วน 4:1) [11] และทำการผสมด้วยเครื่องผสมอีก 30 นาที เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน

2.3.2 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

นำสารผสมที่เตรียมได้จากข้อ 2.3.1 มาเทใส่ถาดอลูมิเนียม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร ให้มีความหนา 1 เซนติเมตร นำเข้าตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถาดเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Heto Power Dry PL3000, Thermo Fisher Scientific, Bath, UK) ภายใต้ความดันสูญญากาศ 1.0 mbar ในขั้นตอน primary drying เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อด้วยขั้นตอน secondary drying อีก 24 ชั่วโมง จนความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 5% (w/w) จากนั้นนำตัวอย่างมาบดละเอียดด้วยโกร่งเพื่อให้ได้เอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหย บรรจุลงถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบซิปล้างแล้วนำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

2.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของเอนแคปซูล

(1) ปริมาณน้ำอิสระ

นำเอนแคปซูลมาทำการวัดปริมาณน้ำอิสระ (Labmaster-a_w Neo, Novasina AG, Lachen, Switzerland) โดยทำการวัด 3 ครั้ง จากนั้นรายงานค่าในรูปค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(2) ความหนาแน่น

นำเอนแคปซูล 2 กรัม วิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยนำมาเทใส่กระบอกตวงปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นคำนวณความหนาแน่นจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเอนแคปซูลต่อปริมาตร (g/cm³) สำหรับความหนาแน่นแบบอัดตัว (tapped density) ชั่งเอนแคปซูล 2 กรัม ใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วทำการเคาะลงบนแผ่นยาง 100 ครั้ง จากความสูง 20 เซนติเมตร คำนวณความหนาแน่นแบบอัดตัวด้วยสมการ: น้ำหนักเอนแคปซูล/ปริมาตรอัดตัว (g/cm³) [14]

(3) ประสิทธิภาพเอนแคปซูล (%) (Encapsulation efficiency, %EE)

คำนวณประสิทธิภาพเอนแคปซูล (%) โดยคำนวณหาปริมาณน้ำมันหอมระเหย (Total oil content, W_{T0}) และปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ผิว (Surface oil content, W_{S0}) ของเอนแคปซูลด้วยวิธีการกลั่น [14] จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพเอนแคปซูล (%) (Encapsulation efficiency (EE), %) ด้วยสมการ

$$EE (\%) = \frac{(W_{T0} - W_{S0})}{W_{T0}} \times 100$$

(4) ปริมาณน้ำมันทั้งหมด

นำตัวอย่างเอนแคปซูล 5 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำมากลั่นด้วยเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหยใช้เวลากลั่น 3 ชั่วโมง นำน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วทำการวัดปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้ด้วย Separatory funnel จะได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในเอนแคปซูล [14] คำนวณ Yield (%) จากปริมาณน้ำมันต่อเปลือกที่ใช้

(5) ค่าสี

นำเอนแคปซูลมาวัดค่าสี (FRU, WR-10, China) โดยใช้พื้นหลังสีขาวในการวิเคราะห์ ด้วยระบบ CIE L* a* b* โดยค่า L* หมายถึง ค่าความสว่าง ค่า a* หมายถึง ค่าของสีแดง (+) และสีเขียว (-) และค่า b* หมายถึง ค่าของสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่า

$$Chroma (C^*) = (a^* + b^*)^{1/2}$$

$$Hue\ angle\ (h^\circ) = \arctan(b^*/a^*)$$

2.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้าง

ทำการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของเอนแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM, SU3900, Hitachi High-Technologies Europe GmbH, Germany) และเทคนิคฟูเรียร์สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR, Spotlight 200i, Perkin-Elmer Inc., California, USA) [15]

2.4 การศึกษาความคงตัวของเอนแคปซูลระหว่างการเก็บรักษา

นำเอนแคปซูลประมาณ 20 กรัม บรรจุลงถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนแบบซิปลงและบรรจุอีกชั้นด้วยถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบซิปลง นำเข้าตู้เก็บรักษา (Climate chamber, Series KBF, Binder GmbH, Tullingen, Germany) อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 สัปดาห์ ทำการวิเคราะห์ ปริมาณน้ำอิสระ น้ำมัน [14] และความเป็นกรด [16] ทุกสัปดาห์ โดยความเป็นกรดคำนวณได้จากสูตร

$$Acid\ value\ \left(\frac{mg}{kg}\right) = \frac{(V - B) \times 56.1 \times N}{W}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของ KOH ที่ใช้ในการไตเตรท (mL) B คือ ปริมาตรของ KOH สำหรับแบลนค์ (mL) N คือ ความเข้มข้นของ KOH (N) และ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

2.5 การศึกษาปริมาณของเอนแคปซูลในผลิตภัณฑ์คุกกี

ปริมาณที่เหมาะสมของเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยที่เสริมลงในผลิตภัณฑ์คุกกี (Table 1) ดัดแปลงจากสูตรควบคุม [17] เตรียมส่วนผสมโดยนำเนยน้ำตาลทรายและเกลือมาผสมด้วยกันและตีให้ขึ้นฟู จากนั้นใส่ไข่ตีต่อไปจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน นำแป้งและเอนแคปซูลใส่ลงไปผสม ตีต่อไปให้เป็นเนื้อเดียวกัน ชั่งน้ำหนักโดให้ได้ 5 กรัม วางเรียงบนถาดอบที่ทาเนยไว้ กดลงเล็กน้อย นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำผลิตภัณฑ์คุกกีที่เย็นแล้วบรรจุลงถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน จำนวน 3 ชิ้น ต่อ 1 ถุง ปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึกแบบร้อน รวบรวมถุงโพลีเอทิลีนไว้ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบซิปลง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 สัปดาห์

Table 1 Cookie formulations of control and enriched with different levels of encapsulates.

Ingredients	Formulation (g)				
	CK1	CK2	CK3	CK4	CK5
Sugar	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94
Salt	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Butter	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94
Flour (all-purpose)	41.89	41.89	41.89	41.89	41.89
Baking soda	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Egg	15.08	15.08	15.08	15.08	15.08
Fresh orange peel	-	5.00	-	-	-
Encapsulates	-	-	5.00	10.00	15.00

CK1– control (no encapsulates), CK2 – fresh peel, CK3 – 5 g encapsulated essential oil powder/100 g cookie, CK4 – 10 g encapsulated essential oil powder/100 g cookie, CK5 – 15 g encapsulated essential oil powder/100 g cookie.

2.5.1 การทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส

นำผลิตภัณฑ์คุกกี้น้ำส้มสายชูเริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 0) มาทำการทดสอบความชอบของผลิตภัณฑ์คุกกี้น้ำส้มสายชู ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ตามวิธีดำเนินการมาตรฐาน (Standard Operating Procedures) โดยยึดหลักการคุ้มครองสิทธิและสวัสดิภาพของอาสาสมัคร มีการชี้แจงรายละเอียดของการทดลองต่อผู้เข้าร่วม ให้สิทธิในการตัดสินใจเข้าร่วมหรือถอนตัวได้ตลอดเวลา และได้รับความยินยอมก่อนเข้าร่วมการวิจัย ทั้งนี้ได้ยึดถือหลักการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ตามแนวทางสากลเป็นสำคัญ โดยผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ใช้เกณฑ์การให้คะแนนแบบ 9-Point hedonic scaling โดยคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด

2.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพ

(1) ค่าสี ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์คุกกี้น้ำส้มสายชูระหว่างการเก็บรักษาด้วยเครื่องวัดสี (FRU, WR 10, China)

(2) ปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์คุกกี้น้ำส้มสายชูระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทุกสัปดาห์เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Labmaster a_w Neo Novasina, Lanchem, Switzerland)

(3) การวัดเนื้อสัมผัส

ทำการวัดค่าการแตกออกจากกัน (fracturability) และความแข็ง (hardness) ของคุกกี้น้ำส้มสายชูด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA XT Plus, Stable Micro Systems, Surrey, UK) โดยใช้คุกกี้น้ำส้มสายชูจำนวน 10 ชิ้น

2.5.3 การเหม็นหืน

วิเคราะห์ความหืนด้วยวิธี Thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) โดยวัดปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ (MDA) ที่เกิดจากการเหม็นหืนด้วยการสร้างสารเชิงซ้อน MDA-TBA2 ในสภาวะกรด (pH 4) โดยนำตัวอย่างหรือสารมาตรฐาน 100 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย TBARS ปรับปริมาตรรวมเป็น 4 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นบน

น้ำแข็ง 30 นาที ก่อนวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ด้วยเครื่องไมโครเพลท (Thermo Scientific Multiskan Go, Thermo Fisher Scientific Oy Ratastie, Finland) ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นหน่วย มิลลิกรัมมาลอนไดออกไซด์ต่อกิโลกรัมคุกกี้ (mg MDA/kg cookie) [18]

2.5.4 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

วิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยวิธี Pour plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Plate count agar (PCA) [19] และวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และรา โดยตัวอย่างถูกวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato dextrose agar (PDA) และบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ก่อนทำการนับจำนวนโคโลนี [20]

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) สำหรับการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี และแบบ Randomized Completely Block Design (RCBD) สำหรับการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส ข้อมูลรายงานเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี และด้วยวิธี Dunnett's test สำหรับการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลการวิจัย

1. ร้อยละผลได้และการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้ม

กระบวนการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มจำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ส้มฮั่นนี่ (Murcott mandarin) ส้มสายน้ำผึ้ง (Honey mandarin) และส้มสีทอง (Sri Thong) โดยทำการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสดและเปลือกส้มอบแห้งด้วยไอน้ำ พบว่าเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากกว่าเปลือกส้มสด โดยเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งมีร้อยละผลได้สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 12.33 รองลงมา ได้แก่ เปลือกส้มฮั่นนี่อบแห้งและเปลือกส้มสีทองอบแห้ง โดยมีร้อยละผลได้ของน้ำมันหอมระเหยในระดับที่เท่ากัน คือ ร้อยละ 11.67 ในส่วนของเปลือกส้มสด พบว่าเปลือกส้มสายน้ำผึ้งมีร้อยละผลได้ของน้ำมันหอมระเหยเท่ากับ 3.47 ส้มฮั่นนี่ร้อยละ 2.87 และส้มสีทองร้อยละ 0.80 (Table 2)

การประเมินทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่น สี และความชอบโดยรวม พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งด้านกลิ่น สี และความชอบโดยรวมมากที่สุด โดยได้คะแนนเท่ากับ 8.47 ± 0.82 , 8.07 ± 0.78 และ 8.47 ± 0.63 ตามลำดับ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากเปลือกสดของส้มสายพันธุ์เดียวกันและทั้งแบบสดและอบแห้งของเปลือกส้มต่างสายพันธุ์ ($p < 0.05$) (Table 2) จากผลการทดลองข้างต้นผู้วิจัยจึงเลือกเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งมาใช้ในการศึกษาในขั้นตอนการเอนแคปซูเลชัน

Table 2 Essential oil yield (%) and sensory evaluation of flavor, color, and overall liking of essential oils derived from orange peels.

Orange peel	Form	Essential oil yield (%) [†]	Flavor	Color	Overall liking
Murcott	Fresh	2.87	6.27±0.94 ^b	6.53±0.57 ^{bc}	6.70±0.95 ^{bc}
mandarin	Dry	11.67	6.78±0.85 ^b	6.60±0.62 ^b	6.80±0.92 ^{bc}
Honey mandarin	Fresh	3.47	6.73±1.11 ^b	6.63±0.80 ^b	7.03±0.89 ^b
	Dry	12.33	8.47±0.82 ^a	8.07±0.78 ^a	8.47±0.63 ^a
Sri Thong	Fresh	0.80	6.50±0.86 ^b	6.17±0.79 ^{cd}	6.80±1.03 ^{bc}
	Dry	11.67	6.30±0.91 ^b	5.90±0.80 ^d	6.40±1.00 ^c

Different lowercase letters represent statistically significant differences within the same column at 95% confidence ($p < 0.05$).[†] Essential oil yield: fresh form reported as a percentage of fresh weight and dry form reported as a percentage of dry weight.

2. คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์และความคงตัวของเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้ง

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้มแบบผสมจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ MD10:GA, MD10:SPI และ MD10:WPI ร่วมกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าเอนแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วย MD10:WPI มีปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.25 ± 0.02 ซึ่งไม่แตกต่างกับเอนแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วย MD10:SPI ที่มีค่าเท่ากับ 0.26 ± 0.02 แต่มีค่าต่ำกว่าเอนแคปซูลที่ใช้ MD10:GA เท่ากับ 0.27 ± 0.02 ($p < 0.05$) (Table 3) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในการคงความชื้นภายในเอนแคปซูล เอนแคปซูลเตรียมจาก MD10:WPI มีความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นแบบอัดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 0.39 ± 0.00 g/cm³ และ 0.43 ± 0.01 g/cm³ ตามลำดับ และแตกต่างจากเอนแคปซูลชนิดอื่น ($p < 0.05$) ในขณะที่เอนแคปซูล MD10:GA มีความหนาแน่นทั้งแบบรวมเท่ากับ 0.24 ± 0.00 g/cm³ และแบบอัดตัว 0.32 ± 0.01 g/cm³ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุด ($p < 0.05$)

เอนแคปซูล MD10:GA มีประสิทธิภาพเอนแคปซูลชันสูงที่สุดเท่ากับ $84.90 \pm 1.75\%$ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยได้ดีกว่าสูตร MD10:WPI ที่มีประสิทธิภาพเอนแคปซูลชันเท่ากับ $80.87 \pm 6.01\%$ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าประสิทธิภาพเอนแคปซูลชันของเอนแคปซูล MD10:GA มีค่าใกล้เคียงกันกับเอนแคปซูล MD10:SPI ที่มีค่าเท่ากับ $80.91 \pm 2.21\%$ สำหรับปริมาณน้ำมันในเอนแคปซูล พบว่า MD10:GA ซึ่งมีประสิทธิภาพเอนแคปซูลชันสูงที่สุดมีการกักเก็บน้ำมันได้สูงสุดเท่ากับ 0.74 ± 0.00 g/100 g DW ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับเอนแคปซูล MD10:SPI และ MD10:WPI ที่มีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 0.67 ± 0.01 และ 0.65 ± 0.01 g/100 g DW ตามลำดับ ผลดังกล่าวยืนยันว่าเอนแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วย MD10:GA ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพเอนแคปซูลชันสูงแต่ยังสามารถกักเก็บปริมาณน้ำมันหอมระเหยไว้ภายในเอนแคปซูลได้มากที่สุด

การวิเคราะห์ค่าสีของเอนแคปซูล พบว่าค่าความสว่าง (L*) ของเอนแคปซูล MD10:GA มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 64.04 ± 2.73 แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเอนแคปซูล MD10:WPI ที่มีค่าเท่ากับ 63.16

± 3.61 ในขณะที่ MD10:SPI มีค่าความสว่างต่ำที่สุดเท่ากับ 61.22 ± 2.15 ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และความเข้มสี (C^*) ที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าความเป็นสีแดง (a^*) โดย MD10:SPI ค่ามากกว่าเอนแคปซูล MD10:GA ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับ MD10:WPI สำหรับเอดสี (h°) พบว่าเอนแคปซูล MD10:SPI มีค่าเอดสีต่ำที่สุด เท่ากับ 1.44 ± 0.01 ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเอนแคปซูล MD10:GA และเอนแคปซูล MD10:WPI ($p < 0.05$)

การวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคด้วย SEM พบว่าเอนแคปซูลทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีลักษณะอนุภาคไม่สมมาตร (asymmetry) พื้นผิวเรียบ ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของเอนแคปซูลที่เกิดจากการก่อตัวของเมตริกซ์สารห่อหุ้มขณะน้ำแข็งระเหิดออก ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างพรุนและคงสภาพรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ [14] การใช้มอลโตเด็คซ์ตรินผสมกับอะราบิก (MD10:GA) ช่วยให้ได้อนุภาคที่มีพื้นผิวเรียบกว่าเล็กน้อย เนื่องจากกัมอะราบิกมีโครงสร้างที่มีสายกิ่งและประจุไอออนิกทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ตามธรรมชาติช่วยให้การกักเก็บน้ำมันหอมระเหยมีความเสถียรมากขึ้นและคงรูปได้ดีกว่า [11, 14, 15] ตรงกันข้ามเมื่อใช้สารห่อหุ้มผสมด้วยโปรตีนทั้ง 2 ชนิด (MD10:SPI, MD10:WPI) พบว่าพื้นผิวของอนุภาคมีลักษณะขรุขระเล็กน้อย (Figure 1A) ซึ่งอาจเกิดจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโปรตีนที่ไม่สม่ำเสมอและการหดตัวของเมตริกซ์ระหว่างกระบวนการทำแห้ง [21] อย่างไรก็ตาม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทั้ง 3 สูตร มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดของสารห่อหุ้มมีผลต่อพื้นผิวและสัณฐานวิทยามากกว่าต่อขนาดอนุภาค

Table 3 Physicochemical properties of encapsulated honey mandarin peel essential oil powders.

Property	Encapsules		
	MD10:GA	MD10:SPI	MD10:WPI
Water activity	0.27 ± 0.02^a	0.26 ± 0.02^b	0.25 ± 0.02^c
Bulk density (g/cm^3)	0.24 ± 0.00^c	0.30 ± 0.00^b	0.39 ± 0.00^a
Tapped density (g/cm^3)	0.32 ± 0.01^c	0.35 ± 0.01^b	0.43 ± 0.01^a
Encapsulation efficiency (%)	84.90 ± 1.75^a	80.91 ± 2.21^{ab}	80.87 ± 6.01^b
Oil content ($\text{g}/100 \text{ g DW}$)	0.74 ± 0.00^a	0.67 ± 0.01^{ab}	0.65 ± 0.01^b
Color			
Lightness (L^*)	64.04 ± 2.73^a	61.22 ± 2.15^b	63.16 ± 3.61^{ab}
Redness (a^*)	1.62 ± 0.26^b	2.51 ± 0.37^a	1.92 ± 0.33^{ab}
Yellowness (b^*)	16.92 ± 0.42^b	19.70 ± 1.28^a	18.49 ± 1.54^{ab}
Chroma (C^*)	17.00 ± 0.45^b	19.85 ± 1.32^a	18.59 ± 1.57^{ab}
Hue angle (h°)	1.48 ± 0.01^a	1.44 ± 0.01^b	1.47 ± 0.01^a

a, b, c in the same row indicate a statistically significant difference at 95% confidence ($p < 0.05$), MD10 – maltodextrin dextrose equivalent 10, GA – gum Arabic, SPI – soy protein isolate, WPI – whey protein isolate.

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR (Figure 1B) แสดงสเปกตรัมที่มีจุดเด่นที่ 2915 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ C-H แบบ aliphatic, 1645 cm^{-1} การสั่นของพันธะ C=O จากกลุ่มคาร์บอนิล, 1436 cm^{-1} พันธะ C-H bending, 1148 cm^{-1} การสั่นของพันธะ C-N หรือ C-O-C stretching และ 886 cm^{-1}

เป็นตำแหน่งการสั่นของ C-H aromatic ซึ่งล้วนเป็นสเปกตรัมจำเพาะ (band characteristic) ของน้ำมันหอมระเหยในเปลือกส้ม โดยเฉพาะสารลิโมนีนและโมโนเทอร์พีน [22] จากผลการทดลองพบว่าเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งที่ใช้ MD10:GA เป็นสารห่อหุ้มมีความหนาแน่นรวมและแบบอัดตัวต่ำ อีกทั้งมีประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันและปริมาณน้ำมันในเอนแคปซูลสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเอนแคปซูลชนิดอื่น ดังนั้น จึงได้คัดเลือกเอนแคปซูล MD10:GA สำหรับการศึกษาความคงตัวภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และสภาวะเร่ง (35 องศาเซลเซียส) โดยประเมินการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา

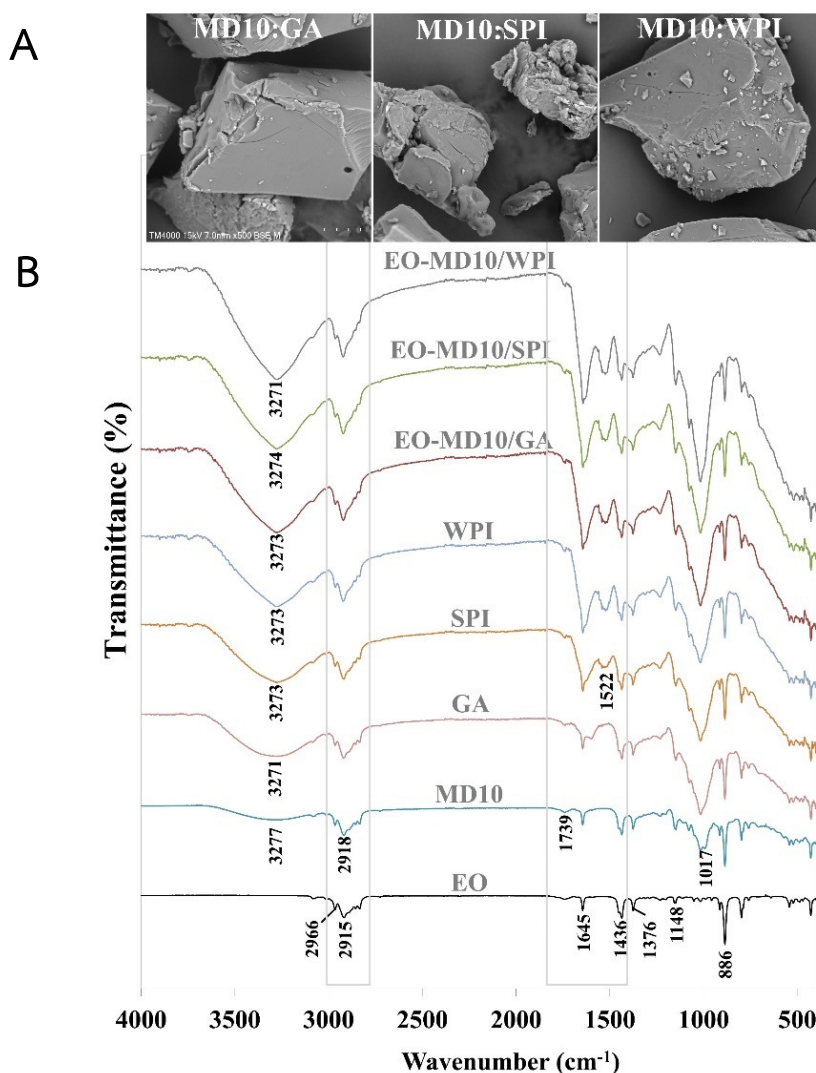


Figure 1 Morphological characteristics measured by (A) scanning electron microscopy (SEM, 500x) and (B) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).

3. ความคงตัวของเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำอิสระ

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำอิสระในเอนแคปซูลเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 สัปดาห์ แสดงดัง Figure 2

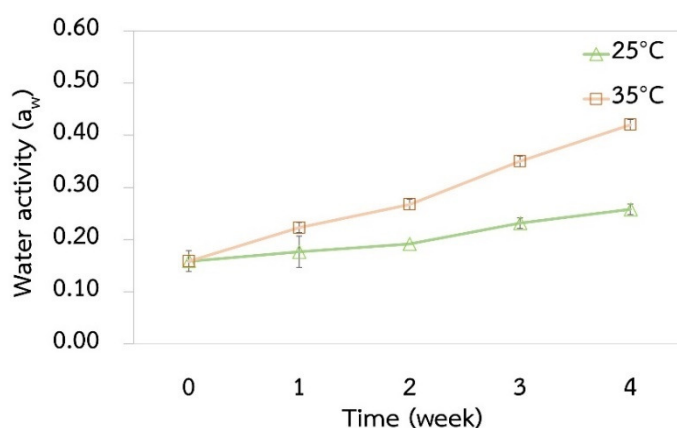


Figure 2: Water activity change of encapsulated honey mandarin peel essential oil powders during storage at 25°C and 35°C for 4 weeks.

จากภาพจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำอิสระในเอนแคปซูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 สัปดาห์ เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้นจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระของเอนแคปซูลมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ระยะเวลาสิ้นสุดการเก็บรักษาในสัปดาห์ที่ 4 เอนแคปซูลที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.26 และที่ 35 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.42 (Figure2) โดยมีค่าไม่เกิน 0.60 ซึ่งเป็นระดับของปริมาณน้ำอิสระที่เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [11, 14, 21, 22]

3.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหอมระเหย

การศึกษาความคงตัวของเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้ง MD10:GA ที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่าเอนแคปซูลมีน้ำมันหอมระเหยลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณลดลงสูงสุดในช่วงสัปดาห์ที่ 1 – 2 และหลังจากสัปดาห์ที่ 2 เป็นต้นไป มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ยังคงมีอยู่ในเอนแคปซูลในสัปดาห์สุดท้ายของการเก็บรักษา (สัปดาห์ที่ 4) มีอยู่ถึงร้อยละ 78 (25 องศาเซลเซียส) และ 75 (35 องศาเซลเซียส) (Figure 3A)

3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด (Acid value)

ค่าความเป็นกรด (Acid value) ของเอนแคปซูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 4 สัปดาห์ โดยเอนแคปซูลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าเอนแคปซูลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 3.37 mg KOH/kg และ 4.49 mg KOH/kg

ตามลำดับ (Figure 3B) ความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งสัมพันธ์กับการเสื่อมสภาพของไขมัน (hydrolytic rancidity) และอาจกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น [23] ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดจึงเป็นดัชนีสำคัญที่บ่งบอกถึงการลดลงของความคงตัวของเคมีของเอนแคปซูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียส ทำให้เอนแคปซูลมีแนวโน้มเสื่อมสภาพได้รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

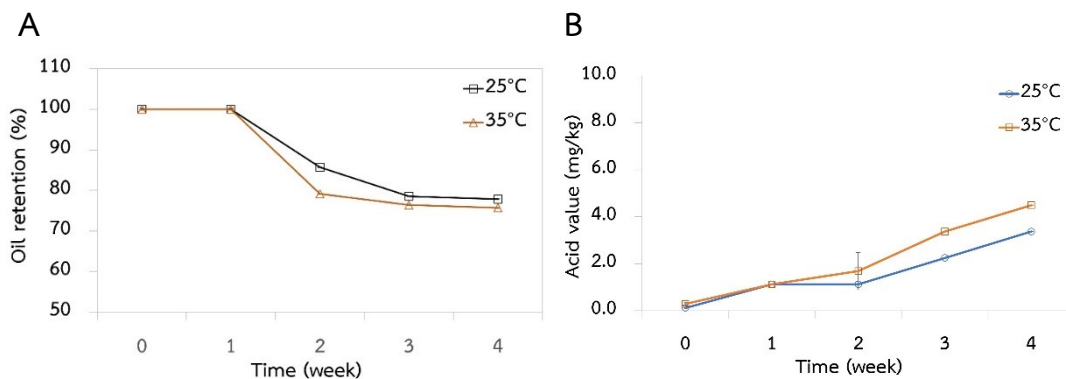


Figure 3: Oil retention and acid value change of encapsulated honey mandarin peel essential oil powders during storage at 25°C and 35°C for 4 weeks.

4. การประยุกต์ใช้เอนแคปซูลในผลิตภัณฑ์คุกกี้

การประยุกต์ใช้เอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้งในผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เอนแคปซูลเป็นสารให้กลิ่นในผลิตภัณฑ์อาหารทดแทนสารให้กลิ่นทางการค้า

4.1 การประเมินทางด้านการประสาทสัมผัส

ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ทั้ง 5 สูตร ในสัปดาห์เริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 0) แสดงใน Table 4 พบว่า ด้านลักษณะปรากฏ คุกกี้สูตร CK1 และ CK2 ได้รับคะแนนสูงสุด เท่ากับ 7.20 ± 1.15 และ 7.40 ± 1.43 ตามลำดับ โดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่สูงกว่าสูตรเสริมเอนแคปซูล โดยเฉพาะ CK4 และ CK5 ที่ได้คะแนนต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สำหรับด้านสี คุกกี้สูตร CK1, CK2, CK3 และ CK5 ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ในขณะที่ CK4 มีคะแนนต่ำที่สุด (6.15 ± 1.73 ; $p < 0.05$) ด้านกลิ่น พบว่าคะแนนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.95 – 6.95 โดยไม่แตกต่างกันระหว่างสูตร ($p > 0.05$) ส่วนด้านเนื้อสัมผัส CK1 และ CK2 ได้คะแนนสูงกว่าสูตรเสริมเอนแคปซูลทั้ง 3 สูตร อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดย CK4 มีคะแนนต่ำที่สุด (5.05 ± 2.21) ในขณะที่ยอดความชอบโดยรวมพบว่า CK1, CK2 และ CK3 มีคะแนนสูงและแตกต่างกันกับ CK4 และ CK5 ($p < 0.05$) สรุปได้ว่าสูตรเสริมเอนแคปซูล CK3 ได้รับการยอมรับในแต่ละด้านใกล้เคียงกับสูตรควบคุม CK1 มากที่สุด

Table 4 Sensory evaluation of cookies enriched with encapsulated Honey mandarin orange peel essential oils evaluated at the initial week (week zeroth).

Sample	Appearance	Color	Flavor ^{ns}	Texture	Overall liking
CK1	7.20±1.15 ^a	6.95±1.20 ^a	6.75±1.92	7.50±1.00 ^a	7.70±1.03 ^a
CK2	7.40±1.43 ^a	7.20±1.20 ^a	6.80±1.82	7.05±1.64 ^a	7.30±1.08 ^a
CK3	6.60±1.20b ^a	7.00±1.03 ^a	6.85±1.40	6.10±1.55 ^b	6.95±1.40 ^a
CK4	6.15±1.70 ^b	6.15±1.73 ^b	5.95±1.67	5.05±2.21 ^b	5.75±2.43 ^b
CK5	6.00±1.60 ^b	6.55±1.80 ^a	6.95±2.20	5.80±2.07 ^b	6.60±2.10 ^b

CK1 – control, CK2 – fresh peel, CK3 – 5 g encapsulated powders/100 g cookie, CK4 – 10 g encapsulated powders/100 g cookie, CK5 – 15 g encapsulated powders/100 g cookie, ns – not significant. Different lowercase letters represent statistically significant differences within the same column at 95% ($p < 0.05$).

4.2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์คุกกี้เสริมเอนแคปซูลระหว่างการเก็บรักษา

4.2.1 คุณภาพด้านกายภาพ

(1) การเปลี่ยนแปลงด้านสี

ค่าความสว่าง (L^*) ของคุกกี้มีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณการเสริมเอนแคปซูล โดยคุกกี้สูตร CK1 มีค่าความสว่าง (L^*) เริ่มต้นสูงเท่ากับ 70.90 แต่ไม่คงที่ตลอดการเก็บรักษา สะท้อนถึงความไวต่อกระบวนการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) และการออกซิเดชันของไขมันที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่ CK2 ส่งผลให้ความสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญในระยะเริ่มต้น และถึงแม้ว่าบางช่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่แนวโน้มยังคงลดลงต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันหอมระเหยที่ยังคงอยู่ในรูปอิสระและไวต่อความร้อน สำหรับสูตร CK3 มีค่าความสว่างสูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 เท่ากับ 74.30 แสดงให้เห็นว่าเอนแคปซูลช่วยปกป้องสารสำคัญและลดการเกิดสีน้ำตาลเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ในขณะที่สูตร CK4 และ CK5 แม้ว่าจะมีค่าความสว่างสูงในช่วงแรก แต่ปริมาณเอนแคปซูลที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการกระจายตัวของผงเอนแคปซูลไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าความสว่างผันผวนมากขึ้นเมื่อเก็บรักษานาน (Figure 4A)

ค่าความเป็นสีแดง (a^*) พบว่าในสัปดาห์แรกคุกกี้สูตร CK4 และ CK5 มีค่าความเป็นสีแดงน้อยกว่าสูตร CK3 และสูตร CK5 มีค่าความเป็นสีแดงสูงสุดในสัปดาห์ที่ 3 (Figure 4B) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) พบว่าในสัปดาห์แรกคุกกี้สูตร CK3 และ CK5 มีค่าความเป็นสีเหลืองน้อยกว่าคุกกี้สูตร CK4 และในสัปดาห์ที่ 3 คุกกี้สูตร CK5 มีค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุด (Figure 4C) สำหรับค่าความเข้มสี (Figure 4D) ของผลิตภัณฑ์คุกกี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าเฉดสี (h°) (Figure 4E) ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 สูตร มีค่าอยู่ระหว่าง 1.37 – 1.44 ซึ่งไม่แตกต่างกันตลอดอายุการเก็บรักษา แสดงให้เห็นว่าการใช้เอนแคปซูล ในระดับที่เหมาะสม โดยเฉพาะที่ระดับ 5 กรัม ต่อ 100 กรัม มีประสิทธิภาพสูงสุดในการรักษาคุณสมบัติทางกายภาพด้านสีของคุกกี้ตลอดอายุการเก็บรักษา

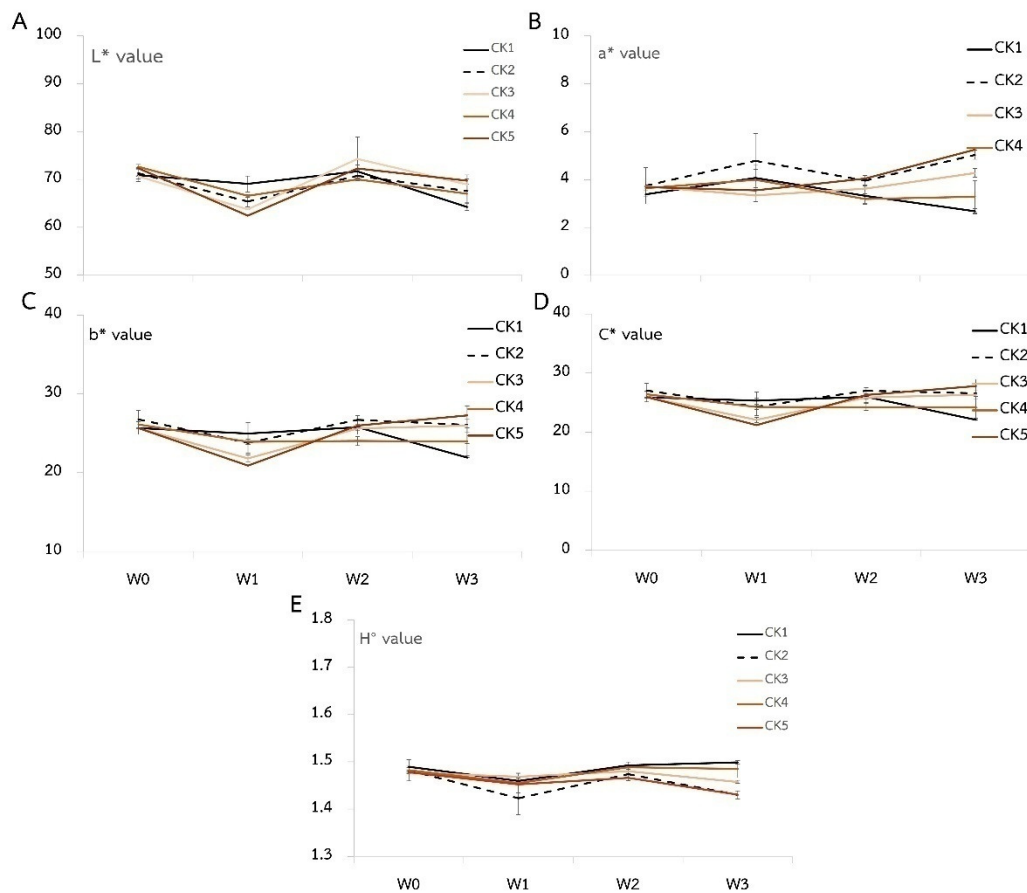


Figure 4 Color parameters of cookies enriched with encapsulated orange peel essential oil powder during storage at 25°C for 3 weeks (A) lightness (L*), (B) redness (a*), (C) yellowness (b*), (D) chroma (C*), and (E) hue angle (h°).

(2) การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำอิสระ

ในสัปดาห์เริ่มต้น ผลิตภัณฑ์คุกกี้สูตร CK1 มีปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุดเท่ากับ 0.37 ในขณะที่คุกกี้สูตร CK2 มีปริมาณน้ำอิสระสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 0.44 สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เสริมเอนแคปซูลพบว่าเมื่อเสริมในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณน้ำอิสระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยคุกกี้สูตร CK3, CK4 และ CK5 มีค่าเท่ากับ 0.37, 0.41 และ 0.41 ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น คุกกี้สูตร CK2 ยังคงมีปริมาณน้ำอิสระมากที่สุดตลอดอายุการเก็บรักษา ในขณะที่คุกกี้เสริมเอนแคปซูลในปริมาณสูงที่สุด คือ สูตร CK5 มีปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุด สำหรับสูตร CK3 พบว่ามีปริมาณน้ำอิสระใกล้เคียงกับสูตร CK1 ตลอดอายุการเก็บรักษา 3 สัปดาห์ (Figure 5)

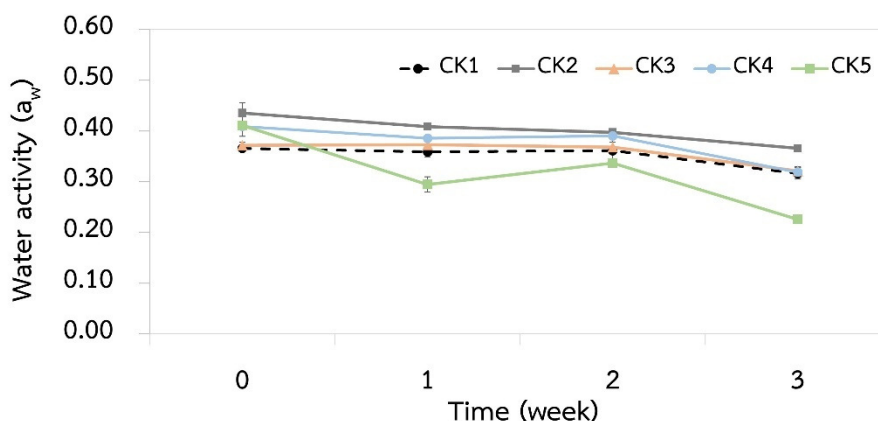


Figure 5 Change in water activity of cookies enriched with encapsulated orange peel essential oil powder during storage at 25°C for 3 weeks.

(3) การประเมินทางด้านเนื้อสัมผัส

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของคุกกี้ แสดงให้เห็นว่าสูตรคุกกี้ที่มีการเสริมเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มมีค่าการแตกออกจากกัน (fracturability) และค่าความแข็ง (hardness) แตกต่างจากสูตร CK1 อย่างมีนัยสำคัญในหลายช่วงของการเก็บรักษา (Table 5) โดยพบว่าคุกกี้สูตร CK4 และ CK5 มีค่าการแตกออกจากกันสูงกว่า CK1 อย่างชัดเจนในสัปดาห์เริ่มต้น (W0) เท่ากับ 292.34, 283.45 และ 143.85 N ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเสริมเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเครือข่ายแป้งและโปรตีน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ระบุว่า การเติมเส้นใยอาหารหรือผงเอนแคปซูลในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่สามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อ (filler) ช่วยเสริมสร้างความแน่นและเพิ่มแรงต้านทานต่อการแตกหัก [24] อย่างไรก็ตาม เมื่อเก็บรักษาไว้ตลอด 3 สัปดาห์ ค่าการแตกออกจากกันมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะ CK3 ที่ค่าลดลงเหลือ 30.56 N ในสัปดาห์ที่ 3 สะท้อนถึงการสูญเสียความกรอบเนื่องจากการดูดซึมความชื้นระหว่างการเก็บรักษา

กรณีค่าความแข็ง พบว่าสูตร CK4 และ CK5 มีค่าความแข็งสูงที่สุดทั้งในช่วงเริ่มต้นและตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีค่าระหว่าง 378.41 – 469.07 N ในขณะที่ CK2 มีค่าความแข็งต่ำที่สุด เท่ากับ 189.46 N ในสัปดาห์เริ่มต้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมเปลือกส้มสดทำให้โครงสร้างคุกกี้อ่อนตัวลง อาจเนื่องมาจากเส้นใยสดในเปลือกส้มและความชื้นที่ยังคงอยู่ในวัตถุดิบ ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโปรตีน-แป้ง [25]

เมื่อเปรียบเทียบ CK1 และ CK2 พบว่า CK2 มีทั้งความแข็งและค่าการแตกออกจากกันต่ำกว่าตลอดการเก็บรักษา แสดงให้เห็นว่าการใช้เปลือกส้มสดโดยตรงไม่เหมาะสมต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของคุกกี้ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดว่าการใช้ผลพลอยได้สดที่มีความชื้นสูงอาจรบกวนกระบวนการก่อตัวของกลูเตนและการจัดเรียงตัวของแป้ง [25] ขณะที่การเสริมด้วยเอนแคปซูลช่วยปรับปรุงทั้งความแข็งและค่าการแตกออกจากกัน โดยสูตร CK4 และ CK5 ให้สมบัติที่เสถียรกว่าตลอดการเก็บรักษา

Table 5 Texture analysis of cookies enriched with encapsulated orange peel essential oil stored at 25°C for 3 weeks.

Formulations	Fracturability (N)			
	W0	W1	W2	W3
CK1	143.85±12.42	44.91±5.57	104.6±13.65	71.98±8.64
CK2	126.57±26.51	30.16±3.22	125.76±9.85	105.17±11.25
CK3	151.00±6.47	76.5±8.04	149.11±10.63	30.56±4.85
CK4	292.34±20.38	72.68±6.51	243.95±12.22	66.58±9.48
CK5	283.45±8.64	78.14±2.65	156.27±3.26	135.5±7.24
Formulations	Hardness (N)			
	W0	W1	W2	W3
CK1	308.18±32.32	163.63±14.62	135.42±2.62	162.21±4.95
CK2	189.46±25.74	125.51±10.34	139.01±8.46	152.34±5.86
CK3	298.94±15.32	85.01±9.64	206.58±7.66	191.26±7.44
CK4	378.41±8.95	243.92±5.26	267.44±10.52	227.70±12.54
CK5	469.07±21.25	273.86±7.28	350.61±6.83	296.60±8.67

CK1 – control, CK2 – fresh peel, CK3 -5 g encapsulated powders/100 g cookie, CK4 – 10 g encapsulated powders/100 g cookie, CK5 – 15 g encapsulated powders/100 g cookie.

4.2.2 คุณภาพด้านเคมี

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (TBA) ของผลิตภัณฑ์คุกกี้พบว่าทุกสูตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บรักษานานขึ้น (Figure 6) แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันขึ้นระหว่างการเก็บรักษา โดยสูตร CK1 มีปริมาณ TBA สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในสัปดาห์ที่ 3 มีค่าเท่ากับ 21.61 ± 1.04 mg MDA/100 g เมื่อเทียบกับสัปดาห์เริ่มต้นที่มีปริมาณ TBA เท่ากับ 11.06 ± 0.10 mg MDA/100 g ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสูตร CK1 มีแนวโน้มเหม็นหืนสูงที่สุดระหว่างการเก็บรักษาสูตร CK2 มีปริมาณ TBA ระหว่าง 13.32 – 13.92 mg MDA/100 g ในกรณีสูตร CK3 พบว่ามีปริมาณ TBA ระหว่าง 13.49 ± 0.41 mg MDA/100 g และ 15.66 ± 0.19 mg MDA/100 (สัปดาห์ที่ 3) ซึ่งต่ำกว่าสูตร CK1 เล็กน้อย และสูตร CK5 ที่มีการเติมเอนแคปซูลในปริมาณมากที่สุด พบว่ามี TBA ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาใกล้เคียงกันและในสัปดาห์ที่ 3 มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 13.72 ± 0.19 mg MDA/100 g แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเอนแคปซูลสูงสุดจะสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเหม็นหืน (lipid peroxidation) ได้ดีที่สุด

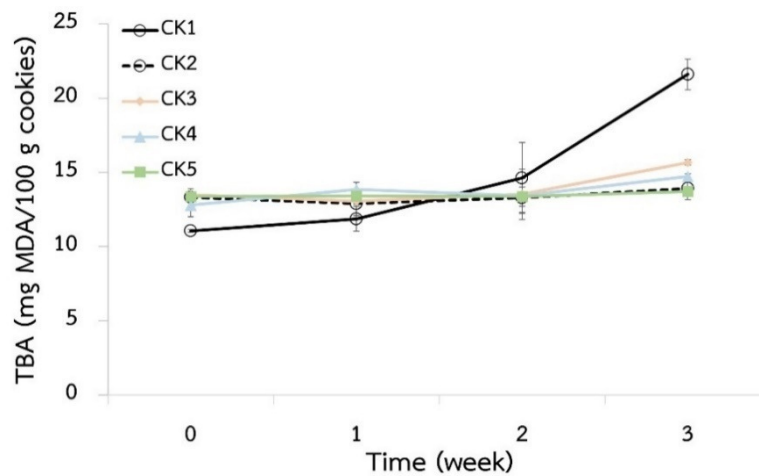


Figure 6 Thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) of cookies enriched with encapsulated orange peel essential oil powder during storage at 25°C for 3 weeks.

3.2.3 คุณภาพด้านจุลชีววิทยา

การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total viable plate count) ในผลิตภัณฑ์คุกกี้สูตร CK1 –CK5 ทุกสัปดาห์ เป็นเวลา 3 สัปดาห์ พบว่าผลิตภัณฑ์คุกกี้ทั้ง 5 สูตร ตรวจไม่พบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดตลอด 7 วันแรก เมื่อเก็บรักษาไปจนกระทั่งวันที่ 14 พบว่าผลิตภัณฑ์คุกกี้สูตร CK1 และ CK2 มีเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้น โดยมีปริมาณน้อยกว่า 25 โคโลนีต่อคุกกี้ 1 กรัม ในขณะที่ผลิตภัณฑ์คุกกี้สูตร CK3, CK4 และ CK5 (เสริมเอนแคปซูล) ไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษาในวันที่ 21 พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 สูตร มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์น้อยกว่า 25 โคโลนีต่อคุกกี้ 1 กรัม สำหรับปริมาณยีสต์และรา นั้นไม่พบในผลิตภัณฑ์คุกกี้ทั้ง 5 สูตร ตลอดอายุการเก็บรักษา 3 สัปดาห์ (Table 6)

Table 6 Total viable plate count and yeasts & molds detected in cookies fortified with encapsulated essential oil powders derived from honey mandarin (MD10:GA) during storage at 25°C for 3 weeks.

Sample	Total viable plate count (CFU/g cookies)			
	W0	W1	W2	W3
CK1	n.d.	n.d.	<25	<25
CK2	n.d.	n.d.	<25	<25
CK3	n.d.	n.d.	n.d.	<25
CK4	n.d.	n.d.	n.d.	<25
CK5	n.d.	n.d.	n.d.	<25
Sample	Yeasts and molds (CFU/g cookies)			
	W0	W1	W2	W3
CK1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CK2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CK3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CK4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CK5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

CK1 – control, CK2 – fresh peel, CK3 - 5 g encapsulated powders/100 g cookie, CK4 – 10 g encapsulated powders/100 g cookie, CK5 – 15 g encapsulated powders/100 g cookie, n.d. – not detected.

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสมบัติด้านเคมีฟิสิกส์ของเอนแคปซูเลชันน้ำมันหอมระเหยนี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [11] โดยได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชันน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งด้วยสารห่อหุ้มผสม (มอลโตเด็คซ์ตริน:กัมอะราบิก, 1:1) เปรียบเทียบกับการใช้สารห่อหุ้มแบบเดี่ยว (กัมอะราบิก เวย์โปรตีนเข้มข้น) พบว่าการใช้สารห่อหุ้มแบบผสม ($70.07 \pm 0.31\%$) มีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงกว่าการใช้กัมอะราบิก (64.16 ± 2.77) และเวย์โปรตีน ($45.40 \pm 2.60\%$) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าการใช้สารห่อหุ้มผสมส่งผลให้ประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชันอยู่ในระดับสูง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 80 ซึ่งสูงกว่าค่าที่รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [11]

สารห่อหุ้มที่แตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยเปลือกส้ม โดยสูตรที่ใช้กัมอะราบิกมีประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชันและปริมาณน้ำมันห่อหุ้มสูงที่สุด สอดคล้องกับคุณสมบัติของกัมอะราบิกที่มีความสามารถในการสร้างฟิล์มบางและมีโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสายโซ่ยาว ช่วยเพิ่มการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยและลดการสูญเสียระหว่างการทำแห้ง ในทางตรงกันข้าม การใช้โปรตีนไอโซเลต แม้จะให้ผลที่มีความหนาแน่นสูงกว่าแต่กลับมีประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชันและปริมาณน้ำมันต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากเกิดการรวมตัวกันของโปรตีนระหว่างการอบแห้งทำให้การกักเก็บน้ำมันในเมทริกซ์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่ากัมอะราบิกมีความสามารถในการเป็นสาร

ห่อหุ้มที่ติดเยื่อสำหรับกักเก็บน้ำมันหอมระเหยและสารออกฤทธิ์อื่นๆ เนื่องจากมีทั้งสมบัติการละลายน้ำดี และการสร้างชั้นฟิล์มที่เสถียร ในขณะที่โปรตีนแมงจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นและความคงตัวเชิงกลของอนุภาคแต่ยังมีข้อจำกัดในการกักเก็บสารประกอบที่ระเหยง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแซ็กคาไรด์ [11, 14, 15, 21]

คุณสมบัติเสริมกันของมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอะราบิก โดยมอลโตเดกซ์ตรินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักที่ให้ความสามารถในการทำแห้งและความคงตัวทางกายภาพ ในขณะที่กัมอะราบิกทำหน้าที่สร้างฟิล์มที่มีความสามารถกระจายตัวได้ดีและลดการสูญเสียน้ำมันหอมระเหย เมื่อผสมร่วมกันจึงเกิด synergistic effect ทำให้ได้เอนแคปซูลที่มีสมบัติเชิงกายภาพดีและมีประสิทธิภาพสูงในการกักเก็บสารประกอบที่ไวต่อการสูญเสีย [9, 11, 13, 14] ความแตกต่างนี้สะท้อนให้เห็นว่าการเลือกใช้สารห่อหุ้มแบบผสมมีความสำคัญต่อการพัฒนาเอนแคปซูลในระดับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการทั้งความเสถียรของผงและการรักษาสารออกฤทธิ์ให้อยู่ในปริมาณสูงสุดระหว่างการเก็บรักษาและการใช้งานจริง

เมื่อพิจารณาสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ปริมาณน้ำอิสระเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมสภาพของสารเอนแคปซูลมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำอิสระของเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้ง (0.25 - 0.27) กับน้ำมันหอมระเหยเมล็ดโป๊วแก้วห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้มแบบผสม (β -cyclodextrin/gum Arabic, β -cyclodextrin/sodium caseinate) ทำแห้งแบบพ่นฝอย (0.2 - 0.3) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน [7]

การใช้เวย์โปรตีนเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้สารเอนแคปซูลมีทั้งความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นแบบอัดตัวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กัมอะราบิกและฮอยโปรตีนไอโซเลต ($p < 0.05$) นอกจากนี้ การใช้เวย์โปรตีนยังส่งผลให้มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยสูงสุด (0.74 ± 0.00 g/100 g) ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยภายในเอนแคปซูลได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารห่อหุ้มประเภทอื่น ความหนาแน่นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการคั่นตัวและการบรรจุเอนแคปซูล เป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับระดับของช่องว่างระหว่างอนุภาคหรือความพรุน ความหนาแน่นของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับปัจจัยด้านการเก็บรักษา เนื่องจากอนุภาคผงที่มีความหนาแน่นสูงต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษา/บรรจุ น้อยกว่าอนุภาคผงที่มีความหนาแน่นต่ำ อีกทั้งการเลือกใช้สารห่อหุ้มแบบผสม (MD10:GA, MD10:SPI, MD10:WPI) ให้ความหนาแน่นรวมของสารเอนแคปซูลมีค่าสูงกว่าการใช้สารห่อหุ้มแบบเดี่ยว (NCEO-GA, NCEO-MD, NCEO-GA/MD) และมีผลให้สารเอนแคปซูลมีความหนาแน่นรวมต่ำกว่า [11, 26]

ความหนาแน่นที่ผ่านการอัดหรือการเคาะ เป็นความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นหลังจากตะกาศณะที่มีตัวอย่างผง โดยตัวอย่างถูกเคาะด้วยเครื่อง และอ่านค่าปริมาตรหรือมวลจนกว่าจะคงที่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของผงตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับความต้องการในการเก็บรักษา เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นรวมของเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยเปลือกส้มสายน้ำผึ้งอบแห้ง ($0.32 - 0.43$ g/cm³) กับเอนแคปซูล น้ำมันหอมระเหยเมล็ดโป๊วแก้ว ($0.2 - 0.3$ g/cm³) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ตรงกันข้ามพบว่าชนิดของสารห่อหุ้มมีผลต่อความหนาแน่นแบบอัด โดยสารห่อหุ้มแบบผสมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ทำให้เอนแคปซูล มีความหนาแน่นแบบอัดน้อยกว่าการใช้สารห่อหุ้มแบบเดี่ยว (β -cyclodextrin, gum Arabic, sodium caseinate) [7]

ในกรณีของค่าสี เอนแคปซูลที่ใช้กัมอะราบิก (MD10:GA) เป็นสารห่อหุ้มให้ค่าความสว่างสูงที่สุดแสดงให้เห็นถึงลักษณะของกัมอะราบิกที่มีความโปร่งใส มีคุณสมบัติเคลือบพื้นผิวได้ดี ช่วยให้เอนแคปซูลที่มีสีอ่อนกว่า ในขณะที่เอนแคปซูลห่อหุ้มด้วยฮอยโปรตีนไอโซเลต มีค่าความเป็นสีแดง สีเหลือง และความ

เข้มข้นสูงกว่า MD10:GA อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสัณฐานวิทยาของโพรตีนที่มีความเข้มข้นกว่าทำให้มีสีเหลืองอ่อน ร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดบางส่วนระหว่างการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้ค่าเอนทัลปีลดลงในกลุ่มเอนแคปซูล MD10:SPI สะท้อนถึงแนวโน้มของสีที่เข้มเอียงไปทางสีแดงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นสีแดงและสีเหลือง ข้อมูลเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าสารทอหุ้มที่ใช้มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อคุณสมบัติด้านสีของเอนแคปซูล และเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ในเชิงอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากสัมผัสกับความน่าดึงดูดใจทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

การวิเคราะห์โครงสร้างอนุภาคด้วยเทคนิค FTIR แสดงให้เห็นจุดพิกที่เป็นลักษณะเด่นของน้ำมันหอมระเหยเปลือกส้ม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหอมระเหยประเภทอื่น เช่น น้ำมันหอมระเหยออริกาน (2920, 2856, 1734, 1457, 1093 cm^{-1}) [22] และน้ำมันหอมระเหยจากขิง (3473, 2920, 1674, 1444, 1377, 883 cm^{-1}) [27] จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน ภายหลังจากการเอนแคปซูลด้วยสารทอหุ้มตำแหน่งของพิกเกิดการเคลื่อนตัวเล็กน้อย แต่ยังปรากฏตำแหน่งที่สำคัญที่บ่งชี้ว่าน้ำมันหอมระเหยมีการกักเก็บไว้ได้สำเร็จจากสารทอหุ้ม การปรากฏของพิกเหล่านี้ยืนยันได้น้ำมันหอมระเหยถูกกักเก็บไว้ในโครงสร้างเอนแคปซูลโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างมีนัยสำคัญหลังผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้ตำแหน่งของพิกที่ไม่พบการหายไปของสเปกตรัมสำคัญบ่งชี้ถึงการคงสภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความเข้ากันได้ทางเคมีระหว่างสารทอหุ้มกับน้ำมันหอมระเหย [21, 22] และช่วยกักเก็บน้ำมันหอมระเหย ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยผลการศึกษาปริมาณน้ำมันคงเหลือระหว่างการเก็บรักษาที่ยังคงพบปริมาณน้ำมันหอมระเหยในเอนแคปซูลที่ระยะสิ้นสุดการเก็บรักษาในสัปดาห์ที่ 4 มากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง [11]

การเสริมเอนแคปซูลในผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่ระดับ 5 กรัม ต่อคุกกี้ 100 กรัม ช่วยให้คุกกี้มีความแข็งแรงและความกรอบใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สูตรควบคุม ผลิตภัณฑ์คุกกี้สูตร CK1 และ CK2 ได้รับการยอมรับสูงสุดทั้งด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม สะท้อนให้เห็นว่าการเสริมเปลือกส้มสดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มลักษณะด้านสีและกลิ่นโดยไม่กระทบคุณภาพด้านอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่า การใช้ผลเปลือกส้มสดในเบเกอรี่สามารถเพิ่มคะแนนการยอมรับด้านสีและกลิ่นได้ [12] ในทางตรงกันข้าม การเสริมเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยในระดับสูง (CK4, CK5) ส่งผลให้คะแนนลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากโครงสร้างเอนแคปซูลที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดไปเพิ่มความหนาแน่นของแป้ง ทำให้เกิดความแข็งหรือร่วนมากขึ้น จึงลดความชอบด้านเนื้อสัมผัส [12] นอกจากนี้สีของคุกกี้สูตร CK4 ยังได้คะแนนต่ำที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเมลลาร์ด หรือการเกิดสีน้ำตาลเข้มจากองค์ประกอบคาร์โบไฮเดรต-โปรตีน ในผงเอนแคปซูล [12, 17] สำหรับด้านรสชาติและกลิ่นรส พบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างสูตรคุกกี้ทั้งหมด แสดงว่าเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยในระดับที่ใช้อาจยังเสริมรสชาติได้ไม่ชัดเจนเพียงพอที่จะกระทบการรับรู้ของผู้บริโภค ซึ่งแตกต่างจากรายงานของ [12] ที่พบว่า การเติมน้ำมันหอมระเหยในเบเกอรี่มีผลต่อกลิ่นรสอย่างมีนัยสำคัญ การใช้เอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยในระดับต่ำ (CK3) ยังสามารถให้ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ได้ใกล้เคียงกับสูตรควบคุม แต่การใช้ในระดับสูงกว่ามีแนวโน้มลดคุณภาพทางประสาทสัมผัสลง ดังนั้น ในเชิงอุตสาหกรรมควรพิจารณาปริมาณเอนแคปซูลที่เหมาะสมเพื่อสร้างสมดุลระหว่างคุณค่าทางโภชนาการและการยอมรับของผู้บริโภค

การเติมสารเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยเปลือกส้มในปริมาณสูง (10 – 15 g/100 g) ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของคุกกี้ชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการที่เอนแคปซูลทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็ม (filler) ในโครงสร้างแป้ง ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นจึงต้องใช้แรงกดสูงกว่าในการแตกหัก ทั้งนี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่พบว่าการเสริมเส้นใยอาหารหรืออนุภาคผงพืชในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่สามารถเพิ่มความแข็งแรง

และความหนาแน่นของโครงสร้างได้ [24, 25] ในขณะที่ค่าการแตกออกจากกัน (fracturability) ของคุกกี้ที่เสริมเอนแคปซูลในระดับปานกลางมีค่าสูงในช่วงแรก แต่เมื่อเก็บรักษานานขึ้นกลับมีแนวโน้มลดลงซึ่งอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความชื้นและการเสริมสภาพของโครงสร้างสตาร์ช-โปรตีนระหว่างการเก็บรักษา

ผลการศึกษาการหมิ่นเหม่ชี้ให้เห็นว่าการเสริมเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยมีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในคุกกี้ โดยค่า TBA ของสูตร CK3, CK4 และ CK5 มีค่าต่ำกว่าสูตร CK1 อย่างชัดเจนตลอดช่วงการเก็บรักษา โดยเฉพาะสูตร CK5 ที่มีค่า TBA ต่ำและคงที่ที่สุด เอนแคปซูลที่เสริมในผลิตภัณฑ์คุกกี้ทำหน้าที่เป็นตัวกั้น (barrier) ป้องกันการสัมผัสของน้ำมันหอมระเหยกับออกซิเจนและแสงซึ่งเป็นตัวกระตุ้นการเกิด lipid peroxidation [1, 2, 11, 14] นอกจากนี้ สารประกอบฟีนอลิกในน้ำมันหอมระเหยเปลือกลิ่มยังอาจทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระโดยตรง ทำให้ช่วยลดการเกิดมาลอนไดอัลดีไฮด์ได้ ในทางกลับกัน สูตร CK1 แสดงค่า TBA สูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 3 ซึ่งเกินค่าของทุกสูตรที่เสริมเอนแคปซูลอย่างมีนัยสำคัญ

การตรวจสอบคุณภาพด้านจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์คุกกี้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 21 วันพบว่าคุกกี้สูตร CK1 และสูตร CK2 มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในวันที่ 14 แม้จะอยู่ในระดับต่ำ (< 25 CFU/g) ในขณะที่สูตรที่เติมผงเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยเปลือกลิ่ม (CK3 – CK5) ไม่พบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของสารออกฤทธิ์ในผงเอนแคปซูลในการต้านจุลินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่กำหนดให้มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม) พบว่าผลิตภัณฑ์คุกกี้เสริมเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ผลการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการใช้เอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยจากโหระพาเป็นวัตถุดิบเสียดตามธรรมชาติในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ [28] พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ด้วยความเข้มข้นต่ำสุดระหว่าง 0.125 ถึง 0.60 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และพบว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ตั้งแต่ 1.1 ถึง 1.8 CFU/g แสดงให้เห็นว่าเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยมีคุณสมบัติช่วยในการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในผลิตภัณฑ์คุกกี้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของน้ำมันหอมระเหย น้ำมันหอมระเหยมีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงทำให้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาไม่พบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ โดยกลไกในการต่อต้านแบคทีเรียของน้ำมันหอมระเหยเกิดเนื่องจากคุณสมบัติในการไม่ชอบน้ำของน้ำมันหอมระเหยและส่วนประกอบ ทำให้น้ำมันหอมระเหยสามารถแทรกตัวเข้าไปคั่นในส่วนไขมันที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียและไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ทำให้ผนังเซลล์ของแบคทีเรียเกิดการซึมผ่านเข้าออกระหว่างสารภายนอกกับภายในเซลล์มากขึ้นและส่งผลให้เซลล์ตาย แสดงให้เห็นว่าเอนแคปซูลน้ำมันหอมระเหยมีคุณสมบัติช่วยในการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในผลิตภัณฑ์คุกกี้ซึ่งเป็นคุณสมบัติของน้ำมันหอมระเหย [28] อีกทั้งน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกลิ่มมีสารประกอบฟีนอลิกและเทอร์ปีนอยด์ โดยเฉพาะลิโมนีน (limonene) ซึ่งได้รับการยอมรับในวงวิชาการว่ามีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียและราหลายชนิด [28, 29] อย่างไรก็ตาม น้ำมันหอมระเหยบริสุทธิ์มีการระเหยสูงและเสื่อมสภาพง่ายเมื่อต้องสัมผัสกับแสง อากาศ หรือความร้อนในกระบวนการผลิตอาหาร ดังนั้น การนำเทคโนโลยีเอนแคปซูลเข้ามาใช้จึงช่วยเพิ่มความคงตัวของสารออกฤทธิ์ได้ เพิ่มประสิทธิภาพในการปลดปล่อยสารและต่อเนื่องตลอดช่วงอายุผลิตภัณฑ์

ประสิทธิภาพในการควบคุมจุลินทรีย์ยังสอดคล้องกับคุณสมบัติทางกายภาพของคุกกี้ โดยจากการศึกษาก่อนหน้านี้นพบว่าผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่มีการเติมเอนแคปซูลมีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นระดับ

ที่ไม่เอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ [30] รวมทั้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและลดความเสี่ยงในการเน่าเสีย นอกจากนี้ การไม่พบยีสต์และราในผลิตภัณฑ์คุกกี้ทั้ง 5 สูตรแสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบภายใต้สภาวะที่ควบคุมอย่างเหมาะสม อีกทั้งสูตรที่เสริมเอนแคปซูเลชันยังมีคุณสมบัติในการป้องกันการปนเปื้อนเพิ่มเติม จึงเหมาะสมสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ขนมอบเพื่อสุขภาพที่เน้นความปลอดภัยและความคงตัวในระยะยาว

การศึกษาในครั้งนี้ ประสบผลสำเร็จในการพัฒนาเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชันน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้ง โดยใช้เทคนิคการกลั่นด้วยไอน้ำร่วมกับการเอนแคปซูเลชันด้วยสารห่อหุ้มแบบผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอะราบิก การเสริมเอนแคปซูเลชันในผลิตภัณฑ์คุกกี้สามารถยกระดับกลิ่น สี และความชอบโดยรวม โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยทางจุลชีววิทยา แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เอนแคปซูเลชันน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มสายน้ำผึ้งเป็นองค์ประกอบเชิงหน้าที่ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ เบเกอรี่เพื่อเพิ่มทั้งคุณภาพและความปลอดภัย

References

- [1] Manakas, P., et al. (2024). Sustainability Assessment of Orange Peel Waste Valorization Pathways From Juice Industries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15, 6525-6544.
- [2] Putnik, P., et al. (2018). Novel Food Processing and Extraction Technologies of High Added Value Compounds From Plant Materials. *Foods*, 7(7), 106.
- [3] Sakkaekaw, K. (2020). Benefits of Pectin From Food Waste. *Dusit Thani College Journal*, 14(1), 487-499. (in Thai)
- [4] del Carmen Razola-Diaz, M., et al. (2021). Recent Developments in Extraction and Encapsulation Techniques of Orange Essential Oil. *Food Chemistry*, 354, 129575.
- [5] Gouin, S. (2004). Microencapsulation: Industrial Appraisal of Existing Technologies and Trends. *Trends in Food Science and Technology*, 15(7-8), 330-347.
- [6] Torres-Alvarez, C., et al. (2017). Chemical Composition, Antimicrobial, and Antioxidant Activities of Orange Essential Oil and Its Concentrated Oils. *CYTA-Journal of Food*, 15(1), 129-135.
- [7] Chew, S. C., et al. (2018). Microencapsulation of Refined Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) Seed Oil by Spray Drying Using B-Cyclodextrin/Gum Arabic/Sodium Caseinate. *Journal of Food Engineering*, 237, 78-85.
- [8] Boonsom, T., & Dumklian, E. (2018). Microencapsulation of Essential Oils by Spray Drying: Effect of Wall Material Composition and Process Conditions. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 12(2), 48-62. (in Thai)
- [9] Giorgio, L. D., et al. (2019). Encapsulation of Fish Oil in Soybean Protein Particles by Emulsification and Spray Drying. *Food Hydrocolloids*, 87, 891-901.
- [10] Francisco, C. R. L., et al. (2020). Plant Proteins at Low Concentrations as Natural Emulsifiers

- for an Effective Orange Essential Oil Microencapsulation by Spray Drying. *Colloids and Surfaces A*, 607, 125470.
- [11] Bajac, J., et al. (2022). Microencapsulation of Juniper Berry Essential Oil (*Juniperus communis* L.) by Spray Drying: Microcapsule Characterization and Release Kinetics of the Oil. *Food Hydrocolloids*, 125, 107430.
- [12] Al-Saab, A. H., & Gadallah, M. G. (2021). Phytochemicals, Antioxidant Activity and Quality Properties of Fibre Enriched Cookies Incorporated With Orange Peel Powder. *Food Research*, 5(4), 72–79.
- [13] Kareng, C., & Chekho, N. (2004). *Extraction of Essential Oil From Pummelo Peel* (Bachelor's project, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University). (in Thai)
- [14] Karrar, E., et al. (2021). Effect of Maltodextrin Combination With Gum Arabic and Whey Protein Isolate on the Microencapsulation of Gurum Seed Oil Using a Spray-Drying Method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 171, 208-216.
- [15] Sakulnarmrat, K., et al. (2021). Microencapsulation of Red Cabbage Anthocyanin-Rich Extract by Drum Drying Technique. *LWT - Food Science and Technology*, 137, 110473.
- [16] AOAC. (2019). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (21st ed.). AOAC International.
- [17] Junton, R., et al. (2020). Product Development of Cookies Supplemented With Extracted Pomelo Peel Pectin. *Journal of Roi Et Rajabhat University: Science and Technology*, 1(2), 27-35. (in Thai)
- [18] de Leon, J. A. D., & Borges, C. R. (2020). Evaluation of Oxidative Stress in Biological Samples Using the Thiobarbituric Acid Reactive Substances Assay. *Journal of Visualized Experiments*, 12(159), e61122.
- [19] Zhang, G., et al. (2026, January). *Aerobic Plate Count* (Chapter 3). In U.S. Food and Drug Administration, *Bacteriological analytical manual (BAM)*.
- [20] AOAC. (2000). *Official Methods 920.149* (17th ed., Vol. 2). Association of Official Analytical Chemist.
- [21] Parhizkary, M., et al. (2025). Spray-Drying Encapsulation of Jujube Extract: Enhancing Bioactivity and Stability via Maltodextrin-Based Carriers With Polysaccharides and Proteins. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 10, 100869.
- [22] Hernandez-Nava, R., et al. (2020). Encapsulation of Oregano Essential Oil (*Origanum vulgare*) by Complex Coacervation Between Gelatin and Chia Mucilage and Its Properties After Spray Drying. *Food Hydrocolloids*, 109, 106077.
- [23] Marcus, J. B. (2013). Lipids Basics: Fats and Oils in Foods and Health. In J. B. Marcus (Ed.), *Culinary Nutrition* (p. 231-277). Academic Press.
- [24] Sridhar, K., et al. (2024). Plant and Animal Protein Mixed Systems as Wall Material for

- Microencapsulation of Manuka Essential Oil: Characterization and In Vitro Release Kinetics. *Food Research International*, 187, 114419.
- [25] O'Shea, N., et al. (2015). Modeling the Effects of Orange Pomace Using Response Surface Design for Gluten-Free Bread Baking. *Food Chemistry*, 166, 223-230.
- [26] Mahdi, A. A., et al. (2022). Nanoencapsulation of Mandarin Essential Oil: Fabrication, Characterization, and Storage Stability. *Foods*, 11, 54.
- [27] Ekrami, M., et al. (2023). Ginger Essential Oil (*Zingiber officinale*) Encapsulated in Nanoliposome as Innovative Antioxidant and Antipathogenic Smart Sustained-Release System. *Food Bioscience*, 53, 102796.
- [28] Gonçalves, N. D., et al. (2017). Encapsulated Thyme (*Thymus vulgaris*) Essential Oil Used as a Natural Preservative in Bakery Product. *Food Research International*, 96, 154-160.
- [29] Burt, S. (2022). Essential Oils: Their Antibacterial Properties and Potential Applications in Foods – A Review. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3), 223-253.
- [30] Hedegaard, R. V., & Skibsted, L. H. (2013). Shelf-Life of Food Powders. In B. Bhandari, et al. (Eds.), *Handbook of Food Powders: Processes and Properties* (p. 409-434). Woodhead Publishing.