

การรักษาเสถียรภาพของผงสารสกัดบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง *Hylocereus polyrhizus* โดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์และการประยุกต์ใช้ในเครื่องดื่มจำลอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STABILIZATION OF BETACYANINS EXTRACT POWDER FROM RED DRAGON FRUIT PEELS  
*Hylocereus polyrhizus* BY USING HYDROCOLLOIDS AND APPLICATION IN BEVERAGE  
MODEL



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	การรักษาเสถียรภาพของผงสารสกัดปีตาไซยานินจาก เปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง <i>Hylocereus polyrhizus</i> โดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์และการประยุกต์ใช้ในเครื่องดื่ม จำลอง
โดย	น.ส.วิภาณี เทพปรียากุลกาล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตรีษ กวีเทพุรย์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวณิช)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภัทรา ลิลิตชาญ)	

วิทยานิพนธ์ : การรักษาเสถียรภาพของผงสารสกัดบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง *Hylocereus polyrhizus* โดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์และการประยุกต์ใช้ในเครื่องดื่มจำลอง. ( STABILIZATION OF BETACYANINS EXTRACT POWDER FROM RED DRAGON FRUIT PEELS *Hylocereus polyrhizus* BY USING HYDROCOLLOIDS AND APPLICATION IN BEVERAGE MODEL) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อปริมาณสารบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (*Hylocereus polyrhizus*) และศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินด้วยเทคนิค Freeze drying รวมถึงการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินลงในเครื่องดื่มจำลองระหว่างการเก็บรักษา โดยเปรียบเทียบวิธีการสกัดสารบีตาไซยานิน 4 วิธี ได้แก่ วิธีดั้งเดิมโดยแช่ในตัวทำละลาย (CE) วิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิคแบบจุ่มโพรและแบบอ่างแช่ (UL-P, UL-B) และวิธีแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีอัลตราโซนิคแบบจุ่มโพร (CE-P) พบว่าวิธีการสกัด CE-P ได้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากที่สุด ( $p < 0.05$ ) ทั้งสารบีตาไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก และสารฟลาโวนอยด์ ( $151.80 \pm 1.09$ ,  $34.27 \pm 0.80$  และ  $4.42 \pm 0.18$  mg/100ml ตามลำดับ) ชนิดสารบีตาไซยานินในสารสกัดประกอบไปด้วย Phyllocactin มากที่สุด รองลงมาได้แก่ Betanin และ Butyrlbetanin ตามลำดับ จากนั้นนำสารสกัดด้วยวิธี CE-P ที่ได้ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยศึกษาผลการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ 5 ชนิด ได้แก่ มอลโทเดกซ์ตริน (MD 20% w/v) กัวร์กัม (GG 0.5% w/v) แชนแทนกัม (XG 0.5% w/v) ส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ตรินกับกัวร์กัม (MD:GG 10:1 w/v) และส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ตรินกับแชนแทนกัม (MD:XG 10:0.1 w/v) โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ การใช้ไฮโดรคอลลอยด์สามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลผลิตที่ได้และช่วยลดค่ากิจกรรมของน้ำได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) จึงทำให้ผงสารสกัดบีตาไซยานินมีความเสถียรมากกว่า เนื่องจากค่ากิจกรรมของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสลายตัวของสารบีตาไซยานิน จากการวิเคราะห์ค่าการสลายตัว (k) พบว่าการใช้ GG และ MD:GG สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินได้ดีในระหว่างการเก็บรักษา โดยมีค่าเท่ากับ  $0.020 \pm 0.00$  และ  $0.041 \pm 0.00$  ตามลำดับ ซึ่งค่า k ของ GG และ MD:GG มีค่าน้อยกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม ( $0.051 \pm 0.01$ ) เมื่อวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) พบว่าตัวควบคุมมีค่า  $\Delta E^*$  เท่ากับ  $26.14 \pm 2.18$  ซึ่งมีค่ามากที่สุด ( $p < 0.05$ ) ทั้งนี้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นจึงเลือกผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ GG และ MD:GG มาประยุกต์ใช้ในเครื่องดื่มจำลองปรับกรด (pH 3.4) โดยเปรียบเทียบกับเครื่องดื่มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) เก็บรักษาเครื่องดื่มไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ เครื่องดื่มจำลองทุกตัวอย่างมีปริมาณสารบีตาไซยานินลดลงและสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา โดยเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ มากที่สุด ในขณะที่เครื่องดื่มจำลองที่ใช้ GG มีแนวโน้มการลดลงของสารบีตาไซยานินน้อยที่สุด ( $k=0.050 \pm 0.01$ ) และมีค่าไม่แตกต่างจากเครื่องดื่มจำลองที่ใช้ MD:GG ( $k=0.061 \pm 0.01$ ) แต่มีค่าน้อยกว่าและแตกต่างจากเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ( $0.078 \pm 0.00$ ) เมื่อวิเคราะห์ค่า  $\Delta E^*$  พบว่าในเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุมมีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $10.47 \pm 0.89$  รองลงมาได้แก่เครื่องดื่มจำลอง GG และ MD:GG ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงในเครื่องดื่มจำลองสามารถช่วยรักษาความเสถียรของปริมาณสารบีตาไซยานินและค่าสีของเครื่องดื่มจำลองได้ดีกว่าการใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6370151623 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORD: RED DRAGON FRUIT (HYLOCEREUS POLYRHIZUS) PEEL, BETACYANINS, ULTRASOUND-ASSISTED EXTRACTION, HYDROCOLLOIDS, BEVERAGE MODEL

Witavane Tappreyakunkarn : STABILIZATION OF BETACYANINS EXTRACT POWDER FROM RED DRAGON FRUIT PEELS *Hylocereus polyrhizus* BY USING HYDROCOLLOIDS AND APPLICATION IN BEVERAGE MODEL. Advisor: Asst. Prof. Dr. SIRIMA PUANGPRAPHANT

The objectives of this research were to compare the betacyanins extraction methods from the red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peel and to study the type and concentration of hydrocolloids for drying betacyanins extract by using the freeze-drying technique, including the application of betacyanin extract powder into beverage model during storage. Four different extraction methods were compared which were the conventional extraction (CE) ultrasound-assisted extraction with bath (UL-B) vs. probe (UL-P) types, and a combination of conventional extraction and ultrasonic-assisted with probe type (CE-P) techniques. The most effective extraction technique was the combination method (CE-P) which provided the extract with the highest betacyanins, phenolic compounds, and flavonoids ( $p \leq 0.05$ ) ( $151.80 \pm 1.09$ ,  $34.27 \pm 0.80$ , and  $4.42 \pm 0.18$  mg/100ml, respectively). Phyllocactin was the highest betacyanin in the extract, followed by betanin and butyrylbetanin. The CE-P extraction method was chosen for freeze-drying betacyanins extract powder. Five different hydrocolloids were maltodextrin (MD 20% w/v), guar gum (GG 0.5% w/v), xanthan gum (XG 0.5% w/v), a mixture of maltodextrin and guar gum (MD:GG 10:1 w/v), and a mixture of maltodextrin and xanthan gum (MD: XG 10: 0.1 w/v) were used for freeze-drying and stored at 25 °C for 8 weeks. The result demonstrated that betacyanin extract powder with hydrocolloids can significantly increase the yield and reduce the water activity value ( $p \leq 0.05$ ) when compared with betacyanin extract powder without hydrocolloids (control). The hydrocolloid improves betacyanin's stability because water activity is an important factor in the degradation of betacyanin. The use of GG and MD: GG was able to maintain the stability of betacyanin during storage, according to an analysis of the degradation rate constant (k). The results were  $0.020 \pm 0.00$  and  $0.041 \pm 0.00$  respectively, which were significantly lower ( $p \leq 0.05$ ) than the betacyanin extract powder without hydrocolloids ( $0.051 \pm 0.01$ ). Furthermore, the color change ( $\Delta E^*$ ) of the betacyanin extract powder without hydrocolloids (control) had the highest value of  $26.14 \pm 2.18$ . The antioxidant activity of DPPH was raised during storage. As a result, betacyanin extract powder containing GG and MD:GG was selected for application in beverage model (pH 3.4) and stored at 4 °C for 8 weeks. The betacyanin content of all acidic beverage models decreased, whereas the phenolic compounds increased during storage. the control beverages model showed the most change in the substances, while the GG beverage model showed the least decrease in betacyanins content ( $k=0.050 \pm 0.01$ ) and was not significantly different from MD:GG beverage model ( $k=0.061 \pm 0.01$ ) but was significantly different and less than the control beverage model ( $p \leq 0.05$ ) ( $0.078 \pm 0.00$ ). The  $\Delta E^*$  value was determined to be  $10.47 \pm 0.89$  in the control beverage model, followed by GG and MD:GG, respectively. Therefore, utilizing betacyanins extract powder with hydrocolloid in the acidic beverage model can maintain betacyanin content and color more stable than using betacyanins extract powder without adding hydrocolloid.

Field of Study: Food Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไข และปรับปรุงรายละเอียดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ตลอดจนความเอาใจใส่ดูแล อบรมสั่งสอน ให้ข้อคิดในการทำงานและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตรีษ กวัคเพชญ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช และรองศาสตราจารย์ ดร.สุภัทรา ลิลิตชาญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่กรุณาเสียสละเวลามาตรวจสอบ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้เหลือให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวและขอขอบคุณพี่และเพื่อนๆ ปริญญาโท และปริญญาเอก ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจที่มีให้ตลอดการวิจัย รวมถึงการแลกเปลี่ยนความรู้ และประสบการณ์ที่ดีต่อกัน

วิถวานี เทพปรียากุลกาล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ .....	4
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	5
2.1 แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (Red Dragon fruit).....	5
2.2 คุณค่าทางสารอาหารของแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง.....	5
2.3 สีส้มอาหารจากธรรมชาติ (Natural colorant).....	7
2.3.1 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้สีผสมอาหาร.....	8
2.4 สารบีตาไซยานิน (Betacyanins) ในเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง.....	9
2.4.1 โครงสร้างและชนิดของสารบีตาไซยานิน.....	10
2.4.2 สมบัติของสารบีตาไซยานิน.....	11
2.4.3 เสถียรภาพของสารบีตาไซยานิน.....	11
2.4.3.1 ปฏิกิริยาการสลายตัวของสารบีตาไซยานิน.....	12
2.4.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายของสารบีตาไซยานิน .....	13

2.5 การสกัดสารบีตาไซยานิน .....	17
2.5.1 วิธีการสกัดแบบดั้งเดิมหรือแบบแช่ในตัวทำละลาย (Conventional Extraction).....	18
2.5.2 วิธีการสกัดแบบใช้คลื่นเสียงความถี่สูงหรืออัลตราโซนิก (Ultrasound-assisted Extraction) .....	18
2.6 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound).....	21
2.7 กลไกการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก.....	23
2.7.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction).....	23
2.7.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) .....	23
2.8 ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids).....	24
2.8.1 มอลโทเดกซ์ตริน (Maltodextrin).....	25
2.8.2 กัวร์กัม (Guar gum).....	26
2.8.3 แซนแทนกัม (Xanthan gum) .....	27
2.9 การทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานิน.....	28
2.9.1 การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying).....	28
2.9.2 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying).....	28
2.10 การประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมลงในอาหารและเครื่องดื่ม .....	30
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	31
3.1 วัสดุอุปกรณ์.....	31
3.2 สารเคมี.....	31
3.3 เครื่องมือ.....	32
3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง.....	33
3.4.2 ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารบีตาไซยานิน .....	34



3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติของสารสกัดบีตาไซยานินเข้มข้น .....	36
3.4.4 ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) สารสกัดบีตาไซยานินในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	36
3.4.5 ศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการทำแห้งลงในเครื่องดื่มจำลอง โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	39
3.4.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ .....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	42
4.1 ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารบีตาไซยานิน.....	42
4.1.1 ค่าสี ( $L^*$ $a^*$ $b^*$ Hue° และ Chroma*).....	42
4.1.2 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content).....	43
4.1.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total phenolic compounds, Total flavonoids content).....	45
4.1.4 การระบุชนิดสารองค์ประกอบในสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีการสกัดแบบผสม (CE-P).....	45
4.1.5 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P).....	48
4.2 ศึกษาผลการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงในระหว่างเก็บรักษา.....	49
4.2.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (Yield %) .....	50
4.2.2 การระบุชนิดสารองค์ประกอบในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) หลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ด้วยวิธีวิเคราะห์ HPLC.....	51
4.2.3 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins Content) .....	55
4.2.4 ค่าคงที่อัตราการสลายตัวทางจลนพลศาสตร์ของสารบีตาไซยานิน (Degradation rate constant, k).....	55
4.2.5 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP).....	57
4.2.6 ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity).....	58

4.2.7 ลักษณะสีปรากฏ (Color appearance).....	60
4.2.8 ค่าสี (L* a* และ b*).....	61
4.2.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ).....	63
4.3 ศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก .....	65
4.3.1 สมบัติของตัวอย่างผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก .....	65
4.3.1.1 สมบัติทางเคมี .....	65
4.3.1.1.1 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) .....	65
4.3.1.1.2 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacities).....	66
4.3.1.1.3 ประสิทธิภาพการกักเก็บ (Encapsulation Efficiency %)......	66
4.3.1.2 สมบัติทางกายภาพ.....	67
4.3.1.2.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (% yield).....	67
4.3.1.2.2 ค่าการละลาย (Water solubility Index, WSI).....	68
4.3.1.2.3 ค่าความชื้น (Moisture content) และค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity).....	68
4.3.1.2.4 ค่าการดูดความชื้น (Hygroscopicity) .....	69
4.3.1.2.5 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density).....	70
4.3.1.2.6 ค่าสี (L*, a* และ b*).....	71
4.4 การศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในเครื่องต้ม จำลอง (pH 3.4) ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ....	71
4.4.1 สมบัติทางเคมี.....	73
4.4.1.1 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content) .....	73
4.4.1.2 ค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสารบีตาไซยานิน (Degradation rate constant, k) .....	74
4.4.1.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic compound).....	75
4.4.1.4 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacities).....	76

4.4.2 สมบัติทางกายภาพ .....	78
4.4.2.1 ค่าความขุ่น (Turbidity).....	78
4.4.2.2 ค่าความหนืด (Viscosity).....	79
4.4.2.3 ค่าสี (L*, a* และ b*).....	80
4.4.2.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) และค่าสีปรากฏ (Color Appearance).....	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	85
5.1 ข้อเสนอแนะ .....	87
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ทางกายภาพ .....	101
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์ทางเคมี .....	104
ภาคผนวก ค ผลการทดลองเพิ่มเติม .....	115
ประวัติผู้เขียน .....	120



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง .....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของปีตาไซยานินและปีตาแซนทิน.....	9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างและชนิดของสารปีตาไซยานิน .....	10
รูปที่ 2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของเบตาเลน .....	12
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน .....	13
รูปที่ 2.6 กระบวนการเกิด cavitation ในการสกัดวิธีอัลตราโซนิก.....	18
รูปที่ 2.7 การสกัดวิธีอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ .....	19
รูปที่ 2.8 การสกัดวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ.....	20
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction) .....	23
รูปที่ 2.10 กลไกการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน.....	24
รูปที่ 2.11 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสารปีตาไซยานินและมอลโทเดกซ์ทริน.....	26
รูปที่ 2.12 โครงสร้างกัวร์กัม.....	27
รูปที่ 2.13 โครงสร้างแซนแทนกัม .....	28
รูปที่ 3.1 การเตรียมผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง .....	33
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสกัดสารปีตาไซยานินจากตัวอย่างผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง .....	35
รูปที่ 4.1 สารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแตกต่างกัน .....	43
รูปที่ 4.2 โครมาโทแกรมของสารในสารสกัดที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P) .....	46
รูปที่ 4.3 โครมาโทแกรมสารองค์ประกอบของสารปีตาไซยานินในผงสารสกัดที่ไม่ใช่ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) หลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ .....	51
รูปที่ 4.4 กระบวนการสังเคราะห์สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids biosynthesis pathway),... 54	
รูปที่ 4.5 ปริมาณสารปีตาไซยานินในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	55

รูปที่ 4.6	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระกลไก DPPH หรือ Free radical scavenging ในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	57
รูปที่ 4.7	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระกลไก FRAP หรือ Ferric Reducing Antioxidant Power ในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	57
รูปที่ 4.8	ค่ากิจกรรมของน้ำของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	58
รูปที่ 4.9	ลักษณะสีปรากฏของผงสารสกัดบีตาไซยานินก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา.....	60
รูปที่ 4.10	ค่าสี L* ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	62
รูปที่ 4.11	ค่าสี a* ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	62
รูปที่ 4.12	ค่าสี b* ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	63
รูปที่ 4.13	เครื่องตีม้จำลองก่อนและหลังการฆ่าเชื้อด้วยวิธีพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา.....	72
รูปที่ 4.14	ปริมาณสารบีตาไซยานินในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	74
รูปที่ 4.15	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องตีม้จำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	75
รูปที่ 4.16	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยกลไก DPPH ในเครื่องตีม้จำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	77
รูปที่ 4.17	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยกลไก FRAP ในเครื่องตีม้จำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	77
รูปที่ 4.18	ค่าความสว่าง (L*) ของเครื่องตีม้จำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	80
รูปที่ 4.19	ค่าสีแดง (a*) ของเครื่องตีม้จำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	81

รูปที่ 4.20 ค่าสีแดง ( $b^*$ ) ของเครื่องดื่มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์  
แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์..... 82

รูปที่ 4.21 ค่าสีปรากฏของเครื่องดื่มจำลองที่เติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่แตกต่างกัน โดย  
เปรียบเทียบในสัปดาห์ที่ 0 และสัปดาห์ที่ 8 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C ..... 84



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารอาหารที่พบในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงต่อส่วนที่บริโภคได้ 100 กรัม .....	6
ตารางที่ 2.2 ชนิดน้ำตาลที่คาร์บอนตำแหน่ง 5 หรือ 6 ในโมเลกุลของสารปีตาไซยานินแต่ละชนิด..	11
ตารางที่ 2.3 ชนิดของสารประกอบฟีนอลิกที่พบในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง .....	22
ตารางที่ 2.4 น้ำหนักโมเลกุลของมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (DE) แตกต่างกัน .....	25
ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดสำหรับทำแห้งสารสกัดปีตาไซยานิน .....	37
ตารางที่ 4.1 ค่าสีของสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน .....	42
ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี แตกต่างกัน.....	43
ตารางที่ 4.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแบบผสม .....	47
ตารางที่ 4.4 ค่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation value, r) ของ สารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P).....	48
ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (%) ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ แตกต่างกันหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง .....	50
ตารางที่ 4.6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ หลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ผลการวิเคราะห์โครมาโทแกรมในภาคผนวก ค.3).....	52
ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราการสลายตัว (k value) ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ แตกต่างกันการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์.....	55
ตารางที่ 4.8 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ .....	59
ตารางที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่ แตกต่างกันในหลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ .....	63
ตารางที่ 4.10 สมบัติทางเคมีของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก.....	65

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางกายภาพของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก..... 67

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่อัตราการสลายตัว (k value) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์..... 74

ตารางที่ 4.13 ค่าความชื้นของเครื่องตีมีผลการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ..... 78

ตารางที่ 4.14 ค่าความหนืดของเครื่องตีมีผลการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ..... 79

ตารางที่ 4.15 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta E^*$ ) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่ต่างกันหลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ..... 83





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (*Hylocereus polyrhizus* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีปริมาณการปลูกและบริโภคจำนวนมากในแถบประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น มาเลเซีย เวียดนามและไทย เป็นต้น (Hor et al., 2012) เปลือกแก้วมังกรเป็นของเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ คิดเป็น 33% ของผลไม้ทั้งหมด (Fathordoobady et al., 2021) และเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรประมาณ 180 ตันต่อปี (ชุติมา ถนอมสิทธิ์, 2018) นอกจากนี้แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงยังเป็นแหล่งของรงควัตถุจำพวกกลุ่มเบตาเลน (Betalains) ได้แก่ สารบีตาไซยานิน (Betacyanins) มีฤทธิ์ในการต่อต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งได้ (Polturak, & Aharoni, 2018) นอกจากนี้ประโยชน์ในด้านสุขภาพแล้ว เปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงยังสามารถนำมาผลิตเป็นสารให้สีในอาหาร เนื่องจากเป็นสารให้สีแดงม่วงที่ดี ในปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจในการบริโภคสีจากธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากสีสังเคราะห์มีผลข้างเคียงต่อสุขภาพ จึงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ทั้งนี้สารให้สีแดงจากธรรมชาติส่วนใหญ่มักได้จากสกัดสารให้สีจากบีทรูท แต่อย่างไรก็ตามบีทรูทมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์และยังมีปริมาณของไนเตรทที่สูงซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพผู้บริโภคได้ (Fathordoobady et al., 2021) ดังนั้นเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงจึงเป็นทางเลือกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารให้สีในอาหาร งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการสกัดสารบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงแทนการนำไปทิ้งซึ่งเป็นการลดขยะและยังนำของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด แต่สารให้สีจากธรรมชาติมักมีความเสถียรต่ำ สลายตัวได้ง่ายทั้งในขั้นตอนการสกัดและการนำไปประยุกต์ใช้ในอาหาร จึงนิยมใช้วิธีการทำแอนแคปซูลชันและการใช้ไฮโดรคอลลอยด์มาช่วยในการรักษาเสถียรภาพให้ดีขึ้น

สารเบตาเลน (Betalains) เป็นรงควัตถุที่พบได้ในผักผลไม้ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ บีตาไซยานิน (Betacyanins) ให้สีแดงม่วง และบีตาแซนทิน (Betaxanthins) ให้สีเหลืองส้ม โดยในเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงนั้นอุดมไปด้วยสารบีตาไซยานินซึ่งมีสมบัติละลายน้ำได้ดี มีความเสถียรในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างกว้าง (pH 3-7) มีความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นสารให้สีในอาหาร และยังมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระและต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ (ทรงพร คำคม, 2560) แต่อย่างไรก็ตาม สารบีตาไซยานินมีข้อจำกัดคือ สลายตัวได้ง่ายเมื่ออยู่ในขั้นตอนการสกัด การผลิตและการเก็บรักษา โดยเฉพาะขั้นตอนการสกัดสารบีตาไซยานินเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อปริมาณสารบีตาไซยานินในสารสกัดหรือในผลิตภัณฑ์สุดท้าย ทั้งนี้มี

งานวิจัยศึกษาวิธีการสกัดสารบีตาไซยานินหลายวิธี (Ramli et al., 2014) เช่น วิธีการสกัดแบบดั้งเดิมหรือการแช่ลงในตัวทำละลาย (Conventional extraction or solid-liquid extraction) และวิธีการสกัดแบบใช้คลื่นเสียงความถี่สูงหรืออัลตราโซนิก (Ultrasound-assisted Extraction) เป็นต้น โดยวิธีแบบอัลตราโซนิก (Ultrasound-assisted extraction) เป็นวิธีการสกัดที่นิยมนำมาใช้ในการสกัดสารบีตาไซยานินจากผัก ผลไม้หลายชนิด (Laqui-Vilca et al., 2018) เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารบีตาไซยานินได้ ช่วยลดปริมาณการใช้ตัวทำละลาย ลดระยะเวลาในการสกัดและยังช่วยลดค่าใช้จ่ายและพลังงานในการสกัดได้อีกด้วย นอกจากนี้ มีงานวิจัยใช้วิธีการสกัดแบบผสมระหว่างวิธีแบบดั้งเดิมหรือแช่ในตัวทำละลายกับวิธีอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ในการสกัดสารบีตาไซยานิน (Koubaa et al., 2016; Tutunchi et al., 2019) แต่อย่างไรก็ตาม จนถึงปัจจุบันยังไม่มียงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม วิธีอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ วิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ และแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมกับอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบต่อปริมาณสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้ ดังนั้นการศึกษาวิธีการสกัดที่เหมาะสมจึงเป็นประโยชน์อย่างมากต่อประสิทธิภาพการสกัดสารบีตาไซยานินจากผักและผลไม้

ในปัจจุบัน การทำแห้งสารสำคัญจากพืชเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากช่วยเพิ่มเสถียรภาพของส่วนผสมหรือสารต่างๆ ที่มีประโยชน์ในอาหารได้ โดยเฉพาะสารให้สีจากธรรมชาติซึ่งมีความเสถียรต่ำ วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินได้แก่ การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ทั้งนี้ ปริมาณสารบีตาไซยานินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณมากกว่าที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากความร้อนมีผลต่อการสลายตัวของสารบีตาไซยานิน (Ravichandran et al., 2013) มีงานวิจัยศึกษาการนำไฮโดรคอลลอยด์มาใช้ในการรักษาเสถียรภาพของบีตาไซยานินมีหลากหลายชนิด เช่น มอลโทเดกซ์ตริน (Kumar, & Giridhar, 2017) แชนแทนกัม (Ravichandran et al., 2013) และบีตาไซโคลเด็กซ์ตริน (Tutunchi et al., 2019) เป็นต้น การใช้ไฮโดรคอลลอยด์แบบผสมทำให้ได้ประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินที่ดีกว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพียงชนิดเดียว (Ravichandran et al., 2014; Chranioti et al., 2015) ไฮโดรคอลลอยด์เหล่านี้สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Interactions) กับโครงสร้างของบีตาไซยานินได้ อันตรกิริยาเหล่านี้ได้แก่ Hydrogen bonding, Hydrophobic interaction และ Electrostatic interaction ซึ่งไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดมีการเกิดอันตรกิริยากับบีตาไซยานินที่แตกต่างกัน (Rodriguez et al., 2015)

นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมในอาหารและเครื่องดื่มสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารให้สีจากธรรมชาติได้ มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้แชนแทนกัมในเครื่องดื่มจำลองเพื่อรักษาเสถียรภาพของแอนโทไซยานิน (Zhao et al., 2020) และบีตาไซยานิน (Marchuk et al.,

2019) โดยแซนแทนกัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่มีสมบัติหนว้นและเสถียรในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างกว้าง (Saha & Bhattacharya, 2010) ซึ่งเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในเครื่องต้มจำลองปรับกรด นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่ศึกษาการประยุกต์ใช้กั้วร์กัมผสมลงในน้ำสารสกัดแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่า กั้วร์กัมมีส่วนช่วยในการรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินในน้ำสารสกัดแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงในระหว่างการเก็บรักษาได้ (Leong et al., 2018) แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้แซนแทนกัมและกั้วร์กัมเพียงชนิดเดียวในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินแต่เป็นการใช้แซนแทนกัมและกั้วร์กัมผสมร่วมกับมอลโทเดกซ์ทรินสำหรับการทำแห้ง (Ravichandran et al., 2013) นอกจากนี้ ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาการนำผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการใช้กั้วร์กัมหรือแซนแทนกัมในการทำแห้งมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมลงในเครื่องต้มจำลอง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อปริมาณสารสกัดบีตาไซยานิน โดยเปรียบเทียบวิธีการสกัดสารบีตาไซยานิน 4 วิธี ได้แก่ วิธีดั้งเดิมโดยแช่ในตัวทำละลาย (CE) วิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบและแบบอ่างแช่ (UL-P, UL-B) และวิธีแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (CE-P) และเพื่อศึกษาผลการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการรักษาเสถียรภาพสารสกัดบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) โดยศึกษาชนิดและความเข้มข้นไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ กั้วร์กัม มอลโทเดกซ์ทริน แซนแทนกัม ส่วนผสมของกั้วร์กัมกับมอลโทเดกซ์ทริน และส่วนผสมของแซนแทนกัมกับมอลโทเดกซ์ทรินในระหว่างการเก็บรักษา รวมทั้งศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการทำแห้งโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมลงในเครื่องต้มจำลองในระหว่างการเก็บรักษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 1.2 สมมติฐานของงานวิจัย

1.2.1 การสกัดด้วยวิธีแบบผสมระหว่างวิธีแบบดั้งเดิมกับวิธีการสกัดแบบใช้คลื่นเสียงความถี่สูงหรืออัลตราโซนิกสามารถสกัดสารบีตาไซยานินได้ในปริมาณมากที่สุด

1.2.2 การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารสกัดบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาได้ดีกว่าผงสารสกัดที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์

1.2.3 เครื่องต้มจำลองที่มีการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสีและปริมาณสารสกัดบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาน้อยกว่าเครื่องต้มที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์

### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

1.3.2 เพื่อศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงด้วยเทคนิค Freeze drying

1.3.3 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลองในระหว่างการเก็บรักษา



## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (Red Dragon fruit)



รูปที่ 2.1 แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (*Hylocereus polyrhizus* L.) เป็นผลไม้เขตร้อน จัดอยู่ในตระกูลเดียวกับตะบองเพชร (*Cactaceae*) สามารถเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า พิไทอา (pitaya) หรือ พิทาโฮอา (pitahaya) (Wu et al., 2006) เมื่อผลดิบมีลักษณะเปลือกเป็นสีเขียว เมื่อสุกเปลือกและเนื้อจะเปลี่ยนเป็นสีแดง ผลเป็นรูปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6-10 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 200-500 กรัม และมีเม็ดเล็กๆ สีดำคล้ายเม็ดงาหรือเม็ดแมงลักกระจายทั่วทั้งผล มีรสชาติหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย อุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น สารบีตาไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ โพรตีน วิตามินซี แร่ธาตุและใยอาหาร เป็นต้น ซึ่งสารสำคัญเหล่านี้มีคุณประโยชน์หลากหลาย เช่น มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต่อต้านโรคหัวใจและหลอดเลือด โรคมะเร็งลำไส้และต่อมลูกหมาก และยังสามารถช่วยบรรเทาอาการโรคโลหิตจางช่วยเพิ่มธาตุเหล็กในร่างกายได้ นอกจากนี้ยังช่วยบำรุงผิวพรรณให้ชุ่มชื้น สดใส ลดริ้วรอยก่อนวัยอันควร เนื่องจากในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงมีปริมาณวิตามินซีสูง และยังสามารถช่วยบำรุงระบบขับถ่าย แก้อาการท้องผูก เนื่องจากอุดมไปด้วยกากใยอาหาร (กรรณิการ์ สอนโยธา, 2552)

#### 2.2 คุณค่าทางสารอาหารของแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง เป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยสารอาหารปริมาณมาก มีองค์ประกอบหลักคือคาร์โบไฮเดรตหรือน้ำตาล มากถึง 20.4 g/100 g โดยน้ำตาลที่พบในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง คือน้ำตาลฟรุคโตส กลูโคสและซูโครส นอกจากนี้ยังอุดมไปด้วยสารอาหารต่างๆ ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น วิตามิน แร่ธาตุ ใยอาหารและสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น (ตารางที่ 2.1) ทั้งนี้ การรับประทานแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง นิยมทานเป็นผลสุก หรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อาทิเช่น น้ำแก้ว

มังกรแดง โยเกิร์ต นม และไอศกรีม เป็นต้น นอกจากนี้ในแก้วมังกร ยังพบสารมิวซิเลจ (Mucilage) มีลักษณะเป็นเจลวุ้น ช่วยดูดซับน้ำในร่างกาย และช่วยควบคุมระดับกลูโคสในคนที่ เป็นโรคเบาหวาน ชนิดที่ 2 (ไม่ต้องพึ่งอินซูลิน) และสารอาหารในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงมีส่วนช่วยลดความดันโลหิต โรคเบาหวาน โรคมะเร็ง ตลอดจนช่วยในเรื่องของการควบคุมน้ำหนักหรือการลดความอ้วนได้ เนื่องจากแก้วมังกรเป็นผลไม้ที่มีแคลอรีต่ำ อุดมไปด้วยกากใยอาหารช่วยดูดซับไขมันและสารพิษต่างๆ ออกจากร่างกาย (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2559)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารอาหารที่พบในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงต่อส่วนที่บริโภคได้ 100 กรัม

องค์ประกอบ	ปริมาณ
พลังงาน	66.0 cal
ความชื้น	76.9 g
คาร์โบไฮเดรต	20.4 g
โปรตีน	1.6 g
ไขมัน	0.4 g
ใยอาหาร	1.1 g
แคลเซียม	37.0 mg
ฟอสฟอรัส	49.0 mg
เหล็ก	0.8 mg
วิตามินเอ	67.0 IU
วิตามินบี 1	0.03 mg
วิตามินบี 2	0.01 mg
วิตามินซี	8.0 mg
ไนอะซิน	0.7 mg

ที่มา : กรรณิการ์ สอนโยธา (2552)

ในปัจจุบันแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงเป็นผลไม้ที่นิยมเพาะปลูกและบริโภคเป็นจำนวนมากในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จึงทำให้มีปริมาณเปลือกซึ่งเป็นของเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากถึง 33 % ของอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ (Fathordoobady et al., 2021) และเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรประมาณ 180 ตันต่อปี (ชุตินา ถนอมสิทธิ์, 2018) ในเปลือกแก้วมังกรอุดมไปด้วยสารให้สีที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพได้แก่ สารบีตาไซยานิน โดยสารบีตาไซยานินมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต่อต้านโรคมะเร็ง ด้านการเจริญของจุลินทรีย์และยังมีความเข้มข้นสีแดงม่วงที่เหมาะสม สามารถพบได้ในแก้ว

มันกรพันธุ์เนื้อแดงมากกว่าในแก้วมันกรพันธุ์เนื้อขาวและพบในเปลือกมากกว่าในเนื้อของแก้วมันกร (Liaotrakoon et al., 2012; Suh et al., 2014) ดังนั้นเปลือกแก้วมันกรพันธุ์เนื้อแดงจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับนำมาผลิตเป็นสีผสมอาหารจากธรรมชาติได้และยังเป็นการนำของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์

### 2.3 สีผสมอาหารจากธรรมชาติ (Natural colorant)

สีผสมอาหาร เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) โดยการเติมสีผสมอาหารนั้นมีวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น เพื่อให้อาหารมีสีสันที่น่ารับประทาน เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เพิ่มความเข้มสีจากสีอาหารเดิมที่อาจเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการผลิตหรือการเก็บรักษา และเพื่อกลบลักษณะปรากฏที่ไม่พึงประสงค์ของอาหารนั้นๆ (Amchova, Kotolova, & Ruda-Kucerova, 2015)

สีของอาหาร เป็นลักษณะปรากฏที่สำคัญต่อการตัดสินใจเลือกซื้อของผู้บริโภค ปัจจุบันอาหารและเครื่องดื่มส่วนมากนิยมใช้สีสังเคราะห์มากกว่าสีจากธรรมชาติ เนื่องจากมีราคาถูก เสถียร เมื่อนำไปใส่ในอาหาร มีความเข้มสีที่ดีและมีสีที่หลากหลายน แต่อย่างไรก็ตาม สีสังเคราะห์อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ในระยะยาวได้ มีงานวิจัยระบุว่า สีสังเคราะห์มีส่วนทำให้เกิดการอาการท้องอืด อาหารไม่ย่อย ชัดขวางการดูดอาหาร เนื่องจากสีสังเคราะห์จะไปเคลือบเยื่อบุกระเพาะอาหารและลำไส้ รวมทั้งมีอาการตับและไตอักเสบ ซึ่งจะเป็นสาเหตุก่อเกิดโรคมะเร็งได้ (ภขมน พิษญาจิตติพงษ์, 2556) นอกจากนี้มีงานวิจัยของ Aguilar และคณะ (2008) พบว่า สีสังเคราะห์ในกลุ่ม Sunset Yellow, Azorubine, Tartrazine, Ponceau 4R ก่อให้เกิดอาการ Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) หรือโรคสมาธิสั้น ในเด็กอายุ 3-9 ปีได้ ดังนั้นการเลือกใช้สีสังเคราะห์ ควรคำนึงถึงชนิดและปริมาณที่ใช้ให้เหมาะสมตามข้อกำหนดตามกฎหมายอย่างเข้มงวด

สีจากธรรมชาติ เป็นสีที่ได้มาจากธรรมชาติ โดยความหมายของสีธรรมชาติ หมายถึงสีที่ได้จากพืช สัตว์ แร่ธาตุ หรือจุลินทรีย์ ผ่านกระบวนการแบบดั้งเดิมหรือกรรมวิธีทางกายภาพหรือกระบวนการทางเคมีซึ่งกระบวนการหรือกรรมวิธีดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของสีที่มีตามธรรมชาติ ทั้งนี้ให้รวมถึงสีชนิดเดียวกันบางรายการที่ได้จากการสังเคราะห์ซึ่งสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาเคยพิจารณาเป็นสีธรรมชาติ (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2562)

ในปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจในการบริโภคสีจากธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารให้สีจากธรรมชาตินอกจากมีสีที่น่ารับประทานแล้ว ยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค สารให้สีจากธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้ในอาหาร เช่น คลอโรฟิลล์ (สีเขียว), แคโรทีนอยด์ (สีเหลืองส้ม), แอนโทไซยานิน (สีม่วง) และบีตาไซยานิน (สีแดงม่วง) เป็นต้น (Rymbai, Sharma, & Srivastav, 2011)

แต่อย่างไรก็ตาม สีจากธรรมชาติส่วนใหญ่มีข้อจำกัดคือ มีความคงตัวต่ำ สลายตัวได้ง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะการผลิตการเก็บรักษา ดังนั้นจึงมีงานวิจัยศึกษาการรักษาเสถียรภาพของสารให้สีจากธรรมชาติเป็นจำนวนมาก (Marchuk et al., 2019; Bockuviene, & Sereikaite, 2020; Zhao et al., 2020) เพื่อการประยุกต์ใช้ลงในผลิตภัณฑ์อาหาร ก่อให้เกิดเป็นประโยชน์และทำให้มีทางเลือกใหม่ๆ สำหรับการเลือกซื้อและรับประทานอาหารของผู้บริโภคได้

### 2.3.1 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้สีผสมอาหาร

การใช้สีสังเคราะห์ผสมลงในอาหารเริ่มมีการใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1881 โดยกระทรวงเกษตรประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Agriculture's: USDA) โดยเติมสีลงในผลิตภัณฑ์เนยและชีส หลังจากนั้นหลายปีต่อมาได้มีการปรับปรุงกฎหมายการใช้สีผสมอาหารหลายครั้ง จนกระทั่งปี ค.ศ. 1938 คณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (Food and Drug Administration: FDA) ได้บัญญัติกฎหมายที่เรียกว่า The Federal Food Drug and Cosmetic Act of 1938 (FD & C) เป็นข้อกำหนดการใช้สีผสมลงในผลิตภัณฑ์อาหาร ยา และเครื่องสำอาง โดยสีสังเคราะห์ทุกชนิดต้องมีการขอใบรับรองก่อนนำไปใช้ในการผลิต (Hendry, & Houghton, 1996) ในปี ค.ศ. 1950 มีการพบอันตรายจากการใช้สีผสมอาหารต่อสุขภาพผู้บริโภค โดยทำให้เกิดอาการท้องเดินหรืออุจจาระร่วงในกลุ่มเด็กจำนวนมากที่บริโภคลูกกวาดและป๊อปคอร์นที่มีการใส่สีสังเคราะห์ชนิด FD & C Orange No. 1 ในปริมาณมากเกินไป จึงทำให้มีข้อควรระวังและข้อกำหนดที่เข้มงวดของชนิดและปริมาณการใช้สีผสมอาหารมากขึ้น โดยในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการแก้ไขข้อกำหนดการใช้สีผสมอาหารโดยคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา ร่างกฎหมาย The Color Additives Amendments Act of 1960 โดยมีการระบุชนิดของสีเจือปนอาหารที่กระตุ้นให้เกิดโรคมะเร็งต่อสุขภาพผู้บริโภคและมีการแบ่งประเภทสีผสมอาหารเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรก สีสังเคราะห์ 7 ชนิดมีการใช้ชื่อเรียกหน้า FD & C ตามด้วยเลขเฉพาะของสีแต่ละชนิดและกลุ่มที่สอง สีผสมอาหารจากธรรมชาติหรือสีที่ไม่ต้องขอใบรับรอง โดยมีชื่อเรียกระบุตาม European Union นำหน้าด้วยอักษร E ตามด้วยเลขของสีจากธรรมชาติแต่ละชนิด (Rymbai, Sharma, & Srivastav, 2011)

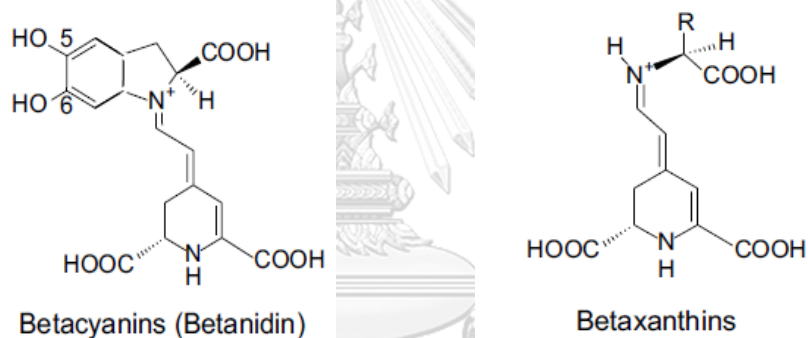
ข้อกำหนดของสำนักคณะกรรมการอาหารและยา ในประเทศไทย มีการใช้ชื่อเรียกหน้าวัตถุเจือปนอาหาร ประเภทสีผสมอาหาร ระบุเป็นเลข International Numbering System : INS โดยสีสังเคราะห์ มีปริมาณกำหนดที่ใช้แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสีสังเคราะห์และประเภทอาหารที่ใช้และสีจากธรรมชาติ ไม่มีข้อกำหนดสำหรับปริมาณที่ใช้แต่ระบุเป็นใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งสีแดงม่วงจากธรรมชาติซึ่งมีองค์ประกอบของสารปีตาไซยานิน ที่มีการใช้โดยทั่วไปในท้องตลาด ได้แก่ สีจากปีทรูท (INS: 162) (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2561) แต่อย่างไรก็ตาม สีแดงม่วงจากธรรมชาติที่ได้จากปีทรูทนั้นมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์จึงเป็นข้อจำกัดของการนำไปใช้ในอาหารและยัง



พบว่าในปีทรูทประกอบไปด้วยสารไนเตรท หากรับประทานในปริมาณมากและเป็นเวลานาน อาจก่อให้เกิดการสะสมและเป็นพิษกับสุขภาพผู้บริโภคได้ (Fathordoobady et al., 2021) ดังนั้นจึงมีการศึกษาแหล่งของสารให้สีบีตาไซยานินในผักและผลไม้อื่นๆ ซึ่งพบว่าแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง อุดมไปด้วยสารให้สีจากธรรมชาติกลุ่มเบทาเลน ซึ่งได้แก่ สารบีตาไซยานิน

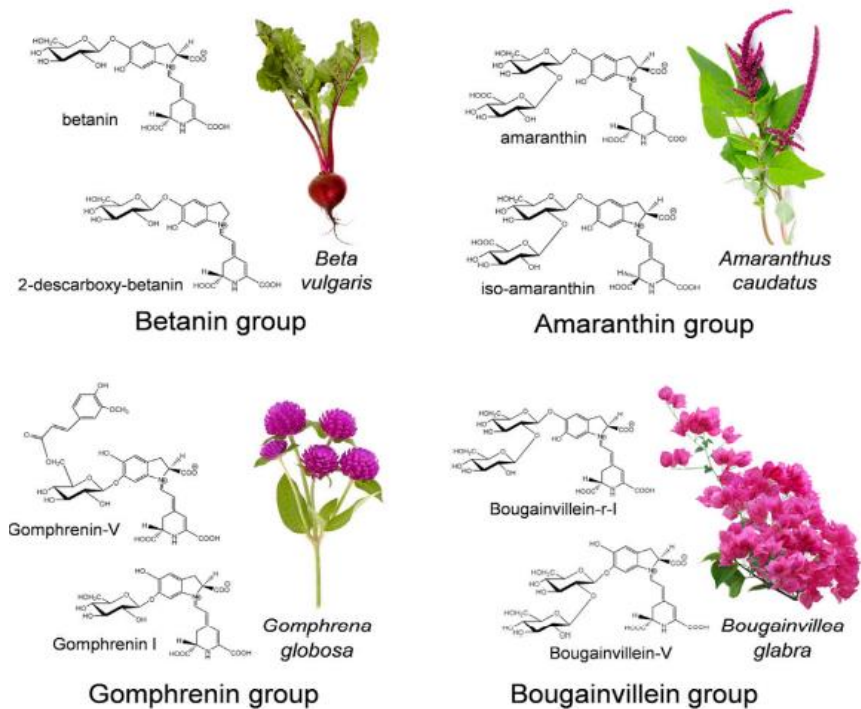
#### 2.4 สารบีตาไซยานิน (Betacyanins) ในเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

เป็นรงควัตถุในกลุ่มเบทาเลน (Betalain) พบได้ตามธรรมชาติ ในพืช ผักและผลไม้ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ บีตาไซยานิน (Betacyanins) ให้สีแดงม่วง ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535-540 nm และ บีตาแซนทีน (Betaxanthins) ให้สีเหลืองส้ม ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475-480 nm ในธรรมชาติพบสารบีตาไซยานินมากถึง 60 ชนิด และบีตาแซนทีน 33 ชนิด (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของบีตาไซยานินและบีตาแซนทีน (Strack et al., 2003)

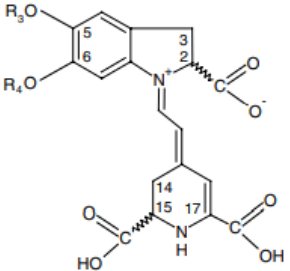
### 2.4.1 โครงสร้างและชนิดของสารบีตาไซยานิน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างและชนิดของสารบีตาไซยานิน (Polturak, & Aharoni, 2018)

สารบีตาไซยานิน (Betacyanins) มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยกรดปีตาลามิค (Betalamic acid) เชื่อมต่อกับ cyclo-3,4-dihydroxyphenyl alanine (cyclo-Dopa) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลัก ได้แก่ เบตานิน (betanin), บูเจนวิลลิน (bougainvillein), กอมพรีนิน (gomphrenin) และอะมารานทิน (amaranthin) (Polturak, & Aharoni, 2018) โดยโมเลกุลของสารบีตาไซยานินประกอบด้วยน้ำตาลที่แตกต่างกัน (Glycosides หรือ acylglycoside) หากไม่มีน้ำตาลในโมเลกุลจะเป็น betanidin ซึ่งในแต่ละชนิดแตกต่างกันที่ชนิดน้ำตาลที่คาร์บอนตำแหน่ง 5 หรือ 6 ในโมเลกุลของสารบีตาไซยานิน (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006)

ตารางที่ 2.2 ชนิดน้ำตาลที่คาร์บอนตำแหน่ง 5 หรือ 6 ในโมเลกุลของสารบีตาไซยานินแต่ละชนิด

โครงสร้างสารบีตาไซยานิน	ชนิดสารบีตาไซยานิน	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
	Betanidin	H	H
	Betanin	5-O- $\beta$ -glucoside	H
	Gomphrenin I	6-O- $\beta$ -glucoside	H
	Phyllocactin	5-O-(6'-O-malonyl)- $\beta$ -glucoside	H
	Amaranthin	2-O-( $\beta$ -glucuronic acid)- $\beta$ -glucose	H
	Bougainvillein	6-O-sophoroside	H

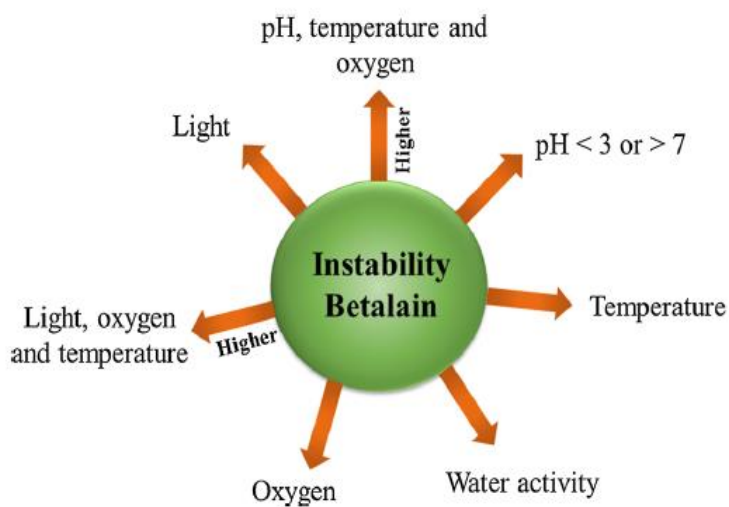
ดัดแปลงจาก Carreon-Hidalgo et al., (2022)

#### 2.4.2 สมบัติของสารบีตาไซยานิน

สมบัติละลายน้ำได้ดี มีความเสถียรในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างกว้าง (pH 3-7) มีความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นสารให้สีในอาหาร และยังมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ต้านการเกิดโรคมะเร็งและต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ (ทรงพร คำคม, 2560)

#### 2.4.3 เสถียรภาพของสารบีตาไซยานิน

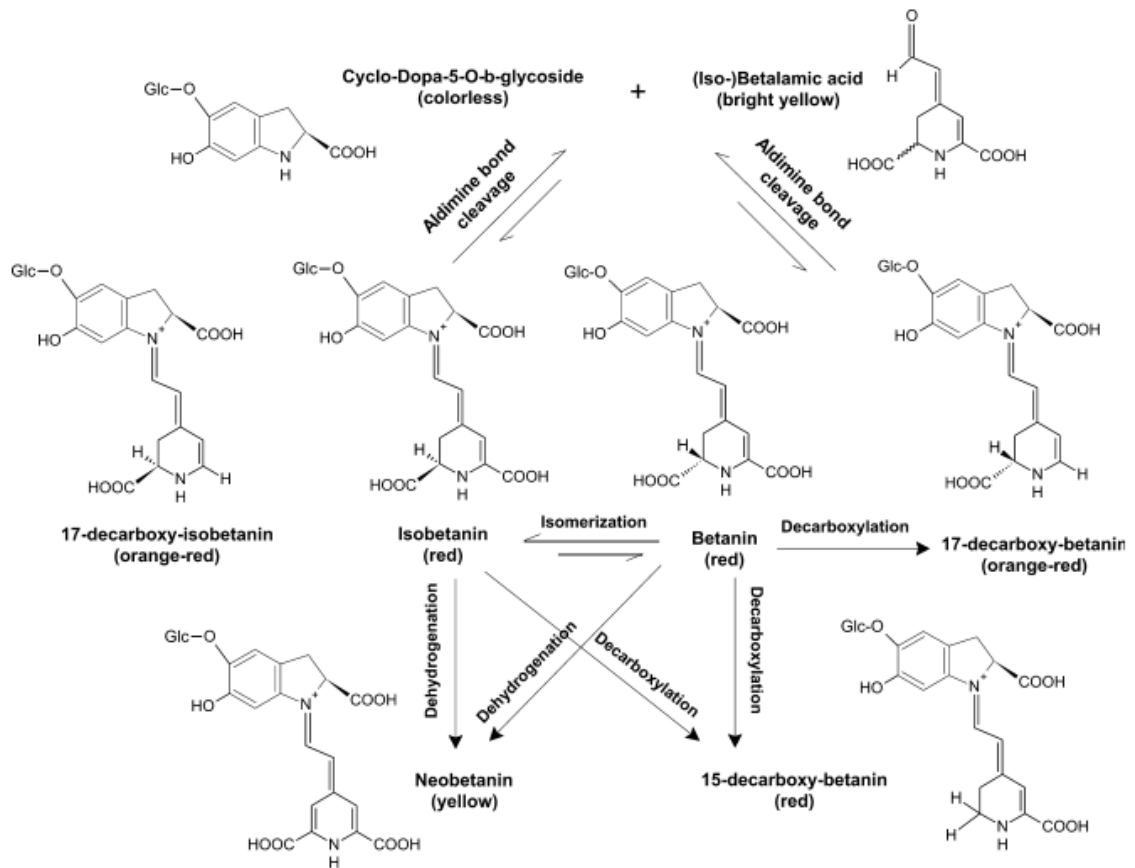
สารบีตาไซยานินมีความเสถียรค่อนข้างต่ำ สลายตัวได้ง่ายเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ทั้งในสภาวะการผลิตและการเก็บรักษา การสลายตัวของสารบีตาไซยานินเกิดได้จากทั้งปัจจัยภายในและภายนอก โดยปัจจัยภายนอก ได้แก่ ออกซิเจน อุณหภูมิ แสง ความเป็นกรด-ด่าง ค่ากิจกรรมของน้ำ และปัจจัยภายใน ได้แก่ แหล่งที่มาของสารบีตาไซยานิน โครงสร้าง เอนไซม์ เช่น polyphenoloxidase และ Peroxidases (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006) สารบีตาไซยานินมีการสลายตัวเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order kinetic reaction) (Bassama et al., 2020)



รูปที่ 2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของเบตาเลน (Castro-Enriquez et al., 2019)

#### 2.4.3.1 ปฏิกริยาการสลายตัวของสารบีตาไซยานิน

- 2.4.3.1.1 Isomerization เป็นปฏิกิริยาที่เกิดการเปลี่ยนรูปของสารบีตาไซยานิน
- 2.4.3.1.2 Deglycosylation เป็นปฏิกิริยาที่มีการกำจัดน้ำตาลกลูโคส
- 2.4.3.1.3 Decarboxylation เป็นปฏิกิริยาการกำจัดหมู่  $-COOH$
- 2.4.3.1.4 Dehydrogenation เป็นปฏิกิริยาการดึงเอา H-atom ออก
- 2.4.3.1.5 Hydrolysis หรือ Aldimine bond cleavage เป็นการตัดที่พันธะอัลดีไมด์ บริเวณ N-atom ในโมเลกุลของบีตาไซยานิน



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารบีตาไซยานิน (Azeredo, 2009)

### 2.4.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายของสารบีตาไซยานิน

#### 2.4.3.2.1. ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อความเสถียรของสารบีตาไซยานินควรอยู่ในช่วง 3-7 โดยจะเสถียรที่สุดที่ pH ประมาณ 5.5 ทั้งนี้ ในสภาวะที่เป็นด่าง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา hydrolysis เกิดการสลายที่พันธะอัลดีไมด์ ในสภาวะที่เป็นกรด ส่งผลให้เกิด  $C_{15}$  isomerization เปลี่ยน betanin และ betanidin ให้กลายเป็น isobetanin และ isobetanidin ตามลำดับ และสามารถเกิด dehydrogenation เกิดเป็นสาร neobetanin ซึ่งมีสีเหลือง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและทำให้ปริมาณสารบีตาไซยานินลดลง แต่อย่างไรก็ตาม สภาวะที่เป็นกรดสามารถช่วยทำให้เกิดการรวมตัวกันของ

Betalamic acid และ *Cyclo-Dopa* กลายเป็นสารปีตาไซยานินได้ในสภาวะ อุณหภูมิต่ำ (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006)

#### 2.4.3.2.2. ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity)

ค่ากิจกรรมของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัวของ สารปีตาไซยานินโดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำลายพันธะอัลดี ไมด์ในโมเลกุลสารปีตาไซยานิน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีสีเหลือง ได้แก่ Betalamic acid และสารไม่มีสี ได้แก่ *cyclo-Dopa* การทำแห้งสารปีตาไซยานินจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการช่วยลดค่ากิจกรรมของน้ำและลดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินได้ (Cai et al., 1999) โดยค่ากิจกรรมของน้ำที่ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินน้อยที่สุด คือที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.521 (Miguel, 2018)

#### 2.4.3.2.3. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสลายตัวของสารปีตาไซยานินเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม ทั้งในขั้นตอนการผลิตและการเก็บรักษา การสลายตัวของสารปีตาไซยานินขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน ได้แก่ isomerization, decarboxylation และทำลายพันธะอัลดีไมด์ในโมเลกุลปีตาไซยานิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีม่วงแดงเป็นสีเหลืองหรือน้ำตาลได้ (Azeredo, 2009) นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยา dehydrogenation ของสาร betanin ไปเป็น neobetainin (สีเหลือง) จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษาได้

Herbach และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารปีตาไซยานินและลักษณะสีของน้ำแก้วมังกรและน้ำปีทรุทในระหว่างการให้ความร้อนและการเก็บรักษา พบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ

85 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินเป็นอย่างมาก ทำให้น้ำปีทรูทเปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองแดง ดังนั้นอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณสารปีตาไซยานิน ทั้งนี้ สารปีตาไซยานิน ชนิด betanin มีความเสถียรต่อความร้อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับชนิดอื่น เช่น Phyllocactin และ lycocerenin เป็นต้น

งานวิจัยของ Bassama และคณะ (2020) ศึกษาผลของอุณหภูมิฆ่าเชื้อแบบพาสเจอร์ไรส์เซชันต่อการสลายตัวของสารปีตาไซยานินในน้ำแคคตัสแพร (*Opuntia dillenii* Haw.) โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 60-90 °C พบว่า การสลายตัวของสารปีตาไซยานินเป็นการสลายตัวแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order kinetic) โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C ส่งผลทำให้สารปีตาไซยานินเกิดการสลายตัวมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยบ่งชี้ได้ว่า อุณหภูมิที่ต่ำมีส่วนช่วยในการรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานิน โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส และ pH 5 เหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวกันของสาร Betalamic acid และ cyclo-Dopa เป็นสารปีตาไซยานินได้ ดังนั้นจึงควรเก็บผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของสารปีตาไซยานินไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (Huang, & Elbe, 1987)

#### 2.4.3.2.4. ออกซิเจน

ออกซิเจนในอากาศสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารปีตาไซยานินได้ จึงส่งผลให้เกิดการสลายตัวและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี หากมีออกซิเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้น จะยิ่งส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Czapski, 1985) การเติมสาร food additive และสารต้านอนุมูลอิสระร่วมด้วย เช่น ascorbic acid เป็นต้น มีส่วนช่วยลดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินได้ ทั้งนี้อัตราการสลายตัวของสารปีตาไซยานินที่เกิดจากออกซิเจนขึ้นอยู่กับค่า pH หากสูงกว่า 7 จะยิ่งส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน

#### 2.4.3.2.5. แสง

ความเข้มแสง ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน โดยแสงส่งผลให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่พันธะคู่ของปีตาไซยานิน ทำให้สารเกิดการสลายตัวและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารปีตาไซยานินได้ Karangutkar และ Ananthanarayan (2020) ได้ทำการศึกษาการรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินในน้ำผักปลัง (*Basella rubra* L.) ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และเป็นเวลา 13 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่า ทั้งสองอุณหภูมิของสภาวะการเก็บรักษา การเก็บน้ำผักปลังในที่มืดช่วยเพิ่มค่าครึ่งชีวิตของสารปีตาไซยานินได้มากกว่าการเก็บในที่ที่มีแสง ดังนั้นแสงมีผลต่อการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน

#### 2.4.3.2.6. สารอื่นๆ

สารปีตาไซยานินสามารถเพิ่มความเสถียรเพิ่มขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับกรด มีงานวิจัยของ Herbach และคณะ (2006) บ่งชี้ได้ว่า เมื่อเติมกรดแอสคอร์บิก 0.10 % w/v สามารถช่วยเพิ่มค่าครึ่งชีวิตของสารปีตาไซยานินได้เป็น 2 เท่า เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงในระดับสเตอริไรซ์ดังนั้นจึงช่วยป้องกันการเปลี่ยนสีของสารปีตาไซยานินได้ นอกจากนี้มีงานวิจัยของ Leong และคณะ (2018) พบว่า เมื่อเติมกรดแอสคอร์บิก 0.5 % w/v ลงในสารสกัดปีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง สามารถช่วยรักษาปริมาณของสารปีตาไซยานินคงเหลือ ( $49.17 \pm 0.61$  %) ได้ดีกว่าสารสกัดที่ไม่ได้เติม ( $3.01 \pm 0.14$  %) หลังจากผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืดเป็นเวลา 10 วัน นอกจากนี้สารปีตาไซยานินสามารถสลายตัวได้เมื่อทำปฏิกิริยากับสารโลหะต่างๆ เช่น เหล็ก, ดีบุก และโครเมียม เป็นต้น โดยมีผลต่อการลดความคงตัวของสารปีตาไซยานิน ซึ่งพบว่าไอออนของเหล็กมีผลต่อการสลายตัวของสารปีตาไซยานินมากกว่าโครเมียม (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006)



## 2.5 การสกัดสารปีตาไซยานิน

ขั้นตอนการสกัดสารสำคัญจากพืช เป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณของสารที่ได้ในสารสกัดหรือในผลิตภัณฑ์สุดท้าย วิธีการสกัดและสภาวะการสกัดที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาเพื่อให้ได้ปริมาณของสารสำคัญมากที่สุด เกิดการสลายตัวน้อยที่สุดและมีสมบัติไม่เปลี่ยนจากเดิม ในปัจจุบันมีงานวิจัยศึกษาการสกัดสารปีตาไซยานินจากพืชหลากหลายชนิด เช่น ปีทรูท (Silva et al., 2020), ผักปลัง (Kumar et al. 2014) และเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (Ramil et al, 2014; Raj, & Dash, 2020) เป็นต้น โดยตัวทำละลายที่นิยมใช้ได้แก่ น้ำและเอทานอล เนื่องจากสารสำคัญ สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และสารปีตาไซยานิน มีโครงสร้างเป็น Hydrophilic ประกอบไปด้วยหมู่ Hydroxyl (-OH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ จึงทำให้ละลายน้ำได้ดี แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยบ่งชี้ได้ว่า การใช้ตัวทำละลายน้ำผสมกับเอทานอลสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญได้ เนื่องจากหากในระบบมีปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้ไปละลายเพคตินและเมือกที่อยู่ในพืชออกมาด้วย (Malviya, 2011) ดังนั้นการมีส่วนผสมของเอทานอลจึงช่วยในการตกตะกอนเพคตินและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ ซึ่งมีผลช่วยทำให้การสกัดสารสำคัญมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ คือ 50:50 % v/v เนื่องจากเป็นระบบที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม ทำให้สามารถสกัดสารสำคัญออกมาได้ดี (ทรงพร คำคม, 2560) ทั้งนี้ไม่นิยมใช้ตัวทำละลายเมทานอลและอะซิโตน แม้ว่าจะสามารถสกัดสารสำคัญจากพืชได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลายเหล่านี้เป็นพิษ จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร (Das et al., 2018)

Naderi และคณะ (2012) ศึกษาการเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารปีตาไซยานินจากเนื้อแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่า เมื่อใช้ตัวทำละลายน้ำผสมเอทานอลในอัตราส่วน 50:50 %v/v ทำให้สามารถสกัดสารปีตาไซยานินได้มากถึง  $655.5 \pm 4.38$  mg/L ซึ่งมีค่ามากกว่าในสารสกัดที่ได้จากการใช้เอทานอลเพียงชนิดเดียวในการสกัด มีค่าเท่ากับ  $449 \pm 13.58$  mg/L

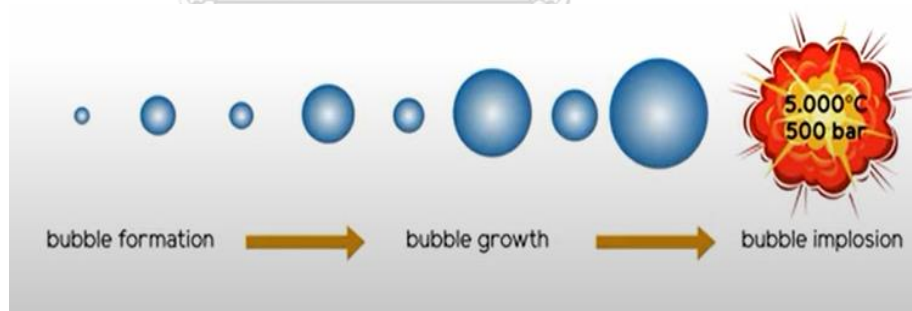
ทรงพร คำคม (2560) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตัวทำละลายเอทานอลและน้ำ สำหรับใช้ในการสกัดสารปีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่า ตัวทำละลาย 50 % เอทานอล สามารถให้สกัดสารปีตาไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกได้ในปริมาณมากที่สุด มีค่าเท่ากับ  $145.21 \pm 1.10$  mg/100g และ  $281.68 \pm 2.15$  mgGAE/100 g ตามลำดับ

นอกจากการเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารปีตาไซยานินแล้ว วิธีการสกัดเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้ ในปัจจุบันมีการศึกษาวิธีที่ใช้ในการสกัดสารปีตาไซยานินหลากหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้ในการสกัดมีดังนี้

### 2.5.1 วิธีการสกัดแบบดั้งเดิมหรือแบบแช่ในตัวทำละลาย (Conventional Extraction)

เป็นวิธีการสกัดที่ใช้ในการสกัดสารบีตาไซยานินมาเป็นเวลานาน เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและราคาถูก โดยตัวทำละลายที่นิยมใช้ส่วนมากคือ น้ำและเอทานอล สารสกัดจากพืช สารประกอบฟีนอลิก สารบีตาไซยานินและสารฟลาโวนอยด์ มีสมบัติละลายได้ดีในน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายมีส่วนช่วยกำจัดองค์ประกอบอื่นในพืชที่ไม่ต้องการ เช่น เพคติน และมิวซิเลจ โดยช่วยตะกอนเพคติน และละลายมิวซิเลจ จึงทำให้ได้เฉพาะสารสกัดจากธรรมชาติที่ต้องการ มีงานวิจัยศึกษาอัตราส่วนของน้ำและเอทานอลต่อการสกัดสารบีตาไซยานินพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำ : เอทานอล เท่ากับ 50:50 มีส่วนช่วยในการสกัดสารบีตาไซยานินให้ได้ในปริมาณที่มากที่สุด เนื่องจากเป็นระบบที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถสกัดสารบีตาไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกออกมาได้ดีและยังช่วยกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการได้ (Naderi et al., 2012; Fathordoobady et al., 2016) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการสกัดแบบดั้งเดิมหรือการแช่ในตัวทำละลายมีข้อด้อยคือ สกัดสารบีตาไซยานินได้น้อย ใช้ตัวทำละลายจำนวนมาก อีกทั้งยังใช้เวลาในการสกัดนานส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารบีตาไซยานินในระหว่างการสกัดได้

### 2.5.2 วิธีการสกัดแบบใช้คลื่นเสียงความถี่สูงหรืออัลตราโซนิก (Ultrasound-assisted Extraction)

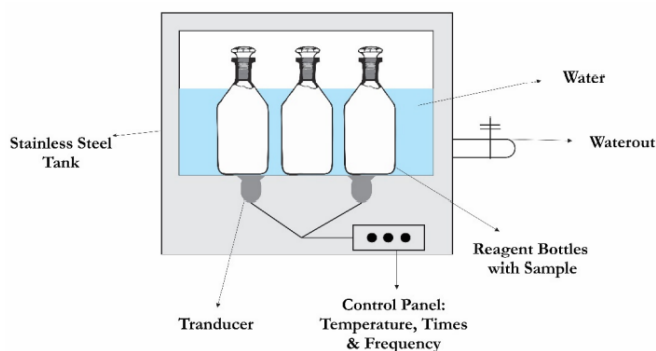


รูปที่ 2.6 กระบวนการเกิด cavitation ในการสกัดวิธีอัลตราโซนิก (Ranjha et al., 2021)

เป็นวิธีการสกัดที่อาศัยคลื่นเสียงความถี่สูงในการเกิด cavitation หรือเกิดฟองอากาศในสารสกัด โดยฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการแตกตัว ความดันในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการปลดปล่อยพลังงานและความร้อนผนังเซลล์ของพืชจึงถูกทำลาย ดังนั้นตัวทำละลายจึงเข้าไปสกัดสารสำคัญภายในเซลล์พืชได้ (Ranjha et al., 2021) ซึ่งการสกัดวิธีอัลตราโซนิก เป็นวิธีที่ใช้ตัวทำละลายและพลังงานในการสกัดต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และใช้เวลาในการสกัดน้อยจึงส่งช่วยลด

โอกาสในการเกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินจากพืชได้ดีกว่าการสกัดแบบดั้งเดิม (Ramli et al., 2014) ในปัจจุบันมีงานวิจัยศึกษาการสกัดสารปีตาไซยานินจากพืชชนิดต่างๆ โดยใช้วิธีการสกัดแบบอัลตราโซนิกเป็นจำนวนมาก เช่น เปลือกควินัว (Laqui-Vilca et al., 2018), ดอกเฟืองฟ้า (Maran et al., 2015), ลูกแพร์แคคตัสแดง (Koubaa et al., 2016), ปีทรูท (Fernando et al., 2021) และแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (Carrera et al., 2021; Raj & Dash, 2020) ทั้งนี้ วิธีการสกัดแบบใช้คลื่นเสียงความถี่สูงหรืออัลตราโซนิก สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

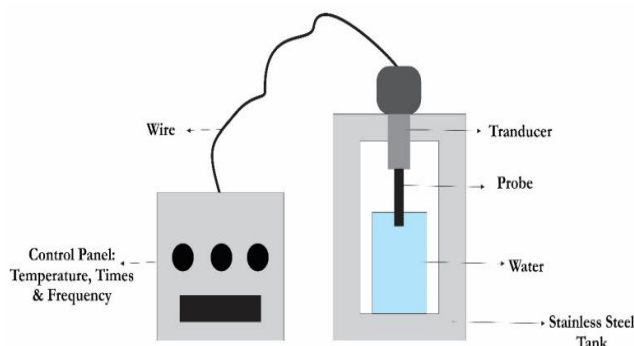
### 2.5.2.1 วิธีการสกัดแบบอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ (Ultrasound-assisted Extraction with bath-type)



รูปที่ 2.7 การสกัดวิธีอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ (Ranjha et al., 2021)

เป็นวิธีการสกัดที่อาศัยหลักการคือ วางตัวอย่างสารสกัดลงในอ่างแช่ที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง โดยมีน้ำเป็นตัวกลางในการส่งผ่านคลื่นเสียงไปตัวอย่าง วิธีอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่มีประสิทธิภาพในการสกัดค่อนข้างต่ำเนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความถี่หรือพลังงานกับตัวอย่างน้อยเนื่องจากต้องส่งผ่านตัวกลาง อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาในการสกัดค่อนข้างนานและในระหว่างการสกัดนั้นมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในระบบ เนื่องจากสารสกัดจากพืชมีความไวต่อความร้อน เกิดการสลายตัวได้ จึงส่งผลให้ได้ปริมาณสารสกัดจากพืชน้อย (Ranjha et al., 2021)

### 2.5.2.2 วิธีการสกัดแบบอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (Ultrasound-assisted Extraction with probe-type)



รูปที่ 2.8 การสกัดวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (Ranjha et al., 2021)

เป็นวิธีการสกัดที่อาศัยหลักการคือ จุ่มหัวโพรบ (Sonotrode) หรือแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงลงในตัวอย่างโดยตรงทำให้ตัวอย่างได้รับพลังงานจำนวนมากถึง 100 เท่าของวิธีแบบอ่างแช่ และยังใช้เวลาในการสกัดที่น้อยกว่า ดังนั้นวิธีแบบจุ่มโพรบจึงมีประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญจากพืชได้ดีกว่าวิธีแบบอ่างแช่ นอกจากนี้การสกัดแบบจุ่มโพรบสามารถควบคุมแอมพลิจูดและเวลาได้ตามที่ต้องการเพื่อให้เหมาะสมต่อการสกัดสารจากพืชต่างๆ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดสารปีตาไซยานินจากแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่าที่แอมพลิจูด 20 % ใช้เวลาในการสกัด 5 นาที สามารถสกัดสารปีตาไซยานินได้ในปริมาณมากที่สุด

Laqui-Vilca และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมและวิธีการสกัดแบบอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบในการสกัดสารปีตาไซยานินจากเปลือกควินัว พบว่า การสกัดด้วยวิธีอัลตราโซนิก สามารถสกัดสารปีตาไซยานินได้เท่ากับ 96.477 mg/100g โดยใช้เวลาในการสกัด 9.2 วินาที ในขณะที่การสกัดด้วยวิธีดั้งเดิมหรือแช่ในตัวอย่างใช้เวลามากถึง 30 นาที เพื่อให้ได้ปริมาณสารปีตาไซยานินเท่ากัน ดังนั้นวิธีการสกัดแบบอัลตราโซนิกสามารถช่วยลดระยะเวลาในการสกัดลงได้

Ramli และคณะ (2014) ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมกับวิธีการสกัดแบบอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ต่อการสกัดสารปีตาไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกจากแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่า การสกัดด้วยวิธีอัลตราโซนิกสามารถสกัดสารปีตาไซยานินจากเนื้อแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงได้เท่ากับ  $82.79 \pm 0.55$  mg/100g สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ  $128.30 \pm 8.17$  mg/100g ซึ่งได้

ปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับการสกัดด้วยวิธีแบบดั้งเดิม สารปีตาไซยานิน  $71.34 \pm 1.00$  mg/100g และสารประกอบฟีนอลิก  $121.86 \pm 4.89$  mg/100g ดังนั้นวิธีการสกัดด้วยวิธีแบบอัลตราโซนิกสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดให้ได้ปริมาณสารสำคัญจากเนื้อแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงมากกว่าการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิมหรือวิธีแช่ในตัวทำละลาย

แต่อย่างไรก็ตาม การสกัดแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การใช้วิธีการสกัด 2 วิธีร่วมกันในการสกัดสารปีตาไซยานินจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดได้ดียิ่งขึ้น (Castro-Enriquez et al., 2019) มีงานวิจัยใช้วิธีการสกัดแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมและวิธีอัลตราโซนิกในการสกัดสารปีตาไซยานินจากปีทรูท (Sivakumar et al., 2009; Tutunchi et al., 2019), ลูกแพร์แคคตัสแดง (Koubaa et al., 2016)

Cheok และคณะ (2013) ศึกษาเทคนิคการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารให้สีแอนโทไซยานินจากเปลือกมังคุด โดยเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมหรือแช่ในตัวทำละลาย วิธีแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมกับอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่และวิธีแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมกับอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ พบว่า การใช้วิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบร่วมกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมสามารถสกัดสารแอนโทไซยานินได้มากกว่าวิธีแบบดั้งเดิม 29.81 % แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการสกัดแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมกับอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ทำให้ได้ปริมาณสารแอนโทไซยานินที่น้อยกว่าการใช้วิธีดั้งเดิมเพียงวิธีเดียว 4.97 % ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการสกัดแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีแบบอัลตราโซนิกจุ่มโพรบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารให้สีจากธรรมชาติได้ดีกว่าการใช้การสกัดวิธีแบบดั้งเดิมเพียงอย่างเดียว

## 2.6 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound)

เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย สารฟีนอล (phenol) ซึ่งมีวงแหวนเบนซีน 1 วงและหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ โดยสารประกอบฟีนอลิกสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) กรดฟีนอลิก (phenolic acid) สติลบีเนส (stilbenes) และลิกแนน (Lignans) เป็นต้น โดยแต่ละชนิดมีจำนวนคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างที่แตกต่างกัน (Chen et al., 2021) ทั้งนี้ มีงานวิจัยศึกษาชนิดของสารประกอบฟีนอลิกในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่า ในเปลือกและเนื้อของแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง ประกอบไปด้วยสารกลุ่มฟีนอลิก ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก และสารปีตาไซยานิน

(Tenore, Novellino, & Basile, 2012) ซึ่งสารเหล่านี้มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งต่างๆ ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันให้ร่างกายได้ และยังมีความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นส่วนผสมอาหารได้อีกด้วย (Chen et al., 2021)

### ตารางที่ 2.3 ชนิดของสารประกอบฟีนอลิกที่พบในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

#### สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound)

##### สารกลุ่มบีตาไซยานิน (Betacyanins)

- Betanidin-5-O-b-sophoroside (Bougainvillein)
- Betanidin--O-b-glucoside (Betanin)
- Isobetanidin-5-O-b-glucoside (Isobetanin)
- Betanidin--O-(6-O-malonyl)-b-glucoside (Phyllocactin)
- Isobetanidin-O-(6-O-malonyl)-b-glucoside (Isophyllocactin)
- Betanidin--O-(6-O-3-hydroxy-3-methyl-glutaryl)-b-glucoside
- Iso-betanidin-5-O-(6-O-3-hydroxy-3-methyl-glutaryl)-b-glucoside
- - Betanidin-5-O-(6-O-3-hydroxy-butyryl)-b-glucoside

##### สารกลุ่มกรดฟีนอลิก (Phenolic acid)

- Gallic acid
- Protocatechuic acid
- P-Hydroxybenzoic acid
- Vanillic acid
- Caffeic acid
- Syringic acid
- P-Coumaric acid

##### สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)

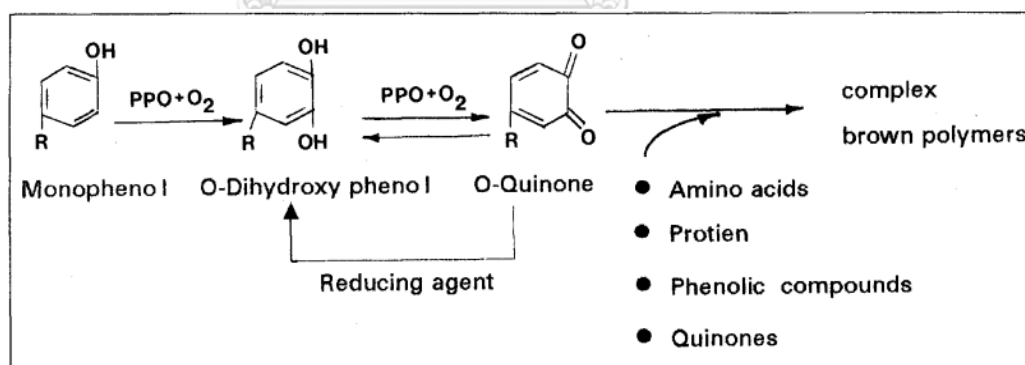
- Isorhamnetin triglycoside
- Quercetin-3-O-rutinoside
- Flavonol glycoside
- Kaempferol-3-O-rutinoside
- Isorhamnetin-3-O-rutinoside
- Isorhamnetin-3-O-glucoside

ที่มา: Tenore, Novellino และ Basile (2012)

## 2.7 กลไกการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก

### 2.7.1 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction)

เป็นปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลในพืชหรือสัตว์ที่มีองค์ประกอบของสารตั้งต้นจำพวก โมโนฟีนอล (Monophenol) เช่น สารประกอบฟีนอลิกจำพวก ferulic acid, *p*-coumaric acid, catechin และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน *cyclo*-Dopa-5-O-Glycoside เป็นต้น (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Alfieri et al., 2020) ทั้งนี้ สาร Monophenol ทำปฏิกริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยมีเอนไซม์ Polyphenol oxidase พบได้ในพืชและสัตว์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา เกิดการเติมหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลกลายเป็น O-Diphenols ซึ่งจะถูกรีดออกซิไดส์ต่อไปเป็นสาร O-Quinones สามารถเกิดปฏิกริยาต่อกับกรดอะมิโนและสารอื่นๆ ในสภาวะที่ไม่ใช่เอนไซม์ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล ดังรูปที่ 2.9 โดยเอนไซม์ Polyphenol oxidase สามารถถูกยับยั้งได้ด้วย ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Eissa, & Ibrahim, 2018) หรือการใช้สารอื่นๆ เช่น ascorbic acid, phenol acids, cysteine และ สารประกอบอื่นๆ ที่สามารถจับกับซับสเตรท (substrate) ได้ ดังนั้นในผักผลไม้ที่มีเอนไซม์ Polyphenol oxidase จึงมีการลวกเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ช่วยลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผักและผลไม้ในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษา (ประสาร สวัสดิ์ชิตัง, 2538)

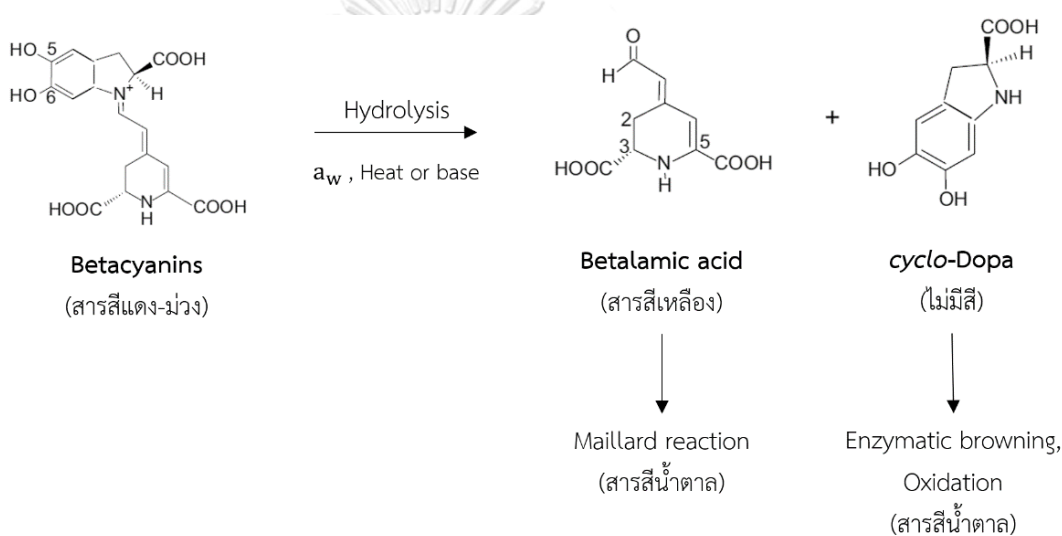


รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction) (ประสาร สวัสดิ์ชิตัง, 2538)

### 2.7.2 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction)

เป็นปฏิกริยาการสร้างสารสีน้ำตาล ที่เกิดจากปฏิกริยา Maillard reaction และ Oxidation ของสารประกอบฟีนอลิกในผักและผลไม้ ได้เป็นสาร Melanoidin ที่มีสีน้ำตาล

โดยปฏิกิริยา Maillard reaction เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของสารที่มีหมู่คาร์บอนิลและหมู่อะมิโนที่เป็นอิสระ หรือในอาหารที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลรีดิวซ์และโปรตีน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอาหารได้ นอกจากนี้ยังมีการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดจากการออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิกไปเป็นสารประกอบคาร์บอนิล โดยเกิดผ่านปฏิกิริยา Aldol condensation จากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนกลายเป็นสารสีน้ำตาล (ประสาร สวัสดิ์ชิตัง, 2538) ทั้งนี้ มีงานวิจัยสามารถบ่งชี้ได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน ได้แก่ betalamic acid สามารถเกิดปฏิกิริยา Aldol condensation และ Maillard reaction ได้เป็นสาร Melanoidins ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีม่วงแดงกลายเป็นสีน้ำตาล ดังรูปที่ 2.10 (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006)



รูปที่ 2.10 กลไกการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Breitel et al., 2020)

## 2.8 ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids)

โครงสร้างประกอบสารในกลุ่มโพลีแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) หรือโปรตีน ในปัจจุบันมีการนำไปใช้อุตสาหกรรมอาหารอย่างแพร่หลายเพื่อจุดประสงค์ต่างๆ เช่น เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล ช่วยรักษาการเกิดผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่ขึ้นในไอศกรีม เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ ช่วยกักเก็บหรือรักษาความคงตัวของสารให้กลิ่นรสและสี มีการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมากในการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการรักษาเสถียรภาพของปีตาไซยานิน ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีการนำมาศึกษา อาทิเช่น มอลโทเดกซ์ตริน (Chranioti et al., 2015; Rodriguez et al., 2015), กัมอะราบิก (Janiszewska, 2014), ปีตาไซโคลเด็กซ์ตริน (Tutunchi et al., 2019), เพคติน (Rahayuningsih et al., 2020), แชนแทนกัม และกัวร์กัม (Ravichandran et al., 2013)



ไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล (Inter-molecule binding interaction) กับสารปีตาไซยานินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินที่ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารไฮโดรคอลลอยด์และสารปีตาไซยานิน ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic interaction) และ พันธะโลหะเป็นแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) (Rodriguez et al., 2015)

### 2.8.1 มอลโทเดกซ์ตริน (Maltodextrin)

มอลโทเดกซ์ตริน เป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ที่ได้จากการย่อยสลายแป้ง (Starch hydrolysates) ให้เป็นสายสั้นๆ ของน้ำตาลกลูโคส มีลักษณะเป็นผงแห้งสีขาว นิยมใช้ในการนำมาทำแกงอาหารหรือสารสำคัญจากพืช เนื่องจากมอลโทเดกซ์ตรินสามารถละลายได้ดีในน้ำเย็น มีความหนืดต่ำ และทำหน้าที่เป็นสารห่อหุ้มที่ดี ซึ่งช่วยในการเพิ่มร้อยละผลผลิตที่ได้ให้สูงขึ้น (สุทธิลักษณ์ ศิริพรเลิศ, 2558) ทั้งนี้ มอลโทเดกซ์ตรินที่นิยมนำมาทำแกง ควรมีค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (Dextrose Equivalent, DE) อยู่ในช่วง 10-20 เนื่องจากเป็นช่วงที่มีค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับสารในระบบ จึงทำหน้าที่เป็นสารห่อหุ้มที่ดี (Ozkan, & Bilek, 2014; Castro et al., 2016) โดยมอลโทเดกซ์ตรินมีน้ำหนักโมเลกุลที่หลากหลายดังแสดงในตารางที่ 2.4

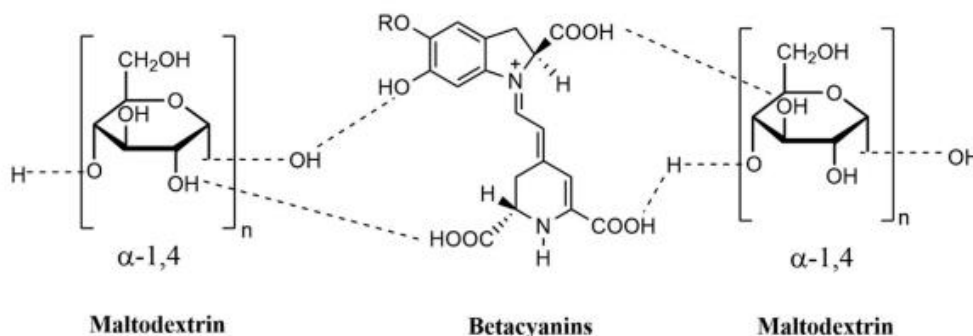
ตารางที่ 2.4 น้ำหนักโมเลกุลของมอลโทเดกซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (DE) ต่างกัน

ค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (DE) ของมอลโทเดกซ์ตริน	น้ำหนักโมเลกุล (Dalton)
4-10	1800-3600
15-18	1000-1200
20-25	720-900

ที่มา: ดัดแปลงจาก Carvajal, Macdonald และ Lanier (1999)

นอกจากนี้ มอลโทเดกซ์ตริน สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของปีตาไซยานินได้ ทำให้ช่วยในการรักษาเสถียรภาพของปีตาไซยานินในสภาวะการเก็บรักษาที่ 4

องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ปี (Kumar, & Giridhar, 2017) นอกจากนี้ยังมีการนำมอลโทเดกซ์ตรินผสมกับกัมอะราบิก ทำให้ปีตาไซยานินมีความเสถียรต่ออุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้น (Mohamed, Iwamoto, & Yamauchi, 2018)

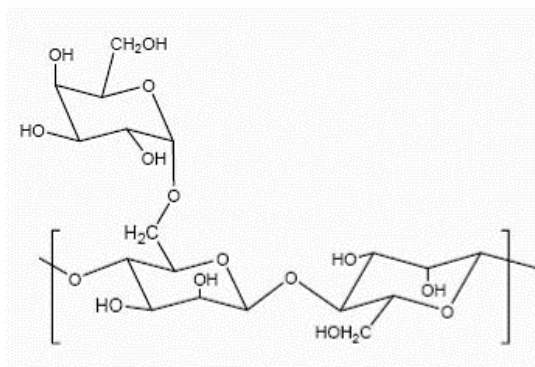


รูปที่ 2.11 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสารปีตาไซยานินและมอลโทเดกซ์ตริน (Flores-Mancha et al., 2020)

### 2.8.2 กัวร์กัม (Guar gum)

กัวร์กัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ที่ได้จาก endosperm ของเมล็ดต้นกัวร์ (*Cyamopsis tetragonoloba*) พบได้ในประเทศอินเดียและปากีสถานเป็นจำนวนมาก กัวร์กัมมีโครงสร้างเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) แบบเส้นตรงโซ่ เป็นโพลีเมอร์ของกาแล็กโทแมนแนน (galactomannan) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลแมนโนส (mannose) และกาแล็กโทส (Galactose) (Gupta, & Variyar, 2018)

กัวร์กัมสามารถละลายได้ดีในน้ำเย็น กระจายตัวและอู่มน้ำได้ดี ทำหน้าที่ให้ความหนืดในอาหาร ทน pH ในช่วงค่อนข้างกว้าง (pH 3-10) ทั้งนี้ กัวร์กัมสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลกัวร์กัมและปีตาไซยานินได้ จึงส่งผลให้ปีตาไซยานินมีความเสถียรเพิ่มขึ้นและช่วยชะลอการสลายตัวโดยการเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ได้ (Shcherbakova et al., 2019) กัวร์กัมมีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยประมาณ  $1.9 \times 10^5$  Dalton (Karaman et al., 2014)

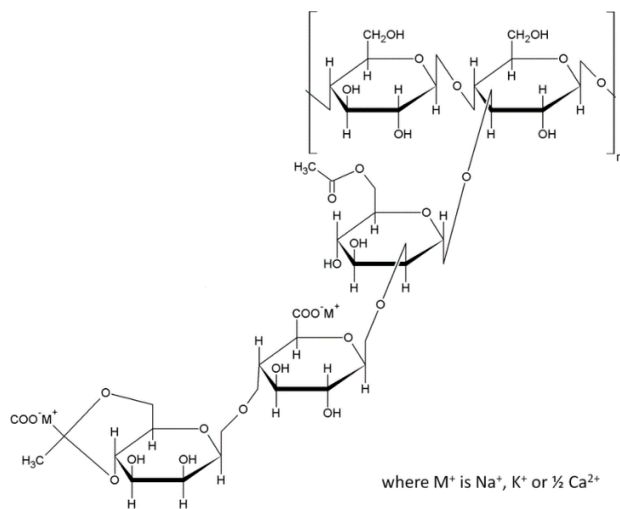


รูปที่ 2.12 โครงสร้างกัวร์กัม (Manjanna et al., 2010)

### 2.8.3 แขนแทนกัม (Xanthan gum)

เป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ที่ผลิตจากเชื้อแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* ในการหมักแบบใช้ออกาศ แขนแทนกัมเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโครงสร้างพอลิเมอร์เป็นเส้นตรง ประกอบด้วย Glucose, Mannose และ Glucuronic acid ทั้งนี้ แขนแทนกัมมีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ  $15 \times 10^6$  Dalton (Karaman et al., 2014)

แขนแทนกัม มีสมบัติละลายได้ดีทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน เสถียรในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างกว้าง (pH 1-13) การที่แขนแทนกัมมีโครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้นตรง ส่งผลให้มีความหนืดสูง และส่งผลให้มีโอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic interaction) ทำให้ปีตาไซยานินมีความเสถียรแม้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ (Marchuk et al., 2019). นอกจากนี้ยังมีการนำแขนแทนกัม ผสมกับมอลโทเดกซ์ทรินพบว่า ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของปีตาไซยานินได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้มอลโทเดกซ์ทรินเพียงชนิดเดียว (Ravichandran et al., 2013)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างแซนแทนกัม (Manjanna et al., 2010)

## 2.9 การทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานิน

### 2.9.1 การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)

การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เป็นวิธีที่นิยมในการทำแห้งของเหลว เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้เวลาน้อยและทำให้ได้ผงแห้งที่มีความชื้นต่ำ มีลักษณะปรากฏที่ดี โดยมีหลักการทำแห้งคือ ตัวอย่างของเหลวถูกพ่นละออง (atomizer) สัมผัสกับกระแสลมร้อน ภายในห้องอบแห้ง (drying chamber) ทำให้น้ำในอาหารระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีลักษณะเป็นผงแห้ง มีความชื้นต่ำ (น้อยกว่า 5 %) นิยมใช้ ในการผลิตอาหารแห้งมีลักษณะเป็นผง เช่น นมผง ครีมเทียม โพรตีนเวย์ (whey) เป็นต้น แต่ข้อจำกัดของการทำแห้งแบบพ่นฝอยคือ ไม่เหมาะสำหรับการทำแห้งสารสกัดจากพืชที่สลายตัวเมื่อโดนความร้อนที่อุณหภูมิสูง (Souza et al., 2015) ทั้งนี้ มีงานวิจัยศึกษาการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินจากพืชชนิดต่างๆ ด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Pitalua et al., 2010; Janiszewska, 2014; Kumar & Giridhar, 2017)

### 2.9.2 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) หรือ lyophilization เป็นวิธีการทำแห้งของเหลวที่อาศัยหลักการทำให้ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งโดยการแช่เยือกแข็ง จากนั้นนำไปใส่ในระบบที่เป็นสุญญากาศเพื่อระเหิดน้ำแข็งออกจากของแข็งในระบบ จึงทำให้ได้ผงแห้งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ

เหมาะสำหรับทำแห้งอาหารหรือสารสกัดจากพืชที่ไม่ทนร้อน (Pudziuvelyte et al., 2020) ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ในการทำแห้งสารสกัดปีตาไซยานินซึ่งสามารถสลายตัวได้เมื่อโดนความร้อน ทั้งนี้ มีงานวิจัยศึกษาการทำแห้งสารสกัดปีตาไซยานินโดยใช้วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Chranioti et al., 2015; Rodriguez et al., 2015; Mohamed, Iwamoto, & Yamauchi, 2018)

Antigo และคณะ (2018) ได้ศึกษาเสถียรภาพของผงสารสกัดปีทรูทที่ได้จากวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) โดยใช้มอลโทเดกซ์ตรินและแซนแทนกัมเป็นสารห่อหุ้ม โดยเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน พบว่าผงสารสกัดปีทรูทที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความเสถียรของสารปีตาไซยานินที่ดีในระหว่างการเก็บรักษา โดยมีค่าคงที่การสลายตัว (Degradation constant,  $k$ ) เท่ากับ  $91.3 \pm 4.9$  มีค่าน้อยกว่าผงปีทรูทที่ได้จากวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย  $127.3 \pm 11.9$  และค่าครึ่งชีวิตของผงปีทรูทที่ได้จากวิธีแบบแช่เยือกแข็งมีค่าเท่ากับ 7.6 วัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าผงปีทรูทที่ได้จากวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยเท่ากับ 5.4 วัน จากผลการทดลองบ่งชี้ได้ว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินในผงปีทรูทได้ดีกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย

Ravichandran และคณะ (2014) ทำการศึกษาการทำแห้งสารปีตาไซยานินจากปีทรูทด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) และแบบพ่นฝอย (Spray drying) โดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด เปรียบเทียบระหว่างการใช้ มอลโทเดกซ์ตรินเพียงชนิดเดียว กับการใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกับไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ได้แก่ แซนแทนกัม กัวร์กัม กัมอะราบิกและเพคติน พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดปีทรูทโดยการใช่มอลโทเดกซ์ตรินผสมแซนแทนกัม ทำให้ได้ปริมาณสารปีตาไซยานินในผงสารสกัดมากกว่าในผงสารสกัดที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีแบบพ่นฝอยมากถึง 1.3 เท่า นอกจากนี้การใช่มอลโทเดกซ์ตรินผสมแซนแทนกัม สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินได้มากที่สุด ซึ่งได้ค่ามากกว่าการใช่มอลโทเดกซ์ตรินเพียงชนิดเดียวมากถึง 65 % ตามด้วยมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม กัมอะราบิกและเพคติน ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถช่วยลดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินในระหว่างการทำแห้งได้ และการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ 2 ชนิดผสมกัน สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินได้ดีกว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพียงชนิดเดียว

## 2.10 การประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมลงในอาหารและเครื่องดื่ม

นอกจากการทำแห้งสารปีตาไซยานินสำหรับการนำไปใช้ในอาหารและเครื่องดื่ม การรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานิน สามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ ไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมลงในอาหารและเครื่องดื่ม เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์มีสมบัติละลายได้ดีในน้ำ จึงสามารถเติมเป็นส่วนผสมลงในอาหารและเครื่องดื่มได้ ในปัจจุบันมีงานวิจัยศึกษาการรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินโดยการเติมไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมลงในอาหารและเครื่องดื่มที่มีองค์ประกอบของสารปีตาไซยานิน ไฮโดรคอลลอยด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของสารปีตาไซยานิน จึงทำให้ลดอัตราการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน

Leong และคณะ (2018) ทำการศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งอาหารต่อการรักษาเสถียรภาพสารปีตาไซยานินจากเปลือกและเนื้อของแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง โดยใช้สารเติมแต่งได้แก่ Ascorbic acid และกัวร์กัม (Guar gum) เติมลงในสารสกัดจากแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงและเก็บรักษาเป็นเวลา 10 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้กัวร์กัม ที่ 0.5 % w/v สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินในสารสกัดจากเปลือกและเนื้อของแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงได้เมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 10 วัน โดยสารสกัดที่มีการเติมกัวร์กัมมีปริมาณสารปีตาไซยานิน เท่ากับ 47-66 % มากกว่าสารสกัดที่ไม่ได้เติมกัวร์กัม มีค่าเท่ากับ 42-52 %

Marchuk และคณะ (2019) ได้ศึกษาการรักษาความเสถียรของสีจากสารปีตาไซยานินในน้ำปีทรุทที่ pH 3.2 และ 5 โดยการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ กัมอะราบิก แชนแทนกัม โซเดียมอัลจินेटและเพคตินจากปีทรุท ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า น้ำสารสกัดปีทรุทที่มีการเติมแชนแทนกัม มีค่าร้อยละปริมาณสารปีตาไซยานินหลังการเก็บรักษามากที่สุด มีค่าเท่ากับ  $135.7 \pm 34.8$  % (pH 3.2) และ  $102.3 \pm 4.0$  % (pH 5.0) มากกว่าปริมาณสารปีตาไซยานินในน้ำสารสกัดปีทรุทที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม)  $69.0 \pm 3.0$  % (pH 3.2) และ  $64.3 \pm 5.0$  (pH 5.0) ค่าการเปลี่ยนของสี ( $\Delta E^*$ ) หลังจากการเก็บรักษา พบว่า น้ำสารสกัดปีทรุท (pH 5) ที่เติมแชนแทนกัมมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีเท่ากับ  $3.0 \pm 0.1$  น้อยกว่าตัวควบคุม  $15.3 \pm 3.4$  ดังนั้นแชนแทนกัมสามารถช่วยรักษาความเสถียรของสีในน้ำปีทรุทได้ในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องจากแชนแทนกัมสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับสารปีตาไซยานินได้ดีกว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น อีกทั้งแชนแทนกัมยังมีสมบัติทนกรด จึงมีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องดื่มหรือสารละลายที่มีการปรับกรด

### บทที่ 3

#### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัตถุดิบ

- แก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (ระยะเวลาการสุก 30-40 วันหลังจากออกดอก) จากสวนเกษตรแก้วมังกร รังสิต คลอง 10 จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย
- มอลโทเดกซ์ทรีน DE 16 - 19 (Food Grade, China)
- กัวร์กัม (Food Grade, China)
- แชนแทนกัม (Food Grade, Pernhofen, Austria)

##### 3.2 สารเคมี

- Folin & Ciocalteu phenol reagent (A.R. grade, Loba Chemie, India)
- Gallic acid (A.R. grade, Sigma-Aldrich, USA)
- Quercitin (A.R. grade, Sigma-Aldrich, USA)
- 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (A.R. grade, Sigma-Aldrich, USA)
- Absolute Ethanol 99.9% (A.R. grade, QRëC®, Newzealand)
- Methanol 99.9 % (A.R. grade, QRëC®, Newzealand)
- 2,4,6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ) (A.R. grade, Sigma-Aldich, USA)
- Sodium acetate tetra-hydrate (A.R. grade, KemAus, Australia)
- Sodium carbonate (A.R. grade, KemAus, Australia)
- Sodium Chloride (A.R. grade, Univar, Australia)
- Aluminium Chloride (A.R. grade, Univar, Australia)
- Acetic Acid Glacial (A.R. grade, QRëC®, Newzealand)
- Hydrochloric acid (A.R. grade, QRëC®, Newzealand)
- Iron (II) Sulfate heptahydrate (A.R. grade, QReC, New Zealand)
- Iron (III) Chloride hexahydrate (A.R. grade, QReC, New Zealand)
- Di-Sodium hydrogen orthophosphate (A.R. grade, Unilab, Newzealand)
- Potassium acetate (A.R. grade, KemAus, Australia)
- Citric Acid (Food grade)
- Sodium benzoate (Food grade)

- Sodium Hydroxide (Food grade)

### 3.3 เครื่องมือ

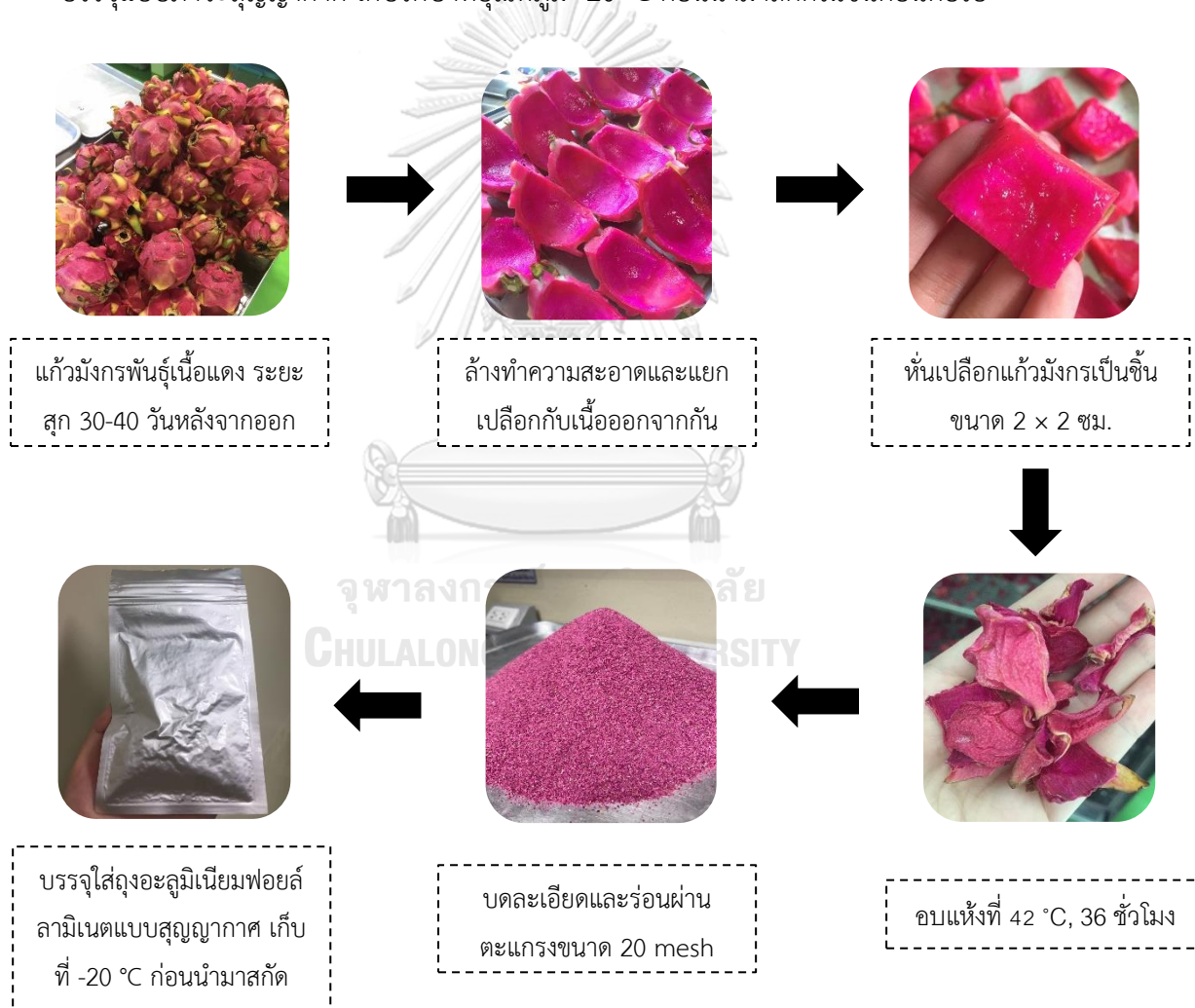
- เครื่อง Ultrasonic bath sonicator (Elma Schmidbauer, รุ่น E70H, Germany)
- เครื่อง Ultrasonic probe sonicator (Hielscher, รุ่น UP400S, Germany)
- เครื่อง Ultrasonic probe sonicator (Sonics, รุ่น VCX 500,750, USA)
- เครื่อง Centrifuge (Hettich zentrifugen, รุ่น 1610, Germany)
- เครื่อง Chroma Meters (Model CR-400 series, Minolta, Japan)
- เครื่อง ColorQuest XT (HunterLab, รุ่น CQXT, USA)
- เครื่อง Water activity (AQUA Lab, รุ่น 3TE, USA)
- เครื่อง Moisture Analyzer (Mettler Toledo, รุ่น HB43-S, Switzerland)
- เครื่อง Viscometer (Fungi Lab, รุ่น Premium, Spain)
- เครื่อง Freeze dryer (Labconco®, รุ่น 7753501, USA)
- เครื่อง Hot air oven (Guangdong IKE, รุ่น WRH-100B, China)
- เครื่อง pH meter (Mettler toledo, Switzerland)
- เครื่อง Rotary evaporator (Buchi Rotavapor รุ่น R-114, Germany)
- เครื่อง UV-visible spectrophotometer (Thermo Fisher, รุ่น 840-211000, USA)
- เครื่อง Vacuum sealer (Multivac, รุ่น A300/16, Germany)
- เครื่อง Vortex mixer (Ohaus, รุ่น VXMNAL, USA)
- เครื่อง Water bath (GFL, รุ่น 1086, Germany)
- เครื่อง Magnetic stirrer (Steromag, Steroglass, Italy)
- เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าตติยนิยม 2 ตำแหน่ง (ML204 Mettler Toledo, Switzerland)
- เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าตติยนิยม 4 ตำแหน่ง (ML204 Mettler Toledo, Switzerland)
- ตู้แช่เยือกแข็ง -20 °C (Sanyo, รุ่น MDF-136, Japan)
- ตู้เย็น 4 °C (Panasonic, รุ่น SBC-P2DB, Thailand)
- ตะแกรงร่อนขนาด 20 mesh (Retsch, รุ่น 807766, Germany)



### 3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมตัวอย่างผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2021) และทรงพร คำคม (2560) เริ่มโดยการนำแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง (ที่มีระยะเวลาการสุก 30-40 วันหลังจากออกดอก) มาล้างทำความสะอาด จากนั้นปอกเปลือกแยกส่วนเนื้อและเปลือกออกจากกัน และนำเปลือกแก้วมังกรมาหั่นเป็นชิ้นขนาด 2x2 เซนติเมตร อบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 42 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง (ความชื้นเหลือต่ำกว่า 30 %) นำเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาบดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh (อนุภาคขนาด น้อยกว่า 0.8 mm) แล้วนำมาบรรจุใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ลามิเนต โดยบรรจุแบบภาวะสุญญากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 °C ก่อนนำมาสกัดในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.1 การเตรียมผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

### 3.4.2 ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารปีตาไซยานิน

นำตัวอย่างผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงที่ได้จากข้อ 3.4.1 ปริมาณ  $10 \pm 0.01$  g มาแช่ในสารละลายเอทานอลผสมกับน้ำ (50 % v/v) ปริมาตร 500 mL จากนั้นนำไปสกัดด้วยวิธีต่างๆ ทั้งหมด 4 วิธี ดังนี้

#### 3.4.2.1 การสกัดวิธีดั้งเดิม (CE)

ตามวิธีของ ทรงพร คำคม (2560) หลังจากผสมผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงกับตัวทำละลายเอทานอล 50 % v/v นำมาควนผสมความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 3.4.2.2 การสกัดวิธีอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ (UI-B)

ดัดแปลงจากวิธีของ Ramil และคณะ (2014) นำสารสกัด 250 mL จุ่มลงในอ่าง Ultrasonic bath sonicator (Elma Schmidbauer, รุ่น E70H, Germany) โดยใช้ความถี่ 50 kHz, 520 W เป็นเวลา 30 นาที

#### 3.4.2.3 การสกัดวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (UI-P)

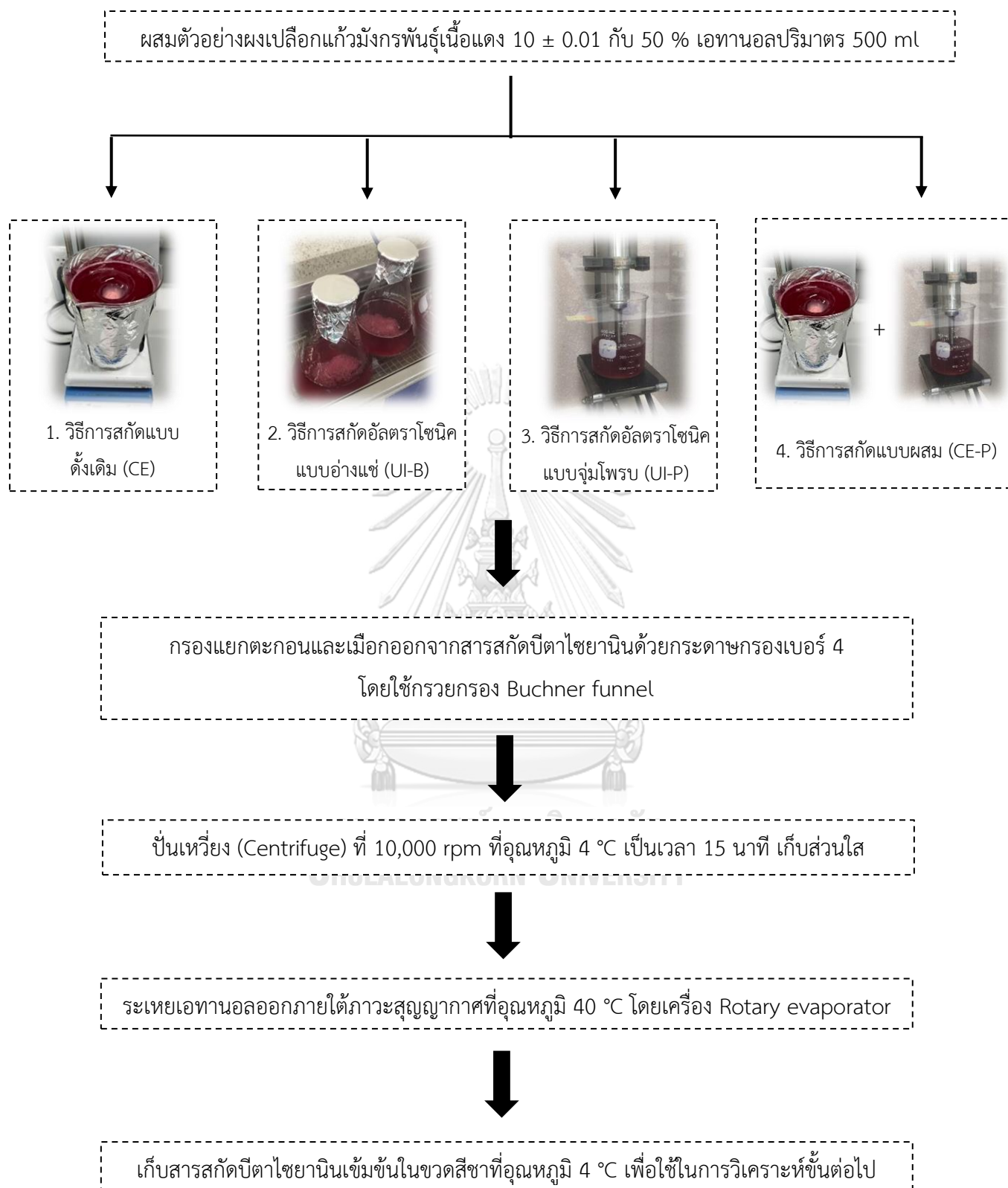
ดัดแปลงจากวิธีของ Carrera และคณะ (2021) นำสารสกัด 250 mL มาสกัดด้วย Ultrasonic probe sonicator (Hielscher, รุ่น UP400S, Germany) ความถี่ 25 kHz, 400 W แอมพลิจูด 30 % หัวโพรบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm โดยจุ่มหัวโพรบเป็นเวลา 5 นาที

#### 3.4.2.4 การสกัดวิธีแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมและวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (CE-P)

ดัดแปลงจากวิธีของ Tutunchi และคณะ (2019) ควนผสมสารสกัดที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปสกัดด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (25 kHz, 400 W) เป็นเวลา 5 นาที

#### 3.4.2.5 การกำจัดตะกอนและระเหยตัวทำละลายในสารสกัดปีตาไซยานิน

นำสารสกัดที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 โดยใช้ตัวกรอง Buchner funnel และนำสารละลายที่ได้มาปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ 10,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 15 นาที เก็บส่วนใส (Supernatant) ไประเหยเอทานอลออกภายใต้ภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C โดยเครื่อง Rotary evaporator หลังจากนั้นเก็บสารสกัดปีตาไซยานินเข้มข้นในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขั้นต่อไป



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสกัดสารปีตาไซยานินจากตัวอย่างผงเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง

### 3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติของสารสกัดบีตาไซยานินเข้มข้น

#### 3.4.3.1 สมบัติทางเคมี

3.4.3.1.1 HPLC-DAD analyses วิเคราะห์ชนิดสารบีตาไซยานินตามวิธีของ Pasko และคณะ (2021) (ภาคผนวก ข.2.2) และชนิดสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ตามวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.2.1)

3.4.3.1.2 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content) ตามวิธีของ Wu และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.3)

3.4.3.1.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds) วิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu (FC) ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.4)

3.4.3.1.4 ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (Flavonoids Content) ดัดแปลงจากวิธีของ Aryal และ คณะ (2019) (ภาคผนวก ข.5)

3.4.3.1.5 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.6)

3.4.3.1.6 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power Assay (FRAP) ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.7)

#### 3.4.3.2 สมบัติทางกายภาพ

3.4.3.2.1 ค่าสี โดยใช้เครื่อง Minolta CR-400 colorimeter ระบบ  $L^* a^* b^*$  (ภาคผนวก ก.1)

### 3.4.4 ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) สารสกัดบีตาไซยานินในระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์

การคัดเลือกวิธีการสกัดสารบีตาไซยานินที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากวิธีการสกัดที่สามารถสกัดสารบีตาไซยานินได้ในปริมาณมากที่สุด ในขั้นตอนนี้สกัดสารบีตาไซยานินโดยใช้เครื่อง Ultrasonic probe sonicator (Sonic, รุ่น VCX 500,750, USA) และทำการสกัดสารบีตาไซยานินจำนวนหลายครั้งเพื่อให้ได้ปริมาณสารสกัดเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์

สมบัติต่างๆ และการนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานิน โดยให้ได้สารบีตาไซยานินอย่างน้อย 19 ลิตร

#### 3.4.4.1 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานินโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ดัดแปลงจากวิธีของ Chranioti และคณะ (2015) และ Flores-Mancha และคณะ (2020) หลังจากนั้นนำมาทำแห้งโดยเริ่มจากการเตรียมสารห่อหุ้ม ดังตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** ความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดสำหรับทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานิน

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ความเข้มข้น (% w/v)
ตัวควบคุม (C)	-
กัวร์กัม (GG)	0.5
แซนแทนกัม (XG)	0.5
มอลโทเดกซ์ตริน DE 16-19 (MD)	20
มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	10 : 1.0
มอลโทเดกซ์ตรินผสมแซนแทนกัม (MD:XG)	10 : 0.1

ความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด ได้จากการศึกษาทดลองก่อนเริ่มงานวิจัย โดยเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นในช่วงต่างๆ ของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด และเลือกสูตรของไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผสมด้วยการทำ Mixture design เลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด โดยพิจารณาจากค่าการละลาย (Water soluble index), ประสิทธิภาพการกักเก็บ (Encapsulation efficiency) และปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินหลังการทำแห้ง (ภาคผนวก ค.2)

นำผงไฮโดรคอลลอยด์ละลายในน้ำกลั่น 100 mL นำไปแช่ใน Water bath ที่ 150 rpm เป็นเวลาข้ามคืน จากนั้นนำสารห่อหุ้มที่ได้ผสมกับสารบีตาไซยานินในอัตราส่วน 3:1 (Saenz et al., 2019) และนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำ -20 °C 48 ชั่วโมง และนำเข้าเครื่อง Freeze dryer โดยใช้อุณหภูมิต่ำ -85 °C ความดัน 0.008

Bar เป็นเวลา 5 วัน จนกระทั่งผงสารสกัดบีตาไซยานินมีความเข้มข้นน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 2 (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006) จากนั้นนำผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้บรรจุใส่ถุงอลูมิเนียมพอยล์ลามิเนตแบบสุญญากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C สำหรับวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

#### 3.4.4.2 การวิเคราะห์สมบัติของผงสารสกัดบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์ (วิเคราะห์ทุกๆ สัปดาห์)

##### 3.4.4.2.1 สมบัติทางเคมี

3.4.4.2.1.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (Yield %) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Flores-Mancha และคณะ (2020) วิเคราะห์สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา (ภาคผนวก ข.1)

3.4.4.2.1.2 HPLC-DAD analyses วิเคราะห์ชนิดสารบีตาไซยานินตามวิธีของ Pasko และคณะ (2021) (ภาคผนวก ข.2.2) และชนิดสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ตามวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.2.1) โดยวิเคราะห์เพียง ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ใช่ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) ในสัปดาห์สุดท้ายของการเก็บรักษา

3.4.4.2.1.4 ประสิทธิภาพการกักเก็บ (% Encapsulation efficiency) ตามวิธีของ Robert และคณะ (2015) (ภาคผนวก ข.8)

3.4.4.2.1.5 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content) ตามวิธีของ Wu และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.3)

3.4.4.2.1.6 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.6)

3.4.4.2.1.7 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power Assay (FRAP) ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และ คณะ (2016) (ภาคผนวก ข.7)

3.4.4.2.1.8 อัตราการสลายตัวทางจลนพลศาสตร์ (Degradation kinetics) ดัดแปลงจากวิธีของ Karangutkar และ Ananthanarayan

(2020) โดยคำนวณค่า First order degradation rate constant (k) (ภาคผนวก ข.9)

### 3.4.4.2.2 สมบัติทางกายภาพ

3.4.4.2.2.1 ค่าสี โดยใช้เครื่อง Minolta CR-400 colorimeter ระบบ L\* a\* b\* (CIE LAB) และคำนวณค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E^*$ ) (ภาคผนวก ก.1)

3.4.4.2.2.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity) โดยใช้เครื่อง Water activity (AQUA Lab) (ภาคผนวก ก.2)

3.4.4.2.2.3 ค่าความชื้น (Moisture content) โดยใช้เครื่อง Moisture Analyzer (ภาคผนวก ก.3)

3.4.4.2.2.4 ค่าการดูดความชื้น (Hygroscopicity) ตามวิธีของ Fernandes และคณะ (2013) (ภาคผนวก ก.4)

3.4.4.2.2.5 ค่าการละลาย (Water Solubility Index, WSI) ดัดแปลงจากวิธีของ Bakar และคณะ (2012) (ภาคผนวก ก.5)

3.4.4.2.2.6 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ตามวิธีของ Fernandes และคณะ (2013) (ภาคผนวก ก.6)

### 3.4.5 ศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการทำแห้งลงในเครื่องตีหม้อ จำลอง โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 สัปดาห์

#### 3.4.5.1 การเตรียมเครื่องตีหม้อจำลอง

โดยดัดแปลงจากวิธีของ Tutunchi และคณะ (2019) และ Karangutkar และ Ananthanarayan (2020) โดยการนำกรดซิตริก 1 % w/v ผสมในน้ำ 1 ลิตร จากนั้นปรับค่า pH 3.4 โดยใช้ 1 M NaOH ผสมผงบีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือกจากข้อ 3.4.4 ในปริมาณ เท่ากับ 0.5 % w/v โดยการคัดเลือกผงสารสกัดบีตาไซยานิน พิจารณาจากค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสารบีตาไซยานิน (Degradation rate constant) ที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบ่งบอกถึงการลดลงของปริมาณสารบีตาไซยานินน้อยที่สุดในระหว่างการเก็บรักษา รวมถึงพิจารณาจากค่ากิจกรรมของน้ำ ( $a_w$ ) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผงสารสกัดบีตาไซยานินควรมีค่าน้อยที่สุดหรือน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) จากนั้นผสม Sodium benzoate (0.05% w/v) ผสมส่วนผสมให้เข้ากันและนำไป

ฆ่าเชื้อด้วยวิธีพาสเจอร์ไรส์เซชัน (HTST, high temperature short time) ที่อุณหภูมิ 70-72 °C เป็นเวลา 15 วินาที (Hasani et al., 2021) จากนั้นบรรจุเครื่องต้มจำลองปริมาตร 100 mL ลงในขวดพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) ขนาด 120 mL ปิดฝาและนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ สำหรับวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

### 3.4.5.2 การวิเคราะห์สมบัติของเครื่องต้มจำลองในระหว่างการเก็บรักษา (วิเคราะห์ทุกๆ สัปดาห์)

#### 3.4.5.2.1 สมบัติทางเคมี

3.4.5.2.1.1 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content) ตามวิธีของ Wu และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.3)

3.4.5.2.1.2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds) วิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu (FC) ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และ คณะ (2016) (ภาคผนวก ข.4)

3.4.5.2.1.3 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) (ภาคผนวก ข.6)

3.4.5.2.1.4 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power Assay (FRAP) ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และ คณะ (2016) (ภาคผนวก ข.7)

3.4.5.2.1.5 อัตราการสลายตัวทางจลนพลศาสตร์ (Degradation kinetics) ดัดแปลงจากวิธีของ Karangutkar และ Ananthanarayan (2020) โดยคำนวณค่า First order degradation rate constant (k) โดยวิเคราะห์ในสัปดาห์สุดท้ายของการเก็บรักษา (ภาคผนวก ข.9)

#### 3.4.5.2.2 สมบัติทางกายภาพ

3.4.5.2.2.1 ค่าสี โดยใช้เครื่อง HunterLab ColorQuest XT ระบบ L\* a\* b\* (CIE LAB) คำนวณค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E^*$ ) (ภาคผนวก ก.1)

3.4.5.2.2.2 ค่าความหนืด (Viscosity) ตามวิธีของ Tongkham และ คณะ (2017) โดยใช้เครื่อง Brookfield viscometer ขนาดหัว R2 ความเร็วรอบ 100 rpm (ภาคผนวก ก.7)



### 3.4.5.2.2.3 ค่าความขุ่น (Turbidity) ตัดแปลงจากวิธีของ Barbosa และคณะ (2005) (ภาคผนวก ก.8)

#### 3.4.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Fisher's Least-Significant Difference : LSD และวิเคราะห์ค่า Correlation ด้วยวิธี Pearson's Correlation ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics เวอร์ชัน 22 ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารบีตาไซยานิน

##### 4.1.1 ค่าสี ( $L^*$ $a^*$ $b^*$ Hue° และ Chroma\*)

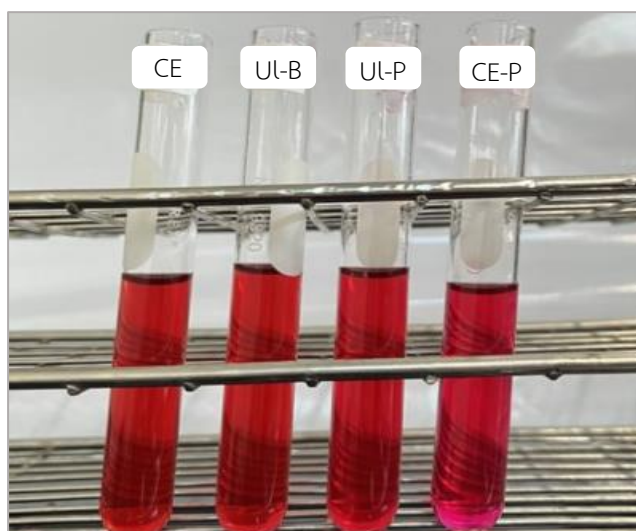
จากผลการศึกษาค่าสีของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน (ดังตารางที่ 4.1) พบว่า สารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีการสกัดแบบผสม (CE-P) ทำให้ค่าความสว่าง (Lightness,  $L^*$ ) ค่าสีแดง (Redness,  $a^*$ ) ค่าสีเหลือง (Yellowness,  $b^*$ ) ค่ามุมของฮิว (Hue angle, H°) และค่าความอิ่มตัว (Chroma,  $C^*$ ) ในปริมาณมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.1 ค่าสีของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

วิธีการสกัด	CE	UI-B	UI-P	CE-P
$L^*$	30.05 <sup>bc</sup> ± 0.12	30.39 <sup>ab</sup> ± 0.28	29.78 <sup>c</sup> ± 0.40	30.62 <sup>a</sup> ± 0.07
$a^*$	20.42 <sup>b</sup> ± 0.39	19.20 <sup>c</sup> ± 0.67	20.53 <sup>b</sup> ± 0.53	25.45 <sup>a</sup> ± 0.41
$b^*$	-6.65 <sup>c</sup> ± 0.02	-7.66 <sup>b</sup> ± 0.56	-8.10 <sup>b</sup> ± 0.20	-10.47 <sup>a</sup> ± 0.40
Hue°	359.69 <sup>b</sup> ± 0.01	359.62 <sup>c</sup> ± 0.02	359.62 <sup>c</sup> ± 0.01	359.74 <sup>a</sup> ± 0.02
Chroma*	21.47 <sup>b</sup> ± 0.36	20.67 <sup>c</sup> ± 0.75	22.08 <sup>b</sup> ± 0.48	27.53 <sup>a</sup> ± 0.40

หมายเหตุ : <sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละวิธีการสกัด (แนวแนว) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

เนื่องจากในสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีการสกัดแบบผสมมีปริมาณสารบีตาไซยานินมากที่สุด จึงทำให้มีความเข้มของสีแดงม่วงที่มากที่สุด (ดังตารางที่ 4.2) นอกจากนี้ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าทุกวิธีการสกัด ค่า  $a^*$  มีค่าเป็นบวก และค่า  $b^*$  มีค่าเป็นลบ สามารถบ่งชี้ได้ว่า สีของสารสกัดที่ได้จากทุกวิธีการสกัดมีค่าสีอยู่ในช่วงสีแดงม่วงเหมือนกัน (รูปที่ 4.1) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการสกัดที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อค่าสีของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้



รูปที่ 4.1 สารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแตกต่างกัน

#### 4.1.2 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content)

จากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ วิธีการสกัดแบบดั้งเดิม (CE) วิธีอัลตราโซนิคแบบอ่างแช่ (UL-B) วิธีอัลตราโซนิคแบบจุ่มโพรบ (UL-P) และวิธีแบบผสมระหว่างวิธีดั้งเดิมและวิธีอัลตราโซนิคแบบจุ่มโพรบ (CE-P) ดังตารางที่ 4.2 พบว่า การสกัดด้วยวิธีแบบผสม (CE-P) สามารถทำให้ได้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากที่สุด โดยปริมาณสารบีตาไซยานิน มีค่าเท่ากับ  $151.80 \pm 1.09$  mg/100g สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ  $34.27 \pm 0.80$  mgGA/100ml และสารฟลาโวนอยด์เท่ากับ  $4.42 \pm 0.18$  mgQE/100ml

ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแตกต่างกัน

วิธีการสกัด	ปริมาณสารบีตาไซยานิน (mg/100ml)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (mgGA/100ml)	ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (mgQE/100ml)
CE	$120.36^c \pm 0.56$	$31.07^b \pm 0.14$	$3.84^b \pm 0.08$
UL-B	$107.20^d \pm 1.04$	$19.32^c \pm 1.34$	$2.90^c \pm 0.11$
UL-P	$126.91^b \pm 1.33$	$29.63^b \pm 0.52$	$3.64^b \pm 0.07$
CE-P	$151.80^a \pm 1.09$	$34.27^a \pm 0.80$	$4.42^a \pm 0.18$

หมายเหตุ : <sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละวิธีการสกัด (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณสารปีตาไซยานินในสารสกัดที่ได้จากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าวิธีการสกัดแบบผสม (CE-P) มีค่าปริมาณสารปีตาไซยานินสูงสุด คือ  $151.80 \pm 1.09$  mg/100ml รองลงมาคือ วิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (UL-P), วิธีการสกัดแบบดั้งเดิม (CE) และวิธีอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ (UL-B) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $126.91 \pm 1.33$  ,  $120.36 \pm 0.56$  and  $107.20 \pm 1.04$  mg/100ml ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าที่ได้ในงานวิจัยมีค่ามากกว่างานวิจัยที่ศึกษาการสกัดสารปีตาไซยานินจากแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง งานวิจัยของ Ramil และคณะ (2014) ศึกษาการสกัดสารปีตาไซยาโดยใช้วิธีการสกัดอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ ได้ปริมาณสารปีตาไซยานินเท่ากับ 17.64-73.84 mg/100g และงานวิจัยที่ศึกษาการใช้วิธีการสกัดอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ ได้ปริมาณสารปีตาไซยานินเท่ากับ 34 mg/100g (Van et al., 2020) และ 84-131 mg/100g (Carrera et al., 2021) การสกัดสารปีตาไซยานินจากแก้วมังกร ด้วยวิธี Ultrasound assisted extraction สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ดีกว่าใช้วิธีแบบดั้งเดิม เนื่องจากผลของการเกิด cavitation จากการสั่นของคลื่นเสียงช่วยให้สามารถทำลายเซลล์ให้แตกออก ตัวทำละลายจึงสามารถเข้าไปสกัดสารปีตาไซยานินออกมาได้มากกว่าวิธีวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ที่แช่ผสมทิ้งไว้ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการสกัดแบบอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ (UL-B) ทำให้ได้ปริมาณสารสกัดปีตาไซยานินน้อยกว่าแบบดั้งเดิม (CE) เนื่องจากในระหว่างกระบวนการสกัด ตัวอย่างมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและใช้เวลานานกว่าเมื่อเทียบกับวิธีแบบอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (UL-P) จึงอาจส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheok และคณะ (2013) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดอัลตราโซนิกแบบอ่างแช่ (UL-B) และแบบจุ่มโพรบ (UL-P) ต่อการสกัดสารให้สีแอนโทไซยานิน (Anthocyanins) ซึ่งวิธีการสกัดแบบ UL-P ทำให้ได้ปริมาณสารแอนโทไซยานินมากกว่าวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีแบบอ่างแช่ ทั้งนี้ วิธีแบบผสมทำให้ได้ปริมาณสารปีตาไซยานินสูงสุดซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้บ่งชี้ได้ว่า การใช้เทคนิคในการสกัดสารร่วมกันสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารปีตาไซยานิน ได้ดีกว่าการใช้วิธีแบบดั้งเดิมแบบเดียว (Koubaa et al., 2016)

#### 4.1.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total phenolic compounds, Total flavonoids content)

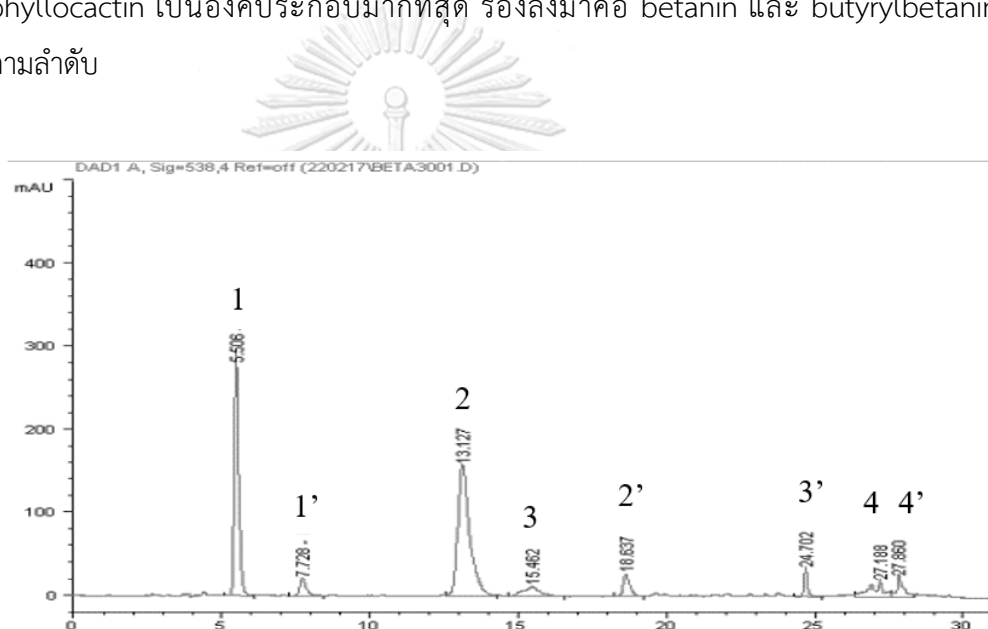
จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (ตารางที่ 4.2) พบว่า แนวโน้มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์มีปริมาณเป็นไปในทิศทางเดียวกันของแต่ละวิธีการสกัด เนื่องจากสารฟลาโวนอยด์เป็นองค์ประกอบของสารในกลุ่มฟีนอลิก โดยวิธีการสกัดแบบผสม (CE-P) ทำให้ได้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์ออกมาในปริมาณมากที่สุด เท่ากับ  $34.27 \pm 0.80$  mgGA/100ml และ  $4.42 \pm 0.18$  mgQE/ 100g ตามลำดับ รองลงมาคือ วิธีการสกัดแบบ วิธีการสกัดแบบดั้งเดิม (CE), วิธีการอัลตราโซนิคแบบจุ่มโพรบ (UL-P) และวิธีการอัลตราโซนิคแบบอ่างแช่ (UL-B) ตามลำดับ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์ที่ได้จากวิธีการสกัดแบบ วิธีการสกัดแบบดั้งเดิม (CE) กับวิธีการอัลตราโซนิคแบบจุ่มโพรบ (UL-P) มีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งนี้เนื่องจากสารฟีนอลิกมีสมบัติละลายน้ำได้ดี ดังนั้นการสกัดด้วยแบบดั้งเดิม (CE) สามารถทำให้สกัดสารประกอบฟีนอลิกออกมาจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงได้ในปริมาณมาก โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheok และคณะ (2013) ศึกษาวิธีการสกัดแบบ อัลตราโซนิคสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารให้สีแอนโทไซยานิน แต่ไม่ได้มีส่วนช่วยในการสกัดสารประกอบฟีนอลิก นอกจากนี้งานวิจัยของ Adje และคณะ (2020) ศึกษาวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารแอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์จากดอกนกยูงฝรั่ง (*Delonix regia*) พบว่า การสกัดด้วยวิธีการอัลตราโซนิคแบบอ่างแช่ไม่ได้มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์เมื่อเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ดังนั้นการประยุกต์ใช้วิธีการสกัดทั้งสองวิธีร่วมกัน จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดมากยิ่งขึ้น

#### 4.1.4. การระบุชนิดสารองค์ประกอบในสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากวิธีการสกัดแบบผสม (CE-P)

##### 4.1.4.1 ชนิดของสารปีตาไซยานินในสารสกัด

จากการศึกษาวิเคราะห์ชนิดของสารองค์ประกอบกลุ่มปีตาไซยานินในสารสกัดเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงด้วยวิธี HPLC ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า องค์ประกอบสารปีตาไซยานินที่พบในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง เป็นสาร betanin, isobetainin, phyllocactin

และไอโซเมอร์ C<sub>15</sub> ของสารปีตาไซยานิน อื่นๆ จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของสารปีตาไซยานินด้วยวิธี HPLC พบว่า ในสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแบบผสม มีองค์ประกอบหลักของสารปีตาไซยานินจำนวน 8 ชนิด ได้แก่ betanin (peak 1), isobetanin (peak 1'), phyllocactin (peak 2), isophyllocactin (peak 2'), butyrylbetanin (peak 3), isobutyrylbetanin (peak 3'), 2'-apiosyl phyllocactin (peak 4) และ 2'-apiosyl-isophyllocactin (peak 4') ทั้งนี้ สารปีตาไซยานินที่พบในงานวิจัย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Herbach และคณะ (2004), Naderi และคณะ (2012) และ Fathordoobady และคณะ (2016) โดยพบว่าในสารสกัดมีปีตาไซยานินชนิด phyllocactin เป็นองค์ประกอบมากที่สุด รองลงมาคือ betanin และ butyrylbetanin ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 โครมาโทแกรมของสารในสารสกัดที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P)

#### 4.1.4.2 ชนิดของสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในสารสกัด

สารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแบบผสม (CE-P) ได้นำมาวิเคราะห์ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ด้วยวิธี HPLC แสดงดังตารางที่ 4.3 (ผลการวิเคราะห์โครมาโทแกรมในภาคผนวก ค.3)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีแบบผสม

ชนิดของสารประกอบฟีนอลิก	ปริมาณ (mg/100mL)
<b>กลุ่มของกรดฟีนอลิก</b>	
4-Hydroxybenzoic acid	9.77 ± 0.31
syringic acid	0.80 ± 0.05
gallic acid	0.33 ± 0.03
sinapic acid	0.21 ± 0.08
<i>p</i> -coumaric acid	0.12 ± 0.01
ferulic acid	0.09 ± 0.03
<b>กลุ่มของฟลาโวนอยด์</b>	
rutin	0.70 ± 0.01

จากการวิเคราะห์ชนิดของสารองค์ประกอบกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในสารสกัดเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงด้วยวิธี HPLC ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ในสารสกัดมีองค์ประกอบของสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ 4-Hydroxybenzoic acid, syringic acid, gallic acid, sinapic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid มีค่าเท่ากับ 9.77 ± 0.31, 0.80 ± 0.05, 0.33 ± 0.03, 0.21 ± 0.08, 0.12 ± 0.01, และ 0.09 ± 0.03 mg/100ml ตามลำดับ และสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ 1 ชนิด ได้แก่ rutin มีค่าเท่ากับ 0.70 ± 0.01 mg/100ml ซึ่งปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกที่พบในงานวิจัยนี้ มีค่าแตกต่างจากงานวิจัยที่ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง โดยงานวิจัยของ Huang และคณะ (2021) พบสาร syringic acid, gallic acid และ rutin มีค่าเท่ากับ 0.065 ± 0.00, 0.160 ± 0.02 และ 0.027 ± 0.00 mg/100ml ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าที่พบในงานวิจัยนี้ ในขณะที่สาร sinapic acid, *p*-coumaric acid และ ferulic acid มีค่าเท่ากับ 1.12 ± 0.80 mg/100ml, 1.52 ± 1.40 mg/100ml และ 14.37 ± 9.30 mg/100ml ตามลำดับ โดยมีปริมาณมากกว่าที่พบในงานวิจัย นอกจากนี้ งานวิจัยของ Pasko และคณะ (2021) ศึกษาเปรียบเทียบของค์ประกอบสารฟีนอลิกในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อขาวจากประเทศไทยและประเทศอิสราเอล พบว่า แก้วมังกรที่มาจากประเทศอิสราเอลมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากกว่าแก้วมังกรที่มาจากประเทศไทย โดยสารประกอบฟีนอลิกที่พบในแก้วมังกรจากประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สารกลุ่มกรดฟีนอลิกพบสาร gallic

acid ปริมาณ  $23.86 \pm 0.70$  mg/100g และสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ พบสาร myricetin, rutin และ quercetin ปริมาณ  $17.95 \pm 0.32$ ,  $1.46 \pm 0.13$  และ  $6.37 \pm 0.14$  mg/100ml ตามลำดับ ทั้งนี้ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่พบมีค่ามากกว่าที่พบในงานวิจัย เนื่องจากผลจากปัจจัยต่างๆ เช่น สายพันธุ์แก้วมังกร ปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอก ตำแหน่งที่ตั้งสวนแก้วมังกร ภูมิอากาศ การเพาะปลูกและการบำรุง ตลอดจนระยะการสุกของผลแก้วมังกร การเก็บเกี่ยวและสภาวะการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ ชนิดและปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผลแก้วมังกร ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่พบในแก้วมังกรมีค่าแตกต่างกัน (Pasko et al., 2021)

#### 4.1.5 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P)

ตารางที่ 4.4 ค่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation value, r) ของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P)

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacities)		
DPPH (%inhibition)	$25.11 \pm 1.73$	
FRAP ( $\mu\text{molFe}^{2+}/100\text{ml}$ )	$3287.67 \pm 15.28$	
Correlation value (r)	DPPH	FRAP
Betacyanins content	-	0.866
Total phenolic content	0.855	-
Total flavonoids content	0.698	-

จากผลการทดลองวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีผสม (ดังแสดงในตารางที่ 4.4) พบว่า ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าเท่ากับ  $25.11 \pm 1.73$  % inhibition และ FRAP เท่ากับ  $3287.67 \pm 15.28$   $\mu\text{molFe}^{2+}/100\text{ml}$  โดยมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Ramil และคณะ (2014) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมกับวิธีอัลตราโซนิคแบบอ่างแช่ ในการสกัดสารบีตาไซยานินจากแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง โดยนำสารสกัดที่ได้ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งก่อนการวิเคราะห์ พบว่า ทั้งสองวิธีผงสารสกัดมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระแบบกลไก FRAP ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) มีค่าเท่ากับ  $255 \pm 49.94$   $\mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$  ในผงสารสกัดจากวิธีอัลตราโซนิคแบบอ่างแช่ และ  $200.83 \pm 38.3$   $\mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$  ในผงสารสกัดจากวิธีแบบดั้งเดิม ทั้งนี้มีงานวิจัยของ Rebecca และคณะ (2010) สามารถบ่งชี้ได้ว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดเป็น



ผลจากปริมาณสารสำคัญในสารสกัด หากในสารสกัดมีปริมาณสารสำคัญจากพืชในปริมาณมาก จะทำให้มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น นอกจากนี้ ในส่วนของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระแบบกลไกการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ (free radical scavenging) พบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีค่าน้อยกว่าในงานวิจัยของ Tutunchi และคณะ (2019) ที่ศึกษาในสารสกัดจากพืชด้วยวิธีการสกัดแบบผสม มีค่าเท่ากับ  $35.85 \pm 1.49$  % inhibition ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ค่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากงานวิจัยมีความสอดคล้องกับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในสารสกัด โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation value, r) ระหว่างสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระแบบกลไก DPPH มีค่าเป็นบวก เท่ากับ 0.855 และ 0.698 ตามลำดับ และระหว่างสารบีตาไซยานินกับฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระแบบกลไก FRAP มีค่าเป็นบวก เท่ากับ 0.866 จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation value, r) สามารถบ่งชี้ได้ว่า สารบีตาไซยานินมีกลไกการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแบบให้อิเล็กตรอนหรือแบบ FRAP ในสารสกัดพบปริมาณสารบีตาไซยานินในปริมาณมาก จึงทำให้มีค่า FRAP ปริมาณมากเช่นกัน ในส่วนของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในสารสกัดที่ได้ในงานวิจัยมีปริมาณที่ค่อนข้างน้อย จึงส่งผลให้มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระแบบ DPPH มีค่าต่ำ ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva และคณะ (2020) ที่พิสูจน์ได้ว่าสารบีตาไซยานินมีกลไกหลักในการต้านอนุมูลอิสระแบบการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ (electron-donor ability) และสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกมีกลไกต้านอนุมูลอิสระแบบให้โปรตอนกับอนุมูลอิสระ (free radical scavenging)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2 ศึกษาการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงในระหว่างเก็บรักษา

จากการคัดเลือกวิธีการสกัดสารบีตาไซยานินที่เหมาะสมต่อปริมาณสารสำคัญทั้งสารบีตาไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ให้ได้ในปริมาณมากที่สุด พบว่า วิธีการสกัดแบบผสมระหว่างวิธีแบบดั้งเดิมกับอัลตราโซนิกแบบจุ่มโพรบ (CE-P) สามารถสกัดสารต่างๆ ได้ในปริมาณมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกวิธีแบบผสม (CE-P) ในการสกัดสารบีตาไซยานินสำหรับใช้ศึกษาชนิดและความเข้มข้นสารไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษา

#### 4.2.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (Yield %)

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (%) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมชนิดของไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ร้อยละผลผลิตที่ได้ (%)
ตัวควบคุม (C)	40.75 <sup>c</sup> ± 0.06
กัวร์กัม (GG)	49.50 <sup>b</sup> ± 1.15
แซนแทนกัม (XG)	48.44 <sup>b</sup> ± 2.25
มอลโทเดกซ์ตริน (MD)	79.09 <sup>a</sup> ± 0.75
มอลโทเดกซ์ตริน : กัวร์กัม (MD:GG)	77.63 <sup>a</sup> ± 0.71
มอลโทเดกซ์ตริน : แซนแทนกัม (MD:XG)	76.64 <sup>a</sup> ± 2.58

หมายเหตุ : <sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละผลผลิตที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

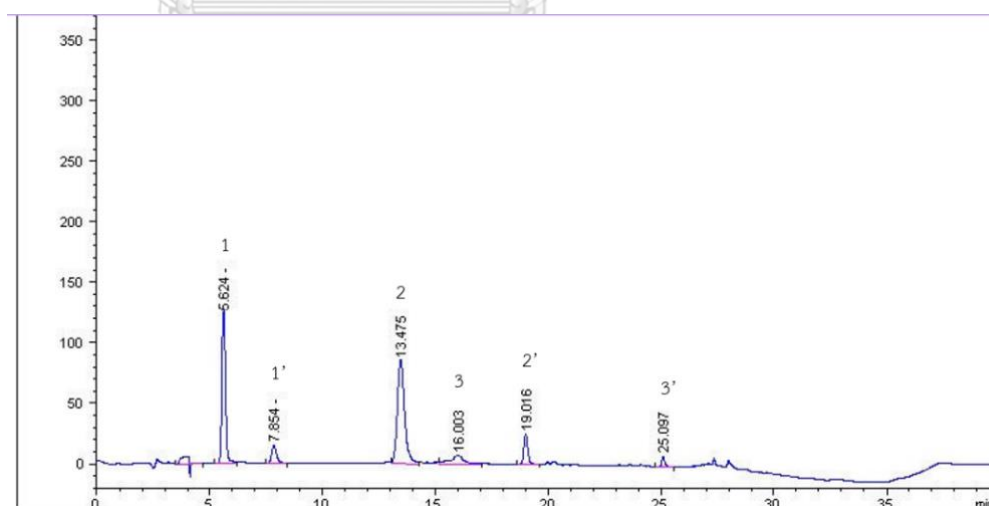
จากการศึกษาร้อยละผลผลิตที่ได้ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า การเติมไฮโดรคอลลอยด์สามารถช่วยเพิ่มปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้มากกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ นอกจากนี้พบว่า การเติมมอลโทเดกซ์ตริน (MD) สามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลผลิตที่ได้มากที่สุด เท่ากับ  $79.09 \pm 0.75$  % การใช้มอลโทเดกซ์ตรินมีส่วนช่วยในการเพิ่มร้อยละของผลผลิตที่ได้จากการทำแห้ง หากเพิ่มปริมาณสารมอลโทเดกซ์ตรินที่ใช้ในการทำแห้งมากขึ้น จะยิ่งทำให้ได้ปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้จากผงหลังการทำแห้งเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Rodriguez et al., 2015) ทั้งนี้ค่าที่ได้จากงานวิจัยมีค่ามากกว่างานวิจัยที่ทำการศึกษากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งน้ำปีทรูทโดยใช้อินนูลินและมอลโทเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ได้ค่าร้อยละผลผลิตที่ได้เท่ากับ 61.678 - 65.329 % (Flores-Mancha et al., 2020), การทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำลูกแพร์แคคตัสม่วง (*Opuntia stricta*) โดยการใช้ส่วนผสมระหว่างมอลโทเดกซ์ตรินและเจลาติน ได้ค่าร้อยละผลผลิตที่ได้เท่ากับ 7.76-14.85 g/100g (Castro-Munoz et al., 2015) และ การทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำลูกแพร์แคคตัส (*Opuntia ficus-indica*) โดยใช้มอลโทเดกซ์ตรินและอินนูลิน ทำให้ได้ค่าผลผลิตที่ได้เท่ากับ 62 และ 81 % ตามลำดับ (Saenz et al., 2009) แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Rodriguez และคณะ (2015) ศึกษาการใช้มอลโทเดกซ์ตรินในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่า ได้ค่าผลผลิตเท่ากับ 89.99 % มีค่ามากกว่าที่

ได้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการใช้ปริมาณผงมอลโทเดกซ์ตรินเท่ากับ 30 %w/v ซึ่งมากกว่าที่ใช้ในงานวิจัยที่ใช้ปริมาณ 20 % w/v

#### 4.2.2 การระบุชนิดสารองค์ประกอบในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) หลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ด้วยวิธีวิเคราะห์ HPLC

##### 4.2.2.1 ชนิดของสารองค์ประกอบบีตาไซยานิน

จากการศึกษาวิเคราะห์ชนิดของสารองค์ประกอบกลุ่มบีตาไซยานินในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ หลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ด้วยวิธี HPLC ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า องค์ประกอบของสารบีตาไซยานินในสารสกัดก่อนการทำแห้งและการเก็บรักษา มีองค์ประกอบของสารบีตาไซยานินทั้งหมด 8 ชนิด (รูปที่ 4.3) แต่เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ชนิดและปริมาณสารบีตาไซยานินมีค่าลดลง โดยพบองค์ประกอบของสารบีตาไซยานิน 6 ชนิด ได้แก่ ได้แก่ betanin (peak 1), isobetanin (peak 1'), phyllocactin (peak 2), isophyllocactin (peak 2'), butyrylbetanin (peak 3), isobutyrylbetanin (peak 3') องค์ประกอบสารบีตาไซยานินที่พบในปริมาณมากที่สุดในผงสารสกัดบีตาไซยานิน ได้แก่ Phyllocactin ตามด้วย betanin และ butyrylbetanin ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 โครมาโทแกรมสารองค์ประกอบของสารบีตาไซยานินในผงสารสกัดที่ไม่ใช่ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) หลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

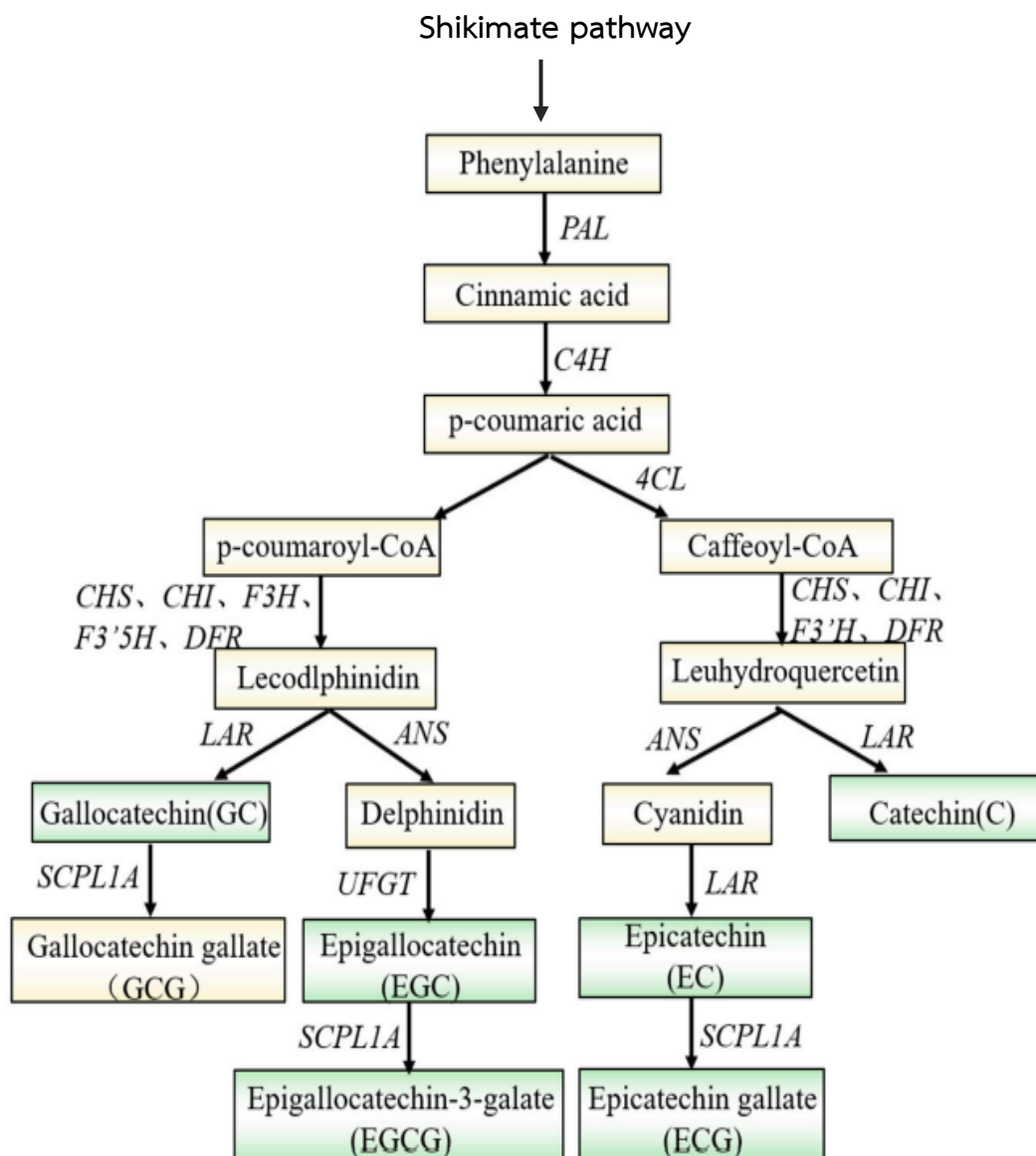
#### 4.2.2.2 ชนิดของสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ หลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ผลการวิเคราะห์โครมาโทแกรมในภาคผนวก ค.3)

ชนิดของสารประกอบฟีนอลิก	ปริมาณ (mg/100mL)	
	สัปดาห์ที่ 0	สัปดาห์ที่ 8
<b>กลุ่มของกรดฟีนอลิก</b>		
4-hydroxybenzoic acid	9.77 ± 0.31	16.85 ± 0.05
syringic acid	0.80 ± 0.05	0.73 ± 0.00
gallic acid	0.33 ± 0.03	1.24 ± 0.07
sinapic acid	0.21 ± 0.08	nd
<i>p</i> -coumaric acid	0.12 ± 0.01	0.26 ± 0.00
ferulic acid	0.09 ± 0.03	0.19 ± 0.04
<b>กลุ่มของฟลาโวนอยด์</b>		
rutin	0.70 ± 0.01	2.79 ± 0.11
catechin	nd	10.16 ± 0.25
epicatechin	nd	1.12 ± 0.00

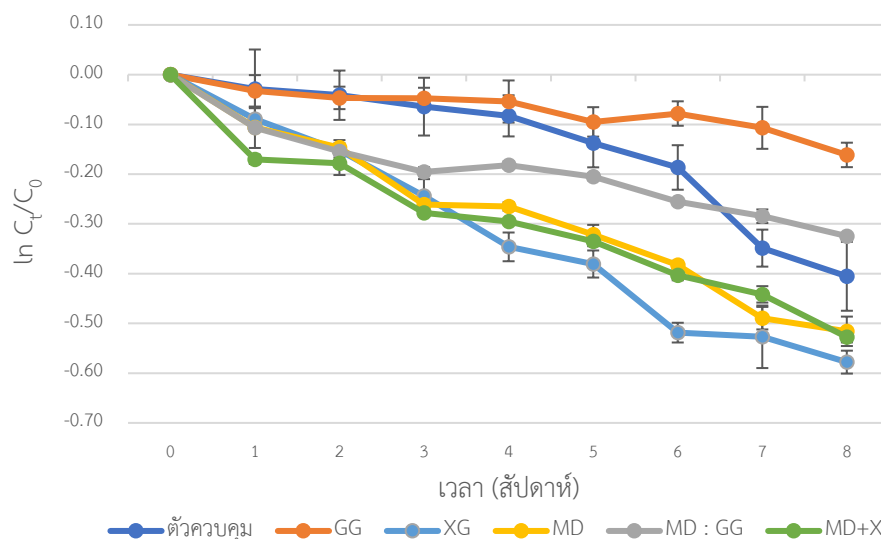
จากผลการศึกษาวิเคราะห์ชนิดของสารองค์ประกอบกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ เมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 4.6) พบว่า องค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกในผงสารสกัดปีตาไซยานินมีชนิดและปริมาณที่เพิ่มขึ้นหลังการเก็บรักษา โดยมีองค์ประกอบของสารกลุ่มของกรดฟีนอลิกทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ 4-Hydroxybenzoic acid, syringic acid, gallic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid มีค่าเท่ากับ 16.85 ± 0.05, 0.73 ± 0.00, 1.24 ± 0.07, 0.26 ± 0.00 และ 0.19 ± 0.04 mg/100ml ตามลำดับ และสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ 3 ชนิด ได้แก่ rutin, catechin และ epicatechin มีค่าเท่ากับ 2.79 ± 0.11, 10.16 ± 0.25, 1.12 ± 0.00 mg/100ml การเพิ่มขึ้นของสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกในระหว่างการเก็บรักษาสามารถเกิดได้จากการสลายตัวของสารปีตาไซยานินและสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกบางชนิด

และการสังเคราะห์สารใหม่ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก syringic acid และ sinapic acid มีค่าลดลง ในขณะที่ สารประกอบฟีนอลิกชนิดอื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีงานวิจัยบ่งชี้ได้ว่า สาร syringic acid และ sinapic acid สามารถเปลี่ยนไปเป็น 4-hydroxybenzoic acid และ gallic acid ได้ (Xie et al., 2015) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พบว่า 4-hydroxybenzoic acid และ gallic acid มีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังการเก็บรักษา นอกจากนี้การเกิดสารฟลาโวนอยด์กลุ่ม catechin และ epicatechin เกิดจากกระบวนการ Flavonoids biosynthesis pathway โดยเกิด ผ่านกระบวนการ Shikimate pathway (ดังแสดงในรูปที่ 4.4) ซึ่งเป็นกระบวนการสังเคราะห์ สารที่สามารถเกิดต่อได้เป็นสารกลุ่มบีตาไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก และสารฟลาโวนอยด์ (Polturak, & Aharoni, 2018) โดยกระบวนการนี้พบได้ทั่วไปในพืชและในแก้วมังกรพันธุ์ เนื้อแดง (*Hylocereus polyrhizus* L.) โดยในแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงประกอบไปด้วย เอนไซม์สำคัญหลายชนิดที่สามารถเกิดกระบวนการเหล่านี้ได้ (Fan et al., 2020) ทั้งนี้ การทำงานของเอนไซม์สามารถถูกยับยั้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Eissa, & Ibrahim, 2018) แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้สูงสุดที่ 40-42 °C สำหรับใช้ในการอบแห้งเปลือกแก้วมังกรและการระเหยตัวทำละลายเอทานอล ดังนั้นจึงยังคงมีกิจกรรมของเอนไซม์เหล่านี้ในการเปลี่ยนสารประกอบฟีนอลิกภายในผงสาร สกัดบีตาไซยานินให้เป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์อื่นๆ ได้ในระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 4.4 กระบวนการสังเคราะห์สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids biosynthesis pathway), PAL, phenylalanine ammonia-lyase; C4H, cinnamic acid 4-hydroxylase; 4CL, 4-coumarate CoA ligase; CHS, chalcone synthase; CHI, chalcone isomerase; F3H, flavanone 3-hydroxylase; F3'H, flavonoid 3'-hydroxylase; LAR, leucocyanidin reductase. (Chen et al., 2020)

### 4.2.3 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins Content)



รูปที่ 4.5 ปริมาณสารบีตาไซยานินในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

### 4.2.4 ค่าคงที่อัตราการสลายตัวทางจลนพลศาสตร์ของสารบีตาไซยานิน (Degradation rate constant, k)

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราการสลายตัว (k value) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

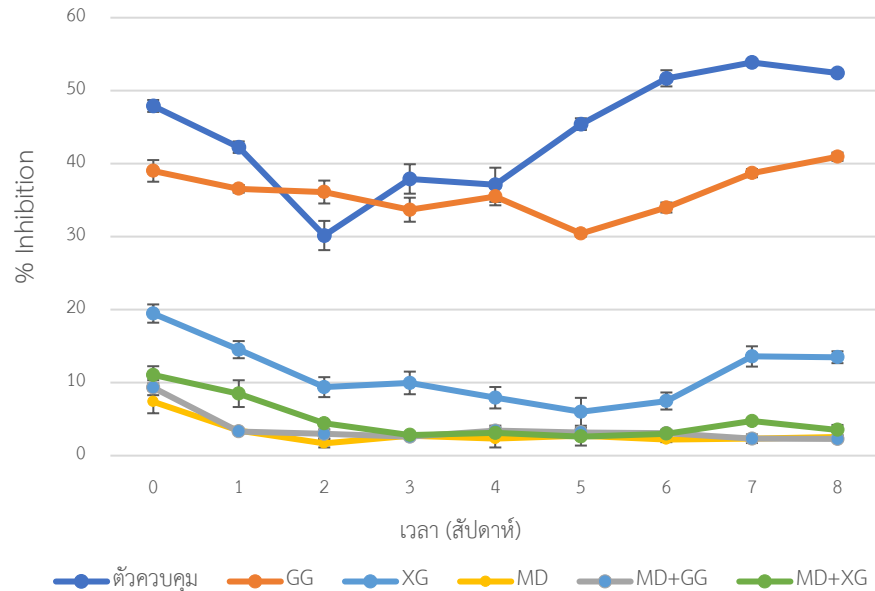
ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ค่าคงที่อัตราการสลายตัว (สัปดาห์ <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
ตัวควบคุม (C)	0.051 <sup>c</sup> ± 0.01	0.90
กัวร์กัม (GG)	0.020 <sup>e</sup> ± 0.00	0.89
แซนแทนกัม (XG)	0.072 <sup>a</sup> ± 0.00	0.98
มอลโทเดกซ์ตริน (MD)	0.065 <sup>b</sup> ± 0.00	0.98
มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	0.041 <sup>d</sup> ± 0.00	0.92
มอลโทเดกซ์ตรินผสมแซนแทนกัม (MD:XG)	0.066 <sup>b</sup> ± 0.00	0.96

หมายเหตุ : <sup>a-e</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคงที่อัตราการสลายตัวที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

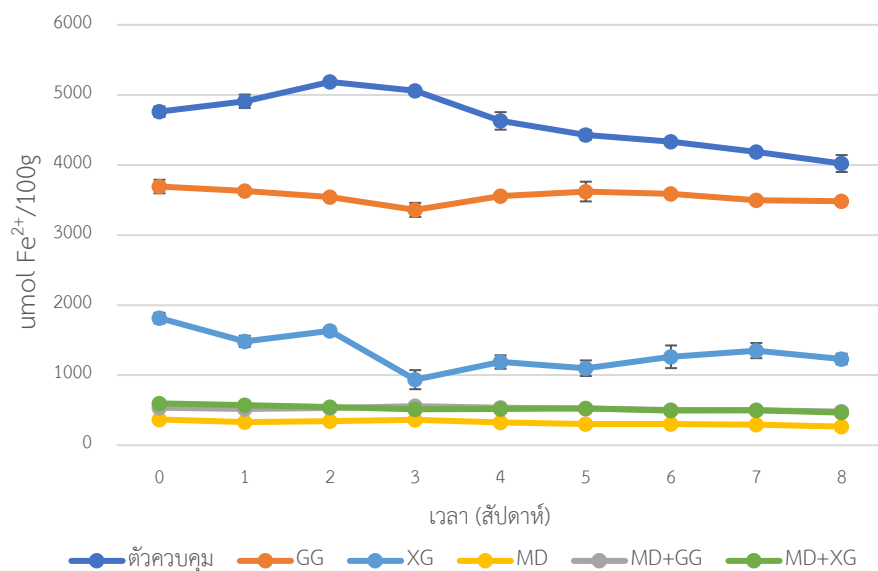
จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารปีตาไซยานินของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน พบว่า ค่าปริมาณสารปีตาไซยานินมีแนวโน้มลดลงในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ โดยพบว่า ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมกัวร์กัม (GG) มีแนวโน้มการลดลงน้อยที่สุด (รูปที่ 4.5) โดยมีค่าคงที่อัตราการสลายตัว (Degradation rate constant,  $k$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 มีค่าเท่ากับ  $0.020 \pm 0.00$  ตามด้วย ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ตรินกับกัวร์กัม (MD:GG) และตัวควบคุม (C) เท่ากับ  $0.041 \pm 0.00$  และ  $0.051 \pm 0.01$  ตามลำดับ ในขณะที่ค่า  $R^2$  ของผงสารสกัดปีตาไซยานินทุกตัวอย่างมีค่ามากกว่า 0.89 ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ถึง การสลายตัวของสารปีตาไซยานินเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction kinetics) (Zhao et al., 2020) การใช้กัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัมสามารถช่วยเพิ่มเสถียรของสารปีตาไซยานินได้ในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากกัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ตรินมีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และความหนืดที่น้อยกว่าแซนแทนกัม (Karaman et al., 2014) จึงทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลได้ดีและรวดเร็วกว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่น้ำหนักโมเลกุลสูง (Wangsakan, Chinachoti, & McClements, 2003) ทั้งนี้กัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ตรินสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารปีตาไซยานินได้ จึงมีส่วนช่วยในการรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งการสลายตัวของสารปีตาไซยานินที่ได้จากงานวิจัยนี้มีแนวโน้มการลดลงที่น้อยกว่างานวิจัยของ Chranioti และคณะ (2015) ศึกษาการใช้ชนิดไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในการทำแห้งสารสกัดจากบิทรูท โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในที่มืด เป็นเวลา 10 สัปดาห์ พบว่าค่าคงที่อัตราการสลายตัวมีค่าเท่ากับ 0.082-0.139 สัปดาห์<sup>-1</sup> ทั้งนี้เป็นผลมาจากอุณหภูมิในการเก็บรักษาผงสารสกัดปีตาไซยานินที่สูงกว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงทำให้สารปีตาไซยานินมีแนวโน้มการลดลงมากกว่า



#### 4.2.5 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP)



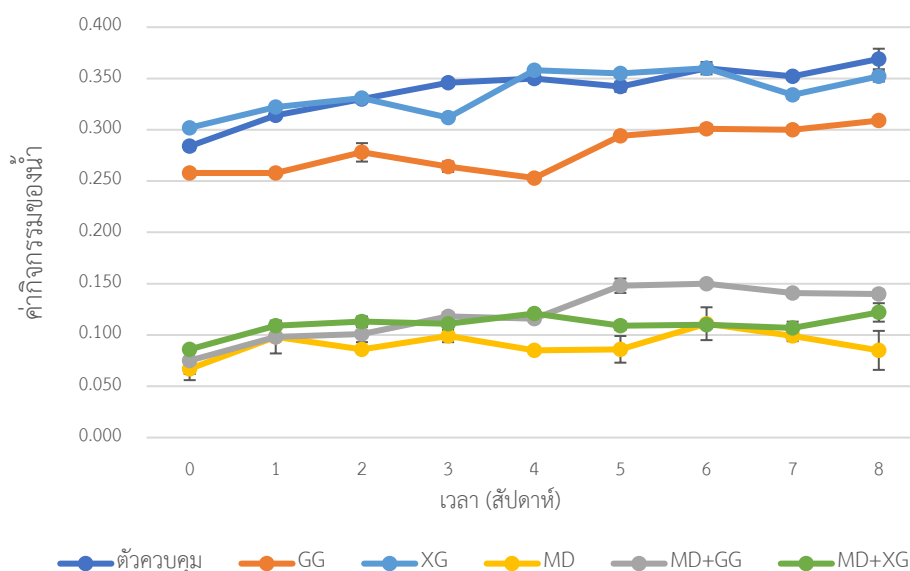
รูปที่ 4.6 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระกลไก DPPH หรือ Free radical scavenging ในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ 4.7 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระกลไก FRAP หรือ Ferric Reducing Antioxidant Power ในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

จากการศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) เกิดการเปลี่ยนแปลงฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด โดยกลไกการต้านอนุมูลอิสระแบบ DPPH หรือ free radical scavenging (รูปที่ 4.6) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ซึ่งมากกว่าในผงสารสกัดที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของสารบีตาไซยานินจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความร้อนและค่ากิจกรรมของน้ำ เป็นต้น โดยเกิดปฏิกิริยา glycosylation หรือการกำจัดน้ำตาลออกจากโมเลกุล ทำให้ได้สาร betanidin (สีเหลือง) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, OH-) เพิ่มขึ้นในโมเลกุล จึงทำให้มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระแบบ DPPH เพิ่มขึ้นหลังการเก็บรักษา (Miguel, 2018) ในส่วนของกลไกการต้านอนุมูลอิสระแบบ FRAP หรือ Ferric Reducing Antioxidant Power (รูปที่ 4.7) มีแนวโน้มลดลงในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารบีตาไซยานินที่ลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (Silva et al., 2018) ดังนั้นการเติมไฮโดรคอลลอยด์จึงมีส่วนช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในผงสารสกัดบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาได้

#### 4.2.6 ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity)



รูปที่ 4.8 ค่ากิจกรรมของน้ำของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

**ตารางที่ 4.8** ค่ากิจกรรมของน้ำของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ค่ากิจกรรมของน้ำ ( $a_w$ )	
	สัปดาห์ที่ 0	สัปดาห์ที่ 8
ตัวควบคุม (C)	0.284 <sup>Ba</sup> ± 0.00	0.377 <sup>Aa</sup> ± 0.01
กัวร์กัม (GG)	0.258 <sup>Bb</sup> ± 0.00	0.309 <sup>Ac</sup> ± 0.00
แซนแทนกัม (XG)	0.261 <sup>Bb</sup> ± 0.00	0.322 <sup>Ab</sup> ± 0.01
มอลโทเดกซ์ตริน (MD)	0.067 <sup>Bd</sup> ± 0.00	0.085 <sup>Af</sup> ± 0.02
มอลโทเดกซ์ตริน : กัวร์กัม (MD:GG)	0.075 <sup>Bd</sup> ± 0.01	0.140 <sup>Ad</sup> ± 0.00
มอลโทเดกซ์ตริน : แซนแทนกัม (MD:XG)	0.086 <sup>Bc</sup> ± 0.00	0.122 <sup>Ae</sup> ± 0.00

หมายเหตุ : <sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากิจกรรมของน้ำที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

<sup>A-B</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากิจกรรมของน้ำก่อนและหลังการเก็บรักษา (แนวนอน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากการวิเคราะห์ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity) ในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ค่ากิจกรรมของน้ำในผงสารสกัดปีตาไซยานินทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4.8) และมีความแตกต่างจากสัปดาห์แรกของการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยหลังการเก็บรักษา ค่า  $a_w$  ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ  $0.377 \pm 0.01$  (แสดงดังตารางที่ 4.8) นอกจากนี้ ค่า  $a_w$  ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมมอลโทเดกซ์ตริน มีค่าเท่ากับ  $0.085 \pm 0.02$  (MD),  $0.140 \pm 0.00$  (MD:GG) และ  $0.122 \pm 0.00$  (MD:XG) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมมอลโทเดกซ์ตรินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.309 \pm 0.00$  (GG) และ  $0.322 \pm 0.01$  (XG) การใช้ความเข้มข้นของมอลโทเดกซ์ตรินที่มากกว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ตัวอื่นๆ ส่งผลให้มีปริมาณของแข็ง (Solid content) ในระบบที่มากกว่า จึงทำให้มีปริมาณน้ำอิสระในระบบที่น้อย ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จึงมีค่า  $a_w$  ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ค่า  $a_w$  ของผงสารสกัดปีตาไซยานินในทุกตัวอย่างหลังการเก็บรักษา มีค่าต่ำกว่า 0.521 ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมของผงสารสกัดปีตาไซยานิน เนื่องจากเป็นปริมาณที่ทำให้สารปีตาไซยานินเกิดการสลายตัวน้อยที่สุด (Miguel, 2018) ค่ากิจกรรมของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน ทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis เกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน (สีแดงม่วง) ไปเป็นสาร betalamic acid (สีเหลือง) และ cyclo-DOPA (ไม่มีสี) โดยสาร betalamic acid

สามารถเกิดปฏิกิริยา non-enzymatic browning (Maillard reaction) และสาร *cyclo-DOPA* สามารถเกิดปฏิกิริยา enzymatic browning และ oxidation ทำให้เกิดการสลายน้ำตาล ได้แก่ melanoidins และ melanin (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Agarwal et al., 2019; Breitel et al., 2020) นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลิกที่พบในผงสารสกัดปีตาไซยานิน ได้แก่ 4-hydroxybenzoic acid, sinapic acid, syringic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid และสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ ได้แก่ catechin และ epicatechin สามารถเกิดปฏิกิริยา enzymatic browning ทำให้เกิดการสร้างสาร melanin ที่มีสีน้ำตาล จึงทำให้ผงสารสกัดปีตาไซยานินเกิดการเปลี่ยนสีในระหว่างการเก็บรักษา (Yoon et al., 2015; Tan et al., 2020; Li et al., 2020) ทั้งนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยา browning reaction ขึ้นอยู่กับค่ากิจกรรมของน้ำ หากมีค่ากิจกรรมของน้ำสูง จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารสีน้ำตาลในปริมาณมาก (Labuza et al., 1972) ดังนั้นผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์จึงมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสีน้ำตาลมากที่สุด เนื่องจากมีค่ากิจกรรมของน้ำมากที่สุด

#### 4.2.7 ลักษณะสีปรากฏ (Color appearance)



รูปที่ 4.9 ลักษณะสีปรากฏของผงสารสกัดปีตาไซยานินก่อนและหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

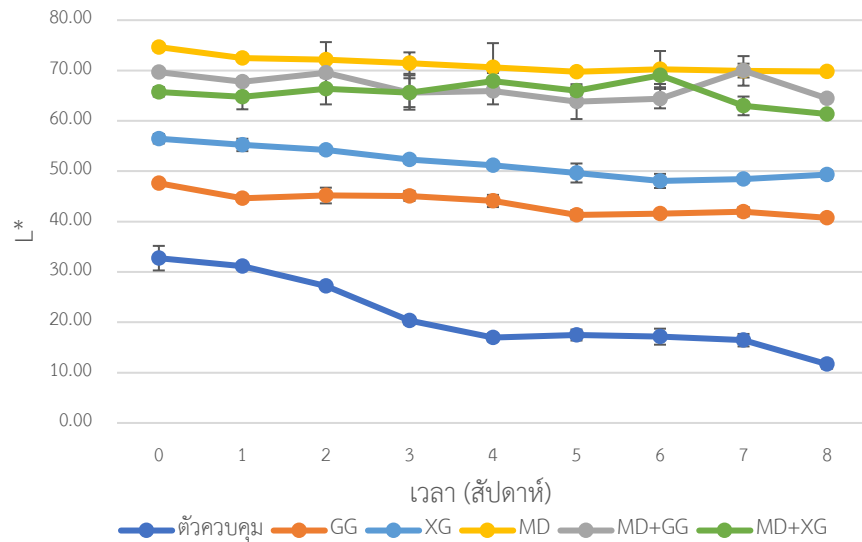
จากการวิเคราะห์ค่าสีปรากฏ (Color appearance) ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน หลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ (รูปที่ 4.9) พบว่า ผงสารสกัดปีตาไซ

ยานินตัวควบคุม เกิดการเปลี่ยนสีมากที่สุด โดยเปลี่ยนจากสีแดงม่วงไปเป็นสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งบ่งบอกได้ถึง การสลายตัวของสารปีตาไซยานินและการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบฟีนอลิกต่างๆ ของผงสารสกัดในระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่ ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กั้วร์กัมและแซนแทนกัม เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ตริน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสีปรากฏหลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

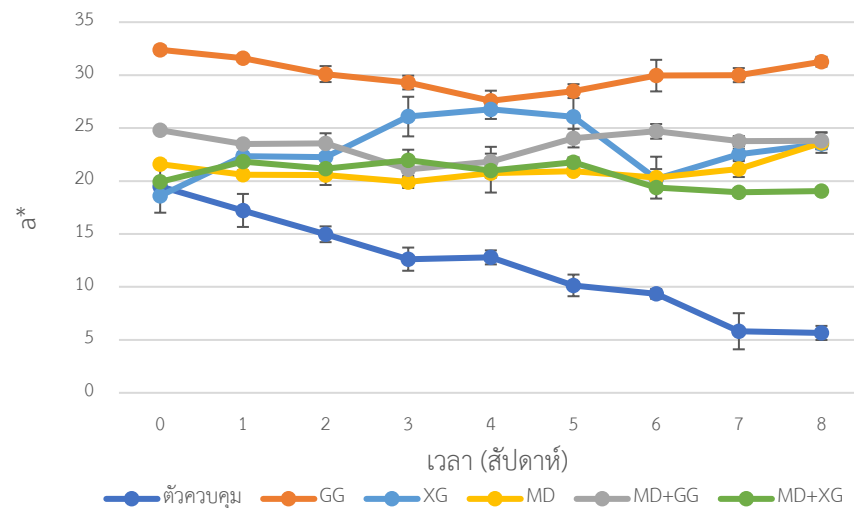
#### 4.2.8 ค่าสี ( $L^*$ $a^*$ และ $b^*$ )

จากการศึกษาค่าสีของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน พบว่า ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ค่า  $L^*$  (รูปที่ 4.10) และค่า  $a^*$  (รูปที่ 4.11) ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) มีแนวโน้มลดลงมากที่สุด ในขณะที่ค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) และค่าสีแดง ( $a^*$ ) ค่อนข้างคงที่ ในระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่ค่า  $b^*$  (รูปที่ 4.12) ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการใช้แซนแทนกัมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการใช้กั้วร์กัมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้การลดลงของค่า  $L^*$  ของผงสารสกัดปีตาไซยานิน เกิดจากปฏิกิริยาสร้างสารสีน้ำตาล ได้แก่ enzymatic browning เนื่องจากในผงสารสกัดยังคงมีกิจกรรมของเอนไซม์ที่สามารถเปลี่ยนสารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ สาร 4-hydroxybenzoic acid, sinapic acid, syringic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid, catechin และepicatechin ภายในผงสารสกัดให้กลายเป็นสาร melanin ที่มีสีน้ำตาล (Yoon et al., 2015; Tan et al., 2020; Li et al., 2020) นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารปีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษา ได้แก่ สาร betalamic acid และ cyclo-DOPA สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้เป็นสารสีน้ำตาล โดยสาร betalamic acid สามารถเกิดปฏิกิริยา Maillard reaction ได้เป็นสาร melanoidins และสาร cyclo-DOPA สามารถเกิดปฏิกิริยา enzymatic browning และ oxidation ได้เป็นสาร melanin (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Agarwal et al., 2019; Breitel et al., 2020) ดังนั้นผงสารสกัดมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ความสว่างหรือค่า  $L^*$  จึงมีค่าลดลง ในส่วนของค่า  $a^*$  สามารถบ่งบอกได้ถึง การสลายตัวของสารปีตาไซยานินในระหว่างเก็บรักษา จึงทำให้ผงสารสกัดมีสีแดงม่วงที่ลดลง ดังนั้นค่า  $a^*$  ของผงสารสกัดปีตาไซยานิน (ตัวควบคุม) จึงมีค่าลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Liao et al., 2020) นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของค่า  $b^*$  หรือค่าสีเหลืองในผงสารสกัดปีตาไซยานิน สามารถบ่งบอกได้ถึง การสลายตัวของสารปีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษา ปฏิกิริยาการสลายตัว ได้แก่ deglycosylation, dehydrogenation และ hydrolysis ทำให้สารปีตาไซยานินสลายตัวได้เป็นสารที่มีสีเหลือง ได้แก่

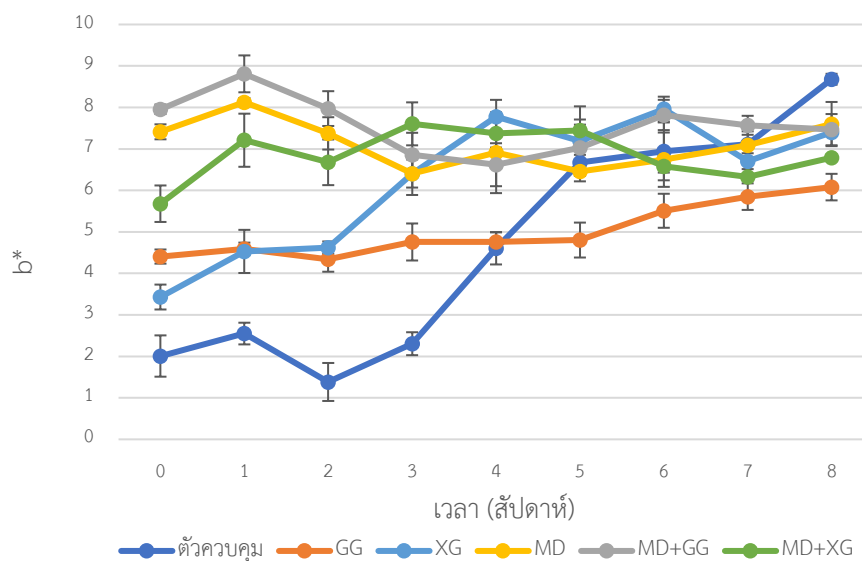
betanidin, neobetanin และ betalamic acid ตามลำดับ (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006) จึงส่งผลทำให้ค่า  $b^*$  มีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 4.10 ค่าสี  $L^*$  ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ 4.11 ค่าสี  $a^*$  ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ 4.12 ค่าสี  $b^*$  ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

#### 4.2.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ )

ตารางที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในหลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	$\Delta E^*$
ตัวควบคุม (C)	$26.14^a \pm 2.18$
กัวร์กัม (GG)	$7.19^c \pm 0.70$
แซนแทนกัม (XG)	$9.28^b \pm 0.84$
มอลโทเดกซ์ตริน (MD)	$5.44^d \pm 0.85$
มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	$4.84^d \pm 0.57$
มอลโทเดกซ์ตรินผสมแซนแทนกัม (MD:XG)	$5.39^d \pm 0.80$

<sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta E^*$ ) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน หลังจากผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 4.9) พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ใช่ไฮโดรคอลลอยด์ มีค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) เท่ากับ  $26.14 \pm 2.18$  (C) รองลงมาคือ ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้แซนแทนกัม (XG  $9.28 \pm 0.84$ ) และกัวร์กัม (GG  $7.19 \pm 0.70$ ) ตามลำดับ ในขณะที่ ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการใช้มอลโทเดกซ์ตริน ได้แก่ MD, MD:GG และ MD:XG มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทัลปีในผงสารสกัดบีตาไซยานิน สามารถบ่งบอกได้ถึง การสลายตัวของสารบีตาไซยานินในผงสารสกัด และการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ใช่ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) เกิดการสลายตัวของสารบีตาไซยานินและเกิดปฏิกิริยาสร้างสารสีน้ำตาลมากที่สุดหลังจากผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์

จากการศึกษาผลการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานิน ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า สามารถคัดเลือกไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานิน การใช้กัวร์กัม (GG) และมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินได้ดีกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นและที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ (C) โดยพิจารณาจากค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสารบีตาไซยานินมีค่าน้อยกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม ซึ่งบ่งบอกได้ถึงแนวโน้มการลดลงของสารบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาที่น้อยกว่า นอกจากนี้ค่ากิจกรรมของน้ำ ( $a_w$ ) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta E^*$ ) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG) และมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) ในการทำแห้ง มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (C) ทั้งนี้ ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้แซนแทนกัม (XG) ไม่ถูกเลือกสำหรับใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้แซนแทนกัมมีแนวโน้มการลดลงของสารบีตาไซยานินที่มากกว่า นอกจากนี้แซนแทนกัมยังมีความหนืดที่สูงกว่ากัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ตริน จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องตีหม่าลอง



#### 4.3 ศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก

##### 4.3.1 สมบัติของตัวอย่างผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก

##### 4.3.1.1 สมบัติทางเคมี

##### ตารางที่ 4.10 สมบัติทางเคมีของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก

สมบัติทางเคมีผงสารสกัดปีตาไซยานิน	ไฮโดรคอลลอยด์ที่ผ่านการคัดเลือก		
	ตัวควบคุม (C)	กัวร์กัม (GG 0.5% w/v)	มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG 10:1.0% w/v)
ปริมาณสารปีตาไซยานิน (mg/100g)	183.92 <sup>a</sup> ± 0.38	133.98 <sup>b</sup> ± 5.75	59.88 <sup>c</sup> ± 0.17
ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (mgGA/100g)	30.67 <sup>a</sup> ± 0.29	26.57 <sup>b</sup> ± 0.40	14.38 <sup>c</sup> ± 0.38
ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (mgQE/100g)	72.24 <sup>a</sup> ± 0.59	41.20 <sup>b</sup> ± 0.09	18.81 <sup>c</sup> ± 0.23
DPPH (% inhibition)	36.66 <sup>a</sup> ± 2.42	27.85 <sup>b</sup> ± 0.82	14.73 <sup>c</sup> ± 0.94
FRAP (mmolFe <sup>2+</sup> /100gl)	4.38 <sup>a</sup> ± 0.14	3.36 <sup>b</sup> ± 0.09	1.28 <sup>c</sup> ± 0.02
ประสิทธิภาพการกักเก็บ (%) <sup>ns</sup>	-	99.22 ± 0.02	99.83 ± 0.05

<sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมบัติต่างๆที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แวนนอน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ), <sup>ns</sup> แสดงความไม่แตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

##### 4.3.1.1.1 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ดังตารางที่ 4.10 พบว่า ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้ง (C) มีปริมาณสารปีตาไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์ มากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) เท่ากับ  $183.92 \pm 0.38$ ,  $133.98 \pm 5.75$  และ  $59.88 \pm 0.17$  mg/100g ตามลำดับ ทั้งนี้ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีส่วนผสมของกัวร์กัม (GG) มีปริมาณสารทั้ง 3 ชนิดมากกว่าผงสารสกัดที่มีส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) เนื่องจาก การเติมมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัมในการทำแห้งสารสกัดปีตาไซยานินใช้ปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ที่มากกว่าการใช้กัวร์กัมเพียงชนิดเดียวหรือตัวควบคุม จึงทำให้ผงสารสกัดที่ได้มีปริมาณของแข็งในระบบมาก ส่งผลให้ได้ปริมาณสารต่างๆ ในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่น้อยกว่าเมื่อวิเคราะห์ในปริมาณที่เท่ากัน (Shofinita et al., 2020) ทั้งนี้ปริมาณสารสำคัญในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากงานวิจัย มีปริมาณมากกว่าในงานวิจัยของ Flores-Mancha และคณะ (2020) ศึกษาการใช้มอลโท

เดกซ์ตรินและอินนูลินในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดจากบีทรูท พบว่า ผงสารสกัดที่ได้มีปริมาณสารบีตาไซยานิน เท่ากับ 6.28 – 10.00 mg/100g ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 5.98 – 6.09 mgGA/100 g นอกจากนี้ มีงานวิจัยของ Tze และคณะ (2012) ทำการศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำแกว้งมั่งรพันธุ์เนื้อแดงโดยการใช้มอลโทเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม พบว่า มีปริมาณสารบีตาไซยานิน เท่ากับ  $44.72 \pm 0.15$  mg/100g และงานวิจัยของ Janiszewska และคณะ (2014) ศึกษาการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดจากน้ำบีทรูท พบว่า ผงสารสกัดที่ใช้กัมอะราบิกมีปริมาณสารบีตาไซยานิน เท่ากับ 123-129 mg/100g และผงสารสกัดที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัมอะราบิก มีค่าเท่ากับ 109-123 mg/100g

#### 4.3.1.1.2 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacities)

จากผลการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของผงสารสกัดบีตาไซยานิน ด้วยวิธี DPPH และ FRAP พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C) มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) โดยมีค่า % inhibition เท่ากับ  $36.66 \pm 2.42$  % และค่า FRAP เท่ากับ  $4.38 \pm 0.14$  mmolFe<sup>2+</sup>/100ml โดยมีปริมาณมากกว่าในผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมกัวร์กัม (GG) มีค่า DPPH เท่ากับ  $27.85 \pm 0.82$  % inhibition และ FRAP  $3.36 \pm 0.09$  mmolFe<sup>2+</sup>/100g โดยผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระน้อยที่สุด ( $14.73 \pm 0.94$  % inhibition,  $1.28 \pm 0.02$  mmolFe<sup>2+</sup>/100gl) โดยฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการวิเคราะห์ มีความสอดคล้องกับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน ซึ่งผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์มีปริมาณสารสำคัญมากที่สุดจึงส่งผลให้มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุดเช่นกัน (Rebecca et al., 2019)

#### 4.3.1.1.3 ประสิทธิภาพการกักเก็บ (Encapsulation Efficiency %)

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกักเก็บของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัมในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินทั้งสองตัวอย่างมีค่าประสิทธิภาพการกักเก็บ เท่ากับ  $99.22 \pm 0.02\%$  (GG) และ  $99.83 \pm 0.05\%$  (MD:GG) ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) การใช้ไฮโดรคอลลอยด์กัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม สามารถทำให้มีประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญที่มากกว่างานวิจัยของ Rodriguez และคณะ (2015) ที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัมอะราบิกและมอลโทเดกซ์ตรินผสมเพคตินในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินจาก

เปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง พบว่า มีค่า Encapsulation Efficiency เท่ากับ  $90.58 \pm 1.56$  และ  $95.04 \pm 0.67$  % ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ไฮโดรคอลลอยด์มอลโทเดกซ์ตริน ผสมกัวร์กัมและกัวร์กัมในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานิน จึงมีความเหมาะสมเนื่องจากทำหน้าที่เป็นสารห่อหุ้มที่ดี

#### 4.3.1.2 สมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางกายภาพของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก

สมบัติทางกายภาพ ผงสารสกัดบีตาไซยานิน	ไฮโดรคอลลอยด์ที่ผ่านการคัดเลือก		
	ตัวควบคุม (C)	กัวร์กัม (GG) 0.5 % w/v	มอลโทเดกซ์ตริน ผสมกัวร์กัม (MD: GG) 10:1.0 % w/v
ร้อยละผลผลิตที่ได้ (% yield)	$40.75^c \pm 0.06$	$49.50^b \pm 1.15$	$77.63^a \pm 0.71$
ค่าการละลาย (%)	$93.58^b \pm 2.46$	$79.61^c \pm 1.41$	$97.14^a \pm 0.09$
ค่าความชื้น (%)	$2.02^a \pm 0.06$	$1.69^b \pm 0.07$	$0.62^c \pm 0.02$
ค่ากิจกรรมของน้ำ ( $a_w$ )	$0.24^a \pm 0.00$	$0.21^b \pm 0.00$	$0.06^c \pm 0.00$
ค่าการดูดความชื้น (%)	$32.32^a \pm 0.42$	$24.25^b \pm 0.17$	$15.54^c \pm 0.15$
ค่าความหนาแน่นรวม ( $\text{kg/m}^3$ )	$520.17^b \pm 21.20$	$151.05^c \pm 8.11$	$585.33^a \pm 13.05$
Lightness ( $L^*$ )	$33.92^b \pm 1.76$	$35.63^b \pm 2.38$	$51.64^a \pm 1.49$
Redness ( $a^*$ )	$32.01^a \pm 1.35$	$30.79^b \pm 1.59$	$30.60^b \pm 0.69$
Yellowness ( $b^*$ )	$10.54^a \pm 0.50$	$6.82^c \pm 0.41$	$7.69^b \pm 0.20$

<sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมบัติต่างๆที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แนวนอน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) <sup>ns</sup> แสดงความไม่แตกต่างกันของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

##### 4.3.1.2.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (% yield)

จากการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตที่ได้ของผงสารสกัดบีตาไซยานิน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า การใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานิน ทำให้มีร้อยละผลผลิตที่ได้มากที่สุด ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ  $77.63 \pm 0.71$  % รองลงมาได้แก่ ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG)  $49.50 \pm 1.15$  % และตัวควบคุม (C)  $40.75 \pm 0.06$  % ตามลำดับ การเติมมอลโทเดกซ์ตรินมีส่วนช่วยในการเพิ่มร้อยละผลผลิตที่ได้ของผงสารสกัดบีตาไซยานิน หากเพิ่มปริมาณสารมอลโทเดกซ์ตรินที่ใช้ในการทำแห้งมาก

ขึ้น จะยิ่งทำให้มีปริมาณของแข็งในระบบที่มากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้ของ ผงหลังการทำแห้งเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Rodriguez et al, 2015)

#### 4.3.1.2.2 ค่าการละลาย (Water solubility Index, WSI)

จากการวิเคราะห์ค่าการละลายของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการทำแห้งโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน (ดังตารางที่ 4.10) พบว่า เมื่อใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานิน ทำให้มีค่าความสามารถในการละลายมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) เท่ากับ  $97.14 \pm 0.09$  % ซึ่งมีความมากกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C)  $93.58 \pm 2.46$  % และผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG)  $79.61 \pm 1.41$  % เนื่องจาก มอลโทเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มที่มีสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่ากัวร์กัมซึ่งมีความหนืดที่สูง โดยมอลโทเดกซ์ตรินมีค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption capacity) เท่ากับ 72-83 % (Castro-Munoz et al., 2015) ซึ่งมีความมากกว่ากัวร์กัม เท่ากับ 25-30 % (Dogan et al., 2011) ดังนั้นการเติมมอลโทเดกซ์ตรินจึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการละลายของผงสารสกัดบีตาไซยานิน นอกจากนี้ค่าการละลายที่ได้จากงานวิจัยของ ผงสารสกัดบีตาไซยานินทุกตัวอย่าง มีความมากกว่างานวิจัยของ Bakar และคณะ (2012) ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยสารสกัดจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงโดยใช้มอลโทเดกซ์ตริน มีค่าการละลายเท่ากับ 67.89 % งานวิจัยของ Castro-Munoz และคณะ (2015) ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำแคคตัสแพร์โดยใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมเจลาติน มีค่าการละลายเท่ากับ 67.71 – 99.71 % และงานวิจัยของ Cano-chauca และคณะ (2005) ศึกษาการทำแห้งน้ำมะม่วงด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้มอลโทเดกซ์ตริน พบว่า ผงน้ำมะม่วงที่ได้ มีค่าการละลายเท่ากับ 77-90 %

#### 4.3.1.2.3 ค่าความชื้น (Moisture content) และค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity)

จากการวิเคราะห์ค่าความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำในผงสารสกัดบีตาไซยานิน พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C) มีค่าความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) เท่ากับ  $2.02 \pm 0.06$  และ  $0.24 \pm 0.00$  ตามลำดับ ในขณะที่ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) มีค่าความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำน้อยที่สุด เท่ากับ  $0.62 \pm 0.02$  และ  $0.06 \pm 0.00$  ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมมอลโทเดกซ์ตรินในปริมาณที่มากกว่าการใช้กัวร์กัม จึงทำให้ผงสารสกัดที่ได้มี Solid content ในปริมาณที่มากกว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จึงมีค่า  $a_w$  และค่าความชื้นต่ำกว่า (Kerr, & Varner, 2020) ทั้งนี้ ผงสารสกัดบีตาไซยานินในทุกตัวอย่าง มีค่า  $a_w$  ต่ำกว่า

0.521 และมีค่าความชื้น น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 2 ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมของผงสารสกัดบีตาไซยานิน เนื่องจากเป็นปริมาณที่ทำให้สารสกัดบีตาไซยานินเกิดการสลายตัวน้อยที่สุด (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006; Miguel, 2018)

#### 4.3.1.2.4 ค่าการดูดความชื้น (Hygroscopicity)

ค่าการดูดความชื้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับน้ำจากอากาศของผงแห้ง โดยทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากันคือ 75 % RH เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากผลการวิเคราะห์ค่าการดูดความชื้น พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้ง (C) มีค่าการดูดความชื้นมากที่สุด ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ  $32.32 \pm 0.42$  % ตามด้วยผงสารสกัดที่ใช้กัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม เท่ากับ  $24.25 \pm 0.17$  % (GG) และ  $15.54 \pm 0.15$  % (MD:GG) ตามลำดับ ทั้งนี้ผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุมมีปริมาณค่าการดูดความชื้นมากที่สุดเนื่องจาก สารบีตาไซยานินในระบบที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ มีปริมาณหมู่ Hydrophilic ในโมเลกุลที่มาก จึงทำให้มีโอกาสในการจับกับน้ำมากกว่าจึงดูดซับน้ำได้ดี ในขณะที่ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมมอลโทเดกซ์ตริน มีค่าการดูดความชื้นที่น้อยที่สุด เนื่องจากการเติมมอลโทเดกซ์ตรินทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับสารบีตาไซยานินในระบบ (Flores-Mancha et al., 2020) จึงทำให้มีส่วนช่วยในการลดค่าการดูดความชื้นของผงแห้งที่ได้ นอกจากนี้มอลโทเดกซ์ตรินยังมีสมบัติในการเป็นสารห่อหุ้มที่ดีจึงมีส่วนช่วยในการลดความสามารถในการดูดซับน้ำของผงแห้งได้ (Cai, & Corke, 2000) ทั้งนี้มีงานวิจัยบ่งชี้ได้ว่า หากในระบบมีปริมาณมอลโทเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น มีส่วนช่วยทำให้ค่าการดูดความชื้นของผงแห้งมีค่าลดลง (Kim, & Kerr, 2013; Bazarria, & Kumar, 2018) นอกจากนี้ ผงสารสกัดบีตาไซยานินเติมมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัมที่ได้จากงานวิจัยมีค่าการดูดความชื้นที่น้อยกว่างานวิจัยของ Kerr และ Varner (2020) ศึกษาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดบีตาไซยานินจากบีทรูทโดยใช้มอลโทเดกซ์ตรินมีค่า Hygroscopicity เท่ากับ 18.69 % และผงที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้มอลโทเดกซ์ตริน ผงน้ำบีทรูทมีค่าเท่ากับ 16.89 % (Bazarria, & Kumar, 2018) ผงจากน้ำแคคตัสแพรเท่ากับ 19.34 - 28.13 % (Castro-Munoz et al., 2015) ผงน้ำผักโขมสวนเท่ากับ 48.5 % และผงสารสกัดบีตาไซยานินจากบีทรูทที่ขายตามท้องตลาด (E162) มีค่าเท่ากับ 58.8 % (Cai, & Corke, 2000)

#### 4.3.1.2.5 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density)

จากผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของผงสารสกัดบีตาไซยานิน พบว่า ผงสารสกัดที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) มีค่ามากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) เท่ากับ  $585.33 \pm 13.05 \text{ kg/m}^3$  รองลงมาได้แก่ ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (C) และ ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (MD:GG) เท่ากับ  $520.17 \pm 21.20$  และ  $151.05 \pm 8.11 \text{ kg/m}^3$  ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าความหนาแน่นรวมของผงแห้ง คืออัตราส่วนระหว่างมวลของผงแห้งกับปริมาตรของผง ซึ่งรวมถึงรูพรุนและช่องว่างระหว่างอนุภาค โดยผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) มีค่าความหนาแน่นรวมมากที่สุด บ่งบอกได้ถึงมีขนาดอนุภาคที่เล็กและละเอียดที่สุดในทางตรงกันข้าม ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมกัวร์กัม (GG) มีค่าความหนาแน่นรวมน้อยที่สุด บ่งบอกได้ถึงมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มากกว่า (Kerr, & Varner, 2020) เนื่องจาก กัวร์กัมมีผลต่อการเพิ่มความหนืดในสารสกัดมากกว่าการเติมมอลโทเดกซ์ตริน ซึ่งความหนืดที่สูงมีผลต่อรูปร่างและขนาดอนุภาคของผงแห้งที่ได้ นอกจากนี้ในสารสกัดที่มีการเติมมอลโทเดกซ์ตรินมีความเข้มข้นที่มากกว่าการเติมกัวร์กัม ในสารสกัดจึงมีปริมาณ Solid content ที่มากกว่า ส่งผลให้การกำจัดน้ำจึงเกิดรวดเร็วกว่า อนุภาคของผงแห้งที่ได้จึงมีขนาดเล็ก (Pieczykolan, & Kurek, 2019) ดังนั้นผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จึงมีค่าความหนาแน่นรวมมากกว่า มีข้อดีคือทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อย ลดโอกาสในการเกิดปฏิกิริยา Oxidation จึงทำให้สารบีตาไซยานินมีความเสถียรเพิ่มขึ้น สามารถเก็บรักษาได้นาน (Cai, & Corke, 2000) แต่อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของผงสารสกัดบีตาไซยานินในงานวิจัยนี้ พบว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ผสมกัวร์กัม (GG) มีความเสถียรมากกว่า เกิดการสลายตัวของสารบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาน้อยกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) เนื่องจากสภาวะการเก็บรักษาที่ใช้ในงานวิจัย เป็นการเก็บผงสารสกัดบีตาไซยานินในสภาวะสุญญากาศ ดังนั้นออกซิเจนจึงไม่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นโดยรวมของผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุมและผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัมในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับผงแห้งที่ได้จากงานวิจัยของ Cai และ Corke (2000) ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยสารสกัดบีตาไซยานินจากผักโขมสวน (*Amaranthus plant*) โดยใช้มอลโทเดกซ์ตริน 20 %w/v พบว่าค่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ  $520 - 670 \text{ kg/m}^3$  และงานวิจัยของ Tze และคณะ (2012) ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงโดยใช้มอลโทเดกซ์ตริน 20 % w/v พบว่า มีค่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ  $290.8 - 338.6 \text{ kg/m}^3$

#### 4.3.1.2.6 ค่าสี ( $L^*$ , $a^*$ และ $b^*$ )

จากการศึกษาวิเคราะห์ค่าสีผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน โดยรายงานเป็นค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสีแดง ( $a^*$ ) และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) ดังแสดงในตาราง 4.10 พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมมอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) มีค่า  $L^*$  มากที่สุด เท่ากับ  $51.64 \pm 1.49$  และผงสารสกัดบีตาไซยานินที่เติมกัวร์กัม (GG) และตัวควบคุม (C) มีค่าความสว่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งนี้ เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น การเติมในปริมาณที่มากกว่าการเติมกัวร์กัม จึงส่งผลต่อค่าความสว่างของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้ จึงทำให้ผงมีสีที่อ่อนกว่า ในส่วนของค่า  $a^*$  และ  $b^*$  พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ (C) มีค่ามากที่สุด โดยมีค่า  $a^*$  เท่ากับ  $32.01 \pm 1.35$  และค่า  $b^*$  เท่ากับ  $10.54 \pm 0.50$  เนื่องจากค่าสีแดง ( $a^*$ ) มีค่าสอดคล้องกับปริมาณของสารบีตาไซยานินในผงสารสกัด (Chranioti et al., 2015) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารบีตาไซยานิน พบว่า ผงตัวควบคุมมีปริมาณสารบีตาไซยานินมากที่สุดจึงทำให้ผงสารสกัดที่ได้มีค่าสีแดงมากที่สุด ( $a^*$ ) และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) บ่งบอกได้ถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารบีตาไซยานินในระหว่างการทำแห้ง โดยผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์มีค่า  $b^*$  มากที่สุด บ่งชี้ได้ถึงการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารบีตาไซยานินเกิดเป็นสารที่มีสีเหลืองมากที่สุด (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006) ทั้งนี้สามารถกล่าวได้ว่า การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินในระหว่างการทำแห้งได้ สอดคล้องกับค่า  $b^*$  ที่น้อยกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.4 การศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในเครื่องต้มจำลอง (pH 3.4) ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์

การเตรียมเครื่องต้มจำลองสำหรับศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินเป็นส่วนผสมในระหว่างการเก็บรักษา โดยเครื่องต้มจำลองมีการปรับค่า pH 3.4 ด้วยกรดซิตริก 1 % w/v และ 1 M NaOH (Food grade) เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือก ได้แก่ ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG), มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) และผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ (C) ปริมาณ 0.5 % w/v เติม Sodium benzoate 0.05 % w/v ฆ่าเชื้อด้วยวิธีพาสเจอร์ไรส์เชงชันที่อุณหภูมิ 70-72 °C เป็นเวลา 15 วินาที (Hasani et al., 2021) และบรรจุลงในขวดพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) ปิดฝาและนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์

การเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินลงในเครื่องต้มจำลอง โดยเติมปริมาณ 0.5 % w/v เท่ากัน ในทุกตัวอย่าง เนื่องจาก มิงงานวิจัยของ Tutunchi และคณะ (2019) สามารถบ่งชี้ได้ว่า ที่ความเข้มข้น 0.5 % w/v เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับเติมลงในเครื่องต้ม เนื่องจากสารบีตาไซยานินในเครื่องต้มเกิดการสลายตัวที่ช้ากว่า โดยมีค่าครึ่งชีวิตมากกว่า ( $t_{1/2} = 7.14 \pm 0.14$  วัน) และมีค่าคงที่อัตราการสลายตัวที่น้อยกว่า ( $k = 0.10 \pm 0.00$ ) เมื่อเทียบกับเครื่องต้มที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานิน ที่ความเข้มข้น 0.25 % w/v ( $t_{1/2} = 6.12 \pm 0.30$  วัน,  $k = 0.11 \pm 0.00$ ) นอกจากนี้ การเตรียมเครื่องต้มจำลองในงานวิจัยไม่ได้มีการปรับปริมาณสารบีตาไซยานินเริ่มต้นให้เท่ากันทุกตัวอย่าง เนื่องจากผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัมมีปริมาณสารบีตาไซยานินที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณสารบีตาไซยานินที่พบในผงสารสกัดที่ใช้กัวร์กัมและผงสารสกัดที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์น้ำลูกแพร์ที่ขายตามท้องตลาด มีปริมาณสารบีตาไซยานินเริ่มต้นเท่ากับ 76 mg/100ml (Bassama et al., 2020) ดังนั้นหากต้องการปริมาณสารบีตาไซยานินเริ่มต้นในเครื่องต้มจำลองในปริมาณที่เท่ากัน จึงต้องใส่ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัมในปริมาณที่มากเพื่อให้ได้ปริมาณสารบีตาไซยานินถึงที่กำหนด ซึ่งจะทำให้เครื่องต้มจำลองที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้น ไม่เป็นลักษณะที่ต้องการสำหรับการผลิตเครื่องต้มน้ำผลไม้ ดังนั้นจึงเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินในปริมาณเริ่มต้นเท่ากัน 0.5 % w/v ในทุกตัวอย่างเครื่องต้มจำลอง

นอกจากนี้ อุณหภูมิและเวลาในการฆ่าเชื้อในตัวอย่างเครื่องต้มจำลอง (pH 3.4) มีผลต่อปริมาณสารบีตาไซยานินและการเปลี่ยนแปลงสีของเครื่องต้ม โดยในงานวิจัยใช้สภาวะการพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 70-72 °C เป็นเวลา 15 วินาที เนื่องจากเป็นสภาวะสำหรับฆ่าเชื้อในเครื่องต้มปรับกรดและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการฆ่าเชื้อเพียงเล็กน้อย (Hasani et al., 2021) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการใช้อุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับฆ่าเชื้อ โดยใช้อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 36 วินาที เนื่องจากมิงงานวิจัยของ Bassama และคณะ (2021) บ่งชี้ได้ว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ยังคงรักษาเสถียรของสารบีตาไซยานินได้ แต่เมื่อได้ทำการทดลองพบว่า สีของเครื่องต้มจำลองเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากโดยเปลี่ยนจากสีแดงม่วงไปเป็นสีส้มอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เครื่องต้มจำลองก่อนและหลังการฆ่าเชื้อด้วยวิธีพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 36 วินาที

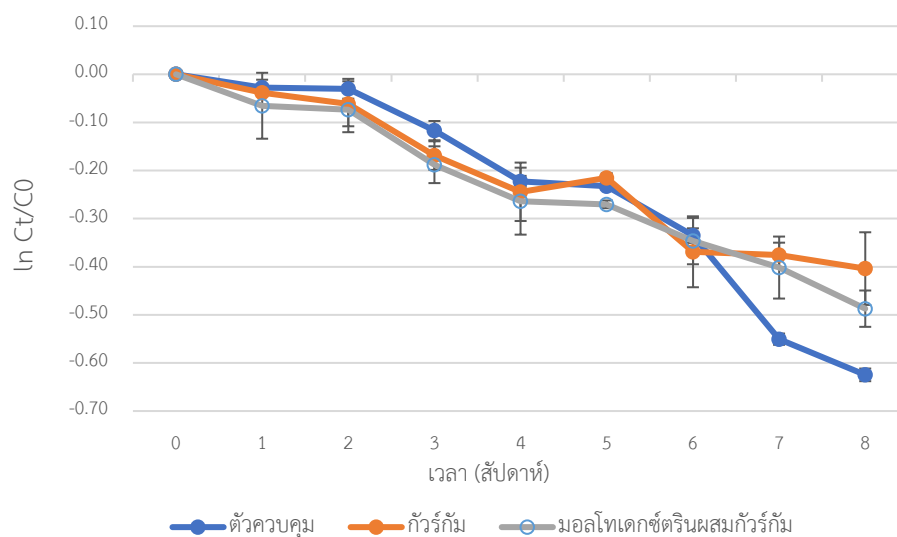


#### 4.4.1 สมบัติทางเคมี

##### 4.4.1.1 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content)

จากผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณสารบีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลองโดยใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน พบว่า ในสัปดาห์แรกของการเก็บรักษา เครื่องดื่มจำลองที่มีส่วนผสมของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้ง (C) มีปริมาณสารบีตาไซยานินเริ่มต้นมากที่สุด เท่ากับ  $161.52 \pm 1.46$  mg/100ml ตามด้วยเครื่องดื่มจำลองที่มีส่วนผสมของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG) และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) มีค่าเท่ากับ  $92.64 \pm 2.21$  และ  $35.63 \pm 1.35$  mg/100ml ตามลำดับ ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ปริมาณสารบีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลองทุกตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง โดยค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสารบีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลอง แสดงดังตารางที่ 4.14 ในเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุม (C) มีค่าคงที่อัตราการสลายตัวมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.078 \pm 0.00$  สัปดาห์<sup>-1</sup> รองลงมาได้แก่ เครื่องดื่มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) เท่ากับ  $0.061 \pm 0.01$  สัปดาห์<sup>-1</sup> และ เครื่องดื่มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG) เท่ากับ  $0.050 \pm 0.01$  สัปดาห์<sup>-1</sup> ซึ่งเครื่องดื่มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 2 สูตร มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งนี้ค่าคงที่อัตราการสลายตัวสามารถบ่งบอกได้ถึงแนวโน้มการลดลงของสารบีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลองระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุมมีค่ามากที่สุด จึงมีแนวโน้มการลดลงของปริมาณสารบีตาไซยานินสูงที่สุด ดังนั้น การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินได้ดีเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องดื่มจำลอง ทั้งนี้เนื่องจากกัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ทรินสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของสารบีตาไซยานินได้ จึงสามารถช่วยลดการสลายตัวของสารบีตาไซยานินได้ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า แนวโน้มการลดลงของสารบีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลองที่เติมมอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัมมีแนวโน้มการลดลงที่มากกว่าในเครื่องดื่มที่เติมกัวร์กัมเพียงชนิดเดียว เนื่องจาก มอลโทเดกซ์ทริน (DE 16-19) มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1000-1200 Da (Carvajal et al., 1999) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า น้ำหนักโมเลกุลของกัวร์กัม มีค่าเท่ากับ  $1.9 \times 10^5$  Da (Karaman et al., 2014) จึงทำให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับโมเลกุลของกัวร์กัมและสารบีตาไซยานินมีความแข็งแรงและคงทนมากกว่า ส่งผลให้สารบีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลองมีความเสถียรและเกิดการสลายตัวน้อยกว่าเครื่องดื่มจำลองที่มีส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ทริน

#### 4.4.1.2 ค่าคงที่อัตราการสลายตัวทางจลนพลศาสตร์ของสารปีตาไซยานิน (Degradation rate constant, k)



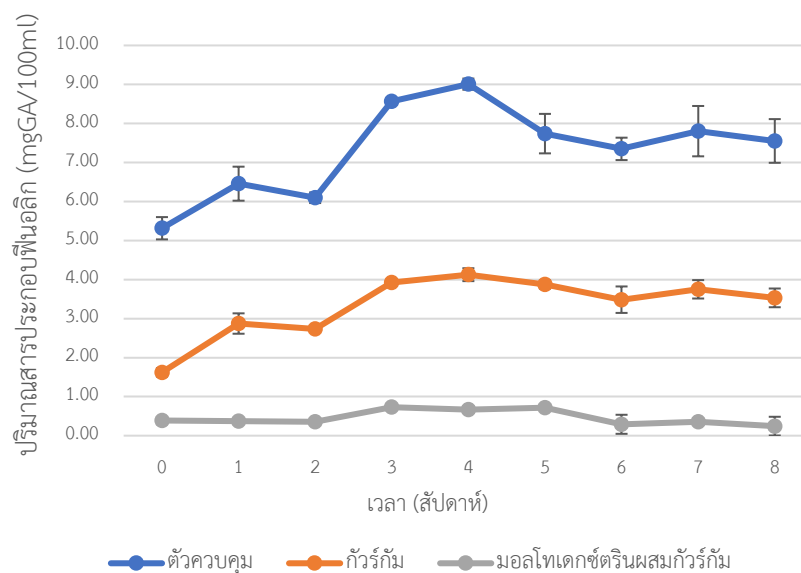
รูปที่ 4.14 ปริมาณสารปีตาไซยานินในผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่อัตราการสลายตัว (k value) ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ค่าคงที่อัตราการสลายตัว (สัปดาห์ <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
ตัวควบคุม (C)	0.078 <sup>a</sup> ± 0.00	0.92
กัวร์กัม (GG)	0.050 <sup>b</sup> ± 0.01	0.96
มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	0.061 <sup>b</sup> ± 0.01	0.98

หมายเหตุ : <sup>a-b</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคงที่อัตราการสลายตัวที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

#### 4.4.1.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic compound)



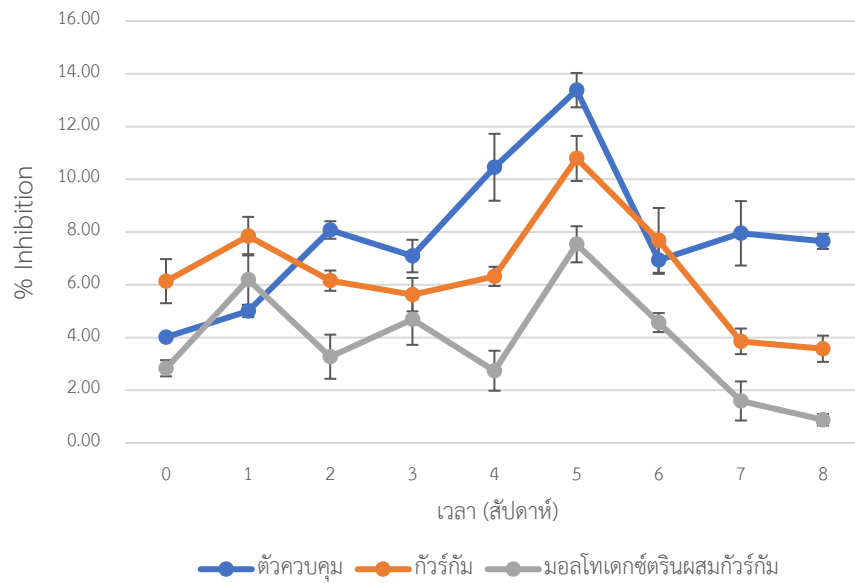
**รูปที่ 4.15** ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องต้มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องต้มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่าง เก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยเริ่มต้นปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องต้มจำลองมีแนวโน้มเดียวกับปริมาณสารบีตาไซยานิน ในเครื่องต้มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C) มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุด เท่ากับ  $5.32 \pm 0.29$  mgGA/100ml รองลงมาได้แก่ เครื่องต้มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG) และมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ  $1.62 \pm 0.11$  และ  $0.39 \pm 0.09$  mgGA/100ml นอกจากนี้ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องต้มจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 3 สัปดาห์ หลังจากนั้นเริ่มลดลงในสัปดาห์ที่ 4 และมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งครบ 8 สัปดาห์ ทั้งนี้ จากรูป 4.15 จะเห็นได้ว่า เครื่องต้มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C) มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุดในระหว่างการเก็บรักษา รองลงมาได้แก่ เครื่องต้มจำลองที่มีส่วนผสมของกัวร์กัม (GG) และมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) ตามลำดับ เนื่องจาก เครื่องต้มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม ไม่มีส่วนผสมของไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำหน้าที่ช่วยรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานิน จึงทำให้สารบีตาไซยานินเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวไปเป็น

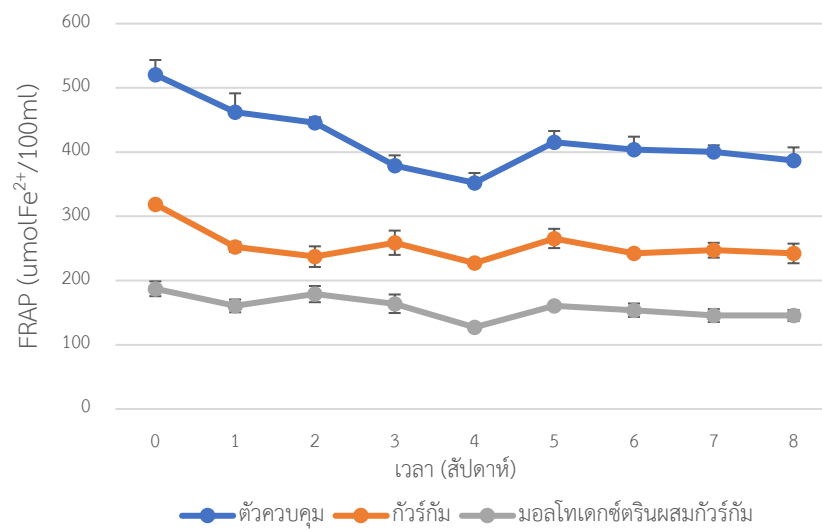
สารประกอบฟีนอลิกกลุ่มอื่น และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่เพิ่มขึ้นสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาการสลายของสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่เดิมในเครื่องต้มจำลองและเกิดปฏิกิริยารวมตัวเป็นสารประกอบฟีนอลิกกลุ่มใหม่ได้ เช่น สารประกอบกลุ่มกรดฟีนอลิก *p*-coumaric acid สามารถเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้สารประกอบฟีนอลิกกลุ่มฟลาโวนอยด์ catechin และ epicatechin ได้ในระหว่างการเก็บรักษา (Liu et al., 2015)

#### 4.4.1.4 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacities)

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH โดยวิเคราะห์กลไกการยับยั้งอนุมูลอิสระโดยการให้ไฮโดรเจนอะตอม และวิธี FRAP โดยวิเคราะห์กลไกการต้านอนุมูลอิสระโดยการให้อิเล็กตรอนเพื่อหยุดปฏิกิริยาสายโซ่ของอนุมูลอิสระ จากการศึกษาวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในเครื่องต้มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการทำแห้งโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน พบว่า ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยกลไก DPPH ในเครื่องต้มจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.16) โดยค่า % inhibition เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 3 ของการเก็บรักษาจนกระทั่งมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดในสัปดาห์ที่ 5 และหลังจากนั้นจึงมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP มีแนวโน้มลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (รูปที่ 4.17) โดยมีแนวโน้มลดลงมากที่สุดในสัปดาห์ที่ 4 หลังจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นและค่อนข้างคงที่จนครบ 8 สัปดาห์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เครื่องต้มจำลองที่มีส่วนผสมของสารบีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (C) ในการทำแห้งมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า % inhibition และการลดลงของค่า FRAP มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารบีตาไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องต้มจำลองในระหว่างการเก็บรักษา โดยพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เครื่องต้มจำลองมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยการให้ไฮโดรเจนอะตอม (DPPH) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันและการลดลงของปริมาณสารบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษา จึงทำให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยกลไกการให้อิเล็กตรอน (FRAP) มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2.2.2 สามารถบ่งชี้ได้ว่า สารประกอบฟีนอลิกที่พบในสารสกัดบีตาไซยานินในงานวิจัย ส่งผลต่อค่าการต้านอนุมูลอิสระแบบกลไก DPPH และสารบีตาไซยานินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการต้านอนุมูลอิสระด้วยกลไก FRAP นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของค่า DPPH เกิดจากการเพิ่มขึ้นของสาร Betanidin (สีเหลือง) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของสารบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, OH-) เพิ่มขึ้นในโมเลกุล จึงทำให้มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระแบบ DPPH เพิ่มขึ้น (Miguel, 2018)



รูปที่ 4.16 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยกลไก DPPH ในเครื่องดื่มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ 4.17 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยกลไก FRAP ในเครื่องดื่มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

#### 4.4.2 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับลักษณะภายนอกของตัวอย่างเครื่องดื่มจำลองในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์ โดยในงานวิจัยศึกษาการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ดังนี้

##### 4.4.2.1 ค่าความขุ่น (Turbidity)

**ตารางที่ 4.13** ค่าความขุ่นของเครื่องดื่มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ความขุ่น (Absorbance 550 nm)	
	สัปดาห์ที่ 0	สัปดาห์ที่ 8
ตัวควบคุม (C)	0.47 <sup>Ab</sup> ± 0.01	0.43 <sup>Bb</sup> ± 0.01
กัวร์กัม (GG)	0.77 <sup>Aa</sup> ± 0.01	0.72 <sup>Ba</sup> ± 0.02
มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	0.18 <sup>Ac</sup> ± 0.00	0.15 <sup>Bc</sup> ± 0.01

หมายเหตุ : <sup>a-b</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขุ่นในเครื่องดื่มจำลองที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

<sup>A-B</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขุ่นในเครื่องดื่มจำลองก่อนและหลังการเก็บรักษา (แนวนอน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

การวิเคราะห์ค่าความขุ่นของเครื่องดื่มจำลองในระหว่างการเก็บรักษา (ดังตารางที่ 4.12) พบว่า เครื่องดื่มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้จากการใช้กัวร์กัม (GG) ในการทำแห้งมีค่าความขุ่นมากที่สุด เท่ากับ  $0.77 \pm 0.01$  ซึ่งแตกต่างจากเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุม (C) เท่ากับ  $0.47 \pm 0.01$  และเครื่องดื่มจำลองที่มีส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ทรินกับกัวร์กัม (MD:GG) เท่ากับ  $0.18 \pm 0.00$  อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งค่าความขุ่นดังกล่าว เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในเครื่องดื่มจำลองก่อนการเก็บรักษา โดยหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ค่าความขุ่นของเครื่องดื่มจำลองในทุกตัวอย่างมีค่าลดลงในระหว่างเก็บรักษา การที่เครื่องดื่มจำลองที่มีส่วนผสมของกัวร์กัม มีความขุ่นมากที่สุด เนื่องจากกัวร์กัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น เมื่อละลายน้ำ สารละลายที่ได้มีความขุ่นและความหนืดมากกว่ามอลโทเดกซ์ทริน (Dwari, & Mishra, 2019) ทั้งนี้ มอลโทเดกซ์ทรินมีสมบัติละลายน้ำได้ดี ความหนืดต่ำ (สุทธิลักษณ์ ศิริพรเลิศ, 2558) ดังนั้นค่าความขุ่นที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่า

#### 4.4.2.2 ค่าความหนืด (Viscosity)

ตารางที่ 4.14 ค่าความหนืดของเครื่องตีจําลองที่มีการเติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ความหนืด (cP)	
	สัปดาห์ที่ 0	สัปดาห์ที่ 8
ตัวควบคุม (C)	10.47 <sup>Ac</sup> ± 0.06	9.73 <sup>Bc</sup> ± 0.06
กัวร์กัม (GG)	18.77 <sup>Aa</sup> ± 0.32	14.53 <sup>Ba</sup> ± 0.29
มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	12.23 <sup>Ab</sup> ± 0.12	11.47 <sup>Bb</sup> ± 0.23

หมายเหตุ : <sup>A-B</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความหนืดในเครื่องตีจําลองในระหว่างการเก็บรักษา (แนวนอน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

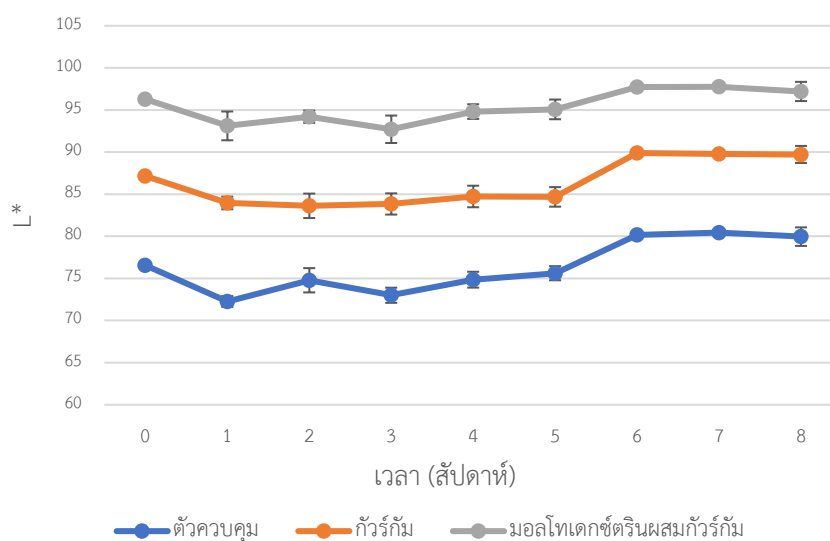
<sup>a-b</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความหนืดในเครื่องตีจําลองที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ความหนืด คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหลเมื่อมีแรงมากระทำ ของไหลที่มีความหนืดสูงจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีความต้านทานการไหลต่ำ (สายนธ์ สุขพงษ์พันธ์, 2549) ความหนืดในผลิตภัณฑ์เครื่องตี เป็นลักษณะสำคัญของผลิตภัณฑ์เครื่องตีมีผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค จากผลการศึกษาค่าความหนืดของเครื่องตีจําลองในระหว่างการเก็บรักษา (ดังตารางที่ 4.13) พบว่า ก่อนการเก็บรักษา ความหนืดของเครื่องตีจําลองที่มีการเติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG) มีค่าความหนืดมากที่สุด ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ  $18.77 \pm 0.32$  cP รองลงมาได้แก่ เครื่องตีจําลองที่มีส่วนผสมของมอลโทเดกซ์ทรินกับกัวร์กัม (MD:GG) มีค่าเท่ากับ  $12.23 \pm 0.12$  cP และเครื่องตีจําลองตัวควบคุม (C) มีค่าเท่ากับ  $10.47 \pm 0.06$  cP ตามลำดับ เนื่องจาก กัวร์กัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในอาหารและเครื่องตี (Teleszko, Nowicka, & Wojdyto, 2019) โดยกัวร์กัมมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่ามอลโทเดกซ์ทริน เมื่อนำไปผสมในเครื่องตีจําลองจึงเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำหรือสารปีตาไซยานินในระบบที่แข็งแรงกว่า ยึดหยุ่นน้อยกว่า จึงทำให้เครื่องตีที่ได้มีความหนืดมากกว่า (Hege, Palberg, & Vilgis, 2020; Culetu et al., 2021) ทั้งนี้ค่าความหนืดของเครื่องตีจําลองทุกตัวอย่างมีค่าความหนืดอยู่ในช่วงของผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้โดยทั่วไป น้ำส้ม 1.53 -300.9 cP น้ำพีช 3.9-2086.9 cP และน้ำแบล็คเคอร์แรนท์ 2.4-499.9 cP (Rai et al., 2005) โดยค่าที่ได้ในงานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของน้ำ

ผลไม้ที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในงานวิจัยของ Tongkham และคณะ (2017) ศึกษาการเติมเพคตินลงในน้ำแก้วมังกร โดยมีค่าความหนืดเท่ากับ 9.57-12.67 cP และงานวิจัยของ ัญชนก อุดมทรัพย์ (2554) ศึกษาการเติมแซนแทนกัมลงในน้ำมังคุด โดยมีค่าความหนืดเท่ากับ 15.47-24.09 cP

หลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์พบว่า ค่าความหนืดของเครื่องดื่มจำลอง ทุกตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจาก เกิดปฏิกิริยา Depolymerizing ของโครงสร้างไฮโดรคอลลอยด์ในระหว่างการเก็บรักษาและเกิดการลดลงของความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารไฮโดรคอลลอยด์ในระบบ จึงส่งผลให้ค่าความหนืดของเครื่องดื่มจำลองมีค่าลดลง (Paquet et al., 2014) โดยแนวโน้มการลดลงของความหนืดเครื่องดื่มจำลองในงานวิจัย มีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำการศึกษาลักษณะของความหนืดในเครื่องดื่มน้ำผลไม้ที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในระหว่างการเก็บรักษา (Liang et al., 2006; Paquet et al., 2010; Paquet et al., 2014)

#### 4.4.2.3 ค่าสี ( $L^*$ , $a^*$ และ $b^*$ )

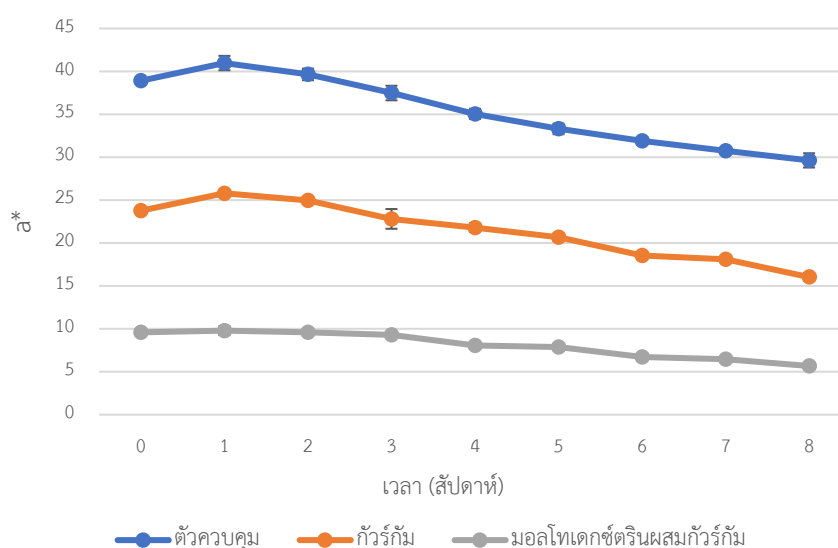


**รูปที่ 4.18** ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ของเครื่องดื่มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

การเปลี่ยนแปลงค่าสี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ของเครื่องดื่มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันทุกตัวอย่างมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ค่าสีเริ่มต้นของเครื่องดื่มจำลอง



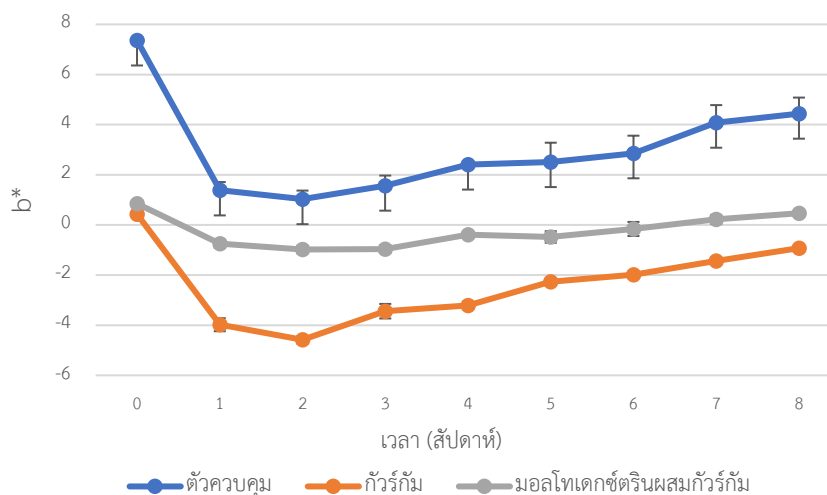
พบว่า ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ของเครื่องตี๋มจำลองที่มีการเติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) มีค่าเท่ากับ  $96.29 \pm 0.02$  ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องตี๋มจำลองที่มีส่วนผสมของสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (GG) มีค่าเท่ากับ  $87.14 \pm 0.01$  และเครื่องตี๋มจำลองตัวควบคุม (C) มีค่าเท่ากับ  $76.57 \pm 0.01$  เนื่องจากมอลโทเดกซ์ตรินเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวขุ่น การใช้มอลโทเดกซ์ตรินเป็นส่วนผสมในผงสารสกัดบีตาไซยานินจึงทำให้เครื่องตี๋มจำลองที่ได้มีค่าความสว่างมากที่สุด ทั้งนี้ ค่า  $L^*$  มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในสัปดาห์ที่ 5 ของการเก็บรักษา



**รูปที่ 4.19** ค่าสีแดง ( $a^*$ ) ของเครื่องตี๋มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดบีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

จากการวิเคราะห์ค่าสีแดง ( $a^*$ ) ในเครื่องตี๋มจำลอง พบว่า ก่อนการเก็บรักษาเครื่องตี๋มจำลองที่มีส่วนผสมของผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C) มีค่า  $a^*$  มากที่สุดเท่ากับ  $38.91 \pm 0.01$  รองลงมาได้แก่ เครื่องตี๋มจำลองที่มีส่วนผสมของสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัม (G) เท่ากับ  $23.77 \pm 0.01$  และมอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) เท่ากับ  $9.59 \pm 0.02$  ตามลำดับ โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า  $a^*$  ของเครื่องตี๋มจำลองทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยใน 2 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา หลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลง จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า เครื่องตี๋มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C) มีแนวโน้มการลดลงมากที่สุด เนื่องจาก ค่าสีแดงบ่งบอกได้ถึงปริมาณสารบีตาไซยานินของเครื่องตี๋มจำลอง (Chranioti et al., 2015) โดยเครื่องตี๋มจำลองที่ไม่ได้มีส่วนผสมของไฮโดรคอลลอยด์มีการสลายตัวของสารบีตาไซยานินมากที่สุดในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้น

การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งผงสารสกัดปีตาไซยานินสำหรับใช้ในเครื่องต้ม จึงช่วยลดการลดลงของค่าสีแดง ( $a^*$ ) ในเครื่องต้มจำลองได้



**รูปที่ 4.20** ค่าสีแดง ( $b^*$ ) ของเครื่องต้มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

นอกจากนี้ค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) ในเครื่องต้มจำลองเกิดจากการประกอบด้วยสารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน ได้แก่ สาร betanidin, neobetainin และ betalamic acid ซึ่งมีสีเหลือง (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006) จากผลการวิเคราะห์ค่า  $b^*$  พบว่า ก่อนการเก็บรักษา (สัปดาห์ที่ 0) เครื่องต้มจำลองตัวควบคุม (C) มีค่า  $b^*$  มากที่สุด เท่ากับ  $7.85 \pm 0.02$  รองลงมาได้แก่ เครื่องต้มจำลองที่มีส่วนผสมของสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัมและกัวร์กัม ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ  $0.85 \pm 0.01$  (MD:GG) และ  $0.43 \pm 0.01$  (GG) การที่เครื่องต้มจำลองตัวควบคุมมีค่า  $b^*$  มากที่สุด สามารถบ่งชี้ได้ถึงการเกิดการสลายตัวของสารปีตาไซยานินมากที่สุด การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดปีตาไซยานินสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินได้ในระหว่างกระบวนการผลิต จึงทำให้เครื่องต้มจำลองที่มีส่วนผสมของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์มีค่า  $b^*$  ที่น้อยกว่า ทั้งนี้ มีงานวิจัยบ่งชี้ได้ว่า อุณหภูมิต่ำ สามารถช่วยทำให้สาร Betalamic acid และ Cyclo-Dopa ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารปีตาไซยานิน เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกัน จึงทำให้ในระบบมีปริมาณสารปีตาไซยานินเพิ่มขึ้นและทำให้สาร Betalamic acid (สีเหลือง) มีค่าลดลง (Karangutkar, & Ananthanarayan, 2020) โดยในงานวิจัยเก็บรักษาเครื่องต้มจำลองไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศา

เซลเซียส จึงทำให้ค่า  $b^*$  ของเครื่องต้มจำลองทุกตัวอย่างมีค่าลดลงในสัปดาห์แรกของการเก็บรักษา หลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.20)

#### 4.4.2.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) และค่าสีปรากฏ (Color Appearance)

ตารางที่ 4.15 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) ของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันในหลังเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	$\Delta E^*$
ตัวควบคุม (C)	10.47 <sup>a</sup> $\pm$ 0.89
กัวร์กัม (GG)	8.15 <sup>b</sup> $\pm$ 0.63
มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	4.08 <sup>c</sup> $\pm$ 0.54

<sup>a-d</sup> แสดงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้ในแต่ละชนิดไฮโดรคอลลอยด์ (แนวตั้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

จากการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) ของเครื่องต้มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน หลังจากผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 4.14) พบว่า เครื่องต้มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ใช่ไฮโดรคอลลอยด์ (C) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) เท่ากับ  $10.47 \pm 0.89$  รองลงมาคือ เครื่องต้มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินจากกัวร์กัม (GG) เท่ากับ  $8.15 \pm 0.63$  และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) เท่ากับ  $4.08 \pm 0.54$  ตามลำดับ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าสีในเครื่องต้มจำลองระหว่างการเก็บรักษาสามารถบ่งบอกได้ถึงการสลายตัวของสารบีตาไซยานินและการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในระหว่างการเก็บ ดังนั้นเครื่องต้มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ใช่ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) เกิดการสลายตัวของสารบีตาไซยานินมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าสีปรากฏ (รูปที่ 4.17) โดยผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม (C) เกิดการเปลี่ยนสีมากที่สุด โดยเปลี่ยนจากสีแดงม่วงไปเป็นสีน้ำตาลส้ม ซึ่งบ่งบอกได้ถึงการสลายตัวของสารบีตาไซยานินและการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบฟีนอลิกต่างๆ ของผงสารสกัดในระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่เครื่องต้มจำลองที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสีม่วงแดงมีสีจางลงทั้งเครื่องต้มจำลองที่เติมกัวร์กัม (GG) และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม (MD:GG) หลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ 4.21 ค่าสีปรากฏของเครื่องตีหม้อที่เติมผงสารสกัดบีตาไซยานินที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบในสัปดาห์ที่ 0 และสัปดาห์ที่ 8 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิธีการสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงให้ได้ปริมาณมากที่สุด พบว่า วิธีการสกัดแบบผสมระหว่างวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมและวิธีอัลตราโซนิคแบบจุ่มโพรบ (CE-P) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารบีตาไซยานินจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดงให้ได้ปริมาณมากที่สุด โดยค่าสีของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากการสกัดทั้ง 4 วิธีมีค่าสีอยู่ในช่วงสีม่วงแดงเหมือนกัน แต่เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารต่างๆ พบว่า การสกัดด้วยวิธีแบบผสม (CE-P) สามารถทำให้ได้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งปริมาณสารบีตาไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์องค์ประกอบในสารสกัดบีตาไซยานินด้วยวิธี HPLC ประกอบด้วยสารบีตาไซยานิน 8 ชนิด โดยพบ Phyllocactin มากที่สุด สารประกอบกลุ่มกรดฟีนอลิกพบทั้งหมด 6 ชนิด โดยพบสาร 4-Hydroxybenzoic acid มีปริมาณมากที่สุด และสารกลุ่มฟลาโวนอยด์พบเพียงชนิดเดียว ได้แก่ Rutin

จากการศึกษาผลของการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) สารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีการสกัดแบบผสม (CE-P) ต่อเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินสามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลผลิตที่ได้และทำให้มีค่ากิจกรรมของน้ำในผงสารสกัดบีตาไซยานินลดลงเมื่อเทียบกับผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) ซึ่งมีค่ากิจกรรมของน้ำมากที่สุดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารบีตาไซยานินและปฏิกิริยาสร้างสารสีน้ำตาล (Maillard reaction) ในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุมมีค่า  $\Delta E^*$  มากที่สุด โดยมีค่าแตกต่างจากผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งนี้ ผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุมมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากการสลายตัวของสารบีตาไซยานินไปเป็นสาร betanidin ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บ นอกจากนี้การใช้กัวร์กัมและกัวร์กัมผสมมอลโทเดกซ์ตรินในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินของผงสารสกัดในระหว่างการเก็บรักษาได้ โดยมีค่าคงที่อัตราการสลายตัวน้อยกว่าผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดบีตาไซยานินสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินและค่าการเปลี่ยนแปลงสีได้ในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของสารในผงสารสกัดบีตาไซยานินตัวควบคุมหลังการเก็บรักษา พบชนิดและ

ปริมาณของสารปีตาไซยานินมีค่าลดลง ในขณะที่สารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์

จากการคัดเลือกไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการทำแห้งสารสกัดปีตาไซยานิน พบว่า ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ผ่านการคัดเลือกได้แก่ ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมและมอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม โดยเปรียบเทียบกับผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (ตัวควบคุม) เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของผงสารสกัดปีตาไซยานินทั้ง 3 สูตร พบว่า ผงสารสกัดปีตาไซยานินตัวควบคุม มีปริมาณสารปีตาไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) รองลงมาได้แก่ ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมและผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพพบว่า ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม มีค่าร้อยละผลผลิตที่ได้ ค่าการละลายและค่าความหนาแน่นรวมมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) ในขณะที่มีค่าความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำและค่าการดูดความชื้นน้อยที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเทียบกับผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมและผงสารสกัดปีตาไซยานินตัวควบคุม

การศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ผ่านคัดเลือกเป็นส่วนผสมลงในเครื่องดื่มจำลอง (pH 3.4) โดยเติมปริมาณเท่ากันในทุกอย่าง เท่ากับ 0.5 % w/v แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารปีตาไซยานินเริ่มต้นของผงสารสกัดในแต่ละตัวอย่างมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้เครื่องดื่มจำลองที่ได้มีปริมาณสารปีตาไซยานินเริ่มต้นไม่เท่ากัน เมื่อวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเครื่องดื่มจำลองในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า เครื่องดื่มจำลองที่มีส่วนผสมของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมมีแนวโน้มการลดลงของปริมาณสารปีตาไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาที่น้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) กับเครื่องดื่มจำลองที่เติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม ซึ่งเครื่องดื่มจำลองทั้งสองตัวอย่าง มีค่าคงที่อัตราการสลายตัวน้อยกว่าเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุม การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกพบว่า เครื่องดื่มจำลองทุกตัวอย่างมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นใน 4 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลง เครื่องดื่มจำลองที่เติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรคอลลอยด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุด เมื่อวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระพบว่า เครื่องดื่มจำลองทุกตัวอย่างใน 4-5 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา ค่า DPPH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่า FRAP มีแนวโน้มลดลง สามารถบ่งชี้ได้ถึงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารปีตาไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกในเครื่องดื่มจำลองระหว่างการเก็บรักษา โดยเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารต่างๆ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ดังนั้นการใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมลงในเครื่องดื่มจำลองสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินได้ดีกว่าการใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ไม่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พบว่า หลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ เครื่องดื่มจำลองที่เติมกัวร์กัมมีค่าความขุ่นและค่าความหนืดมากที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ยังอยู่ในช่วงของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มโดยทั่วไปที่ขายตามท้องตลาด และในส่วนของค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E^*$ ) ในเครื่องดื่มจำลองตัวควบคุมมีค่ามากที่สุดและแตกต่างจากเครื่องดื่มจำลองที่ใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินจากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ( $p \leq 0.05$ )

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องดื่มจำลองที่มีการปรับกรด แม้ว่าจะมีค่าร้อยละผลผลิตที่ได้น้อยกว่าผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม แต่หากพิจารณาในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม พบว่า แม้ใส่ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมสามารถให้ความเข้มข้นที่ดีและมีปริมาณสารปีตาไซยานินที่มากกว่าการเติมผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ทรินผสมกัวร์กัม นอกจากนี้ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้กัวร์กัมยังสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินและค่าสีให้มีความคงตัวตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ทั้งในสภาวะการเก็บรักษาผงสารสกัดปีตาไซยานินและเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องดื่มจำลอง เมื่อเก็บตัวอย่างเครื่องดื่มจำลองครบ 8 สัปดาห์ ยังคงมีปริมาณสารปีตาไซยานินหลงเหลืออยู่ ดังนั้นจึงยังคงมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสารปีตาไซยานินเมื่อสลายตัวจะทำให้เกิดเป็นสารอื่นๆ ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเก็บรักษาเครื่องดื่มจำลองปรับกรดที่มีส่วนผสมของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้ง นอกจากจะช่วยรักษาความเสถียรของค่าสีและปริมาณสารปีตาไซยานินแล้ว ยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค แม้ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 5.1 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพบว่า การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการทำแห้งสารสกัดปีตาไซยานินสามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของสารปีตาไซยานินได้ดีในระหว่างการเก็บรักษาและมีความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารให้สีในอุตสาหกรรมอาหารได้ และที่สำคัญจากการศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินในเครื่องดื่มจำลอง แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ลงในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มปรับกรดได้จริง และสามารถช่วยรักษาความคงตัวของค่าสีและปริมาณสารปีตาไซยานินได้ในระหว่างการเก็บรักษา แต่อย่างไรก็ตาม ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ได้ในงานวิจัยสามารถเกิดการสลายตัวหากผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ Pasteurization ที่อุณหภูมิเกิน 90 °C เนื่องจากผงสารสกัดปีตาไซยานินสามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน 80 °C ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้อุณหภูมิสูงในการผลิต เช่น ผลิตภัณฑ์ลูกกวาด ขนมเบเกอรี่ และเครื่องดื่มที่ใช้กระบวนการฆ่าเชื้อแบบ Sterilization เป็นต้น นอกจากนี้ ควรมีการประเมินความปลอดภัยของผง

สารสกัดปีตาไซยานินและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม มีการทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในเครื่องดื่มที่ใส่ผงสารสกัดปีตาไซยานินเทียบกับปริมาณที่ควรได้รับต่อวัน มีการศึกษา Bioavailability เมื่อรับประทานเข้าสู่ร่างกายและศึกษาผลขององค์ประกอบอื่นๆ ในอาหาร (Food matrix) ที่อาจส่งผลกระทบต่อความเสถียรของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ประยุกต์ใช้เป็น ส่วนผสมในผลิตภัณฑ์นั้นๆ ทั้งนี้ ผงสารสกัดให้สีจากธรรมชาติ อุดมไปด้วยสารที่มีประโยชน์ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดีมีความเข้มข้นที่เหมาะสมและมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันตามชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ จึงสามารถประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ดังนั้น ผลดังกล่าวจึงสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาประยุกต์ใช้ผงสารสกัดปีตาไซยานินที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่อไป





บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2559). คำแนะนำการปลูกแก้วมังกร [ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://esc.doae.go.th/wp-content/uploads/2016/03/Dragon\\_fruit.pdf](https://esc.doae.go.th/wp-content/uploads/2016/03/Dragon_fruit.pdf) [22 เมษายน 2565].
- กรรณิการ์ สอนโยธา. (2552). ผลของการใช้เอนไซม์ต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกและเนื้อแก้วมังกรพันธุ์เนื้อสีแดง *Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชุติมา ถนอมสิทธิ์, ธิพรพงษ์ เจริญยิ่ง และ จักรพันธ์ นาน่วม. (2561). เบตาเลน : สารสกัดจากเปลือกแก้วมังกรเพื่อการพัฒนาสีผิวของสัตว์น้ำ. *วารสารวิทยาศาสตร์ คชสาร*, 40(2).
- ทรงพร คำคม. (2560). การใช้สารสกัดจากเปลือกแก้วมังกรแดง *Hylocereus polyrhizus* ร่วมกับโซเดียมแลกเตตเพื่อการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคและการยืดอายุการเก็บรักษาคริสต์คริม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัญชนก อุดมทรัพย์, นันทวัน เทอดไทย และ เทพกัญญา หาญศิลป์. (2554). ผลของความเข้มข้นของแซนแทนกัมและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อคุณภาพของน้ำมัจจุชชนิดขุน. *เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 49, 43-50.
- ประกาศกระทรวงสาธารณสุข. (2561). วัตถุเจือปนอาหาร [ออนไลน์]. สืบค้นจาก [http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ\\_moph/P389.pdf](http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P389.pdf) [22 เมษายน 2565].
- ประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. คำชี้แจงประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยเรื่อง การแสดงฉลากของอาหารในภาชนะบรรจุ (เพิ่มเติม) [ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://www.fda.moph.go.th/Food/Process\\_download/.pdf](https://www.fda.moph.go.th/Food/Process_download/.pdf) [22 เมษายน 2565]
- ประสาน สวัสดิ์สีตั้ง. (2538). การเกิดสีน้ำตาลของอาหารและการควบคุมป้องกัน. *อาหาร*, 25(3), 160-169.
- ภขมน พิษญาจิตติพงษ์. (2556). การผลิตและสมบัติทางชีวภาพของสีผสมอาหารจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อผลสีแดง (*Hylocereus polyrhizus*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สายัณห์ สุขพงษ์พันธ์ และ วิรัตน์ ปฐมชัยอำพร. (2549). ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล [ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://www.dss.go.th/images/st-article/pep\\_9\\_2549\\_viscosity.pdf](https://www.dss.go.th/images/st-article/pep_9_2549_viscosity.pdf) [16 มิถุนายน 2565].

- สุทธิลักษณ์ ศิริพรเลิศ. (2558). ผลของสภาวะการดำเนินงานต่อการกระจายตัวของโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโทเดกซ์ตรินที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Adje, F., Lozano, Y. F., Lozano, P., Adima, A., Chemat, F., & Gaydou, E. M. (2010). Optimization of anthocyanin, flavonol and phenolic acid extractions from *Delonix regia* tree flowers using ultrasound-assisted water extraction. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 439-444.
- Agarwal, P., Singh, M., Singh, J., & Singh, R. P. (2019). Chapter 1 - Microbial Tyrosinases: A Novel Enzyme, Structural Features, and Applications. *Microbiology and Bioengineering*, 3-19.
- Aguilar, F., Crebelli, R., Barlow, S., & Dekant, W. (2008). Assessment of the results of the study by McCann et al. (2007) on the effect of some colours and sodium benzoate on children's behaviour - Scientific Opinion of the Panel on Food Additives, Flavourings, Processing Aids and Food Contact Materials (AFC). *European Food Safety Authority Journal*, 6(3), 660.
- Amchova, P., Kotolova, H., & Ruda-Kucerova, J. (2015). Health safety issues of synthetic food colorants. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(3), 914-922.
- Antigo, J., Bergamasco, R., & Madrona, G. (2017). Effect of ph on the stability of red beet extract (*Beta vulgaris* l.) microcapsules produced by spray drying or freeze drying. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 38.
- Aryal, S. A. O., Baniya, M. K., Danekhu, K., Kunwar, P., Gurung, R., & Koirala, N. A. O. (2019). Total Phenolic Content, Flavonoid Content and Antioxidant Potential of Wild Vegetables from Western Nepal. *Plants*, 8(96).
- Azeredo, H. M. C. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(12), 2365-2376.
- Bakar, J., Ee, S. C., Muhammad, K., Hashim, D. M., & Adzahan, N. (2013). Spray-Drying Optimization for Red Pitaya Peel (*Hylocereus polyrhizus*). *Food and Bioprocess Technology*, 6(5), 1332-1342.

- Barbosa, M. I. M. J., Borsarelli, C. D., & Mercadante, A. Z. (2005). Light stability of spray-dried bixin encapsulated with different edible polysaccharide preparations. *Food Research International*, 38(8), 989-994.
- Bassama, J., Tamba, A., Ndong, M., Sarr, K. D., & Cissé, M. (2021). Degradation Kinetics of Betacyanins during the Pasteurization and Storage of Cactus Pear (*Opuntia dillenii* Haw.) Juice Using the Arrhenius, Eyring, and Ball Models. *Beverages*, 7(1).
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2018). Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 408-415.
- Bockuviene, A., & Sereikaite, J. A.-O. (2020). New  $\beta$ -Carotene-Chitooligosaccharides Complexes for Food Fortification: Stability Study. *Foods*, 9(765).
- Breitel, D., Brett, P., Alseekh, S., Fernie, A. R., Butelli, E., & Martin, C. (2021). Metabolic engineering of tomato fruit enriched in L-DOPA. *Metabolic Engineering*, 65, 185-196.
- Cai, Y., & Corke, H. (1999). Amaranthus Betacyanin Pigments Applied in Model Food Systems. *Journal of Food Science*, 64(5), 869-873.
- Cai, Y. Z., & Corke, H. (2000). Production and Properties of Spray-dried Amaranthus Betacyanin Pigments. *Journal of Food Science*, 65(7), 1248-1252.
- Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., & Cal-Vidal, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4), 420-428.
- Carreon-Hidalgo, J. P., Franco-Vásquez, D. C., Gómez-Linton, D. R., & Pérez-Flores, L. J. (2022). Betalain plant sources, biosynthesis, extraction, stability enhancement methods, bioactivity, and applications. *Food Research International*, 151, 110821.
- Carrera, C., Pastol, J., Setyaningsih, W., Ruiz-Rodríguez, A., Ferreiro-González, M., Fernández Barbero, G., & Palma, M. (2021). Optimization by Means of Chemometric Tools of an Ultrasound-Assisted Method for the Extraction of Betacyanins from Red Dragon Fruit (*Hylocereus polyrhizus*). *Agronomy*, 11(6).

- Carvajal, P. A., MacDonald, G. A., & Lanier, T. C. (1999). Cryostabilization Mechanism of Fish Muscle Proteins by Maltodextrins. *Cryobiology*, 38(1), 16-26.
- Castro, N., Durrieu, V., Raynaud, C., & Rouilly, A. (2016). Influence of DE-value on the physicochemical properties of maltodextrin for melt extrusion processes. *Carbohydrate Polymers*, 144, 464-473.
- Castro-Enríquez, D. D., Montaña-Leyva, B., Del Toro-Sánchez, C. L., Juárez-Onofre, J. E., Carvajal-Millan, E., Burruel-Ibarra, S. E., Tapia-Hernández, J. A., Barreras-Urbina, C. G., & Rodríguez-Félix, F. (2020). Stabilization of betalains by encapsulation—a review. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1587-1600.
- Castro-Munoz, R., Barragán-Huerta, B. E., & Yáñez-Fernández, J. (2015). Use of gelatin-maltodextrin composite as an encapsulation support for clarified juice from purple cactus pear (*Opuntia stricta*). *LWT - Food Science and Technology*, 62(1), 242-248.
- Chen, X., Wang, P., Zheng, Y., Gu, M., Lin, X., Wang, S., Jin, S., & Ye, N. (2020). Comparison of Metabolome and Transcriptome of Flavonoid Biosynthesis Pathway in a Purple-Leaf Tea Germplasm Jinmingzao and a Green-Leaf Tea Germplasm Huangdan reveals Their Relationship with Genetic Mechanisms of Color Formation. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(11).
- Chen, Z., Zhong, B., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2021). Identification of phenolic compounds in Australian grown dragon fruits by LC-ESI-QTOF-MS/MS and determination of their antioxidant potential. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(6), 103151.
- Cheok, C. Y., Chin, N. L., Yusof, Y. A., Talib, R. A., & Law, C. L. (2013). Optimization of total monomeric anthocyanin (TMA) and total phenolic content (TPC) extractions from mangosteen (*Garcinia mangostana* Linn.) hull using ultrasonic treatments. *Industrial Crops and Products*, 50, 1-7.
- Chranioti, C., Nikoloudaki, A., & Tzia, C. (2015). Saffron and beetroot extracts encapsulated in maltodextrin, gum Arabic, modified starch and chitosan: Incorporation in a chewing gum system. *Carbohydrate Polymers*, 127.

- Czapski, J. (1985). The effect of heating conditions on losses and regeneration of betacyanins. *International Journal of Food Research and Technology*, 180(1), 21-25.
- Das, M., Saeid, A., Hossain, M. F., Jiang, G.-H., Eun, J. B., & Ahmed, M. (2019). Influence of extraction parameters and stability of betacyanins extracted from red amaranth during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 643-653.
- Dogan, M., Toker, O. S., & Gokse, M. (2011). Rheological Behaviour of Instant Hot Chocolate Beverage: Part 1. Optimization of the Effect of Different Starches and Gums. *Food Biophysics*, 6, 512-518.
- Dwari, R. K., & Mishra, B. K. (2019). Evaluation of flocculation characteristics of kaolinite dispersion system using guar gum: A green flocculant. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(5), 745-755.
- Eissa, H. A., & Ibrahim, W. A. (2018). Kinetics of phenylalanine and tyrosine ammonia-lyase enzymes activity of banana fruit (*Musa cavendishii* L., cv. Enana). *Middle East Journal of Applied Sciences*, 8(2), 680-689.
- Fan, R., Sun, Q., Zeng, J., & Zhang, X. (2020). Contribution of anthocyanin pathways to fruit flesh coloration in pitayas. *BMC Plant Biology*, 20(1), 361.
- Fathordoobady, F., Jarzebski, M., Pratap-Singh, A., Guo, Y., & Abd-Manap, Y. (2021). Encapsulation of betacyanins from the peel of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus* L.) in alginate microbeads. *Food Hydrocolloids*, 113, 106535.
- Fathordoobady, F., Mirhosseini, H., Selamat, J., & Manap, M. Y. A. (2016). Effect of solvent type and ratio on betacyanins and antioxidant activity of extracts from *Hylocereus polyrhizus* flesh and peel by supercritical fluid extraction and solvent extraction. *Food Chemistry*, 202, 70-80.
- Fernandes, R., Borges, S., & Botrel, D. (2013). Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties. *Food Science and Technology (Campinas)*, 33, 171-178.
- Fernando, G. S. N., Wood, K., Papaioannou, E. H., Marshall, L. J., Sergeeva, N. N., & Boesch, C. (2021). Application of an Ultrasound-Assisted Extraction Method to

- Recover Betalains and Polyphenols from Red Beetroot Waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(26), 8736-8747.
- Flores-Mancha, M. A., Ruíz-Gutiérrez, M. G., Sánchez-Vega, R., Santellano-Estrada, E., & Chávez-Martínez, A. (2020). Characterization of Beet Root Extract (*Beta vulgaris*) Encapsulated with Maltodextrin and Inulin. *Molecules*, 25(23), 5498.
- Gupta, S., & Variyar, P. S. (2018). Chapter 12 - Guar Gum: A Versatile Polymer for the Food Industry. In *Biopolymers for Food Design*, 383-407.
- Hasani, A., Kongoli, R., Laze, A., Popovska, O., & Rexhepi, E. (2021). Production of a Pasteurized Functional Drink Containing Wheatgrass and Apple Juice. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 27, 615-624.
- Hege, J., Palberg, T., & Vilgis, T. (2020). Interaction of different hydrocolloids with milk proteins. *Journal of Physics: Materials*, 3, 044003.
- Hendry, G. A. F., & Houghton, J. D. (1996). Natural food colours. In *Natural Food Colorants*, 40-79.
- Herbach, K. M., C. Stintzing, F., & Carle, R. (2004). Thermal degradation of betacyanins in juices from purple pitaya [*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose] monitored by high-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometric analyses. *European Food Research and Technology*, 219(4), 377-385.
- Herbach, K. M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Betalain Stability and Degradation—Structural and Chromatic Aspects. *Journal of Food Science*, 71(4), 41-50.
- Hor, S. Y., Ahmad, M., Farsi, E., Yam, M. F., Hashim, M. A., Lim, C. P., Sadikun, A., & Asmawi, M. Z. (2012). Safety assessment of methanol extract of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*): Acute and subchronic toxicity studies. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 63(1), 106-114.
- Huang, A. S., & Elbe, J. H. V. (1987). Effect of pH on the Degradation and Regeneration of Betanin. *Journal of Food Science*, 52(6), 1689-1693.
- Huang, Y., Brennan, M. A., Kasapis, S., Richardson, S. J., & Brennan, C. S. (2021). Maturation Process, Nutritional Profile, Bioactivities and Utilisation in Food Products of Red Pitaya Fruits: A Review. *Foods*, 10(11), 2862.

- Janiszewska, E. (2014). Microencapsulated beetroot juice as a potential source of betalain. *Powder Technology*, 264, 190-196.
- Karaman, S., Kesler, Y., Goksel, M., Dogan, M., & Kayacier, A. (2014). Rheological and some Physicochemical Properties of Selected Hydrocolloids and their Interactions with Guar Gum: Characterization using Principal Component Analysis and Viscous Synergism Index. *International Journal of Food Properties*, 17(8), 1655-1667.
- Karangutkar, A. V., & Ananthanarayan, L. (2021). Evaluating the effect of additives on stability of betacyanin pigments from *Basella rubra* in a model beverage system during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 1262-1273.
- Kerr, W. L., & Varner, A. (2020). Chemical and physical properties of vacuum-dried red beetroot (*Beta vulgaris*) powders compared to other drying methods. *Drying Technology*, 38(9), 1165-1174.
- Kim, M., & Kerr, W. L. (2013). Vacuum-Belt Drying of Rabbiteye Blueberry (*Vaccinium ashei*) Slurries: Influence of Drying Conditions on Physical and Quality Properties of Blueberry Powder. *Food and Bioprocess Technology*, 6(11), 3227-3237.
- Koubaa, M., Barba, F. J., Grimi, N., Mhemdi, H., Koubaa, W., Boussetta, N., & Vorobiev, E. (2016). Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 336-344.
- Kumar, S. S., & Giridhar, P. (2017). Stabilization of bioactive betalain pigment from fruits of *Basella rubra* L. through maltodextrin encapsulation. *Madridge Journal of Food Technology*, 2(1), 73-77.
- Kumar, S. S., Manoj, P., Shetty, N. P., Prakash, M., & Giridhar, P. (2014). Characterization of major betalain pigments-gomphrenin, betanin and isobetanin from *Basella rubra* L. fruit and evaluation of efficacy as a natural colourant in product (ice cream) development. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 4994-5002.



- Labuza, T. P., McNally, L., Gallagher, D., Hawkes, J., & Hurtado, F. (1972). STABILITY OF INTERMEDIATE MOISTURE FOODS. 1. Lipid Oxidation. *Journal of Food Science*, 37(1), 154-159.
- Laqui-Vilca, C., Aguilar-Tuesta, S., Mamani-Navarro, W., Montaña-Bustamante, J., & Condezo-Hoyos, L. (2018). Ultrasound-assisted optimal extraction and thermal stability of betalains from colored quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) hulls. *Industrial Crops and Products*, 111, 606-614.
- Leong, H. Y., Ooi, C. W., Law, C. L., Julkifle, A. L., Pan, G. T., & Show, P. L. (2019). Investigation of betacyanins stability from peel and flesh of red-purple pitaya with food additives supplementation and pH treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 98, 546-558.
- Li, H., Shui, Y., Li, S., Xing, Y., Xu, Q., Li, X., Lin, H., Wang, Q., Yang, H., Li, W., & Che, Z. (2020). Quality of fresh cut lemon during different temperature as affected by chitosan coating with clove oil. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1214-1230.
- Liang, C., Hu, X., Ni, Y., Wu, J., Chen, F., & Liao, X. (2006). Effect of hydrocolloids on pulp sediment, white sediment, turbidity and viscosity of reconstituted carrot juice. *Food Hydrocolloids*, 20(8), 1190-1197.
- Liao, H., Zhu, W., Zhong, K., & Liu, Y. (2020). Evaluation of colour stability of clear red pitaya juice treated by thermosonication. *LWT- Food Science and Technology*, 121, 108997.
- Liaotrakoon, W., De Clercq, N., Lewille, B., & Dewettinck, K. (2012). Physicochemical properties, glass transition state diagram and colour stability of pulp and peel of two dragon fruit varieties (*Hylocereus Spp.*) as affected by freeze-drying. *International Food Research Journal*, 19, 743-750.
- Liu, M., Tian, H. L., Wu, J. H., Cang, R. R., Wang, R. X., Qi, X. H., Xu, Q., & Chen, X. H. (2015). Relationship between gene expression and the accumulation of catechin during spring and autumn in tea plants (*Camellia sinensis L.*). *Horticulture Research*, 2.
- Malviya, R. (2011). Extraction characterization and evaluation of selected mucilage as pharmaceutical excipient. *Polymers in Medicine*, 41, 39-44.

- Manjanna, K. M., Kumar., T. M. P., & Shivakumar, B. (2010). Natural polysaccharide hydrogels as novel excipients for modified drug delivery systems: A review. *International Journal of ChemTech Research*, 2, 509-525.
- Maran, J. P., Priya, B., & Nivetha, C. V. (2015). Optimization of ultrasound-assisted extraction of natural pigments from *Bougainvillea glabra* flowers. *Industrial Crops and Products*, 63, 182-189.
- Marchuk, M., Selig, M. J., Celli, G. B., Lawrence, P., Smilgies, D.-M., & Abbaspourrad, A. (2019). Mechanistic investigation via QCM-D into the color stability imparted to betacyanins by the presence of food grade anionic polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 93, 226-234.
- Miguel, M. G. (2018). Betalains in Some Species of the Amaranthaceae Family: A Review. *Antioxidants*, 7(4), 53.
- Mohamed, E. E., Iwamoto, S., & Yamauchi, R. (2018). Optimization of betalain extraction from *Salicornia fruticosa* and its encapsulation. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 24(1), 1-8.
- Naderi, N., Mohd Ghazali, H., & Yazid, A. (2012). Characterization and quantification of Dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) betacyanin pigments Extracted by two procedures. *Journal of Tropical Agricultural Science*, 35(1), 33-40.
- Ozkan, G., & Bilek, S. E. (2014). Microencapsulation of natural food colourants. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 145-156.
- Paquet, É., Hussain, R., Bazinet, L., Makhlof, J., Lemieux, S., & Turgeon, S. L. (2014). Effect of processing treatments and storage conditions on stability of fruit juice based beverages enriched with dietary fibers alone and in mixture with xanthan gum. *LWT - Food Science and Technology*, 55(1), 131-138.
- Paquet, E., Turgeon, S. L., & Lemieux, S. (2010). Effect of xanthan gum on the degradation of cereal  $\beta$ -glucan by ascorbic acid. *Journal of Cereal Science*, 52(2), 260-262.
- Pasko, P. A.-O., Galanty, A. A.-O., Zagrodzki, P. A.-O. X., Luksirikul, P. A.-O., Barasch, D. A.-O., Nemirovski, A. A.-O., & Gorinstein, S. A.-O. (2021). Dragon Fruits as a Reservoir of Natural Polyphenolics with Chemopreventive Properties. *Molecules*, 26, 2158.

- Pieczykolan, E., & Kurek, M. A. (2019). Use of guar gum, gum arabic, pectin, beta-glucan and inulin for microencapsulation of anthocyanins from chokeberry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 665-671.
- Pitalua, E., Jimenez, M., Vernon-Carter, E. J., & Beristain, C. I. (2010). Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2), 253-258.
- Polturak, G., & Aharoni, A. (2018). "La Vie en Rose": Biosynthesis, Sources, and Applications of Betalain Pigments. *Molecular Plant*, 11(1), 7-22.
- Priatni, S., & Pradita, A. (2015). Stability Study of Betacyanin Extract from Red Dragon Fruit (*Hylocereus Polyrhizus*) Peels. *Procedia Chemistry*, 16, 438-444.
- Pudziumelyte, L., Marksa, M., Sosnowska, K., Winnicka, K., Morkuniene, R., & Bernatoniene, J. (2020). Freeze-Drying Technique for Microencapsulation of *Elsholtzia ciliata* Ethanolic Extract Using Different Coating Materials. *Molecules*, 25, 2237.
- Rahayuningsih, E., Arie Setiawan, F., Kasyfur Rahman, A., Siahaan, T., & Petrus, H. T. B. M. (2020). Microencapsulation of betacyanin from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peels using pectin by simple coacervation to enhance stability. *Journal of Food Science and Technology*, 58.
- Rai, P., Majumdar, G. C., DasGupta, S., & De, S. (2005). Prediction of the viscosity of clarified fruit juice using artificial neural network: a combined effect of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 68(4), 527-533.
- Raj, G. V. S. B., & Dash, K. K. (2020). Ultrasound-assisted extraction of phytochemicals from dragon fruit peel: Optimization, kinetics and thermodynamic studies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105180.
- Ramli, N. S., Ismail, P., & Rahmat, A. (2014). Influence of Conventional and Ultrasonic-Assisted Extraction on Phenolic Contents, Betacyanin Contents, and Antioxidant Capacity of Red Dragon Fruit (*Hylocereus polyrhizus*). *The Scientific World Journal*, 964731.
- Ranjha, M. M. A. N., Irfan, S., Lorenzo, J. M., Shafique, B., Kanwal, R., Pateiro, M., Arshad, R. N., Wang, L., Nayik, G. A., Roobab, U., & Aadil, R. M. (2021).

- Sonication, a Potential Technique for Extraction of Phytoconstituents: A Systematic Review. *Processes*, 9(8).
- Ravichandran, K., Palaniraj, R., Saw, N. M. M. T., Gabr, A. M. M., Ahmed, A. R., Knorr, D., & Smetanska, I. (2014). Effects of different encapsulation agents and drying process on stability of betalains extract. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2216-2221.
- Rebecca, O., Nasrulhaq Boyce, A., & Somasundram, C. (2010). Pigment identification and antioxidant properties of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*). *African Journal of Biotechnology*, 9, 1450-1454.
- Robert, P., Torres, V., García, P., Vergara, C., & Sáenz, C. (2015). The encapsulation of purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) pulp by using polysaccharide-proteins as encapsulating agents. *LWT - Food Science and Technology*, 60(2), 1039-1045.
- Rodriguez, E., Vidallon, M., Mendoza, D., Dalisay, K., & Reyes, C. (2015). Stabilization of Betalains from the Peel of Red Dragon Fruit [*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose] through Biopolymeric Encapsulation. *The Philippine agriculturist*, 98, 382-391.
- Rymbai, H., Sharma, R., & Srivastav, M. (2011). Biocolorants and its implications in Health and Food Industry -A Review. *International Journal of PharmTech Research*, 3, 2228-2244.
- Saenz, C., Tapia, S., Chávez, J., & Robert, P. (2009). Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 114(2), 616-622.
- Saha, D., & Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 47, 587-597.
- Shcherbakova, A., Bakhtin, V., Sokolova, Y., & Chelnakova, P. (2019). Color stabilization in aqueous solution of Beetroot Red. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Shofinita, D., Bindar, Y., Samadhi, T. W., Jaelawijaya, A. A., & Fawwaz, M. (2020). Reducing the stickiness of dragon fruit skin extract powder as food colorant

- by addition of maltodextrin during freeze drying. *AIP Conference Proceedings*, 2219(1), 070011.
- Silva, J. P. P., Bolanho, B. C., Stevanato, N., Massa, T. B., & da Silva, C. (2020). Ultrasound-assisted extraction of red beet pigments (*Beta vulgaris* L.): Influence of operational parameters and kinetic modeling. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), 14762.
- Sivakumar, V., Anna, J. L., Vijayeeswarri, J., & Swaminathan, G. (2009). Ultrasound assisted enhancement in natural dye extraction from beet root for industrial applications and natural dyeing of leather. *Ultrasonics Sonochemistry*, 16(6), 782-789.
- Souza, V. B. d., Thomazini, M., Balieiro, J. C. d. C., & Fávaro-Trindade, C. S. (2015). Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification byproducts of the Bordo grape (*Vitis labrusca*). *Food and Bioproducts Processing*, 93, 39-50.
- Suh, D. H., Lee S Fau - Heo, D. Y., Heo do Y Fau - Kim, Y.-S., Kim Ys Fau - Cho, S. K., Cho Sk Fau - Lee, S., Lee S Fau - Lee, C. H., & Lee, C. H. (2014). Metabolite profiling of red and white pitayas (*Hylocereus polyrhizus* and *Hylocereus undatus*) for comparing betalain biosynthesis and antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 8764-8771.
- Tan, J., de Bruijn, W. J. C., van Zadelhoff, A., Lin, Z., & Vincken, J.-P. (2020). Browning of Epicatechin (EC) and Epigallocatechin (EGC) by Auto-Oxidation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(47), 13879-13887.
- Teleszko, M., Nowicka, P., & Wojdyło, A. (2019). Effect of the Addition of Polysaccharide Hydrocolloids on Sensory Quality, Color Parameters, and Anthocyanin Stabilization in Cloudy Strawberry Beverages. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 69, 167-178.
- Tenore, G. C., Novellino, E., & Basile, A. (2012). Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts. *Journal of Functional Foods*, 4(1), 129-136

- Tongkham, N., Juntasalay, B., Lasunon, P., & Sengkhamparn, N. (2017). Dragon fruit peel pectin: Microwave-assisted extraction and fuzzy assessment. *Agriculture and Natural Resources*, 51(4), 262-267.
- Tutunchi, P., Roufegarinejad, L., Hamishehkar, H., & Alizadeh, A. (2019). Extraction of red beet extract with  $\beta$ -cyclodextrin-enhanced ultrasound assisted extraction: A strategy for enhancing the extraction efficacy of bioactive compounds and their stability in food models. *Food Chemistry*, 297, 124994.
- Tze, N. L., Han, C. P., Yusof, Y. A., Ling, C. N., Talib, R. A., Taip, F. S., & Aziz, M. G. (2012). Physicochemical and nutritional properties of spray-dried pitaya fruit powder as natural colorant. *Food Science and Biotechnology*, 21(3), 675-682
- Van, M. P., Duc, D. T., Thanh, H. D. T., & Chi, H. T. (2020). Comparison of ultrasound assisted extraction and enzyme assisted extraction of betacyanin from red dragon fruit peel. *E3S Web of Conferences*.
- Wangsakan, A., Chinachoti, P., & McClements, D. J. (2003). Effect of Different Dextrose Equivalent of Maltodextrin on the Interactions with Anionic Surfactant in an Isothermal Titration Calorimetry Study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(26), 7810-7814.
- Wu, L. C., Hsu, H. W., Chen, Y. C., Chiu, C. C., Lin, Y. I., & Ho, J. A. A. (2006). Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chemistry*, 95(2), 319-327.
- Xie, X. G., Huang, C. Y., Fu, W. Q., & Dai, C. C. (2016). Potential of endophytic fungus *Phomopsis liquidambari* for transformation and degradation of recalcitrant pollutant sinapic acid. *Fungal Biology*, 120, 402-413.
- Yoon, H. S., Lee, N. H., Hyun, C. G., & Shin, D. B. (2015). Differential Effects of Methoxylated p-Coumaric Acids on Melanoma in B16/F10 Cells. *Preventive Nutrition and Food Science*, 20(1), 73-77.
- Zhao, L., Pan, F., Mehmood, A., Zhang, Y., Hao, S., Rehman, A. U., Li, J., Wang, C., & Wang, Y. (2020). Protective effect and mechanism of action of xanthan gum on the color stability of black rice anthocyanins in model beverage systems. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 3800-3807.



## ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ทางกายภาพ

### ก.1 การวิเคราะห์ค่าสี

เครื่องมือ - Minolta CR-400 colorimeter (วิเคราะห์ค่าสีของผงสารสกัดปีตาไซยานิน)  
 - HunterLab ColorQuest XT (วิเคราะห์ค่าสีของสารสกัดปีตาไซยานินและเครื่องตีม  
 จำลอง)

วิเคราะห์ค่าสีสารสกัดปีตาไซยานินโดยใช้เครื่อง ด้วยระบบ L\* a\* b\* (CIE LAB) บันทึกค่า  
 ค่า L\* ค่าความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) จนถึง 100 (สีขาว), ค่า a\* (redness) สีแดง (-  
 a\*) จนถึง สีเขียว (+a\*) และ ค่า b\* (yellowness) ค่าสีเหลือง (+b\*) จนถึง สีน้ำเงิน (-b\*) จากนั้น  
 คำนวณค่า hue angle (H°) and chroma (C\*) และค่าความแตกต่างของสี (ΔE\*) ดังสมการ

$$H^\circ = \tan^{-1}(a^*/b^*) \quad (1)$$

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

$$\Delta E^* = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2} \quad (3)$$

### ก.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity)

เครื่องมือ Water activity (Aqua Lab)

#### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งผงสารสกัดปีตาไซยานินน้ำหนัก 1-2 g ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง
2. เคลี่ยให้ตัวอย่างกระจายเท่ากัน
3. นำไปวิเคราะห์ค่ากิจกรรมของน้ำและบันทึกผล

### ก.3 ค่าความชื้น (Moisture content)

เครื่องมือ Moisture Analyzer

#### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งผงสารสกัดปีตาไซยานินน้ำหนัก 2-3 g ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง
2. เคลี่ยให้ตัวอย่างกระจายเท่ากัน
3. นำไปวิเคราะห์ค่ากิจกรรมของน้ำ ที่อุณหภูมิ 105°C และบันทึกผล

### ก.4 ค่าการดูดความชื้น (Hygroscopicity)



โดยวิเคราะห์ตามวิธีของ Fernandes และคณะ (2013)

สารเคมี Sodium Chloride (NaCl)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างผงสารสกัดบีตาไซยานินน้ำหนัก 1 g ลงในถ้วยตัวอย่าง นำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า
2. นำไปใส่ในระบบที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (75.29 %RH)
3. เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์
4. เมื่อครบระยะเวลาการเก็บรักษา นำถ้วยตัวอย่างที่มีผงสารสกัดบีตาไซยานินมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า และคำนวณดังสมการ (4)

$$\text{ค่าการดูดความชื้น (g/100g)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างสัปดาห์สุดท้าย} - \text{น้ำหนักตัวอย่างสัปดาห์แรก}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสัปดาห์แรก}} \times 100 \quad (4)$$

#### ก.5 ค่าการละลาย (% Water Solubility Index, WSI)

ดัดแปลงจากวิธีของ Bakar และคณะ (2012) และ Pieczykolan และ Kurek (2019)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างผงสารสกัดบีตาไซยานินน้ำหนัก 1 g ละลายในน้ำกลั่น 100 ml
2. ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง Vortex เป็นเวลา 3 นาที
3. นำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 1000 g เป็นเวลา 10 นาที
4. ชั่งน้ำหนักถ้วยเปล่า แยกส่วนใสปริมาตร 25 ml ใส่ในถ้วยตัวอย่างและชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า
5. นำไปอบด้วยตู้อบลงร้อนอุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ บันทึกผล และคำนวณดังสมการ (5)

$$\text{ค่าการละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ} - \text{น้ำหนักถ้วยเปล่า}}{\text{น้ำหนักผงแห้งในสารละลายก่อนอบ}} \times 100 \quad (5)$$

#### ก.6 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density)

โดยวิเคราะห์ตามวิธีของ Fernandes และคณะ (2013)

เครื่องมือ กระบอกตวงขนาด 25 ml

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 10 g ใส่ลงในกระบอกตวงปริมาตร 25 ml
2. จากนั้นอ่านค่า บันทึกผล และคำนวณรายงานค่าเป็น  $\text{kg/cm}^3$

## ก.7 ค่าความหนืด (Viscosity)

โดยวิเคราะห์ตามวิธีของ Tongkham และคณะ (2017)

- เครื่องมือ
- Viscometer
  - หัววัดขนาด R2

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างปริมาตร 250 ml ใส่ในบีกเกอร์
2. นำไปวัดค่าความหนืด โดยจุ่มหัววัด R2 ใช้ความเร็วรอบ 100 rpm
3. จับเวลา 30 นาที อ่านค่าความหนืดทุกๆ 10 นาที และบันทึกผล

## ก.8 ค่าความขุ่น (Turbidity)

โดยวิเคราะห์ตามวิธีของ Barbosa และคณะ (2005)

เครื่องมือ Spectrophotometer

วิธีวิเคราะห์

ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างเครื่องดื่มจำลอง ที่ความยาวคลื่น 550 nm ใช้ blank เป็นน้ำกลั่น อ่านค่าและบันทึกผล

## ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์ทางเคมี

### ข.1 ร้อยละของผลผลิตที่ได้ (Yield %)

ดัดแปลงจากวิธีของ Flores-Mancha และคณะ (2020) โดยคำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้ตั้ง  
สมการ (6)

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{น้ำหนักผงที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น}} \times 100$$

(6)

### ข.2 HPLC-DAD analyses

#### ข.2.1 การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์

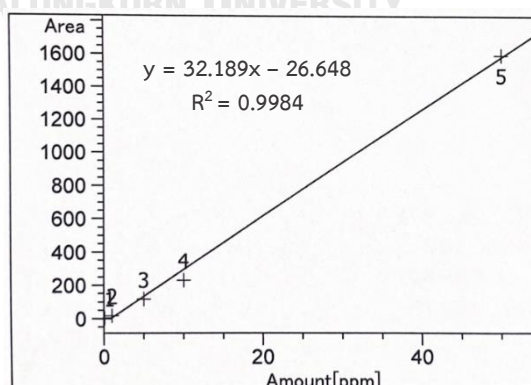
ดัดแปลงจากวิธีของ Pasko และคณะ (2021)

##### สภาวะการวิเคราะห์

วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 280 nm ใช้คอลัมน์ C-18 (4.6 × 280 mm, 5 μm, Zorbax SB-C18) ด้วยระบบ DAD-HPLC (Agilent, 1100 series, Germany) ฉีดตัวอย่างสารสกัดครั้งละ 20 μL อัตราเร็ว 1 mL/min วัฏภาคเคลื่อนที่ ได้แก่ 1 % Formic acid (A) และ Methanol (B) ระยะเวลา 60 นาที

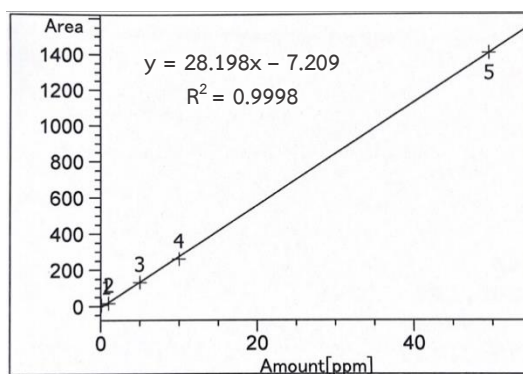
##### กราฟของสารละลายมาตรฐาน

- สารมาตรฐาน 4-Hydroxybenzoic acid



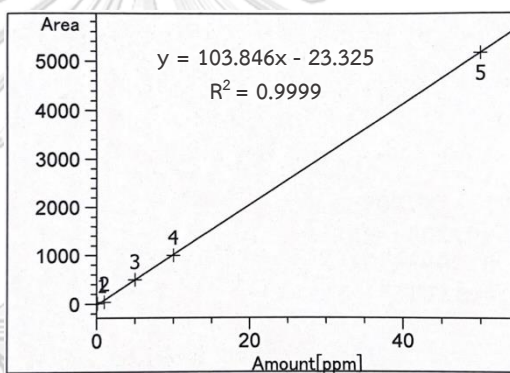
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของสารละลาย 4-Hydroxybenzoic acid

- สารมาตรฐาน Syringic acid



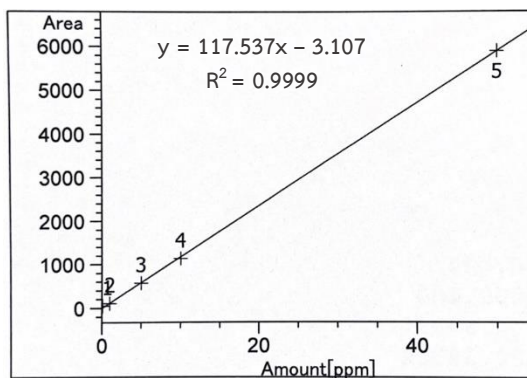
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Syringic acid

- สารมาตรฐาน Gallic acid



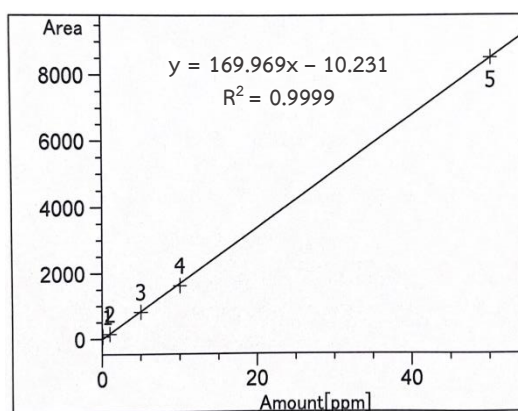
รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Gallic acid

- สารมาตรฐาน Sinapic acid



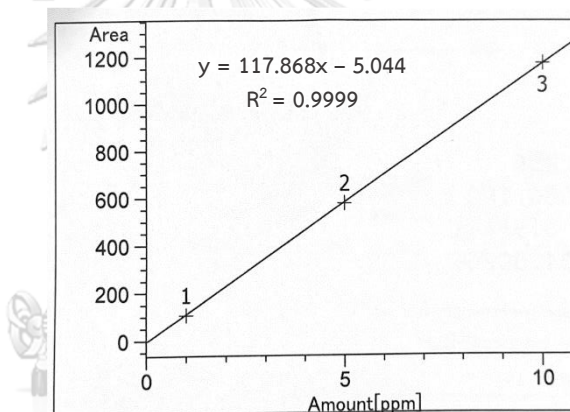
รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Sinapic acid

- สารมาตรฐาน P-coumaric acid



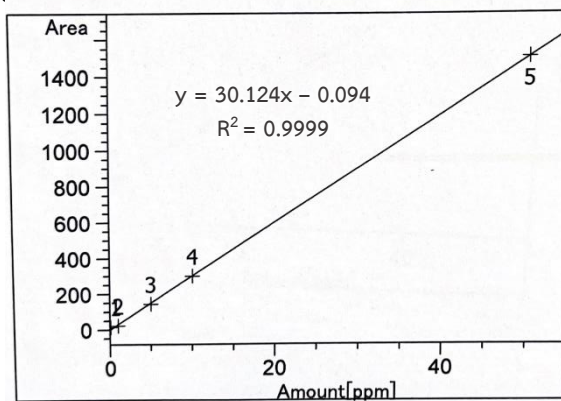
รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานของสารละลาย P-coumaric acid

- สารมาตรฐาน Ferulic acid



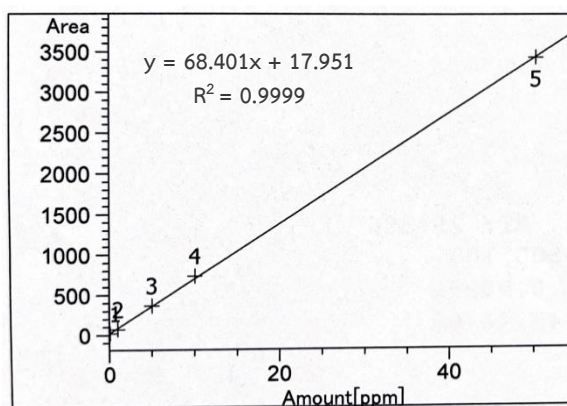
รูปที่ ข.6 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Ferulic acid

- สารมาตรฐาน Rutin



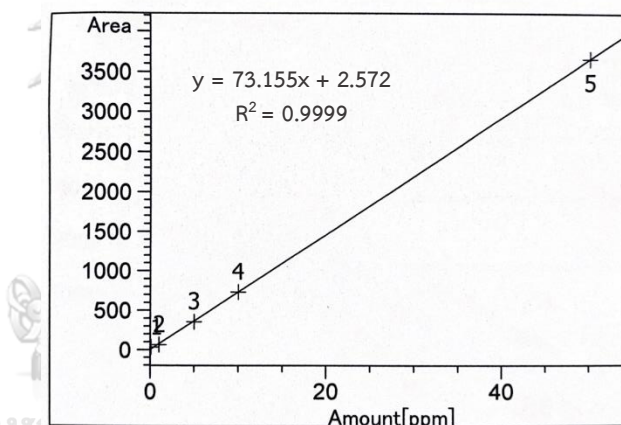
รูปที่ ข.7 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Rutin

- สารมาตรฐาน Catechin



รูปที่ ข.8 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Catechin

- สารมาตรฐาน Epicatechin



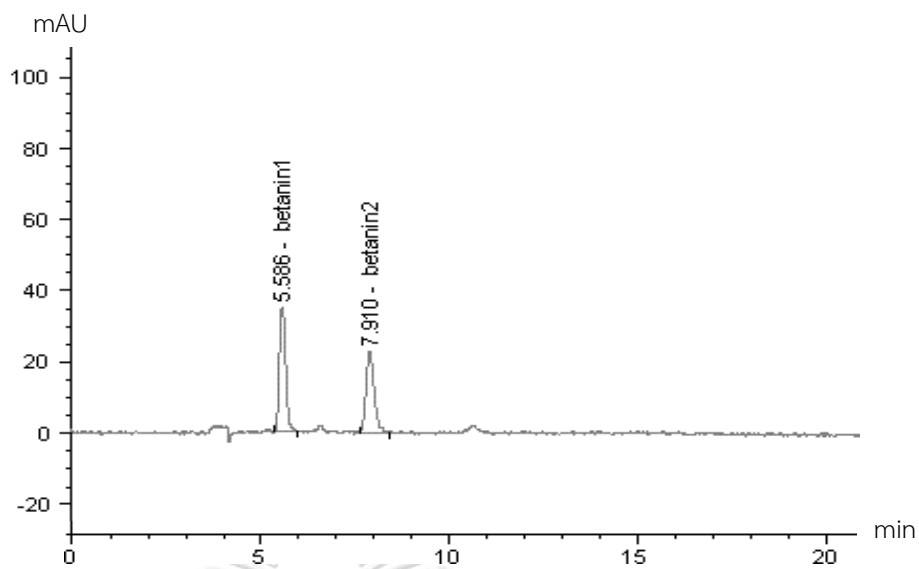
รูปที่ ข.9 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Epicatechin

## ข.2.2 การวิเคราะห์ชนิดของสารปีตาไซยานิน

ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016)

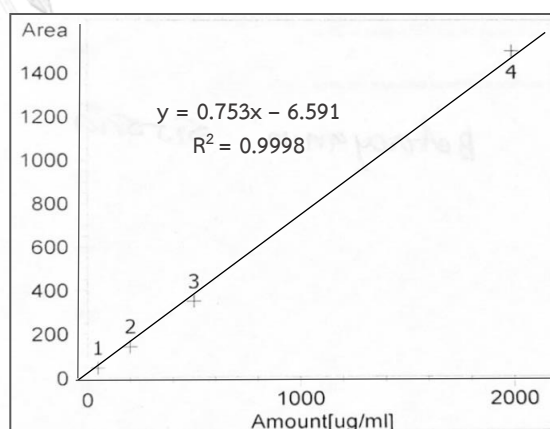
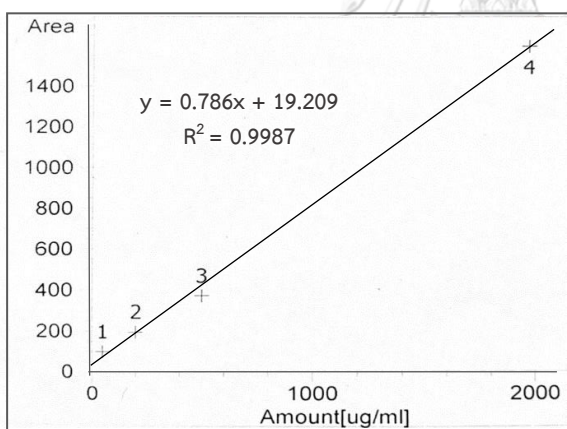
### สภาวะการวิเคราะห์

วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 538 nm ฉีดตัวอย่างสารสกัดครั้งละ 20  $\mu$ L อัตราเร็ว 1 ml/min วัฏภาคเคลื่อนที่ ได้แก่ 1 % Formic acid (A) และ 80% Methanol (B) ระยะเวลา 60 นาที โดยใช้สารมาตรฐาน ได้แก่ Betanin



รูปที่ ข.10 โครมาโทแกรม HPLC ของ Betanin ที่ความเข้มข้น 500 ppm

กราฟของสารละลายมาตรฐาน betanin



รูปที่ ข.11 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Betanin 1 (ซ้าย) และ Betanin 2 (ขวา)

### ข.3 ปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content)

ดัดแปลงจากวิธีของ Wu และคณะ (2016)

- การเตรียมสารเคมี
1. 0.2 M Di-Sodium hydrogen orthophosphate : ชั่งสารน้ำหนัก 3.56 g ละลายในน้ำกลั่น 100 ml
  2. 0.1 M Citric Acid : กรดซิตริกน้ำหนัก 2.1014 g ละลายในน้ำกลั่น 100 ml
  3. Mclvaine buffer pH 6.5 : ผสมสารละลายจากข้อ 1 และ ข้อ 2 ในอัตราส่วน 3 : 7

#### วิธีวิเคราะห์

เจือจางตัวอย่างโดยใช้ Mclvaine buffer (pH 6.5, Citrate-phosphate) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 538 nm ควรมีค่าอยู่ในช่วง  $0.9 \leq A \leq 1.0$  นำค่าที่ได้คำนวณดังสมการ (7)

$$\text{ปริมาณสารบีตาไซยานิน (mg/100ml)} = \frac{A \times DF \times Mw \times V \times 100}{\epsilon \times W \times L} \quad (7)$$

- เมื่อ
- A แทนค่า ค่าการดูดกลืนแสง
  - Mw แทนค่า น้ำหนักโมลโมเลกุลของสารบีตาไซยานิน (550 g/mol)
  - V แทนค่า ปริมาตรของสารสกัด
  - DF แทนค่า dilution faction
  - $\epsilon$  แทนค่า ค่าเฉลี่ยมวล (โมลาร์) ของการดูดกลืนแสง (60,000 mol/L-1cm)
  - W แทนค่า น้ำหนักผงเปลือกแก้วมังกรเริ่มต้น (g)
  - L แทนค่า ขนาดความความกว้างของคิวเวต (1 cm)

### ข.4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds)

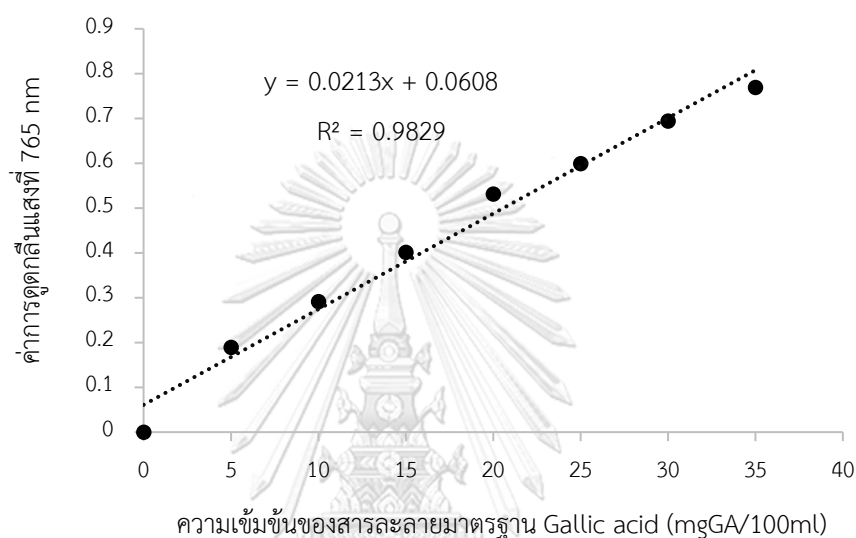
ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016) วิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu (FC)

- การเตรียมสารเคมี
1. 10 % Folin reagent : ผสมสาร Folin reagent 1 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จนครบ 10 ml
  2. 20 % Sodium Chloride : ชั่งสารน้ำหนัก 20 g ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตร จนครบ 100 ml



3. สารละลายมาตรฐาน Gallic acid : เตรียมที่ความเข้มข้น 50 mg/100ml โดยชั่งสารน้ำหนัก 0.025 g ละลายในน้ำ DI ปรับปริมาตรจนครบ 50 ml และนำสารละลายไปเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ (0-35 mg/100ml)

ผลของกราฟมาตรฐานที่ได้



**รูปที่ ข.13** กราฟมาตรฐานของ Gallic acid สำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

วิธีวิเคราะห์

1. ผสมสารละลาย Folin phenol reagent ปริมาตร 0.4 ml กับ สารสกัดบีตาไซยานินหรือสารมาตรฐาน Gallic acid (0-35 mg/100ml) ปริมาตร 0.2 ml
2. เติมน้ำ DI ปริมาตร 4 ml ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. เติมสารละลาย 20 % Sodium carbonate ปริมาตร 1 ml ตั้งทิ้งไว้ 90 นาที
4. เมื่อครบเวลาจึงนำมาวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 765 nm (Blank : น้ำ DI) รายงานผลเป็น mgGA/100 ml.

#### **ข.5 ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (Flavonoids Content)**

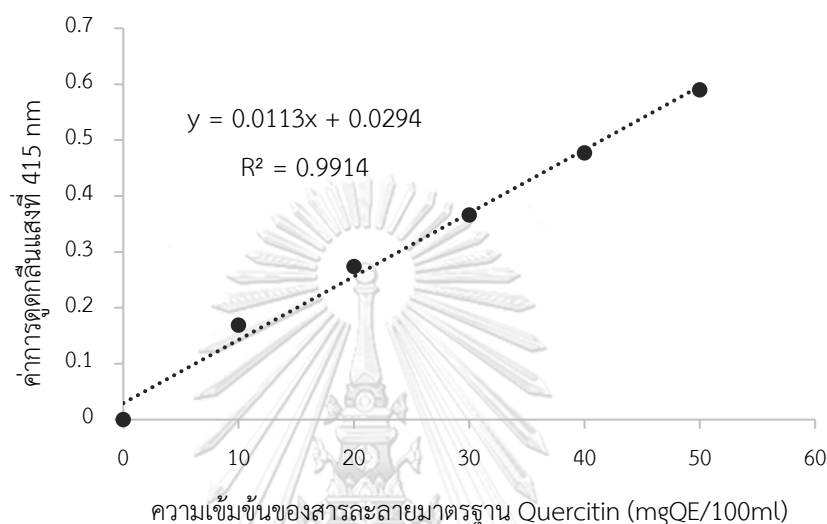
ดัดแปลงจากวิธีของ Aryal และคณะ (2019)

การเตรียมสารเคมี 1. 10 % Aluminium Chloride : ชั่งสารน้ำหนัก 5 g ละลายในเมทานอล 50 ml

2. 1 M Potassium acetate : ชั่งสารน้ำหนัก 4.9075 g ละลายในน้ำกลั่น 50 ml

3. สารละลายมาตรฐาน Quercitin : เตรียมที่ความเข้มข้น 50 mgQE/100ml โดยชั่งสารน้ำหนัก 0.025 g ละลายใน 75% เอทานอล ปริมาตร 50 ml จากนั้นนำสารละลาย ที่ได้ไปเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ (0-50 mgQE/100ml)

#### ผลของกราฟมาตรฐานที่ได้



รูปที่ ข.14 กราฟมาตรฐานของ Quercitin สำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์

#### วิธีวิเคราะห์

1. ผสมสารสกัดบีตาไซยานินหรือสารมาตรฐาน Quercitin (0-50 mgQE/100ml) ปริมาตร 1 ml กับสารละลาย Aluminium chloride 10 % ในเอทานอล ปริมาตร 0.2 ml
2. เติมสารละลาย 1 M potassium acetate ปริมาตร 0.2 ml
3. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 5.6 ml ผสมเข้าด้วยกัน ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที
4. เมื่อครบเวลาจึงนำมาวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 415 nm (Blank : น้ำกลั่น) รายงานผลเป็น mgQE/100ml

#### ข.6 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity

ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016)

การเตรียมสารเคมี 0.1 mM DPPH reagent : ชั่งสาร DPPH น้ำหนัก 0.004 g ละลายด้วย Absolute ethanol 100 ml

### วิธีวิเคราะห์

1. ผสมสารละลาย 0.1 mM DPPH ปริมาตร 3.9 ml กับสารสกัดปืตาไซยานิน 0.1 ml
2. ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 60 นาที จึงนำมาวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 515 nm  
(Blank : เอทานอล) และคำนวณดังสมการ (8)

$$\% \text{ Inhibition} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{test}}}{A_{\text{control}}} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ  $A_{\text{control}}$  แทนค่า ค่าดูดกลืนแสงของ control (DPPH ผสมกับเอทานอล)

$A_{\text{test}}$  แทนค่า ค่าดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง

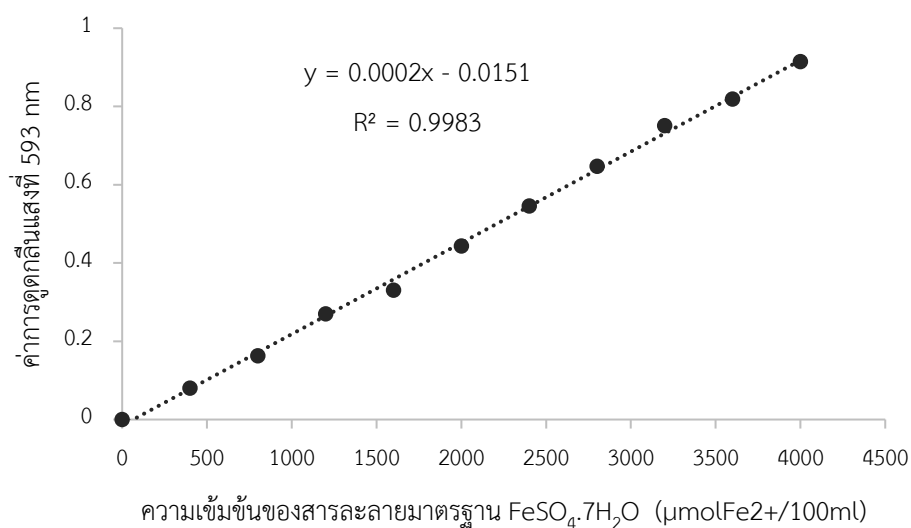
### ข.7 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power Assay (FRAP)

ดัดแปลงจากวิธีของ Fathordoobady และคณะ (2016)

#### การเตรียมสารเคมี

1. 40 mM Hydrochloric acid : นำสารละลายกรด HCl ปริมาตร 7.8 ml ปรับ ปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 100 ml จากนั้นนำสารละลายที่ได้ ปริมาตร 4 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 100 ml
2. 10 mM TPTZ : ชั่งสารน้ำหนัก 0.0312 g ละลายด้วยสารละลาย 40 mM HCl (ข้อ 1) ปรับปริมาตรจนครบ 10 ml
3. 20 mM Iron (III) Chloride hexahydrate : ชั่งสารน้ำหนัก 0.0540 g ละลายด้วยน้ำกลั่นจนครบ 10 ml
4. Acetate Buffer pH 3.6 : ชั่งสาร Sodium acetate tetra-hydrate น้ำหนัก 0.31 g ละลายด้วยกรด Acetic Acid ปริมาตร 1.6 ml ปรับ ปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 100 ml
5. FRAP reagent : ผสม 10 mM TPTZ, 20 mM  $\text{FeCl}_3$ , และ 0.3 mM acetate buffer pH 3.6 ในอัตราส่วน 1:1:10 บ่มที่  $37^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที
6. สารละลายมาตรฐาน Iron (II) Sulfate heptahydrate ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) : เตรียมที่ ความเข้มข้น  $4000 \mu\text{molFe}^{2+}/100\text{ml}$  โดยชั่งสารน้ำหนัก 0.1112 g ละลายในน้ำ DI ปรับปริมาตรจนครบ 100 ml นำไปเจือจางที่ ความเข้มข้นต่างๆ ( $0-4000 \mu\text{molFe}^{2+}/100\text{ml}$ )

### ผลของกราฟมาตรฐานที่ได้



### รูปที่ ข.15 กราฟมาตรฐานของ FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O สำหรับวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี

FRAP

### วิธีวิเคราะห์

1. ผสมสารสกัดบีตาไซยานินหรือสารมาตรฐาน FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (0-4000 µmolFe<sup>2+</sup>/100ml) ปริมาตร 40 µl กับ FRAP reagent ปริมาตร 1.8 ml ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
2. เมื่อครบเวลา จึงนำไปวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 593 nm รายงานค่าเป็น µmolFe<sup>2+</sup>/100ml

### ข.8 ประสิทธิภาพการกักเก็บ (% Encapsulation efficiency)

ดัดแปลงจากวิธีของ Robert และคณะ (2015)

#### ข.8.1 การสกัดสารจากผงสำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารบีตาไซยานินทั้งหมด (Betacyanins content, BC)

การเตรียมสารเคมี: ตัวทำละลาย เมทานอลผสมกรดอะซิติกผสมน้ำกลั่น (50 : 8 : 42 % v/v/v)

#### วิธีวิเคราะห์:

1. ชั่งตัวอย่างผงสารสกัดบีตาไซยานินน้ำหนัก 0.5 g ละลายในตัวทำละลายปริมาตร 10 ml
2. ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง Vortex 3 นาที
3. ปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 9000 rpm เป็นเวลา 10 นาที

4. แยกส่วนใสและกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1
5. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสารบีตาไซยานิน ตามวิธีในภาคผนวก ข.3 บันทึกผลและนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการ (9)

#### ข.8.2 การสกัดสารจากผงสำหรับวิเคราะห์สารบีตาไซยานินบริเวณพื้นผิว (Surface betacyanins content, SBC)

การเตรียมสารเคมี: ตัวทำละลาย เอทานอล : เมทานอล (1:1 % v/v)

##### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งผงสารสกัดบีตาไซยานิน 0.3 g ละลายในตัวทำละลายปริมาตร 6 ml
2. ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง Vortex 3 นาที
3. ปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 9000 rpm เป็นเวลา 10 นาที
4. แยกส่วนใสและกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1
5. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสารบีตาไซยานิน ตามวิธีในภาคผนวก ข.3 บันทึกผลและคำนวณดังสมการ (9)

$$\text{ประสิทธิภาพการกักเก็บ (\%)} = \frac{BC - SBC}{BC} \times 100 \quad (9)$$

#### ข.9 อัตราการสลายตัวทางจลนพลศาสตร์ (Degradation kinetics)

ดัดแปลงจากวิธีของ Karangutkar และ Ananthanarayan (2020) โดยคำนวณค่า ค่า First order degradation rate constant ดังสมการ (10) โดย โดย  $C_t$  คือปริมาณบีตาไซยานินที่เวลา 8 สัปดาห์ และ  $C_0$  ปริมาณบีตาไซยานินที่เวลาเริ่มต้น

$$\ln \left( \frac{C_t}{C_0} \right) = -kt \quad (10)$$

## ภาคผนวก ค ผลการทดลองเพิ่มเติม

### ค.1 การคัดเลือกความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด

คัดเลือกความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด ดังตารางที่ ค.2 โดยพิจารณาจากค่าการละลาย (Water soluble index), ประสิทธิภาพการกักเก็บ (Encapsulation efficiency) และปริมาณสารบีตาไซยานิน (Betacyanins content) คัดเลือกความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดที่มีค่าดังกล่าวมากที่สุด ทั้งนี้อัตราส่วนของความเข้มข้นไฮโดรคอลลอยด์สูตรผสม (MD:GG และ MD:XG) ใช้วิธีการทำ Mixture Design

ตารางที่ ค.2 สูตรไฮโดรคอลลอยด์สำหรับใช้คัดเลือกความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	ความเข้มข้น (% w/v)
กัวร์กัม (GG)	0.1
	0.5
	1.0
แซนแทนกัม (XG)	0.1
	0.5
	1.0
มอลโทเดกซ์ตรินผสมกัวร์กัม (MD:GG)	10 : 0.1
	10 : 1.0
	15 : 0.5
	20 : 0.1
	20 : 1.0
มอลโทเดกซ์ตรินผสมแซนแทนกัม (MD:XG)	10 : 0.1
	10 : 1.0
	15 : 0.5
	20 : 0.1
	20 : 1.0

**ค.2 ผลการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ที่ความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด**  
**ตารางที่ ค.3** ค่าการวิเคราะห์ต่างๆ ของผงสารสกัดปีตาไซยานินที่ใช้ชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน

ชนิดไฮโดรคอลลอยด์	กั้วร็กัม			แซนแทนกัม			มอลีโทเดกซ์ทรินผลมกั้วร็กัม						มอลีโทเดกซ์ทรินผลมแซนแทนกัม					
	0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0	10:0.1	10:1.0	15:0.5	20:0.1	20:1.0	10:0.1	10:1.0	15:0.5	20:0.1	20:1.0		
ความเข้มข้น (% w/v)																		
ปริมาณสารปีตาไซยานิน (mg/100g)	69.81	74.16	49.83	49.72	57.20	**	6.09	6.51	4.01	3.03	2.67	9.76	7.45	8.25	3.93	3.99		
ประสิทธิภาพการกักเก็บ (% EE)	97.85	98.77	97.65	98.17	98.75		96.99	98.27	94.51	93.88	93.07	99.53	98.67	98.00	96.07	95.63		
ค่าการละลาย	71.81	73.60	70.68	61.76	73.72	72.34	95.53	95.87	97.85	98.45	98.40	96.22	96.40	98.33	98.98	98.62		

\*\* ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้เนื่องจากตัวอย่างมีความหนืดสูง

จากผลการวิเคราะห์ค่าต่างๆ พบว่า ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่มีการใช้กัวร์กัมที่ความเข้มข้น 0.5 % w/v เนื่องจาก มีค่าประสิทธิภาพการกักเก็บและปริมาณสารบีตาไซยานินมากที่สุด เท่ากับ 98.77 % และ 74.16 mg/100g ทั้งนี้ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 % w/v มีค่า % EE ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leong และคณะ (2018) ศึกษาการใช้กัวร์กัมในการรักษาเสถียรภาพสารบีตาไซยานินจากเปลือกและเนื้อแก้วมังกรพันธุ์เนื้อแดง โดยใช้เป็น Food additive ลงในสารสกัดบีตาไซยานิน พบว่าที่ความเข้มข้น กัวร์กัม 0.5 % w/v สามารถรักษาเสถียรภาพของสารบีตาไซยานินได้ดีที่สุดเมื่อผ่านการเก็บรักษา 10 วัน

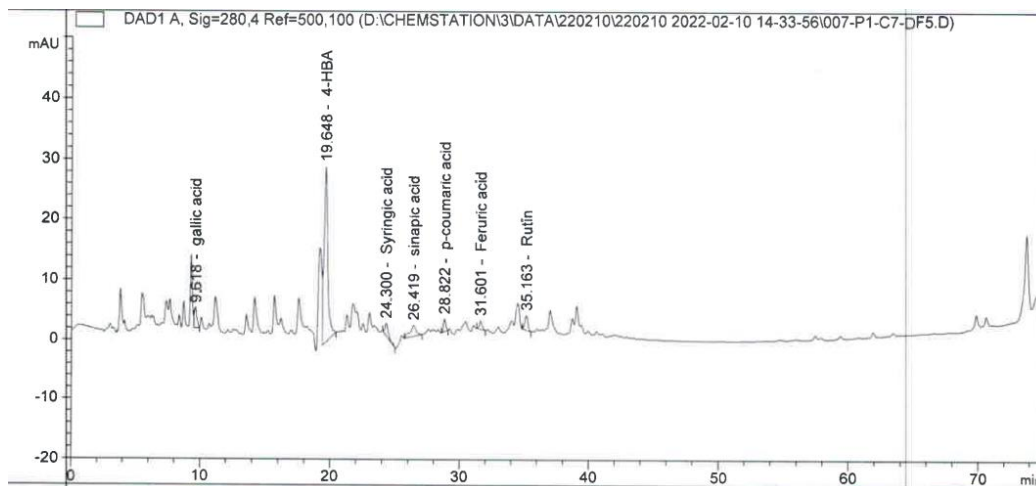
ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้แซนแทนกัม คัดเลือกที่ความเข้มข้น 0.5 % w/v เนื่องจากมีปริมาณสารบีตาไซยานินและค่าการละลายมากที่สุด เท่ากับ 57.20 mg/100g และ 73.72 % ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บที่ค่าใกล้เคียงกับที่ความเข้มข้น 0.1 % w/v ทั้งนี้ที่ความเข้มข้น 1.0 % ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าปริมาณสารบีตาไซยานินและประสิทธิภาพการกักเก็บได้ เนื่องจากตัวอย่างมีความหนืดค่อนข้างสูง

นอกจากนี้ผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผสม พบว่า มอลโทเดกซ์ตรินผสมกับกัวร์กัม คัดเลือกที่ความเข้มข้นอัตราส่วน 10:1.0 % w/v เนื่องจากผงสารสกัดบีตาไซยานินมีค่าปริมาณสารบีตาไซยานินและประสิทธิภาพการกักเก็บมากที่สุด เท่ากับ 6.51 mg/100g และ 98.27 % ตามลำดับ และผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ใช้มอลโทเดกซ์ตรินผสมแซนแทนกัม คัดเลือกที่ความเข้มข้นอัตราส่วน 10:0.1 % w/v เนื่องจากมีค่าปริมาณสารบีตาไซยานินและประสิทธิภาพการกักเก็บมากที่สุด เท่ากับ 9.76 mg/100g และ 99.53 % ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณของมอลโทเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ทำให้มีปริมาณของสารสกัดบีตาไซยานินและประสิทธิภาพการกักเก็บลดลง



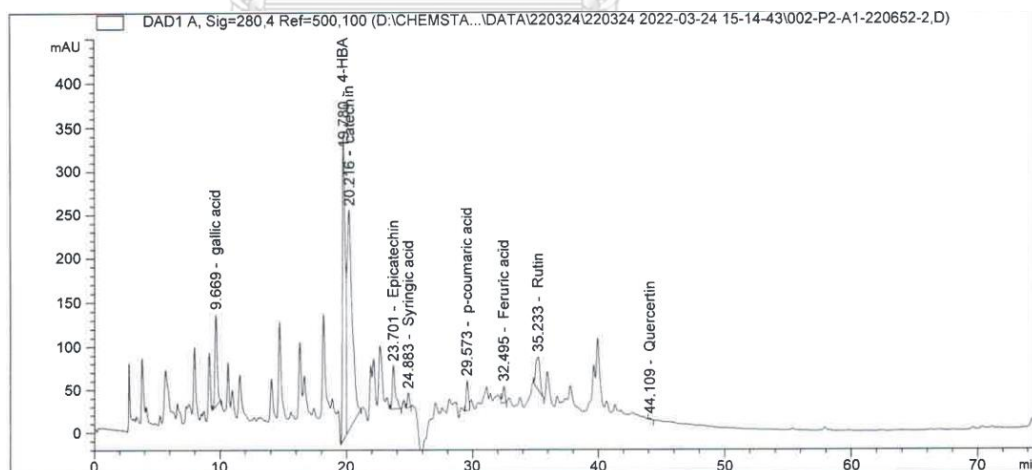
### ค.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) ด้วยวิธี HPLC

#### ค.3.1 ผลโครมาโทแกรมของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P)



รูปที่ ข.1 โครมาโทแกรมของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P)

#### ค 3.2 ผลโครมาโทแกรมของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์หลังเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ ข.2 โครมาโทแกรมของผงสารสกัดบีตาไซยานินที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์หลังเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์

ค.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation value, r) ของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P)

ตารางที่ ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation value, r) ของสารสกัดบีตาไซยานินที่ได้จากวิธีแบบผสม (CE-P)

Correlation	Betacyanins	TFC	TPC	DPPH
FRAP	0.866	-0.872	-0.967	-0.959
DPPH	-0.690	0.698	0.855	
TPC	-0.965	0.968		
TFC	-1.000**			
Betacyanins				

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิถวานี เทพปรียากุลกาล
วัน เดือน ปี เกิด	21 มกราคม 2541
สถานที่เกิด	เพชรบุรี
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 140 ถ.มาตยาวงศ์ ต.ท่าราบ อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY