

เอนแคปซูเลชันสารสกัดรอกสุกรที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENCAPSULATION OF PORCINE PLACENTA EXTRACT WITH ANTIOXIDANT ACTIVITY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | เอนแคปซูเลชันสารสกัดรสสุกรที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน |
| โดย | น.ส.พรภัสสร จุฬาลักษณ์านุกูล |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีทางอาหาร |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.กิติพงษ์ อัครกุล |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวณิช)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิติพงษ์ อัครกุล)

----- กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

พรภัสสร จุฬาลักษณ์านุกุล : เอนแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน. (ENCAPSULATION OF PORCINE PLACENTA EXTRACT WITH ANTIOXIDANT ACTIVITY) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กิติพงษ์ อัครกุล

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการสกัดรกสุกร (porcine placenta) โดยการสกัดไขมันออกด้วยสารละลาย n-hexane ต่อสมบัติของโปรตีนและฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัด ศึกษาภาวะการผลิตไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกรต่อสมบัติของโปรตีน สมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูล โดยแปรภาวะการใช้อุณหภูมิเข้า (165 และ 175 องศาเซลเซียส) ชนิดของสารห่อหุ้ม (มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยและกัมอารบิก) และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม (40% และ 45% w/v) และศึกษาผลของภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน โดยใช้บรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด (ถุงอลูมิเนียมฟอยล์และถุงพลาสติก HDPE) และภาวะการบรรจุ 2 ภาวะ (ภายใต้ภาวะสุญญากาศและภายใต้ภาวะบรรยากาศ) ต่อคุณภาพของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 90 วัน โดยผลการทดลองพบว่า การสกัดไขมันกับไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกรด้วยสารละลาย n-hexane ส่งผลทำให้ความเข้มข้นโปรตีนลดลง จาก 1.60 เป็น 1.22 mg/ml และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีค่าลดลง จาก 3.53 ± 0.11 mM TE/g db. และ 5.26 ± 0.16 mM FeSO₄/g db. เป็น 2.61 ± 0.08 mM TE/g db. และ 4.80 ± 0.27 mM FeSO₄/g db ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนของสารสกัดทั้งสองชนิดพบแถบของโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มากกว่า 200 kDa และขนาดเล็กต่ำกว่า 10 kDa โดยพบว่าโปรตีนส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 25 ถึง 100 kDa อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลาย n-hexane ในการสกัดไขมันออกจากรกสุกรไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมวลโมเลกุลของโปรตีน และเลือกสารสกัดรกสุกรที่ผ่านการสกัดไขมันออกด้วย n-hexane ไปใช้ในขั้นตอนต่อไป และจากผลการศึกษาการเอนแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่าทุกปัจจัยในภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรส่งผลต่อสมบัติของโปรตีน สมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีความเข้มข้นโปรตีนในช่วง 0.66 ± 0.02 ถึง 3.93 ± 0.23 mg/g และผงไมโครแคปซูลมีสีเหลืองอมแดงอ่อน มีร้อยละผลผลิตในช่วง $43.58 \pm 3.56\%$ ถึง $86.45 \pm 1.40\%$ มีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำกว่า 0.2 และร้อยละความชื้นต่ำกว่า 5% มีความสามารถละลายในน้ำได้ในช่วง $73.17 \pm 0.76\%$ ถึง $96.67 \pm 0.47\%$ โดยมีประสิทธิภาพการกักเก็บสารต้านออกซิเดชันในช่วง $85.88 \pm 1.22\%$ ถึง $97.99 \pm 0.15\%$ รวมทั้งมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ในช่วง 44.1 ถึง 61.5 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มมีรูปร่างทรงกลม พื้นผิวเรียบมากกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลมีค่าเพิ่มขึ้นจากสารสกัดเริ่มต้น โดยมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP ในช่วง 11.56 ± 1.23 ถึง 18.92 ± 0.84 mM TE/g db. และ 6.40 ± 0.83 ถึง 16.37 ± 0.85 mM FeSO₄/g db. ตามลำดับ โดยภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP และความเข้มข้นโปรตีนสูงสุด คือ ภาวะการใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม ที่ความเข้มข้น 40% w/v และอุณหภูมิเข้า 165 องศาเซลเซียส โดยผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรภาวะนี้มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP และความเข้มข้นโปรตีนเท่ากับ 18.92 ± 0.84 mM TE/g db. 16.37 ± 0.85 mM FeSO₄/g db. และ 3.93 ± 0.23 mg/g ตามลำดับ และเลือกภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรนี้ไปใช้ในการศึกษาอายุการเก็บรักษาโดยแปรภาวะการเก็บรักษาและติดตามสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร (ค่าปริมาณความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ ค่าความสามารถในการละลายน้ำ ค่าสี (L*, a*, b* และ ΔE) และฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน) ที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา โดยพบว่าผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีค่าปริมาณความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ และค่าความแตกต่างของสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความสามารถในการละลายและฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น การใช้บรรจุภัณฑ์อลูมิเนียมฟอยล์และการบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศเป็นภาวะการเก็บรักษาที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างน้อยกว่าการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติก HDPE และการบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ อย่างไรก็ตาม ชนิดของบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุไม่ส่งผลทำให้สมบัติของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษา 90 วัน งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตและการเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลสารสกัดโปรตีนที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
 ปริญญาโท 2564
 ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370127623 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORD: Porcine placenta, Antioxidant activity, Encapsulation

Pornpassorn Chulalaksananukul : ENCAPSULATION OF PORCINE PLACENTA EXTRACT WITH ANTIOXIDANT ACTIVITY.

Advisor: Assoc. Prof. Dr. KITIPONG ASSATARAKUL, Ph.D.

The objective of this study was to evaluate the effect of lipid-removing process from porcine placenta on protein characteristics and antioxidant activity (DPPH and FRAP assays), to investigate the effects of microencapsulation by spray drying on protein properties, physical-chemical properties, and antioxidant properties of porcine placenta microcapsules by varying inlet temperatures (165 and 175 °C), wall materials (resistant maltodextrin and gum Arabic), and wall material concentration (40% and 45 w/v) and to study the effects of packaging types (aluminum foil bag and high-density polyethylene plastic bag or HDPE) and packaging conditions (under vacuum and under atmospheric conditions) on porcine placenta microcapsules properties during storage at room temperature for 90 days. The results from the first objective showed that lipid removal caused a decrease in protein concentration from 1.60 to 1.22 mg/ml, and antioxidant activity (DPPH and FRAP) from 3.53±0.11 mM TE/g db. and 5.26±0.16 mM FeSO₄/g db to 2.61±0.08 mM TE/g db. and 4.80±0.27 mM FeSO₄/g db, respectively. The protein patterns showed that most proteins were clearly in the range 25 to 100 kDa and lipid extraction had no effects ($p>0.05$) on molecular structures of protein. The results of encapsulation on physical-chemical properties and antioxidant activity were significant ($p\leq 0.05$). The protein concentration of microcapsules was in the range of 0.66±0.02 to 3.93±0.23 mg/g. The percentage of yield was in the range of 43.58±3.56% to 86.45±1.40%, water activity less than 0.2 and percentage of moisture less than 5%, water solubility in the range of 73.17±0.76% to 96.67±0.47%, with encapsulation efficiency in the range of 85.88±1.22% to 97.99±0.15% and glass transition temperature was in the range of 44.1 to 61.5 °C. The microcapsules were light yellowish-red in color. The results from scanning electron microscope (SEM) showed that the porcine placenta extract microcapsule prepared by gum Arabic as a coating material had a spherical shape, smooth surface and less shrinkage than porcine placenta extract microcapsules prepared by resistant maltodextrin. Moreover, the antioxidant activity of the microcapsules was increased compared to the extract. The antioxidant activity by DPPH and FRAP methods ranged from 11.56±1.23 to 18.92±0.84 mM TE/g db. and 6.40±0.83 to 16.37±0.85 mM FeSO₄/g db., respectively. The highest antioxidant activity and protein concentration was found in the sample prepared by the condition of using gum Arabic as wall material at concentration of 40% w/v and an inlet temperature of 165°C in which the antioxidant activity (DPPH and FRAP methods), and the protein concentration were 18.92±0.84 mM TE/g db., 16.37±0.85 mM FeSO₄/g db. and 3.93±0.23 mg/g, respectively. Consequently, porcine placenta extract microcapsule prepared by gum Arabic as a coating material at concentration 40% w/v was used in storage experiment by varying types and conditions of packaging on microcapsule properties. The results showed that moisture content, water activity, color difference (ΔE^*) of all samples tended to increase during the storage; however, the solubility and antioxidant activity by DPPH and FRAP assays were decreased. In addition, porcine placenta extract microcapsule packed in aluminum foil bag under vacuum condition had slightly changed in sample's properties compared to samples packed in HDPE bag under atmosphere condition. However, packaging types and packing conditions did not significantly affect the protein properties of porcine placenta extract microcapsule during storage for 90 days ($p>0.05$). In conclusion, this research could be used as a guideline for the development of microencapsulation of bioactive peptide with preserved antioxidant activity.

Field of Study: Food Technology

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณบางส่วนจากโครงการ "การพัฒนาโภชนเภสัชภัณฑ์จาก ส่วนประกอบฟังก์ชันของรอกหมู" ซึ่งได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถ ในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) สัญญาเลขที่ C10F640021 และได้รับการสนับสนุนวัสดุดิบในโครงการจากกลุ่ม สหกรณ์การเกษตรปศุสัตว์ราชบุรี และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กิติพงศ์ อัครกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย และคอยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มงานวิจัยจนสิ้นสุด งานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา พ่วง ประพันธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ ที่กรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังให้ คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณบัณฑิตศึกษาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้สนับสนุนทุนอุดหนุนการศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษา เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาศที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงพระเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา สำหรับค่าเล่าเรียน 4 ภาคการศึกษา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ประจำตึกภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร รวมถึงเจ้าหน้าที่ประจำ ห้องปฏิบัติการทุกชั้น สำหรับการให้คำแนะนำในอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ และขอบคุณเพื่อน ๆ ในหลักสูตร ปริญญาโทบัณฑิต ฟ้า ๆ หลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต และเพื่อน ๆ นอกภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารที่คอยช่วย สนับสนุน ให้คำแนะนำ และช่วยดูแลมาตลอดตั้งแต่เริ่มงานวิจัยจนกระทั่งสิ้นสุดงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้การช่วยเหลือ สนับสนุน และให้กำลังใจเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พรภัสสร จุฬาลักษณ์านุกูล

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....ค | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง | ง |
| กิตติกรรมประกาศ.....จ | จ |
| สารบัญ.....ฉ | ฉ |
| สารบัญตาราง.....ญ | ญ |
| สารบัญรูปภาพ.....ฎ | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... 1 | 1 |
| บทที่ 2 วารสารปริทัศน์..... 3 | 3 |
| 2.1 รก (placenta)..... 3 | 3 |
| 2.1.1 กายวิภาคทั่วไปของรก..... 3 | 3 |
| 2.2 รกสุกร (porcine placenta)..... 5 | 5 |
| 2.3 ฮอโมน (hormone)..... 7 | 7 |
| 2.4 ไบโอแอคทีฟเปปไทด์ (Bioactive peptides)..... 8 | 8 |
| 2.5 อนุมูลอิสระ (Free radical)..... 9 | 9 |
| 2.5.1 อนุมูลอิสระแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่..... 9 | 9 |
| 2.5.2 ขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ..... 10 | 10 |
| 2.6 สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant)..... 11 | 11 |
| 2.7 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)..... 13 | 13 |
| 2.8 เทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน (encapsulation technology)..... 14 | 14 |
| 2.8.1 เทคโนโลยีเอนแคปซูเลชันประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก 14 | 14 |
| 2.9 กระบวนการทำแห้ง (drying process)..... 20 | 20 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.10 | บรรจุภัณฑ์อาหาร..... | 23 |
| 2.10.1 | วัสดุที่นำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ | 23 |
| บทที่ 3 | การดำเนินงานวิจัย | 26 |
| 3.1 | การเตรียมตัวอย่างรกสุกร..... | 27 |
| 3.2 | การศึกษาผลของกระบวนการกำจัดไขมันต่อสมบัติของสารสกัดรกสุกร..... | 28 |
| 3.3 | การศึกษาผลของภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร | 28 |
| 3.4 | การศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์และภาวะการเก็บรักษาต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา | 29 |
| 3.6 | การวิเคราะห์ผลทางสถิติ..... | 30 |
| บทที่ 4 | ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง..... | 31 |
| 4.1 | การศึกษาผลของกระบวนการกำจัดไขมันต่อสมบัติของสารสกัดรกสุกร..... | 31 |
| 4.1.1 | ความเข้มข้นโปรตีนและมวลโมเลกุลโปรตีนของสกัดรกสุกร | 31 |
| 4.1.2 | ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัดรกสุกร..... | 32 |
| 4.2 | การศึกษาผลของภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร | 33 |
| 4.2.1 | ความเข้มข้นโปรตีน รูปแบบ และมวลโมเลกุลโปรตีน..... | 33 |
| 4.2.2 | ร้อยละผลผลิต (%yeild)..... | 36 |
| 4.2.3 | ค่าความชื้น (%moisture content) และค่ากิจกรรมของน้ำ (a_w)..... | 38 |
| 4.2.4 | ความสามารถในการละลายน้ำ (%solubility)..... | 41 |
| 4.2.5 | ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (%encapsulation efficiency) ... | 42 |
| 4.2.6 | ค่าสี L^* a^* และ b^* | 44 |
| 4.2.7 | อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g)..... | 47 |
| 4.2.8 | ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP | 48 |
| 4.2.9 | การศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิว..... | 52 |

| | |
|---|----|
| 4.3. การศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุก ระหว่างการรักษา..... | 56 |
| 4.3.1 ความเข้มข้นโปรตีน รูปแบบ และมวลโมเลกุลโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรส สุกระหว่างการรักษา..... | 56 |
| 4.3.2 ค่าปริมาณความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกระหว่างการรักษา..... | 65 |
| 4.3.3 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกระหว่างการรักษา | 66 |
| 4.3.3 ค่าความสามารถในการละลายน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกระหว่างการรักษา..... | 67 |
| 4.3.4 ค่าสี L^* , a^* , b^* และความแตกต่างของสี (ΔE) ของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุก ระหว่างการรักษา..... | 68 |
| 4.3.5 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และวิธี FRAP ของไมโครแคปซูลสารสกัดรส สุกระหว่างการรักษา..... | 72 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... | 76 |
| ข้อเสนอแนะ | 77 |
| บรรณานุกรม | 78 |
| ภาคผนวก | 91 |
| ภาคผนวก ก | 92 |
| ก.1 ปริมาณความชื้น (%moisture content) ตามวิธีของ AOAC (2000)..... | 92 |
| ก.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity, a_w) ตามวิธีของ AOAC (2000)..... | 92 |
| ก.3 ค่าสี ระบบ CIE LAB ด้วยเครื่อง chroma meter..... | 92 |
| ก.4 ผลผลิตร้อยละที่ได้ (%encapsulation yield) จากวิธี Ramakrishnan และคณะ (2018).. | 92 |
| ก.5 ประสิทธิภาพการกักเก็บของสารต้านออกซิเดชัน (%encapsulation efficiency) ดัดแปลง จากวิธี Saénz และคณะ (2009) | 93 |
| ก.6 ความสามารถในการละลาย (%solubility) ดัดแปลงวิธีจาก Wang และคณะ (2020)..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| ก.7 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ดัดแปลงวิธีจาก Silva และคณะ (2012)..... | 94 |
| ก.8 ลักษณะรูปร่างภายนอกของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)..... | 94 |
| ภาคผนวก ข | 95 |
| ข.1 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ดัดแปลงตามวิธีของ Teng และคณะ (2013) และ Brand-William และคณะ (1995) | 95 |
| ข.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ด้วยวิธี ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) ดัดแปลงวิธีจาก Benzie และ Strain (1996) | 98 |
| ข.3 การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน (Protein quantitative assay) จากวิธี Bradford M (1976) | 101 |
| ข.4 การวิเคราะห์โปรตีนด้วยเทคนิค SDS-polyacrylamide gel electrophoresis จากวิธี Sambrook และคณะ (1989)..... | 101 |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม | 102 |
| ประวัติผู้เขียน | 107 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีในรกสุกรของการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ..... | 6 |
| ตารางที่ 2.2 ปริมาณแร่ธาตุ (ppm) และ α - tocopherol (IU/kg) ของรกสุกรจากวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน | 6 |
| ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณของฮอร์โมนที่สะสมในรกสุกรด้วยวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน..... | 8 |
| ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดคุณภาพของกัมอาราบิกทางสากล | 19 |
| ตารางที่ 3.1 ชนิดบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร..... | 30 |
| ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นโปรตีนในตัวอย่างสารสกัดรกหมู | 31 |
| ตารางที่ 4.2 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP ของสารสกัดรกสุกร..... | 33 |
| ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร..... | 34 |
| ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร..... | 48 |
| ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นโปรตีนของผงไมโครแคปซูลในระหว่างการเก็บรักษา..... | 57 |
| ตารางที่ 4.6 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง..... | 74 |
| ตารางที่ 4.7 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง..... | 75 |
| ตารางที่ ข.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox | 96 |
| ตารางที่ ข.2 วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน FeSO ₄ ความเข้มข้นต่าง ๆ..... | 99 |

สารบัญรูปร่างภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 ลักษณะรอกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในรูปแบบแตกต่างกัน | 4 |
| รูปที่ 2.2 ลักษณะชั้นเนื้อเยื่อระหว่างรอกของเซลล์มารดาและเซลล์ตัวอ่อน | 5 |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างของรอกสุกรก่อนตัดแต่ง..... | 5 |
| รูปที่ 2.4 ชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนในผงไฮโดรไลเสตจากสารสกัดรอกสุกรเมื่อผ่านกระบวนการ ทำแห้งแบบเยือกแข็ง..... | 7 |
| รูปที่ 2.5 ตัวอย่างอนุภาคอนุมูลอิสระและอนุภาคที่ไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระแบ่งประเภทตาม องค์ประกอบในโครงสร้าง..... | 9 |
| รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระจากกรดไขมันไม่อิ่มตัว..... | 10 |
| รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาระหว่างสารละลาย DPPH กับสารต้านออกซิเดชัน..... | 12 |
| รูปที่ 2.8 โครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของสารละลาย FRAP ที่เปลี่ยนไปในหลังจากทำปฏิกริยากับ สารต้านออกซิเดชัน | 12 |
| รูปที่ 2.9 วิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) | 13 |
| รูปที่ 2.10 วิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว (solid-liquid extraction) ด้วยชุดสกัดชอกท์เลต | 14 |
| รูปที่ 2.11 โครงสร้างอนุภาคในเทคโนโลยีเอนแคปซูลชัน..... | 14 |
| รูปที่ 2.12 มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย..... | 15 |
| รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย | 16 |
| รูปที่ 2.14 โครงสร้างมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย..... | 17 |
| รูปที่ 2.15 กัมอาราบิกที่ได้มาจากต้น Acacia | 18 |
| รูปที่ 2.16 โครงสร้างกัมอาราบิก..... | 19 |
| รูปที่ 2.17 การทำแห้งผลไม้ด้วยดวงอาทิตย์ | 21 |
| รูปที่ 2.18 การทำแห้งผลไม้ด้วยการทำแห้งเยือกแข็ง | 21 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.19 กราฟแสดงร้อยละการเลือกใช้เทคโนโลยีการแปรรูปในการห่อหุ้มสารรวมทุกประเทศทั่วโลก | 22 |
| รูปที่ 2.20 การทำแห้งแบบพ่นฝอย | 22 |
| รูปที่ 2.21 โครงสร้างหลักของพอลิเอทิลีน | 24 |
| รูปที่ 2.22 ลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันของพลาสติกพอลิเอทิลีน | 24 |
| รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์มวลโมเลกุลโปรตีนในสารสกัดรกสุกร ด้วยเทคนิค SDS-PAGE | 32 |
| รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนในผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรในภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิเข้า 165 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค SDS-PAGE | 35 |
| รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนในผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรในภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิเข้า 175 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค SDS-PAGE | 36 |
| รูปที่ 4.4 ร้อยละผลผลิตทั้งหมด (%) ของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร | 38 |
| รูปที่ 4.5 ร้อยละความชื้นของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร | 40 |
| รูปที่ 4.6 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร | 40 |
| รูปที่ 4.7 ค่าความสามารถในการละลายน้ำของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร | 42 |
| รูปที่ 4.8 ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บสารต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร | 44 |
| รูปที่ 4.9 ค่า L^* ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร | 45 |
| รูปที่ 4.10 ค่า a^* ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร | 46 |
| รูปที่ 4.11 ค่า b^* ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร | 46 |
| รูปที่ 4.12 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของสารสกัดรกสุกรและผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร | 51 |
| รูปที่ 4.13 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP ของสารสกัดรกสุกรและผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร | 51 |
| รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1000 เท่า | 54 |
| รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1000 เท่า | 55 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์หมวลโมเลกุลโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 1 (วันที่ 0) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE..... | 58 |
| รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์หมวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 2 (วันที่ 15) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE..... | 59 |
| รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์หมวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 3 (วันที่ 30) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE..... | 60 |
| รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์หมวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 4 (วันที่ 45) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE..... | 61 |
| รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์หมวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 5 (วันที่ 60) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE..... | 62 |
| รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์หมวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 6 (วันที่ 75) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE..... | 63 |
| รูปที่ 4.22 การวิเคราะห์หมวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 7 (วันที่ 90) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE..... | 64 |
| รูปที่ 4.23 ค่าความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 66 |
| รูปที่ 4.24 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 67 |
| รูปที่ 4.25 ความสามารถในการละลายของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 68 |
| รูปที่ 4.26 ค่า L^* ของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 70 |
| รูปที่ 4.27 ค่า a^* ของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 71 |
| รูปที่ 4.28 ค่า b^* ของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 71 |
| รูปที่ 4.29 ค่า ΔE ของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรการเก็บรักษา..... | 72 |
| รูปที่ 4.30 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 74 |
| รูปที่ 4.31 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา..... | 75 |

| | |
|--|-----|
| รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)..... | 97 |
| รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP)..... | 100 |
| รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี Bradford protein assay | 101 |
| รูปที่ ค.1 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้โมลโตเด็กซ์ตรินด้านทานการย่อย 40% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส | 103 |
| รูปที่ ค.2 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้โมลโตเด็กซ์ตรินด้านทานการย่อย 45% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส | 103 |
| รูปที่ ค.3 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้โมลโตเด็กซ์ตรินด้านทานการย่อย 40% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส | 104 |
| รูปที่ ค.4 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้โมลโตเด็กซ์ตรินด้านทานการย่อย 45% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส | 104 |
| รูปที่ ค.5 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 40% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส | 105 |
| รูปที่ ค.6 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 45% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส | 105 |
| รูปที่ ค.7 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 40% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส | 106 |

รูปที่ ค.8 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g)
 ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 45% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 175 องศา
 เซลเซียส 106



บทที่ 1

บทนำ

ในปี 2020 การผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ทั่วโลกมีปริมาณมากถึง 337.2 ล้านตัน ซึ่งมีการผลิตเนื้อสุกรประมาณ 109.2 ล้านตันทั่วโลก และในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงขนาดฟาร์มเลี้ยงสัตว์จากฟาร์มขนาดเล็กให้เป็นฟาร์มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีการผลิตเนื้อสุกรได้ปริมาณมากขึ้น (Thanapongtharm และคณะ, 2016) แต่การเพิ่มขนาดฟาร์มให้มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้เกิดของเสียหรือหลงเหลือขึ้นส่วนเหลือทิ้งหลังจากการแปรรูปจำนวนมาก ได้แก่ ชิ้นส่วนเศษเนื้อสุกรหรืออวัยวะที่เป็นของเสียเหลือทิ้งที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ เช่น รกสุกร ที่ได้มาจากแม่สุกรในการคลอดลูกมากถึง 2.85 ล้านตันต่อปี (Svendsen และ Svendsen, 1997) ซึ่งต่อมาทีมงานวิจัยค้นพบว่า รกเป็นของเหลือทิ้งที่มีคุณค่าทางมวลชีวภาพเนื่องจากมีไบโอแอคทีฟเปปไทด์ที่มีฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชันสูง ดังนั้นในบางประเทศจึงมีการใช้รกสุกรในผลิตภัณฑ์ด้านต่าง ๆ (ทางด้านอาหาร เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง และยา) (Togashi และคณะ, 2002) เช่น ในประเทศเกาหลีและจีนมีการใช้รกสุกรในการทำเครื่องสำอางและยาเป็นจำนวนมาก แต่ประเทศไทยยังไม่มีรายงานการใช้ประโยชน์จากรกสุกรในผลิตภัณฑ์อื่นนอกจากการนำไปทำเป็นปุ๋ยและรับประทานเป็นอาหารของคนบางพื้นที่ในประเทศไทยเพียงเท่านั้น ดังนั้นรกสุกรจึงกลายเป็นของเสียเหลือทิ้งจำนวนมาก

รกสุกร (porcine placenta) เป็นอวัยวะสำคัญของมารดาในการป้องกันการกระทบกระเทือน รวมถึงอุดมไปด้วยสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับตัวอ่อนเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เช่น สารอาหาร แอคทีฟเปปไทด์ โกรทแฟกเตอร์ ฮอร์โมน ไขมัน กรดนิวคลีอิก คอลลาเจน วิตามิน และแร่ธาตุอื่น ๆ เป็นต้น (Togashi และคณะ, 2002) ซึ่งรกมีสารที่เรียกว่าแอคทีฟเปปไทด์หรือเปปไทด์ที่มีฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชันสะสมอยู่ในรก และจากงานวิจัยของ Teng และคณะ (2011) รายงานว่า สารไบโอแอคทีฟเปปไทด์ที่มีฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชันในรกสุกร เป็นสารที่มีความสามารถในการยับยั้งชะลอความแก่และการอักเสบของบาดแผล เป็นสารกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกัน ช่วยบำบัดรักษาภาวะภูมิไวเกิน และป้องกันการเกิดออกซิเดชันและการกลายพันธุ์ได้ ซึ่งเป็นสารที่สามารถใช้ได้โดยไม่มีผลข้างเคียงหรือความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ เนื่องจากรกสุกรมีโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างรกของมนุษย์ ดังนั้นการทำให้รกมีมูลค่าเพิ่มขึ้นด้วยเทคโนโลยีหรือกระบวนการต่าง ๆ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ แต่การใช้รกในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ยังคงมีปัญหา เนื่องจากรกมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นและอาจมีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคที่เป็นอันตราย ดังนั้นการใช้กระบวนการสกัดและเทคนิคการทำแห้งมาใช้เพื่อพัฒนาต่อยอดรวมถึงเป็นการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค จึงเป็นสิ่งที่น่าศึกษาต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากรกสุกร

จากงานวิจัยที่ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยของสารสกัดโปรตีนพบว่า ภาวะของเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงไมโครแคปซูลที่มีสมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชันที่แตกต่างกันในแต่ละงานวิจัย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการสกัดไขมันด้วยสารละลายเฮกเซนออกจากสารสกัดรกสุกรต่อสมบัติของโปรตีนและฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชันของสารสกัด และศึกษาผลของภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่แตกต่างกัน (อุณหภูมิเข้า ชนิดของสารหล่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารหล่อหุ้ม) ต่อสมบัติของโปรตีน สมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชัน รวมถึง

ศึกษาผลของภาวะการเก็บรักษาผงไม้โครแคปซูลสารสกัดรกสุกร (ชนิดของบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุ) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 90 วัน โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติของโปรตีน สมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไม้โครแคปซูลสารสกัดรกสุกร



บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 รก (placenta)

รกเป็นอวัยวะชั่วคราวในร่างกายของมารดาที่เชื่อมต่อกับตัวอ่อน เป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่สำคัญหลายหน้าที่ เช่น ทำหน้าที่ช่วยป้องกันตัวอ่อน ลำเลียงสารอาหาร แก๊ส และของเสียระหว่างมารดากับทารกในระหว่างการตั้งครรภ์ รวมถึงทำหน้าที่สร้างฮอร์โมนที่ใช้ในการเจริญเติบโตของตัวอ่อนและฮอร์โมนที่ใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม ซึ่งพบรกได้ในสัตว์หลายสายพันธุ์ เช่น หมู แพะ แกะ และวัว เป็นต้น โดยรกเป็นแหล่งสะสมของสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สารอาหารพื้นฐาน ฮอรโมน โปรตีน ไขมัน กรดนิวคลีอิก กรดอะมิโน วิตามิน และแร่ธาตุ เป็นต้น (Supakorn และ Thongpassano, 2011) นอกจากนี้ยังพบสารประกอบเคมีอื่น ๆ ที่มีคุณค่ามากมาย เช่น ฮอรโมนสเตียรอยด์ เอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเตส และคอลลาเจน เป็นต้น (Rajchasom และ Phanphatthatachai, 2019)

2.1.1 กายวิภาคทั่วไปของรก

รกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีรูปร่าง ลักษณะ และองค์ประกอบแตกต่างกันในสัตว์แต่ละสายพันธุ์ มีหน้าที่หลัก ๆ อยู่ 2 อย่าง อย่างแรกคือขยายรกให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับแลกเปลี่ยนสารอาหารและช่วยกำหนดทิศทางการไหลเวียนเลือดจากมารดาสู่ตัวอ่อนที่ฝังตัวอยู่ และอย่างที่สองคือทำหน้าที่สร้างฮอร์โมนสำหรับตัวอ่อนที่ฝังตัวอยู่ในมดลูก (Friss และคณะ, 1980; Munro, 1983)

โครงสร้างรกประกอบไปด้วยองค์ประกอบฝั่งของตัวอ่อน (fetal component) ซึ่งพัฒนามาจากส่วนเยื่อหุ้มตัวอ่อนชั้นนอก (chorion) และองค์ประกอบฝั่งของมารดา (maternal component) ซึ่งพัฒนามาจากส่วนของเยื่อบุมดลูก (endometrium) จากองค์ประกอบทั้งสองฝั่งจึงทำให้เกิดพื้นที่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนสารระหว่างมารดากับตัวอ่อน (metabolic exchange zone) โดยสามารถแบ่งรกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมออกเป็น 2 ประเภท ตามกฎเกณฑ์การจำแนกที่แตกต่างกัน โดยกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกอันแรกเป็นการจำแนกประเภทของรกตามรูปร่าง (classification based on gross shape) และกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกอันที่สองเป็นการจำแนกประเภทรกตามลักษณะโครงสร้างเนื้อเยื่อของรก (classification based on histological structure) (Furukawa และคณะ, 2014)

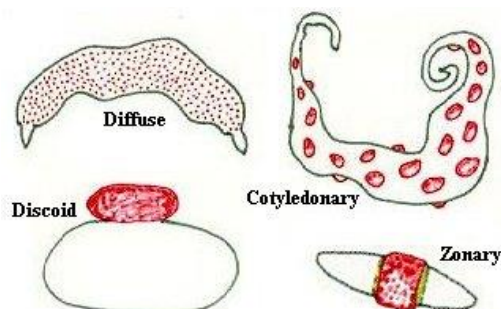
1. การจำแนกประเภทของรกตามรูปร่างโดยรวม (classification based on gross shape) (Wooding และคณะ, 2008) เป็นเกณฑ์การจำแนกชนิดของรกจากลักษณะการกระจายตัวของวิลโล (chorionic villi) หรือเซลล์ที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือขนาดเล็กเกาะติดอยู่บนเยื่อหุ้มตัวอ่อนชั้นนอกในรูปแบบที่แตกต่างกัน (Furukawa และคณะ, 2014) สามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด (ดังแสดงในรูปที่ 2.1)

1.1 Diffuse placenta เป็นรกที่กระจายไปทั่วพื้นผิวของเยื่อหุ้มตัวอ่อนชั้นนอก (chorion) สามารถพบรกชนิดนี้ได้ในสุกรและม้า

1.2 Multicotyledonary placenta เป็นรกที่กระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นจุดคล้ายเม็ดกระดุม (cotyledon) ทั่วพื้นผิวเยื่อหุ้มตัวอ่อนชั้นนอก โดยมีเส้นเลือดและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันมาหล่อเลี้ยงรกจำนวนมาก สามารถพบรกชนิดนี้ในกลุ่มสัตว์เคี้ยวเอื้อง

1.3 Zonary placenta เป็นรกที่มีลักษณะเป็นแถบขนาดใหญ่มัดกับเยื่อหุ้มตัวอ่อนชั้นนอกอย่างแน่นหนาสามารถพบได้ในสัตว์กินเนื้อ เช่น หมา แมว

1.4 Discoid/bidiscoid placenta เป็นรกที่มีลักษณะเป็นแผ่นเดี่ยว (discoid) หรือดิสก์คู่ (bidiscoid) เกาะติดกับเยื่อหุ้มชั้นนอกของตัวอ่อนเพียงบริเวณส่วนใดส่วนหนึ่ง สามารถพบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม สัตว์ฟันแทะ และกระต่าย



รูปที่ 2.1 ลักษณะรกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในรูปแบบแตกต่างกัน

ที่มา: ฐานข้อมูลออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก

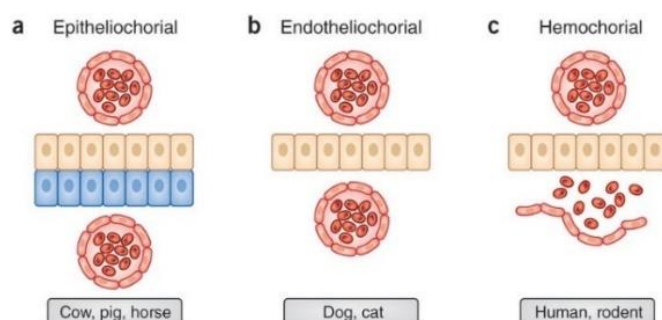
<http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathophys/reprod/placenta/structure.html>

2. การจำแนกประเภทตามโครงสร้างทางเนื้อเยื่อ (classification based on histological structure) (Grosser, 1909) เป็นวิธีแยกชนิดของรกตามลักษณะโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่สัมผัสกันระหว่างเนื้อเยื่อฝังตัวอ่อนกับเนื้อเยื่อฝังมารดา (Leiser และ Kaufmann, 1994) สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด (ดังแสดงในรูปที่ 2.2)

2.1 Epitheliochorial type เป็นรกที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและไม่มีการรุกรานของเนื้อเยื่อฝังตัวอ่อนเข้ามาในเนื้อเยื่อฝังมารดา มีเพียงการสัมผัสกันของเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดของตัวอ่อน (trophoblast) กับชั้นเยื่อบุผิวมดลูกของมารดา (maternal endometrial epithelium) ดังนั้นรกชนิดนี้จะมีโครงสร้างของชั้นเนื้อเยื่อฝังตัวอ่อนและฝังมารดาอยู่ครบทุกชั้น และมีพื้นที่แลกเปลี่ยนสารสำคัญที่บริเวณเยื่อหุ้มชั้นนอกของตัวอ่อนและเยื่อบุผิวมดลูกของมารดา สามารถพบรกชนิดนี้ได้ในม้า สุนัข และสัตว์เคี้ยวเอื้อง เป็นต้น

2.2 Endotheliochorial type เป็นรกที่ไม่พบชั้นเยื่อบุผิวมดลูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของฝังมารดาในโครงสร้าง เพราะเนื้อเยื่อสองชั้นนี้จะสลายหายไปหลังจากตัวอ่อนฝังตัวในมดลูก ดังนั้นพื้นที่การแลกเปลี่ยนสารสำคัญจะเกิดที่บริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดของตัวอ่อน (trophoblast) ที่สัมผัสกับเยื่อบุโพรงมดลูกภายในของมารดาโดยตรง (maternal endometrial) สามารถพบรกชนิดนี้ได้ในสุนัขและแมว เป็นต้น

2.3 Hemochorial type เป็นรกที่โครงสร้างไม่พบชั้นเนื้อเยื่อของฝังมารดา ดังนั้นพื้นที่การแลกเปลี่ยนสารสำคัญจึงเกิดที่บริเวณเยื่อหุ้มตัวอ่อนชั้นนอก (chorion) กับหลอดเลือดของมารดาโดยตรง (maternal blood) พบรกชนิดนี้ได้ในสัตว์จำพวกไพรเมต กระต่าย และหนู เป็นต้น

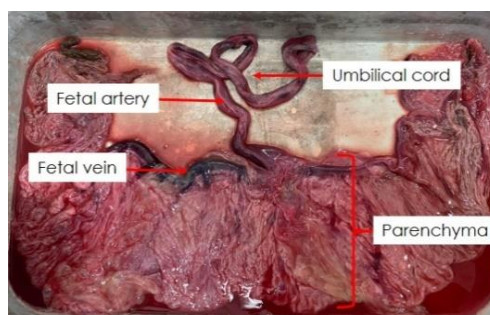


รูปที่ 2.2 ลักษณะชั้นเนื้อเยื่อระหว่างรกของเซลล์มารดาและเซลล์ตัวอ่อน
ที่มา: Prabhudas และคณะ (2015)

2.2 รกสุกร (porcine placenta)

รกสุกรเป็นอวัยวะที่เป็นแหล่งสะสมของสารที่ใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการพัฒนาการของตัวอ่อน เช่น สารอาหารพื้นฐาน ฮอร์โมน โกรทแฟคเตอร์ เกลือแร่ และวิตามิน เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้รกสุกรในผลิตภัณฑ์อาหารและยา และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นต้น (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) ซึ่งในงานวิจัยของ Jang และคณะ (2007) ที่ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของรกสุกรดิบและรกสุกรอบแห้งด้วยกระบวนการอบแห้งต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่า รกสุกรดิบมีร้อยละความชื้น 90.02 ± 1.308 โปรตีนร้อยละ 5.97 ± 0.857 ไขมันร้อยละ 0.78 ± 3.072 เกลือร้อยละ 0.39 ± 0.154 นอกจากนี้รกสุกรยังมีแร่ธาตุที่สำคัญและจำเป็นต่อร่างกายมนุษย์สะสมอยู่ ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม โซเดียม และแมกนีเซียม ซึ่งเป็นไอออนโคแฟกเตอร์ที่สำคัญในปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชันและกระบวนการสังเคราะห์ไขมัน และยังมี แอลฟา-โทโคฟีโนล เป็นต้น (ตารางที่ 2.2)

นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Laosam และคณะ (2021) ที่ศึกษาเกี่ยวกับฤทธิ์การต้านออกซิเดชันและความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรไลเสตสารสกัดจากรกสุกรพบว่า รกสุกรเป็นแหล่งสะสมของสารไบโอแอคทีฟเปปไทด์และกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่มีประโยชน์ จึงมีการนำรกสุกรมาแปรรูปให้อยู่ในรูปแบบของสารสกัดด้วยวิธีสกัดต่าง ๆ โดยในหลายประเทศมีการนำไฮโดรไลเสตสารสกัดจากรกสุกรไปใช้ในทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นสารกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกัน (Georgieva และคณะ, 1995) เป็นสารช่วยต้านริ้วรอย (Chen และคณะ, 1999) สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน สารป้องกันการกลายพันธุ์ของพันธุกรรม (mutation) สารช่วยบรรเทาอาการการแพ้ ลมรอยแดดเผา (sunburn) และเป็นสารช่วยบำบัดรักษาภาวะภูมิไวเกิน (hypersensitivity) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของรกสุกรก่อนตัดแต่ง

ตารางที่ 2.1 สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีในรกสุกรของการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

| | Raw placenta | FD (72hrs) | OD-60 (12hrs) | OD-90 (12hrs) | HDHP (24hrs) |
|---------------|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Moisture | 90.02±1.308 | 5.96±0.906 | 5.11±1.729 | 1.76±0.814 | 6.79 |
| Crude protein | 5.97±0.035 | 76.24±3.279 | 76.24±3.279 | 78.88±2.949 | 80.84 |
| Crude fat | 0.78±3.072 | 4.94±0.432 | 4.72±0.313 | 4.72±0.313 | 1.59 |
| Crude ash | 0.39±0.154 | 6.04±1.475 | 5.98±1.314 | 5.98±1.314 | 5.75 |

*FD, Freeze drying. *OD-60, Oven drying 60 Celcus. *OD-90, Oven drying 90 Celcus. *HDHP, heat dried human placenta (80-100 Celcus)

ที่มา Jang และคณะ (2007)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณแร่ธาตุ (ppm) และ α - tocopherol (IU/kg) ของรกสุกรจากวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน

| | Raw placenta | FD (72 hrs) | OD-60 (12 hrs) | OD-90 (12 hrs) | HDHP (24 hrs) |
|----------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| Ca | 700±0.00 | 7,800±108.56 | 7,267.70±272.88 | 7,000±1,177.70 | 1,906.75 |
| P | 800±0.04 | 7,400±408.25 | 7,300±346.41 | 7,700±115.47 | 2,803.50 |
| Na | 1,086.96±848.56 | 10,239.98±3,823.05 | 9,600.62±1,661.99 | 9,510.77±3,808.21 | 10,310.00 |
| K | 839.96±693.54 | 11,145.15±3,478.69 | 10,834.79±1,636.41 | 11,370.64±1721.58 | 8,479.00 |
| Mg | 69.32±28.64 | 611.95±12.86 | 590.87±69.67 | 599.36±42.55 | 382.90 |
| α -Tocopherol | 1.25±0.07 | 8.56±0.09 | 6.54±0.14 | 6.01±0.17 | 5.45 (ug/g) |

*FD, Freeze drying. *OD-60, Oven drying 60 celcus. *OD-90, Oven drying 90 celcus. *HDHP, heat dried (80-100) human placenta

ที่มา : Jang และคณะ (2007)

จากงานวิจัยของ Tang และคณะ (2013) ที่ศึกษาภาวะการสกัดและขั้นตอนการทำแห้งต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัดไฮโดรไลเสตรกสุกรที่ย่อยด้วยเอนไซม์ทริปซินและเอนไซม์ปาเปนพบว่า สารสกัดรกสุกรหลังผ่านกระบวนการสกัดมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมาจากการดออะมิโนและเปปไทด์ของไฮโดรไลเสตรกสุกรที่มีมวลโมเลกุลอยู่ช่วง 200 ถึง 2000 kDa ซึ่งมีกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเหล่านี้ปริมาณมากถึง 60.14% ของกรดอะมิโนทั้งหมดในไฮโดรไลเสตรกสุกร โดยสามารถแบ่งกรดอะมิโนเหล่านี้ออกเป็น กรดอะมิโนที่ชอบน้ำ

23.81% ซึ่งได้แก่ ฮีสทิดีน อาร์จินีน กรดแอสปาทิก และกรดอะมิโนที่ไม่ชอบน้ำ 35.81% ซึ่งได้แก่ ไทโรซีน เมทไทโอนีน ทริปโตเฟน อลานีน วาลีน ฟีนิลอลานีน โพรลีน และลิวซีน (ดังแสดงในรูปที่ 2.4)

| Amino acid | Quality composition |
|---------------|---------------------|
| Aspartic acid | 69.87 |
| Glutamic acid | 124.71 |
| Serine | 37.76 |
| Histidine | 12.51 |
| Glycine | 120.20 |
| Threonine | 27.57 |
| Arginine | 67.80 |
| Alanine | 63.09 |
| Tyrosine | 20.86 |
| Cysteine | 4.51 |
| Valine | 40.06 |
| Methionine | 15.66 |
| Phenylalanine | 29.53 |
| Isoleucine | 29.29 |
| Leucine | 55.93 |
| Lysine | 52.65 |
| Proline | 79.93 |
| Total | 851.95 |

รูปที่ 2.4 ชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนในผงไฮโดรไลสได้จากสารสกัดรกสุกรเมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง
ที่มา: Tang และคณะ (2013)

2.3 ฮอร์โมน (hormone)

ฮอร์โมนเป็นสารเคมีที่สร้างจากต่อมไร้ท่อ เนื้อเยื่อ หรือเซลล์ประสาท แล้วส่งผ่านทางกระแสเลือดไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเซลล์หรืออวัยวะเป้าหมาย ตัวอย่างเช่น ฮอร์โมน FSH (follicle stimulating hormone) ที่ทำหน้าที่ควบคุมและกระตุ้นการเจริญของไข่ในรังไข่และการสร้างเชื้ออสุจิในอัณฑะ รวมถึงกระตุ้นการสร้างฮอร์โมนเพศของตัวอ่อน (พัชรี และคณะ, 2550)

โดยฮอร์โมนจะมีหน้าที่ดังนี้

1. ควบคุมกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น กระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ เป็นต้น
2. ควบคุมสมดุลของสภาวะต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น การควบคุมร่างกาย การรักษาปริมาณน้ำในร่างกาย ความดันโลหิต เป็นต้น
3. ควบคุมการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต เช่น กระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การเติบโตของร่างกาย หรือการทำงานของโกรทฮอร์โมน เป็นต้น
4. ควบคุมการสืบพันธุ์ โดยกระตุ้นการเจริญเติบโตและการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ เช่น ฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน เอสโตรเจน และโพรเจสเตอโรน เป็นต้น

ฮอร์โมนสามารถแบ่งหลากหลายประเภท โดยมีวิธีที่ใช้แบ่งฮอร์โมนหลากหลายวิธี เช่น แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี แบ่งตามลักษณะการทำงาน และแบ่งตามตำแหน่งที่ออกฤทธิ์ต่อเซลล์เป้าหมาย เป็นต้น สามารถแบ่งประเภทฮอร์โมนตามโครงสร้างทางเคมีได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. ฮอร์โมนที่เป็นอนุพันธ์เอมีน (amine-derived hormone) คือฮอร์โมนที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีนหรือหมู่อะมิโนในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น ฮอร์โมนแคททีโคลามีน ฮอร์โมนไทรอกซีน เป็นต้น

2. ฮอรโมนที่เป็นเปปไทด์หรือโปรตีน (peptide hormone/protein) คือฮอรโมนที่มีกรดอะมิโน (amino acid) เชื่อมกันด้วยพันธะเปปไทด์อยู่ในโครงสร้าง โดยฮอรโมนกลุ่มนี้จะมีขนาดมวลโมเลกุลแตกต่างกัน ขึ้นกับจำนวนกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น ไทรโอโทรปินรีลีสซิงฮอรโมน โกรทฮอรโมน เป็นต้น

3. ฮอรโมนสเตียรอยด์ (steroid hormone) เป็นฮอรโมนที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากโครงสร้างของสเตอรอยด์ ซึ่งสังเคราะห์มาจากคอเลสเตอรอล ตัวอย่างเช่น ฮอรโมนโพรเจสเตอโรน ฮอรโมนเทสโทสเตอโรน เป็นต้น

4. ฮอรโมนจากสารกลุ่มอื่น ๆ ได้แก่ กลุ่มเอโคซานอยด์ กลุ่มอนุพันธ์ของวิตามิน เป็นต้น

โดยในรกสุกรเป็นแหล่งสะสมของฮอรโมนสเตียรอยด์และฮอรโมนเพศสะสมอยู่ ได้แก่ ฮอรโมนเอสตราไดออล ฮอรโมนโพรเจสเตอโรน และฮอรโมนเทสโทสเตอโรน (ดังแสดงในตารางที่ 2.3) ซึ่งฮอรโมนเหล่านี้เป็นฮอรโมนที่สำคัญที่ทำหน้าที่รองรับการตั้งครรภ์ตัวอ่อนของมารดา ทำหน้าที่ยับยั้งความสามารถของชั้นกล้ามเนื้อผนังมดลูกไม่ให้หดตัวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคลอดตัวอ่อนก่อนถึงเวลาสมควร รวมถึงช่วยกระตุ้นการเจริญและพัฒนาต่อมน้ำนมในระหว่างการจัดตั้งครรภ์

ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณของฮอรโมนที่สะสมในรกสุกรด้วยวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน

| | Raw placenta | FD (72 hrs) | OD-60 (12 hrs) | OD-90 (12 hrs) | HDHP (24 hrs) |
|--------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| Estradiol | 1811.37±177.64 | 13127.02±1617.35 | 8391.26±605.78 | 8474.73±301.43 | 8.92 |
| Progesterone | 311.9±86.81 | 1952.71±365.60 | 1716±230.68 | 1436.58±271.89 | 135.87 |
| Testosterone | 3.1±2.09 | 33.10±9.23 | 30.11±3.60 | 19.16±5.41 | 20.25 |

*FD, Freeze drying. *OD-60, Oven drying 60 celcus. *OD-90, Oven drying 90 celcus. *HDHP, heat dried (80-100) human placenta

ที่มา Jang และคณะ (2007)

2.4 ไบโอแอคทีฟเปปไทด์ (Bioactive peptides)

ตลอดศตวรรษที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับทางอาหารได้มีการมุ่งเน้นไปที่ประโยชน์ทางชีวภาพของโปรตีนประเด็นอื่นนอกจากเป็นสารอาหารหลักในอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งหน้าที่ทางชีววิทยาของโปรตีนหรือเปปไทด์บางชนิดที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive peptide) หรือเปปไทด์ที่มีฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชัน และจะออกฤทธิ์คล้ายฮอรโมนหรือยา ซึ่งจะปรับการทำงานทางสรีรวิทยาในเหมาะสมกับตัวรับจำเพาะของเซลล์ เป้าหมายที่ออกฤทธิ์ โดยไบโอแอคทีฟเปปไทด์มีจำนวนกรดอะมิโนในโครงสร้าง 3-20 กรดอะมิโน ซึ่งความสามารถในการกระตุ้นออกซิเดชันของไบโอแอคทีฟเปปไทด์แต่ละตัวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ลำดับ และโครงสร้างของกรดอะมิโนภายในโครงสร้าง ซึ่งเป็นสารที่จะช่วยส่งเสริมสุขภาพร่างกายของมนุษย์ให้มีสุขภาพที่ดี ช่วยป้องกันรักษาโรคร้ายต่าง ๆ เช่น ช่วยป้องกันโรคอ้วน โรคระบบหัวใจและหลอดเลือด โรคเบาหวาน โรคระบบภูมิคุ้มกัน และโรคระบบประสาท เป็นต้น (Mora และคณะ, 2018)

ไบโอแอคทีฟเปปไทด์มีข้อดี คือ เป็นสารที่มีฤทธิ์กระตุ้นออกซิเดชันสูงและมีความสามารถในการป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเป็นสารที่ร่างกายดูดซึมได้ง่าย และมีความปลอดภัยในการนำไปใช้ ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัย

ที่ศึกษาเกี่ยวกับแหล่งสะสมของเปปไทด์ที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันในพืชและสัตว์ ตัวอย่างเช่น เมล็ดถั่วลิสง รำข้าว โปรตีนจากดอกทานตะวัน แป้งกลูเตนข้าวโพด มันเทศ เห็ด สมุนไพร ปลาหู ไข่เค็มฝอย รำข้าว เมล็ดควินัว โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ของรอก และเคซีน เป็นต้น

จากประโยชน์ของไบโอแอคทีฟเปปไทด์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่กล่าวมาข้างต้น การนำไปใช้ประโยชน์ จึงมีความน่าสนใจ แต่การเก็บรักษาในรูปแบบของสารละลายที่ได้หลังจากการสกัดจะทำให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน มีค่าลดลง ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้เพื่อกักเก็บ ป้องกันให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของเปปไทด์ยังคง อยู่ เช่น การนำเทคนิคไมโครหรือนาโนเอนแคปซูลชัน

2.5 อนุมูลอิสระ (Free radical)

อนุมูลอิสระ คือ สารที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ที่วงอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของอะตอมหรือโมเลกุลของสาร ทำให้โมเลกุลสารไม่เสถียรภาพ เพราะอิเล็กตรอนเดี่ยวในชั้นอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสาร อื่นที่อยู่บริเวณใกล้เคียงได้ง่าย โดยไปจับหรือดึงอิเล็กตรอนของโมเลกุลข้าง ๆ เข้ามาในโมเลกุลตัวเองเพื่อให้โมเลกุล มีความเสถียรภาพมากขึ้น แต่โมเลกุลที่สูญเสียอิเล็กตรอนให้กับสารอีกโมเลกุลจะเปลี่ยนตัวเองกลายเป็นสารอนุมูล อิสระตัวใหม่แทน และเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปเรื่อย ๆ (chain reaction) โดยปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระนี้ พบได้ในสิ่งมีชีวิต ในเซลล์ หรือในสิ่งแวดล้อม และพบได้จากกระบวนการผลิตพลังงานภายในเซลล์ หรือจาก กระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) (อชิป, 2017)

2.5.1 อนุมูลอิสระแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

1. กลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive oxygen species, ROS) เป็นรูปแบบอนุมูลอิสระ ที่พบมากที่สุด เช่น oxygen radical, hydrogen peroxide, transition metals เป็นต้น
2. กลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive nitrogen species, RNS)
3. กลุ่มที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive chlorine species, RNS)

| Reactive oxygen species | | | |
|---------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| Free radicals | Formula | Non-radicals | Formula |
| Oxygen radical | O_2^{\cdot} | Singlet oxygen | $^1O_2^*$ |
| Superoxide radical | $O_2^{\cdot-}$ | Hydrogen peroxide | H_2O_2 |
| Hydroxyl radical | OH^{\cdot} | Ozone | O_3 |
| Hydroperoxyl radical | HO_2^{\cdot} | Organic peroxide | ROOH |
| Peroxyl radical | RO_2^{\cdot} | | |
| Alkoxy radical | RO^{\cdot} | | |
| Carbonate radical | $CO_3^{\cdot-}$ | | |
| Reactive chlorine species | | | |
| Chlorine radical | Cl^{\cdot} | Hypochloric acid | HOCl |
| | | Nitryl chloride | NO_2Cl |
| | | Chlorine gas | Cl_2 |
| Reactive nitrogen species | | | |
| Nitric oxide radical | NO^{\cdot} | Nitric oxide | HNO_2 |
| Nitrogen dioxide radical | NO_2^{\cdot} | Peroxynitrite | ONOO ⁻ |
| | | Peroxynitrous acid | ONOOH |
| | | Nitryl chloride | NOOCl |

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างอนุภาคอนุมูลอิสระและอนุภาคที่ไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระแบ่งประเภทตามองค์ประกอบในโครงสร้าง
ที่มา: Sakunphueak (2017)

2.5.2 ขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ

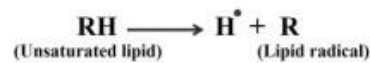
ปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ เป็นปฏิกิริยาที่อะตอมหรือโมเลกุลมีการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นในบริเวณใกล้เคียง มักมีสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาคือกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาอยู่ 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (Gordon, 1990)

1. ขั้นตอนอินิทิเอชัน (initiation step) เป็นขั้นตอนเริ่มต้นในการเกิดอนุมูลอิสระจากสารตั้งต้น คือ กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid, RH) ที่ไม่คงตัวเนื่องจากมีพันธะคู่ในโครงสร้างทำให้เกิดการแตกตัวและเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้นมา เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ

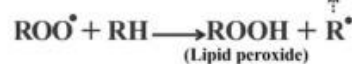
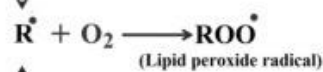
2. ขั้นตอนพวพาเกชัน (propagation step) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนอินิทิเอชัน เกิดขึ้นหลังจากมีอนุมูลอิสระอยู่ภายในร่างกาย โดยอนุมูลอิสระเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาลูกโซ่กับสารโมเลกุลอื่นและสร้างอนุมูลอิสระชนิดใหม่ต่อไปเรื่อย ๆ

3. ขั้นตอนเทอร์มิเนชัน (chain termination) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการอนุมูลอิสระ เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระจะรวมตัวกันเองเกิดเป็นสารใหม่ (secondary product) เช่น แอลดีไฮด์ คีโตน แอลเคน และกรดอินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดกลิ่น สี และรสชาติผิดปกติในอาหาร

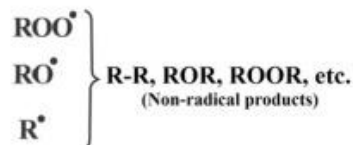
Initiation



Propagation



Termination



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระจากกรดไขมันไม่อิ่มตัว

ที่มา: Gavahian และคณะ (2018)

โดยทั่วไปในร่างกายมนุษย์มีระบบการกำจัดอนุมูลอิสระที่สะสมอยู่ภายในร่างกาย แต่ถ้าอนุมูลอิสระ (ROS) มีการสะสมในร่างกายปริมาณมากเกินไป จะทำให้ร่างกายอยู่ในสภาวะ oxidative stress หรือภาวะที่ร่างกายมีอนุมูลอิสระสะสมในปริมาณมาก ส่งผลทำให้เกิดอันตรายกับส่วนประกอบสำคัญของเซลล์ในร่างกาย เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ดีเอ็นเอ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารชีวโมเลกุลในเซลล์ และทำให้เซลล์ภายในร่างกายไม่ทำงานรวมถึงทำให้เกิดการกลายพันธุ์ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ได้ เช่น โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ ไช้ออกเสบ โรคทางสมอง เป็นต้น (Peter, 1989)

2.6 สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant)

ภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ในทางชีวภาพเป็นภาวะที่เกิดจากความไม่สมดุลระหว่างอนุมูลอิสระในร่างกายกับสารต้านออกซิเดชัน เป็นภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณของอนุมูลอิสระสะสมอยู่ในร่างกายมากกว่าปริมาณสารต้านออกซิเดชัน ส่งผลทำให้สูญเสียฤทธิ์ต้านออกซิเดชันและทำให้เกิดโรคต่างๆขึ้น ดังนั้นเพื่อชดเชยการขาดสารต้านออกซิเดชันในร่างกายจะสามารถทดแทนได้ด้วยการบริโภคสารที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่มีอยู่ในองค์ประกอบของอาหาร ผักผลไม้ หรือยารักษาโรค ตัวอย่างเช่น สารประกอบฟีนอลิก สารแคโรทีนอยด์ วิตามินซี และสารไบโอแอคทีฟต่าง ๆ เป็นต้น

สารต้านออกซิเดชันมีกลไกการทำงานและโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับอนุมูลอิสระ สามารถแบ่งชนิดการทำงานของสารต้านออกซิเดชันออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ สารต้านออกซิเดชันปฐมภูมิ (primary antioxidant) และสารต้านออกซิเดชันทุติยภูมิ (secondary antioxidant) (พันทอง, 2016)

1. สารต้านออกซิเดชันปฐมภูมิ (primary antioxidant)

เป็นการทำงานของสารต้านออกซิเดชันที่ทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยการให้โปรตอนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระมีความคงตัวและไม่มีว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ โดยมีกลไกการทำงานอยู่ 2 แบบ

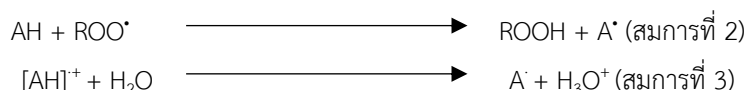
1.1 กลไกการแลกเปลี่ยนอะตอมไฮโดรเจน (hydrogen atom transfer, HAT)

เป็นกลไกทำงานของสารต้านออกซิเดชันที่จะให้อะตอมไฮโดรเจน (H) แก่อนุมูลอิสระ (ROO[•]) ทำให้อนุมูลอิสระเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นโมเลกุล ROOH ที่มีเสถียรภาพ และสารต้านออกซิเดชันหลังจากให้อะตอมไฮโดรเจนแล้วจะกลายเป็นอนุมูลของสารต้านออกซิเดชัน (phenoxyl radical, A[•]) ดังแสดงในสมการที่ 1 ซึ่งกลไกนี้สามารถวัดได้ด้วยวิธีการวัดต่าง ๆ ได้แก่ วิธี oxygen radical absorbance capacity (ORAC) และวิธี total radical trapping antioxidant parameter (TRAP) เป็นต้น



1.2 กลไกการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron transfer, SET)

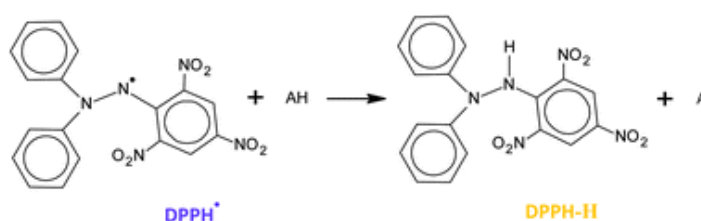
เป็นกลไกการทำงานของสารต้านออกซิเดชัน (AH) ที่จะให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ (ROO[•]) เพื่อให้อนุมูลอิสระมีเสถียรภาพ มีความคงตัว ไม่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อ ดังแสดงในสมการที่ 2 และสมการที่ 3 โดยมีวิธีการตรวจสอบสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันตามกลไกนี้ ได้แก่



- วิธีวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging capacity (DPPH) (ลอยพิมาย, 2011)

เป็นวิธีวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน โดยจะใช้อนุมูลอิสระ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical (DPPH) ที่เป็นสารละลายสีม่วงเป็นตัววัดความสามารถ โดยถ้าตัวอย่างที่นำมาทดสอบมี

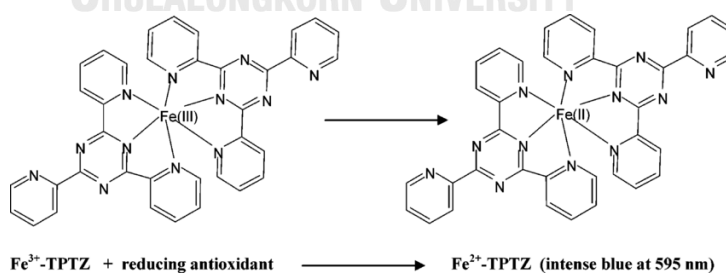
ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน จะทำให้สารละลาย DPPH สูญเสียอิเล็กตรอนอิสระ และกลายเป็นสารที่คงตัว มีเสถียรภาพ และทำให้สีม่วงของสารละลายเริ่มต้นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยความสามารถในการต้านออกซิเดชันของตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากการวัดค่าดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ได้หลังทำปฏิกิริยากับ สารละลาย DPPH ที่ความยาวคลื่น 517 nm และคำนวณเปรียบเทียบกับความสามารถในการต้านออกซิเดชันของ สาร Trolox หรืออนุพันธ์ของวิตามินอีที่เป็นสารมีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชัน ซึ่งวิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถทำได้ง่าย ใช้เวลาในการทำน้อย และมีความถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย DPPH กับสารต้านออกซิเดชัน
ที่มา: Pyrzynska และ Pekal (2013)

- วิธีวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP)

เป็นวิธีวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์ของสารต้านออกซิเดชันในตัวอย่างที่นำมาทดสอบกับอะตอมของเหล็กในสารละลายเริ่มต้นของ FRAP ที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ferric tripyridyl triazine (Fe^{3+} -TPTZ) ที่มีสีส้มแดงอัญ แต่ถ้าวางที่ทดสอบเป็นสารต้านออกซิเดชันที่มีความสามารถในการรีดิวซ์สูง สารละลาย FRAP หลังจากเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ferrous tripyridyl triazine (Fe^{2+} -TPTZ) ที่มีสีม่วงน้ำเงินแทน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยสามารถวัดฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของตัวอย่างได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm ที่ได้ของตัวอย่างกับ ไอรอน (II) ซัลเฟต หรือเปรียบเทียบกับสาร Trolox หรืออนุพันธ์ของวิตามินอีที่เป็นสารมีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชัน วิธีวิเคราะห์นี้มีข้อดี คือ สามารถทำได้ง่าย สะดวก ใช้เวลาน้อยและราคาไม่แพง (ลอยพิมาย, 2011)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของสารละลาย FRAP ที่เปลี่ยนไปในหลังจากทำปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชัน

ที่มา: Prior และคณะ (2005)

2. สารต้านออกซิเดชันทุติยภูมิ (secondary antioxidant)

เป็นสารต้านออกซิเดชันที่ทำหน้าที่ยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันนอกเหนือจากหน้าที่ของสารต้านออกซิเดชันปฐมภูมิ เช่น การจับสารโลหะ (chelant) ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในสมการที่ 4

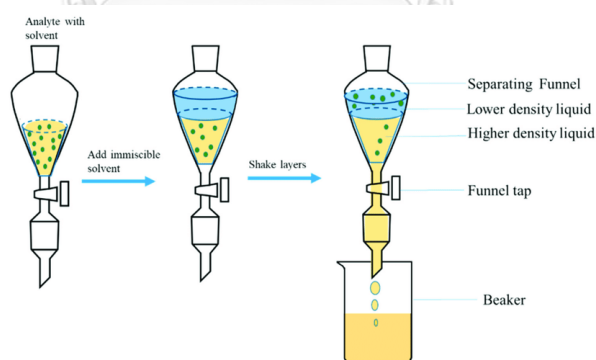


2.7 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)

เป็นกระบวนการในการแยกสารที่ต้องการและไม่ต้องการออกจากวัตถุดิบ ทำให้สารมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งการเลือกวิธีการสกัดจะขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการสกัดสาร โดยวิธีการสกัดที่มีการใช้มานานและมีความนิยมมากที่สุด คือ การสกัดของเหลวด้วยของเหลว และการสกัดของแข็งด้วยของเหลว แต่ในปัจจุบันก็มีการพัฒนาวิธีการสกัดที่หลากหลายมากขึ้น

1. การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction)

เป็นกระบวนการที่มีการใช้มากที่สุดสำหรับการสกัดแยกสารออกจากตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของเหลว โดยกระบวนการนี้ตัวอย่างจะผสมเข้ากับสารละลายที่ใช้สกัดและถูกตั้งทิ้งไว้ในกรวยแยกสาร จนกระทั่งตัวอย่างและสารละลายที่ใช้สกัดแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยสารละลายที่ใช้สกัดจะต้องเป็นสารละลายที่ไม่ผสมรวมเข้ากับตัวอย่าง วิธีนี้มีข้อดี คือ มีสารละลายที่สามารถนำมาใช้สกัดได้หลากหลาย มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการสกัดน้อย แต่มีข้อเสีย คือ เป็นวิธีที่ใช้เวลาในการสกัดนาน มีข้อจำกัดความเฉพาะเจาะจงของสารละลายที่นำมาใช้ในสกัดสาร

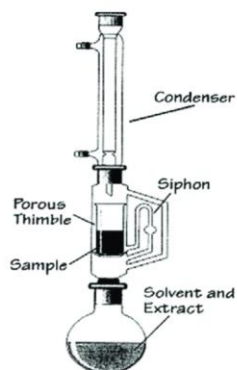


รูปที่ 2.9 วิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction)

ที่มา: Targuma และคณะ (2021)

2. การสกัดของแข็งด้วยของเหลว (solid-liquid extraction)

เป็นกระบวนการสกัดตัวอย่างที่อยู่ในรูปของแข็งด้วยสารละลายที่เหมาะสมในการสกัดแยกสารที่ต้องการออกจากตัวอย่าง ตัวอย่างการสกัดด้วยวิธีนี้ เช่น การใช้ชุดสกัดซอกซ์เลต (soxhlet extractor) ในการสกัดไขมัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.10)



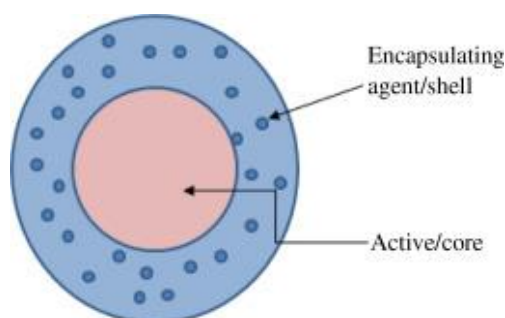
รูปที่ 2.10 วิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว (solid-liquid extraction) ด้วยชุดสกัดซอกซ์เลต
ที่มา: Gunturu 2018

2.8 เทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน (encapsulation technology)

เอนแคปซูเลชันเป็นเทคโนโลยีที่ห่อหุ้มสารที่เสื่อมสลายได้ง่ายไว้ด้วยสารชนิดอื่น ทำให้เกิดเปลือกหรือชั้นผนังกั้นระหว่างสารที่เสื่อมสลายได้ง่ายกับสิ่งแวดล้อมภายนอก เพื่อป้องกันการสลายตัวของสารที่มีประโยชน์แก่ร่างกายมนุษย์และทำให้สารมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มความสามารถในการดูดซึมสารที่มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันเข้าสู่ร่างกายได้มากขึ้น และทำให้สารที่มีความเข้มข้นน้อยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นพร้อมกับเกิดการกระจายตัวของสารที่มีประโยชน์อยู่ทั่วอนุภาคไมโครแคปซูลอย่างสม่ำเสมอ (Timilsena และคณะ, 2020)

ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมีการนำเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชันมาใช้ในกระบวนการผลิต เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้สามารถนำสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compound) เช่น สารต้านออกซิเดชัน วิตามิน แร่ธาตุ เข้าสู่ร่างกายได้โดยไม่เกิดการสลายตัวของสารสำคัญในระหว่างกระบวนการผลิตและสภาวะการย่อยอาหารของมนุษย์ นอกจากนี้ยังยังสามารถคงกลิ่น สี รสชาติและลักษณะเนื้อสัมผัสของวัตถุดิบไว้ได้ดี (Nedovic และคณะ, 2011)

2.8.1 เทคโนโลยีเอนแคปซูเลชันประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก (ดังแสดงในรูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างอนุภาคในเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน
ที่มา: Potdar และคณะ (2020)

1. สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compound)

เป็นสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่ส่งผลดีต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งอยู่ข้างในแกนกลางของโมเลกุลของแคปซูลและถูกห่อหุ้มด้วยสารอื่นเพื่อป้องกันปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีปริมาณลดลง รวมถึงช่วยรักษาเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในระหว่างสภาวะการแปรรูปและการเก็บรักษา ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ สารต้านออกซิเดชัน ไขมัน วิตามิน เปร็ไบโอติก เป็นต้น (Nedovic และคณะ, 2011)

2. สารห่อหุ้ม (coating material)

เป็นสารที่ออกแบบมาเพื่อเป็นผนังห่อหุ้มสารที่ต้องการเก็บรักษาไว้ที่แกนกลางของผงไมโครแคปซูลเพื่อลดการเสื่อมสลายของสาร สารห่อหุ้มมีได้หลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว แก๊ส ที่มีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติ (Nedovic และคณะ, 2011) แต่เมื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร สารที่นำมาใช้มีความจำเป็นที่จะต้องเป็นสารที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นสาร generally recognized as safe (GRAS) ตามข้อกำหนดของยุโรป (European Food Safety Authority, EFSA) (Robin และ Sankhla, 2013) และคณะกรรมการอาหารและยาของอเมริกา (Food and Drug Administration, FDA) ซึ่งการเลือกสารห่อหุ้มมีความสำคัญ เพราะจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ลักษณะการปลดปล่อยสาร ความคงตัว และค่าใช้จ่ายในกระบวนการเอนแคปซูล ดังนั้นสารห่อหุ้มจึงต้องเป็นสารที่สามารถใช้ได้กับอาหาร (food grade) สามารถย่อยสลายได้ (biodegradable) และมีความสามารถในการห่อหุ้มสารสำคัญไว้ภายในได้ดี โดยส่วนมากจึงมักเป็นสารชีวโมเลกุล เพราะเป็นสารจากธรรมชาติและมีความสามารถในการป้องกันปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียได้ ตัวอย่างเช่น พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ได้แก่ แป้ง มอลโตเดกซ์ตริน มอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย นอกจากนี้ยังมีการใช้สารที่ผลิตมาจากการสกัดจากพืช ได้แก่ กัมอารบิก เพกทิน มาใช้เป็นสารห่อหุ้มด้วยเช่นกัน

2.1 มอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย (resistant maltodextrin) (Hashizume และ Okuma, 2009)

เป็นสารที่พัฒนาและผลิตมาจากบริษัท Matsutani Chemical Industry Co., Ltd., Itami, Hyogo ที่ประเทศญี่ปุ่น จัดเป็นแป้งต้านทานการย่อยชนิด V เนื่องจากมีการนำมาจัดเรียงโมเลกุลใหม่ มีลักษณะเป็นผงสีขาว และมีรสชาติจืด (ดังแสดงในรูปที่ 2.12) จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้มีการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพและเครื่องดื่มจำนวนมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติช่วยพัฒนาการทำงานของลำไส้ ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด และยังช่วยลดปริมาณไตรกลีเซอไรด์และคอเลสเตอรอลในเลือด



รูปที่ 2.12 มอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย

ที่มา: ฐานข้อมูลออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก

<https://www.okchem.com/news/JzLuRMZxo/Digestible%20maltodextrin%20vs-Resistant-maltodextrin.html>

2.1.1 ขั้นตอนการผลิตมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย (ดังแสดงในรูปที่ 2.13)

1. นำแป้งมาทำการตัดกิ่งในโครงสร้างแป้งออก โดยมักจะใช้แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมาผลิต

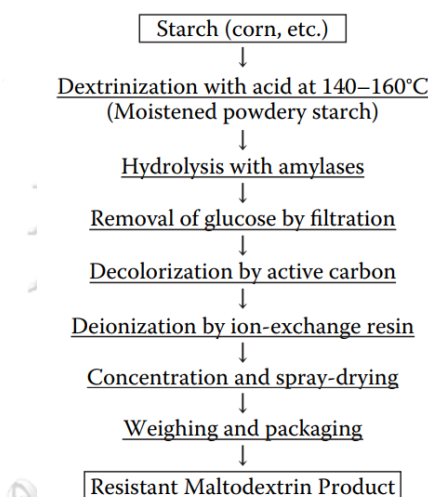
2. ทำให้โมเลกุลแป้งเล็กลงด้วยการให้ความร้อนกับแป้งที่แห้งในสภาวะที่มีกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน (dextrinization process) ซึ่งทำให้เกิดการย่อยโมเลกุลแป้งลงจนมีขนาดเล็กลงอยู่ในรูปของเดกซ์ตริน

3. ย่อยเดกซ์ตรินที่ได้ด้วยเอนไซม์

4. กรองด้วยถ่านกัมมันต์

5. กรองด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

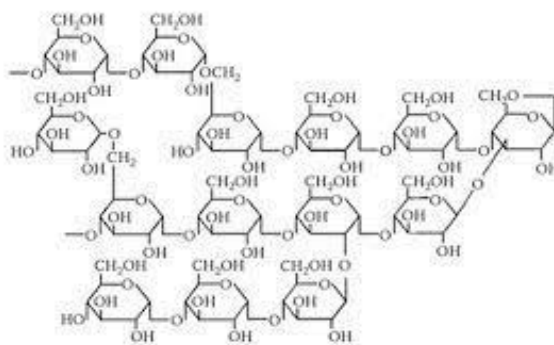
6. ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dry) ให้กลายเป็นผง



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย

ที่มา: Hashizume และ Okuma (2009)

ในโครงสร้างของมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยมีการเชื่อมกันด้วยพันธะ glycosidic linkage ที่ตำแหน่ง 1-6 มากกว่ามอลโตเดกซ์ตริน นอกจากนี้ยังมีการเชื่อมกันที่ตำแหน่งพันธะ 1-4 และ 1-6 และมีการเชื่อมกันที่ตำแหน่ง 1-2 และ 1-3 ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการย่อยแป้งให้มีโมเลกุลเล็กลง (ดังแสดงในรูปที่ 2.14) จึงทำให้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยถูกย่อยและถูกดูดซึมเข้าที่ลำไส้เล็กเพียง 10% อีก 50% จะเกิดการหมักในลำไส้ใหญ่ และอีก 40% ที่เหลือจะถูกขับออกทางอุจจาระ และจากงานวิจัยของ Bear และคณะ (2009) พบว่ามอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยให้พลังงานอยู่ในช่วง 2-2.5 kcal/g ซึ่งให้พลังงานใกล้เคียงกับแป้งด้านทานการย่อยที่มีค่าเท่ากับ 2 kcal/g



รูปที่ 2.14 โครงสร้างมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย
ที่มา: Hashizume และ Okuma (2009)

2.1.2 คุณสมบัติของมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (Hashizume และ Okuma, 2009)

1. ด้านการทำงานในระบบทางเดินอาหารพบว่า 90% ของมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยจะอยู่ในลำไส้ใหญ่ โดย 50% จะถูกหมัก ส่งผลทำให้การขับถ่ายดีขึ้นและบ่อยมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มผู้ทดสอบที่ไม่ได้ทานมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย

2. ด้านการขับถ่าย จากการทดสอบพบว่า มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยส่งผลต่อการขับถ่ายของผู้ทดสอบทำให้ขับถ่ายได้มากขึ้น และของเสียที่ขับถ่ายออกมามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้กินมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย จึงสรุปได้ว่า มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมีผลช่วยให้ขับถ่ายได้ดีขึ้น แต่ไม่ทำให้ท้องร่วงท้องเสีย เนื่องจากเป็นสารที่มีสมบัติเป็นเส้นใยอาหาร

3. ช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมของลำไส้

3.1 การเป็นพรีไบโอติก จากการทดสอบความสามารถในการหมักในหลอดทดลองพบว่า จุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียในลำไส้มนุษย์สามารถใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นอาหารสำหรับการเจริญเติบโตได้ ซึ่งแบคทีเรียสายพันธุ์หลักที่นำไปใช้ในการเติบโต ได้แก่ *Bifidobacterium* spp. และ *Bacteroides* spp.

4. ช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด จากงานวิจัยพบว่า มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยช่วยลดการเพิ่มระดับของน้ำตาลในเลือดและอินซูลินหลังกินอาหาร สอดคล้องกับการศึกษาของ Tokunaga และ Matsuoka (1999) ที่ให้ผู้ทดสอบกินบะหมี่แบ่งข้าวสาลี ข้าวสาลี และน้ำชาที่ผสมมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยพบว่า เมื่อผ่านไป 30 ถึง 60 นาทีหลังจากกินอาหารระดับปริมาณน้ำตาลในเลือดของผู้ทดสอบมีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาวามอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเฉพาะเพื่อสุขภาพ Foods for Specified Health Uses (FOSHU)

ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยที่นำมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมาใช้เป็นสารทอหุ้มเทคโนโลยีเอนแคปซูลชั้นผลิตไมโครแคปซูล เช่น ใช้เป็นสารทอหุ้มสารสกัดนารินจิน (Pai และคณะ, 2015) และใช้เป็นสารทอหุ้มน้ำส้ม (Igal และคณะ, 2021) เป็นต้น

2.2 กัมอารบิก (gum Arabic)

กัมอารบิกเป็นยางไม้ที่ได้จากลำต้นและกิ่งก้านของต้น *Acacia senegal* และ *Acacia seyal* ที่เติบโตในภูมิภาคแอฟริกากลาง แอฟริกาตะวันออก และผลิตมากที่พื้นที่ตอนกลางของประเทศซูดาน (Sudan) โดยมีการ

ส่งออกไปที่ตลาดในประเทศยุโรปและอเมริกาจำนวนมาก ซึ่งลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากต้นไม้จะอยู่ในรูปของของเหลวที่มีความเหนียวแต่อุดมไปด้วยเส้นใยที่สามารถละลายน้ำได้ (Williams & Phillips, 2000)



รูปที่ 2.15 กัมอาราบิกที่ได้มาจากต้น *Acacia*

ที่มา: ฐานข้อมูลออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก https://boxkao.blogspot.com/2017/03/blog-post_842.html

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของกัมอาราบิก

กัมอาราบิกมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่ซับซ้อน ประกอบไปด้วยสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต 97% และโปรตีน < 3% (ดังแสดงในตารางที่ 2.4) ซึ่งปริมาณจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด สภาพอากาศ ฤดูเก็บเกี่ยว อายุของต้นไม้ และสภาพการแปรรูป และจากองค์ประกอบในโครงสร้างของกัมอาราบิกจึงทำให้กัมอาราบิกเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) เนื่องจากมีส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) คือ คาร์โบไฮเดรต และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) คือ โปรตีนอยู่ในโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์โครมาโตกราฟีเพื่อศึกษาสมบัติด้านดรรชนีหักเหและการวัดค่าดูดกลืนแสงของกัมอาราบิก พบว่า กัมอาราบิกมีองค์ประกอบในโครงสร้างอยู่ 3 องค์ประกอบหลัก (ดังแสดงในรูปที่ 2.16)

1. คาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างมากถึง 88-90% ขององค์ประกอบทั้งหมด ประกอบไปด้วย แรมโนส (rhamnose) อาราบิโนส (arabinose) และกรดกลูโคโรนิก (glucuronic acid) โดยเรียกส่วนนี้ว่า อาราบิโนกาแลคแทน (arabinogalactan, AG) (Renard และคณะ, 2006; Sanchez และคณะ, 2008)

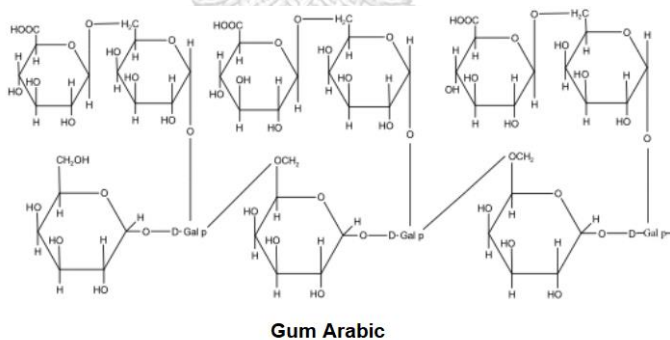
2. โปรตีน เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในโครงสร้างประมาณ 10% ขององค์ประกอบทั้งหมด ซึ่งเป็นส่วนทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอาราบิโนกาแลคแทน-โปรตีน (arabinogalactan-protein, AGP) (Goodrum และคณะ, 2000)

3. องค์ประกอบอื่นๆ มีขนาดเล็ก มีปริมาณ 1% ขององค์ประกอบทั้งหมด ได้แก่ โกลโคโปรตีน (glycoprotein, GP) (Williams และคณะ, 1990)

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดคุณภาพของกัมอาราบิกทางสากล

| คุณสมบัติ | ค่าที่กำหนด |
|---|---------------|
| ความชื้น (%) | 13-15 |
| ปริมาณเถ้า (%) | 2-4 |
| พลังงานภายใน | 30-39 |
| สารระเหย | 51-65 |
| การหมุนตามระนาบของแสง | (-26) – (-34) |
| ปริมาณไนโตรเจน | 0.26-0.39 |
| ปริมาณไอออนบวกที่มาจากปริมาณเถ้าทั้งหมดที่ 550°C | |
| คอปเปอร์ (ppm) | 52-66 |
| เหล็ก (ppm) | 730-2490 |
| แมงกานีส (ppm) | 69-117 |
| สังกะสี (ppm) | 45-111 |

ที่มา: Montenegro และคณะ (2012)



รูปที่ 2.16 โครงสร้างกัมอาราบิก

ที่มา: ฐานข้อมูลออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก <https://byjus.com/chemistry/gum-arabic/>

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ

เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของกัมอาราบิกมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ดังนั้นคุณสมบัติของกัมอาราบิกจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของกัมอาราบิก เช่น ความสามารถในการละลาย ความหนืด ระดับของปฏิกิริยากับน้ำและน้ำมัน ความสามารถในการห่อหุ้มไมโครเอนแคปซูลชัน และสมบัติอื่น ๆ

1. ความสามารถในการละลายและความหนืด

กัมอาร์บิกมีความสามารถในการละลายสูง แต่เป็นสารที่มีความหนืดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกัมชนิดอื่น โดยความหนืดของกัมอาร์บิกสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยสารละลายกรดและเบส ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของกัมอาร์บิก พบว่าที่ pH ในช่วง 5.0-5.5 เป็นช่วงที่ทำให้กัมอาร์บิกมีความหนืดมากที่สุด แต่เมื่อทำให้สารละลายมี pH เป็นเบส ความหนืดจะมีค่าลดลง (Anderson และคณะ, 1990; Williams และคณะ, 1990)

2. คุณสมบัติการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์

กัมอาร์บิกถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของสารอิมัลซิไฟเออร์ในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันหอมระเหยและกลิ่นรส ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีผลมาจากองค์ประกอบของอาร์บิกโนกาแลคแทน-โปรตีน ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของกัมอาร์บิก เนื่องจากมีส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ชอบน้ำและส่วนของโปรตีนชอบไขมัน

จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการนำกัมอาร์บิกมาเป็นสารหนืดในเทคโนโลยีเอนแคปซูลชัน เพื่อป้องกันสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพภายในไมโครแคปซูล งานวิจัยของ Silva และคณะ (2012) ในการผลิตผงไมโครแคปซูลโปรตีนไฮโดรไลเสตจากหอยแมลงภู่ในการใช้สารหนืดที่แตกต่างกัน (มอลโตเดกซ์ตรินและกัมอาร์บิกที่ความเข้มข้น 15% และ 30%) พบว่า การใช้กัมอาร์บิกส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี TEAC และ FRAP สูงที่สุด และในงานวิจัยของ Yousefi และคณะ (2011) ที่ศึกษาผลของชนิดสารหนืดและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำทับทิม (*Punica Granatum L.*) พบว่า การใช้กัมอาร์บิกทำให้มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่บ่งบอกถึงความเสถียรของผงไมโครแคปซูลมากที่สุด

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของของเหลวจะทำให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพภายในสารละลายไม่คงตัวเกิดการเสื่อมสลายได้ง่าย ดังนั้นกระบวนการทำแห้งให้สารละลายกลายเป็นผงด้วยวิธีต่าง ๆ ที่นำมาใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีเอนแคปซูลชันจะทำให้สามารถเก็บรักษาและขนส่งตัวอย่างได้ง่าย มีความสะดวกในการทำงาน และทำให้สารต้านออกซิเดชันมีความคงตัวได้ดีกว่า ซึ่งในปัจจุบันมีกระบวนการทำแห้งหลากหลายกระบวนการที่ใช้ควบคู่กับการทำเอนแคปซูลชัน เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) การอัดผ่านเกลียว (extrusion) การทำแห้งสุญญากาศ (vacuum drying) และการทำแห้งเยือกแข็ง (freeze drying) เป็นต้น

2.9 กระบวนการทำแห้ง (drying process)

กระบวนการทำแห้งเป็นกระบวนการถนอมอาหารที่มีกันมาอย่างยาวนาน โดยในอดีตจะอาศัยดวงอาทิตย์ลม และควันไฟในการทำแห้ง มีจุดประสงค์หลักเพื่อกำจัดน้ำออกจากตัวอย่างอาหาร ส่งผลทำให้จุลินทรีย์ในอาหารไม่สามารถเจริญเติบโตได้ และเป็นการหยุดการทำงานของเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์อาหารส่งผลให้อาหารแห้งไม่เกิดการเสื่อมเสีย โดยอาหารแห้งที่ได้จะมีรสชาติอร่อย มีคุณค่าทางโภชนาการ น้ำหนักเบา เก็บรักษาได้ และสามารถใช้งานได้ง่าย ซึ่งในปัจจุบันก็มีกระบวนการทำแห้งหลากหลายวิธี (Ahmed และคณะ, 2013)

1. การทำแห้งด้วยดวงอาทิตย์

การทำแห้งด้วยดวงอาทิตย์เป็นการทำแห้งอาหารที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งผลไม้ ไม่เหมาะกับการทำแห้งผักและเนื้อสัตว์ เนื่องจากผักมีปริมาณน้ำตาลและกรดต่ำ รวมถึงเนื้อสัตว์ที่มีปริมาณโปรตีนสูง จะเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ โดยการทำแห้งด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาในการทำแห้งผลไม้นานหลายวัน เนื่องจากสภาพอากาศในแต่ละวันจะมีความแตกต่างกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 การทำแห้งผลไม้ด้วยดวงอาทิตย์

ที่มา: ฐานข้อมูลออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก <https://mothernature-healthydelights.com/why-sun-dried-fruits-are-good-for-you/>

2. การทำแห้งเยือกแข็ง (freeze drying)

เป็นการทำแห้งเยือกแข็งที่ใช้อุณหภูมิต่ำในการทำแห้ง เป็นวิธีที่มีการใช้มานานหลายปี โดยมักใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา เป็นกระบวนการที่สามารถใช้กับวัตถุดิบที่เกิดการเน่าเสียได้ง่าย และมีขั้นตอนการผลิตหลัก ๆ คือการแช่เยือกแข็งวัตถุดิบและลดแรงดันลง ส่งผลให้น้ำที่อยู่ในวัตถุดิบเกิดการระเหิด เปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นแก๊ส ทำให้ในวัตถุดิบมีปริมาณน้ำลดลง ซึ่งการทำแห้งด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถคงความเสถียรภาพของวัสดุที่มีชีวิตไว้ได้ เช่น จุลินทรีย์ เป็นต้น (ดังแสดงในรูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 การทำแห้งผลไม้ด้วยการทำแห้งเยือกแข็ง

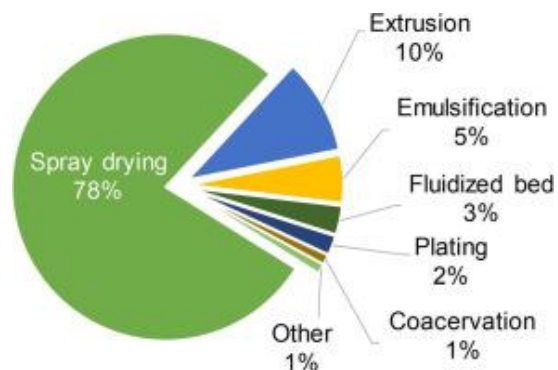
ที่มา: ฐานข้อมูลออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก <https://harvestright.com/commercial-freeze-dryer/>

3. การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying)

การทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการการทำแห้งที่เก่าแก่ และมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะการนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารที่มักจะนิยมใช้ร่วมกับเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.19) เป็นกระบวนการผลิตผงแห้งโดยการพ่นตัวอย่างเป็นละอองฝอยเข้าไปในห้องทำแห้งที่มีลมร้อนไหลแบบปั่นป่วน (turbulent heat flow) และความชื้นจากลมร้อนทำให้น้ำในละอองเกิดการระเหยออกจากโมเลกุล และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายออกมาในรูปของผงไมโครแคปซูลความชื้นต่ำ

วิธีนี้มีข้อดี คือ เป็นกระบวนการทำแห้งที่สามารถทำได้ต่อเนื่อง จึงทำให้ได้ผลผลิตหลังจากการทำแห้งสูง และผงไมโครแคปซูลที่ได้มีประสิทธิภาพการกักเก็บสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดปัจจัยที่

ส่งผลต่อการทำแห้งได้หลากหลาย โดยตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่นำมาทำแห้งแบบพ่นฝอย เช่น กลิ่น (flavor) น้ำมัน (oils) โพรไบโอติก (probiotic cultures) วิตามิน (vitamins) เป็นต้น



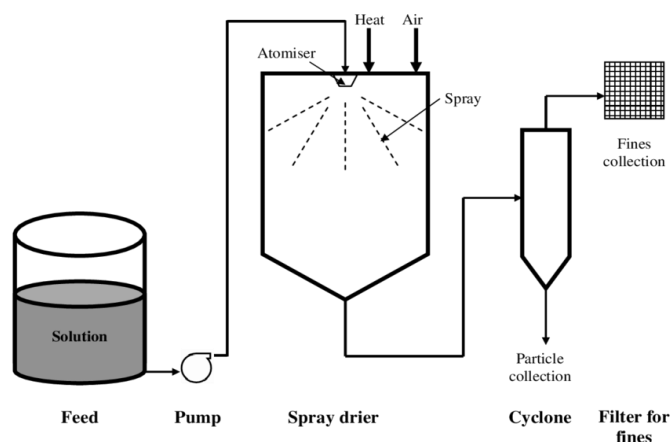
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงร้อยละการเลือกใช้เทคโนโลยีการแปรรูปในการทอหุ้มสารรวมทุกประเทศทั่วโลก
ที่มา: Arpagaus (2019)

3.1 หลักการของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย มี 4 ขั้นตอนหลัก (ดังแสดงในรูปที่ 2.20)

1. ขั้นตอนการพ่นตัวอย่างผ่านหัวพ่นฝอย (atomizer) ให้เป็นละอองฝอยเข้าไปในห้องทำแห้ง (drying chamber) โดยมีหัวพ่นฝอยอยู่หลากหลายรูปแบบซึ่งมีความเฉพาะเจาะจงกับคุณสมบัติของสารละลายที่แตกต่างกัน

2. ขั้นตอนการทำแห้งละอองฝอยของตัวอย่าง ตัวอย่างละอองฝอยที่อยู่ในห้องทำแห้งจะเกิดการระเหยของน้ำจากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับลมร้อนที่ไหลแบบปั่นป่วน ทำให้โมเลกุลน้ำเกิดการระเหยกลายเป็นแก๊สอย่างรวดเร็ว

3. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง หลังจากที่มีน้ำระเหยออกจากโมเลกุลจะทำให้เกิดการสร้างผนังทอหุ้มและเกิดเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กขึ้นภายในห้องทำแห้ง จากนั้นจะถูกแยกออกด้วยแก๊สลมร้อนในห้องไปยังโถแก้วเก็บตัวอย่างด้านล่างสุดของเครื่อง ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายออกมาอยู่ในรูปของผงไมโครแคปซูลที่มีความชื้นต่ำ



รูปที่ 2.20 การทำแห้งแบบพ่นฝอย

ที่มา: Burey และคณะ 2008

กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการทำแห้งที่ทำได้ง่าย มีค่าใช้จ่ายน้อย และเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งสารที่ไม่คงทนต่อความร้อนและเสื่อมสลายด้วยความร้อนได้ง่าย การทำแห้งแบบพ่นฝอยจึงเป็นวิธีที่ทำให้เทคนิคเอนแคปซูเลชันมีประสิทธิภาพ และช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผงได้ดีมากขึ้น

2.10 บรรจุภัณฑ์อาหาร

บรรจุภัณฑ์อาหารมีการนำมาใช้มากกว่า 200 ปี และมีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคมาตลอด จนในปัจจุบันจึงมีบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติและหน้าที่ที่หลากหลายสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้ในการเก็บรักษา ใช้ในการป้องกัน การให้ข้อมูลแก่ผู้บริโภค การใช้ร่องเพื่อลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ และเพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดเก็บ เป็นต้น

บรรจุภัณฑ์มีหลากหลายหน้าที่ ตัวอย่างเช่น เพื่อป้องกันปัจจัยภายนอกที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้ในการห่อหุ้มอาหาร และเพื่อให้ผู้บริโภคได้รับส่วนผสมและข้อมูลทางโภชนาการของอาหาร เป็นต้น โดยบรรจุภัณฑ์อาหารในทางโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการเลือกบรรจุภัณฑ์มาใช้เพื่อทำให้มีความคุ้มค่าและตรงกับความต้องการของอุตสาหกรรมและผู้บริโภค แต่ยังคงรักษาความปลอดภัยของอาหารและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด (Marsh และคณะ, 2007)

2.10.1 วัสดุที่นำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

การออกแบบบรรจุภัณฑ์เป็นสิ่งสำคัญในการทำให้อาหารสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานมากขึ้น การเลือกบรรจุภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหาร จะช่วยรักษาคุณภาพและความสดของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการจำหน่ายและเก็บรักษาไว้ได้ดี โดยวัสดุที่นำมาใช้มีมากมายหลายชนิด ตัวอย่างเช่น แก้ว เหล็ก กระดาษ และพลาสติก เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้วัสดุต่าง ๆ มาผสมกันในการผลิตบรรจุภัณฑ์เพื่อทำให้ความสามารถของบรรจุภัณฑ์นั้นมีความสามารถที่ดีขึ้น (Marsh และคณะ, 2007)

1. บรรจุภัณฑ์พลาสติก (plastic)

เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สังเคราะห์มาจากการควบแน่นในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) โดยสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ เพราะพลาสติกทำมาจากสารเคมีที่มีความต้านทาน มีราคาถูก และง่ายต่อการพิมพ์ แต่การใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกจะมีปัญหาด้านสุขภาพที่ต้องระวังเกี่ยวกับการตกค้างของสารเคมีที่อันตรายในบรรจุภัณฑ์ เช่น บิสฟีนอล เอ (bisphenol A) โดยสามารถแบ่งพลาสติกออกได้เป็น 2 ชนิด ตามสมบัติทางความร้อน ได้แก่ (Raj, 2005)

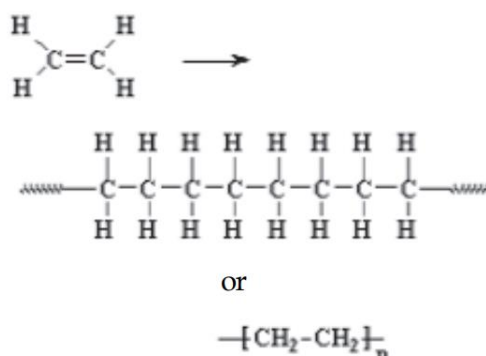
- เทอร์โมเซต (thermosets)

เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง ส่งผลทำให้พลาสติกชนิดนี้มีความแข็งแรง ทนทาน และไม่สามารถคืนตัวหรือปั้นกลับไปเป็นของเหลวได้เมื่อโดนความร้อน จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์อาหาร แต่มักใช้ในด้านรถยนต์และก่อสร้างเป็นหลัก ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ ได้แก่ เมลามีนฟอร์มาดีไฮด์ พอลิเอสเทอร์ เป็นต้น

- เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic)

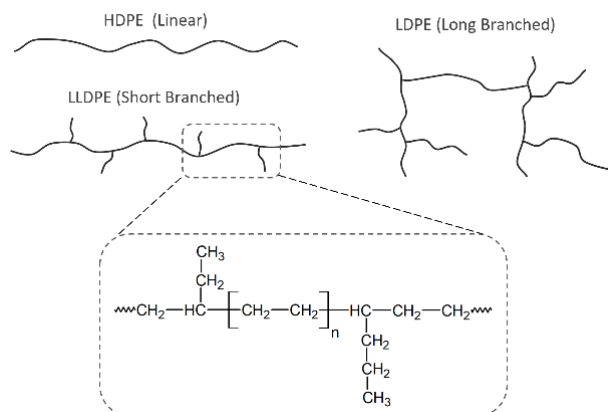
เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์สายสั้น จะอ่อนตัวลงเมื่อโดนความร้อนและกลับมาแข็งตัวเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นพลาสติกชนิดนี้จึงสามารถนำไปทำได้หลากหลายรูปร่างและสามารถนำกลับมาขึ้นใหม่เป็น

รูปร่างอื่นได้ เช่น นำไปทำเป็นขวดโหล หรือ ฟิล์ม เป็นต้น ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ ได้แก่ พลาสติกพอลิเอทิลีน ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด ประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนที่เชื่อมกับไฮโดรเจนต่อกันเป็นสายยาว (ดังแสดงในรูป 2.21) เป็นพลาสติกที่นำมาใช้มากที่สุดในชีวิตประจำวัน เช่น การนำมาทำเป็นขวดแชมพู ของเล่นเด็ก เป็นต้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามความหนาแน่น ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high-density polyethylene) ซึ่งแตกต่างกันที่โครงสร้าง ส่งผลให้มีความหนาแน่นที่ต่างกัน (ดังแสดงในรูป 2.22)



รูปที่ 2.21 โครงสร้างหลักของพอลิเอทิลีน

ที่มา: Raj (2005)



รูปที่ 2.22 ลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันของพลาสติกพอลิเอทิลีน

ที่มา: ฐานข้อมูลออนไลน์ สืบค้นเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก

<https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyolefin%20type.html>

2. ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil bag)

อลูมิเนียมฟอยล์ เป็นวัสดุลามิเนตที่สำคัญและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร เพราะเป็นวัสดุที่สามารถผลิตได้หลากหลายรูปแบบและมีคุณสมบัติเป็นผนังกั้นการซึมผ่านของความชื้น

ออกซิเจน และแก๊สอื่น ๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังมีความคงตัวทางเคมีของอลูมิเนียมพอยล์ที่ทำให้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความปลอดภัยทางพิษวิทยา เมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมพอยล์กับวัสดุการผลิตบรรจุภัณฑ์อื่นพบว่า อลูมิเนียมพอยล์มีคุณสมบัติที่ดีกว่า สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารและยาได้ดี แต่เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีราคาแพง

Kanpairo (2020) ศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ระหว่างถุงอลูมิเนียมพอยล์ลามิเนตและพลาสติก LLDPE ในการเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลน้ำชาเจ้เหมงพร้อมดื่มสำเร็จรูปที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 90 วัน และดูการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีพบว่า ชนิดของบรรจุภัณฑ์ และอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยการบรรจุผงน้ำชาเจ้เหมงพร้อมดื่มสำเร็จรูปในถุงอลูมิเนียมพอยล์ลามิเนตจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีน้อยที่สุด และมีความคงตัวมากที่สุดตลอดระยะเวลา 90 วัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Irwandi และคณะ (1998) ที่ศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ที่ต่างกันต่อคุณสมบัติทางกายภาพเคมี จุลินทรีย์ และการทดสอบประสาทสัมผัสของทุเรียนแผ่น ในการเก็บรักษาทุเรียนแผ่นเป็นเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าการบรรจุในถุงอลูมิเนียมพอยล์พบว่า ทุเรียนแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ สี และปริมาณจุลินทรีย์ของตัวอย่างน้อยที่สุด และถุง LDPE มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

Sulandari (2016) ศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ที่ต่างกันต่อปริมาณความชื้น ปริมาณจุลินทรีย์ และค่า peroxide value (PV) ของข้าวเหลืองกันหยงกึ่งสำเร็จรูป (instant Ganyong yellow rice) เมื่อทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์พบว่า ข้าวกันหยงในถุงอลูมิเนียมพอยล์ มีปริมาณความชื้น ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ และค่า peroxide value น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

วัตถุดิบ

รกสุกร (ราชบุรี, ประเทศไทย)

มอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย (resistant maltodextrin) (Fibersol ®-2, DE12) (Matsutani, Japan)

กัมอารบิก (gum Arabic) (Agrigum, UK)

สารเคมี

2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Sigma Aldrich, USA)

2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ) (Sigma Aldrich, USA)

6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) (Sigma Aldrich, USA)

Ethanol (CH₃CH₂OH) (DEPTAL-AX, Thailand)

Glacial acetic acid (CH₃COOH) (A.R. grade, Qrec, New Zealand)

Hydrochloric acid 0.1 M (HCL) (Kemaus, Australia)

Hexane (A.R. grade, aNaPure, New Zealand)

Iron (II) sulphate 7-hydrate (FeSO₄.7H₂O) (KemAus, Australia)

Iron (III) chloride (FeCl₃) (POCH S.A., Poland)

Methanol (CH₃OH) (Fisher Scientific, UK)

Sodium acetate trihydrate (CH₃COONa.3H₂O) (Glentham, UK)

Sodium chloride (NaCl) (GHP, Thailand)

Sodium hypochlorite (NaOCL) (Loba, India)

เครื่องมือ

กรวยแยกสาร (separatory funnel) (Arco, England)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope and energy dispersive x-ray spectrometer) (JEOL, รุ่น JSM-IT300, Japan)

เครื่องกวนผสมสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (hotplate stirrer) (SCILOGEX, รุ่น SCI550-S, U.S.A)

เครื่องกวนสาร (overhead stirrer) (HT500X, รุ่น SKU-00166, Germany)

เครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) (Onilab, USA)

เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง (analytical balance) (Mettler Toledo, รุ่น New Classic MF, Switzerland)

เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance) (Mettler Toledo, รุ่น MS304S, Switzerland)

เครื่องซีลกิ่งอัตโนมัติแบบเท้าเหยียบ (semi auto impulse sealer) (TUPACK, รุ่น PHS 450/10D, Thailand)

เครื่องซีลสุญญากาศ (vacuum sealer) (Multivac, รุ่น A300/16, Germany)

เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) (Niro A/S, DK-2860 Soeborg, Denmark)

เครื่องปั่นผสม (blender) (Philips, HR2221/00 ProBlend crush, Netherlands)
 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) (Kubota, รุ่น 6000, Japan)
 เครื่องปั่นเหวี่ยง (refrigerated centrifuge) (Thermo Scientific, Sorvall RC6 Plus wit Fiberlitter rotor)
 เครื่องวัดกิจกรรมของน้ำ (water activity analyzer) (AquaLab, รุ่น series3 TE, U.S.A)
 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (BioSpectrophotometer basic) (Eppendorf, USA)
 เครื่องวัดค่าความต่างความร้อนของสาร (differential scanning calorimeter) (NETZSCH, รุ่น 204 F1 Phoenix, Germany)
 เครื่องวัดสี (chroma meter) (Konica Minolta, รุ่น CR-400, Japan)
 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบดิจิตอล (digital refractometer) (Hanna instruments, รุ่น HI96801, USA)
 ชุดตรวจวัดโปรตีน Bio-Rad Bradford protein assay (Life Science Group, USA)
 ตู้แช่แข็ง (freezer) (Panasonic, รุ่น SF-PC1497, Japan)
 ตู้แช่เย็น (refrigerator) (Panasonic, รุ่น SBC-P2DSA, Japan)
 ตู้อบลมร้อน (hot air oven) (Memmert, รุ่น DO 6062, Germany)
 ผ้าขาวบาง (filter cloth)
 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (shaking water bath) (Julabo, รุ่น SW33, Germany)

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างรกสุกร

ละลายน้ำแข็งรกสุกรที่แช่แข็งในตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสที่ได้จากฟาร์มในกลุ่มสมาชิก สหกรณ์การเกษตรกรรมปศุสัตว์จังหวัดราชบุรีในตู้แช่เย็น (Panasonic, รุ่น SBC-P2DSA, Japan) อุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งไม่มีเกล็ดน้ำแข็งหลงเหลือในชิ้นส่วนรกสุกร จากนั้นล้างเมือกและเลือดที่ติดค้างด้วยน้ำเกลือที่ผ่านการฆ่าเชื้อ (sterile sodium chloride 0.9% (w/v)) ที่ใส่ไว้ในตู้แช่เย็นอุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียส ล้างซ้ำประมาณ 3-4 ครั้ง จนกระทั่งไม่มีเลือดและเมือกติดค้างอยู่ในรก ชั่งน้ำหนักและจดบันทึกน้ำหนักที่ได้ไว้ จากนั้นตัดสายสะดือ (umbilical cord) ตัดหลอดเลือดดำ (fetal vein) และตัดหลอดเลือดแดง (fetal artery) ที่เชื่อมกับสายสะดือของรกสุกรทิ้ง หั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด 3-5 เซนติเมตร ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเกลือที่ใส่ไว้ในตู้แช่เย็นอุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียส และสะเด็ดน้ำออกบนกระดาษกรองตาถี่ จากนั้นชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่เหลือของรกสุกรหลังผ่านการตัดแต่งแล้วผสมรกสุกรที่ได้กับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ไร้ไอออนที่ผ่านการฆ่าเชื้อ (sterile deionized water) ที่แช่เย็นในตู้แช่เย็นอุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน 1:1 (น้ำหนักรกสุกรต่อปริมาณน้ำ DI (w/v)) โดยแบ่งการปั่นออกเป็นครั้งละ 600 มิลลิลิตรแล้วปั่นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่น (Philips, HR2221/00 ProBlend crush, Netherlands) ด้วยความแรงระดับ 5 นาน 1 นาที จนกระทั่งเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้ส่วนของสารสกัดหยาบ (blended crude) แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อตกตะกอนเซลล์และเนื้อเยื่อที่ระดับการเหวี่ยงความเร็ว 10000 rpm อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เก็บเฉพาะส่วนใสที่ได้แล้วกรองผ่านผ้าขาวบางขนาด 0 ที่พับซ้อนทับกันอย่างน้อย 4 ครั้ง แล้วเก็บรักษาส่วนใสของสารสกัดรกสุกร (porcine placenta extract, PPE) ที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในตู้แช่เย็นสำหรับใช้ในขั้นตอนถัดไป

3.2 การศึกษาผลของกระบวนการกำจัดไขมันต่อสมบัติของสารสกัดรกสุกร

นำรกสุกรในขั้นตอน 3.1 มาสกัดไขมันออก โดยเติมสารละลายเฮกเซน (n-hexane) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 (ปริมาตรสารสกัดรกสุกรต่อปริมาตรเฮกเซน (mL/mL)) โดยแบ่งเพื่อทำการผสมครั้งละ 1 L (สารสกัดรกสุกร 500 mL ต่อเฮกเซน 500 mL) ในบีกเกอร์ขนาด 2 L ปิดด้านบนปากบีกเกอร์ให้มิดชิดด้วยฟิล์มยืดห่ออาหารเพื่อป้องกันการระเหยของเฮกเซน (ขั้นตอนการผสมสารทั้งหมดทำภายใต้ตู้ดูดควัน) แล้วกวนผสมสารเพื่อไม่ให้เกิดการแยกชั้นด้วยเครื่องกวนสาร (magnetic stirrer) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษากิจกรรมของโปรตีนและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัด

ประกอบชุดตั้งกรวยแยกที่ประกอบด้วยห่วงวงแหวน (o-ring) ขนาด 4 นิ้ว และชุด stand & base ขนาด 60 cm ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม แล้วจึงเทสารผสมของสารสกัดรกสุกรและเฮกเซนที่ผ่านการกวนสารแล้วลงในกรวยแยกขนาดความจุ 1 L โดยปริมาณของเหลวที่บรรจุไม่ควรเกิน 3 ใน 4 ส่วนของปริมาตรของกรวยแยก จากนั้นปิดจุดด้านบนให้แน่นและพันรอบรอยต่อของจุกให้มิดชิดด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันการรั่วไหลของไอระเหยของเฮกเซน เขย่ากรวยแยกเบา ๆ อีกครั้งเพื่อให้ของเหลวทั้ง 2 ชั้นผสมกันมากที่สุด เอียงกรวยแยกให้ปลายเอียงขึ้น แล้วเปิดก๊อกเพื่อลดแรงดันภายในกรวยแยก ตั้งกรวยแยกในแนวตั้งบนที่ยึดวงแหวนเพื่อปล่อยให้สารละลายแยกเป็น 2 เฟส ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วแยกเก็บสารสกัดที่ผ่านการกำจัดไขมัน (porcine placenta fat-removed extracts, PPFE) โดยเปิดจุดด้านบนแล้วเปิดก๊อกให้สารละลายที่อยู่ชั้นล่างไหลลงในภาชนะรองรับอย่างช้าๆ โดยระมัดระวังช่วงรอยต่อระหว่างชั้นทั้งสองพร้อมวัดปริมาตรสารสกัดส่วนใสหลังผ่านการกำจัดไขมันที่ได้ทั้งหมดด้วยกระบอกตวงและจดบันทึก จากนั้นแบ่งตัวอย่างเก็บใส่ขวดพลาสติกทนความเย็นให้แต่ละขวดมีปริมาตรขวดละ 500 โดยเก็บตัวอย่างทั้งสองชนิดไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส สำหรับการเก็บรักษาในระยะสั้น และที่ -80 องศาเซลเซียส สำหรับการเก็บรักษาในระยะยาว

วิเคราะห์สมบัติของโปรตีนและฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัดรกสุกรที่ได้จากข้อ 3.1 และ 3.2 ดังนี้

3.2.1 ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Bradford protein assay (ภาคผนวก ข.3)

3.2.2 มวลโมเลกุลโปรตีนด้วย SDS-polyacrylamide gel electrophoresis (Sambrook และคณะ 1989) (ภาคผนวก ข.4)

3.2.3 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ดัดแปลงจากวิธีของ Brand-Williams และคณะ (1995) และ Tang และคณะ (2013) (ภาคผนวก ข.1)

3.2.4 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) ดัดแปลงจากวิธีของ Benzie และ Strain (1995) (ภาคผนวก ข.2)

3.3 การศึกษาผลของภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

แปรปัจจัยในการเอนแคปซูเลชันของสารสกัดรกสุกร 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสารห่อหุ้ม (มอลโตเดกตริน ต้านทานการย่อยและกัมอาร์บิก) ร้อยละความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม (40 และ 45 %w/v) และอุณหภูมิขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (165 และ 175 องศาเซลเซียส) โดยกำหนดค่า อัตราส่วนของสารสกัดต่อสารห่อหุ้ม (1:2 v/v) และ อัตราการไหลของตัวอย่างที่ 8

mL/min ให้คงที่สำหรับทุกการทดลอง ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Tang และคณะ (2013) และ Kurozawa และคณะ (2009) โดยเก็บผงไมโครแคปซูลที่ได้ในถุงอะลูมิเนียมพอยลีนในภาวะการบรรจุสุญญากาศ และเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิห้อง

วิเคราะห์สมบัติของโปรตีน สมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ได้จากข้อ 3.3 ดังนี้

3.3.1 สมบัติตามข้อ 3.2.1 – 3.2.4

3.3.2 ปริมาณความชื้น (%moisture content) ด้วยวิธี AOAC (2000) (ภาคผนวก ก.1)

3.3.3 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity, a_w) ด้วยวิธี AOAC (2000) (ภาคผนวก ก.2)

3.3.4 ค่าสี ระบบ CIE LAB ด้วยเครื่อง chroma meter (ภาคผนวก ก.3)

3.3.5 ผลผลิตร้อยละที่ได้ (%encapsulation yield) ดัดแปลงจากวิธีของ Ramakrishnan และคณะ (2018) (ภาคผนวก ก.4)

3.3.6 ประสิทธิภาพการกักเก็บของสารต้านออกซิเดชัน (%encapsulation efficiency) ดัดแปลงจากวิธีของ Saénz และคณะ (2009) (ภาคผนวก ก.5)

3.3.7 ความสามารถในการละลาย (%solubility) ดัดแปลงจากวิธีของ Wang และคณะ (2019) (ภาคผนวก ก.6)

3.3.8 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ดัดแปลงจากวิธีของ Silva และคณะ (2012) (ภาคผนวก ก.7)

3.3.9 ลักษณะรูปร่างภายนอกของไมโครแคปซูล ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (ภาคผนวก ก.8)

จากนั้นเลือกภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมา 1 ภาวะ โดยพิจารณาจากฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่สูงที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3.4 การศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์และภาวะการเก็บรักษาต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

บรรจุตัวอย่างผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรจากข้อ 3.3 ในภาวะการเก็บรักษาที่ต่างกัน โดยแปรบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด (ถุงอะลูมิเนียมพอยลีนลามิเนตและถุงพลาสติก HPDE) และแปรภาวะการบรรจุ 2 ชนิด (บรรจุภายใต้สุญญากาศและบรรจุภายใต้บรรยากาศ) รายละเอียดตามตารางที่ 3.1 และเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและติดตามการเปลี่ยนแปลงทุก 15 วัน เป็นเวลา 90 วัน โดยวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรหลังเก็บรักษา ตามข้อ 3.3.1 – 3.3.9

ตารางที่ 3.1 ชนิดบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

| ชนิดบรรจุภัณฑ์ | ชนิดของการบรรจุ | |
|--|--------------------|--------------------|
| ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil bag) | ภายใต้ภาวะบรรยากาศ | ภายใต้ภาวะสุญญากาศ |
| ถุงพลาสติก HDPE (high density polyethylene bag) | ภายใต้ภาวะบรรยากาศ | ภายใต้ภาวะสุญญากาศ |

3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ในการศึกษาผลของกระบวนการสกัดไขมันออกจากสารสกัดรกสุกรในขั้นตอนที่ 3.2 ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลอง Paired sample test และในขั้นตอนการทดลองที่ 3.3 การทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร ออกแบบการทดลองแบบ 3x2x2 Factorial designs in Completely Randomized Design (CRD) และขั้นตอนที่ 3.4 ออกแบบการทดลองแบบ 2x2 Factorial design in Completely Randomized Design (CRD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาผลของกระบวนการกำจัดไขมันต่อสมบัติของสารสกัดรกสุกร

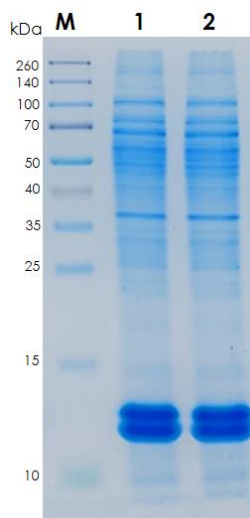
4.1.1 ความเข้มข้นโปรตีนและมวลโมเลกุลโปรตีนของสกัดรกสุกร

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโปรตีนในตัวอย่างสารสกัดรกสุกร ด้วยวิธี Bradford protein assay พบว่า ความเข้มข้นโปรตีนจากส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE) เมื่อผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) มีความเข้มข้นโปรตีนลดลง โดยเมื่อส่วนใสดังกล่าวผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) พบว่า มีร้อยละผลผลิตโปรตีนลดลงประมาณ 40% (ตารางที่ 4.1) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตของปริมาณส่วนใส ภายหลังจากการแยกไขมันซึ่งมีการสูญเสียปริมาตร ตัวอย่างไปโดยสามารถอธิบายได้จากการที่สารสกัดโปรตีนรกสุกรบางส่วนมีสมบัติที่สามารถละลายและรวมไปกับชั้นของเฮกเซนและถูกนำออกไปหลังจากผ่านกระบวนการสกัดไขมันได้

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นโปรตีนในตัวอย่างสารสกัดรกสุกร

| ตัวอย่าง | ความเข้มข้นโปรตีน (mg/ml) | ร้อยละผลผลิต (%) |
|---|------------------------------|---------------------|
| ส่วนใสของสารสกัดหยาบ (Porcine placenta extracts, PPE) | 1.60 | 100 |
| ส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PP fat-removed extracts, PPFE) | 1.22 | 58.3 |

เมื่อวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนหยาบในสารสกัดทั้ง 2 ชั้นตอนเปรียบเทียบกับกันด้วยเทคนิค SDS-PAGE พบว่า โปรตีนใน lane 1 และ 2 ของสารสกัดในรูปของเหลวพบแถบของโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มากกว่า 200 kDa และขนาดเล็กต่ำกว่า 10 kDa โดยพบโปรตีนส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 100 ถึง 25 kDa อย่างชัดเจน (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายเฮกเซนในการสกัดไขมันออกจากสารสกัดนั้นจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีนหรือไม่ทำให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีน



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์มวลโมเลกุลโปรตีนในสารสกัดรกสุกร ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane 1 = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane 2 = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE)

4.1.2 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัดรกสุกร

ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัดรกสุกรแบบกำจัดไขมันออกและแบบไม่กำจัดไขมันออกจากสารสกัดพบว่า สารสกัดรกสุกรที่มีไขมันมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมากกว่าสารสกัดรกสุกรที่กำจัดไขมันออกแล้ว (ตารางที่ 4.2) เนื่องจากในขั้นตอนการสกัดไขมันด้วยเฮกเซนส่งผลให้โปรตีนในสารสกัดที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันบางส่วนถูกสกัดออกจากชั้นของตัวอย่างและรวมกับชั้นของสารละลายเฮกเซน ทำให้ปริมาณโปรตีนที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันลดลง ผลที่ได้สอดคล้องกับความเข้มข้นของโปรตีนที่ลดลงหลังจากผ่านกระบวนการสกัดไขมันของสารสกัดรกสุกร และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Brodowska และคณะ (2014) ที่ศึกษาผลของการกำจัดไขมันออกจากเมล็ดลินินต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน โดยพบว่ากระบวนการสกัดไขมันในเมล็ดลินินส่งผลทำให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่วัดด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันน้อยกว่าเมล็ดลินินที่ไม่ได้เอาไขมันออก

กระบวนการสกัดไขมัน เป็นกระบวนการที่มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดไขมันออกจากตัวอย่างทำให้ตัวอย่างมีเสถียรภาพมากขึ้น เพราะไขมันเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่อุตสาหกรรมอาหารให้ความสำคัญ เพราะเป็นปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส สี และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างเก็บรักษา ทำให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารลดลง ซึ่งในรกสุกรนอกจากจะมีสารอาหาร ไบโอแอคทีฟเปปไทด์ และเอนไซม์สะสมอยู่ในรกแล้ว ยังพบว่า มีฮอร์โมนสเตียรอยด์สะสมอยู่ในรกด้วย ซึ่งในประกาศของกระทรวงสาธารณสุขประเทศไทย ฉบับที่ 424 พ.ศ. 2564 ออกตามความในพระราชบัญญัติอาหารแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2522 มีข้อกำหนดห้ามผลิต นำเข้า และหรือส่งออกสารสกัดจากอวัยวะของสัตว์และพืชที่ยังคงมีฮอร์โมนคงเหลืออยู่ ซึ่งฮอร์โมนสเตียรอยด์ที่สะสมในรก เป็นฮอร์โมนที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้าง ดังนั้นกระบวนการสกัดไขมันออกจากสารสกัดเพื่อนำฮอร์โมนออก จึงเป็น

กระบวนการที่มีความจำเป็นในการผลิตสารสกัดรกสุกรเพื่อนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นจึงเลือกสารสกัดรกสุกรแบบกำจัดไขมันออกไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.2 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP ของสารสกัดรกสุกร

| ตัวอย่าง | DPPH (mM Trolox equivalents (TE) /g db.) | FRAP (mM FeSO ₄ equivalents /g db.) |
|--|--|--|
| ส่วนใสของสารสกัดหยาบ (Porcine placenta extracts; PPE) | 3.53±0.11 ^a | 5.26±0.16 ^a |
| ส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัด ไขมัน (PP fat-removed extracts; PPFE) | 2.61±0.08 ^b | 4.80±0.27 ^b |

*ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (^{a,b}) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแต่ละแถวแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2 การศึกษาผลของภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

4.2.1 ความเข้มข้นโปรตีน รูปแบบ และมวลโมเลกุลโปรตีน

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโปรตีนในตัวอย่งผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรจากเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยของแต่ละภาวะพบว่า ความเข้มข้นโปรตีนของผงไมโครแคปซูลที่ใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้มมีความเข้มข้นโปรตีนน้อยกว่าผงไมโครแคปซูลที่ใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูล โดยภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลที่มีความเข้มข้นโปรตีนมากที่สุด คือการใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มที่ระดับความเข้มข้น 40% w/v ด้วยการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นโปรตีนเท่ากับ 3.93±0.23 mg/g (ดังแสดงในตารางที่ 4.3)

กัมอารบิกเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ ทำให้เมื่อใช้เป็นสารห่อหุ้มในเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน ด้วยการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยจะมีความสามารถในการสร้างผนังห่อหุ้มปกป้องสารสำคัญภายในผงไมโครแคปซูลได้ดีกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกักเก็บสารต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร ดังนั้นผงไมโครแคปซูลที่ใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มจึงมีความเข้มข้นโปรตีนคงเหลือภายในไมโครแคปซูลมากกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม (Fernandes และคณะ, 2013)

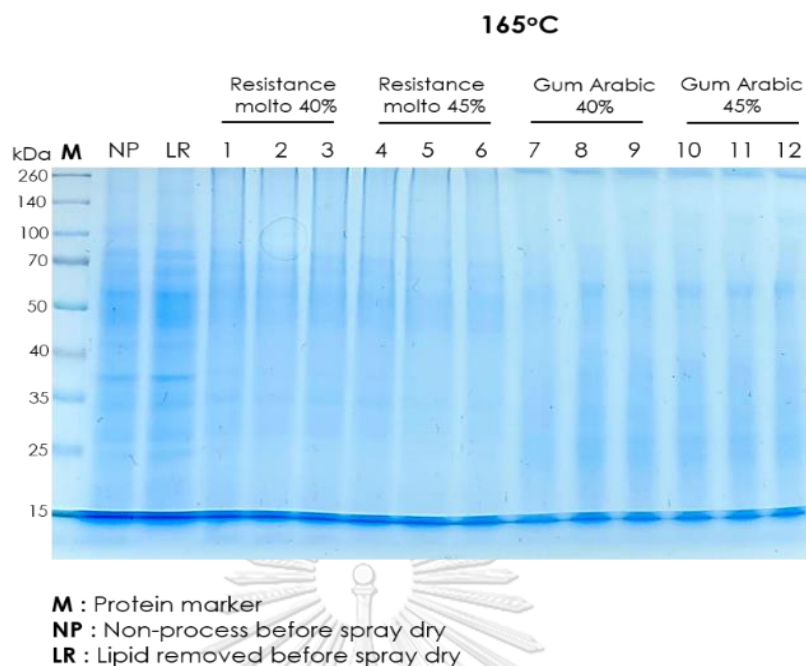
ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

| อุณหภูมิเข้า (°C) | ชนิดของสารหล่อหุ้ม | ความเข้มข้นของสารหล่อหุ้ม (w/v) | ความเข้มข้นโปรตีน (mg/g) |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 165 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (RMD) | 40% | 0.69±0.42 ^b |
| 165 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (RMD) | 45% | 0.66±0.02 ^b |
| 165 | กัมอารบิก(GA) | 40% | 3.93±0.23 ^a |
| 165 | กัมอารบิก (GA) | 45% | 3.67±0.23 ^a |
| 175 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (RMD) | 40% | 0.65±0.06 ^b |
| 175 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (RMD) | 45% | 0.73±0.06 ^b |
| 175 | กัมอารบิก (GA) | 40% | 3.67±0.12 ^a |
| 175 | กัมอารบิก (GA) | 45% | 2.24±1.60 ^a |

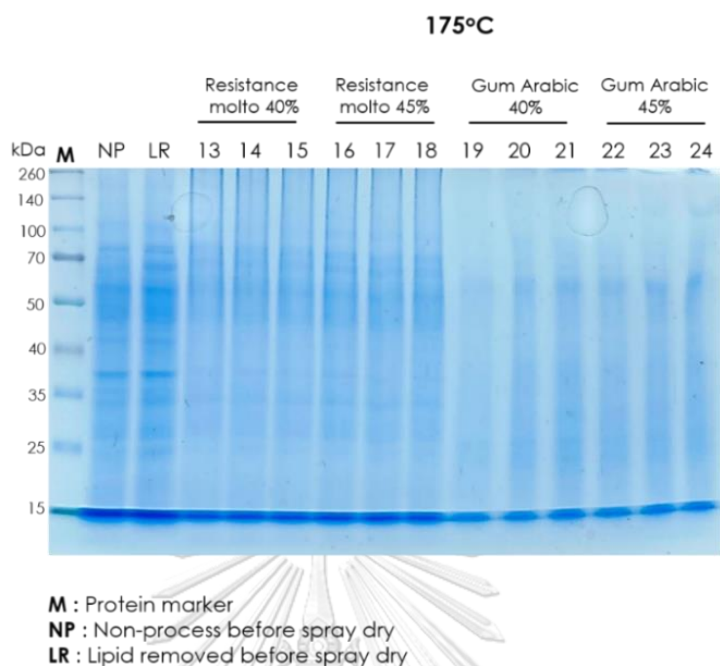
*ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (^{a-d}) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแต่ละแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์รูปแบบโปรตีนของผงไมโครแคปซูลในแต่ละภาวะการผลิตด้วยเทคนิค SDS-PAGE ดังแสดงในรูป 4.2 และรูป 4.3 พบว่า มวลโมเลกุลหรือแถบโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรเมื่อผ่านเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีรูปแบบโปรตีนไม่แตกต่างจากสารสกัดรกสุกรเริ่มต้น และภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรของทุกภาวะมีรูปแบบและมวลโมเลกุลของโปรตีนไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลด้วยชนิดของสารหล่อหุ้ม ความเข้มข้นของสารหล่อหุ้ม และอุณหภูมิการทำแห้งที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อมวลโมเลกุลและการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในผงไมโครแคปซูล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fang และคณะ (2012) ที่ศึกษาผลของการใช้เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยและ อุณหภูมิเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ต่างกัน (77, 107, 155, 178 องศาเซลเซียส) ต่อรูปแบบโปรตีนของผงไมโครแคปซูลจากนมวัวพบว่า เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยไม่ส่งผลทำให้รูปแบบโปรตีนของผงไมโครแคปซูลแตกต่าง สารละลายนมวัวเริ่มต้น และอุณหภูมิเข้าไม่ส่งผลทำให้รูปแบบโปรตีนของผงไมโครแคปซูลแต่ละอุณหภูมิมีรูปแบบแตกต่างกัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao และคณะ (2012) ที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยและ เทคนิคการทำแห้งเยือกแข็งของสารสกัดโปรตีนจากกากข้าวที่กำจัดไขมันออกพบว่า ผงไมโครแคปซูลจากเทคนิคการทำแห้งแบบ พ่นฝอยและเทคนิคการทำแห้งเยือกแข็งมีรูปแบบโปรตีนไม่แตกต่างจากสารสกัดโปรตีนจากกากข้าว และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang และคณะ (2007) ที่ศึกษารูปแบบของโปรตีนผงบักวีทด้วยการทำแห้งที่ต่างกันพบว่า ผลของ กระบวนการทำแห้งไม่ส่งผลต่อรูปแบบของโปรตีนของผงบักวีท



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนในผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรในภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิเข้า 165 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PP fat-removed extracts)/ lane 1-3 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ที่ความเข้มข้น 40% w/v / lane 4-6 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ที่ความเข้มข้น 45% w/v / lane 7-9 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอารบิก ที่ความเข้มข้น 40% w/v / lane 10-12 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอารบิก ที่ความเข้มข้น 45% w/v



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนในผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรในภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิเข้า 175 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PP fat-removed extracts)/ lane 1-3 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย ที่ความเข้มข้น 40% w/v / lane 4-6 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย ที่ความเข้มข้น 45% w/v / lane 7-9 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอารบิก ที่ความเข้มข้น 40% w/v / lane 10-12 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอารบิก ที่ความเข้มข้น 45% w/v

4.2.2 ร้อยละผลผลิต (%yeild)

ร้อยละผลผลิตของเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความสำคัญโดยตรงกับต้นทุนและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต อีกทั้งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญต่อการพิจารณาเลือกภาวะการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละผลผลิต เช่น ปัจจัยจากเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (อุณหภูมิเข้า อุณหภูมิออก และอัตราการไหลของตัวอย่าง) และปัจจัยด้านภาวะการทำแห้ง (ชนิดและความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม) (Rutz และคณะ, 2016) ในการศึกษาร้อยละผลผลิตของการทำแห้งแบบพ่นฝอยสารสกัดรกสุกรพบว่า ผงไมโครแคปซูลมีค่าร้อยละผลผลิตระหว่าง $43.58 \pm 3.56\%$ ถึง $86.45 \pm 1.40\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เมื่อศึกษาอิทธิพลของ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้มต่อร้อยละผลผลิตของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรพบว่า มีอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเข้าและชนิดของสารห่อหุ้ม และชนิดของสารห่อหุ้มและความเข้มข้นของสารห่อหุ้มมีผลต่อร้อยละผลผลิตของผงไมโคร

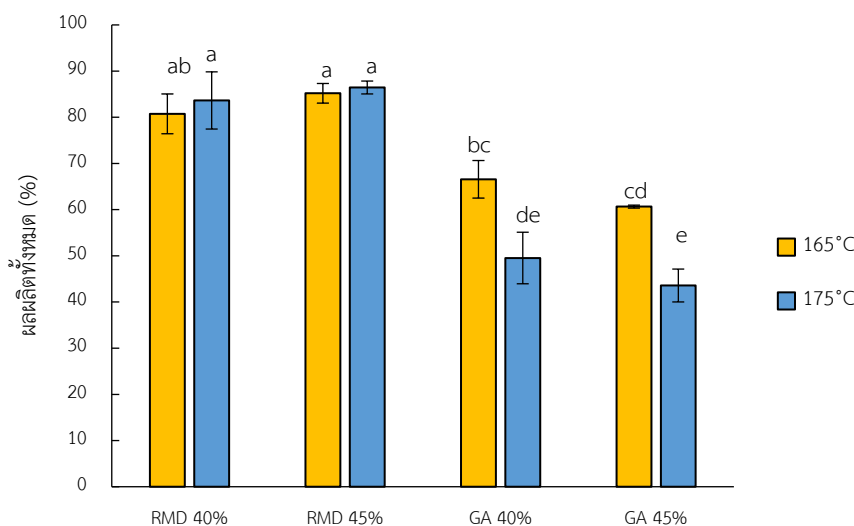
แคปซูลสารสกัดรกสุกรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และจากการศึกษาอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิขาเข้าและชนิดของสารห่อหุ้มพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจาก 165 องศาเซลเซียส เป็น 175 องศาเซลเซียส และการใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ร้อยละผลผลิตเพิ่มขึ้น แต่การใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มส่งผลทำให้ร้อยละผลผลิตมีปริมาณลดลง นอกจากนี้เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของชนิดสารห่อหุ้มและความเข้มข้นของสารห่อหุ้มพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารห่อหุ้มกัมอารบิกจาก 40% w/v เป็น 45% w/v ทำให้ร้อยละผลผลิตมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อแยกพิจารณาแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยเดียว (อุณหภูมิทำแห้ง ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม) ในการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรพบว่า ภาวะการผลิตที่อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส และใช้สารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยระดับความเข้มข้น 45% w/v ให้ร้อยละผลผลิตที่มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ $86.45 \pm 1.40\%$ โดยการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยสารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจาก 165 เป็น 175 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก $80.74 \pm 4.31\%$ และ $85.20 \pm 2.12\%$ เป็น $83.65 \pm 6.19\%$ และ $86.45 \pm 1.40\%$ ตามลำดับ แต่ในภาวะผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยสารห่อหุ้มกัมอารบิก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจาก 165 เป็น 175 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตมีค่าลดลงจาก $66.58 \pm 4.07\%$ และ $60.32 \pm 0.01\%$ เป็น $49.53 \pm 5.58\%$ และ $43.58 \pm 3.56\%$ ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของสารห่อหุ้มเมื่อพิจารณาแยกปัจจัยไม่ส่งผลต่อร้อยละผลผลิตที่ได้ ($p > 0.05$)

จากการศึกษาปัจจัยของชนิดสารห่อหุ้มพบว่า การใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีร้อยละผลผลิตน้อยกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย เนื่องจากกัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มที่ทำให้ความหนืดของสารละลายมีความหนืดมากขึ้น และผงไมโครแคปซูลที่ได้มีลักษณะหลังผ่านหัวพ่นฝอยเป็นผงไมโครแคปซูลหยาบ มีความสามารถในการจับตัวรวมตัวกันเป็นก้อนและมีคุณสมบัติในการเกาะตัว (agglomeration) เกิดจากโมเลกุลโปรตีนในองค์ประกอบของกัมอารบิกเคลื่อนที่มาที่ผิวของอนุภาคไมโครแคปซูล ซึ่งการเคลื่อนที่ของโปรตีนดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดฟิล์มซ้อนทับกันและเกิดเป็นผนังห่อหุ้มที่มีความหนาเพิ่มขึ้นในระหว่างเทคนิคการทำแห้ง ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลที่ได้ติดที่ผนังห้องทำแห้ง (drying chamber) ของเครื่องทำแห้งจำนวนมาก (Ahad และคณะ, 2020; Muzaffar และ Kumar, 2015) ทำให้ร้อยละผลผลิตผงไมโครแคปซูลมีค่าลดลง

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจาก 165 เป็น 175 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตเพิ่มขึ้นสำหรับการใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม ในขณะที่ร้อยละผลผลิตลดลงเมื่อใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม ดังนั้นกระบวนการผลิตไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยสารห่อหุ้มกัมอารบิกด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าร้อยละผลผลิตน้อยกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarabandi และคณะ (2019) และ Tolun และคณะ (2016) ที่ศึกษาการผลิตผงไมโครแคปซูลจากน้ำเปลือกมะเขือยาวและสารสกัดพอลิฟีนอลขององุ่นด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า การใช้มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ร้อยละผลผลิตผงไมโครแคปซูลมีค่ามากกว่าการใช้กัมอารบิก เนื่องจากมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารที่มีความหนืดต่ำ และมีความเหนียวของอนุภาคผงหลังการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้อย ทำให้ผงไมโครแคปซูลเกาะติดที่ผนังห้องทำแห้งของเครื่องทำแห้งน้อย จึงส่งผลให้ค่าร้อยละผลผลิตสูง และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gawalek และคณะ (2017) ที่ศึกษาผงไมโครแคปซูลจากไซโคเบอร์รี่ โดยรายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้า

เข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้มอเตอร์เดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ร้อยละผลผลิตผงไมโครแคปซูลมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.4 ร้อยละผลผลิตทั้งหมด (%) ของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร

4.2.3 ค่าความชื้น (%moisture content) และค่ากิจกรรมของน้ำ (a_w)

ความชื้นเป็นสมบัติทางเคมีกายภาพที่สำคัญเพราะเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพ เสถียรภาพ และความคงตัวของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร เพราะเป็นค่าที่สามารถใช้ประมาณอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร โดยศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิขาเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้น ต่อคุณภาพของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยการแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า ค่าความชื้นทุกภาวะของผงไมโครแคปซูลมีค่าไม่เกิน 5% และมีค่าความชื้นอยู่ในช่วงระหว่าง $2.28 \pm 0.84\%$ ถึง $4.08 \pm 0.88\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

จากการศึกษาพบว่า มีอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสารห่อหุ้มและความเข้มข้นของสารห่อหุ้มที่ส่งผลต่อค่าความชื้นในผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยจากระดับความเข้มข้น 40% w/v เป็น 45% w/v ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีค่าความชื้นลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารห่อหุ้มก็มารบิก จาก 40% w/v เป็น 45% w/v ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีความชื้นเพิ่มมากขึ้น

เมื่อแยกพิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยเดี่ยว (อุณหภูมิขาเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม) พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 165 เป็น 175 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ความชื้นของผงไมโครแคปซูลมีค่าลดลงจาก $2.30 \pm 0.17\%$ ถึง $4.08 \pm 0.88\%$ เป็น $2.28 \pm 0.84\%$ ถึง $2.99 \pm 0.61\%$ และเมื่อใช้สารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม ผงไมโครแคปซูลที่ได้มีค่าความชื้นน้อยกว่าการใช้กัมมารบิกเป็นสารห่อหุ้ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $2.28 \pm 0.84\%$ ถึง $3.91 \pm 0.81\%$ และ $2.52 \pm 0.33\%$ ถึง $4.08 \pm 0.88\%$

ตามลำดับ จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ความเข้มข้นของสารหอมหุ้มเป็นปัจจัยเดี่ยวที่ไม่ส่งผลต่อค่าความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ในการผลิตไมโครแคปซูลด้วยทำแห้งแบบพ่นฝอย การใช้อุณหภูมิสูงในการทำแห้งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารสกัดรกสุกรและลมร้อนภายในเครื่องถ่ายเทได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงผลักให้น้ำเกิดการระเหยมากขึ้น (Shabde และ Hoo, 2008) ดังนั้นผงไมโครแคปซูลที่ได้จึงมีความชื้นลดลงเมื่ออุณหภูมิการทำแห้งสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cao และคณะ (2020) ที่ศึกษาอุณหภูมิการทำแห้งแบบพ่นฝอยของผงไมโครแคปซูลสารสกัดโปรตีนจากเมล็ดแตงโม (*Citrullus lanatus var. megulaspemus*) โดยแปรระดับของอุณหภูมิเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 150-180 องศาเซลเซียส และพบว่า ที่อุณหภูมิเข้า 180 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลโปรตีนจากเมล็ดแตงโมที่ได้มีค่าความชื้นที่ต่ำที่สุด

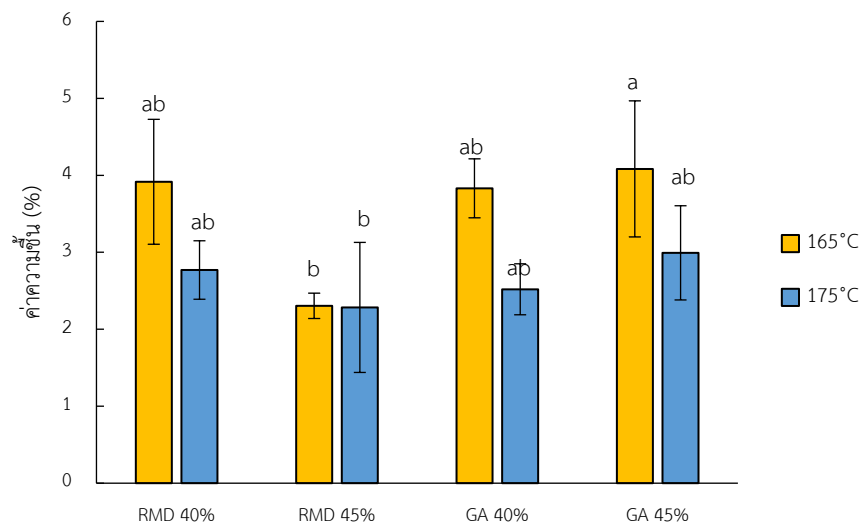
การเติมสารหอมหุ้ม (มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยและกัมอารบิก) ลงในสารสกัดเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็ง และลดปริมาณน้ำอิสระลง ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลหลังทำแห้งมีความชื้นลดน้อยลง (Re และคณะ, 1999) สอดคล้องกับรายงานงานวิจัยของ Tran และคณะ (2018) ที่พบว่า การเลือกชนิดของสารหอมหุ้มส่งผลต่อปริมาณความชื้นของผงไมโครแคปซูลตะไคร้ เนื่องจากคุณสมบัติของสารหอมหุ้ม (มอลโตเดกซ์ตรินและกัมอารบิก) มีความแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า กัมอารบิกเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดน้ำ (hygroscopicity) สูงกว่ามอลโตเดกซ์ตริน ดังนั้นการใช้กัมอารบิกเป็นสารหอมหุ้มจึงทำให้ผงไมโครแคปซูลมีความสามารถในการดูดน้ำจากสภาพแวดล้อมข้าง ๆ เข้ามาในอนุภาคได้รวดเร็วกว่ามอลโตเดกซ์ตริน ผงไมโครแคปซูลที่ใช้กัมอารบิกจึงมีค่าความชื้นมากกว่า

ค่ากิจกรรมของน้ำ (a_w) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยผลิตภัณฑ์อาหารแห้งควรจะมีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำกว่า 0.6 เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Sharifi และคณะ, 2015) จากการศึกษาผลของอุณหภูมิเข้า ชนิดของสารหอมหุ้มและความเข้มข้นของสารหอมหุ้มในการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อค่ากิจกรรมของน้ำพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรทุกภาวะมีค่ากิจกรรมของน้ำไม่เกิน 0.15 โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.08 ± 0.004 ถึง 0.11 ± 0.001 (ดังแสดงในรูปที่ 4.6) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับเสถียรภาพของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร เนื่องจากค่ากิจกรรมของน้ำที่ต่ำกว่า 0.4 ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่คงตัว (Baysan และคณะ, 2019; Koç และคณะ, 2012; Ramakrishnan และคณะ, 2018)

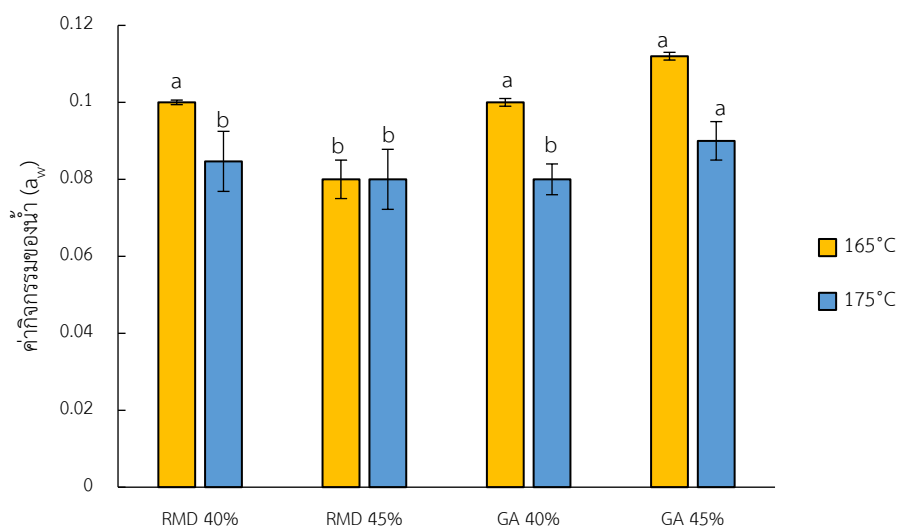
เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้ง 3 (อุณหภูมิเข้า ชนิดของสารหอมหุ้ม และความเข้มข้นของสารหอมหุ้ม) ต่อค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรพบว่า มีอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิการทำแห้งและชนิดของสารหอมหุ้ม และชนิดของสารหอมหุ้มและความเข้มข้นของสารหอมหุ้ม และมีอิทธิพลร่วมของทั้ง 3 ปัจจัยต่อค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิเข้าจาก 165 เป็น 175 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารหอมหุ้มเพิ่มขึ้นจากระดับความเข้มข้น 40% w/v เป็น 45% w/v ส่งผลให้ค่ากิจกรรมของน้ำลดลงเพียงเล็กน้อย

เมื่อแยกพิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยเดี่ยว (อุณหภูมิเข้า ชนิดของสารหอมหุ้ม และความเข้มข้นของสารหอมหุ้ม) พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 165 เป็น 175 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรทุกภาวะมีค่าลดลง และเมื่อใช้สารหอมหุ้มมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารหอมหุ้มส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีค่ากิจกรรมของน้ำน้อยกว่ากัมอารบิก จากการศึกษา

ดังกล่าวพบว่า เมื่อพิจารณาปัจจัยความเข้มข้นของสารห่อหุ้มเป็นปัจจัยเดียวที่ไม่ส่งผลต่อค่ากิจกรรมของน้ำของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Admin และคณะ (2021) ที่ศึกษาเทคนิคการทำแห้งที่ต่างกันและผลของสารห่อหุ้มที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพ ทางชีวภาพ และสัณฐานวิทยาของผงไมโครแคปซูลจากต้น Amaranth (*Amaranthus viridis* L.) พบว่า การใช้สารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ตริน ด้านทานการย่อยจะมีค่ากิจกรรมน้ำที่ต่ำกว่าการใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม



รูปที่ 4.5 ร้อยละความชื้นของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรสสุกร



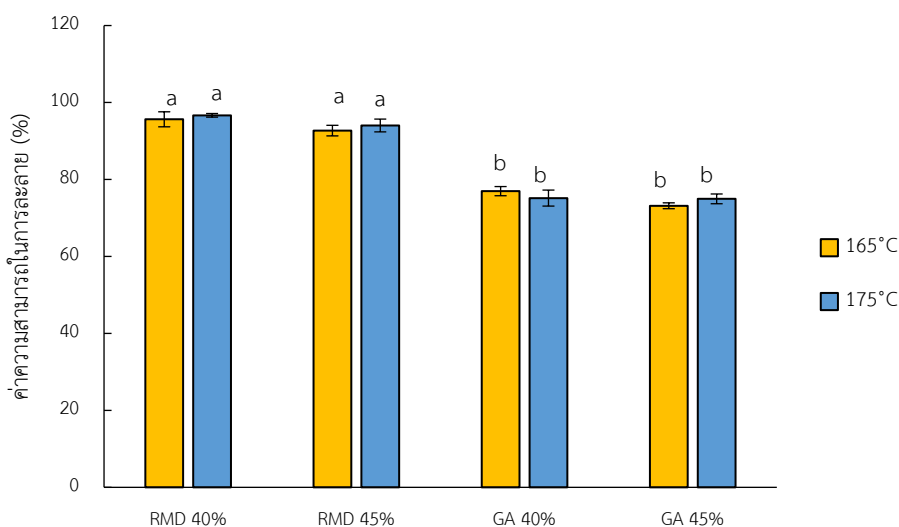
รูปที่ 4.6 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรสสุกร

4.2.4 ความสามารถในการละลายน้ำ (%solubility)

ค่าความสามารถในการละลายน้ำเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผงไมโครแคปซูลเมื่อประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ดังนั้นถ้าความสามารถในการละลายของผงมีค่าสูง จะแสดงถึงคุณภาพของผงไมโครแคปซูลที่สามารถละลายในน้ำได้ดีและแสดงถึงความสามารถในปลดปล่อยสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันภายในโครงสร้างผงไมโครแคปซูล จากการศึกษาผลของอุณหภูมิเข้า ชนิดของสารห่อหุ้มและความเข้มข้นของสารห่อหุ้มในการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อความสามารถในการละลายน้ำพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีค่าความสามารถในการละลายน้ำระหว่าง $73.17 \pm 0.76\%$ ถึง $96.67 \pm 0.47\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ผลการทดลองพบว่า ไม่มีอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัยร่วมกัน แต่เมื่อแยกพิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยเดี่ยว (อุณหภูมิเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม) พบว่า การใช้สารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อย ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีความสามารถในการละลายน้ำสูงกว่า 90% โดยมีค่าอยู่ระหว่าง $92.70 \pm 1.38\%$ ถึง $96.67 \pm 0.47\%$ แต่เมื่อผสมตัวอย่างกับสารห่อหุ้มกัมอารบิก ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงเหลือประมาณ 70% โดยมีค่าอยู่ระหว่าง $73.17 \pm 0.76\%$ ถึง $76.97 \pm 1.19\%$

ชนิดของสารห่อหุ้มที่แตกต่างกันสามารถส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำ โดยมีสาเหตุมาจากลักษณะ องค์ประกอบและโครงสร้างของสารห่อหุ้มที่ใช้ทำให้เกิดความแตกต่าง จากการใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้มพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีค่าความสามารถในการละลายมากกว่ากัมอารบิก เนื่องจากโครงสร้างของมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นโครงสร้างที่เกิดจากการตัดแปรโครงสร้างจากมอลโตเดกซ์ตรินดั้งเดิม ทำให้มีกิ่งของน้ำตาล D-glucose เชื่อมกับโครงสร้างหลักเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยจะทำให้โครงสร้างแตกแขนงมากขึ้น ความสามารถในการจับโมเลกุลน้ำจึงดีขึ้นส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยมีประสิทธิภาพในการละลายน้ำได้ดี (Astina และ Sapwarobol, 2018) ในขณะที่กัมอารบิกเป็นสารที่มีโครงสร้างเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ที่ซับซ้อน และยังมีโปรตีนเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างประมาณ 2% ซึ่งเป็นโปรตีนมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่งผลทำให้กัมอารบิกมีความสามารถในการละลายในน้ำได้น้อยลง และโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีนรวมกันทำให้กัมอารบิกมีคุณสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความหนืด ทำให้ผงไมโครแคปซูลที่ได้หลังจากผ่านหัวพ่นฝอยจะเกาะติดกับผนังห้องทำแห้งของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง โดยผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pudizuvelyte และคณะ (2019) ที่รายงานว่า การใช้มอลโตเดกซ์ตรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีความสามารถในการละลายในน้ำได้ดีกว่าการใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jordan-Suarez และคณะ (2018) ที่ศึกษาผลของการผลิตผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดใบ *Annona muricata L.* ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงไมโครแคปซูล และพบว่า ผงไมโครแคปซูลที่ผลิตจากมอลโตเดกซ์ตรินจะมีความสามารถในการละลายสูงกว่ากัมอารบิก



รูปที่ 4.7 ค่าความสามารถในการละลายน้ำของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร

4.2.5 ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (%encapsulation efficiency)

ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (%encapsulation efficiency) คือศักยภาพของสารห่อหุ้มที่ทำหน้าที่ยึดหรือห่อหุ้มส่วนประกอบที่ต้องการเก็บรักษาไว้ภายในไมโครแคปซูล ซึ่งถ้าประสิทธิภาพการกักเก็บสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันไว้ภายในไมโครแคปซูลมีค่าน้อย แสดงถึงความสามารถของสารห่อหุ้มในการสร้างฟิล์มป้องกันได้ไม่ดี หรืออาจเกิดจากมีรอยแตกร้าวของฟิล์มห่อหุ้มที่ทำให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเข้าทำลายสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารภายในไมโครแคปซูลได้โดยตรง โดยทั่วไปค่าประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันภายในผงไมโครแคปซูลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน จากการศึกษาผลของอุณหภูมิเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้มในการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันพบว่า ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมีค่าระหว่าง $85.88 \pm 1.22\%$ ถึง $97.99 \pm 0.15\%$ โดยภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลด้วยการใช้กัมอาร์บิกที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 40% w/v อุณหภูมิเข้า 165 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ $97.99 \pm 0.15\%$ (ดังแสดงในรูปที่ 4.8)

จากการศึกษาพบว่า มีอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสารห่อหุ้มและความเข้มข้นของสารห่อหุ้มที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันในผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ทริน ด้านทานการย่อยจากระดับความเข้มข้น 40% w/v เป็น 45% w/v ส่งผลให้ไมโครแคปซูลมีประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารห่อหุ้มกัมอาร์บิก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 40% w/v เป็น 45% w/v ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันลดลง

เมื่อแยกพิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยเดียว (อุณหภูมิเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บ

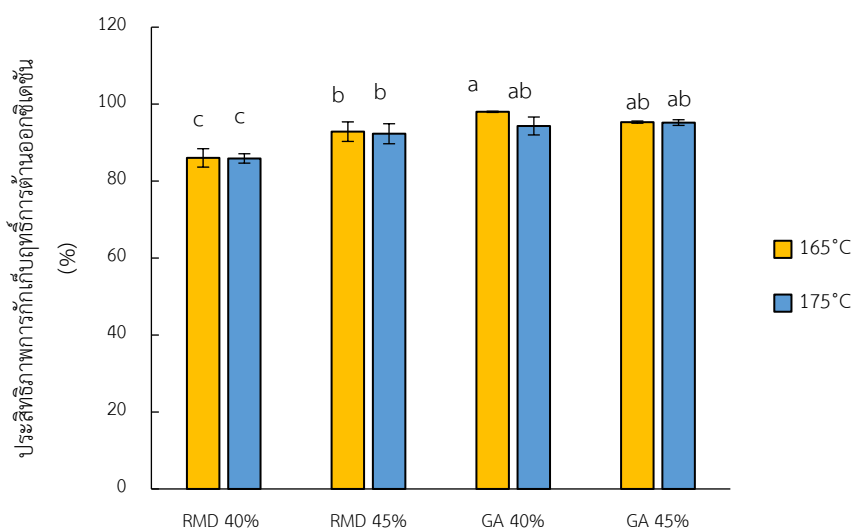
ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิเข้า 165 องศาเซลเซียสจะมีค่าอยู่ในช่วง 95.20 ± 0.74 ถึง $97.99 \pm 0.15\%$ และที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันลดลงอยู่ในช่วง 85.88 ± 1.22 ถึง $95.20 \pm 0.74\%$ และการศึกษาชนิดของสารห่อหุ้ม โมลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรมี่ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันน้อยกว่ากัมอาร์บิก โดยมีค่าอยู่ในช่วง $85.88 \pm 1.22\%$ ถึง $92.83 \pm 2.53\%$ ในขณะที่ผงไมโครแคปซูลที่ใช้กัมอาร์บิกเป็นสารห่อหุ้มมีประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันในช่วง $94.32 \pm 2.33\%$ ถึง $97.99 \pm 0.15\%$ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโมลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $85.88 \pm 1.22\%$ ถึง $86.03 \pm 2.39\%$ เป็น $92.30 \pm 2.60\%$ ถึง 92.83% ในทางตรงกันข้ามค่าประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรมี่ผลิตจากกัมอาร์บิกมีค่าลดลงจากค่าในช่วงระหว่าง $95.33 \pm 0.28\%$ ถึง $97.99 \pm 0.15\%$ เหลือ $94.32 \pm 2.33\%$ ถึง $95.20 \pm 0.74\%$

ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิการทำแห้ง ความเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ คุณลักษณะของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และชนิดของสารห่อหุ้ม เป็นต้น โดยพบว่า กัมอาร์บิกมีประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่มากกว่าการใช้โมลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม เนื่องจากกัมอาร์บิกมีคุณสมบัติเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ ทำให้สารละลายที่ผสมกัมอาร์บิกจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นและมีคุณสมบัติเป็นผนังห่อหุ้มไมโครแคปซูลที่สร้างฟิล์มห่อหุ้มได้ดีกว่า (Fernandes และคณะ, 2013) ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วยกัมอาร์บิกสร้างผนังห่อหุ้มป้องกันสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันไว้ภายในอนุภาคได้ดีกว่าการใช้โมลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม รวมถึงกัมอาร์บิกเป็นสารที่มีความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Costa และคณะ, 2015) ดังนั้นกัมอาร์บิกจึงทำให้สารต้านออกซิเดชันภายในโครงสร้างไมโครแคปซูลไม่เคลื่อนที่มาที่พื้นผิวของอนุภาค และเกิดการสูญเสียจากความร้อนในระหว่างการทำแห้งโดยตรง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramakrishnan และคณะ (2018) ที่ศึกษาผลของสารห่อหุ้มต่อการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำมะเขือต้น (Tamarillo) โดยพบว่า การใช้กัมอาร์บิกส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลน้ำมะเขือต้นมีประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่สูงกว่าการใช้โมลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม เนื่องจากคุณสมบัติของกัมอาร์บิกที่สามารถสร้างฟิล์มป้องกันได้ดีกว่าสารห่อหุ้มชนิดอื่น

จากรายงานของ Corrêa-Filho และคณะ (2019) พบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในการทำแห้งแบบพ่นฝอยส่งผลให้น้ำในสารละลายเกิดการระเหยออก และเกิดขึ้นฟิล์มห่อหุ้มไมโครแคปซูลปกป้องสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันไว้ภายใน แต่หากใช้อุณหภูมิในการทำแห้งสูง การระเหยน้ำของสารละลายเกิดอย่างรวดเร็ว ทำให้พื้นผิวอนุภาคไมโครแคปซูลที่เกิดการสร้างฟิล์มเกิดรอยแตกออกและทำให้ความร้อนจากเครื่องทำแห้งและปัจจัยในสิ่งแวดล้อมภายนอกสามารถเข้ามาทำลายสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันภายในไมโครแคปซูลได้โดยตรง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า 'ballonong' ซึ่งเกิดจากอนุภาคผงไมโครแคปซูลไม่สามารถทนความดันภายในอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นได้ ทำให้อนุภาคเกิดการพองตัวและเกิดรอยแตกบนพื้นผิวอนุภาคไมโครแคปซูล (Kha และคณะ, 2014; Jafari และคณะ, 2008; Bhandari และคณะ., 1992)

ความเข้มข้นของสารห่อหุ้มเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารห่อหุ้มจะทำให้สารละลายก่อนเข้าเครื่องทำแห้งมีความหนืดและมีปริมาณของแข็งในสารละลายเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกักเก็บฤทธิ์การต้านออกซิเดชันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการสร้างฟิล์มห่อหุ้มสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเป็นผงไมโครแคปซูลน้อยลง แต่ถ้าสารละลายก่อนเข้าเครื่องทำแห้ง

แบบพ่นฝอยมีความหนืดมาก ความหนืดของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลทำให้ใช้เวลาในการสร้างฟิล์มนานมากขึ้น เพราะหัวพ่นฝอยตัวอย่างไม่สามารถพ่นตัวอย่างออกมาได้ต่อเนื่อง ในขณะที่สารละลายที่มีความหนืดต่ำเกินไป จะชะลอการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มของสารห่อหุ้มผงไมโครแคปซูล (Huynh และคณะ, 2008)



รูปที่ 4.8 ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บสารด้านออกไซด์ของผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกร

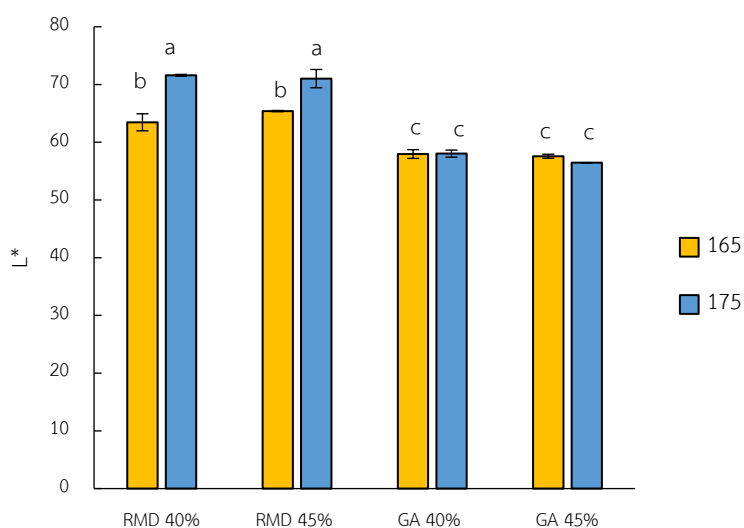
4.2.6 ค่าสี L* a* และ b*

สี เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยค่า L* เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่างและมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 ซึ่ง 0 หมายถึงสีดำ และ 100 หมายถึงสีขาว ในขณะที่ค่า a* แสดงถึงค่าความเป็นสีเขียว (-a*) ไปจนถึงสีแดง (+a*) และค่า b* สามารถแสดงถึงความเป็นสีน้ำเงิน (-b*) ไปจนถึงสีเหลือง (+b*) จากการศึกษาผลของอุณหภูมิขาเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้มในการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร ด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อค่า L* , a* และ b* ของผงไมโครแคปซูล พบว่า ค่า L* , a* และ b* มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 71.61±0.15 ถึง 56.47±0.01, 0.20±0.01 ถึง 1.03±0.01 และ 6.55±0.02 ถึง 8.58±0.01 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11

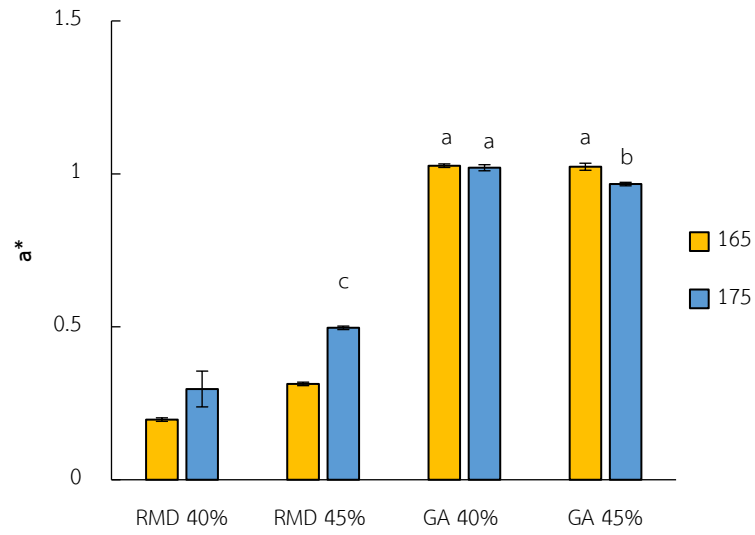
ผลการทดลองพบว่า ผงไมโครแคปซูลที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส และใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย ที่ระดับความเข้มข้น 40% w/v มีค่าความสว่างมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 71.61±0.15 และผงไมโครแคปซูลที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส โดยใช้กัมอาร์บิก ที่ระดับความเข้มข้น 45% w/v มีค่าความสว่างน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 56.47±0.01 จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยด้านชนิดสารห่อหุ้มส่งผลต่อค่าความสว่าง การใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีความสว่างมากกว่ากัมอาร์บิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากสีของสารห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ทรินมีลักษณะเป็นผงสีขาวล้วน จึงทำให้มีค่าความสว่างมากกว่ากัมอาร์บิกที่เป็นสารห่อหุ้มที่มีลักษณะผงเป็นสีเหลืองและสีแดง

ในขณะที่ตัวอย่างผงไมโครแคปซูลทุกภาวะมีแนวโน้มสีแดง (+a*) ซึ่งได้รับผลกระทบมาจากสีของสารสกัด รกสุกร และพบว่า การใช้กัมอาร์บิกเป็นสารหล่อลื่นส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีสีแดงมากกว่าการใช้ มอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย เนื่องจากสีของกัมอาร์บิกมีความเป็นสีแดงมากกว่ามอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการ ย่อย โดยตัวอย่างผงไมโครแคปซูลที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และใช้กัมอาร์บิก เป็นสารหล่อลื่นที่ระดับความเข้มข้น 40% w/v มีค่าสีแดงมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.03 ± 0.01

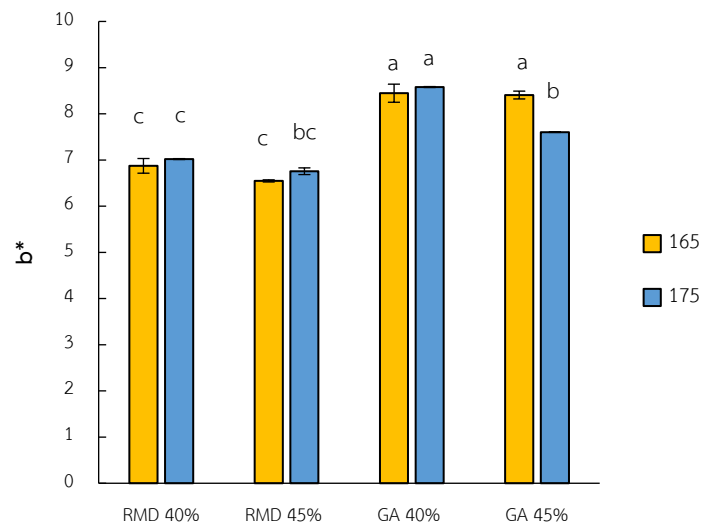
นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า b* ได้รับผลกระทบจากปัจจัยอุณหภูมิเข้ากับชนิดของสารหล่อลื่น โดยตัวอย่างผง ไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีแนวโน้มเป็นสีเขียวเหลืองเมื่อใช้กัมอาร์บิกเป็นสารหล่อลื่น (+b*) เกิดจากสีเริ่มต้นของ สารหล่อลื่นกัมอาร์บิกมีความเป็นสีเหลืองมากกว่ามอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยที่เป็นผงสีขาว และจากปฏิกิริยา เมลลาร์ดที่เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะเกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายหรือเมลานอยดินที่มีสีเหลือง ส่งผลทำให้ค่า b* มีค่าเพิ่ม มากขึ้น และผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรจากการทำแห้งที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ใช้กัมอาร์บิกที่ระดับความ เข้มข้น 40% w/v มีค่าสีเหลืองมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 8.58 ± 0.01 และเมื่อพิจารณาจากค่า a* และ b* ตัวอย่าง ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรของทุกภาวะพบว่าตัวอย่างมีสีเหลืองอมแดง



รูปที่ 4.9 ค่า L* ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร



รูปที่ 4.10 ค่า a* ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร



รูปที่ 4.11 ค่า b* ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

4.2.7 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g)

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เป็นปัจจัยที่สำคัญของผงไมโครแคปซูลจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อใช้บอกระดับเสถียรภาพของผงไมโครแคปซูลในการเก็บรักษาในระยะยาว โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงไมโครแคปซูล ได้แก่ ความชื้น มวลโมเลกุลและชนิดของสารห่อหุ้ม และอุณหภูมิการทำให้แห้ง เป็นต้น โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลสูงขึ้น โครงสร้างอสังฐานของผงไมโครแคปซูลจากสถานะแก้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลง (glassy state) เป็นสถานะยาง (rubbery state) และเมื่ออุณหภูมิของผงไมโครแคปซูลมากกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ทำให้ผงไมโครแคปซูลมีความหนืดและเกิดปัญหาการเกาะติดกัน ส่งผลต่อคุณภาพของผงไมโครแคปซูลที่มีค่าลดลง (Subtil และคณะ, 2014)

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิขาเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้มในการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรจากการทำแห้งแบบพ่นฝอยทุกภาวะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วในช่วง 44.1 ถึง 61.5 องศาเซลเซียส โดยผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าการใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม โดยมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วในช่วง 44.1 ถึง 49.1 องศาเซลเซียส และช่วง 53.3 ถึง 61.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ผลิตด้วยกัมอารบิกที่ความเข้มข้น 40% w/v ที่

อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงที่สุด ซึ่งบ่งบอกถึงระดับเสถียรภาพของผงไมโครแคปซูล (ดังแสดงในตารางที่ 4.4) และพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรทุกภาวะการผลิตสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผงไมโครแคปซูลจะอยู่ในรูปของสถานะแก้ว (glassy state) ที่มีเสถียรภาพและมีความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษา

รูปร่างอสังฐานของผงไมโครแคปซูลเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการแตกตัวของอนุภาค หรือสามารถเกิดผลึกได้เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลาานาน ดังนั้นเสถียรภาพและความคงตัวของผงไมโครแคปซูลสามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เพื่ออ้างอิงกำหนดคุณลักษณะ คุณภาพ เสถียรภาพ และความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหารได้ ดังนั้นการเติมสารห่อหุ้ม เช่น มอลโตเดกซ์ทรินหรือกัมอารบิกในสารละลายที่นำมาผ่านเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นและมีความคงตัวมากกว่าสารสกัดเริ่มต้น (Roos และ Karel, 1991).

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva และคณะ (2012) และงานวิจัยของ Kurozawa และคณะ (2009) ที่ผลิตไมโครแคปซูลจากสารสกัดหอยแมลงภู่และผลิตไมโครแคปซูลจากสารสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสตจากไก่พบว่า ผงไมโครแคปซูลที่ผลิตจากกัมอารบิกมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมากกว่ามอลโตเดกซ์ทริน เนื่องจากกัมอารบิกมีมวลโมเลกุลสูงกว่า (617,320 g/mol) มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อย (4,230 g/mol) ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกัมอารบิก จาก 10% เป็น 20% พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงไมโครแคปซูลมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม จาก 20% เป็น 30% ส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงไมโครแคปซูลไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากข้อจำกัดในการจับกับน้ำอิสระที่สามารถส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Silva และคณะ, 2012)

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

| อุณหภูมิเข้า (°C) | ชนิดของสารทอหุ้ม | ความเข้มข้นของสาร ทอหุ้ม (w/v) | อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้ว |
|----------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 165 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการ ย่อย (RMD) | 40% | 49.1 |
| 165 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการ ย่อย (RMD) | 45% | 45.2 |
| 165 | กัมอารบิก(GA) | 40% | 57.3 |
| 165 | กัมอารบิก (GA) | 45% | 61.5 |
| 175 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการ ย่อย (RMD) | 40% | 44.1 |
| 175 | มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการ ย่อย (RMD) | 45% | 46.0 |
| 175 | กัมอารบิก (GA) | 40% | 56.2 |
| 175 | กัมอารบิก (GA) | 45% | 53.3 |

4.2.8 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP

สารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่มาจากโปรตีนหรือเปปไทด์ เป็นสารที่มีความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดโรคต่าง ๆ รวมถึงส่งผลให้ร่างกายเสื่อมสภาพลง โดยในการทดลองนี้ใช้การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) และด้วยวิธี FRAP (ferric reducing antioxidant activity) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารต้านออกซิเดชันจากสารสกัดโปรตีนที่ทำหน้าที่ในการให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ ส่งผลให้อนุมูลอิสระในระบบมีปริมาณน้อยลงหรือทำให้สารอนุมูลเกิดความเสถียรที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสายโซ่ต่อเป็นอนุมูลอิสระ

จากการศึกษาสารสกัดรกสุกรเริ่มต้นพบว่า สารสกัดเริ่มต้นมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP เท่ากับ 2.61 ± 0.01 mM Trolox equivalents (TE)/g db. และ 4.80 ± 0.30 mM FeSO₄/g db ตามลำดับ ในขณะที่สารสกัดรกสุกรผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย (ผงไมโครแคปซูล) มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น โดยมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP ในช่วง 11.56 ± 1.23 ถึง 18.92 ± 0.84 (TE)/g db. และในช่วง 6.40 ± 0.83 ถึง 16.37 ± 0.85 mM FeSO₄/g db ตามลำดับ โดยการใช้กัมอารบิกเป็นสารทอหุ้มที่ระดับความเข้มข้น 40% w/v ที่อุณหภูมิเข้า 165 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน

สูงที่สุด ซึ่งมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP เท่ากับ 18.92 ± 0.84 mM Trolox equivalents/ g db. และ 16.37 ± 0.85 mM FeSO₄/g db. ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13)

เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิขาเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม ต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรพบว่า มีอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิขาเข้าและชนิดของสารห่อหุ้ม และชนิดของสารห่อหุ้มและความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม ที่มีผลต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิขาเข้าและชนิดของสารห่อหุ้ม พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าจาก 165 องศาเซลเซียส เป็น 175 องศาเซลเซียส และใช้มอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันลดลงอย่างมาก และเมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของชนิดสารห่อหุ้มและความเข้มข้นของสารห่อหุ้มพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันลดลง

ในการศึกษาแยกแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยเดี่ยว (อุณหภูมิทำแห้ง ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม) พบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรที่ผลิตที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมากกว่าการใช้อุณหภูมิขาเข้าที่ 175 องศาเซลเซียส จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า เมื่อพิจารณาปัจจัยความเข้มข้นของสารห่อหุ้มเป็นปัจจัยเดี่ยวที่ไม่ส่งผลต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

การเพิ่มขึ้นของฤทธิ์การต้านออกซิเดชันในผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรอาจเกิดจากความร้อนในระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลให้โปรตีนและเปปไทด์ในสารสกัดเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

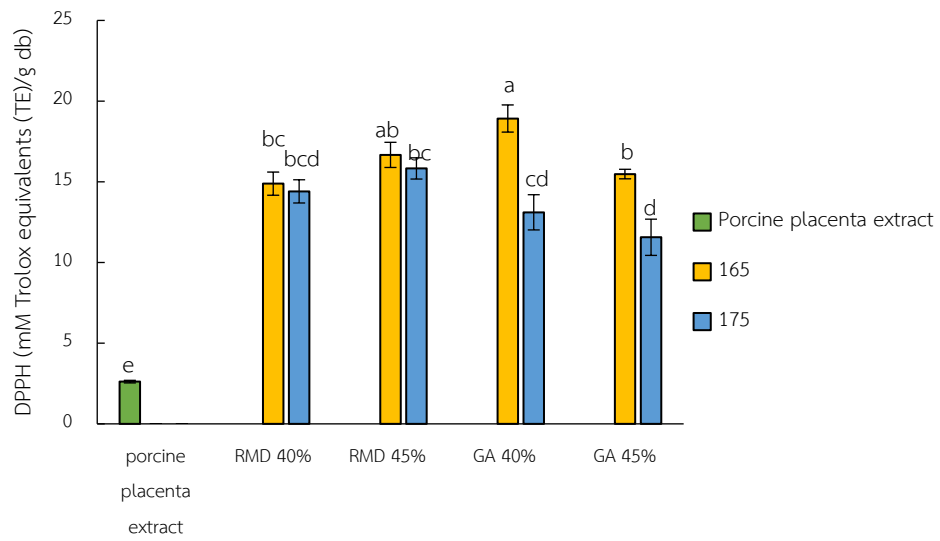
1. การสลายหรือเกิดการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ขึ้นมาใหม่ทั้งภายในและภายนอกโมเลกุลของโปรตีนหรือเปปไทด์ จนมีโครงสร้างหรือได้โปรตีนและเปปไทด์ที่เปลี่ยนชนิดไป
2. การเกิดปฏิกิริยาจากกรดอะมิโนสายข้างของโครงสร้างโมเลกุลโปรตีนหรือทำให้เกิดไอโทปของเปปไทด์ขึ้น
3. การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) จากกรดอะมิโนของโปรตีนหรือเปปไทด์และน้ำตาลรีดิวซ์จากสารห่อหุ้ม จนเกิดเป็นสารเมลานอยดิน (melanoidin) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันทั้งในวิธี DPPH และ FRAP ที่สูง (Manzocco และคณะ, 2000)
4. การเกิดปฏิกิริยาที่สายด้านข้าง (side chain) ของกรดอะมิโนที่สามารถสร้างและเชื่อมพันธะระหว่างกรดอะมิโนด้วยกันเอง (cross-linked amino acid) จนเกิดเป็นโครงสร้างใหม่จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของกรดอะมิโนหรือเปปไทด์ ซึ่งส่งผลให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (Arnoldi, 2002)

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lima และคณะ (2021) ที่ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยของสารสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสตจากปลาและพบว่า สารสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสตที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดเริ่มต้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Krittalak และคณะ (2018) ที่รายงานว่าผงไมโครแคปซูลสารสกัดเห็ดจากมัทซึกาเกะที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีฤทธิ์การต้าน

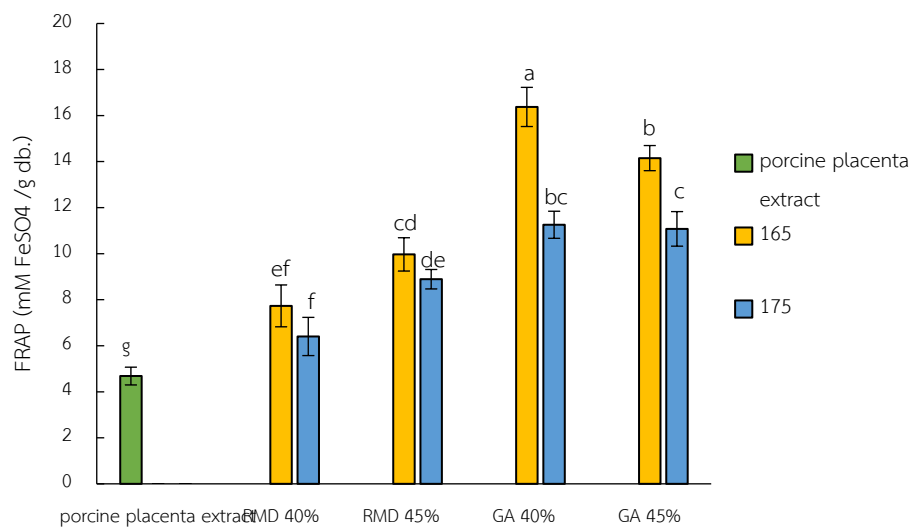
ออกซิเดชันที่มากกว่าสารสกัดเริ่มต้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.44 ± 0.01 (mM Fe(II)/ g dried sample) เป็น 12.02 ± 0.26 (mM Fe(II)/ g dried sample)

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระการทำแห้งส่งผลทำให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมี่ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 175 องศาเซลเซียส กลับพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมี่ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันลดลง ซึ่งสามารถเกิดจากหลากหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน เช่น เกิดจากความร้อนสูงที่ทำให้พื้นผิวอนุภาคผงไมโครแคปซูลแตกออกและสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันภายในสัมผัสกับความชื้นของอากาศทำแห้งโดยตรง ทำให้เกิดการสูญเสียฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารภายในเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งเข้าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cao และคณะ (2020) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอย (150 ถึง 180 องศาเซลเซียส) ต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดโปรตีนในเมล็ดแตงโม และที่อุณหภูมิเข้า 160 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดโปรตีนในเมล็ดแตงโมมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 170 และ 180 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดโปรตีนในเมล็ดแตงโมมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันลดลง และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suhanq และคณะ (2016) ในการผลิตผงไมโครแคปซูลน้ำผึ้งพบว่า การใช้อุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลน้ำผึ้งมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมากที่สุด

การใช้กัมอาร์บิกเป็นสารห่อหุ้มส่งผลทำให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมี่ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่มากกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย เนื่องจากกัมอาร์บิกมีประสิทธิภาพในการสร้างฟิล์มห่อหุ้มสารต้านออกซิเดชันไว้ภายในไมโครแคปซูลได้ดี แต่มอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อยมีความสามารถในการสร้างฟิล์มห่อหุ้มสารที่มีประสิทธิภาพการห่อหุ้มที่ต่ำกว่า จึงทำให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมี่ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมากกว่ามอลโตเดกซ์ตรินต้านทานการย่อย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva และคณะ (2012) ในการผลิตผงไมโครแคปซูลโปรตีนไฮโดรไลเสตจากหอยแมลงภูโดยใช้สารห่อหุ้มที่แตกต่างกัน (มอลโตเดกซ์ตรินและกัมอาร์บิกที่ความเข้มข้น 15% และ 30%) พบว่า การใช้กัมอาร์บิกที่ระดับความเข้มข้น 15% ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลโปรตีนไฮโดรไลเสตจากหอยแมลงภูมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันทั้งการวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP มากที่สุด โดยการใช้กัมอาร์บิกส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมากกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ตริน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารห่อหุ้มทั้งสองชนิดให้เข้มข้นขึ้น สารละลายที่ผสมกัมอาร์บิกจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคไมโครแคปซูลสร้างผนังห่อหุ้มช้าเพราะการพ่นตัวอย่างผ่านหัวพ่นฝอยในเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อเนื่องเนื่องจากความหนืดที่เพิ่มมากขึ้นของกัมอาร์บิก (Huynh และคณะ, 2008)



รูปที่ 4.12 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของสารสกัดรกสุกรและผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร



รูปที่ 4.13 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP ของสารสกัดรกสุกรและผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

4.2.9 การศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิว

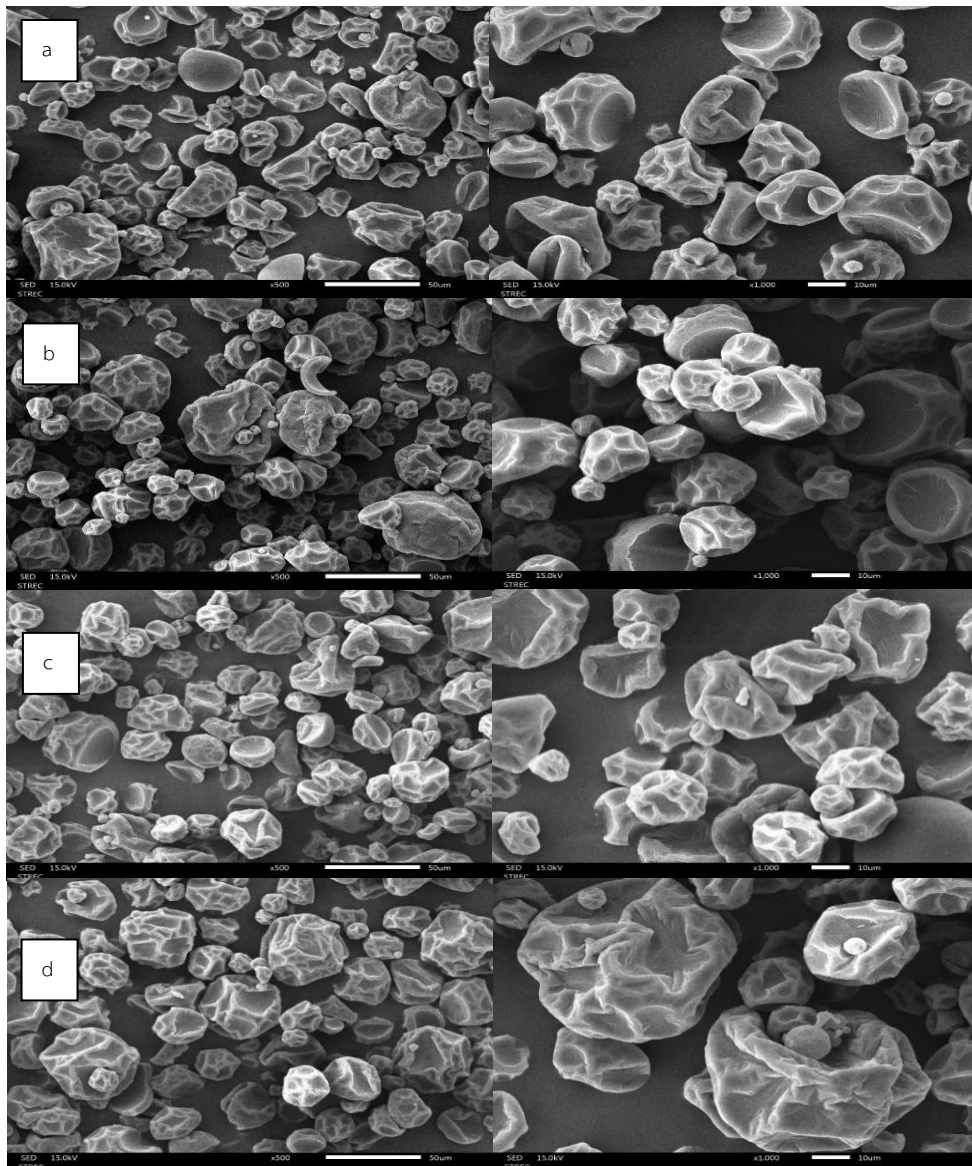
การศึกษาด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวอนุภาคของไมโครแคปซูล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการกักเก็บสารที่มีฤทธิ์ด้านออกซิเดชัน หลังจากผ่านการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งรูปทรงอนุภาคไมโครแคปซูลจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิเข้า ชนิดสารห่อหุ้ม ความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม การไหลของความเร็ว และความหนืดของสารละลาย เป็นต้น (Alves และคณะ, 2016) โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ไมโครแคปซูลมีรูปร่างที่แตกต่างกัน เช่น ทรงกลม รูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอ การหดตัว รอยแตก หรือการแตกของอนุภาค เป็นต้น นอกจากนี้รูปร่างของอนุภาคไมโครแคปซูลยังส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลด้วยเช่นกัน ซึ่งรูปทรงอนุภาคผงไมโครแคปซูลที่เป็นทรงกลม มีหลากหลายขนาด มีผนังห่อหุ้มทั่วทั้งอนุภาค ไม่ปรากฏรอยแตก รอยแยก รอยเหว้าแหง หรือรอยบุบบนพื้นผิวจัดเป็นอนุภาคไมโครแคปซูลที่ดีที่สุด สามารถสร้างฟิล์มห่อหุ้มสารออกฤทธิ์ด้านออกซิเดชันไว้ภายในได้ดี และผนังห่อหุ้มที่หุ้มทั่วอนุภาคทำให้มีการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มห่อหุ้มน้อย ส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีความคงตัว แต่ในอนุภาคที่รูปทรงหดตัว เหี่ยว จับตัวกันเป็นก้อน และมีรอยบุบ รูปทรงเหล่านี้ส่งผลให้สารภายในไมโครแคปซูลเกิดการสูญเสียฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (Carneiro และคณะ, 2013)

จากการศึกษาลักษณะรูปร่างของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่แปรภาวะอุณหภูมิเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้มพบว่า อนุภาคของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีรูปร่างและลักษณะที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 โดยพบว่า การใช้ทั้งมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยและกัมอารบิกส่งผลให้อนุภาคผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีรอยย่น รูปทรงกลม และรอยหดในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยอนุภาคของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม (รูปที่ 4.15) มีพื้นผิวอนุภาคเรียบเนียน มีรอยบุบ รอยเว้า รอยยุบ และรอยย่นที่น้อยกว่าอนุภาคที่ใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม (รูปที่ 4.14) และผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ผลิตโดยใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มที่ความเข้มข้น 40% w/v อุณหภูมิการทำแห้งเข้าที่ 165 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.15a) มีรูปทรงอนุภาคไมโครแคปซูลเป็นทรงกลม มีรอยย่น รอยหด และรอยเว้าน้อยที่สุด แสดงถึงความสามารถในการสร้างผนังห่อหุ้มและการป้องกันสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramakrishnan และคณะ (2018) ในการผลิตผงไมโครแคปซูลน้ำมะเขือต้น (tamarillo) ด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarabandi และคณะ (2019) การผลิตผงไมโครแคปซูลมะเขือม่วงพบว่า การใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้ม ส่งผลให้อนุภาคไมโครแคปซูลมีผนังอนุภาคทรงกลมเรียบเนียนและมีความสมบูรณ์ของผนังห่อหุ้มมากกว่า เนื่องจากสารห่อหุ้มที่มีมวลโมเลกุลสูงช่วยเพิ่มความหนาของผนังห่อหุ้ม ทำให้ผนังแข็งแรง มีการหดตัวของอนุภาคน้อย และช่วยให้สารต้านออกซิเดชันมีความคงตัวสูง (มวลโมเลกุลกัมอารบิกเท่ากับ 617,320 g/mol และมอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 4,230g/mol) (Walton, 2000; Jafari และคณะ, 2008)

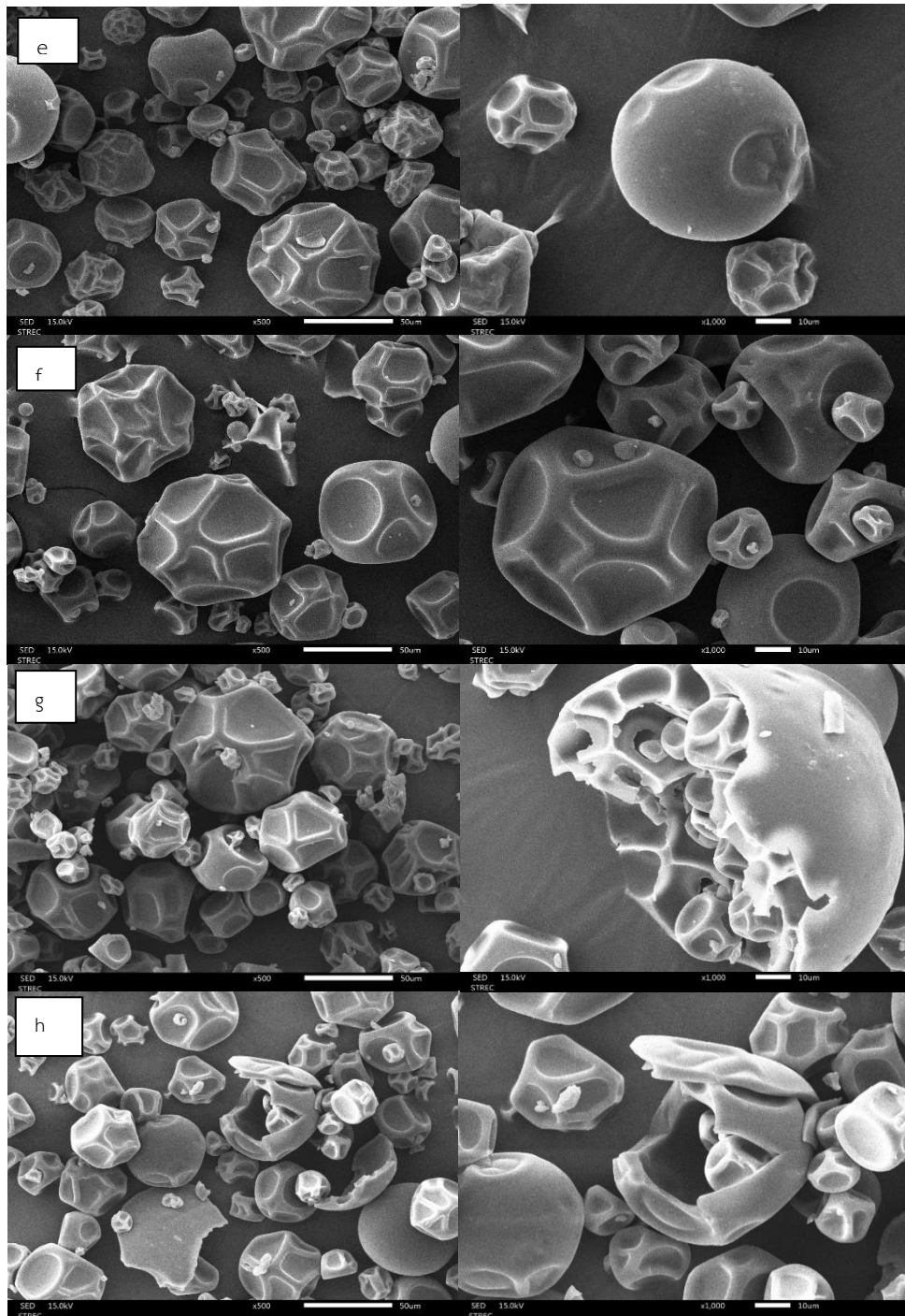
เมื่อศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิเข้าพบว่า เมื่ออุณหภูมิการทำแห้งเพิ่มขึ้นจาก 165 องศาเซลเซียส เป็น 175 องศาเซลเซียส และใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีรอยเหี่ยว รอยย่น และรอยเว้าเพิ่มขึ้น (165 องศาเซลเซียส; รูปที่ 4.14a-4.14b, 175 องศาเซลเซียส; รูปที่

4.14c-4.14d) แต่การใช้กัมอาร์บิกเป็นสารหล่อลื่นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเข้าส่งผลให้อนุภาคของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกเสียสภาพ อยู่ในสภาพไม่สมบูรณ์ ผนังห่อหุ้มอนุภาคแตกอนุภาคออก ส่งผลให้สารไปโอแอคทีฟไปเปปไทด์สัมผัสกับความร้อนของเทคนิคทำแห้งโดยตรง (165 องศาเซลเซียส; รูปที่ 4.15a-4.15b, 175 องศาเซลเซียส; รูปที่ 4.15c-4.15d) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alamilla-Beltran และคณะ (2005) ที่ศึกษารูปร่างของอนุภาคไมโครแคปซูลที่เปลี่ยนแปลงไปในการทำแห้งแบบพ่นฝอย และพบว่า เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีขั้นตอนการเกิดผงไมโครแคปซูลอยู่ 2 ขั้นตอนด้วยกัน ขั้นแรกคือสารละลายตัวอย่างจะหดตัวและเกิดการระเหยของน้ำจากความร้อนของเครื่องทำแห้ง ส่งผลให้ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นบนพื้นผิวอนุภาคผงไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้น จนเมื่อความเข้มข้นเพิ่มถึงจุดหนึ่ง พื้นผิวจะอ่องฝอยจะเกิดผลึกของแข็งสร้างเป็นผนังห่อหุ้มชั้นล้อมรอบ โดยการเกิดผนังห่อหุ้มจะเกิดได้อย่างรวดเร็วหรือเกิดอย่างช้า ๆ ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการทำแห้ง ซึ่งอัตราการระเหยน้ำในระหว่างเทคนิคการทำแห้งส่งผลให้อนุภาคมีความผิดปกติของรูปร่าง เช่น มีรอยย่น รอยบุบ และรอยเหี่ยที่แตกต่างกัน (Nkurunziza และคณะ, 2021) จากนั้นขั้นตอนที่สอง คือการก่อตัวเป็นอนุภาคที่มีผนังห่อหุ้มจะทำให้การไหลของไออากาศร้อนภายในอนุภาคเคลื่อนที่ยากขึ้นเนื่องจากผนังห่อหุ้มจะขวางกั้นการเคลื่อนที่ จึงเกิดฟองอากาศขึ้นภายในอนุภาค เนื่องจากมีความดันเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดโพรงอากาศกลวงภายในอนุภาคและสามารถเกิดโพรงอากาศได้จากการรวมตัวของฟองอากาศและการขยายตัวของฟองอากาศภายในอนุภาคระหว่างเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความดันภายในอนุภาคจะเพิ่มสูงขึ้นตาม และเมื่อความดันภายในมีมากกว่าความแข็งแรงของผนังห่อหุ้มจะรับได้ จะทำให้อนุภาคไมโครแคปซูลเกิดการแตก หด หรือยุบตัวลง ซึ่งในบางกรณีการเสียสภาพของผนังห่อหุ้มก็เกิดมาจากการสร้างฟิล์มในระหว่างการทำแห้งซ้ำด้วยเช่นกัน (Seydel และคณะ, 2006; Ré, 1998)

นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารหล่อลื่นส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคไมโครแคปซูล โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารหล่อลื่นจาก 40% w/v เป็น 45% w/v ส่งผลให้อนุภาคของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีพื้นผิวหดตัวลง มีรอยบุบบนพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva และคณะ (2012) ในการทำแห้งแบบพ่นฝอยโปรตีนไฮโดรไลเสตจากหอยแมลงภู่พบว่า การใช้กัมอาร์บิกที่ 15% เป็นสารหล่อลื่นส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลมีพื้นผิวที่เรียบเนียนและมีการหดตัวเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 30% พบว่า อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นทรงกลมและมีพื้นผิวที่หดตัว นอกจากนี้ยังมีรอยบุบบนพื้นผิวจำนวนมาก และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kurozawa และคณะ (2009) ที่ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยโปรตีนไฮโดรไลเสตจากเนื้อไก่พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารหล่อลื่นทั้งมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอาร์บิกจาก 10% เป็น 20% ส่งผลให้อนุภาคของผงไมโครแคปซูลมีรูปร่างผิดปกติเพิ่มขึ้น มีรอยย่นและรอยหดบนพื้นผิวอนุภาคมากขึ้น และที่ 30% พบว่า พื้นผิวของอนุภาคไมโครแคปซูลมีรอยแตกออก ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของสารหล่อลื่นส่งผลให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น อนุภาคไมโครแคปซูลจึงสร้างผนังห่อหุ้มได้ช้าลง ทำให้รูปร่างของอนุภาคไมโครแคปซูลที่ได้มีรูปร่างไม่สมบูรณ์ (Ré, 1998) นอกจากนี้รอยบุบ รอยย่น และการเว้าแหว่งของอนุภาคที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้จากการหดตัวของอนุภาคในระหว่างเทคนิคการทำแห้งและหลังเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1000 เท่า (ซ้ายไปขวา ตามลำดับ) ของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร a) มอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย ความเข้มข้น 40% w/v อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส , b) มอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย ความเข้มข้น 45% w/v อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส, c) มอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการย่อยความเข้มข้น 40% w/v อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส และ d) มอลโตเดกซ์ทรินต้านทานการย่อย ความเข้มข้น 45% w/v อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1000 เท่า (ซ้ายไปขวา ตามลำดับ) ของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร e) กัมอารบิก ความเข้มข้น 40% w/v อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส, f) กัมอารบิก ความเข้มข้น 45% w/v อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส, g) กัมอารบิก ความเข้มข้น 40% w/v อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียสและ h) กัมอารบิก ความเข้มข้น 45% w/v อุณหภูมิขาเข้า 175 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรในภาวะการผลิตด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย จึงเลือกภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เหมาะสมที่สุด 1 ภาวะ ที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูงสุด คือผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ได้จากการผลิตด้วยการใช้กัมอาร์บิก ความเข้มข้น 40% w/v ที่อุณหภูมิเข้า 165 องศาเซลเซียส โดยใช้ผงไมโครแคปซูลจากภาวะการผลิตนี้มาใช้ในการศึกษาผลของชนิดบรรจุภัณฑ์ (ถุงอลูมิเนียมฟอยล์และถุงพลาสติก HDPE) และภาวะการบรรจุ (บรรจุภายใต้สุญญากาศและบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติผงไมโครแคปซูลด้านต่าง ๆ ดังนี้ ค่าความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ ความสามารถในการละลาย ค่าสี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (วิธี DPPH และ FRAP) โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ 15 วัน จนครบ 90 วัน

4.3. การศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุต่อสมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของอาหารหลังเก็บรักษาเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลแบ่งออกได้เป็น 3 ปัจจัย คือ ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ภาวะการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และภาชนะบรรจุ ดังนั้นการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์กับภาวะแวดล้อมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยังคุณภาพได้ดี ช่วยทำให้เก็บรักษาได้นานมากขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ (อารีกุล และคณะ, 2014)

ภาชนะบรรจุเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาหารสูญเสียคุณภาพ โดยบรรจุภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติป้องกันปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊ส อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และการปิดผนึกด้วยความร้อน นอกจากนี้ภาวะการบรรจุเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพอาหารด้วยเช่นกัน โดยพบว่า ปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้น ออกซิเจน และแสง มีผลต่อความคงตัวและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร (ธนวิทย์, 2557) โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารจะถูกเก็บรักษาในภาวะควบคุมและทำนายอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์จากการเปลี่ยนแปลงที่วิเคราะห์ได้

4.3.1 ความเข้มข้นโปรตีน รูปแบบ และมวลโมเลกุลโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

โปรตีนเป็นสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สำคัญที่สะสมอยู่ในรกเพื่อให้ตัวอ่อนใช้ในการเจริญเติบโต และเป็นสารที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่สำคัญ จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นโปรตีนด้วยวิธี Bradford protein assay ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์และภาวะการเก็บบรรจุที่แตกต่างกันพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมภายใต้ภาวะสุญญากาศ ถุงอลูมิเนียมภายใต้ภาวะบรรยากาศ ถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะสุญญากาศ และถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะบรรยากาศ มีความเข้มข้นโปรตีนเริ่มต้นเท่ากับ 4.10 ± 0.42 4.10 ± 0.14 3.90 ± 0.14 และ 3.80 ± 0.00 mg/g ตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 4.5) โดยชนิดของบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 90 วันพบว่า ความเข้มข้นโปรตีนทุกอย่างมีปริมาณลดลงเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Agarhar-Murugkar และ Jha (2011)

ที่ศึกษาความเข้มข้นโปรตีนในแป้งของถั่วงอกต่อระยะเวลาการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่ต่างกัน (ถุงอลูมิเนียมฟอยล์และถุงพลาสติก LDPE) พบว่า เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 75 วัน แป้งถั่วงอกมีความเข้มข้นโปรตีนที่คงตัวโดยมีความเข้มข้นโปรตีนลดลงเพียงเล็กน้อยจากความเข้มข้นโปรตีนเริ่มต้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Borges และคณะ (2017) ที่ศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพ และสมบัติของโปรตีนในผงไมโครแคปซูลนมควายด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า เมื่อเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลนมควายเป็นระยะเวลา 120 วัน ความเข้มข้นของแถบโปรตีนบนเจล SDS-PAGE มีความเข้มข้นลดลงเล็กน้อย แสดงถึงความเข้มข้นโปรตีนที่ลดลงเล็กน้อย

กระบวนการกำจัดไขมันเป็นกระบวนการแยกไขมันออกจากสารสกัดรกสุกร ดังนั้นการผลิตผงไมโครแคปซูลจากสารสกัดรกสุกรจึงมีปริมาณไขมันสะสมในผงไมโครแคปซูลปริมาณน้อยลง ส่งผลทำให้สารสำคัญภายในไมโครแคปซูลมีความเสถียร ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากไขมันเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้สารสำคัญในผงไมโครแคปซูลไม่คงตัว เนื่องจากเกิดอนุมูลอิสระขึ้นทำให้เกิดการออกซิไดซ์กับโปรตีนและส่งผลทำให้ปริมาณกรดอะมิโนและโปรตีนในตัวอย่างลดลง (Gardner, 1979) นอกจากนี้การใช้เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยร่วมกับการใช้เทคโนโลยีเอนแคปซูลเลชันที่ห่อหุ้มสารสำคัญไว้ภายในด้วยสารห่อหุ้มอื่นเป็นเทคนิคที่ทำให้สารสำคัญภายในไมโครแคปซูลมีเสถียรภาพและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nadarajah และ Mahendran (2015) พบว่า การใช้แป้งมะพร้าวที่กำจัดไขมันออกทดแทนแป้งข้าวสาลีในการทำบิสกิตส่งผลให้คุณค่าทางโภชนาการของบิสกิตหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้อยที่สุด

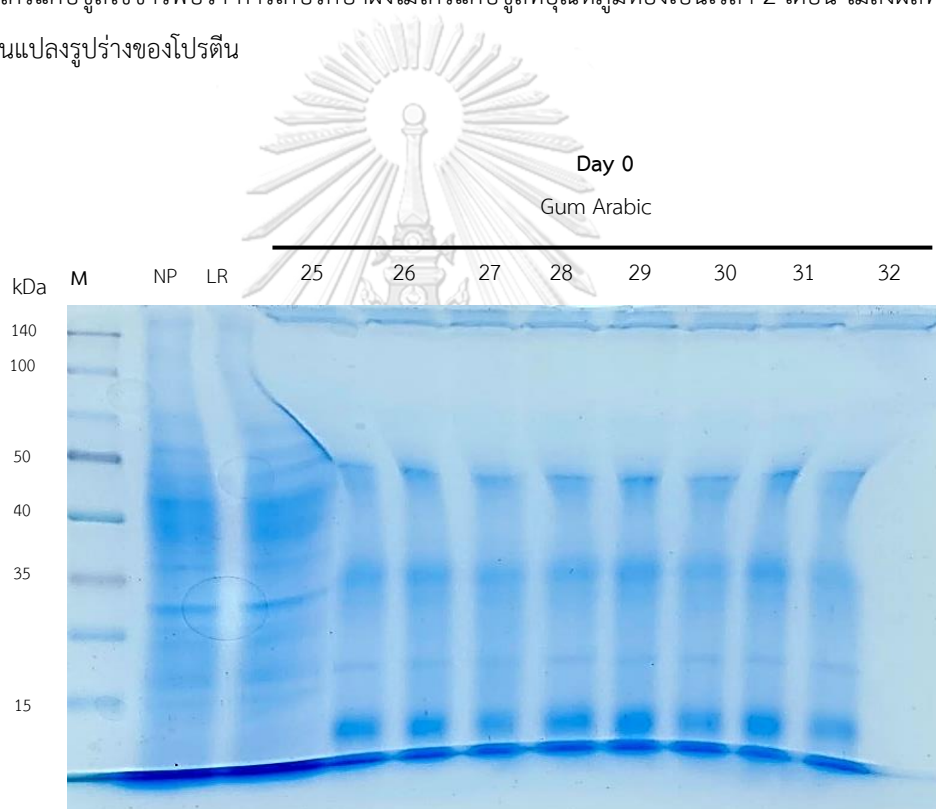
ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นโปรตีนของผงไมโครแคปซูลในระหว่างการเก็บรักษา

| เวลาการเก็บรักษา ^{ns} | ความเข้มข้นโปรตีน (mg/g) | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| | ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ ^{ns} | | ถุงพลาสติก HDPE ^{ns} | |
| | บรรจุภายใต้สุญญากาศ ^{ns} | บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ ^{ns} | บรรจุภายใต้สุญญากาศ ^{ns} | บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ ^{ns} |
| 0 | 4.10±0.42 | 4.10±0.14 | 3.90±0.14 | 3.80±0.00 |
| 15 | 3.90±0.14 | 4.00±0.28 | 3.80±0.00 | 3.80±0.28 |
| 30 | 4.07±0.21 | 3.83±0.12 | 3.88±0.08 | 3.89±0.13 |
| 45 | 3.81±0.29 | 3.75±0.25 | 3.78±0.34 | 4.02±0.09 |
| 60 | 3.34±0.32 | 3.52±0.28 | 3.56±0.12 | 3.52±0.19 |
| 75 | 3.21±0.71 | 3.57±0.37 | 3.57±0.17 | 3.83±0.35 |
| 90 | 3.82±0.13 | 3.90±0.07 | 3.86±0.08 | 3.85±0.00 |

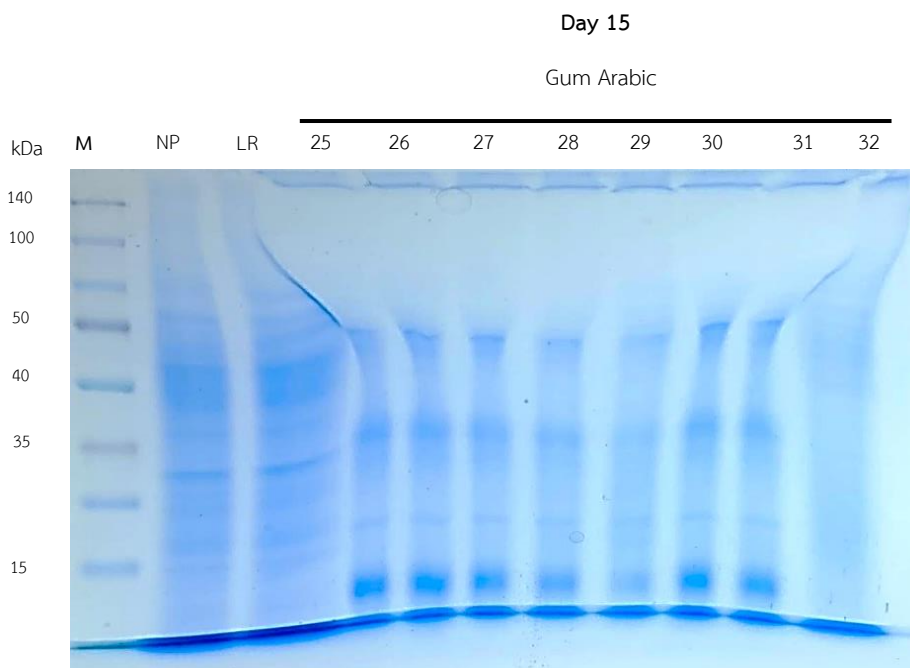
* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (^{ns}) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแต่ละแถวแนวนอนและแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

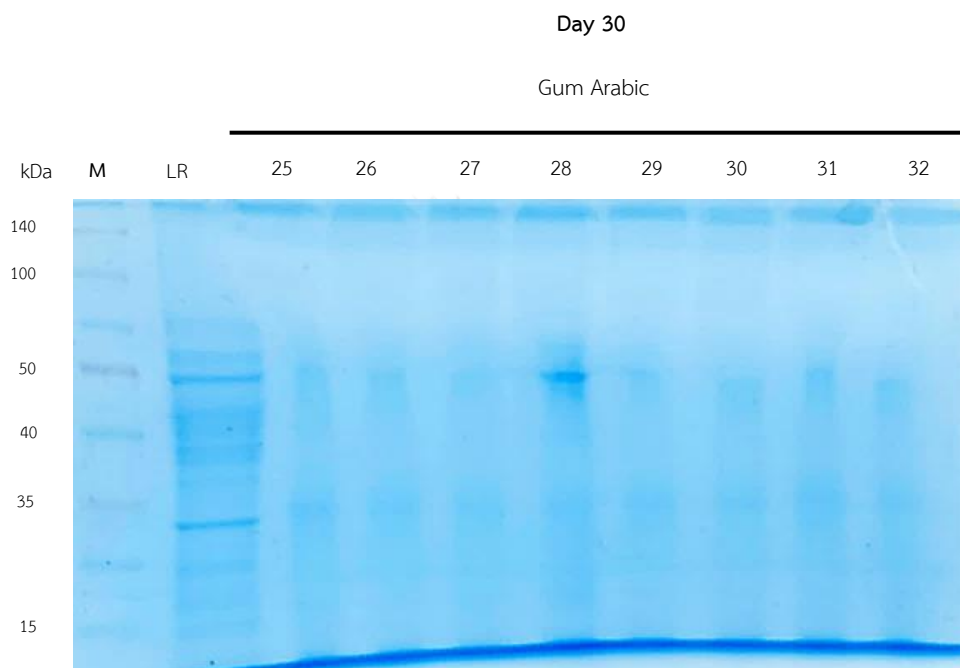
เมื่อวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนในผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรในแต่ละภาวะการผลิตด้วยเทคนิค SDS-PAGE ดังแสดงในรูปที่ 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 4.21 และ 4.22 พบว่า มวลโมเลกุลและรูปแบบโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นไม่มีความแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อมวลโมเลกุลและการเปลี่ยนรูปแบบของโปรตีนในผงไมโครแคปซูล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Labuckas และคณะ (2011) ที่ศึกษาความคงตัวของโปรตีนในแป้งวอลนัต (*Juglans regia* L.) ที่สกัดไขมันออกบางส่วนมาเก็บรักษาและพบว่า การเก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมและถุงพลาสติกไม่ส่งผลต่อมวลโมเลกุลและรูปแบบของโปรตีน เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 8 เดือน และสอดคล้องกับงานวิจัย Kaekhong และ Charoenrein (2016) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำแห้งและการเก็บรักษาต่อสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติของผงไมโครแคปซูลไข่ขาวพบว่า การเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 เดือน ไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโปรตีน



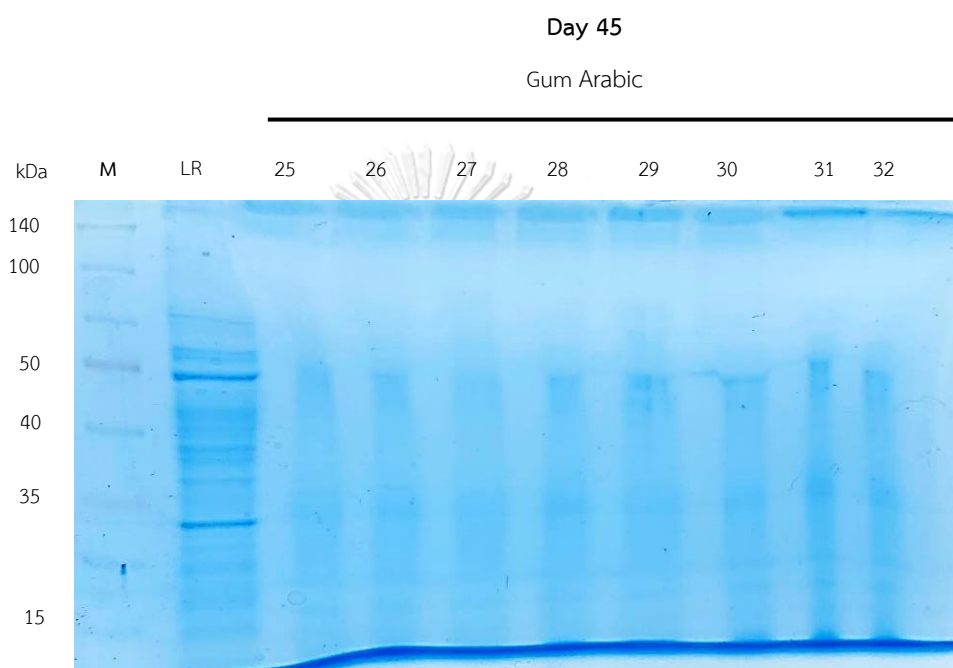
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์มวลโมเลกุลโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 1 (วันที่ 0) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) / lane 25-26 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมพอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 27-28 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมพอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ / lane 29-30 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 31-32 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ



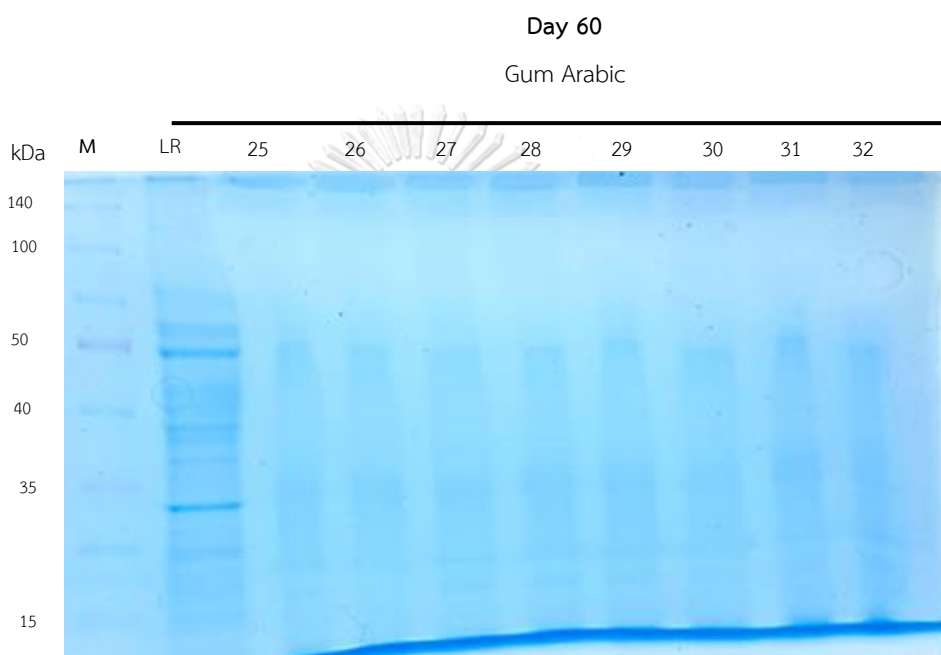
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ห้วงโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 2 (วันที่ 15) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) / lane 25-26 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 27-28 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ / lane 29-30 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 31-32 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ



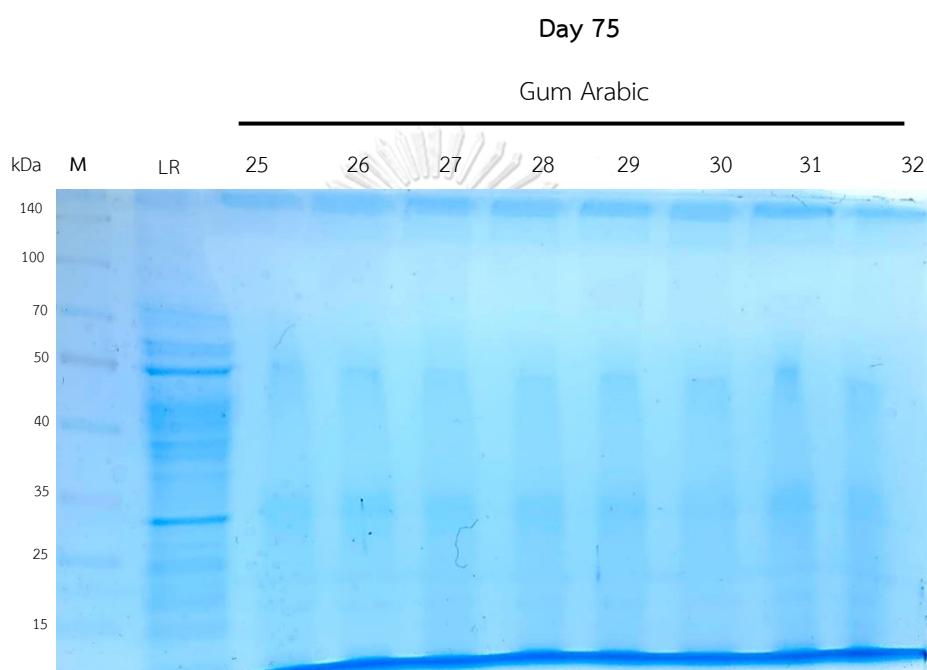
รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ห้วงโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 3 (วันที่ 30) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) / lane 25-26 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ /lane 27-28 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ / lane 29-30 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 31-32 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ



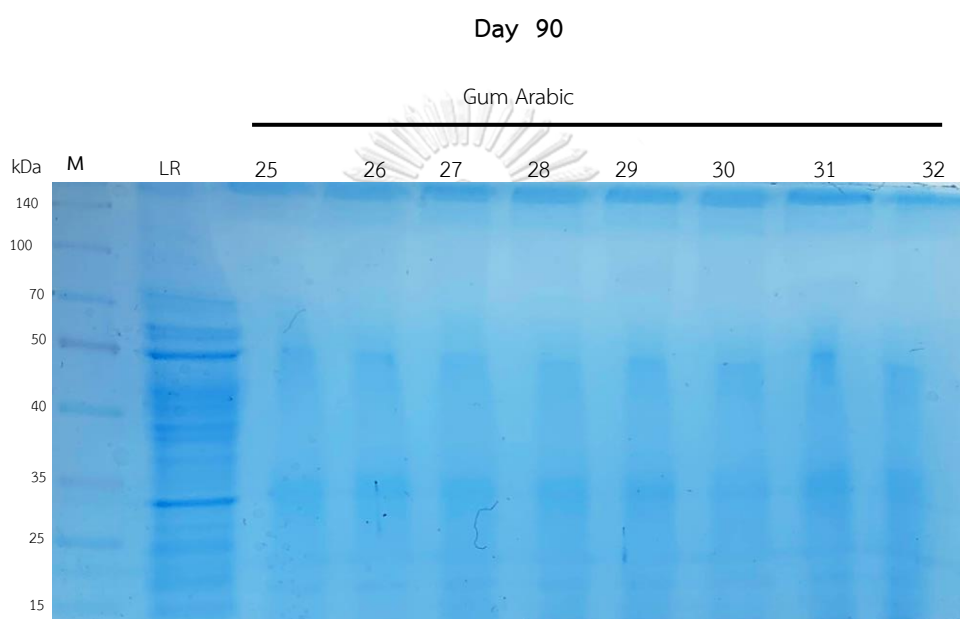
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์มวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 4 (วันที่ 45) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) / lane 25-26 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ /lane 27-28 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ / lane 29-30 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 31-32 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ



รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์มวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 5 (วันที่ 60) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) / lane 25-26 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ /lane 27-28 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ / lane 29-30 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 31-32 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ



รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ห้วงโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 6 (วันที่ 75) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) / lane 25-26 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 27-28 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ / lane 29-30 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 31-32 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ



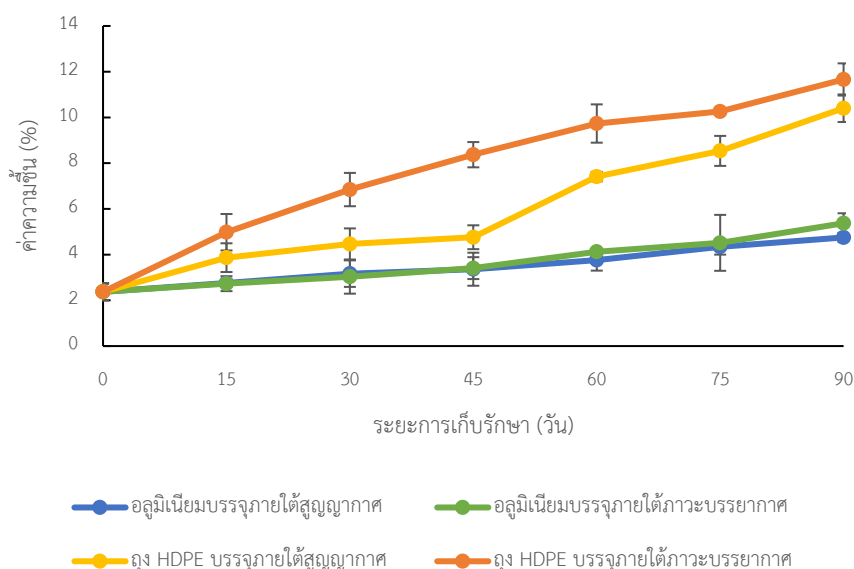
รูปที่ 4.22 การวิเคราะห์หีมวลโมเลกุลของโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากรกสุกรที่ระยะการเก็บรักษาจุดที่ 7 (วันที่ 90) ด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดย lane M = โปรตีนมาตรฐาน Spectra multicolor broad range protein ladder/ lane NR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบ (PPE)/ lane LR = โปรตีนส่วนใสของสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดไขมัน (PPFE) / lane 25-26 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 27-28 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ / lane 29-30 = โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ / lane 31-32 โปรตีนจากผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก HDPE บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ

4.3.2 ค่าปริมาณความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสกระหว่างการเก็บรักษา

ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นสมบัติที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผงไมโครแคปซูล เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อคุณภาพด้านต่าง ๆ ของอาหารผง เช่น การเกาะตัวกันเป็นก้อน ความคงตัวของสารสำคัญภายในผงไมโครแคปซูล และส่งผลต่อการเกิดการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ได้ (Santhalakshmy และคณะ, 2015) ผลการทดลองปริมาณความชื้นผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรในภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องพบว่า มีความชื้นร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2.37 ± 0.37 และปริมาณความชื้นของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยปริมาณความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดเมื่อการเก็บรักษาระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น คือ ถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะบรรยากาศ ถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ภายใต้ภาวะบรรยากาศ และถุงอลูมิเนียมฟอยล์ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.23)

จากการพิจารณาปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงพบว่า ปริมาณความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์มีแนวโน้มมีปริมาณความชื้นน้อยสุดและผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรที่บรรจุในถุงพลาสติก HDPE มีแนวโน้มมีปริมาณความชื้นมากที่สุดเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ภาวะการบรรจุ (ภายใต้ภาวะสุญญากาศและภายใต้ภาวะบรรยากาศ) ไม่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ แก๊ส ความชื้น และแสงของบรรจุภัณฑ์แต่ละชนิด โดยพบว่า ถุงอลูมิเนียมฟอยล์มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีกว่าถุงพลาสติก HDPE เนื่องจากถุงอลูมิเนียมฟอยล์เป็นถุงที่มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำในภาวะที่มีความชื้นสูง (80% RH) (Bargale และคณะ, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Irwandi และคณะ (1997) ในการศึกษาการเก็บรักษาแผ่นมะม่วงกวนในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันเป็นเวลา 12 สัปดาห์พบว่า แผ่นมะม่วงกวนที่บรรจุลงในถุงอลูมิเนียมฟอยล์มีความชื้นน้อยกว่าการใช้พลาสติก HDPE เป็นบรรจุภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษา

นอกจากนี้ในการศึกษาของ Wong และ Lim (2016) รายงานว่าการใช้ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ในการเก็บรักษาผงมะละกอบจากเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยส่งผลให้ตัวอย่างมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าการใช้พลาสติก polyethylene terephthalate (PET) เป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากพลาสติก PET มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำได้น้อยกว่าถุงอลูมิเนียมฟอยล์ และจากรายงานของ Yian และ Phing (2020) พบว่าถุงอลูมิเนียมฟอยล์ที่มีความหนาแน่นระหว่าง 6-9 μm เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันปัจจัยจากภาวะแวดล้อมเข้าบรรจุภัณฑ์ได้ดีกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น เช่น PET เป็นต้น

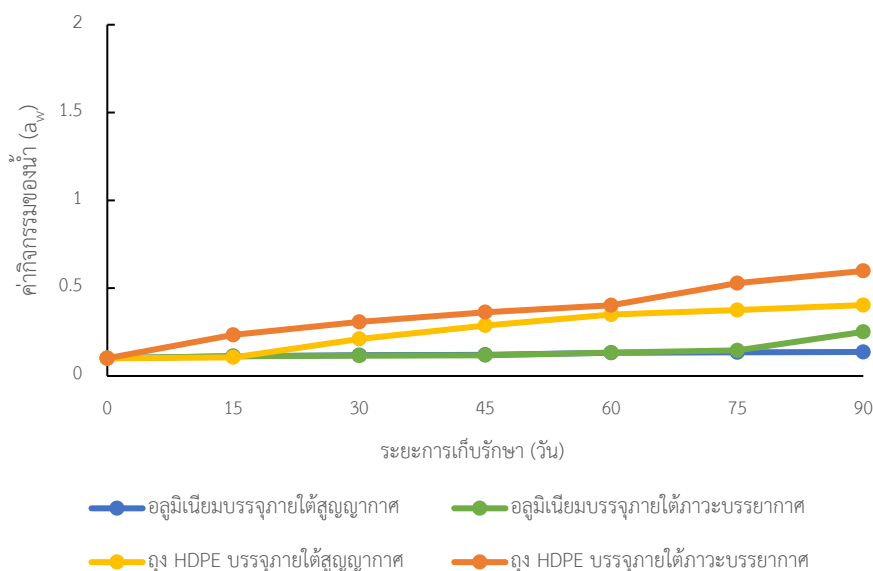


รูปที่ 4.23 ค่าความชื้นของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

4.3.3 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

ค่ากิจกรรมของน้ำเป็นการวัดปริมาณน้ำอิสระที่อยู่ในตัวอย่าง เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความคงตัวและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Teijeiro และคณะ, 2018) ซึ่งค่ากิจกรรมของน้ำเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาทางเคมี และการสูญเสียโปรตีนในผลิตภัณฑ์อาหาร (Kristanti และ Hermianiati, 2021) ดังนั้นถ้าค่ากิจกรรมของน้ำมีค่าน้อยจะทำให้อายุการเก็บรักษาและความเข้มข้นโปรตีนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ผลของบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุมีผลต่อค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร และพบว่า ค่ากิจกรรมของน้ำเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.10 ± 0.01 แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นค่ากิจกรรมของน้ำในทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่ากิจกรรมของน้ำของตัวอย่างที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมพอยล์ภายใต้ภาวะสุญญากาศที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ดังแสดงในรูปที่ 4.24) โดยค่ากิจกรรมของน้ำที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากที่สุดไปน้อยที่สุดเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น คือ ถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะบรรยากาศ ถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ถุงอลูมิเนียมพอยล์ภายใต้ภาวะบรรยากาศ และถุงอลูมิเนียมพอยล์ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ตามลำดับ ซึ่งค่ากิจกรรมของน้ำมีแนวโน้มทิศทางไปในทางเดียวกับปริมาณความชื้น จากผลการทดลองพบว่า การบรรจุผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรลงในถุงพลาสติก HDPE ส่งผลให้มีค่ากิจกรรมของน้ำมากกว่าการบรรจุลงในถุงอลูมิเนียมพอยล์ เนื่องจากถุงอลูมิเนียมพอยล์มีคุณสมบัติในการป้องกันไอน้ำและแก๊สซึมผ่านเข้ามาในบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพบว่า การบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศส่งผลให้ค่ากิจกรรมของน้ำสูงกว่าการบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ เนื่องจากการบรรจุในภาวะสุญญากาศเป็นการกำจัดอากาศออกจากบรรจุภัณฑ์ทำให้ไม่เกิดการดูดซึมน้ำ ไก๊ส และสารระเหยจากอากาศเข้าสู่ตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramachandra และ Rao (2013) ที่ศึกษาอายุการเก็บรักษาและการเปลี่ยนสีของแป้งเจลวุ้นทางจระเข้ในบรรจุ

ภัณฑ์ที่แตกต่างกัน (ถุงอลูมิเนียมพอยล์ biaxially oriented polypropylene, BOPP และ polypropylene, PP) พบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่บรรจุในอลูมิเนียมพอยล์มีอายุการเก็บรักษามากกว่าการใช้ถุง PP เป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากถุงอลูมิเนียมพอยล์มีความสามารถในการป้องกันแก๊ส ไอน้ำ และสารระเหยได้ดีกว่า



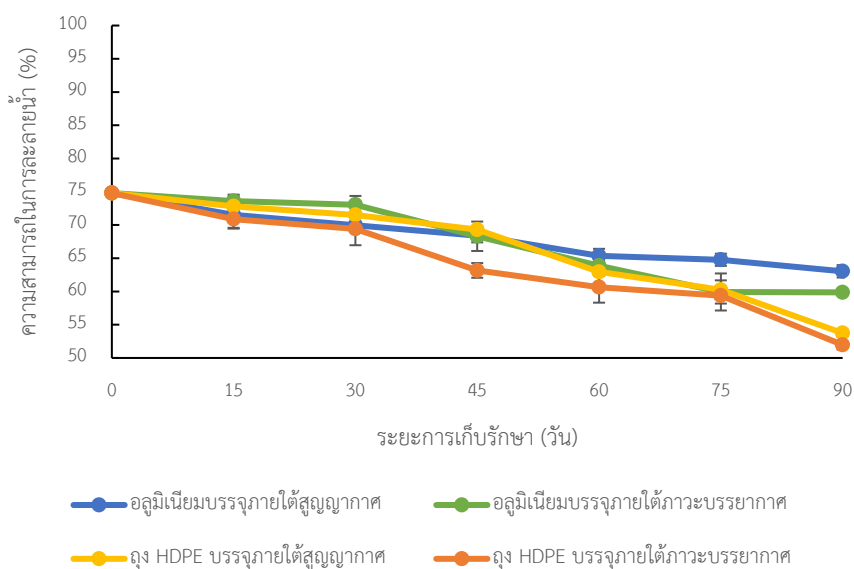
รูปที่ 4.24 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

4.3.3 ค่าความสามารถในการละลายน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

ความสามารถในการละลายน้ำ เป็นสมบัติที่ใช้วัดความสามารถของผงในการละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ (Vissotto และคณะ, 2006) โดยลักษณะการละลายที่ต้องการคือผงไมโครแคปซูลที่สามารถละลายในน้ำได้ทันที และไม่มีตะกอนหลงเหลืออยู่ (Santhalakshmy และคณะ, 2015) นอกจากนี้ความสามารถในการละลายน้ำยังเป็นลักษณะคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารผงไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อื่น

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรพบว่า ผงไมโครแคปซูลมีความสามารถในการละลายน้ำเริ่มต้นเท่ากับ $74.80 \pm 0.55\%$ และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นความสามารถในการละลายของทุกตัวอย่างมีค่าลดลง (ดังแสดงในรูปที่ 4.25) โดยมีแนวโน้มค่าความสามารถในการละลายน้ำลดลงมากที่สุดไปน้อยที่สุดคือ ถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะบรรยากาศ ถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ถุงอลูมิเนียมพอยล์ภายใต้ภาวะบรรยากาศ และถุงอลูมิเนียมพอยล์ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ตามลำดับ ซึ่งค่าความสามารถในการละลายน้ำมีแนวโน้มทิศทางไปในทางเดียวกับปริมาณความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำ จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ภาวะการบรรจุ (ภายใต้ภาวะสุญญากาศและภายใต้ภาวะบรรยากาศ) ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ในขณะที่การเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรในถุงอลูมิเนียมพอยล์ส่งผลให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงกว่าการใช้ถุงพลาสติก HDPE เป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ผงมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงเนื่องจากเกิดอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำ (Goula และ Asamopoulos, 2005) ซึ่งเกิดจากการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคของผงไมโครแคปซูลด้วยตัวเองส่งผลทำให้เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะมีความสามารถในการละลายน้ำดีกว่า (Potter, 1968) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wong และ Lim (2016) ที่ศึกษาการเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลจากมะละกอจากเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน (ถุงอลูมิเนียมพอยล์ และถุง polyethylene terephthalate, PET) และพบว่า ผงไมโครแคปซูลที่เก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมพอยล์มีความสามารถในการละลายสูงกว่าการใช้ถุง PET เป็นบรรจุภัณฑ์ เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 7 สัปดาห์



รูปที่ 4.25 ความสามารถในการละลายของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

4.3.4 ค่า L^* , a^* , b^* และความแตกต่างของสี (ΔE) ของไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

สีเป็นคุณลักษณะสำคัญภายนอก เป็นสิ่งแรกที่ผู้บริโภคสังเกตเห็น (Balaban และคณะ, 2005) โดยเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค จากการศึกษาผลของชนิดบรรจุภัณฑ์ (ถุงอลูมิเนียมพอยล์ และถุงพลาสติก HDPE) และภาวะการบรรจุ (ภายใต้ภาวะสุญญากาศและภายใต้ภาวะบรรยากาศ) ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 90 วัน พบว่า ค่าสีของผงไมโครแคปซูลเริ่มต้นก่อนเก็บรักษา มีค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 64.44 ± 0.0 , 1.24 ± 0.02 และ 7.22 ± 0.78 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28

โดยค่า L^* เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่างและความมืด จากผลการทดลองเมื่อเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร วันที่ 0 ถึงวันที่ 45 พบว่า ปัจจัยด้านบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุไม่มีผลต่อค่าความสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่หลังจากเก็บรักษาหลังวันที่ 45 พบว่า ปัจจัยด้านชนิดบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุส่งผลต่อค่าความสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการใช้ถุงบรรจุภัณฑ์อลูมิเนียมพอยล์และภาวะการบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศส่งผลให้ค่าความสว่างของตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าการใช้ถุงพลาสติก HDPE และภาวะการบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ ในขณะที่ปัจจัยด้านบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุไม่ส่งผลต่อค่า a^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ค่า a^* (ค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นสีแดง) มีแนวโน้มลดลงในทุกตัวอย่าง และปัจจัยด้านบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุไม่ส่งผลต่อค่า b^* (ค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นสีเหลือง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

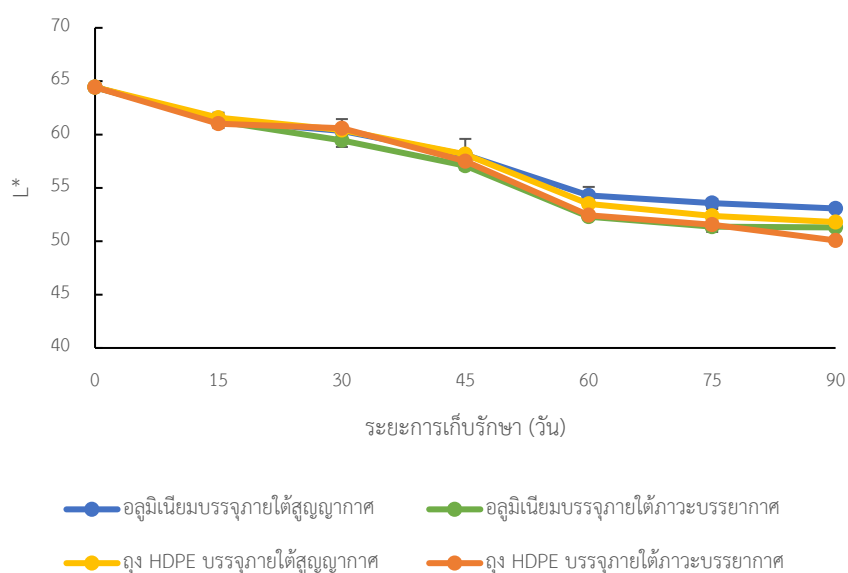
ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) คือความแตกต่างของสีตัวอย่างในระหว่างการเก็บรักษาเทียบกับตัวอย่างก่อนเก็บรักษา โดยถ้ามีค่ามากแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสีจากค่าเริ่มต้นมาก จากผลการทดลองพบว่า ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมพอยล์ภายใต้ภาวะสุญญากาศมีค่าความแตกต่างของสีน้อยกว่าตัวอย่างที่บรรจุในถุงพลาสติก HDPE ภายใต้ภาวะบรรยากาศ เนื่องจากถุงอลูมิเนียมพอยล์สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ไอน้ำ และความชื้นได้ดีกว่า ทำให้การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีเกิดน้อยกว่าการบรรจุในถุงพลาสติก HDPE รวมถึงการบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศเป็นการกำจัดอากาศภายในถุงบรรจุภัณฑ์ออก ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารไม่ดูดซึมความชื้นและไอน้ำเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย (ดังแสดงในตารางที่ 4.29)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของผงไมโครแคปซูลสารสกัดจากโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษา มีหลากหลาย อาทิเช่น ชนิดของบรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิการเก็บรักษา ปริมาณน้ำตาล ปริมาณโปรตีน ค่ากิจกรรมของน้ำ และระยะเวลาการเก็บรักษา (Kristanti และ Herminiati, 2020) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ได้แก่ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (ปฏิกิริยาเมลลาร์ดและปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปรากฏการณ์ทางเคมีที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้งในระหว่างการเก็บรักษา (Acevedo และคณะ, 2008) และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหล่านี้มีสีเหลืองและสีน้ำตาล เช่น เพอร์ฟิวรัล และ ไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟิวรัล ซึ่งส่งผลต่อค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ของตัวอย่าง

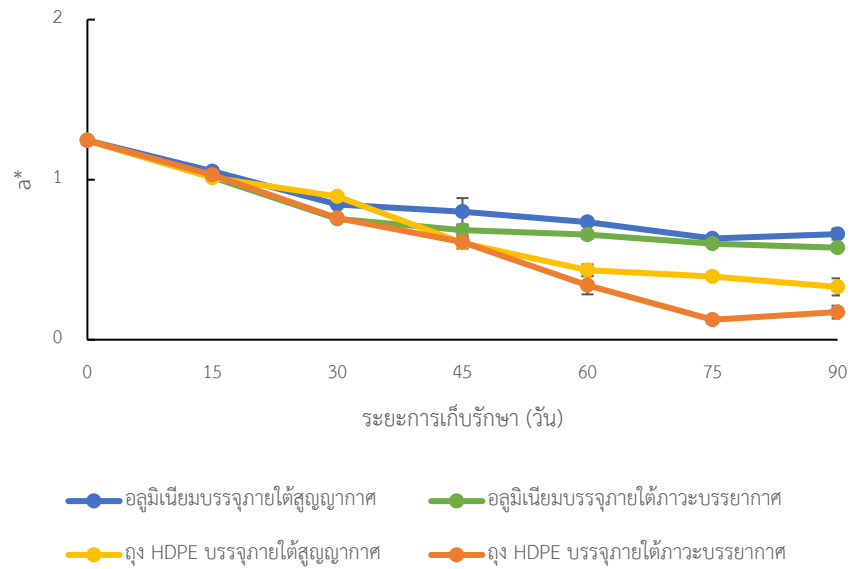
ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chudy และคณะ (2015) ที่ศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงไมโครแคปซูลนม ไข่ และนมไข่ผสมกันจากเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยในภาวะบรรจุที่ต่างกัน (ภายใต้ภาวะสุญญากาศและภายใต้ภาวะในบรรยากาศ) พบว่า การบรรจุผงไมโครแคปซูลในภาวะสุญญากาศส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลทั้งสามชนิดมีค่าความสว่างและ ΔE ลดลงน้อยกว่าตัวอย่างที่บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ เนื่องจากการบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) น้อยกว่าการบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีสีน้ำตาลน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการวัดค่าความเข้มเข้มของผลิตภัณฑ์สีน้ำตาล (Maillard browning intensity,

MBI) ในผลิตภัณฑ์ผงไมโครแคปซูล ที่พบว่า การบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศส่งผลให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลน้อยกว่าการบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ

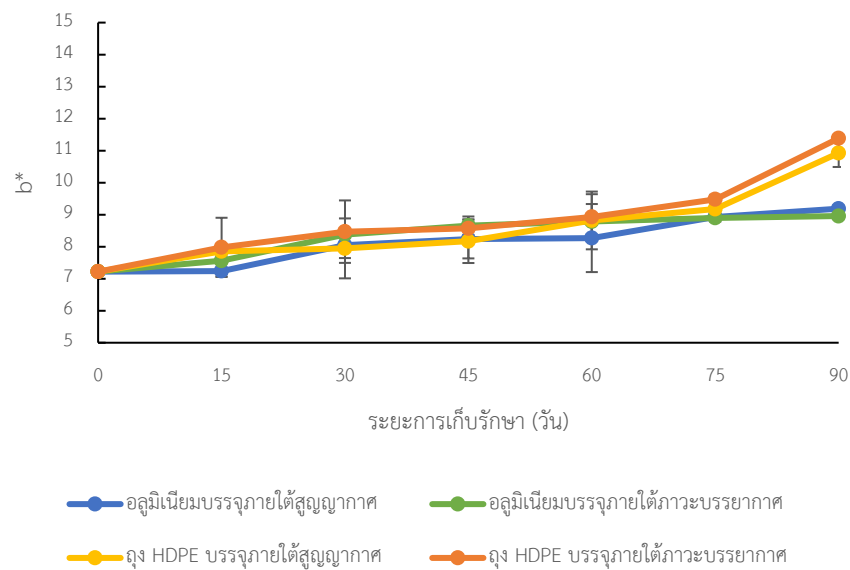
นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar และ Mishra (2004) ในการศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน (ถุงพลาสติก high density polypropylene, HDPP) และถุงอลูมิเนียมฟอยล์) ต่อความคงตัวของผงโยเกิร์ตเสริมถั่วเหลืองมะม่วง โดยพบว่า การบรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดและเกิดผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลน้อยกว่าการบรรจุในถุงพลาสติก HDPP ซึ่งส่งผลให้ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) มีค่าน้อยกว่าการบรรจุในถุงพลาสติก HDPP เนื่องจากถุงอลูมิเนียมฟอยล์มีการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำน้อยกว่า ทำให้มีปริมาณความชื้นน้อยกว่าจึงเกิดปฏิกิริยาทางเคมีน้อยกว่า



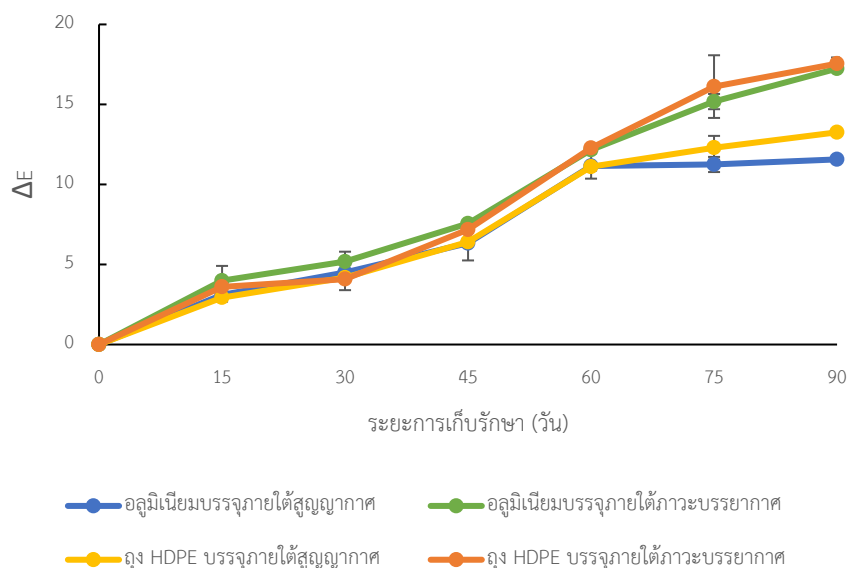
รูปที่ 4.26 ค่า L^* ของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกกระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 4.27 ค่า a^* ของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 4.28 ค่า b^* ของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 4.29 ค่า ΔE ของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรการเก็บรักษา

4.3.5 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และวิธี FRAP ของไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรระหว่างการเก็บรักษา

จากการศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ (ถุงอลูมิเนียมฟอยล์และถุงพลาสติก HDPE) และภาวะการบรรจุ (ภายใต้ภาวะสุญญากาศและภายใต้ภาวะบรรยากาศ) ต่อคุณภาพของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรพบว่า ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP เริ่มต้นของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 13.65 ± 1.51 mM Trolox equivalents (TE)/g db. และ 10.83 ± 0.17 mM FeSO_4 /g db ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อเก็บรักษาผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร วันที่ 0 ถึงวันที่ 60 พบว่า ปัจจัยด้านบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุไม่มีผลต่อค่าฤทธิ์การต้านออกซิเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่หลังจากเก็บรักษาหลังวันที่ 60 พบว่า ปัจจัยด้านชนิดบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุส่งผลต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการใช้ถุงบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก HDPE และภาวะการบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศส่งผลให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมีปริมาณลดลงมากกว่าการใช้ถุงบรรจุภัณฑ์อลูมิเนียมฟอยล์และภาวะการบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศ (ตารางที่ 4.6-4.7 และรูปที่ 4.30-4.31) และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP ของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง

ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งชนิดของบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของโปรตีน เนื่องจากบรรจุภัณฑ์แต่ละชนิดมีความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ ความชื้น ไขมันที่แตกต่างกัน รวมถึงภาวะการบรรจุจะทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารดูดซับไอน้ำ ความชื้น และแก๊สเข้าไปในตัวอย่างอาหาร ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพ (ค่าปริมาณความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำ) มีค่าแตกต่างกัน โดยถุงอลูมิเนียมฟอยล์มีคุณสมบัติในการป้องกันแก๊ส ออกซิเจน ไขมัน ไอน้ำ ความชื้น และกลิ่นเข้ามาภายใน

บรรจุภัณฑ์ได้ดี ในขณะที่ถุงพลาสติก HDPE มีคุณสมบัติยอมให้แก๊สซึมผ่านเข้ามาได้ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการสร้างอนุมูลอิสระและทำลายสารชีวโมเลกุลภายในจนทำให้อาหารมีคุณภาพลดลง (Amanda และคณะ, 2019)

ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมาจากโปรตีนและกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันในสารสกัด รวมถึงมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมาจากผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลหรือเมลานอยดิน (melanoidin) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโนในระหว่างเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้นจากสารสกัดเริ่มต้นประมาณ 5 เท่า ทำให้มีความสามารถในการป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui และคณะ (2014) ที่ศึกษาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์สีน้ำตาล (Maillard reaction products, MRPs) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมสารสกัดไฮโดรไลเสตของผงถั่วลิสงที่สกัดไขมันออกกับกลูโคสไซรัป โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการผลิตที่แตกต่างกัน จากนั้นนำมาใช้เป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร Sachima เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 เดือน โดยผลการทดลองพบว่า จากกระบวนการผสมที่อุณหภูมิสูง ระยะเวลาสั้น ส่งผลให้น้ำตาลจากกลูโคสไซรัปและกรดอะมิโนในสารสกัดไฮโดรไลเสตเกิดปฏิกิริยาทางเคมีร่วมกันในระหว่างการผสม (ปฏิกิริยาเมลลาร์ด) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สีน้ำตาล มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูง มีความสามารถในการป้องกันการย่อยสลายของไขมันและป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันจากคุณสมบัติการเป็นสารต้านออกซิเดชันได้ดี นอกจากนี้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร Sachima สามารถส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน

นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิตสารสกัดรกสุกรก่อนผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย มีขั้นตอนการสกัดไขมันที่เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาออกซิเดชันออกจากสารสกัดจึงส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิห้อง โมเลกุลโปรตีนที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันภายในผงไมโครแคปซูลจึงมีความเสถียรภาพหรือความคงตัวสูง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นโปรตีนของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่มีความเข้มข้นโปรตีนหลังเก็บรักษาลดลงเพียงเล็กน้อย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mariod และคณะ (2010) ที่ศึกษาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของสารสกัดรำข้าวด้วยสารละลายเมทานอลภายใต้การเก็บรักษาภาวะเร่ง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยจากการศึกษาค่าเปอร์ออกไซด์ (peroxide value, PV) และค่ากรดไทโอบาร์บิวทริก (thio barbituric acid reactive substance, TBARS) ซึ่งเป็นค่าใช้วัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation) พบว่า สารสกัดรำข้าวที่สกัดไขมันออกมีค่า PV และค่า TBARS ต่ำกว่าสารสกัดรำข้าวที่ไม่ได้สกัดไขมันออก ดังนั้นในสารสกัดรำข้าวที่สกัดไขมันออกมีความคงตัว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพ และไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างการเก็บรักษา

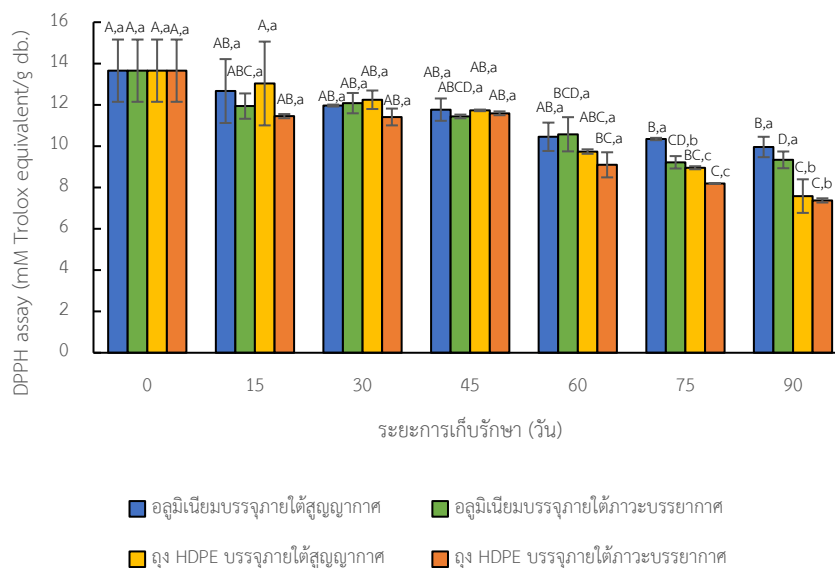
ตารางที่ 4.6ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสกระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

| เวลาการเก็บรักษา | ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH (mM Trolox equivalent/g db.) | | | |
|------------------|--|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | ถั่วอัลมอนด์เนยพอยล์ | | ถั่วพลาสติก HDPE | |
| | บรรจุภายใต้สุญญากาศ | บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ | บรรจุภายใต้สุญญากาศ | บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ |
| 0 | 13.65±1.51 ^{A,a} | 13.65±1.51 ^{A,a} | 13.65±1.51 ^{A,a} | 13.65±1.51 ^{A,a} |
| 15 | 12.67±1.55 ^{AB,a} | 11.94±0.61 ^{ABC,a} | 13.03±2.03 ^{A,a} | 11.45±0.10 ^{AB,a} |
| 30 | 11.97±0.47 ^{AB,a} | 12.08±0.49 ^{AB,a} | 12.25±0.45 ^{AB,a} | 11.41±0.41 ^{AB,a} |
| 45 | 11.76±0.54 ^{AB,a} | 11.44±0.09 ^{ABCD,a} | 11.73±0.04 ^{AB,a} | 11.59±0.09 ^{AB,a} |
| 60 | 10.45±0.69 ^{AB,a} | 10.58±0.83 ^{BCD,a} | 9.74±0.11 ^{ABC,a} | 8.75±0.17 ^{BC,a} |
| 75 | 10.35±0.56 ^{B,a} | 9.22±0.30 ^{CD,b} | 8.31±0.30 ^{BC,c} | 8.20±0.01 ^{C,c} |
| 90 | 9.96±0.49 ^{B,a} | 9.14±0.41 ^{D,a} | 7.58±0.81 ^{C,b} | 7.37±0.10 ^{C,b} |

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ตัวอักษรที่ต่างกัน (^{A-C}) หมายถึง ค่าเฉลี่ย (ตามระยะเวลา) ของแต่ละแถวแนวดิ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

* ตัวอักษรที่ต่างกัน (^{a-c}) หมายถึง ค่าเฉลี่ย (บรรจุภัณฑ์และภาวะบรรจุ) ของแต่ละแถวแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



รูปที่ 4.30 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสกระหว่างการเก็บรักษา

* ตัวอักษรที่ต่างกัน (^{A-C}) หมายถึงค่าเฉลี่ย (ตามระยะเวลา) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

* ตัวอักษรที่ต่างกัน (^{a-c}) หมายถึงค่าเฉลี่ย (บรรจุภัณฑ์และภาวะบรรจุ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

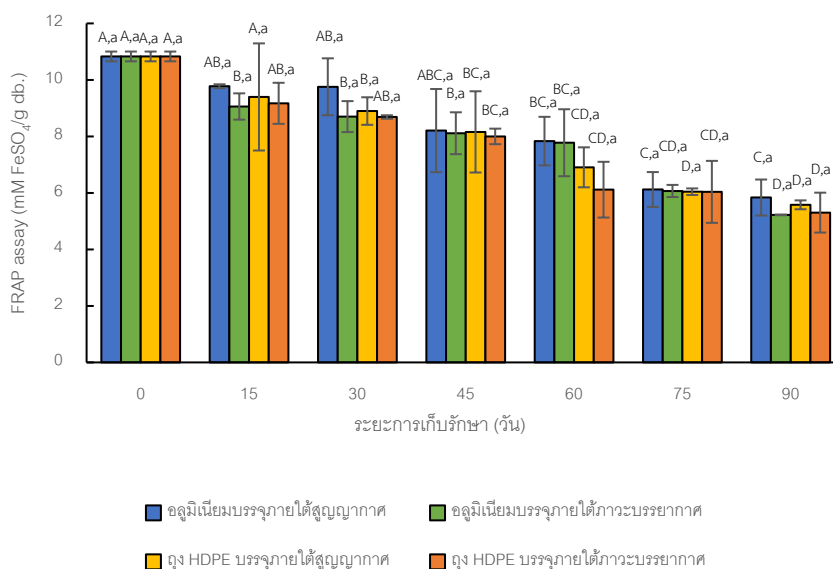
ตารางที่ 4.7ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

| เวลาการเก็บรักษา | ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP (mM FeSO ₄ /g db.) | | | |
|------------------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ | | ถุงพลาสติก HDPE | |
| | บรรจุภายใต้สุญญากาศ | บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ | บรรจุภายใต้สุญญากาศ | บรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศ |
| 0 | 10.83±0.17 ^{A,a} | 10.83±0.17 ^{A,a} | 10.83±0.17 ^{A,a} | 10.83±0.17 ^{A,a} |
| 15 | 9.78±0.67 ^{AB,a} | 9.06±0.47 ^{B,a} | 10.45±0.76 ^{A,a} | 9.17±0.73 ^{AB,a} |
| 30 | 9.76±1.01 ^{AB,a} | 8.70±0.55 ^{B,a} | 8.90±0.49 ^{B,a} | 8.69±0.06 ^{AB,a} |
| 45 | 8.21±1.47 ^{ABC,a} | 8.11±0.74 ^{B,a} | 8.16±0.46 ^{BC,a} | 8.00±0.28 ^{BC,a} |
| 60 | 7.83±0.86 ^{BC,a} | 7.78±1.19 ^{BC,a} | 6.91±0.71 ^{CD,a} | 6.11±0.99 ^{CD,a} |
| 75 | 6.12±0.62 ^{C,a} | 6.07±0.21 ^{CD,a} | 6.04±0.11 ^{D,a} | 6.04±1.10 ^{CD,a} |
| 90 | 5.84±0.64 ^{C,a} | 5.22±0.11 ^{D,a} | 5.57±0.16 ^{D,a} | 5.30±0.71 ^{D,a} |

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (^{A-C}) หมายถึง ค่าเฉลี่ย (ตามระยะเวลา) ของแต่ละแถวแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

* ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (^{a-c}) หมายถึง ค่าเฉลี่ย (บรรจุภัณฑ์และภาวะบรรจุ) ของแต่ละแถวแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



รูปที่ 4.31 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษา

* ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (^{A-C}) หมายถึงค่าเฉลี่ย (ตามระยะเวลา) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

* ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (^{a-c}) หมายถึงค่าเฉลี่ย (บรรจุภัณฑ์และภาวะบรรจุ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการสกัดไขมันออกจากสารสกัดรกสุกรด้วยวิธี liquid-liquid extraction พบว่าการสกัดไขมันออกจากรกสุกรด้วยเฮกเซนส่งผลให้ปริมาณโปรตีนและฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP ของสารสกัดรกสุกรมีค่าลดลงจากรกสุกรเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่รูปแบบของโปรตีนในสารสกัดทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าทั้งสองตัวอย่างมีโปรตีนขนาดใหญ่กว่า 200 kDa และพบโปรตีนขนาดเล็กต่ำกว่า 10 kDa โดยมีโปรตีนส่วนมากอยู่ในช่วง 25 ถึง 100 kDa แต่เนื่องจากประกาศของกระทรวงสาธารณสุขประเทศไทย ฉบับที่ 424 พ.ศ. 2564 ออกตามความในพระราชบัญญัติอาหารแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2522 มีข้อกำหนดห้ามผลิต นำเข้า และหรือส่งออกสารสกัดจากอวัยวะของสัตว์และพืชที่ยังคงมีฮอร์โมนคงเหลืออยู่ ดังนั้นกระบวนการสกัดไขมันออกจากรกสุกรเพื่อนำฮอร์โมนสเตียรอยด์ออกจากตัวอย่างจึงเป็นกระบวนการที่จำเป็นในกระบวนการผลิตสารสกัดรกสุกร

การศึกษาผลของภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อสมบัติของโปรตีน สมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรพบว่า ภาวะการทำแห้งด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยสารสกัดรกสุกรที่แตกต่างกัน (อุณหภูมิเข้า ชนิดของสารห่อหุ้ม และความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม) ส่งผลต่อสมบัติและคุณภาพของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่แตกต่างกัน โดยผงไมโครแคปซูลทุกตัวอย่างมีรูปแบบของโปรตีนไม่แตกต่างกัน มีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำกว่า 0.2 มีร้อยละความชื้นต่ำกว่า 5% wb. และมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (44.1 ถึง 61.5 องศาเซลเซียส) แต่เมื่อใช้กัมอาร์บิกเป็นสารห่อหุ้มจะส่งผลให้สมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีสมบัติบางสมบัติที่ดีกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม ซึ่งได้แก่ ค่าปริมาณโปรตีนและประสิทธิภาพการกักเก็บสารต้านออกซิเดชัน โดยมีความเข้มข้นโปรตีนอยู่ในช่วง 0.66 ± 0.02 ถึง 3.93 ± 0.23 mg/g และมีค่าประสิทธิภาพการกักเก็บสารต้านออกซิเดชันอยู่ในช่วง $94.32 \pm 0.71\%$ ถึง $97.99 \pm 0.15\%$ ในขณะที่การใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้สมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีความสามารถในการละลายและค่าร้อยละผลผลิตมีค่าสูงกว่าการใช้กัมอาร์บิกเป็นสารห่อหุ้ม ซึ่งมีค่าร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วง 80.74 ± 4.31 ถึง 86.45 ± 1.40 และมีความสามารถในการละลายน้ำสูงกว่า 90% เมื่อพิจารณาค่าสีของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรพบว่า ชนิดของสารห่อหุ้มส่งผลต่อค่า L^* , a^* และ b^* ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผงไมโครแคปซูลที่ใช้กัมอาร์บิกเป็นสารห่อหุ้มมีค่า L^* น้อยกว่า แต่ค่า a^* และ b^* มีค่าบวกมากกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม โดยทุกตัวอย่างมีลักษณะสีเหลืองอมแดง นอกจากนี้การศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ภาวะการผลิตผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่แตกต่างกันส่งผลต่อรูปร่างและลักษณะพื้นผิวของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรอย่างชัดเจน โดยผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอาร์บิกเป็นสารห่อหุ้มมีรูปร่างทรงกลมและพื้นผิวเรียบมากกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม และผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่ใช้กัมอาร์บิกที่มีความเข้มข้น 40% w/v ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 18.92 ± 0.84 mM TE/g db และ 16.37 ± 0.85 mM FeSO₄/g db. ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 90 วัน (แปรชนิดบรรจุภัณฑ์และภาวะการบรรจุ) พบว่าค่าความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ ค่าความแตกต่างของสี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความสามารถในการละลาย และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีแนวโน้มลดลง โดยพบว่าผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ถุงอลูมิเนียมพอยล์และบรรจุภายใต้ภาวะสุญญากาศมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านต่าง ๆ น้อยกว่าตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก HDPE และบรรจุภายใต้ภาวะบรรยากาศในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 90 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ข้อเสนอแนะ

ในวิธีการสกัดฮอร์โมนสเตียรอยด์ออกจากรกสุกรด้วยสารละลายเฮกเซน สารละลายที่ได้อาจมีปริมาณฮอร์โมนคงเหลืออยู่ ดังนั้นจึงควรมีวิธีการสกัดฮอร์โมนออกจากสารสกัดรกสุกรด้วยวิธีอื่น ซึ่งในงานวิจัยของ Roudbari และคณะ (2018) มีการศึกษาการใช้เครื่องอัลตราซาวด์ในการสกัดฮอร์โมนออกจากน้ำเสียจากชุมชน พบว่า เป็นวิธีที่ทำให้สามารถลดปริมาณฮอร์โมนสเตียรอยด์ออกจากน้ำเสียได้มากถึง 85-96% ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณฮอร์โมนได้ดี ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิธีการสกัดฮอร์โมนออกจากน้ำสารสกัดรกสุกรด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติมเพื่อให้สารสกัดรกสุกรมีปริมาณฮอร์โมนคงเหลือในสารสกัดน้อยที่สุด

เนื่องจากสมบัติของผงไมโครแคปซูลในภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่แตกต่างกันมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปในแต่ละสมบัติของผงไมโครแคปซูล โดยเมื่อพิจารณาปัจจัยด้านสารห่อหุ้มพบว่าการใช้กัมอารบิกเป็นสารห่อหุ้มส่งผลให้ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีปริมาณโปรตีน ประสิทธิภาพการกักเก็บสารต้านออกซิเดชัน และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP สูงกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม แต่สมบัติด้านร้อยละผลผลิต ความสามารถในการละลาย ค่ากิจกรรมของน้ำ และความชื้นของผงไมโครแคปซูลมีค่าน้อยกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินด้านทานการย่อยเป็นสารห่อหุ้ม ดังนั้นหากต้องการเพิ่มสมบัติของผงไมโครแคปซูลให้ดีขึ้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้สารห่อหุ้มกัมอารบิกผสมกับสารห่อหุ้มชนิดอื่น เพื่อให้สมบัติของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรมีสมบัติด้านโปรตีน สมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันดีที่สุด

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิงภาษาไทย

- กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 424) พ.ศ. 2564 เรื่อง กำหนดอาหารที่ห้ามผลิต นำเข้า หรือจำหน่าย. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 138, ตอนพิเศษ 45 ง (ลงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2564).
- ธนวิทย์ ลายิ้ม. (2557). โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ฟอยทองตัวน้อย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา https://dspace.rmutk.ac.th/bitstream/handle/123456789/1582/Tanavit_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [1 กรกฎาคม 2565].
- ปฎิวิทย์ ลอยพิมาย. (2011). การประเมินความสามารถด้านออกซเดชันรวมในหลอดทดลอง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 31 (มีนาคม – เมษายน), 31(2), 164-170.
- ปวีณา พันทอง. (2016). การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี CUPRAC โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/56920133.pdf. [1 กรกฎาคม 2565].
- พัชรี บุญศิริ, เปรมใจ อารีจิตรานุสรณ์, อุบล ชาอ่อน และ ปิติ ธูจิตต์. (2550). ตำราชีวเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 5. ขอนแก่น : คลังนานาวิทยา.
- วิรัชย์ อารีกุล. (2557). การพัฒนาชาเขียวกู่หลานผงสำเร็จรูปด้วยวิธีการทำแห้งแบบฟั่นฝอยและความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา http://archive.lib.cmu.ac.th/full/rpf/2550/rpf50_pwr_full.pdf. [10 กุมภาพันธ์ 2564].
- สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2012). ฮอร์โมน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.il.mahidol.ac.th/e-media/hormone/chapter3/pancrease_hormon.htm. [10 กุมภาพันธ์ 2564].
- อธิป สกุลเผือก. (2017). อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา https://ccpe.pharmacycouncil.org/index.php?option=article_detail&subpage=article_detail&id=204. [10 กุมภาพันธ์ 2564].
- BoxKao. (2017). "อะคาเซียกัม" ผลผลิตจากธรรมชาติที่มีบทบาทสำคัญในกลุ่มประเทศซาเฮล ทั้งในเชิงสังคม เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา https://boxkao.blogspot.com/2017/03/blog-post_842.html [10 กุมภาพันธ์ 2564].

รายการอ้างอิงภาษาอังกฤษ

- Acevedo, N.C., Schebor, C. and Buera, P. (2008). Non-enzymatic kinetics analysed through water-solids interactions and water mobility in dehydrated potato. *Food Chemistry*, 108, 900–906

- Admin, S.F.M., Karim, R., Yusof, Y.A. and Muhammad, K. (2021). Effects of enzymatic liquefaction, drying techniques, and wall materials on the physicochemical properties, bioactivities, and morphologies of zinc-amaranth (*Amaranthus viridis* L.) powders. *International Journal of Food Science*, 2021(4), 1-13.
- Ahad, T., Gull, A., Wani, S.M., Shafi, M.N. and Masoodi, F.A. (2020). Optimization of process parameters for spray drying of ginger oleoresin powder using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4), 1-13.
- Ahmed, N., Singh, J., Chauhan, H., Gupta, P., Anjum, A. and Kour, H. (2013). Difference drying methods: Their applications and recent advances. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 4(1), 34-42.
- Alamilla-Beltrán, L., Chanona-Pérez, J.J., Jiménez-Aparicio, A.R. and Gutiérrez-López, G.F. (2005). Description of morphological changes of particles along spray drying. *Journal of Food Engineering*, 67(1-2), 179-184.
- Alves, A.I., Rodrigues, M.Z., Ribeiro-Pinto, M.R.M., Lago-Vanzela, E.S., Stringheta, P., Perrone, I.T. and Ramos, A.M. (2017). Morphological characterization of pequi extract microencapsulated through spray drying. *International Journal of Food Properties*, 20(2), 1298-1305.
- Amanda, V., Sulaiman, I. and Yunita, D. (2019). Variety of packaging and estimated shelf life of Acehnese traditional food (pliek u). *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 536(1), 012121.
- Anderson, D.M.W., Brown-Douglas, D.M., Morrison, N.A. and Weiping, W. (1990). Specifications for gum Arabic (*Acacia Senegal*); analytical data for samples collected between 1904 and 1989. *Food Additives and Contaminants*, 7(3), 303-321.
- AOAC. (2000), Official Methods of Analysis of AOAC International. Seventeen editions. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland.
- AOAC. (2006), Official Methods of Analysis of AOAC International. Eighteen editions. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland.
- Arnoldi, A. (2002). In The nutrition handbook for food processors. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge. England.
- Arpagaus, C. (2019). Nanoencapsulation of Food Ingredients by Specialized Equipment. Elsevier Academic Press. America.
- Astina, J. and Sapwarobol, S. (2019). Resistant maltodextrin and metabolic syndrome: A review.

Journal of the American College of Nutrition, 38(4), 380–385.

- Balaban, M.O., Kristinsson, H.G. and Otwell, S. (2005). Evaluation of color parameters in a machine vision analysis of carbon monoxide-treated fish—Part 1. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 14(2), 5-24.
- Bargale, P.C., Joshi, K.C. and Jha, K. (1993). Keeping quality of soyflakes in different packaging materials under humid condition of storage. *Legume Research*, 31(1), 32–37
- Baysan, U., Elmas, F. and Koç, M. (2019). The effect of spray drying conditions on physicochemical properties of encapsulated propolis powder. *Journal of Food Process Engineering*, 42(4), 1– 11.
- Benzie, I.F.F. and Strain, J.J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76.
- Bhandari, B.R., Dunmoulin, E.D., Richard, H.M.J., Noleau, I. and Lebert, A.M. (1992). Flavor Encapsulation by Spray Drying: Application to Citral and Linalyl Acetate. *Journal of Food Science*, 57(1), 217-221.
- Bowen, A. (2011). Placental structure and classification. [online]. source: <http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/reprod/placenta/structure.html>. [10 February 2565].
- Bradford, M.M. (1976). A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E. and Berset, C.L.W.T. (1995). Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Brodowska, K.M., Catthoor, R., Brodowska, A.J., Symonowicz, M. and Lodyga-Chruscinska, E. (2014). A comparison of antioxidant properties of extracts from defatted and non-defatted flax (*Linum usitatissimum*) seeds. *Albanian Journal of Agricultural Sciences*, 13(2), 16-23.
- Byju’s. (n.d.). Gum Arabic. [online]. source <https://byjus.com/chemistry/gum-arabic/> . [10 February 2565].
- Cao, C., Zhao, X., Zhang, C., Ding, Z., Sun, F. and Zhao, C. (2020). Effect of inlet temperature on the physicochemical properties of spray-dried seed-watermelon seed protein powder. *Journal of Food Science*, 85(10), 3442-3449.
- Carter, A.M. and Martin, R. (2010). Placenta Bed Disorders. Cambridge University Press. England.

- Careiro, H.C.F., Tonon, R.V., Grosso, C.R.F. and Hubinger, M.D. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*, 115(4), 443-451.
- Chen, L., Zhang, L.P., Luo, Y.H., Su, X., Kou, J.Q. and Tan, G. (1999). Studies on characteristic and preparation of pig placenta polypeptide (Transfer Factor). *Journal of East China Normal University*, 11, 9-13.
- Chudy, S., Pikul, J., Rudzińska, M. and Makowska, A. (2015). The effect of storage on physicochemical properties of spray-dried milk, egg and milk-egg mixture. *Journal Acta Agrophysica*, 22(1), 17-26.
- Corrêa-Filho, L.C., Lourenço, M.M., Moldão-Martins, M. and Alves, V.D. (2019). Microencapsulation of β -carotene by spray drying: Effect of wall material concentration and drying inlet temperature. *International Journal of Food Science*. 2019(7), 1-12.
- Costa, S.S., Machado, B.A.S., Martin, A.R., Bagnara, F., Ragadalli, S.A. and Alves, A.R.C. (2015). Drying by spray drying in the food industry: Micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. *African Journal of Food Science*, 9(9), 462-470.
- Crow. (n.d.). Polyolefins (polyalkenes). [online]. source: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyolefin%20type.html>. [10 February 2565].
- Cui, C., Lei, F.F., Wang, Y.R., Zhao, H.F., Sun, W.Z. and You, L.J. (2014). Antioxidant properties of Maillard reaction products from defatted peanut meal hydrolysate-glucose syrup and its application to Sachima. *Food Science and Technology Research*, 20(2), 327-335.
- de Fernandes, R.V.B., Borges, S.V. and Botrel, D.A. (2013). Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties. *Food Science and Technology*, 33(SUPPL.1), 171-178.
- Enders A.C. and Blankenship, T.N. (1999). Comparative placental structure. *Advanced Drug Delivery Review*. 38(1), 3-15.
- Fang, Y., Rogers, S., Selomulya, C. and Chen, X.D. (2012). Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature. *Biochemical Engineering Journal*, 62, 101-105.
- Chikamai, B.N., Casadei, E., Coppen, J.J.W. Abdel Nour, H.O. and Cesareo, D. (1996). A review of production, markets and quality control of gum Arabic in Africa. [online]. source: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=KE2005100102> .[10 February 2565].
- Friess, A.E., Sinowatz, F., Skolek-Winnisch, R. and Trautner, W. (1980). The placenta of the pig.

Anatomy and Embryology, 158, 179-191.

- Furukawa, S., Kuroda, Y. and Sugiyama, A. (2014). A comparison of the histological structure of the placenta in experimental animals. *Journal of Toxicologic Pathology*, 27(1), 11-18.
- Gaiani, C., Schuck, P., Scher, J., Ehrhardt, J.J., Arabe-Tehrany, E., Jacquot, M. and Banon, S. (2009). Native phosphocaseinate powder during storage: Lipids released onto the surface. *Journal Food Engineering*, 94(2), 130-134.
- Gardner H.W. (1975). Decomposition of linoleic acid hydroperoxides: Enzymic reactions compared with non-enzymic. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 23(2), 129-136
- Gawalek, J., Domian, E., Ryniecki, A. and Bakier, S. (2017). Effects of the spray drying conditions of chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) juice concentrate on the physicochemical properties of powders. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 1993-1941.
- Gavahian, M., Chu, Y.M., Khaneghah, A.M., Barba, F.J. and Misra, N.N. (2018). A critical analysis of the cold plasma induced lipid oxidation in foods. *Trends in Food Science & Technology*, 77, 32-41.
- Georgieva, R., Stefanov, D., Fichorova, R. and Dimitrova, E. (1995). Effects of the whole extract and the chromatographic fractions of the pig placenta on lymphocyte proliferation and humoral immune response. *Theriogenology*, 44(4), 539-551.
- Goodrum, L.J., Patel, A., Leykam, J.F. and Kieliszewski, M.J. (2000). Gum Arabic glycoprotein contains glycomodules of both extension and arabinogalactan-glycoproteins. *Phytochemistry*, 54(1), 99-106.
- Gunturu, B. (2018). Review on the extraction methods of crude oil from all generation biofuels in last few decades. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 330, 012024.
- Gordon, M.H. (1990). Food antioxidants. Elsevier Science Publishers Ltd. England.
- Goula, A.M. and Adamopoulos, K.G. (2005). Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: 2. The effect on powder properties. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 35-42.
- Harvestright. (n.d.). Freeze dryer for commercial use. [online]. source: <https://harvestright.com/commercial-freeze-dryer/>. [10 February 2565]
- Hashizume, C. and Okuma, K. (2009). Fiber Ingredients. CRC Press. America.
- Igual, M., García-Segovia, P. and Martínez-Monzó, J. (2021). Resistant maltodextrin's effect on the physicochemical and structure properties of spray dried orange juice powders. *European Food Research and Technology*, 247(6), 1125-1132.
- Irwandi, I., Man, Y.B.M., Yusof, S., Jinap, S. and Sugisawa, H. (1998). Effects of type of packaging

- materials on physicochemical, microbiological and sensory characteristics of durian fruit leather during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(3), 427-434.
- Jacy. (n.d.). Why sun-dried fruits are good for you. [online]. source: <https://mothernature-healthydelights.com/why-sun-dried-fruits-are-good-for-you/>. [10 February 2565].
- Jafari, S.M., Assadpoor, E., He, Y. and Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Drying Technology*, 26(7). 816-835.
- Jang, A., Jo, Cheorum., Kim, I.J. and Lee, M. (2007). Nutritional quality of dried pig placenta. *Journal Food Science Nutrition*, 12(2), 89-94.
- Jordan, O., Paulet, P.G. and Vidal, L. (2018). Microstructure of *Annona muricata* L. leaves extract microcapsules linked to physical and chemical characteristics. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 8(3), 173-193.
- Kanpairo, K. (2020). The effect of maltodextrin on qualities of instant Che-Mei tea powder. *Burapha Science Journal*, 25(3), 1067-1082.
- Kha, T.C., Nguyen, M.H., Roach, P.D. and Stathopoulos, C.E. (2014). Microencapsulation of Gac oil: Optimisation of spray drying conditions using response surface methodology. *Powder Technology*, 264, 298–309.
- Koç, M., Güngör, Ö., Zungur, A., Yalçın, B., Selek, İ., Ertekin, F. K. and Ötles, S. (2015). Microencapsulation of extra virgin olive oil by spray drying: Effect of wall materials composition, process conditions, and emulsification method. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 301– 318.
- Kristanti, D. and Herminiati, A. (2020). Physicochemical and microbiological properties of pudding powder as a complementary food during storage. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1011, 1-8.
- Krittalak, P., Panida, B., Supaporn, L., Nowwapan, N., Takunrat, T. and Ubolwanna, S. (2016). Effect of drying process on the physicochemical properties and biological activities of enzymatic protein hydrolysate from shiitake mushroom (*Lentinula edodes*). *Chiang Mai Journal Science*, 45(2), 762-773.
- Kumar, P. and Mishra, H.N. (2004). Storage stability of mango soy fortified yoghurt powder in two different packaging materials: HDPP and ALP. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 569-576.

- Kurozawa, L.E., Park, K.J. and Hubinger, M.D. (2009). Effect of carrier agents on the physicochemical properties of a spray dried chicken meat protein hydrolysate. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 326-333.
- Kurozawa, L.E., Park, K.J. and Hubinger, M.D. (2011). Spray drying of chicken meat protein hydrolysate: Influence of process conditions on powder property and dryer performance. *Drying Technology*, 29(2), 163-173.
- Labuckas, D., Maestri, D. and Lamarque, A. (2011). Lipid and protein stability of partially defatted walnut flour (*Juglans regia* L.) during storage. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(7), 1388-1397.
- Laosam, P., Panpipat, W., Yusaku, I. G., Cheong, L.Z. and Chaijan, M. (2021). Porcine placenta hydrolysate as an alternate functional food ingredient: In vitro antioxidant and antibacterial assessments. *PLOS ONE*, 16(10), 1-26.
- Leiser, R. and Kaufmann, P. (1994). Placental structure: in a comparative aspect. *Experimental and Clinical Endocrinology & Diabetes*, 102(3), 122-134.
- Manzocco, L., Calligaris, S., Mastrocola, D., Nicoli, M.C. and Lerici, C.R. (2000). Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9-10), 340-346.
- Mariod, A.A., Adamu, H.A., Ismail, M. and Ismail, N. (2010). Antioxidative effects of stabilized and unstabilized defatted rice bran methanolic extracts on the stability of rice bran oil under accelerated conditions. *Grasas y Acetias*, 61(4), 409-415.
- Marsh, K. and Bugusu, B. (2007). Food packaging-role, materials, and environmental issue. *Journal of Food Science*, 72(3), 39-55.
- Moller, N.P., Scholz-Ahrens, K.E., Roos, N. and Schrezenmeir, J. (2008). Bioactive peptides and proteins from foods: indication for health effects. *European Journal of Nutrition*, 47, 171-182.
- Mora, L., Aristoy, M. and Toldra, F. (2018). Module in Food Science. Elsevier Inc.
- Munro, H.N., Pilistine, S.J. and Fant, M.E. (1983). The placenta in nutrition. *Annual Review of Nutrition*, 3, 97-124.
- Murugkar, D. and Jha, K. (2011). Influence of storage and packaging conditions on the quality of soy flour from sprouted soybean. *Journal of Food Science and Technology*, 48(3), 325-8.
- Muzaffar, K. and Kumar, P. (2015). Parameter optimization for spray drying of tamarind pulp using response surface methodology. *Powder Technology*, 279, 179-184.

- Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S. and Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technology for food applications. *Procedia Food Sciences*, 1, 1806-1815.
- Nkurunziza, D., Sivagnanam, S.P., Park, J.S., Cho, Y.J. and Chun, B.S. (2021). Effect of wall materials on the spray drying encapsulation of brown seaweed bioactive compounds obtained by subcritical water extraction. *Algal Research*, 58, 1-10.
- Okchem. (2021). Digestible maltodextrin vs Resistant maltodextrin. [online]. source: <https://www.okchem.com/news/JzLuRMZxo/Digestible%C2%A0maltodextrin%C2%A0vs-Resistant-maltodextrin.html>. [10 February 2565].
- Oliveira-Lima, K., Alemán, A., López-Caballero, M.E., Gómez-Guillén, M., Montero, M.P., Prentice, C., Taipe Huisa, A.J. and Monserrat, J.M. (2021). Characterization, stability, and in vivo effects in *Caenorhabditis elegans* of microencapsulated protein hydrolysates from stripped weakfish (*Cynoscion guatucupa*) industrial byproducts. *Food Chemistry*, 364, 1-9.
- Pai, D.A., Vangala, V.R., Ng, J.W. and Tan, R.B.H. (2015). Resistant maltodextrin as a shell material for encapsulation of naringin: Production and physicochemical characterization. *Journal of Food Engineering*, 161, 68-74.
- Protor, P. (1989). CRC Handbook of Free Radical and Antioxidant Vol 1. CRC Press. England.
- Potter, N.N. and Hotchkiss, J.H. (1968). Food science 5th ed. Springer. New York.
- Prabhudas, M., Bonney, E., Caron, K., Dey, S., Erlebacher, A., Fazleabas, A., Fisher, S., Golos, T., Matzuk, M., Mccune, J., Mor, G., Schulz, L., Soares, M., Spencer, T., Strominger, J., Way, S.S. and Yoshinaga, K. (2015). Immune mechanisms at the maternal-fetal interface: Perspectives and challenges. *Nature Immunology*, 16(4). 328-334.
- Pudziuvelyte, L., Marksa, M., Jakstas, V., Ivanauskas, L., Kopustinskiene, D.M. and Bernatoniene, J. (2019). Microencapsulation of *Elsholtzia ciliata* herb ethanolic extract by spray-drying: impact of resistant-maltodextrin complemented with sodium caseinate, skim milk, and beta-cyclodextrin on the quality of spray dried powders. *Molecules*, 24(8), 1461.
- Ramachandra, C.T. and Rao, P.S. (2013). Shelf-life and colour change kinetics of Aloe vera gel powder under accelerated storage in three different packaging materials. *Journal of Food Science and Technology*, 50(4).
- Ramakrishnan, Y., Adzahan, N.M., Yusof, Y.A. and Muhammad, K. (2018). Effect of wall materials on the spray drying efficiency, powder properties and stability of bioactive compounds in tamarillo juice microencapsulation. *Powder Technology*, 328, 406-414.
- Rajchasom, S. and Phanphattharachai, P. (2019). Study of drying condition and extraction process

- of protein and antioxidants from porcine placenta. *Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Research Journal*, 13(2), 13-23.
- Raj, B. (2005). Plastic in food packaging. (n.p.).
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. and Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10), 1231–1237.
- Ré, M.I. (1998). Microencapsulation by spray drying. *Drying Technology*, 16(6), 1195-1236.
- Renard, D., Lavenant-Gourgeon, L., Ralet, M. and Sanchez, C. (2006). *Acacia Senegal* gum: continuum of molecular species differing by their protein to sugar ratio, molecular weight, and charges. *Biomacromolecules*, 7(9), 2637–2649.
- Robin, A.L. and Sankhla, D. (2013). Essential Guide to Food Additives. 4th edition. RCA publishing International. New York.
- Roudbari, A. and Rezakazemi, M. (2018). Hormones removal from municipal wastewater using ultrasound. *AMB Express*, 8, 91.
- Rutz, J.K., Borges, C.D., Zambiasi, R.C., Crizel-Cardozo, M.M., Kuck, L.S. and Norenã, C.P.Z. (2017). Microencapsulation of palm oil by complex coacervation for application in food systems. *Food Chemistry*, 220, 59–66.
- Sambrook, J., Fritsch, E.R. and Maniatis, T. (1989). Molecular cloning: A laboratory Manual. 2nd ed. Cold Spring Harbor Lab Press. New York.
- Sanchez, C., Schmitt, C., Kolodziejczyk, E., Lapp, A., Gaillard, C. and Renard, D. (2008). The Acacia gums arabinogalactan fraction is a thin oblate ellipsoid: A new model based on small-angle neutron scattering and AB initio calculation. *Biophysical Journal*, 94(2), 629–639.
- Santhalakshmy, S., Bosco, S.J.D., Francis, S. and Sabeena, M. (2015). Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray dried jamun fruit juice powder. *Powder Technology*, 274, 37-43.
- Sarabandi, K., Jafari, S.M., Mahoonak, A.S. and Mohammadi, A. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of eggplant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 59-68
- Sarnadi B.H. and Ismail, A. (2010). Antioxidative peptides from food proteins: A review. *Peptide*, 31, 1949-1956.
- Saéncz, C., Tapia, S., Chávez, J. and Robert, P. (2009). Microencapsulation by spray drying of

- bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 114(2), 616-622.
- Seydel, P., Blömer, J. and Bertling, J. (2006). Modeling particle formation at spray drying using population balances. *Drying Technology*, 24(2), 137-146.
- Shabde, V.S. and Hoo, K.A. (2008). Optimum controller design for a spray drying process. *Control Engineering Practice*, 16(5), 541-552.
- Sharifi, A., Niakousari, M., Maskooki, A. and Mortazavi, S.A. (2015). Effect of spray drying conditions on the physicochemical properties of barberry (*Berberis vulgaris*) extract powder. *International Food Research Journal*, 22(6). 2364-2370.
- Silva, V.M., Kurozawa, L.E., Park, K.J. and Hubinger, M.D. (2012). Water sorption and glass transition temperature of spray-dried mussel meat protein hydrolysate. *Drying Technology*, 30(2), 175-184.
- Silva, V.M., Kurozawa, L., Prark, K.J. and Hubinger, M. (2014). Influence of carrier agents on the physicochemical properties of mussel protein hydrolysate powder. *Drying Technology*, 30(6), 653-663.
- Subtil, S.F., Rocha-Selmi, G.A., Thomazini, M., Trindade, M.A., Netto, F.M. and Favaro-Trindade, C.S. (2014). Effect of spray drying on the sensory and physical properties of hydrolysed casein using gum Arabic as the carrier. *Journal of Food Science Technology*, 51(9), 2014-2021.
- Suhang, Y., Nayik, G.A. and Nanda, V., (2016). Effect of gum Arabic concentration and inlet Temperature during spray drying on physical and antioxidant properties of honey powder. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(2), 350-356.
- Sulandari, L. (2017). Effects of packaging types on moisture content, microbe total and peroxide value of instant Ganyong (*Canna edulis* Kerr) Yellow Rice. *Universitas Jamver E-Proceeding*, 379-383.
- Supakorn, C. and Thongpassano, S. (2011). Effect of dried porcine placenta on growth performance in post-weaning pigs. *Walailak Journal*, 8(2), 167-173.
- Svendsen, J. and Svendsen, L.S. (1997). Intensive (commercial) systems for breeding sows and piglets to weaning. *Live Production Science*, 49(2), 165-179.
- Tang, C.H. (2007). Functional properties and in vitro digestibility of buckwheat protein products: Influence of Processing. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 568-576.

- Tang, W.L., Zhang, M., Adhikari, B. and Mujumdar, A.S. (2013). Effects of preparation and drying methods on the antioxidant activity of enzymatically hydrolyzed porcine placenta hydrolysates. *Drying Technology*, 31(13-14), 1600-1610.
- Targuma, S., Njobeh, P.B. and Ndungu, P. (2021). Current applications of magnetic nanomaterials for extraction of mycotoxins, pesticides, and pharmaceuticals in food commodities. *Molecules*, 26(14), 4284.
- Teijeiro, M., Pérez, P.F., Antonia, G.L.D. and Golowczyca, M.A. (2018). Suitability of kefir powder production using spray drying. *Food Research International*, 112, 169–174.
- Thanapongtharm, W., Linard, C., Chinson, P., Kasemsuwan, S., Visser, M., Gaughan, A. E., Epprech, M., Robinson, T. P. and Gilbert, M. (2016). Spatial analysis and characteristics of pig farming in Thailand. *BMC veterinary research*, 12(1), 218.
- Timilsena, Y.P., Haque, Md.A. and Adhikari, B. (2020). Encapsulation in the food industry: A brief historical overview to recent developments. *Food and Nutrition Science*, 11(6), 481-508.
- Togashi, S., Takahashi, N., Iwama, M., Watanabe, S., Tamagawa, K. and Fukui, T. (2002). Antioxidative collagen-derived peptides in human-placenta extract. *Placenta*, 23(6), 497–502.
- Tolun, A., Altintas, Z. and Artik, N. (2016). Microencapsulation of grape polyphenols using maltodextrin and gum Arabic as two alternative coating materials: Development and characterization. *Journal of Biotechnology*, 239, 23-33.
- Tran, T.T.A. and Nguyễn, H.V.H. (2018). Effects of spray-drying temperatures and carriers on physical and antioxidant properties of lemongrass leaf extract powder. *Beverages*. 4(4), 84.
- Vissotto, F.Z., Montenegro, F.M., Santos, J.M. and Oliveira, S.J.R. (2006). Avaliação da influencia dos processos de lecitinação e de aglomeração nas propriedades físicas de achocolatado em pó. *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, 26(3), 66-671.
- Walther, B. and Sieber, R. (2011). Bioactive Proteins and Peptides in Foods. *International Journal for vitamin and Nutrition Research*, 81(23), 181-192.
- Walton, D.E. (2000). The morphology of spray-dried particles a qualitative view. *Drying Technology*, 18(9). 1943-1986.
- Wang, C.Y., and Qi, L. (1997). Modified atmosphere packaging alleviates chilling injury in cucumbers. *Postharvest Biology and Technology*, 10(3), 195-200.
- Williams, P.A., and Phillips, G.O. (2009). In Handbook of Hydrocolloids 2nd edition. Woodhead

Publishing. Washington, DC.

- Williams, P.A., Phillips, G.O. and Stephen, A.M. (1990). Spectroscopic and molecular comparisons of three fractions from *Acacia Senegal* gum. *Food Hydrocolloids*, 4(4), 5-311.
- Wooding, P. and Burton, G. (2008). Comparative placentation. Berlin Heidelberg: Springer. German.
- Wong, C.W. and Lim, W.T. (2016). Storage stability of spray-dried papaya (*Carica papaya* L.) powder packaged in aluminum laminated polyethylene (ALP) and polyethylene terephthalate (PET). *International Food Research Journal*, 23(5), 1887-1994.
- Huynh, T.V., Caffin, N., Dykes, G. and Bhandari, B. (2008). Optimization of the microencapsulation of lemon myrtle oil using response surface methodology. *Drying Technology*, 26(3), 357-368.
- Yian, L.Y. and Pui, L.P. (2020). Storage stability of kuini powder in two packaging aluminum laminated polyethylene and polyethylene terephthalate. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 24(5), 657-669.
- Yousefi S., Emam-Djomeh Z. and Mousavi S.M. (2011). Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica Granatum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 677-684.
- Zungur Bastioğlu, A., Koç, M. and Kaymak Ertekin, F. (2017). Moisture sorption isotherm of microencapsulated extra virgin olive oil by spray drying. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(3), 1295- 1305.



ภาคผนวก ก สมบัติทางกายภาพ

ก.1 ปริมาณความชื้น (%moisture content) ตามวิธีของ AOAC (2000)

1. อบแห้งด้วยอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ใส่ลงในโถดูดความชื้นพักจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วจึงชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำเช่นเดิมจนน้ำหนักคงที่แล้วเก็บไว้ที่โถดูดความชื้น
2. ชั่งตัวอย่างผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร 1 g ลงในถ้วยอะลูมิเนียมซึ่งทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่โถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมตัวอย่าง จากนั้นนำกลับไปเข้าตู้อบและทำซ้ำเช่นเดิมจนได้ผลต่างของน้ำหนักคงที่แล้วคำนวณปริมาณความชื้น ตามสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง}} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 1})$$

ก.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity, a_w) ตามวิธีของ AOAC (2000)

วิเคราะห์ค่ากิจกรรมของน้ำของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรด้วยเครื่อง water activity analyzer (รุ่น MS1, Novasina, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ก.3 ค่าสี ระบบ CIE LAB ด้วยเครื่อง chroma meter

วัดค่าสีของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกรที่อุณหภูมิห้อง โดยเครื่องวัดสี Minolta รุ่น CR-400 ซึ่งใช้ illuminant D65 โดยแสดงค่าสีในระบบ CIE ($L^* a^* b^*$)

โดยค่า L^* คือ ค่าแกนความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 (โดย 0 คือสีดำ และ 100 คือสีขาว)

a^* คือ ค่าแกนสีเขียว ($-a^*$) จนถึงสีแดง ($+a^*$)

b^* คือ ค่าแกนสีน้ำเงิน ($-b^*$) จนถึงสีเหลือง ($+b^*$)

ก.4 ผลผลิตร้อยละที่ได้ (%encapsulation yield) จากวิธี Ramakrishnan และคณะ (2018)

คำนวณร้อยละผลผลิตที่ได้จากน้ำหนักของผงสารสกัดรสสุกรที่ได้หลังจากทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมาหารด้วยน้ำหนักของแข็งทั้งหมดของสารสกัดที่ได้ก่อนนำเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย และนำค่าที่ได้คูณด้วย 100 ตามสมการที่ 2

$$\text{ตั้งสมการนี้} \quad \frac{M}{TS} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2})$$

โดย M คือ น้ำหนักผงที่ได้หลังจากทำแห้งแบบพ่นฝอย

TS คือ น้ำหนักของแข็งในสารสกัดรสสุกรและสารทอหุ้มก่อนนำเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

ก.5 ประสิทธิภาพการกักเก็บของสารต้านออกซิเดชัน (%encapsulation efficiency) ดัดแปลงจากวิธี Saénz และคณะ (2009)

การหาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพทั้งหมด (total bioactive compounds)

1. ชั่งน้ำหนักผงไมโครแคปซูลสกัดรสสุกร 0.1 g ละลายในสารละลายผสม (เอทานอล : กรดอะซิติก : น้ำ ที่อัตราส่วน 50:8:42) ปริมาตร 1 mL เขย่าด้วย vortex mixer เป็นเวลา 1 นาที
2. ปั่นเหยียงด้วยเครื่องปั่นเหยียง ความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำส่วนใสกรองด้วยแผ่นกรองขนาด 0.45 μm แล้ววิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันทั้งหมดด้วยวิธี ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) ดัดแปลงตามวิธีของ Benzie และ Strain (1996)

การหาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพบริเวณพื้นผิว (surface bioactive compounds)

1. ชั่งน้ำหนักผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร 0.1 g ละลายในสารละลายผสม (เอทานอล:เมทานอล อัตราส่วน 1:1) 1 ml เขย่าด้วย vortex mixer เป็นเวลา 1 นาที
2. กรองตัวอย่างด้วยแผ่นกรองขนาด 0.45 μm แล้ววิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันทั้งหมดด้วยวิธี ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) ดัดแปลงตามวิธีของ Benzie และ Strain (1996) จากนั้นนำค่าทั้งสองมาคำนวณผลตามสมการที่ 3

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพการกักเก็บ} = \frac{\text{สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพทั้งหมด} - \text{สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพบริเวณพื้นผิว}}{\text{สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพทั้งหมด}} \quad (\text{สมการที่ 3})$$

ก.6 ความสามารถในการละลาย (%solubility) ดัดแปลงวิธีจาก Wang และคณะ (2020)

1. ชั่งตัวอย่างผงไมโครแคปซูล 1 g (W_1) จากนั้นละลายในน้ำกลั่น 100 ml จากนั้น Vortex ตัวอย่างให้เข้ากัน 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหยียงที่ความเร็วรอบ 5000 rpm ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำส่วนใสเทลงถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว (W_0) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ 3-4 ชั่วโมง โดยต้องทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นก่อนชั่งน้ำหนักทุกครั้ง
2. จดบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก (W_2) เพื่อนำไปใช้คำนวณค่าความสามารถในการละลาย ตามสมการที่ 4

$$\text{ความสามารถในการละลาย (\%)} = \frac{W_2 - W_0}{W_1} \times 100 \quad (\text{สมการ 4})$$

ก.7 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ตัดแปลงวิธีจาก Silva และคณะ (2012)

1. นำตัวอย่างผง 3 mg ใส่ใน aluminum pan 20 μ L พักไว้ในโถดูดความชื้นที่มีเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
2. จากนั้นนำตัวอย่างเข้าเครื่อง DSC ตั้งค่าโปรแกรมของอุณหภูมิเริ่มต้นที่ -70 องศาเซลเซียส และเพิ่มอุณหภูมิถึง 100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และมีภาคเปล่าเป็นอ้างอิง และอัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมแห้ง (purge gas) ที่ 25 mL/min

ก.8 ลักษณะรูปร่างภายนอกของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างภายนอกของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยเครื่อง scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometer (JEOL, JSM-IT300 and Oxford, X-Max N 20)

1. โรยตัวอย่างลงบนสตัปทองเหลืองที่ติดด้วยแผ่นเทปกาวสองหน้า หลังจากนั้นนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนนำเข้าเครื่อง SEM
2. วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างภายนอกของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ที่ 30 kV กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า

ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

ข.1 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ดัดแปลงตามวิธีของ Teng และคณะ (2013) และ Brand-William และคณะ (1995)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) (Thermo Fisher Scientific, รุ่น GENESYS 20 Visible, U.S.A)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง (analytical balance) (Mettler Toledo, รุ่น New Classic MF, Switzerland)

สารเคมี

1. 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Sigma Aldrich, USA)
2. 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) (Sigma Aldrich, USA)
3. methanol (CH_3OH) (Fisher Scientific, UK)

วิธีเตรียมสารละลาย DPPH

1. เตรียมสารละลาย DPPH โดยชั่ง DPPH 0.004 g แล้วละลายใน methanol ประมาณ 50 mL จากนั้นเทลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL
2. ปรับปริมาตรด้วย methanol ให้ได้ปริมาตรสุดท้ายอยู่ที่ 100 mL จะได้สารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.1 mM (เก็บสารละลาย DPPH ที่อุณหภูมิ 4°C เก็บรักษาไม่เกิน 5 วัน) และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงเริ่มต้น (A_{initial}) ที่ความยาวคลื่น 517 nm โดยใช้ methanol ในการปรับค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank)

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox และการสร้างกราฟมาตรฐาน

1. ชั่ง Trolox 0.025 g ละลายลงด้วย methanol จากนั้นปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 10 ml ด้วย methanol ผสมให้เข้ากัน จะได้สารละลาย Trolox ที่มีความเข้มข้น 10,000 μM
2. เจือจางสารละลาย Trolox ความเข้มข้น 10,000 μM ด้วย methanol จนได้ความเข้มข้น 123 - 625 μM ดังแสดงในตารางที่ ข.1
3. ปิเปิดสารละลาย Trolox แต่ละความเข้มข้นในข้อ 2 ปริมาตร 2 ml ผสมกับสารละลาย DPPH ปริมาตร 2 ml ในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำมาวัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 nm โดยใช้ methanol ในการปรับค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank)
5. คำนวณผลต่างของค่าดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) โดยหักลบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH (A_{initial}) ด้วยค่าดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) ตามสมการที่ 5

$$A_{\text{difference}} = A_{\text{initial}} - A_{\text{final}} \quad (\text{สมการที่ 5})$$

6. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Trolox (แกน x) กับค่า $A_{\text{difference}}$ (แกน y) แสดงดังรูป ข.1

ตารางที่ ข.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (μM) | ปริมาตร FeSO ₄ (ml) | ปริมาตรน้ำกลั่น (ml) | ความเข้มข้นสุดท้าย(μM) |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 10000 | 5 | 5 | 5000 |
| 5000 | 5 | 5 | 2500 |
| 2500 | 5 | 5 | 1250 |
| 1250 | 5 | 5 | 625 |
| 625 | 4 | 2 | 417 |
| 417 | 4 | 2 | 278 |
| 278 | 4 | 2 | 185 |
| 185 | 4 | 2 | 123 |
| 123 | 4 | 2 | 82 |

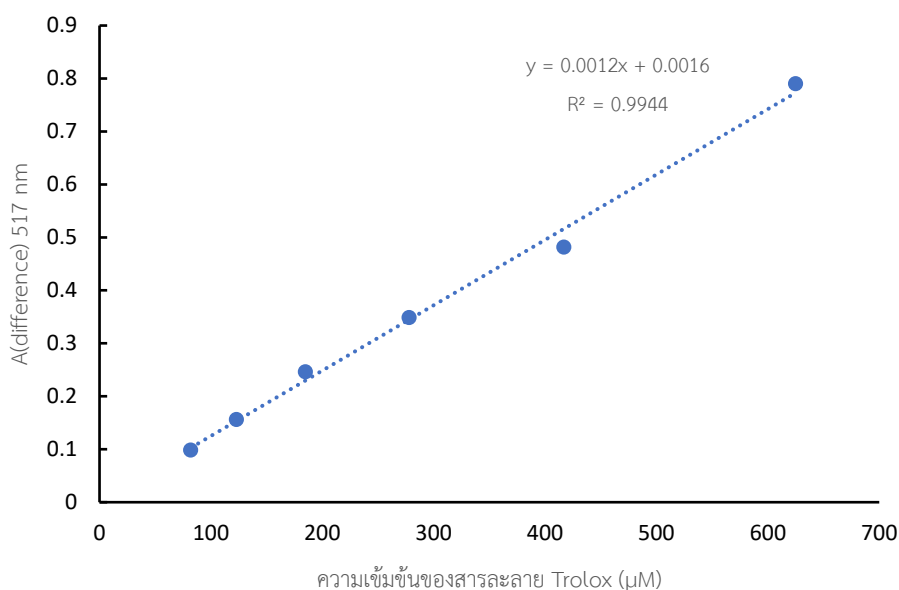
วิธีวิเคราะห์สารสกัดรกสุกร

1. ปิเปิดตัวอย่างสารสกัดรกสุกร 2 ml ผสมกับสารละลาย 0.1 mM DPPH 2 mL ลงในหลอดทดลอง ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex จากนั้นทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
2. นำตัวอย่างใส่หลอด centrifuge นำเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่สภาวะ 5000 rpm เป็นเวลา 10 นาที
3. นำตัวอย่างเข้าเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 nm โดยใช้ methanol ในการปรับค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank) และนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน โดยหักลบค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) กับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH (A_{initial}) จะได้เป็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) ตามสมการที่ 5
4. คำนวณหาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันโดยใช้ค่า $A_{\text{difference}}$ ที่คำนวณได้เทียบกับ $A_{\text{difference}}$ ในสมการของกราฟมาตรฐานของ Trolox และรายงานค่าเป็น mM Trolox equivalent/g db.

วิธีวิเคราะห์ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

1. ละลายสารสกัดรกสุกรไมโครแคปซูล 1 g ในน้ำกลั่น 10 mL ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixer เป็นเวลา 3 นาที
2. ปิเปิดสารละลายปริมาตร 2 ml ผสมกับสารละลาย DPPH 2 mL ในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
3. นำตัวอย่างใส่หลอด centrifuge นำเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่สภาวะ 5000 rpm 10 นาที

4. นำตัวอย่างเข้าเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 nm โดยใช้ methanol ในการปรับค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank) และนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน โดยหักลบค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) กับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH (A_{initial}) จะได้เป็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) ตามสมการที่ 5
5. คำนวณหาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันโดยใช้ค่า $A_{\text{difference}}$ ที่คำนวณได้เทียบกับ $A_{\text{difference}}$ ในสมการของกราฟมาตรฐานของ Trolox และรายงานค่าเป็น mM Trolox equivalent/g db.



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)

ข.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ด้วยวิธี ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) ดัดแปลงวิธีจาก Benzie และ Strain (1996)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) (Thermo Fisher Scientific, รุ่น GENESYS 20 Visible, U.S.A)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง (analytical balance) (Mettler Toledo, รุ่น New Classic MF, Switzerland)

สารเคมี

1. Sodium acetate trihydrate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (Glentham, UK)
2. 2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ) (Sigma Aldrich, USA)
3. Iron (III) chloride (FeCl_3) (POCH S.A., Poland)
4. Glacial acetic acid (A.R. grade, Qrec, New Zealand)
5. Hydrochloric acid 0.1 M (HCl) (Kemaus, Australia)
6. Iron(II) Sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Glentham, UK)

การเตรียมสารละลาย FRAP

1. เตรียมสารละลาย acetate buffer โดยผสม Sodium acetate trihydrate 0.3 g ละลายใน glacial acetic acid 1.6 mL แล้วจึงนำมาปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 mL จะได้ความเข้มข้น 300 mM
2. เตรียมสารละลาย Iron (III) chloride โดยชั่ง Iron (III) chloride 0.054 g ละลายในน้ำกลั่น เกล่งในขวดปรับปริมาตร 10 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้น 20 mM
3. เตรียมสารละลาย 2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ) โดยชั่ง 0.0312 g ละลายใน HCl 0.04 M (ละลาย hydrochloric acid ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 4 mL ในน้ำกลั่น 6 mL) เกล่งในขวดปรับปริมาตร 10 mL และปรับปริมาตรด้วย HCl 0.04 M
4. เตรียมสารละลาย FRAP โดยการผสม acetate buffer 100 mL Iron (III) chloride 10 mL และ TPTZ 10 mL ตามลำดับ แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 5-15 นาที ให้ได้สารละลายสีน้ำตาลส้มก่อนจะทำการวิเคราะห์ทุกครั้ง
5. วัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 593 nm โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวอ้างอิง และบันทึกค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP เป็น A_{initial}

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน FeSO_4 และสร้างกราฟมาตรฐาน

1. ชั่ง FeSO_4 0.01519 g ผสมกับน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 100 mL ผสมให้เข้ากัน จะได้สารละลาย FeSO_4 ที่มีความเข้มข้น 1000 μM
2. เจือจางสารละลาย FeSO_4 จากข้อ 1 ด้วยน้ำกลั่น จนได้ความเข้มข้น 100 – 500 μM ดังแสดงตามในตาราง ข.2

3. ปิเปตสารละลาย FeSO_4 แต่ละความเข้มข้น ในข้อ 2 ปริมาตร 250 μL ผสมกับสารละลาย FRAP solution ปริมาตร 4.75 ml ในหลอดทดลอง ทั้งในที่มีดเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. วัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 593 nm โดยใช้ น้ำกลั่นในการปรับค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank)
5. คำนวณผลต่างของค่าดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) โดยหักลบค่าดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) ด้วยค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP (A_{initial}) ตามสมการที่ 6

$$A_{\text{difference}} = A_{\text{final}} - A_{\text{initial}} \quad (\text{สมการที่ 6})$$

6. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน FeSO_4 (แกน x) กับค่า $A_{\text{difference}}$ (แกน y) แสดงดังรูป ข.2

ตารางที่ ข.2 วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน FeSO_4 ความเข้มข้นต่าง ๆ

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (μM) | ปริมาตร FeSO_4 (ml) | ปริมาตรน้ำกลั่น (ml) | ความเข้มข้นสุดท้าย (μM) |
|--|------------------------------|----------------------|---|
| 1000 | 5 | 5 | 500 |
| 500 | 4 | 6 | 400 |
| 400 | 3 | 7 | 300 |
| 300 | 2 | 8 | 200 |
| 200 | 1 | 9 | 100 |

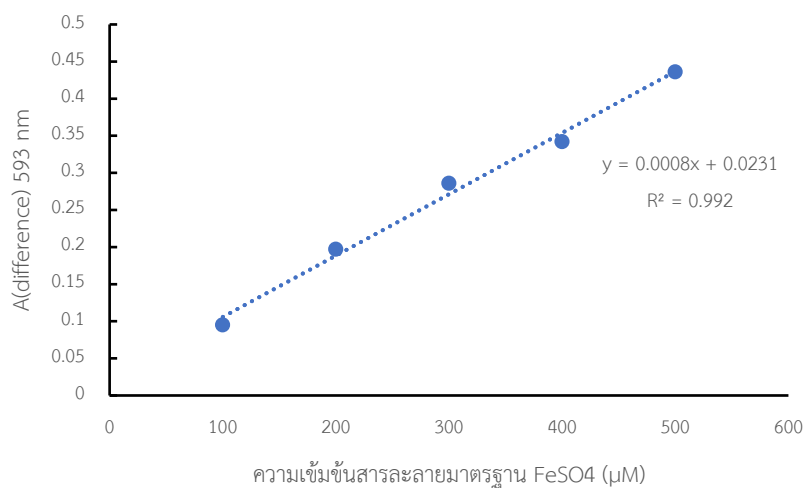
วิธีวิเคราะห์สารสกัดรกสุกร

1. ให้ความร้อนสารละลาย FRAP ที่ 37°C ในอ่างให้ความร้อน ทำให้สารละลายมีสีน้ำตาลอมแดง
2. ปิเปตตัวอย่างสารสกัดรกสุกร 250 μL ผสมกับสารละลาย FRAP 4750 μL บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มีด 30 นาที
3. วัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 593 nm โดยใช้ น้ำกลั่นในการปรับค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank)
4. คำนวณผลต่างของค่าดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) โดยหักลบค่าดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) ด้วยค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP (A_{initial}) ตามสมการที่ 6
5. คำนวณหาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันโดยใช้ค่า $A_{\text{difference}}$ ที่คำนวณได้เทียบกับ $A_{\text{difference}}$ ในสมการของกราฟมาตรฐานของ FeSO_4 และรายงานค่าเป็น mM FeSO_4 equivalent/g db.

วิธีวิเคราะห์ผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร

1. ละลายผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร 0.1 g ในน้ำกลั่น 10 mL ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixer เป็นเวลา 3 นาที

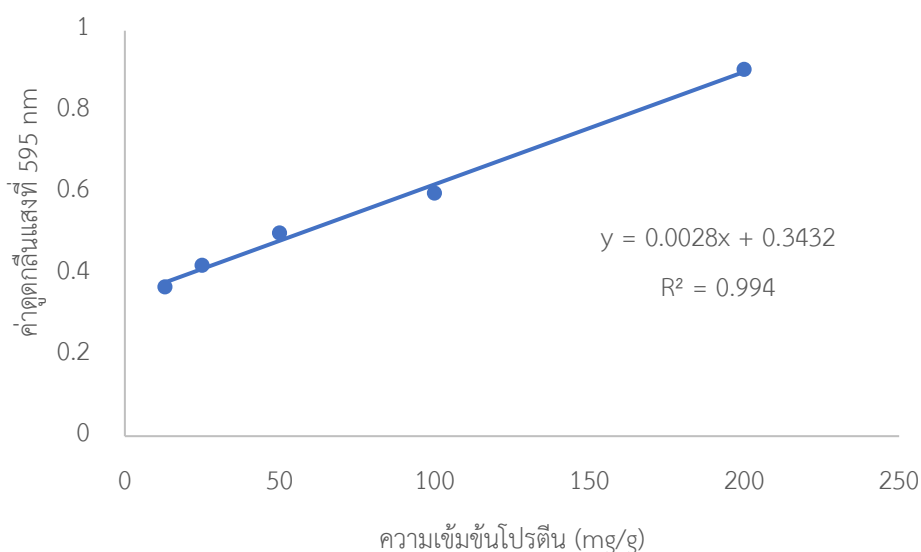
2. ปิเปตสารละลายผงไมโครแคปซูล 250 μL ผสมกับสารละลาย FRAP 4750 μL บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มีด 30 นาที
3. วัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 593 nm โดยใช้ น้ำกลั่นในการปรับค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank)
4. คำนวณผลต่างของค่าดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) โดยหักลบค่าดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) ด้วยค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP (A_{initial}) ตามสมการที่ 6
5. คำนวณหาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันโดยใช้ค่า $A_{\text{difference}}$ ที่คำนวณได้เทียบกับ $A_{\text{difference}}$ ในสมการของกราฟมาตรฐานของ Trolox และรายงานค่าเป็น mM FeSO₄ equivalent/g db.



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP)

ข.3 การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน (Protein quantitative assay) จากวิธี Bradford M (1976)

วิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี Bradford Protein Assay โดยใช้ชุดตรวจวัด Bio-Rad Bradford protein assay kit นำตัวอย่างปริมาตร 20 μl ใส่ลงในหลุมไมโครเพลท เติมสารละลาย 1X Bradford dye reagent ปริมาตร 180 μl ปั่นสารละลายลงในหลุมไมโครเพลทอย่างเบามือเพื่อระวังการเกิด ฟองอากาศ ตั้งไมโครเพลททิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร บันทึกผลการทดลองที่ได้ คำนวณค่าปริมาณโปรตีนใน ตัวอย่าง โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานสารละลายโปรตีน (BSA protein standards) ดังแสดงในรูปข.3



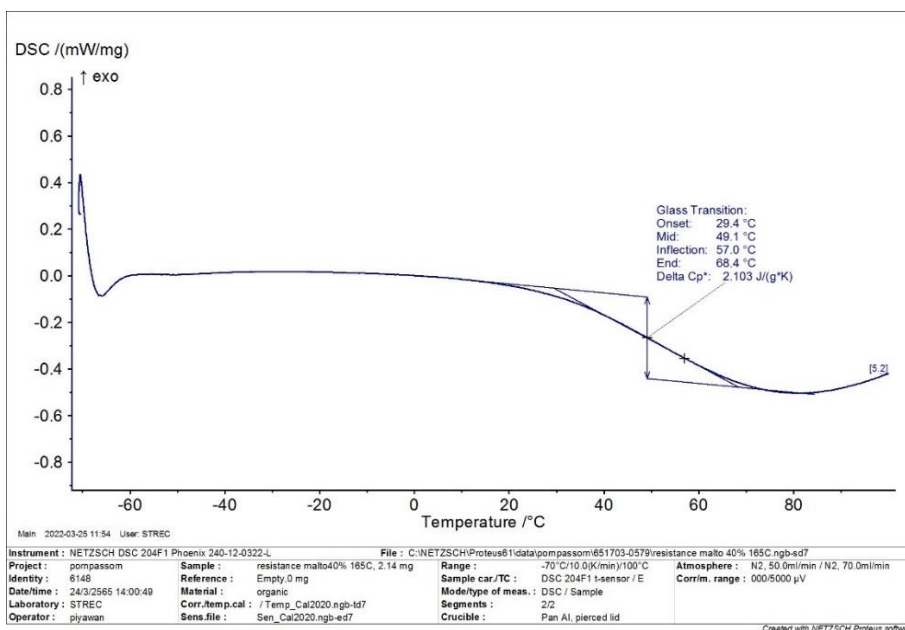
รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี Bradford protein assay

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

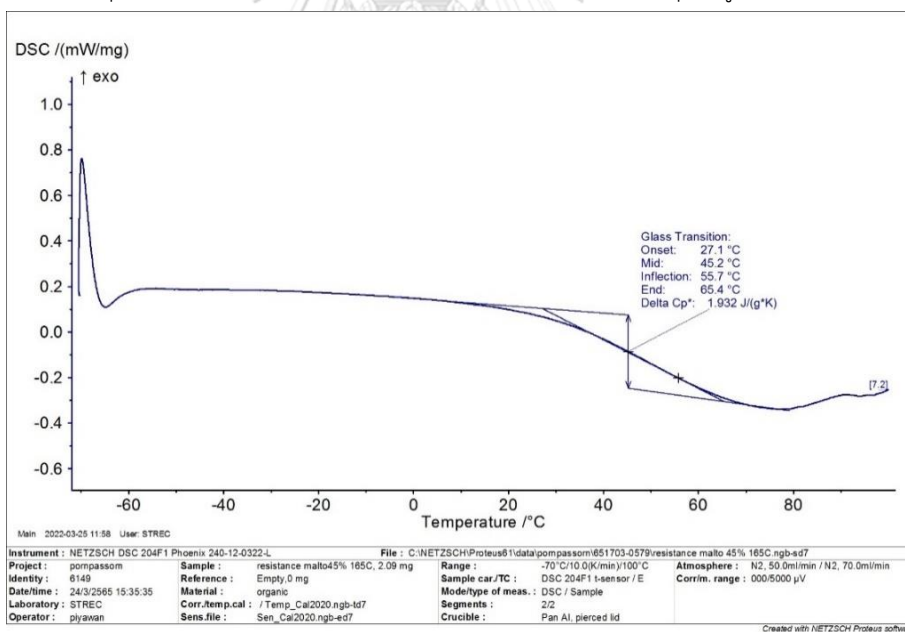
ข.4 การวิเคราะห์โปรตีนด้วยเทคนิค SDS-polyacrylamide gel electrophoresis จากวิธี Sambrook และคณะ (1989)

การวิเคราะห์โปรตีนด้วยเทคนิค SDS-polyacrylamide gel electrophoresis วิเคราะห์ขนาดโปรตีนในตัวอย่างด้วยเทคนิค SDS-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) โดยใช้ 15% resolving gel นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ผสมกับ 6x loading dye ในอัตราส่วน 1:5 (ความเข้มข้นสุดท้ายของตัวอย่างโปรตีน ประมาณ 30 μg ต่อหลุม) และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที โหลดตัวอย่างโปรตีนลงเจลที่ให้กระแสไฟฟ้าที่ ความต่างศักย์ 100 โวลต์ เป็นเวลา 130 นาที สำหรับการเปรียบเทียบขนาดของโปรตีนจะใช้ Spectra multicolor broad range protein ladder เป็นสารละลายโปรตีนมาตรฐาน หลังจากนั้นย้อมเจลด้วย สารละลาย Coomassie Protein Staining (InstantBlue) เป็นเวลาข้ามคืน และสังเกตแถบโปรตีนที่เกิดขึ้น

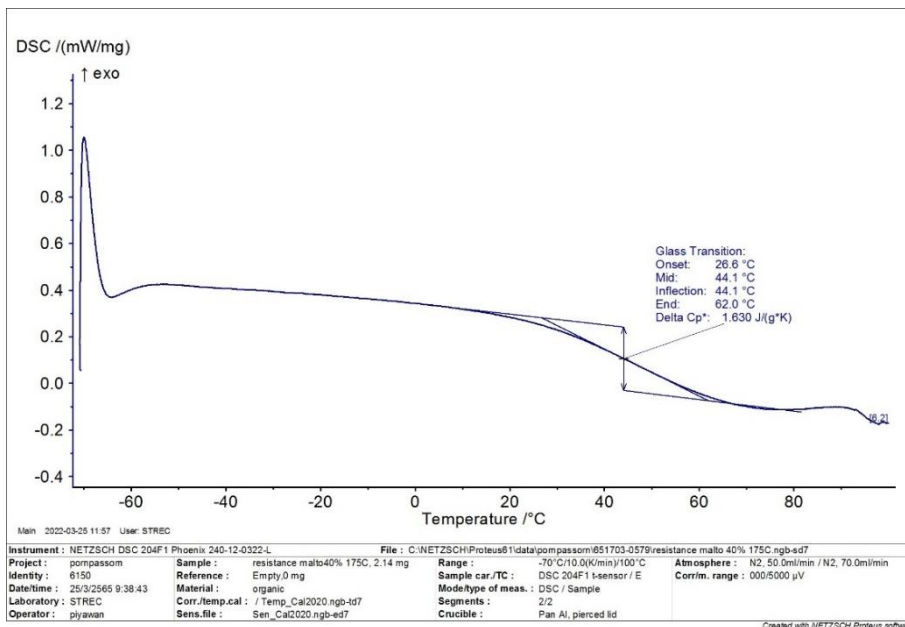




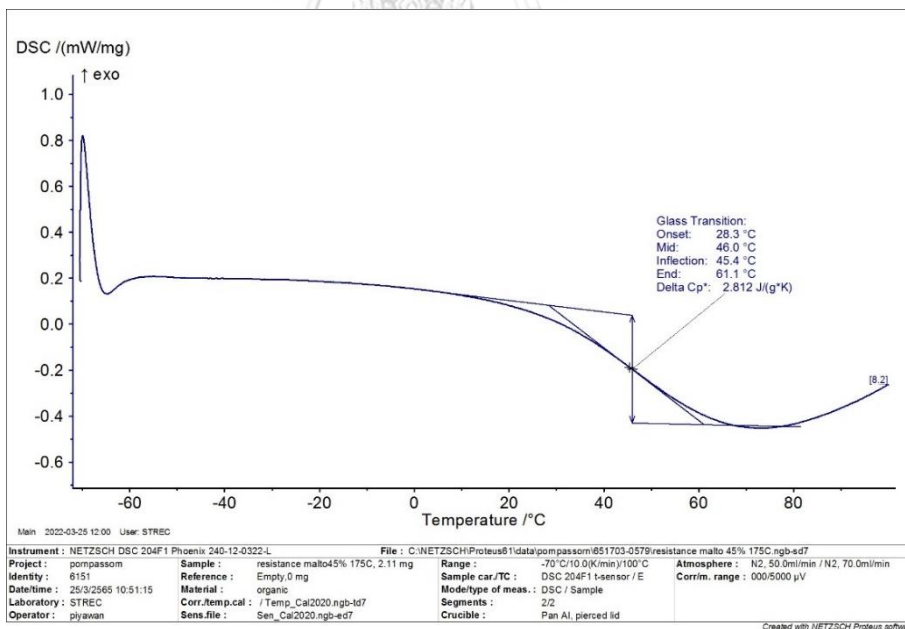
รูปที่ ค.1 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้นมโกลเด้นเด็กซ์ทรินด้านทานการย่อย 40% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส



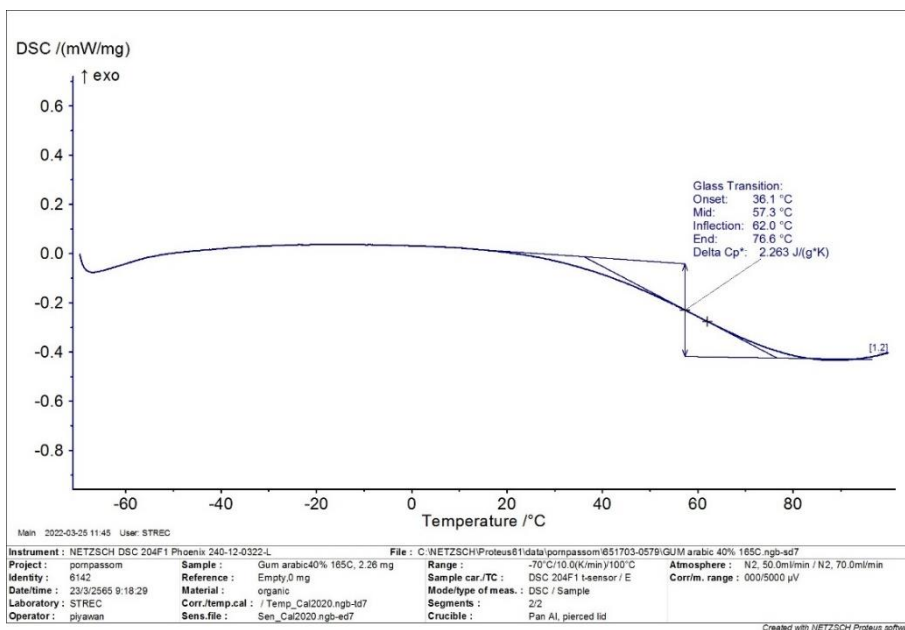
รูปที่ ค.2 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้นมโกลเด้นเด็กซ์ทรินด้านทานการย่อย 45% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส



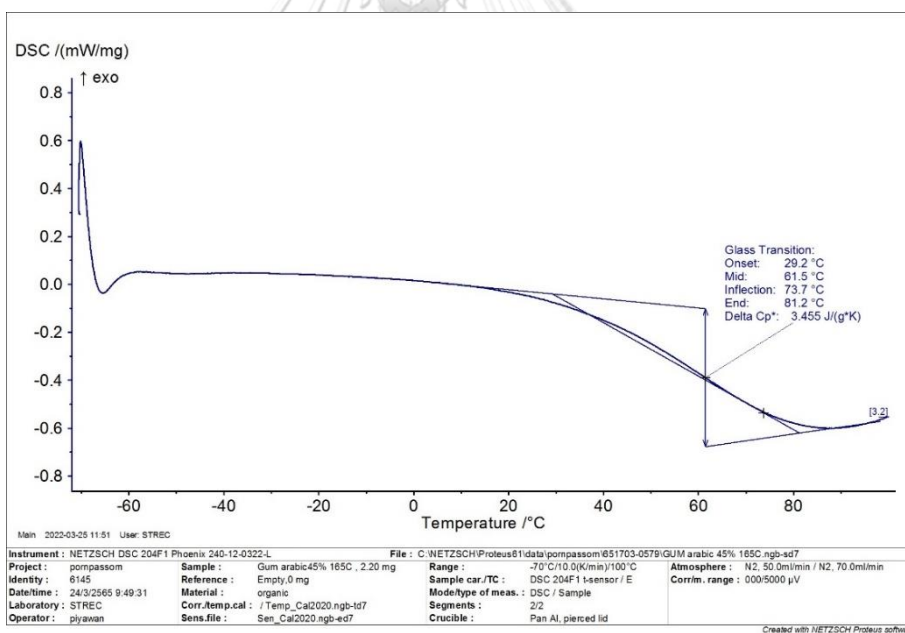
รูปที่ ค.3 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร โดยใช้มอลโตเด็กซ์ทรินด้านทานการย่อย 40% w/v ที่อุณหภูมิเข้า 175 องศาเซลเซียส



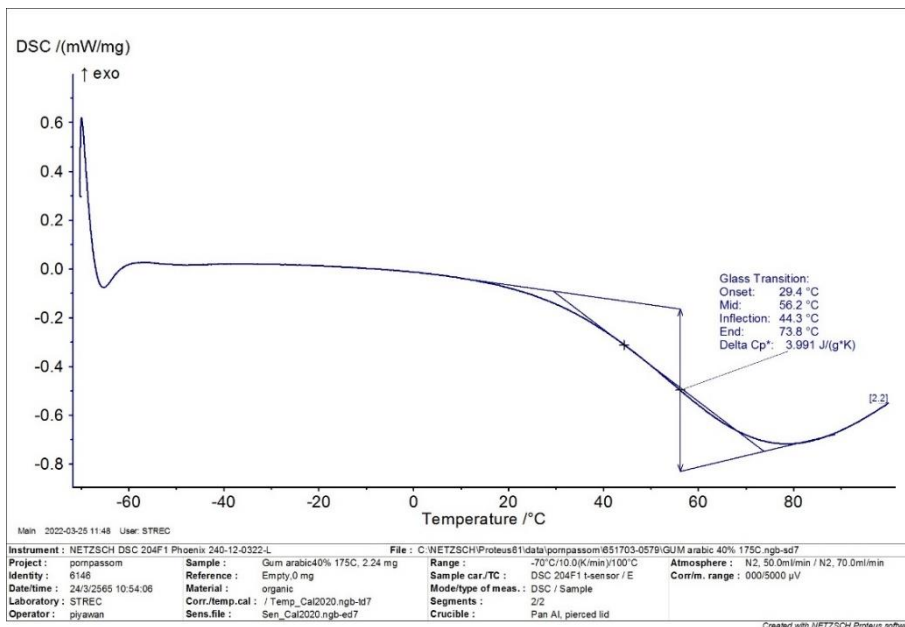
รูปที่ ค.4 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร โดยใช้มอลโตเด็กซ์ทรินด้านทานการย่อย 45% w/v ที่อุณหภูมิเข้า 175 องศาเซลเซียส



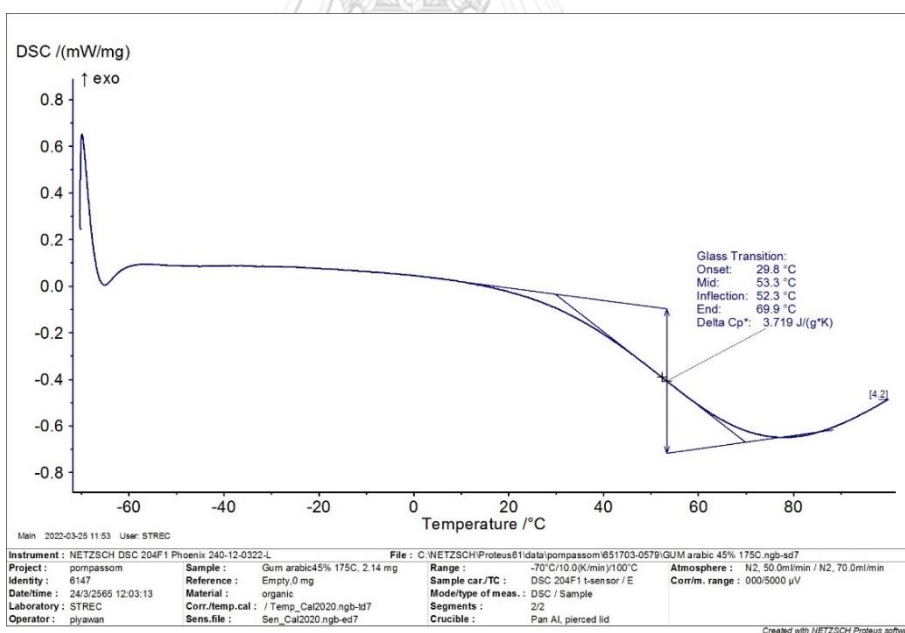
รูปที่ ค.5 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 40% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.6 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรกสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 45% w/v ที่อุณหภูมิขาเข้า 165 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.7 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 40% w/v ที่อุณหภูมิเข้า 175 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.8 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของผงไมโครแคปซูลสารสกัดรสสุกร โดยใช้กัมอาราบิก 45% w/v ที่อุณหภูมิเข้า 175 องศาเซลเซียส

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | นางสาว พรภัสสร จุฬาลักษณ์านุกุล |
| วัน เดือน ปี เกิด | 17 สิงหาคม 2541 |
| สถานที่เกิด | กรุงเทพ |
| วุฒิการศึกษา | สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จากสาขาวิชา วิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม ผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2562 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทาง อาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2563 |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 109/68 The next condominium ซอย 52 ถนนสุขุมวิท แขวงพระโขนง เขตพระโขนง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10260 |
| ผลงานตีพิมพ์ | Chulalaksananukul, P., Jafari, S., Pholmanee, N., Harnvoravongchai, P., Janvilisri, T. and Assatarakul, K. (2022). Encapsulation by spray drying of porcine placenta extract (fat - removed vs non-fat removed): Effects on characteristics and antioxidant activities. In Proceedings of the 23rd Food Innovation Asia Conference; 16-17 June 2022; Bangkok, Thailand. p. 64-70 |