รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพิวเร่ในระหว่างการเก็บรักษา

Degradation kinetics of total carotenoids and antioxidant activity in banana-pumpkin puree during heating and changes in puree quality during storage

ดร.ศนิ จิระสถิตย์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล
(งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222400
สัญญาเลขที่ 33/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพิวเร่ในระหว่างการเก็บรักษา

Degradation kinetics of total carotenoids and antioxidant activity in banana-pumpkin puree during heating and changes in puree quality during storage

ดร. ศนิ จิระสถิตย์
ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ ม.บูรพา

6/2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559 (เพิ่มเติม) มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 33/2559

Acknowledgment

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 33/2559)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

รายละเอียดตามเอกสารแนบ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และค่าสีในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อน (60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 60 นาที พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C นาน 60 นาที มีผลให้ปริมาณแคโรทีนอยด์คงเหลือในตัวอย่างต่ำที่สุดเท่ากับ 37% ขณะที่ตัวอย่างยังคงมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เหลืออยู่ 96% อุณหภูมิการให้ความร้อนยังคงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี ได้แก่ L*, a*, b* และ TCD* ของตัวอย่าง การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ผลอุณหภูมิต่อค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการ Arrhenius, Eyring และ Ball ซึ่งสามารถทำนายการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนได้อย่างแม่นยำ และจากการศึกษาความคงตัวของคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่ผ่านการพาสเจอไรซ์ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 21-28 วัน ภายใต้สภาวะการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศและแบบบรรยากาศ พบว่าการเก็บรักษาพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่อุณหภูมิ 4°C จะเป็นผลให้ตัวอย่างมีความคงตัวของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ค่าสี (L*, a*, b* และ TCD*) สูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°C อีกทั้งพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์ตลอดอายุการเก็บรักษาที่ 4°C นาน 28 วัน และ 30°C นาน 21 วัน ทั้งการบรรจุแบบสภาวะการบรรจุแบบบรรยากาศและแบบสุญญากาศ โดยการบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศจะสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ค่าสี และคุณภาพด้านจุลินทรีย์ได้ใกล้เคียงกับการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 4°C

Abstract

The objective of this study was to investigate the effect of temperature on degradation of total carotenoids, antioxidant activity (DPPH assay) and color in banana-pumpkin puree during heating (60, 70, 80 and 90°C) for 60 min. It was found that the heating temperatures had a significant effect on total carotenoids loss, but little effect on loss of DPPH inhibition in banana-pumpkin puree. 37% of total carotenoids content was remained after heat at 90°C for 60 min, while the remaining of DPPH inhibition was 96% at this heating condition. The heating temperature had also influence on the color changes including *L**, *a**, *b** and TCD* in sample. The kinetics of degradation of total carotenoid and antioxidant activity in sample during heating followed the first-order reaction. The effect of temperatures on kinetic constants was described by an Arrhenius, Eyring and Ball equation, which predicted accurately the total carotenoids content and DPPH inhibition during isothermal heating. In addition, the stability of pasteurized banana-pumpkin puree during storage at 4 and 30°C for 21-28 days under vacuum and atmospheric conditions in packages was investigated. The result showed that sample kept at 4°C had a stable antioxidant activity and color (L*, a*, b* and TCD*) higher than that of sample kept at 30°C. The banana-pumpkin puree has a microbial quality throughout the storage at 4°C for 28 days and 30°C for 21 days under vacuum and atmospheric packaging conditions. At storage temperature of 4°C, the atmospheric packaging can preserve the product quality including antioxidant activity, color and microbial quality, which was similar to that of vacuum packaging.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศภาษาไทย	ก
กิตติกรรมประกาศภาษาอังกฤษ	ข
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญเรื่อง	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
เนื้อเรื่อง	
1. บทนำ	1
2. วัตถุดิบและวิธีการทดลอง	5
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	10
3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และค่าสีของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน	10
3.2 จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อน	13
3.3 ความคงตัวของคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่ผ่านการพาสเจอไรซ์ในระหว่างการเก็บรักษาอุณหภูมิ 4 และ 30°C ภายใต้สภาวะการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศและแบบบรรยากาศ	18
4. สรุปผลการทดลอง	23
ผลผลิต	25
บรรณานุกรม	26
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	29
ประวัตินักวิจัยและคณะ	33

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) และค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระหว่างการให้ความร้อน	14
2	จลนพลศาสตร์พารามิเตอร์ของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยสมการต่างๆ	15
3	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 21-28 วัน	21
4	ปริมาณยีสต์และราทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 21-28 วัน	22

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	การเปลี่ยนแปลงค่า L* (a), ค่า a* (b) ค่า b* (c) และค่า TCD* (d) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C (♦), 70°C (■), 80°C (▲) และ 90°C (x) นาน 0-60 นาที	12
2	จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C (♦), 70°C (■), 80°C (▲) และ 90°C (x) นาน 0-60 นาที ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	13
3	ความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดระหว่างการให้ความร้อน	15
4	จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C (♦), 70°C (■), 80°C (▲) และ 90°C (x) นาน 0-60 นาที ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	16
5	ความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระหว่างการให้ความร้อน	17
6	การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาแบบสภาวะบรรยากาศ (solid line) ที่อุณหภูมิ 4°C (♦) และ 30°C (■) และแบบสภาวะสุญญากาศ (dash line) ที่อุณหภูมิ 4°C (◊) และ 30°C (□) เป็นระยะเวลา 21-28 วัน	18
7	การเปลี่ยนแปลงค่าสี L* (a), ค่า a* (b) ค่า b* (c) และค่า TCD* (d) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างเก็บรักษาแบบสภาวะบรรยากาศ (solid line) ที่อุณหภูมิ 4°C (♦) และ 30°C (■) และแบบสภาวะสุญญากาศ (dash line) ที่อุณหภูมิ 4°C (◊) และ 30°C (□) เป็นระยะเวลา 21-28 วัน	20

บทที่1
บทนำ

กล้วย (*Musa* sp.) จัดอยู่ในตระกูล *Musaceae* เป็นพืชที่พบมากบริเวณภูมิประเทศโซนร้อนและโซนกึ่งร้อน กล้วยอุดมไปด้วยวิตามินซี แคโรทีนอยด์ และสารประกอบฟีนอลิก มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant activity) และฤทธิ์ต้านการแบ่งตัวของเซลล์ (antiproliferation) สูง สามารถยับยั้งการเกิดเซลล์มะเร็ง ซึ่งมีสาเหตุจากสาร N-nitroso compounds ในกระเพาะอาหาร (Englberger et al., 2003; Giannakourou & Taoukis, 2003; Sun et al., 2002)

ฟักทองเป็นพืชในตระกูล Cucurbita มีการเพาะปลูกทั่วไปในทุกสภาพอากาศทั้งเขตหนาวไปจนถึงเขตร้อน เนื้อของฟักทองมีคุณค่าทางโภชนาการสูงสำหรับมนุษย์ โดยประกอบด้วยสารอาหารหลากหลายชนิด เช่น แคโรทีนอยด์ วิตามินซี วิตามินบีสอง วิตามินอี และโพแทสเซียม ให้พลังงานต่ำและมีใยอาหารสูง ทั้งนี้สารแคโรทีนอยด์หลักที่พบในผักและผลไม้ เช่น เบต้าแคโรทีน (β-carotene), แอลฟ่าแคโรทีน (α-carotene) และ เบต้าคริปโทแซนทิน (β-cryptoxantene) มีคุณสมบัติเป็น pro-vitamin A ซึ่งหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า การบริโภคแคโรทีนอยด์สามารถช่วยลดความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพและโรคหลอดเลือดและหัวใจ ต้อกระจก จอประสาทตาเสื่อม และการเกิดเซลล์มะเร็ง (Gliemmo et al., 2009; Provesi et al, 2011)

นอกจากกล้วยและฟักทองจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูงแล้ว กล้วยและฟักทองยังเป็นพืชที่มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในประเทศไทย ซึ่งการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น น้ำผลไม้ น้ำผลไม้เข้มข้น หรือพิวเร่ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการใช้ประโยชน์จากกล้วยและฟักทองที่มีปริมาณมาก และเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร

ทั้งนี้พิวเร่เป็นอาหารที่เหมาะสมสำหรับเด็กและผู้สูงอายุ เนื่องจากง่ายต่อการกลืนและง่ายต่อการย่อยในร่างกายของมนุษย์ อีกทั้งผลิตภัณฑ์อุดมยังไปด้วยสารอาหารปริมาณสูง เนื่องจากผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปอาหารที่มีความเข้มข้น ทำให้ผู้บริโภคได้รับสารอาหารและสารพฤษเคมีที่มีประโยชน์ต่อร่างกายในปริมาณสูง ซึ่งช่วยลดภาวะขาดสารอาหารได้

อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตพิวเร่จะต้องนำผลิตภัณฑ์ไปให้ความร้อนระดับพาสเจอไรเซชันหรือสเตอริไลเซชันเพื่อทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ซึ่งความร้อนที่ใช้ในระหว่างการแปรรูป ทำให้เกิดการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น แคโรทีนอยด์ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งการลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์จะทำให้ลดความสามารถในการออกฤทธิ์ทางชีวภาพและเกิดการสังเคราะห์สารระเหย ซึ่งอาจทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์ (Provesi et al., 2011) อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนอาจเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้บางชนิด ดังนั้นการศึกษากระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการผลิตเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยและมีการเหลืออยู่ของคุณค่าทางโภชนาการสูงสุด (Liaotrakoon et al., 2013)

หลายงานวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่างๆ ในระหว่างการให้ความร้อน ตัวอย่างเช่น Dhuique-Mayer et al. (2007) ศึกษาการเสื่อมสลายของเบต้าแคโรทีนและเบต้าคริปโทแซนทินในเครื่องดื่มน้ำผลไม้รสเปรี้ยวระหว่างการให้ความร้อน พบว่าเบต้าแคโรทีนและเบต้าคริปโทแซนทินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75-100°C นาน 0-300 นาที โดยปฏิกิริยาเสื่อมสลายของสารเบต้าแคโรทีนและและเบต้าคริปโทแซนทินสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order kinetic reaction)

อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อมูลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนและการเก็บรักษา อีกทั้งยังขาดข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินสภาวะการให้ความร้อนเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน ร่วมทั้งพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน และศึกษาความคงตัวของคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณจุลินทรีย์ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษาภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งความรู้ที่ได้จากการทดลองสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับเด็กและผู้สูงอายุในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน
2. พัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนด้วยสมการ Arrhenius, Eyring และ Ball
3. ศึกษาความคงตัวของคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณจุลินทรีย์ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษาภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสุญญากาศ

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิ (60, 70, 80 และ 90°C) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน (0-60 นาที)
2. พัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนด้วยสมการ Arrhenius, Eyring และ Ball

3. ศึกษาความคงตัวของคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณจุลินทรีย์ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษา (4°C และ 30°C นาน 30 วัน) ภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสุญญากาศ

ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

กล้วยและฟักทองเป็นพืชที่มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในประเทศไทย และยังอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากกล้วยและฟักทองที่มีปริมาณมาก โดยการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจศึกษา ซึ่งนอกจากจะเป็นการประโยชน์จากผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมากแล้ว ยังสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตรด้วย (Provei et al., 2011; Tsen & King, 2002) พิวเร่เป็นอาหารที่เหมาะสมสำหรับเด็กและผู้สูงอายุ เนื่องจากง่ายต่อการกลืนและง่ายต่อการย่อยในร่างกายของมนุษย์ อีกทั้งผลิตภัณฑ์อุดมยังไปด้วยสารอาหารปริมาณสูง เนื่องจากผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปอาหารที่มีความเข้มข้น ทำให้ผู้บริโภคได้รับสารอาหารและสารพฤษเคมีที่มีประโยชน์ต่อร่างกายในปริมาณมาก ซึ่งช่วยลดภาวะขาดสารอาหารได้ ทั้งนี้กระบวนการผลิตพิวเร่จะต้องนำผลิตภัณฑ์ไปให้ความร้อนระดับพาสเจอไรเซชันหรือสเตอริไลเซชัน เพื่อทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนระหว่างการแปรรูปเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น แคโรทีนอยด์ เป็นผลให้ความสามารถในการออกฤทธิ์ทางชีวภาพลดลง ร่วมทั้งเกิดการสังเคราะห์สารระเหย ซึ่งอาจทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์ (Provesi et al., 2011) อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนอาจเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้บางชนิด ดังนั้นการศึกษากระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการผลิตเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยและมีการเหลืออยู่ของคุณค่าทางโภชนาการสูงสุด (Liaotrakoon et al., 2013) ทั้งนี้เพื่อที่จะเข้าใจผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง และความคงตัวของคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษา งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน รวมถึงพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง และศึกษาความคงตัวของคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณจุลินทรีย์ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษาภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งข้อมูลจากการทดลองสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบกระบวนการแปรรูปเพื่อผลิตพิวเร่ซึ่งเป็นอาหารสำหรับเด็กและผู้สูงอายุที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้จะทำให้ทราบถึงอัตราการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และการเปลี่ยนแปลงค่าสีในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองอันเกิดจากอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการแปรรูปด้วยความร้อน และทราบถึงความคงตัวของคุณภาพของพิวเร่ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งความรู้ที่ได้จากการศึกษาจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบกระบวนการผลิตเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่ให้คุณค่าทางโภชนาการสูงสุด อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร และสามารถแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่อไป

บทที่2
วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบ

1. ฟักทองพันธุ์ศรีเมืองซื้อจากตลอดหนองมน จ.ชลบุรี
2. กล้วยน้ำว้าพันธุ์มะลิอ่องซื้อจากตลอดหนองมน จ.ชลบุรี

วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมกล้วย

นำกล้วยน้ำว้าสุกพันธุ์มะลิอ่องสุก ไม่มีตำหนิ งอม กำหนดคุณภาพโดยเปลือกมีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 64.62-66.83, 9.33-9.79 และ 48.28-51.45 ตามลำดับ และเนื้อกล้วยมีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 75.76-79.25, 2.40-5.21 และ 22.71-25.44 ตามลำดับ ล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaOCl) ความเข้มข้น 20 ppm ปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้นบางๆ ขนาด 2×3 เซนติเมตร แล้วนำไปลวกในน้ำเดือด (100°C) เป็นเวลา 7 นาที แล้วทำให้เย็นทันทีที่อุณหภูมิ 15°C ด้วยอ่างน้ำแข็ง (Tsen & King, 2002) นำตัวอย่างเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C ระหว่างรอเตรียมขั้นถัดไป

2.2 การเตรียมฟักทอง

นำฟักทองพันธุ์ศรีเมือง กำหนดคุณภาพโดยมีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 65.49–65.66, 9.88–10.05 และ 68.29–68.37 ตามลำดับ มาล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮไปคลอไรด์ (NaOCl) ความเข้มข้น 50 ppm ปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้นขนาด 2×3 เซนติเมตร นำไปนึ่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 นาที ให้เย็นโดยแช่ในน้ำนาน 3 นาที ซับให้แห้งด้วยกระดาษ (Gliemmo et al., 2009) เก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C ระหว่างการเตรียมขั้นถัดไป

2.3 การเตรียมกล้วยผสมฟักทองพิวเร่

นำกล้วยและฟักทองที่เตรียมไว้ข้างต้นผสมกันในอัตราส่วน 1:1 บดด้วยเครื่องบด จากนั้นปรับให้ pH ให้มีค่าเท่ากับ 4.2 ด้วยกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 0.05% w/w (Gliemmo et al., 2009) นำตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่ไม่ได้ผ่านความร้อนมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี-กายภาพดังนี้

- ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid; TSS) ด้วย handheld refractometer ที่ 25°C (Master, Atago, Japan)
- ค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter (Model Lab 850 set, Schott instruments)
- ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (Carvalho et al., 2012)

- ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ โดยการทดสอบประสิทธิภาพการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH free radical free radical scavenging activity test) (Karagozler et al., 2008)
- ค่าสีระบบ CLE ด้วย Hunter colorimeter (Minican XP Plus, Hunter Associates Laboratory, USA) รายงานเป็นค่า L*, a* และ b*

2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน

ตัวอย่างพิวเร่กล้วยและฟักทองจะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 4 ระดับ ได้แก่ 60, 70, 80 และ 90°C นาน 0-60 นาที ซึ่งการให้ความร้อนระดับพาสเจอไรเซชันเพียงพอสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษา (shelf-stability) ในอาหารที่มีความเป็นกรดสูง (pH<4.5) (Ahmed et al., 2004) โดยการทดลองสามารถทำได้ดังนี้

นำพิวเร่ที่เตรียมได้ใส่ในหลอดทดลอง หลอดละ 20 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดทดลองให้สนิท นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อน โดยให้ความร้อนที่ระยะเวลานาน 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที (Liaotrakoon et al., 2013) เมื่อตัวอย่างมีอุณหภูมิตามที่ต้องการและเวลาตามที่กำหนดแล้ว ให้นำตัวอย่างออกมาจากอ่างน้ำร้อน นำไปทำให้เย็นทันทีในอ่างน้ำแข็งเพื่อหยุดปฏิกิริยา จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -18°C สำหรับวิเคราะห์ทางเคมี-กายภาพ ได้แก่

- ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (Carvalho et al., 2012)
- ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Karagozler et al., 2008)
- ค่าสีระบบ CLE ด้วย Hunter colorimeter (Minican XP Plus, Hunter Associates Laboratory, USA) รายงานเป็นค่า L*, a* และ b* และค่าความแตกต่างของสี (total color difference; TCD* หรือ ΔE)

$$\mathrm{TCD}^{*} = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}$$

เมื่อ L^*_0, a^*_0 และ b^*_0 คือค่าเริ่มต้น และ L*, a* และ b* คือค่าที่เวลาใดๆ ในระหว่างการให้ความร้อน (Kara และ Ercelebi, 2013)

2.4 การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระหว่างการให้ความร้อน

การศึกษาจลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระหว่างการให้ความร้อนจะทำการพัฒนาสมการแบบ simple kinetics model โดยอัตราการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (1)

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \qquad (1)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้มของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดหรือฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่เวลาใดๆ และ t คือ เวลา (min), k คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา และ n คืออับดับของปฏิกิริยา (Horia, 2006; Jirasatid et al., 2013)

ผล kinetics parameters เช่น ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Berkeley Madonna โดยเขียนสมการการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในรูป mathematical models ด้วยสมการ differential equation และใช้วิธี numerical integration เพื่อที่จะ fit curve หาที่ k ในแต่ละปฏิกิริยา ทั้งปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อันดับหนึ่ง และอับดับสอง ตามลำดับ (Martins et al., 2005) ค่าจาก fit curve ที่ดีที่สุด สามารถประเมินได้จากค่า R^2 จากนั้นนำค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิมาคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่าคงที่ของ Arrhenius (k_0) ด้วยสมการ Arrhenius model (สมการที่ (2))

$$k = k_0 exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] \tag{2}$$

เมื่อ k_0 คือ frequency factor, R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol.K), T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) (Horia, 2006)

ค่า activation enthalpy (ΔH), activation entropy (ΔS) และ free activation enthalpy (ΔG) ของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระหว่างการให้ความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ Eyring-Polanyi model (สมการที่ (3) และ (4)) (Cisse et al., 2009; Kechinski et al., 2010)

$$k = \frac{k_B}{h} T \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right) = \frac{k_B}{h} T \exp\left(-\frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{RT}\right) \tag{3}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \tag{4}$$

เมื่อ k_B คือ Bolyzmann's constant (1.381×10^{-23} J/K), h คือ Plank's constant (6.626×10^{-34} J·s), T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol·K), ΔH คือ activation enthalpy (J/mol), ΔS คือ activation entropy (J/mol·K) and ΔG คือ free activation enthalpy (J/mol)

Ball model (สมการที่ (5) และ (6)) เป็นสมการที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารสำหรับการทำลายจุลินทรีย์ โดยสมการจะวิเคราะห์ค่า D-value หรือ decimal reduction time ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิหรือค่า Z-value (Cisse et al., 2009; Remini et al., 2015)

$$D = \frac{\ln 10}{k} \tag{5}$$

$$D = D_0 10^{\frac{-T}{Z}} \quad (6)$$

เมื่อ D คือ เวลาในการให้ความร้อนเพื่อลดปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดหรือฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลง 90%, D_0 คือ ค่า D ที่อุณหภูมิ 0°C (min), T คือ อุณหภูมิ (°C) และ Z (°C) คือ อุณหภูมิที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า D value ลด 1 $\log_{10}$ cycle

สุดท้ายทำการ validation model โดยคำนวณค่า k จาก Arrhenius model (2), Erying model (3 และ 4) และ Ball model (5 และ 6) แล้วแทนที่ค่า k ที่ได้ ลงในสมการปฏิกิริยาอันดับศูนย์อันดับหนึ่ง หรืออันดับสอง (1) เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดหรือฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่เวลาใดๆ แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

จากนั้นคัดเลือกอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาให้ความร้อนที่เหมาะสมจะพิจารณาจากตัวอย่างมีปริมาณคงเหลือของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด และมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์และราทั้งหมดไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 355 เรื่อง อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) โดยกำหนดให้มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 37°C ไม่เกิน 10,000 ต่ออาหาร 1 กรัม และมีปริมาณยีสต์และราทั้งหมดไม่เกิน 100 ต่ออาหาร 1 กรัม

2.6 ศึกษาความคงตัวของคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษา

พิวเร่จะถูกปรับให้มีค่า pH ประมาณ 4.2 ด้วยกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 1.0% (w/w) จากนั้นชั่งตัวอย่าง 25 g ลงในบีกเกอร์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปิดปากบีกเกอร์ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์ นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อน (Model 11DT-1, Heto, Denmark) ที่อุณหภูมิ 72°C นาน 15 วินาที (จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 72°C นาน 15 วินาที มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 2.5×10 cfu/g และปริมาณยีสต์และราน้อยกว่า 10 cfu/g ซึ่งพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์ตามตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 144) เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างถึง 72°C จากนั้นนำบีกเกอร์ออกมาจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเมื่อถึงเวลาตามที่กำหนด บรรจุพิวเร่ขณะร้อนปริมาณ 100 g ลงถุงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) ถุงละ 100 g และทำให้เย็นทันทีโดยแช่ในอ่างน้ำแข็ง ตัวอย่างจะถูกบรรจุภายใต้สภาวะบรรยากาศโดยปิดผนึกปากถุงด้วยเครื่องซีลมือกด และบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศด้วยเครื่องซีลสุญญากาศ (UV-420T, Pascal Intertech, Thailand) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C เป็นเวลา 28 และ 21 วัน ตามลำดับ สุ่มตัวอย่างทุกๆ 7 วัน ในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่

- ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Karagozler et al., 2008)

- ค่าสีระบบ CLE ด้วย Hunter colorimeter (Minican XP Plus, Hunter Associates Laboratory, USA) รายงานเป็นค่า L*, a* และ b*
- ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) (Yousef & Carlstrom, 2003)
- ปริมาณยีสต์และราทั้งหมด (Yousef & Carlstrom, 2003)

บทที่ 3
ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และค่าสีของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการให้ความร้อน

จากการทดลองพบว่า พิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่าความชื้นเริ่มต้น, water activity (a_w) เริ่มต้น , pH เริ่มต้น และ TSS เริ่มต้น เท่ากับ 85.62±2% (wet basis), 0.96±0.03, 4.2±0.1 และ 13.6±0.2°Brix ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่า แคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีปริมาณลดลงในระหว่างการให้ความร้อน (0-60 นาที) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการให้ความร้อน ณ เวลาเดียวกัน พบว่า แคโรทีนอยด์ทั้งหมดมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ ทั้งนี้การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ทำให้มีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองคงเหลืออยู่สูงสุด โดยปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดที่เหลืออยู่ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 60 นาที มีค่าเท่ากับ 70% อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่เหลืออยู่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 37% ภายหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C นาน 60 นาที

การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในระหว่างการให้ความร้อนเกิดจากปฏิกิริยา *trans-cis* isomerization และ oxidation ทั้งนี้ปฏิกิริยาการสลายตัวของโมเลกุลแคโรทีนอยด์ด้วยปฏิกิริยา *trans-cis* isomerization เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้แคโรทีนอยด์เปลี่ยนโครงสร้างจาก *trans*-form เป็น *cis*-form (Aman et al., 2005) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น 13,13′-di-*cis*-β-carotenes, 9,13′-di-*cis*-β-carotene, 15-*cis*-β-carotene, 13-*cis*-β-carotene และ 9,9′-di-*cis*-β-carotene (Bonnie & choo, 1999) ขณะที่การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุพันธ์ของอัลดีไฮด์และคีโตน ซึ่งได้แก่ β-apo-8′-carotenal, β-apo-10′-carotenal, β-apo-12′-carotenal, β-apo-14′-carotenal, β-apo-15-carotenal และ β-carotene-4-one (Marty & Berset, 1990)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อน พบว่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในทุกตัวอย่างมีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่างการให้ความร้อน (อุณหภูมิ 60-90°C นาน 0-60 นาที) โดยพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH เริ่มต้นที่เวลา 0 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90°C เท่ากับ 69.1±1.5, 74.9±3.6, 74.4±3.1 และ 65.9±4.1% ตามลำดับ ภายหลังการให้ความร้อน

เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90°C ตัวอย่างกล้วยผสมฟักทองพิวเร่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 67.4±3.3, 72.4±0.4, 71.5±3.6 และ 63.1±1.2% ตามลำดับ

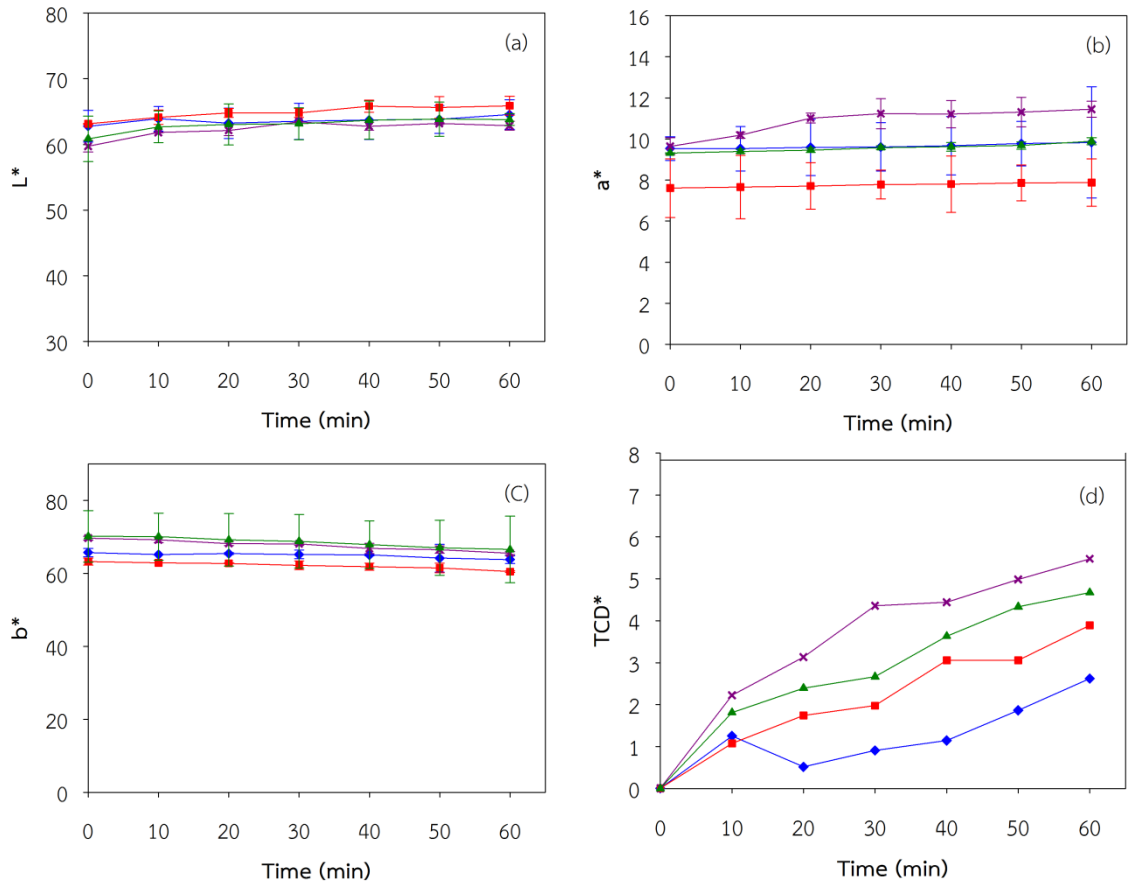
จากการทดลองการวิเคราะห์ค่าสี LAB พบว่าตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่าความสว่าง (L*) เริ่มต้นอยู่ในช่วง 59.73-66.14 โดยค่า L* เท่ากับ 0 แสดงถึงสีดำ และ L* เท่ากับ 100 แสดงถึงสีขาว ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L*) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-90°C นาน 0-60 นาที (ภาพที่ 1a) ผลการทดลองพบว่า ทุกตัวอย่างมีค่า L* ค่อนข้างคงที่ในระหว่างการให้ความร้อน ตัวอย่างเช่น ภายใต้อุณหภูมิ 60°C ตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่า L* เริ่มต้น เท่ากับ 62.78±2.43 และภายหลังการให้ความร้อนเป็นเวลา 60 นาที ค่า L* ของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 64.56±2.25 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ พบว่าค่า L* ของตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น (60-90°C) ณ เวลาเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ค่า L* ของตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองภายหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C นาน 60 นาที มีค่าเท่ากับ 62.86±0.66 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า L* ของตัวอย่างกล้วยผสมฟักทองพิวเร่ภายหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 60 นาที

ภาพที่ 1b แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า a* ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-90°C นาน 0-60 นาที โดยค่า a* เป็นบวก แสดงความเป็นสีแดง และค่า a* เป็นลบ แสดงความเป็นสีเขียว จากการทดลองพบว่า ทุกตัวอย่างมีค่า a* เป็นบวก ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีแดง โดยตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่า a* เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90°C เท่ากับ 9.54±0.57, 7.61±1.42, 9.31±0.02 และ 9.64±0.41 ตามลำดับ ภายหลังการให้ความร้อนนาน 60 นาที ที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90°C ตัวอย่างกล้วยผสมฟักทองพิวเร่มีค่า a* เท่ากับ 9.83±2.71, 7.88±1.15, 9.89±0.18 และ 11.45±0.39 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นมากที่สุดในตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C

ภาพที่ 1c แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า b* ในตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-90°C นาน 0-60 นาที ค่า b* เป็นบวก แสดงความเป็นสีเหลือง และค่า b* เป็นลบ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน จากการทดลองพบว่า ทุกตัวอย่างมีค่า b* เป็นบวก ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีเหลือง โดยค่า b* ของตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่าเริ่มต้นอยู่ในช่วง 63.26-70.17 และการเปลี่ยนแปลงของค่า b* ของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยระหว่างการให้ความร้อน (จาก 0-60 นาที) ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 80°C ตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่า b* เริ่มต้นเท่ากับ 70.17±7.06 และภายหลังการให้ความร้อนนาน 60 นาที ค่า b* ของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 66.56±9.11 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิพบว่า ค่า b* ของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น (60-90°C) ณ เวลาเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ค่า b* ของตัวอย่างกล้วยผสมฟักทองพิวเร่ภายหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C นาน 60 นาที มีค่าเท่ากับ 66.56±9.11 ขณะที่ค่า b* ของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C มีค่าเท่ากับ 65.58±0.39 ณ เวลาเดียวกัน

นอกจากนี้การให้ความร้อนแก่พิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่อุณหภูมิ 90°C นาน 60 นาที ส่งผลให้ค่า TCD* เพิ่มขึ้นสูงสุด เท่ากับ 5.48 ขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 60 นาที ส่งผลให้ค่า TCD* เพิ่มขึ้นต่ำสุด เท่ากับ 2.62 (ภาพที่ 1d)

ผลการทดลองอธิบายได้ว่า สีของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองอาจเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีที่สว่างกว่า โดยรงควัตถุที่ให้เฉดสีเหลือง-สีส้มในกล้วยและฟักทอง เช่น แคโรทีนอยด์สามารถเสื่อมสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารที่ปราศจากสี (colorless compound) เช่น สารประกอบอีพอกไซด์ และไฮดรอกซิล และการสูญเสียสีเหลืองอาจเป็นผลจากปฏิกิริยา *cis-trans* isomerization ของแคโรทีนอยด์ ทำให้สีเหลืองในตัวอย่างจางลงในระหว่างการให้ความร้อน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่า a* โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง (100°C) อาจเป็นผลจากการเกิดสารสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Bonnie & Choo, 1999; Demiray et al., 2013)

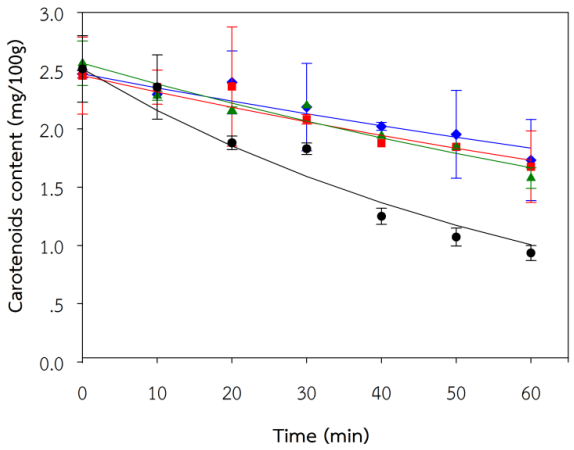


ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่า L* (a), ค่า a* (b) ค่า b* (c) และค่า TCD* (d) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C (♦), 70°C (■), 80°C (▲) และ 90°C (x) นาน 0-60 นาที

3.2 จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อน

3.2.1 จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อน

จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-90°C นาน 0-60 นาที สามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (ภาพที่ 2) โดยมีค่า R^2 ของแคโรทีนอยด์อยู่ในช่วง 0.906-0.959 (ตารางที่ 1) ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (*k*) ของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดมีค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 0.0050-0.0152 นาที$^{-1}$ โดยค่า *k* เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงขึ้น (ตารางที่ 1)



ภาพที่ 2 จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C (♦), 70°C (■), 80°C (▲) และ 90°C (x) นาน 0-60 นาที ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

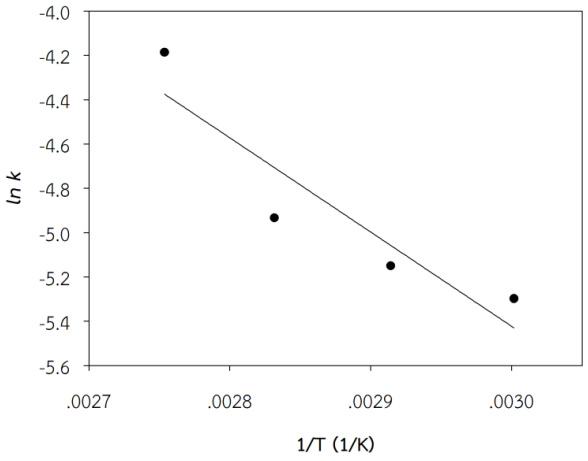
หลายงานวิจัยรายงานว่า การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ในเอพริคอต (*Prunus armeniaca* L.) ระหว่างการทำแห้งด้วยไมโครเวฟและการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C นาน 12-21 ชั่วโมง (Fratianni et al., 2013) การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ในพิวเร่มะละกอระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70-105°C นาน 0-3 ชั่วโมง (Ahmed et al., 2002) และการเสื่อมสลายของเบต้าแคโรทีนในพิวเร่ฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-100°C นาน 2 ชั่วโมง (Dutta et al., 2006) นอกจากนี้ยังพบว่า การเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดอื่นๆสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การเสื่อมสลายของไลโคพีนในมะเขือเทศระหว่างการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60-100°C นาน 20 ชั่วโมง (Demiray et al., 2013)

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) และค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระหว่างการให้ความร้อน

ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา, k (นาที$^{-1}$)	ค่าสหสัมพันธ์, R^2	ค่าครึ่งชีวิต, $t_{1/2}$ (min)
แคโรทีนอยด์ทั้งหมด	60	0.0050	0.906	139
	70	0.0058	0.946	119
	80	0.0072	0.933	96
	90	0.0152	0.959	45
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH	60	4.57×10^{-4}	0.941	1516
	70	4.56×10^{-4}	0.908	1518
	80	7.97×10^{-4}	0.819	869
	90	9.59×10^{-4}	0.774	723

ค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) หมายถึง เวลาที่ทำให้สารลดลงไป 50% โดยค่าครึ่งชีวิตของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สามารถคำนวณได้จาก $t_{1/2} = -\ln 0.5/k$ ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อค่าครึ่งชีวิตของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในกล้วยผสมฟักทองพิวเร่แสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าครึ่งชีวิตของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด โดยค่าครึ่งชีวิตของแคโรทีนอยด์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ครึ่งชีวิตของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 139 นาที เป็น 45 นาที เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 90°C

จากนั้นนำค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) อันดับหนึ่ง มาหาพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่าคงที่ของ Arrhenius (k_0) ด้วยสมการ Arrhenius จากการพล็อตกราฟระหว่างความสัมพันธ์ของ ln k และ 1/T (ภาพที่ 3) โดยค่าพลังงานกระตุ้นของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (E_a) ภายใต้การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-90°C นาน 0-60 นาที มีค่าเท่ากับ 35.36 kJ/mol ตามลำดับ (ตารางที่ 2) ทั้งนี้ค่าพลังงานกระตุ้นของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่ กล้วยผสมฟักทองระหว่างอุณหภูมิ 60-90°C (35.36 kJ/mol) มีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดจากอาหารชนิดอื่นๆ เช่น พิวเร่มะละกอที่อุณหภูมิ 70-105°C นาน 0-3 ชั่วโมง (20.56 kJ/mol) (Ahmed et al., 2002) แสดงได้ว่า การเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองเกิดขึ้นได้เร็วกว่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Ou et al., 2009)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดระหว่างการให้ความร้อน

ตารางที่ 2 จลนพลศาสตร์พารามิเตอร์ของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยสมการต่างๆ

ปฏิกิริยา	Arrhenius model			Eyring model			Ball model		
	k_0 (นาที$^{-1}$)	E_a (kJ/mol)	R^2	ΔH (kJ/mol)	ΔS (J/mol·K)	R^2	$D_0 \times 10^3$ (min)	Z (°C)	R^2
TC	1537.63	35.36	0.846	32.47	-193.47	0.823	4.4	67	0.863
DPPH RSA	9.56	27.83	0.873	24.93	-235.72	0.847	29.2	83	0.881

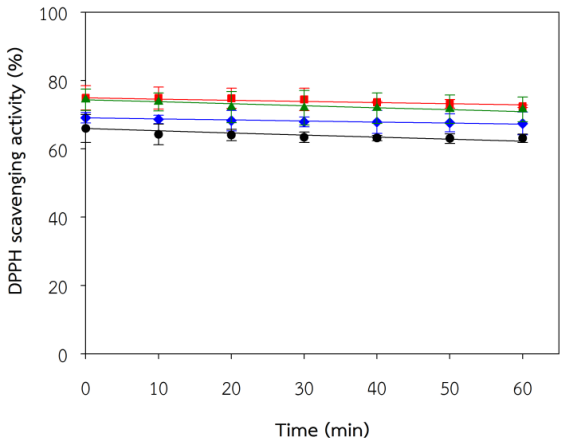
TC: total carotenoids, DPPH RSA: DPPH radical scavenging activity

Thermodynamic function จากสมการ Eyring-Polanyi model ได้แก่ ΔH, ΔS และ ΔG ของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 32.47 (kJ/mol), -193.47 (J/mol·K) และ 99.83 (kJ/mol) ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ค่า *D* value หรือ decimal reduction value คือ เวลาในการให้ความร้อนเพื่อลดปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดลง 90% สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งคำนวณจากสมการ (5) (Van Boekel, 2009) ค่า *D* value มีค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 460.5-151.5 นาที สำหรับการให้ความร้อนที่ 60-90°C โดยค่า *D* value มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิการให้ความร้อนสูงกว่า จะทำให้ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าสำหรับการลดแคโรทีนอยด์ทั้งหมดลง 90% นอกจากนี้ *D* value สามารถถูกอธิบายได้ด้วย Ball model โดยมีค่า R^2 สูง (0.863) ค่า *Z* และ D_0 มีค่าเท่ากับ 67°C and 4.4 $\times 10^3$ นาที ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

3.2.2 จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อน

จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-90°C นาน 0-60 นาที สามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (ภาพที่ 4) โดยมีค่า R^2 ของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 0.774-0.941 (ตารางที่ 1) ซึ่งมีค่าสูงกว่าปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (R^2=0.768-0.940) และปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อันดับสอง (R^2=0.742-0.940) ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ของการเปลี่ยนแปลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 4.57×10^{-4} ถึง 9.59×10^{-4} นาที$^{-1}$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 ถึง 90°C (ตารางที่ 1)

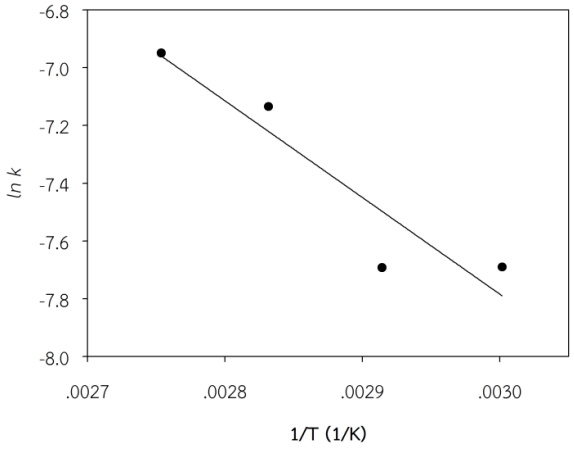


ภาพที่ 4 จลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C (♦), 70°C (■), 80°C (▲) และ 90°C (x) นาน 0-60 นาที ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของการเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าครึ่งชีวิตของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง โดยค่าครึ่งชีวิตของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ครึ่งชีวิตของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 1516 นาที เป็น 723 นาที เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 90°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีความคงตัวมากกว่าภายใต้การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า

จากการพล็อตกราฟระหว่างความสัมพันธ์ของ ln k และ 1/T เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ Arrhenius พบว่า ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนแปลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการ Arrhenius โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.873 (ภาพที่ 5) โดยค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ค่าคงที่ของ Arrhenius (k_0) ของการเปลี่ยนแปลงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ค่าพลังงานกระตุ้น

ของการเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ต่ำกว่าการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า การเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการให้ความร้อนน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ (Jirasatid et al., 2013)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระหว่างการให้ความร้อน

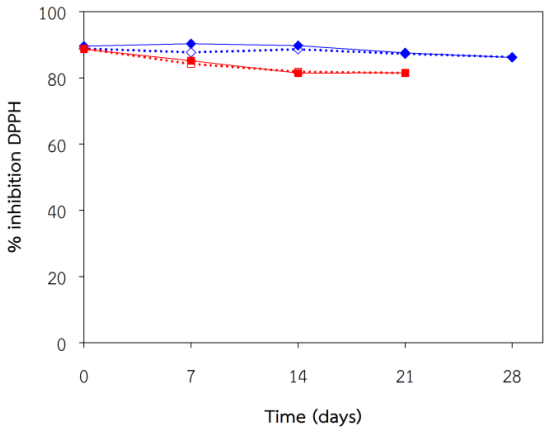
จากการคำนวณค่า ΔH, ΔS และ ΔG ของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการให้ความร้อนด้วยสมการ Eyring-Polanyi model มีค่าเท่ากับ 24.93 (kJ/mol), -235.72 (J/mol·K) และ 107.00 (kJ/mol) ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

เวลาในการให้ความร้อนเพื่อลดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ลง 90% (*D* value ของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ) มีค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 5,035.7 ถึง 2,401.0 นาที เมื่ออุณหภูมิการให้ความร้อนเพิ่มจาก 60 ถึง 90°C ทั้งนี้ค่า *D* value ของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าสูงกว่าค่า *D* value ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีความคงตัวต่อความร้อนมากกว่าแคโรทีนอยด์ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง ซึ่งพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงแม้ว่าแคโรทีนอยด์ทั้งหมดจะลดลง

จากการพล็อตกราฟระหว่างความสัมพันธ์ของ log *D* และ *T* (°C) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของค่า *D* value และอุณหภูมิตามสมการ Ball model พบว่า ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและ *D* value สำหรับการเปลี่ยนแปลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Ball model โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.881 โดยมีค่า *Z* และ D_0 มีค่าเท่ากับ 83°C and 29.2×10^3 นาที ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

3.3 ความคงตัวของคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่ผ่านการพาสเจอไรซ์ในระหว่างการเก็บรักษาอุณหภูมิ 4 และ 30°C ภายใต้สภาวะการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศและแบบบรรยากาศ

จากการทดลองพบว่า พิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่า pH เริ่มต้น และ TSS เริ่มต้น เท่ากับ 4.20±0.01 และ 11.30±0.23°Brix ตามลำดับ ภาพที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษา ผลการทดลองพบว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองทั้งการบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสภาวะสุญญากาศมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา โดยตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่เวลาเริ่มต้น (0 วัน) ภายใต้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C ด้วยการบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 90.00±0.03% และ 89.00±0.04% ตามลำดับ ขณะที่ตัวอย่างที่บรรจุแบบสภาวะสุญญากาศมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 89.00±0.01% และ 89.00±0.01% ตามลำดับ นอกจากนี้ภายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C นาน 21 วัน และ 30°C นาน 28 วัน พบว่า พิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่บรรจุแบบสภาวะบรรยากาศมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 86.00±0.03% และ 82.00±0.00% ตามลำดับ ขณะที่ตัวอย่างที่บรรจุแบบสภาวะสุญญากาศมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 86.00±0.02% และ 81.00±0.06% ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีความคงตัวของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการเก็บรักษาโดยเฉพาะภายใต้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (4°C) อีกทั้งสภาวะการบรรจุไม่มีอิทธิพลต่อการรักษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่าง



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาแบบสภาวะบรรยากาศ (solid line) ที่อุณหภูมิ 4°C (♦) และ 30°C (■) และแบบสภาวะสุญญากาศ (dash line) ที่อุณหภูมิ 4°C (◊) และ 30°C (□) เป็นระยะเวลา 21-28 วัน

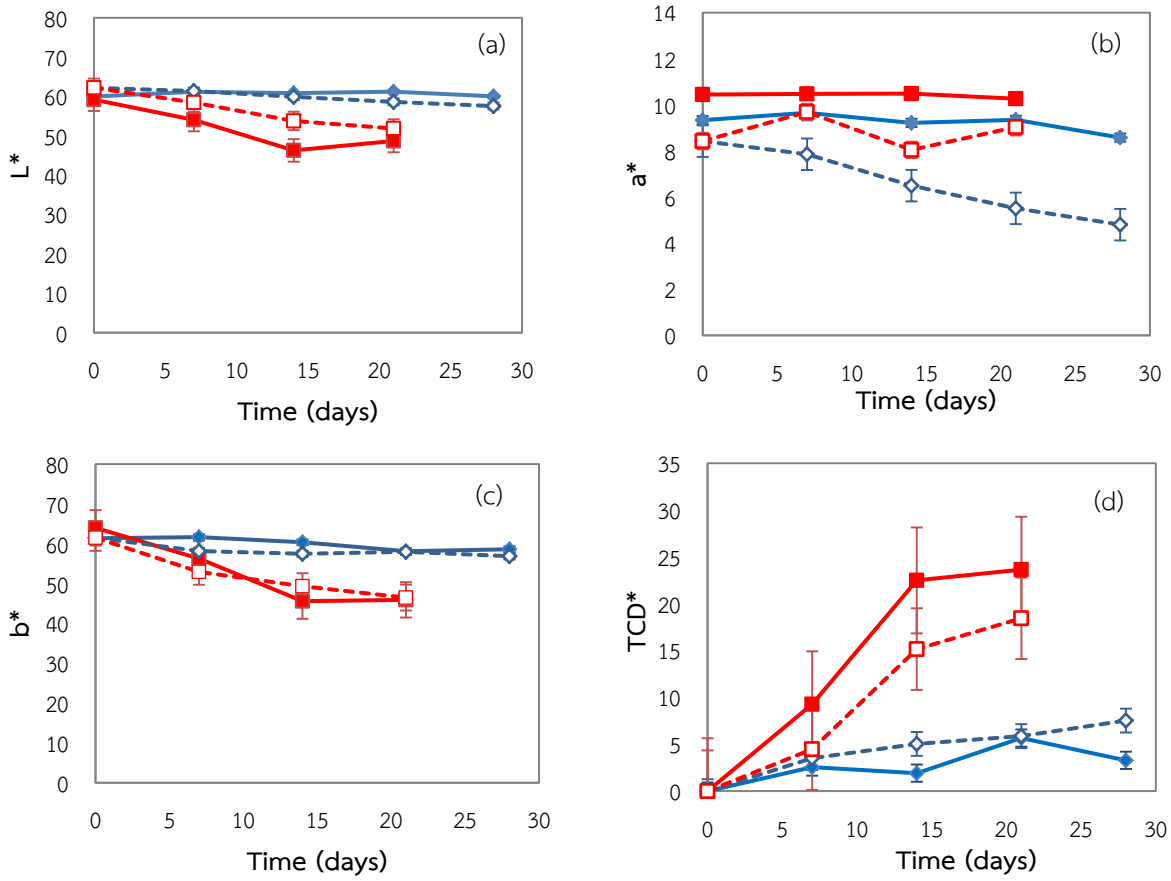
จากการทดลองการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสีในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C (ภาพที่ 7) พบว่า ตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่เวลาเริ่มต้น (0 วัน) ที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C ภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 60.00±1.60 และ

59.22±3.83 ตามลำดับ ขณะที่สภาวะการบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 62.21±0.26 และ 62.21±0.26 ตามลำดับ โดยค่า L* ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C นาน 28 วัน ทั้งการบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสภาวะสุญญากาศมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา ขณะที่ค่า L* ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°C มีแนวโน้มลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 7a) ทั้งนี้ภายใต้การเก็บที่อุณหภูมิ 4°C พบว่า สภาวะการบรรจุไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L* ในระหว่างการเก็บรักษา ขณะที่ภายใต้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°C พบว่า ตัวอย่างที่บรรจุแบบสภาวะบรรยากาศมีการลดลงของค่า L* สูงกว่าการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศ แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 30°C การบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศสามารถป้องกันการลดลงของค่า L* ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองได้ ทั้งนี้ค่า L* เป็นค่าที่แสดง browning index (Ibarz et al., 1999) โดยการลดลงของค่า L* ในพิวเร่อาจเป็นผลมาจากการเกิดสารสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน (N-subtituted glycosylamine) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล (melaniodin) โดยอุณหภูมิสูงจะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลให้ค่า L* ของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่ 30°C มีค่าต่ำกว่า 4°C

ภาพที่ 7b แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า a* ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 21-28 วัน ผลการทดลองพบว่าพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่เวลาเริ่มต้น (0 วัน) ที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C ภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศมีค่าความเป็นสีแดง (+a*) เท่ากับ 9.33±0.79 และ 10.44±0.20 ตามลำดับ ขณะที่การบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศมีค่าความเป็นสีแดง (+a*) เริ่มต้นที่ เท่ากับ 8.43±0.15 และ 8.43±0.15 ตามลำดับ ค่า a* ของตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 28 วัน มีแนวโน้มลดลง โดยภายหลังการเก็บรักษาตัวอย่างมีค่า a* เท่ากับ 8.58±1.58 และ 4.80±1.09 ภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศตามลำดับ ขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°C นาน 21 วัน พบว่า ค่า a* ของตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองทั้งการบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสภาวะสุญญากาศมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งภายหลังการเก็บรักษาตัวอย่างมีค่า a* เท่ากับ 10.27±0.00 และ 9.03±1.09 ตามลำดับ

พิวเร่กล้วยผสมฟักทองเวลาเริ่มต้น (0 วัน) ที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C ภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศมีค่าความเป็นสีเหลือง (+b*) เท่ากับ 61.40±1.10 และ 63.98±2.18 ตามลำดับ ขณะที่การบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าความเป็นสีเหลือง (+b*) เริ่มต้น เท่ากับ 61.49±0.28 และ 61.49±0.28 ตามลำดับ ซึ่งค่า b* ของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 7c) นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้นเป็นผลให้ค่า b* ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศไม่สามารถป้องกันการลดลงของค่า b* ของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศภายใต้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน ทั้งนี้สีของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองอาจเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีที่สว่างกว่า โดยรงควัตถุที่ให้เฉดสีเหลือง-สีส้มในกล้วยและฟักทอง เช่น แค

โรทีนอยด์ สามารถเสื่อมสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเก็บรักษาได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารที่ปราศจากสี (colorless compound) เช่น สารประกอบอีพอกไซด์ ไฮดรอกซิล และการสูญเสียสีเหลืองอาจเป็นผลจากปฏิกิริยา *cis-trans* isomerization ของแคโรทีนอยด์ ทำให้สีเหลืองในตัวอย่างลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (Bonnie & Choo, 1999; Demiray et al., 2013)



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่าสี L* (a), ค่า a* (b) ค่า b* (c) และค่า TCD* (d) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างเก็บรักษาแบบสภาวะบรรยากาศ (solid line) ที่อุณหภูมิ 4°C (♦) และ 30°C (■) และแบบสภาวะสุญญากาศ (dash line) ที่อุณหภูมิ 4°C (◊) และ 30°C (□) เป็นระยะเวลา 21-28 วัน

เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (TCD* หรือ ΔE) ซึ่งเป็นค่าความเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 7d) พบว่า พิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่า TCD* เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเก็บรักษาสูงขึ้น โดยเฉพาะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°C ซึ่งตัวอย่างมีค่า TCD* เพิ่มขึ้นสูงสุดจาก 0 ถึง 23.64 และ 18.45 ภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับระหว่างการเก็บรักษานาน 21 วัน ขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C ตัวอย่างมีค่า TCD*เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 3.29 และ 7.53 ภายใต้การบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับในระหว่างการเก็บรักษานาน 28 วัน ซึ่งการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (4°C) มีผลทำให้ตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงค่าสี

ต่ำสุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างมีความคงตัวของสี เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (4°C) และพบว่าการบรรจุแบบสุญญากาศสามารถรักษาความคงตัวของสีของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการบรรจุแบบสภาวะบรรยากาศภายใต้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30°C)

จากการทดลองการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count; TPC) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ 3) พบว่า พิวเร่กล้วยผสมฟักทองทุกตัวอย่างทั้งภายใต้สภาวะการบรรจุแบบบรรยากาศและแบบสุญญากาศมีปรมาณจุลินทรีย์ค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 355 เรื่องอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) โดยกำหนดให้มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 37°C ไม่เกิน 1×10^5 cfu/g

ตารางที่ 3 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 21-28 วัน

สภาวะการบรรจุ	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) (cfu/g)				
		0	7	14	21	28 (วัน)
บรรยากาศ	4	1.75x10	5.50x10	2.50x10	6.00x10	2.75x10
	30	2.75x10	2.30x10	5.25x10	9.00x10	-
สุญญากาศ	4	1.00×10^2	1.05×10^2	13.00x10	1.55×10^2	1.52×10^2
	30	1.00×10^2	1.22×10^2	1.87×10^2	2.32×10^2	-

จากการทดลองการวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ 4) พบว่า พิวเร่กล้วยผสมฟักทองทั้งภายใต้สภาวะการบรรจุแบบบรรยากาศและแบบสุญญากาศมีปริมาณยีสต์และราตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากับ <10 cfu/g โดยปริมาณยีสต์และราทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 355 เรื่องอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) โดยปริมาณยีสต์และราทั้งหมดไม่เกิน 100 ต่ออาหาร 1 กรัม แสดงให้เห็นว่าการแปรรูปโดยการให้ความร้อนระดับพาสเจอไรเซชัน (ที่อุณหภูมิ 72°C นาน 15 นาที) แก่ตัวอย่าง และสภาวะอาหารที่มีความเป็นกรดสูง (pH<4.5) ทำให้ตัวอย่างมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 28 และ 21 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ปริมาณยีสต์และราทั้งหมดในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 21-28 วัน

สภาวะการบรรจุ	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณยีสต์และราทั้งหมด (Total yeast and mold) (cfu/g)				
		0	7	14	21	28 (วัน)
บรรยากาศ	4	<10	<10	<10	<10	<10
	30	<10	<10	<10	<10	-
สุญญากาศ	4	<10	<10	<10	<10	<10
	30	<10	<10	<10	<10	-

ผลการทดลองแนะนำได้ว่า การเก็บรักษาพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่อุณหภูมิ 4°C จะเป็นผลให้ตัวอย่างมีความคงตัวของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ค่าสี (L*, a*, b* และ TCD*) และมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 355 (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) ตลอดอายุการเก็บรักษานาน 28 วัน ทั้งการบรรจุแบบสภาวะการบรรจุแบบบรรยากาศและแบบสุญญากาศ อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่อุณหภูมิ 30°C จะเป็นผลให้ตัวอย่างมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ต่ำกว่า และมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (L*, a*, b* และ TCD*) สูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C แต่ตัวอย่างยังคงมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 355 (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) ตลอดอายุการเก็บรักษานาน 21 วัน โดยการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศจะสามารถรักษาความคงตัวของสีของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 30°C

บทที่ 4
สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิ (60-90°C) ต่อการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และค่าสีในพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการให้ความร้อน ทำให้แคโรทีนอยด์เสื่อมสลายเร็วขึ้น การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C นาน 60 นาที มีผลให้ปริมาณแคโรทีนอยด์คงเหลือในตัวอย่างต่ำที่สุดเท่ากับ 37% อย่างไรก็ตามอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนไม่มีผลต่อเปลี่ยนแปลงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ในพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง และจากการวิเคราะห์ค่าสี พบว่าตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมีค่าความสว่าง (L*) ค่อนข้างคงที่ระหว่างการให้ความร้อน (60-90°C นาน 0-60 นาที) อย่างไรก็ตามตัวอย่างมีความเป็นสีแดง (+a*) มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 90°C นอกจากนี้ตัวอย่างมีความเป็นสีเหลือง (+b*) ลดลงพียงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง

การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพิวเร่กล้วยผสมฟักทองสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ซึ่งอุณหภูมิในการให้ความร้อนมีผลต่อการเร่งอัตราการเสื่อมสลายแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ด้วย Arrhenius, Eyring และ Ball model ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำมาวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนพิวเร่กล้วยผสมฟักทองเพื่อรักษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระให้คงเหลือสูงสุดสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

จากการศึกษาความคงตัวของคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่ผ่านการพาสเจอไรซ์ (72°C นาน 15 วินาที) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30°C นาน 21-28 วัน ภายใต้สภาวะการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศและแบบบรรยากาศ พบว่าการเก็บรักษาพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่อุณหภูมิ 4°C จะเป็นผลให้ตัวอย่างมีความคงตัวของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ค่าสี (L*, a*, b* และ TCD*) และมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 144 (กระทรวงสาธารณสุข, 2535) ตลอดอายุการเก็บรักษานาน 28 วัน ทั้งการบรรจุแบบสภาวะการบรรจุแบบบรรยากาศและแบบสุญญากาศ อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาพิวเร่กล้วยผสมฟักทองที่อุณหภูมิ 30°C จะเป็นผลให้ตัวอย่างมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ต่ำกว่า และมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (L*, a*, b* และ TCD*) สูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C แต่ตัวอย่างยังคงมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 144 (กระทรวงสาธารณสุข, 2535) ตลอดอายุการเก็บรักษานาน 21 วัน โดยการบรรจุแบบสภาวะสุญญากาศจะสามารถรักษาความคงตัวของสีของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 30°C

ข้อเสนอแนะ

ควรประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษาเพื่อเป็นดัชนีชี้วัดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์

ผลผลิต (output)

ผลงานตีพิมพ์บทความวิจัยฉบับสมบูรณ์ในวารสารวิทยาศาสตร์เกษตร (ฉบับพิเศษ) (ศนิ จิระสถิตย์ และ กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์. (2559). จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของสีในกล้วยผสมฟักทองพิวเร่ระหว่างการให้ความร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 47* (2) (พิเศษ), 561-564.

ผลงานตีพิมพ์บทความวิจัยฉบับสมบูรณ์ในวารสารวิทยาศาสตร์เกษตร (ฉบับพิเศษ) (ศนิ จิระสถิตย์ วารีรัตน์ เฟื่องฟู เขมจิรา พุทธรัตน์ และ มณฑิรา นพรัตน์. (2561). ผลของอุณหภูมิและสภาวะการบรรจุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพิวเร่กล้วยผสมฟักทองในระหว่างการเก็บรักษา: สมการทำนายอายุการเก็บรักษา. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 49* (2) (พิเศษ), 61-64.

อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ “International of Food Research Journal” (Jirasatid, S., Chaikham, P. and Nopharatana, M. Thermal degradation kinetics of total carotenoids and antioxidant activity in banana-pumpkin puree using Arrhenius, Eyring-Polanyi and Ball models. *International of Food Research Journal*)

บรรณานุกรม

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 355) พ.ศ. 2556 เรื่อง อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท. (2556, 24 กรกฎาคม). ราชกิจจานุเบกษา. หน้า 88-92.

Ahmed, J., Shivhare, U.S., & Sandhu, K.S. (2002). Thermal degradation kinetics of carotenoids and visual color of papaya puree. *Journal of Food Science*, *67*, 2692-2695.

Ahmed, J., Shivhare, U.S. & Singh, P. (2004). Colour kinetics and rheology of coriander leaf puree and storage characteristics of the paste. *Food Chemistry*, *84*, 605-611.

Aman, R., Schieber, A., & Carle, R. (2005). Effects of heating and illumination on trans-cis isomerization and degradation of β-carotene and lutein in isolated spinach chloroplasts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*, 9512-9518.

Bonnie, T.Y.P. & Choo, Y.M. (1999). Oxidation and thermal degradation of carotenoids. *Journal of Oil Palm Research, 2*, 62-78.

Carvalho, L.M.J., Gomes, P.B., Godoy, R.L.O, Pacheco, S., Monte, P.H.F., Carvalho, J.L.V., Nutti, M.R., Neves, A.C.L., Vieira, A.C.R.A. & Ramos, S.R.R. (2012). Total carotenoid content, α-carotene and β-carotene, of landrace pumpkins (*Cucurbita moschata* Duch): A preliminary study. *Food Research International*, *47*, 337-340.

Cisse, M., Vaillant, F., Acosta, O., Dhuique-Mayer, C. & Dornier, M. (2009). Thermal degradation kinetics of anthocyanins from blood orange, blackberry, and roselle using the Arrhenius, Erying, and Ball models. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *57*, 6285-6291.

Demiray, E., Tulek, Y. & Yilmaz, Y. (2013). Degradation kinetics of lycopene, β-caratene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *Food Science and Technology*, *50*, 172-176.

Dhuique-Mayer, C., Tbatou, M., Carail, M., Caris-Veyrat, C., Dornier, M. & Amitot, M.J., (2007). Thermal degradation of antioxidant micronutrients in citrus juice: kinetics and newly formed compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *55*, 4209-4216.

Dutta, D., Dutta, A., Raychaudhuri, U., & Chakraborty, R. (2006). Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *Journal of Food Engineering*, *76*, 538-546.

Englberger, L., Darnton-Hill, I., Fitzgerald, M.H. & Marks, G.C. (2003). Carotenoi-rich bananas: A potential food source for alleviating vitamin A deficiency. *Food and Nutrition Bulletin*, *24*, 303-318.

Fratianni, A., Albanese, D., Mignogna, R., Cinquanta, L., Panfili, G., & Matteo, M.D. (2013). Degradation of carotenoids in apricot (*Prunus armeniaca* L.) during drying process. *Plant Foods for Human Nutrition*, *68*, 241-246

Giannakourou, M.C. & Taoukis, P.S. (2003). Kinetics modeling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions. *Food Chemistry*, *83*, 33-41.

Gliemmo M.F., Latorre M.E., Gerschenson, L.N. & Campos, C.A. (2009). Color stability of pumpkin (*Cucurbita moschata*, Duchesne ex Poiret) puree during storage at room temperature: Effect of pH, potassium sorbate, ascorbic acid and packaging material. *Food Science and Technology*, *42*, 196–201.

Horia M. (2006). *Physical chemistry kinetics*. New York: Taylar & Francis Group.

Ibarz, A., Pagan, J. & Garza, S. (1999). Kinetic models for colour changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 39, 415-422.

Jirasatid, S., Nopharatana, M., Kitsubun, P. & Tongta, A. (2013). Degradation kinetics of monacolin K in red yeast rice powder using mutiresponse modeling approach. *Journal of Food Engineering*, *116*, 436-443.

Karagozler, A.A., Erdag, B., Emek, Y.C. & Uygun, D.A. (2008). Antioxidant activity and proline content of leaf extracts from *Dorystoechas hastate*. *Food Chemistry*, 111, 400-407.

Kenchinski, C.P., Guimaraes, P.V.R., Norena, C.P.Z., Tessaro, I.C. & Marczak, L.D.F. (2010). Degradation kinetics of anthocyanin in blueberry juice during thermal treatment. *Journal of Food Science*, *75*, 173-176.

Liaotrakoon, W., Clercq, N.D., Hoed, V.V., Walle, D.V., Lewille, B. & Dewettinck, K. (2013). Impact of thermal treatment on physicochemical, antioxidative and rheological properties of white-flesh and red-flesh dragon fruit (*Hylocereus* spp.) puree. *Food and Bioprocess Technology*, *6*, 416-430.

Martins S.I.F.S. & Van Boekel, M.A.J.S. (2005). A kinetics model for the glucose/glycine Maillard rection pathways. *Food Chemistry*, 90, 257-269.

Marty, C. & Berset, C. (1990). Factors affecting the thermal degradation of all trans-β-carotene. *Journal of agricultural and food chemistry*, *38*, 1063-1067

Ou, H.P., Wang, C.C.R. & Lai, L.S. (2009). Thermal degradation kinetics analysis of monacolin K in *Monascus*-fermented products. *Food Science and Technology*, *42*, 292–296.

Provesi, J.G., Dias, C.O. & Amante, E.R. (2011). Changes in carotenoids during processing and storage of pumpkin puree. *Food Chemistry*, 128, 195-202.

Remini, H., Mertz, C., Belbahi, A., Achir, N., Dornier, M. & Madani, K. (2015). Degradation kinetic modeling of ascorbic acid and colour intensity in pasteurized blood orange juice during storage. *Food Chemistry*, 173, 665-673.

Sun, J., Chu, Y.F., Wu, X. & Liu, R.H. (2002). Antioxidant and antiproliferative activities of common fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *50*, 7449-7454.

Tsen, J.A. & King, V.A.E. (2002). Density of banana puree as a function of soluble solids concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 55, 305-308**.**

Van Boekel, M.A.J.S. (2009). *Kinetic Modeling of Reactions in Foods*. Florida: Taylor and Francis group.

Yousef, A.E. & Carlstrom, C. (2003). *Food Microbiology: A Laboratoru Manual*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

ก-1 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (AOAC, 2000)

นำส่วนใสจากพิวเร่กล้วยผสมฟักทองมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ด้วยเครื่อง Hand Refractometer ที่มีช่วงการวัด 0-32 ºBrix ที่อุณหภูมิห้อง ทำวิธีการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ทำการสอบเทียบเครื่องรีแฟรคโตรมิเตอร์ด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่าที่อ่านได้เท่ากับ 0 ºBrix

ก-2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) (AOAC, 2000)

นำตัวอย่างกล้วยผสมฟักทองพิวเร่มาวัด pH ด้วยเครื่อง pH meter ที่อุณหภูมิห้อง โดยก่อนวัดต้องทำการสอบเทียบเครื่อง pH meter ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 4.0, 7.0 และ10.0

ก-3 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (Carvalho et al., 2012)

1. ชั่งตัวอย่างพิวเร่กล้วยผสมฟักทอง 15 g เติมอะซิโตน 25 ml ใส่ลงใน Bucher flask ขนาด 250 ml กรองผ่าน membrane ขนาด 5 μm ภายใต้สุญญากาศ กรองซ้ำจนกว่าตัวอย่างไม่มีสี
2. นำส่วนที่สกัดได้ ใส่ลงในกรวยแยกขนาด 500 mL เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ 40 ml จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 ml อย่างช้าๆ
3. แยกเอาส่วนน้ำทิ้งไป
4. จากนั้น นำส่วนที่สกัดได้ (สารละลายปิโตรเลียมอีเทอร์) ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml ที่มี anhydrous sodium sulfate 15 g ปรับปริมาตรเป็น 100 ml ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ เขย่าให้เข้ากัน วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 nm คำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (mg/g wet basis) ตามสมการ

$$\text{Total carotenoids (mg/g)} = \frac{\text{A} \times \text{V(ml)} \times 10^4}{A_{1\,cm}^{1\%} \times \text{P (g)} \times 1000}$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง, V คือ ปริมาตรของสารสกัดทั้งหมด (ml), P คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g), $A^{1\%}_{1CM}$ คือ 2592 (สัมประสิทธิ์การสูญเสีย β-carotene ในปิโตรเลียมอีเทอร์

ก-4 วิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Liaotrakoon et al., 2013; Karagozler et al., 2008)

1. วิธีการสกัดสารมีขั้วสามารถทำได้โดย ชั่งตัวอย่างพิวเร่ 20 g ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml เติมอะซิโตน (4°C) ความเข้มข้น 80% ปริมาตร 80 ml ปั่นโดยใช้เครื่องปั่น นาน 10 นาที กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 (Liaotrakoon et al., 2013)

2. ปิเปตสารสกัดตัวอย่าง 3 ml ผสมกับสาร DPPH ที่ละลายในเอทานอลความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 1 ml ใส่ในหลอดทดลอง แล้ว vortex ให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สำหรับตัวอย่าง blank ทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่ปราศจากสารสกัดตัวอย่าง คำนวณฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH หรือ % inhibition ตามสมการ

$$\%\ \text{DPPH radical scavenging activity} = \left(\frac{A_0 - A_1}{A_0}\right) \times 100$$

เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุม, A_1 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

ก-5 วิธีการวัดค่าสีระบบ CIE

ก่อนทำการวัดสีทุกครั้ง ต้องทำการปรับมาตรฐานของเครื่อง (Colorimemter) ด้วยแผ่นสีมาตรฐาน Black glass และ White tile

1. โดยวางแผ่นสีมาตรฐาน Black glass ปิดบน Simple Port แล้วกดปุ่ม ok จากนั้นวางแผ่นสีมาตรฐาน White tile ปิดบน Sample Port แล้วกดปุ่ม ok

2. เมื่อทำการ Standardize เสร็จ ให้ใส่ตัวอย่างอาหารใน Sample cup แล้วเกลี่ยหรือจัดตัวอย่างให้สม่ำเสมอ และให้มีความหนาเพียงพอที่แสงจากเครื่องวัดสีจะไม่ลอดผ่าน

3. วาง Sample cup บน Sample port และปิดด้วยฝาครอบเพื่อป้องกันแสงภายนอกลอดผ่านมารบกวนการวัดค่าสี

4. ทำการวัดสีของตัวอย่างด้วยระบบ CIE ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ซึ่งวัดค่า L* a* และ b* ซึ่งรายงานค่าสีตามความหมายดังนี้

L* คือ ความสว่าง โดยสีดำมีค่าเท่ากับ 0 และสีขาวมีค่าเท่ากับ 100

a* คือ ค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว โดยค่าบวกแสดงความเป็นสีแดง และค่าลบแสดงความเป็นสีเขียว

b* คือ ค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยค่าบวกแสดงความเป็นสีเหลือง และค่าลบแสดงความเป็นสีน้ำเงิน

ก-6 การวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Yousef & Carlstrom, 2003)

1. ปิเปตตัวอย่าง 25 ml ใส่ลงในถุง stomacher

2. เจือจางตัวอย่างให้มีระดับการเจือจางเป็น 10^{-1} ด้วยสารละลายเปปโตน 0.1% ปริมาตร 225 มิลลิลิตร

3. ตีตัวอย่างให้กระจายเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง stomacher นาน 1 นาที

4. เจือจางตัวอย่างให้มีระดับการเจือจางเป็น 10^{-2} ด้วยสารละลายเปปโตน 0.1% ปริมาตร 9 มิลลิลิตร

5. ดูดตัวอย่างที่ระดับการเจือจางที่เหมาะสมปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป Compact dry TC ทำระดับการเจือจางละ 2 ซ้ำ

6. บ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

7. ตรวจนับโคโลนีจุลินทรีย์ทั้งหมดในอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป Compact dry TC ที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ในช่วง 25-250 โคโลนี แล้วหาค่าเฉลี่ยของจานอาหารทั้ง 2 ซ้ำ รายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตร คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด } (\text{cfu/ml}) = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนจุลินทรีย์บนจานอาหารที่ระดับการเจือจางเดียวกัน}}{\text{ระดับการเจือจางนั้น}}$$

ก-7 การวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราทั้งหมด (Yousef & Carlstrom, 2003)

1. ปิเปตตัวอย่างพิวเร่ 25 ml ใส่ลงในถุง stomacher

2. เจือจางตัวอย่างให้มีระดับการเจือจางเป็น 10^{-1} ด้วยสารละลายเปปโตน 0.1% ปริมาตร 225 มิลลิลิตร

3. ตีตัวอย่างให้กระจายเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง stomacher นาน 1 นาที

4. ดูดตัวอย่างที่ระดับการเจือจางที่เหมาะสม ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป Compact dry YM ทำ 2 ซ้ำ

5. บ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 4-5 วัน

6. ตรวจนับโคโลนียีสต์และราในอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป Compact dry YM ที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ในช่วง 25-250 โคโลนี รายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตรตัวอย่าง คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณยีสต์และรา } (\text{cfu/ml}) = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนจุลินทรีย์บนจานอาหารที่ระดับการเจือจางเดียวกัน}}{\text{ระดับการเจือจางนั้น}}$$