



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งในกระบวนการ
ผลิตแโครทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ
โครงการย่อยเรื่อง ผลของวิธีการทำแห้งและการเก็บรักษาต่อสมบัติของ
แโครทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ

โดย ผศ.ดร.พัชรินทร์ ระวียัน

มีนาคม 2551

สัญญาเลขที่ RDG4920053

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งในกระบวนการ
ผลิตแโครทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ
โครงการย่อยเรื่อง ผลของวิธีการทำแห้งและการเก็บรักษาต่อสมบัติของ
แโครทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ

ผู้วิจัย

ผศ. ดร. พชรินทร์ ระวังยัน

สังกัด

คณะอุตสาหกรรมเกษตร มช.

ชุดโครงการปาล์มน้ำมัน

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	๗
สารบัญภาพ	๘
บทสรุปผู้บริหาร	4
บทคัดย่อภาษาไทย	6
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	7
เนื้อหางานวิจัย	8
บทที่ 1 หลักการและเหตุผล	8
บทที่ 2 สาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วัตถุประสงค์และวิธีการศึกษา	31
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์	37
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก	72
ภาคผนวก ข	75
ภาคผนวก ค	82
ภาคผนวก ง	99
ภาคผนวก จ	104

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบแอกติวิตีของวิตามินเอในสารกลุ่มแคโรทีนอยด์	17
2.2 ความสามารถในการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ระดับวอเตอร์แอกติวิตีต่าง ๆ	21
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Sorption isotherms	27
4.1 การคัดเลือกเบื้องต้น แป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์ชนิดละลายในไขมัน	38
4.2 ร้อยละของผลผลิตแคโรทีนอยด์รวมที่ได้กลับคืนมา (% Recovery of Total Carotenoids) เมื่อใช้แป้งชนิดต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับที่อัตราส่วนของแคโรทีนอยด์ รูปละลายในน้ำมันต่อแป้งอัตราส่วนต่าง ๆ	38
4.3 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) และลักษณะปรากฏของแคโรทีนอยด์ชนิดละลาย ในน้ำมันที่ทำให้แห้งโดยใช้แป้งดูดซับชนิดต่าง	39
4.4 การคัดเลือกเบื้องต้น แป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน	41
4.5 คุณภาพทางเคมี และกายภาพของแป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์	41
4.6 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์ที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วน แคโรทีนอยด์อิมัลชันต่าง ๆ	44
4.7 ร้อยละประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ (% Encapsulation Efficiency) ในการดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชันด้วยแป้งชนิดต่าง ๆ	44
4.8 ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ($\mu\text{g/g}$) ในแป้งดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการผลิต แคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ	46
4.9 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของแคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งที่ทำแห้งโดยใช้เครื่อง อบแห้งระบบสุญญากาศ	46
4.10 ร้อยละของผลผลิตแคโรทีนอยด์รวมที่ได้กลับคืนมา (% Recovery of Total Carotenoids) ของแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ	47
4.11 ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ($\mu\text{g/g}$) ในแป้งดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการผลิต แคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ	48
4.12 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของแคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งที่ทำแห้งโดยใช้เครื่อง ไมโครเวฟระบบสุญญากาศ	48
4.13 ร้อยละของผลผลิตแคโรทีนอยด์รวมที่ได้กลับคืนมา (% Recovery of Total Carotenoids) ของแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ทำแห้งโดยใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ	49
4.14 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายตัวในน้ำมันตลอด ระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	51

4.15	ปริมาณยีสต์และราชของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายตัวในน้ำมันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	52
4.16	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	54
4.17	ปริมาณยีสต์และราชของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	54
4.18	การลดลงของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายตัวในน้ำมัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	56
4.19	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายตัวในน้ำมันระหว่างการเก็บรักษา ในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	58
4.20	ปริมาณยีสต์และราชของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายตัวในน้ำมันระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน	58
4.21	การลดลงของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	60
4.22	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	62
4.23	ปริมาณยีสต์และราชของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	63
ง.1	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ % Total Carotenoids Recovery ในการผลิตแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายตัวในน้ำมัน	100
ง.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Total Carotenoids และค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ในการผลิตแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันโดยใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ	100
ง.3	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Total Carotenoids และค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ในการผลิตแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ	101

ง.4	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Total Carotenoids ในการผลิต แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน เก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	101
ง.5	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Total Carotenoids ในการผลิต แคโรทีนอยด์แห่งรูปอิมัลชัน เก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 6 เดือน	102
ง.6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Total Carotenoids ในการผลิต แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	102
ง.7	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Total Carotenoids ในการผลิต แคโรทีนอยด์แห่งรูปอิมัลชัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	103

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 การเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบของสารภายในสนามแม่เหล็ก	24
2.2 Moisture Sorption isotherm	26
2.3 ค่า a_w กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เอนไซม์และจุลินทรีย์ภายในอาหาร	29
4.1 ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อค่า L ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน	42
4.2 ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อค่า a^* ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน	42
4.3 ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อค่า b^* ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน	43
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปริมาณสารระเหย กับอัตราส่วนอิมัลชัน	43
4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	50
4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	53
4.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือนในสถานะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	55
4.8 Moisture sorption isotherm ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	57
4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือนในสถานะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	60
4.10 Moisture sorption isotherm ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	61
ข.1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเบต้าแคโรทีน (ppm) กับค่า การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร	78
ค. 1 แป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์	83
ค. 2 น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการดีกัมแล้ว (จากซ้ายไปขวา)	83
ค. 3 แคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ	83
ค. 4 แคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบและเตรียมในรูปอิมัลชันร้อยละ 35,40 และ 45 โดยปริมาตร (จากซ้ายไปขวา)	84
ค.5 เครื่องสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ	84

[illegible]

[illegible]

ค.40	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 30 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน	96
ค.41	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 40 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน	96
ค.42	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน	96
ค.43	แคโรทีนอยด์แห่งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 60 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน	97
ค.44	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 70 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน	97
ค.45	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 80 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน	97
ค.46	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 90 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา)เป็นเวลา 3 เดือน	98
ค.47	แคโรทีนอยด์แห่งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ก่อนการเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังการเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 6เดือน	98
ค.48	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ก่อนการเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังการเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 6 เดือน	98

สัญญาเลขที่ RDG4920053

โครงการ “การลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตแคโรทีนอยด์
จากน้ำมันปาล์มดิบ”

โครงการย่อยเรื่อง ผลของวิธีการทำแห้งและการเก็บรักษาต่อสมบัติของแคโรทีนอยด์จาก
น้ำมันปาล์มดิบ

สรุปรายงานฉบับสมบูรณ์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2549 ถึงวันที่ 29 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน: ผศ. ดร. พชรินทร์ ระวังียน

หน่วยงาน: ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถานที่ใช้ทำการวิจัยและรวบรวมข้อมูล (Location)

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย (Duration)

ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 1 ปี 6 เดือน

- เริ่มต้นจากเดือน กันยายน 2549 ถึง สิงหาคม 2550

ได้รับการขยายเวลาถึง 29 กุมภาพันธ์ 2551

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาชนิดของแปรงดูดซับ และอัตราส่วนของแปรงต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ ที่เหมาะสมในการผลิตแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชัน
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน โดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศและเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
3. เพื่อศึกษาคุณภาพทางเคมี และจุลชีววิทยา ของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน และในรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา 6 เดือน
4. เพื่อศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับต่าง ๆ ต่อคุณภาพทางเคมี และจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชัน ระหว่างเก็บรักษา 3 เดือน

หมายเหตุ วัตถุประสงค์ข้อ 4 ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากที่เสนอในโครงร่างงานวิจัย เพื่อให้งาน
วิจัยสมบูรณ์ขึ้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มชนิดละลายในน้ำมัน และในรูปอิมัลชันของแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ ทราบถึงความคงตัวของแคโรทีนอยด์แห้ง ระหว่างการเก็บรักษา ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการผลิตแคโรทีนอยด์ผงในเชิงพาณิชย์ต่อไป

กิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง	ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับน้ำมันปาล์มดิบ การสกัดแคโรทีนอยด์ และเตรียมแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน	ปฏิบัติตามกิจกรรมตามที่วางแผนไว้	ได้ข้อมูลพื้นฐานในการทำงานวิจัย
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน	ศึกษาปริมาณ แคโรทีนอยด์ที่เหมาะสมและศึกษาชนิดแป้งดูดซับที่แตกต่างกัน 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 3 ระดับ	ปฏิบัติตามกิจกรรมตามที่วางแผนไว้	ได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์รูปอิมัลชัน	ศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ใช้และชนิดแป้งดูดซับแตกต่างกัน 3 ระดับรวมถึงวิธีการทำแห้งที่เหมาะสม	ปฏิบัติตามกิจกรรมตามที่วางแผนไว้	ได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์รูปอิมัลชัน
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษา 6 เดือน	ศึกษาคุณภาพทางเคมี และจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษา 6 เดือน	ปฏิบัติตามกิจกรรมตามที่วางแผนไว้	ทราบการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งระหว่างเก็บรักษา 6 เดือน
5. ศึกษาผลของความสัมพันธ์ที่ระดับต่างๆ	ศึกษาคุณภาพทางเคมี และจุลชีววิทยา ของผลิตภัณฑ์	กิจกรรมนี้ได้ปฏิบัติเพิ่มเติมจากที่เสนอใน	ทราบการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์

ต่อการเปลี่ยนแปลงของ แคโรทีนอยด์แห่งรูป ละลายในน้ำมันและใน รูปอิมัลชันระหว่างเก็บ รักษา 3 เดือน	แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลาย ในน้ำมันและในรูปอิมัลชัน ที่ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่ระดับ ต่าง ๆ ระหว่างเก็บรักษา 3 เดือน	proposal เพื่อให้งานวิจัย สมบูรณ์ขึ้น	แคโรทีนอยด์แห่งที่ความ เข้มข้นสัมพัทธ์ที่ระดับต่าง ๆ ระหว่างเก็บรักษา 3 เดือน
---	---	--	---

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อสกว.

.....

ลงนาม.....

(ผศ. ดร. พชรินทร์ ระวัง)

วันที่.....

บทสรุปผู้บริหาร

งานวิจัยเรื่อง ผลของวิธีการทำแห้งและการเก็บรักษาต่อสมบัติของแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อ (1) ศึกษาการทำแห้งผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบรูปละลายในน้ำมัน และในรูปอิมัลชัน (2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษา และ (3) ศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชัน ซึ่งผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

การทำแห้งแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน ได้ทำการศึกษาโดยใช้แปรงดูดซับ 3 ชนิด คือ แปรงข้าวเหนียว แปรงข้าวเจ้า แปรงมันสำปะหลัง พบว่าสถานะที่เหมาะสมคือ การใช้แปรงข้าวเหนียวเป็นตัวดูดซับ ที่อัตราส่วนแคโรทีนอยด์ต่อแป้ง 4.0:10 โดยน้ำหนัก ซึ่งแคโรทีนอยด์จะถูกดูดซับไว้ได้ 97.44% ของน้ำหนักแคโรทีนอยด์เริ่มต้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงมีสีส้มเหลือง และมีค่า $a_w = 0.41$ ซึ่งเป็นค่า a_w ที่ต่ำมากพอที่จะป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงไม่ต้องนำผลิตภัณฑ์ไปอบแห้งต่อ

จากการศึกษาการทำแห้งแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน ได้ทำการศึกษาโดยใช้แปรงดูดซับ 3 ชนิด คือ แปรงข้าวเหนียว แปรงข้าวเจ้า แปรงถั่วเขียว พบว่า แปรงที่เหมาะสม คือ แปรงถั่วเขียวโดยใช้อัตราส่วนแป้งต่อแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 2:1 โดยน้ำหนัก ใช้สัดส่วนอิมัลชัน 40 % โดยปริมาตร แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังไม่แห้ง ต้องทำการอบแห้งต่อ โดยได้เปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศและเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ พบว่าสถานะที่เหมาะสม คือ การอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ที่กำลังวัตต์ 720 เป็นเวลา 15 นาที ($p \leq 0.05$) ได้แคโรทีนอยด์คงเหลือหลังการอบแห้ง 75.00 % ของน้ำหนักแคโรทีนอยด์เริ่มต้นก่อนการดูดซับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นอนุภาคนาขนาดเล็กและมีสีเหลืองส้ม มีค่า $a_w = 0.52$

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน พบว่า ในช่วง 3 เดือนแรก ปริมาณบิตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากนั้นปริมาณบิตาแคโรทีนลดลงเล็กน้อยจนถึงเดือนที่ 6 ($p > 0.05$) ซึ่งที่เวลาการเก็บนาน 6 เดือน บิตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์ในรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชันยังมีบิตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์เหลืออยู่ 83.02 และ 78.19 % ตามลำดับ และพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา ไม่เกินค่ามาตรฐานของอาหารแห้ง

จากการศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชัน โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 23 – 80 % ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าปริมาณบิตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์มี

แนวโน้มน้ลดลงอย่างต่อเนื่อง และอัตราการลดลงเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 80 % ยังพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่เพื่อให้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูป ละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชัน ได้นานขึ้นควรเก็บในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ ต่ำกว่า 54.70 และ 60.13 % ตามลำดับ

บทคัดย่อ

การทำแห้งแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดละลายในน้ำมัน ศึกษาโดยใช้แปรงดูดซับ คือ แปรงข้าวเจ้า แปรงข้าวเหนียว และแปรงมันสำปะหลัง พบว่า สภาพที่เหมาะสม คือ การใช้แปรงข้าวเหนียว ที่อัตราส่วนแป้งต่อแคโรทีนอยด์เป็น 10:4 โดยน้ำหนัก โดยแปรงข้าวเหนียวสามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ 97.44 % มีค่า $a_w = 0.41$ ส่วนการทำแห้งแคโรทีนอยด์ชนิดอิมัลชัน ศึกษาโดยใช้แปรงข้าวเจ้า แปรงข้าวเหนียว และแปรงถั่วเขียว เป็นตัวดูดซับ ร่วมกับการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศ หรือ เครื่องไมโครเวฟสุญญากาศ พบว่า สภาพที่เหมาะสม คือ การใช้ อัตราส่วนแป้งถั่วเขียวต่อแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 2:1 โดยน้ำหนัก และใช้ไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ที่กำลัง 720 วัตต์ นาน 15 นาที ซึ่งหลังการอบแห้งแป้งถั่วเขียวสามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ 75.00 % และ มีค่า $a_w = 0.52$

การเก็บแคโรทีนอยด์ผงในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ ที่ 30 °C นาน 6 เดือน พบว่า บิดาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน และรูปอิมัลชัน มีปริมาณลดลง 23.55% และ 9.85 % ตามลำดับ ส่วนการเก็บแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน และรูปอิมัลชัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 23 -80 % ที่ 30 °C นาน 3 เดือน พบว่า การลดลงของบิดาแคโรทีนเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) การเก็บแคโรทีนอยด์แห้งในรูปน้ำมันและรูปอิมัลชัน ควรเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ ไม่เกิน 54.70 % และ 60.13 % ตามลำดับ ตัวอย่างที่ศึกษาทั้งหมดมีจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ตามเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้ง

ABSTRACT

Drying of oil soluble carotenoids extracted from crude palm oil was carried out by adsorption of carotenoids extract on non-sticky rice, sticky rice and tapioca flours. The optimum condition was using sticky rice flour at the weight ratio of flour to carotenoids of 10:4 in which the maximum carotenoids retention of 97.44 % and the a_w of 0.41 was obtained. Drying of carotenoid emulsion was studied by adsorption on non-sticky rice, sticky rice and mungbean flours, followed by drying with vacuum dryer or microwave-vacuum dryer. The optimum condition was using the weight ratio of mungbean flour to carotenoids emulsion of 2:1 with microwave-vacuum drying at 720 W for 15 minutes. The carotenoids recovery and a_w were 75.00 % and 0.52, respectively.

Storage the dried powders of oil soluble carotenoids and carotenoids emulsion in aluminum foil bag at 30 °C for 6 months resulted in decreasing of beta-carotene by 7.55 and 11.43 %, respectively. While storage at 23 – 80 % relative humidity (RH) and at 30°C for 3 months showed grater decreasing of beta-carotene at higher RH ($p \leq 0.05$). To extend the shelf-life, the powders of oil soluble carotenoids and carotenoids emulsion should be kept at RH less than 54.70 and 60.13 %, respectively. All samples of dried carotenoids had total microorganisms, mould and yeast counts within the standard levels for dried food.

บทที่ 1

หลักการและเหตุผล

ปาล์มน้ำมัน (oil palm) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* อยู่ในวงศ์ *Plamae* จัดเป็นพืชที่ให้น้ำมันชนิดหนึ่งที่พบมากในจังหวัดแถบภาคใต้ของประเทศ ได้แก่ จังหวัดสุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และกระบี่ เป็นต้น โดยสายพันธุ์เทเนอรา (tenera) เป็นสายพันธุ์ที่มีการปลูกมาก (ปัญญา และ คณะ, 2535) จากผลสำรวจการใช้ พบว่า น้ำมันปาล์มมีส่วนแบ่งในตลาดน้ำมันบริโภคประมาณ 70% ของน้ำมันพืชทั้งหมด โดยมีความต้องการบริโภคน้ำมันปาล์มภายในประเทศประมาณ 8-9 แสนตันต่อปี ส่วนการส่งออกมีน้อยมากเนื่องจากมีคู่แข่งที่สำคัญ คือ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ซึ่งมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่ามาก (อรชุน, 2539)

จากการที่มีการประเศไทยมีผลผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่สูง การสกัดสารแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์ม เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารคนและสัตว์ เป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำมันปาล์มอย่างมาก และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้ราคาน้ำมันปาล์มดิบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สารสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มยังมีสารสำคัญคือ บีตาแคโรทีน ซึ่งเป็นโปรวิตามินเอ ซึ่งเมื่อเข้าสู่ร่างกายมนุษย์แล้วจะสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปวิตามินเอได้ จึงเป็นการเพิ่มปริมาณวิตามินเอให้กับผู้บริโภค ซึ่งขณะนี้พบว่า การขาดวิตามินเอเป็นปัญหาสำคัญกับเด็กไทย (แสงโสม, 2548) เพราะการเสริมวิตามินเอในอาหารยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากประเทศไทยต้องนำเข้าวิตามินเอจากต่างประเทศด้วยราคาที่สูง การเสริมแคโรทีนอยด์ในอาหารปกติของไก่ นอกจากจะช่วยเสริมคุณค่าทางอาหารของไก่แล้ว ยังทำให้สีส้มของไข่ไก่เข้มขึ้น ซึ่งเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค (Na et al., 2004)

แคโรทีนอยด์มีการผลิตออกมาในหลายรูปแบบ เช่น ในรูปที่ละลายในน้ำมัน ในรูปคอลลอยด์ ในรูปอิมัลชัน และในรูปผง เป็นต้น โดยพบว่าแคโรทีนอยด์ในรูปผงเป็นรูปที่สะดวกต่อการใช้งาน และสามารถเก็บรักษาได้ง่าย ได้มีการศึกษาการทำแห้งเซลล์ยีสต์ *Rhodotorula glutinis* ที่ผลิตบีตาแคโรทีนได้ พบว่า การใช้เครื่องอบแห้งระบบแบบพ่นฝอย สามารถให้ผลผลิตบีตาแคโรทีนที่มีความเข้มข้นสูงออกมา (Bhosale et al., 2003) หรือการทำแห้งแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำ แครอทด้วยระบบแช่เยือกแข็ง (Tang & chen., 2000) ซึ่งจะเห็นว่าการอบแห้งทั้งสองวิธีมีข้อจำกัด คือเป็นเทคนิคในการทำผงซึ่งใช้ค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาสูงและมีการใช้งานในวงแคบ

การทำแห้งโดยใช้ระบบสุญญากาศ มีการทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งทำให้แห้งได้ ที่อุณหภูมิต่ำ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่จะสูญเสียได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อน (Regier et al., 2005) ส่วนการทำแห้งด้วยไมโครเวฟระบบสุญญากาศ มีการให้ความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจาก ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้อย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ สามารถใช้

พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นระบบที่มีออกซิเจนต่ำจึงช่วยลดการสูญเสีย เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Cui *et al.*, 2004)

ปัจจุบันยังไม่มีรายงานการประยุกต์ใช้เตาอบแบบสุญญากาศ และเตาอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศในการทำแห้งแคโรทีนอยด์ วิธีการในการทำแห้งทั้งสองวิธีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการทำแห้งของผลผลิตทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ศึกษาการทำแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบให้แห้งโดยใช้เตาอบแบบสุญญากาศและเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศเพื่อให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำแห้งแคโรทีนอยด์

บทที่ 2

สาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปาล์มน้ำมัน (Oil palm)

ปาล์มน้ำมันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Elaeis guineensis* เป็นพืชที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน พบว่าการปลูกอย่างแพร่หลายในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และทวีปแอฟริกา บริเวณแนวเส้นศูนย์สูตร จากการที่ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชให้น้ำมันชนิดอื่น อีกทั้งน้ำมันที่ได้ยังมีความเสถียรสูง และราคาถูกอีกด้วย ทำให้มีการนำเอาน้ำมันปาล์มไปใช้ทั้งด้านการอุปโภคและบริโภคอย่างกว้างขวาง และจากการสำรวจพบว่าการใช้น้ำมันปาล์มในการบริโภคในปริมาณมากเป็นอันดับสองของโลก รองจากน้ำมันถั่วเหลือง (Sambanthamurthi *et al.*, 2000)

ปาล์มน้ำมันจัดว่าเป็นพืชที่สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น นำไปสกัดเอาน้ำมันปาล์มมาใช้ในการบริโภคและเป็นส่วนประกอบในอาหารชนิดต่าง ๆ เส้นใยที่สามารถนำมาทำเป็นกระดาษ ส่วนกากที่เหลือนำไปทำเป็นเชื้อเพลิง ในแถบแอฟริกาจะพบมีการนำส่วนลำต้นและก้านใบของต้นปาล์ม ทำเป็น ไม้กวาด ไม้เท้า และเชือก ในประเทศบราซิลและแอฟริกันั้นมีการนำน้ำหวานจากต้นปาล์มไปทำเป็นไวน์และน้ำตาล (พนัส, 2551) หลังจากสกัดเอาน้ำมันออกแล้วกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม และกากเยื่อใยปาล์มถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์จำพวกโค กระบือและแพะ นอกจากนี้ยังพบว่าปาล์มน้ำมันสามารถนำไปใช้ในการเพาะเห็ด และใช้เป็นอาหารในการเลี้ยงโปรตีนเซลล์เดียวได้อีกด้วย (Corley and Tinker, 2003)

สำหรับประเทศไทย พบว่าปาล์มน้ำมันมีการปลูกอยู่ทั่วไปในประเทศ โดยมีพื้นที่ปลูกที่ให้ผลผลิตทั่วประเทศ 1.3-1.6 ล้านไร่ ส่วนใหญ่พบในภาคใต้ของประเทศ 14 จังหวัดและ 2 จังหวัดทางภาคตะวันออก โดยแหล่งปลูกที่สำคัญ คือจังหวัด กระบี่ สุราษฎร์ธานีและชุมพร ตามลำดับ และจากแนวทางการพัฒนาปาล์มน้ำมันตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 8 โดยสำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยางได้มีโครงการลดพื้นที่ในการปลูกสวนยางลงแล้วให้เกษตรกรหันมาปลูกปาล์มน้ำมันทดแทน ทำให้จากการประมาณการผลผลิตปาล์มน้ำมันในประเทศไทยช่วงปี 2546-2570 คาดว่าผลผลิตน่าจะเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 5 ต่อปี (จินดา, 2548)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในน้ำมันปาล์มดิบ มีส่วนประกอบของสารสำคัญอยู่หลายชนิด เช่น อัลฟาแคโรทีน (α -carotene) บีตาแคโรทีน (β -carotene) ไลโคพีน (lycopene) และไฟโทอิน (phytoene) เป็นต้น แต่ที่มีปริมาณสูงและได้รับความนิยมที่สุด คือ สารประกอบแคโรทีนอยด์ซึ่งมีความสามารถในการต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน โดยพบว่าปริมาณอัลฟาแคโรทีน และ บีตาแคโรทีน มีปริมาณมากกว่า 90 % ของปริมาณสารประกอบแคโรทีนอยด์ทั้งหมดใน

น้ำมันปาล์ม เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตปาล์มน้ำมันการสกัดเอาสารประกอบแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบก็ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ในปัจจุบันพบว่าเริ่มมีการนำเอาสารสกัดแคโรทีนอยด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้เป็นสารให้สีจากธรรมชาติหรือใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารเสริมเพื่อช่วยบำรุงสุขภาพ (Mortensen, 2005) บีตาแคโรทีนเป็นสารตั้งต้นที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นวิตามินเอหรือที่เรียกว่า โปรวิตามินเอ ดังนั้นเมื่อเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ บีตาแคโรทีนจึงมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของประสาทตาที่ใช้ในการมองเห็น ระบบสืบพันธุ์ การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม ตลอดจนซ่อมแซมเซลล์ที่สึกหรอและช่วยในการเจริญเติบโต ทำให้ระบบดังกล่าวสามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติเช่นเดียวกับการได้รับวิตามินเอโดยตรง (Gireesh *et al.*, 2004)

จากความน่าสนใจในปริมาณแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มนี้เอง จึงได้มีการศึกษาสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวทำละลายเฮกเซนที่อุณหภูมิต่ำ เริ่มจากนำน้ำมันปาล์มดิบที่ไม่ผ่านการตกตะกอน ไปให้ความร้อนที่ 70 - 90 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดกัมและโลหะหนัก ทำการกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเติมสารละลายผสมระหว่างกรดซิตริกเข้มข้น 20 % และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 75% เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งไว้จนอุณหภูมิลดต่ำประมาณ 50 - 60 องศาเซลเซียส ทำการกรองด้วยกระดาษกรองด้วยระบบสุญญากาศ หลังจากนั้นนำไปผสมกับ เฮกเซนอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที แล้วทำการกรองแยกส่วนที่ไม่ละลายออกด้วยระบบสุญญากาศ และทำการระเหยเพื่อแยกตัวทำละลายเฮกเซนออก และจากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาซาปอนนิฟิเคชัน (Saponification reaction) แยกเอาสบู่และแคโรทีนอยด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาซาปอนนิฟิเคชันออก แล้วระเหยเฮกเซนออกอีกครั้ง จะได้แคโรทีนอยด์เข้มข้น (พัชรินทร์ และคณะ, 2548)

สำหรับความคงตัวของบีตาแคโรทีนและสารประกอบแคโรทีนอยด์ชนิดอื่น ๆ พบว่า เมื่ออยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสม เช่นเมื่อได้รับแสง อุณหภูมิสูง สัมผัสกับอากาศและโอโซน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ทำให้สูญเสียสมบัติในการเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันรวมถึงสูญเสียสมบัติการเป็นโปรวิตามินเอของบีตาแคโรทีนด้วย จากเหตุผลนี้เองจึงมีการนำเอาวิธีการมาประยุกต์ใช้ในดินชาด (annatto) โดยนำเอาอัลฟาไซโคลเดกทรีน (α -cyclodextrin) มาใช้ในการจับกับแคโรทีนอยด์ในรูปเอสเทอร์ที่ละลายน้ำได้หรือที่เรียกว่าไบซิน (bixin) เพื่อที่จะเพิ่มความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Lyang *et al.*, 2005) นอกจากนี้จะเห็นว่าที่นิยมใช้กันในการเพิ่มความเสถียรให้กับบีตาแคโรทีนที่สกัดจากน้ำแครอท คือ การทำไมโครเอนแคปซูเลชัน (micro encapsulation) ภายในเจลาติน หรือการดูดซับไว้ในแป้ง ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปผงที่ละลายน้ำได้ (water-dispersible powder) เพื่อเพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนผง (Thurmann *et al.*, 2002)

จากการที่ผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน ทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีหลายรูปแบบ เช่น ในรูปผง รูปละลายในน้ำมัน และในรูปอิมัลชัน เป็นต้น โดยแคโรทีนอยด์ในรูปผง สามารถเก็บรักษาได้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน

เนื่องจากเหตุผลนี้เองการศึกษานี้จึงได้ทำการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบก่อนนำไปทำให้แห้งเพื่อจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายในรูปผงออกมา สำหรับวิธีการอบแห้งนั้นมีอยู่หลายวิธี แต่จุดประสงค์นั้นเหมือนกันคือ ต้องการกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากผลิตภัณฑ์รูปของแข็ง กึ่งแข็ง และของเหลว โดยทั่วไปวิธีการแบบดั้งเดิมจะใช้อากาศร้อนในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อระเหยเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งเป็นการลดปริมาณน้ำอิสระในอาหารลง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น (Mujumdar and Suvachittanont, 2000) ปัจจุบันในการทำให้อยู่ในรูปผงพบว่าสามารถทำได้ด้วยเครื่องอบแห้งระบบสเปรย์ ในการทำแห้งเซลล์ยีสต์ *Rhodotorula glutinis* ซึ่งจะได้ผงของบีตาแคโรทีนที่มีความเข้มข้นสูงออกมา (Bhosale *et al.*, 2003) หรือการทำแห้งแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำแครอทด้วยระบบแช่เยือกแข็ง (Tang & chen., 2000) ซึ่งจะเห็นว่าการอบแห้งทั้งสองวิธีมีข้อเสียคือ เป็นเทคนิคในการทำผงซึ่งใช้ค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาสูงและมีการใช้งานในวงแคบ

2.2 สารแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นสารที่สะสมอยู่ในคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) ถือเป็นรงควัตถุในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) ของพืช ในธรรมชาติจะพบว่าแคโรทีนอยด์จะอยู่ร่วมกับคลอโรฟิลล์เพื่อเพิ่มความเสถียร (Bauernfeind, 1981) ในรูป pigment-protein complex ภายในคลอโรพลาสต์ โดย เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ 40 อะตอม สูตรโครงสร้างพื้นฐานของแคโรทีนอยด์ จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มเทอร์พีน (terpene group) เกิดจากหมู่ไอโซพรีน 8 หน่วย ซึ่งเป็นสารประกอบอัลคีน (alkene) ที่มีพันธะคู่จำนวนมาก (polyene) ในโมเลกุลมาเรียงต่อกันเป็นสายยาว มีลักษณะที่สำคัญ คือ 2 พันธะคู่จะถูกแบ่งโดยพันธะเดี่ยว และมีการเชื่อมต่อกับหมู่เมทิล โดยการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไอโซพรีนในโครงสร้างโมเลกุลมี 2 แบบ คือ แบบหัวโมเลกุลต่อท้ายโมเลกุล (head to tail) และท้ายโมเลกุลต่อท้ายโมเลกุล (tail to tail) ซึ่งการเชื่อมต่อนี้ระหว่างหมู่ไอโซพรีนของแบบที่ 2 จะพบที่บริเวณส่วนกลางของโมเลกุลโมเลกุลแคโรทีนอยด์ (Gross, 1987)

นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ยังประกอบด้วยวงแหวนที่มีคาร์บอนอยู่ 5 อะตอม หรือ 6 อะตอม (ส่วนใหญ่พบ 6 อะตอม) เป็นแบบวงแหวน (cyclic) โดยต่ออยู่ที่ปลายของโครงสร้างด้านใดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น บีตาแคโรทีน อัลฟาแคโรทีน ไวโอเลทริน (violerythrin) และอาจมีอนุพันธ์อื่น ๆ ที่มีออกซิเจน

อะตอมมาเกาะอยู่ด้วย ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) คีโต (keto) อีพอกซี (epoxy) เมทอกซี (methoxy) หรือหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic group) เช่น ในลูเทอิน (lutein) เป็นต้น (Britton, 1995)

ลักษณะการเชื่อมต่อกันของหมู่ไอโซพรีน ทำให้เกิดการสมมาตรของโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ และพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลเกิดการหมุน หรือเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะ (rotation) ในโครงสร้างได้ (Handelman, 1996) ทำให้สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (geometric) ได้หลายไอโซเมอร์ (isomer) คือ Z-E isomer โดย Z isomer ทั้งในรูปแบบ cis form และ trans form จะมีความคงตัวสูง เช่น บีตาแคโรทีน ในธรรมชาติจะพบรูปแบบ trans ประมาณร้อยละ 90

2.2.1 การจำแนกสารกลุ่มแคโรทีนอยด์

สารกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถแบ่งตามโครงสร้างทางเคมี ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ (Goodwin, 1980) ดังนี้

กลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน (Hydrocarbon carotene) เป็นกลุ่มที่โครงสร้างภายในโมเลกุลของแคโรทีนประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมและไฮโดรเจนอะตอมเท่านั้น เช่น บีตาแคโรทีน ลูเทอิน และไลโคพีน เป็นต้น

กลุ่มออกซิเจนเตดแซนโทฟิลล์ (Oxygenated xanthophylls) เป็นกลุ่มของสารแคโรทีนอยด์ที่มีหมู่อนุพันธ์ที่ประกอบด้วยออกซิเจนอะตอมอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล ได้แก่ แซนโทฟิลล์ เช่น ซีแซนทีน (zeaxanthin) ที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของไฮดรอกซิล และสไปลิลโลแซนทีน (spilloxanthin) เป็นต้น

นอกจากลักษณะโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ทั้ง 2 กลุ่มจะแตกต่างกันแล้ว จะเห็นได้ว่ากลุ่มออกซิเจนเตดแซนโทฟิลล์มีความเป็นขั้ว (polar) มากกว่ากลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน จากคุณสมบัตินี้จึงใช้ตัวละลายในการแยกสารแคโรทีนอยด์ทั้ง 2 กลุ่มออกจากกัน

2.3 ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีน

บีตาแคโรทีน ถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหลายรูปแบบเพื่อสนองความต้องการของผู้บริโภค ที่ต้องการทดแทนสารอาหารที่ขาดไปโดยการใช้สารบีตาแคโรทีนในการเสริมให้สุขภาพร่างกายให้สมบูรณ์แข็งแรง ในปัจจุบันมีการผลิตแคโรทีนอยด์ให้เหมาะต่อการใช้งานไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรมอาหารหรือยาโดย มีรูปแบบหลัก อยู่ 3 แบบดังนี้ (BASF, 2001)

2.3.1 บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปน้ำมัน

บีตาแคโรทีนในน้ำมัน (Betacarotene in vegetable oils) คือ ผลิตภัณฑ์ของบีตาแคโรทีนที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมันซึ่งปกติเป็นน้ำมันพืช มีการเติมสารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer) หรืออาจไม่เติมก็ได้ การบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ก่อนปิดผนึกจะต้องมีการแทนที่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนในรูปของน้ำมันโดยทั่วไป มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลแดง จนถึงสีน้ำตาลเข้ม สามารถละลายได้เฉพาะในน้ำมันเท่านั้น การเก็บรักษาควรเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดหรือบริเวณที่ไม่ได้รับแสงแดด ซึ่งจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้ 12 - 36 เดือน ขึ้นกับชนิดของน้ำมันพืช บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปน้ำมันส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจำพวกที่มีส่วนประกอบของไขมัน หรือน้ำมัน โดยใช้เป็นสารให้สีเหลืองหรือส้ม ผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ มาร์การีน (margarine) ชีส (cheese) ไอศกรีม (ice cream) ซุป (soup) และในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

2.3.2 บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปอิมัลชัน

บีตาแคโรทีนในรูปอิมัลชัน (Betacarotene emulsion) คือ ผลิตภัณฑ์ของบีตาแคโรทีนที่ผ่านกระบวนการอิมัลซิฟิเคชัน (Emulsification) ซึ่งจะเริ่มจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) เช่น ลงในบีตาแคโรทีนที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมัน จากนั้นเติมตัวทำละลายลงไปในสภาวะดังกล่าวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ สุดท้ายจะเติมสารเพิ่มความคงตัว แล้วบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ โดยก่อนปิดผนึกจะต้องมีการแทนที่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนในรูปอิมัลชันโดยทั่วไป มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาล สามารถละลายในน้ำมันและกระจายตัวในน้ำได้ การเก็บรักษาควรเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส ในที่มีดหรือบริเวณที่ไม่ได้รับแสงแดด ซึ่งจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้ 12 เดือน ในปัจจุบันถูกใช้เป็นสารให้สีเหลือง ส้ม ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มจำพวกน้ำผลไม้ (fruit juice beverage) น้ำมะนาวอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbonated lemonades) และในอาหารที่มีส่วนประกอบของน้ำผลไม้เข้มข้น (fruit juice concentrate)

2.3.3 บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปผง

บีตาแคโรทีนในรูปผง (Beta-carotene powder) คือ ผลิตภัณฑ์ของบีตาแคโรทีนที่ผ่านกระบวนการอิมัลซิฟิเคชัน (Emulsification) ซึ่งจะเริ่มจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ลงในบีตาแคโรทีนที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมัน จากนั้นเติมตัวทำละลายลงไปในสภาวะดังกล่าวเพื่อให้

เกิดปฏิกิริยาอิมัลซิฟิเคชันได้สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนในรูปอิมัลชันที่ได้ เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้ง (drying process) สุดท้ายจึงได้สารเพิ่มความคงตัว ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนในรูปผงโดยทั่วไป มีลักษณะเป็นผงสีแดงเข้มแล้วมีจุดสีขาวกระจายประปราย ซึ่งมีคุณสมบัติละลายในน้ำมันและกระจายตัวในน้ำได้ และในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียส บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ที่มีการหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ แล้วเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดหรือบริเวณที่ไม่ได้รับแสงแดด ซึ่งจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้ 36 เดือน ในปัจจุบันถูกใช้เป็นโปรวิตามินเอในอุตสาหกรรมยา โดยจะนำไปอัดให้อยู่ในรูปเม็ดของสารเสริมวิตามินเอ หรือนำไปผสมกับวิตามินที่จำเป็นเพื่อให้ได้เป็นวิตามินรวม นอกจากนี้ก็ยังนำไปทำเป็นแคปซูลอีกด้วย

2.4 ประโยชน์ของสารแคโรทีนอยด์

2.4.1. เป็นสารสี

เนื่องจากโครงสร้างของแคโรทีนอยด์มี conjugated double bonds เรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore) ทำให้แคโรทีนอยด์แต่ละชนิดดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน จึงมีผลต่อสีที่ปรากฏของผลไม้ที่มีสารแคโรทีนอยด์เป็นส่วนประกอบ โดยสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์จะถูกนำไปใช้เป็นสีผสมอาหาร ตัวอย่างเช่น บีตาแคโรทีน แซนโทฟิลล์ และแคนทาแซนทิน (canthaxanthin) ในสหรัฐอเมริกาอนุญาตให้ใช้สารทั้ง 4 ชนิดนี้ผสมในอาหารได้ (Ball, 1992) ซึ่งสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ให้สีเหลือง-ส้ม และส้ม-แดง แก่ผลิตภัณฑ์อาหาร

ลักษณะของแคโรทีนอยด์ที่ใช้เป็นสีผสมอาหารในรูปละลายในน้ำมัน (Bauernfeind, 1981) ที่ผลิตจากเซลล์ยีสต์ *Cryptococcus albidus* สามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เนย มายอนเนส และผลิตภัณฑ์ขนมอบ เป็นต้น หรืออาจอยู่ในรูปอิมัลชัน เช่น ในไอศกรีม และเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ

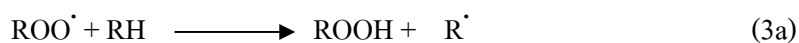
2.4.2. เป็นสารต้านการออกซิเดชัน (Antioxidation)

สารต้านการออกซิเดชัน หมายถึง สารที่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ โดยในแคโรทีนอยด์สามารถยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมี (Handelman, 1996) เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (singlet oxygen) เนื่องจากแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่ภายในโมเลกุลที่สามารถจับกับออกซิเจนอะตอมเดี่ยวได้ เช่น ในไลโคพีน มีพันธะคู่อยู่ 11 ตำแหน่ง และบีตาแคโรทีนมีตำแหน่งพันธะคู่อยู่ 9 ตำแหน่ง เป็นต้น อีกทั้งยังป้องกันสารเคมีและอนุมูลอิสระที่จะส่งผลเสียต่อร่างกายในกระบวนการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation) ชนิดไม่อิ่มตัวรวมถึงสารอื่นที่ไวต่อการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งมีกลไกการเกิด 3 ขั้นตอน (Madhavi *et al*, 1996) ดังนี้

1. กระบวนการเริ่มต้น(Initiation)

เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ(free radical) $R^\cdot$ (1)

2. กระบวนการแพร่ขยาย (Propagation)



3. กระบวนการสิ้นสุด (Termination)



ในกระบวนการเกิดออกซิเดชันของไขมัน เป็นการเริ่มต้นของความผิดปกติภายในร่างกาย โดยเมื่อเกิดอนุมูลอิสระขึ้น ($R^\cdot$) จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมาในรูป อนุมูลเพอร์ออกซิด ($ROO^\cdot$) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการแพร่ขยายของปฏิกิริยาลูกโซ่ ที่จะเข้าไปทำลายกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวภายในร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาลูกโซ่นี้สามารถถูกยับยั้งได้โดยการเติมสารแอนต้ออกซิแดนท์ เช่น บีตาแคโรทีน วิตามินอีและสารประกอบฟีนอล เป็นต้น

2.4.3. เป็นสารโปรวิตามินเอ

จากการศึกษาสารแคโรทีนอยด์ในปัจจุบัน พบว่าแคโรทีนอยด์มีมากกว่า 600 ชนิด แต่มีเพียง 50 ชนิดเท่านั้น ที่มีสมบัติเป็นโปรวิตามินเอ (Farombi, 1999) โดยบีตาแคโรทีนเป็นแคโรทีนอยด์ที่ใน 1 โมเลกุลสามารถเปลี่ยนไปเป็นวิตามินเอได้ถึง 2 โมเลกุล ซึ่งจะมีกิจกรรมของวิตามินเอสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารแคโรทีนอยด์ชนิดอื่น ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กิจกรรมของวิตามินเอของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์

สารแคโรทีนอยด์	Activity (%)
all-trans- β -carotene	100
9-cis- β -carotene	38
13- cis- β -carotene	53
all-trans- α -carotene	53
9-cis- α -carotene	13
13-cis- α -carotene	16
all-trans-cryptoxanthin	57
9-cis-cryptoxanthin	27
15-cis-cryptoxanthin	42
β -carotene 5,6-epoxide	21
β -carotene 5,8-epoxide	80
γ -carotene	42-50
β -zeacarotene	20-40

ที่มา : Crawley, 1993

ประโยชน์ของโปรวิตามินเอต่อระบบร่างกาย มีดังนี้

2.4.3.1 ด้านการมองเห็น

โปรวิตามินเอเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะเปลี่ยนไปเป็นสารสำคัญที่เรียกว่า คือ เรตินัล (retinal) เรตินัลเป็นส่วนประกอบสำคัญของจอประสาทตา (retina) โดยเป็นสารไกลโคโปรตีน (glycoprotein) ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์รูปแท่ง (rod cells) สำหรับการเห็นภาพขาวดำ ในแสงสว่างและเป็นส่วนประกอบของไอโอดอปซิน (iodopsin) ที่อยู่ในเซลล์รูปกรวย (cone cells) สำหรับการเห็นภาพสีบนจอประสาทตา จากความสามารถนี้จึงทำให้ปีตาแคโรทีน ช่วยในการป้องกันความผิดปกติทางสายตา เช่น อาการตาบอดกลางคืน (night blind illness) หรือทางการแพทย์เรียกว่า Xerophthalmia ซึ่งมีสาเหตุมาจากการขาดวิตามินเอ โดยจะแสดงอาการ คือ กระจกตาเป็นแผล เยื่อบุตาขาวแห้งมีรอยย่นที่เรียกว่าแกร์ดกระดี่ เป็นต้น (ศิริวรรณ, 2545)

2.4.3.2 ด้านการเจริญเติบโตของกระดูกและเนื้อเยื่อผิวหนัง

สารโปรวิตามินเอในรูปของกรดเรติโนอิก (retinoic acid) ในร่างกายจะทำงานร่วมกับวิตามินดี ในการสร้างเสริมความแข็งแรงของกระดูก โดยกรดเรติโนอิกจะช่วยให้การควบคุมเซลล์ ออสทีโอคลาสต์ (osteoclast) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระดูกและฟันในร่างกายให้มีการเจริญเติบโตอย่างเป็นปกติ ส่วนสารโปรวิตามินเอในรูปเรติโนล (retinol) จะทำหน้าที่ช่วยควบคุมรูปร่างและความแข็งแรงให้แก่เยื่อผิวหนังในเซลล์ นอกจากนี้การรับประทานสารที่มีโปรวิตามินเอเข้าไปยังสามารถป้องกันโรคทางผิวหนัง ในลักษณะความผิดปกติจากการเพิ่มจำนวนของเซลล์ชั้นผิวหนัง การเกิดผิวหนังอักเสบหรือแห้ง จนถึงเกิดการหลุดลอก รวมถึงในส่วนของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ที่เกิดจากภูมิคุ้มกันของร่างกายต่ำลง การอักเสบหรือติดเชื้อได้ง่าย ตลอดจนความผิดปกติของเนื้อเยื่อในระบบทางเดินอาหารและระบบทางเดินหายใจ (อรชุน, 2539)

2.4.3.3 ด้านระบบสืบพันธุ์

โปรวิตามินเอเมื่อถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของวิตามินเอ ในเพศชายจะมีบทบาทในการเปลี่ยนสภาพของเซลล์เริ่มต้นเพื่อใช้ในการสร้างอสุจิ โดยหากได้รับวิตามินเอน้อยจะส่งผลทำให้เยื่อหุ้มตัวอสุจิเสื่อมและถูกเก็บน้ำอสุจิเกิดการเปลี่ยนแปลงผิดปกติ จนถึงการสร้างอสุจิจากเจมินัลอีพิทีเลียม (germinal epithelium) ลดลง รวมทั้งส่งผลต่อการพัฒนาและการเจริญเติบโตของตัวอ่อนให้เป็นไปอย่างปกติในหญิงที่กำลังตั้งครรภ์

ในเพศหญิงจะแสดงอาการบวมที่บริเวณชั้นใต้ผิวหนังภายในเซลล์ของท่อรังไข่ มดลูก รวมถึงช่องคลอด นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดการหลุดลอกของเยื่อหุ้มมดลูก ซึ่งกระทบต่อการเจริญของทารกและสายรกในระหว่างตั้งครรภ์ (อรชุน, 2539)

2.4.3.4 ป้องกันโรคมะเร็ง

สารโปรวิตามินเอ เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ที่มีความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ และมีความสามารถในการจับกับออกซิเจนเดี่ยว โดยอนุมูลอิสระคือโมเลกุลที่ขาดอิเล็กตรอนไปหนึ่งอิเล็กตรอนทำให้สารดังกล่าวมีความไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี และจะทำการแย่งอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่น เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ จนทำให้ความสมดุลภายในร่างกายสูญเสียไป โดยอนุมูลอิสระจะเข้าไปทำลายสารประกอบจำพวกไขมัน ที่เป็นส่วนประกอบหลักของเยื่อหุ้มเซลล์ สารจำพวกโปรตีนซึ่งเป็นโครงสร้างของร่างกายรวมถึงเอนไซม์ นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้ปฏิกิริยาขนาดเล็กที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตภายในเซลล์ผิดปกติ และก่อให้เกิด

ความผิดปกติของดีเอ็นเอในหน่วยพันธุกรรม สาเหตุดังกล่าวล้วนเป็นจุดเริ่มต้นของโรคมะเร็ง ในการทดลองพบว่า โปรวิตามินเอ เช่น บีตาแคโรทีน มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระแก่อนุมูลอิสระแล้วเสื่อมสลายไปโดยไม่เกิดอันตรายต่อร่างกาย (Madhavi *et al.*, 1996) และจากการศึกษาเกี่ยวกับโรคมะเร็งในผู้รับประทานวิตามินเอสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งในช่องปาก มะเร็งกระเพาะอาหาร รวมถึงมะเร็งปอด โดยพบว่าในการทดลองให้ปริมาณบีตาแคโรทีนแก่กลุ่มคนที่เป็โรคมะเร็งและคนที่สูบบุหรี่จัดเป็นประจำ พบว่าปริมาณบีตาแคโรทีนในเลือดต่ำจะกว่ากลุ่มคนที่ไม่เป็นโรคมะเร็ง (อรชุน, 2539)

2.5 การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีปัจจัยดังนี้

2.5.1 ออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทางตรง (direct oxidation) เกิดขึ้นเมื่อแคโรทีนอยด์สัมผัสกับอากาศ ตำแหน่งพันธะคู่ในโครงสร้างของโมเลกุลจะไปจับกับออกซิเจนเกิดเป็นสารสีน้ำตาลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) สารประกอบคาร์บอนิลและสารระเหยอื่นๆ โดยอัตราการสูญเสียแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนแล้ว ความเข้มของแสง อุณหภูมิ และความชื้น ก็เป็นปัจจัยร่วมในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Crawley, 1993) การป้องกันการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากอากาศ สามารถทำได้โดยการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (นิธิยา, 2548) เช่น BHA (Butylated hydroxyanisole) BHT (Butylated Hydroxytoluene) TBHQ (Tertiary Butyl Hydroquinone) และ PG (propyl gallate) เป็นต้น และการทำไฮโดรจิเนชัน คือ กระบวนการเติมไฮโดรเจนให้กับตำแหน่งพันธะคู่ภายในโมเลกุลของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เพื่อเพิ่มความคงตัวและลดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนลง อีกวิธีคือการป้องกันการเข้าไปสัมผัสอากาศ เช่น การใช้บรรจุภัณฑ์ที่บรรจุก๊าซเฉื่อย การเก็บรักษาภายในระบบสุญญากาศและการใช้น้ำมันเคลือบที่ผิวผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Bauernfeind, 1981)

2.5.2 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทางอ้อม (indirect oxidation) เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสามารถรวมตัวกับออกซิเจน และทำให้แคโรทีนอยด์ถูกออกซิไดซ์ไปด้วย โดยสามารถแก้ไขได้จากการใช้กรดไขมันชนิดอิ่มตัวในการผสมกับสารแคโรทีนอยด์ (นิธิยา, 2548)

2.5.3 อีออนของโลหะ

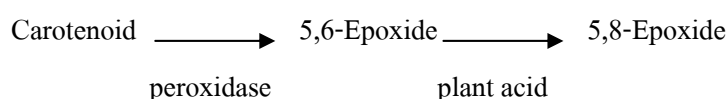
หากในผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ประกอบด้วยอีออนของโลหะซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย พบว่าการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ยิ่งรวดเร็วขึ้น เช่นในมะเขือเทศ พบว่าหากมีโลหะทองแดง ภายในส่วนประกอบ จะมีการเสื่อมสลายของไลโคพีนจะเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.5 เท่า เนื่องจากโลหะทองแดงเป็นตัวเร่งการเกิดอนุมูลอิสระได้อย่างดี (นิธิยา, 2548)

2.5.4 แสงสว่าง

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากแสงสว่างเป็นตัวเร่ง มีปริมาณออกซิเจนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้อง โดยจะสามารถสังเกตจาก การเปลี่ยนแปลงของสี กลิ่น และรสชาติ ทั้งนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่ทึบแสง (Morais *et al.*, 2001)

2.5.5 เอนไซม์

การเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากเอนไซม์ (ปราณี, 2543) เป็นผลมาจากภายในเซลล์แคโรทีนอยด์จะอยู่ในรูปซึ่งก่อพันธะเชิงซ้อนอยู่กับโมเลกุลของโปรตีน (Pigment-protein complex) โดยเอนไซม์หลักที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ 3 ชนิดคือ เปอร็อกซิเดส (peroxidase) หรือ POD เป็นเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแคโรทีนอยด์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังสมการ



เอนไซม์นี้จะไปเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอากาศ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาแคโรทีนอยด์ ทำให้แคโรทีนอยด์ลดลง และในเอนไซม์ไลโปเปอร็อกซิเดส (lipoperoxidase) เอนไซม์ตัวนี้จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการสลายของสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งเกิดต่อเนื่องมาจากสารเปอร็อกไซด์ ที่ได้จากการออกซิเดชันโดยอาศัยเอนไซม์ไลโปอกซิเดส (lipoxidase) (นิธิยา, 2548)

2.5.6 น้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่ช่วยในกิจกรรมของเอนไซม์ โดยพบว่า หากมีการลดปริมาณน้ำลงจะทำให้เอนไซม์ทำงานได้ลดลง เนื่องจากสารตั้งต้นสามารถเคลื่อนที่ได้ช้าลง และไม่สามารถแพร่ไปยังตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ หากกำจัดน้ำออกไปหมดจะทำให้ผิวนอกของตัวอย่างสัมผัสกับอากาศโดยตรง ทำให้แคโรทีนอยด์เกิดออกซิเดชันด้วยอากาศมากขึ้น (Bauernfeind, 1981)

2.6 กระบวนการทำแห้ง

การทำแห้งเป็นวิธีในการถนอมอาหารวิธีหนึ่งที่มีการใช้มาตั้งแต่อดีต โดยเริ่มต้นจากการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ จนมาในปัจจุบันมีการใช้แหล่งพลังงานหลากหลายชนิดทั้ง พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า แก๊ส ใช้น้ำ ตลอดจนการใช้พลังงานไมโครเวฟ โดยหลักการสำคัญในการทำแห้ง คือ วิธีการในการลดความชื้นภายในอาหารหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ความสามารถในการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ระดับ a_w (water activity) ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 จะทำให้อาหารสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น (สุคนธ์ชื่น, 2546)

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ระดับ a_w ต่าง ๆ

a_w	การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์
0.95	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Clostridium perfringens</i> และยีสต์บางชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้
0.90	ค่าต่ำสุดสำหรับการเจริญของเชื้อแบคทีเรียโดยทั่วไป <i>Salmonella</i> spp., <i>Vibrio parahaemolyticus</i> , <i>Lactobacillus</i> spp. และยีสต์บางชนิดไม่สามารถเจริญได้
0.85	ยีสต์หลายชนิดไม่สามารถเจริญได้
0.80	ค่าต่ำสุดสำหรับปฏิกิริยาเอนไซม์ และการเจริญของเชื้อราส่วนใหญ่ <i>Staphylococcus aureus</i> ไม่สามารถเจริญได้
0.75	ค่าต่ำสุดสำหรับ Halophilic bacteria
0.70	ค่าต่ำสุดของการเจริญของ Xerophilic Fungi ส่วนใหญ่
0.60	ค่าต่ำสุดสำหรับการเจริญของ Osmophilic bacteria, Xerophilic yeast และ Fungi

0.55	ค่าต่ำสุดของการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย
0.25	ค่าต่ำสุดของการเจริญของแบคทีเรียสร้างสปอร์

ที่มา : Fellow, 1997

2.6.1 การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum drying)

การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ อาศัยหลักการที่ว่าภายในระบบสุญญากาศสามารถระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดภายใต้บรรยากาศปกติ จึงช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการผลิต ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป (Baker, 1997) จะเห็นว่ากระบวนการนี้เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ทนความร้อนสูงหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความชื้นต่ำโดยไม่เกิดการทำลายของตัวผลิตภัณฑ์ ชนิดของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศมี 4 ชนิด ได้แก่

1) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถาด (Vacuum shelf dryer)

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถาด ตัวเครื่องประกอบด้วยตู้สุญญากาศ ซึ่งภายในมีชั้นรองรับถาดวางผลิตภัณฑ์ ตัวชั้นอาจได้รับความร้อนจากไฟฟ้า ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารโดยการนำความร้อน หรือใช้อากาศร้อนเป็นตัวพาความร้อนไปยังชั้นผลิตภัณฑ์ ตัวตู้สุญญากาศจะต่อกับอุปกรณ์สร้างระบบสุญญากาศที่อยู่ภายนอกตู้ ซึ่งอาจเป็นปั๊มสุญญากาศ หรือปั๊มไอน้ำ อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบ คือ คอนเดนเซอร์ซึ่งเป็นตัวเก็บไอน้ำอาจอยู่ภายใน หรือนอกตู้ แต่ควรติดตั้งอยู่ก่อนหน้าปั๊มสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำเข้าไปในปั๊ม เครื่องนี้จะเหมาะสำหรับการผลิตแบบครั้งเดียว สามารถบำรุงรักษาได้ง่าย เหมาะสำหรับการใช้ที่ระดับสุญญากาศสูง ๆ สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ในทุกรูปแบบ ตั้งแต่รูปของเหลว ของเหลวข้น และเป็นผง

2) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถัง (Rotary vacuum dryer)

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถัง เป็นเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง มีลักษณะเป็นลูกกลิ้งแนวนอนไม่เคลื่อนที่ หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อน เป็นการทำงานแบบครั้งเดียว ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลากหลาย และเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการระดับสุญญากาศสูง ๆ

3) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถังหมุน (Conical rotating vacuum dryer)

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถังหมุน ตัวเครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นถังสุญญากาศทรงกระบอก เมื่อเกิดการหมุน จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเคลื่อนที่ติดกับผนังของถังสุญญากาศที่หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อนรอบ ๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง และชิ้น ที่ไม่เกิดการเกาะติดกัน หรือที่ติดผนังของถังสุญญากาศ ซึ่งจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง

4) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดต่อเนื่อง (Continuous vacuum dryer)

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดต่อเนื่อง อุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบต่อเนื่อง โดยการอบแห้งจะใช้รังสีอินฟราเรด หรือให้ความร้อนจากแผ่นความร้อนด้านบน หรือด้านล่างของสายพานร่วมกับการใช้ระบบสุญญากาศ จากนั้นจะมีการกลับผลิตภัณฑ์ระหว่างการลำเลียง จากสายพานหนึ่งไปสายพานอีกอันหนึ่ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับการทำแห้งผลไม้เป็นชิ้น

2.6.2 การทำแห้งด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave drying)

ไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างทันสมัยและก้าวหน้ามากในการทำแห้ง ไมโครเวฟเริ่มรู้จักในปี พ.ศ. 2483 และพัฒนาออกมาในรูปของเตาไมโครเวฟ ปัจจุบันไมโครเวฟกลายเป็นของใช้ภายในครัวเรือนที่ใช้การหุงต้มอาหาร เนื่องจากสามารถใช้เวลาในการปฏิบัติงานไม่นาน ประหยัดพลังงาน และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ (สายสนม, 2546) ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้เลือกเอาพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการกระบวนการทำแห้งแคโรทีนอยด์

ไมโครเวฟ คือ พลังงานที่เกิดจากการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคลื่นที่มีความถี่สูง (High energy radiation) โดยความถี่ช่วงคลื่นไมโครเวฟจะมีความยาวคลื่น (λ) อยู่ในช่วงระหว่าง 75 เซนติเมตร ถึง 3 มิลลิเมตร ความถี่ของช่วงคลื่นอยู่ระหว่าง 300 MHz (Megahertz) ถึง 300 GHz (gigahertz) สถาบันระหว่างชาติคือ International Telecommunication Union (ITU) ได้กำหนดการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับระบบอุตสาหกรรม การใช้ในครัวเรือนและสำหรับงานวิจัยอื่น ๆ ไว้ที่ความถี่ 915 ± 25 , 2450 ± 50 , 5000 ± 75 และ 22125 ± 125 MHz เป็นต้น (สายสนม, 2546)

คลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะเหมือนลำแสงเดินทางเป็นเส้นตรงเมื่อกระทบโลหะจะสะท้อนกลับแต่สามารถทะลุผ่านอากาศ แก้ว กระดาษและพลาสติกได้ ถูกดูดซับไว้ได้ดีในสารประกอบที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริก(dielectric) เมื่อคลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับจะไม่ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นกับ

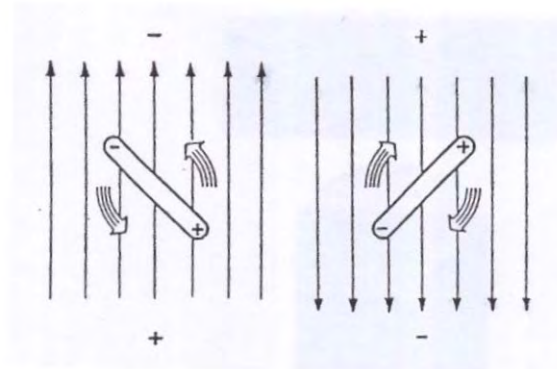
วัสดุ นั้น แต่ถ้าสารใดสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟไว้ได้จะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนภายในสารนั้น โดยเปลี่ยนจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สารใดที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้สูง และเกิดความร้อนได้รวดเร็วจะเรียกสารนั้นว่ามี lossiness สูง (สายสนม, 2546)

2.6.2.1 การเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่ชิ้นอาหาร อาหารจะเกิดความร้อนได้สองแบบร่วมกัน (สายสนม, 2546) คือ

1. Ionic Polarization เป็นการเกิดความร้อน เนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อเข้าสู่สนามไฟฟ้า แต่ละไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าประจำตัวจะถูกกระตุ้นและเร่งให้มีการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดการเสียดสีกันขึ้นกับไอออนอื่น และมีการเปลี่ยนพลังงานจลน์มาเป็นพลังงานความร้อน แล้วจึงกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่น ๆ ต่อไป การเกิดความร้อนแบบนี้เกิดได้ในของเหลวภายในเซลล์ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย

2. Dipole rotation เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบมีขั้ว (polar) ได้แก่ น้ำนั่นเอง ในสภาพปกติสารประกอบนั้นจะเรียงตัวประจุบวกและลบอย่างไม่มีระเบียบ (random oriented) เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า ประจุบวกและประจุลบของสารนั้นจะเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางเพื่อเรียงตัวอย่างมีระเบียบ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบของสารภายในสนามแม่เหล็ก
ที่มา : สายสนม, 2546.

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปกลับมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ คือ 915-2450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งผลของความเร็วในการหมุนตัวและการเสียดสีกันทำให้เกิดความร้อนขึ้นและเป็นลักษณะการเกิดความร้อนที่สำคัญ

ความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งสองรูปแบบดังกล่าวที่จุดซึ่งอาหารสัมผัสกับไมโครเวฟแล้วจึงค่อยกระจายตัวออกไปยังส่วนอื่นเนื่องจากผลของการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนด้วยแลเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเกิดความร้อนจากสาเหตุต่าง ๆ ดังกล่าวนี้นำให้เกิดได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการหุงต้มโดยความร้อนแบบดั้งเดิม (Lakshmia *et al.*, 2006)

ปริมาณพลังงานที่เกิดจากเครื่องไมโครเวฟสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในสารประกอบไดอิเล็กทริกได้โดยคำนวณจากสมการ (Decareau & Peterson, 1986)

$$P_D = 55.61 \times 10^{-14} E^2 f k' \tan \delta$$

$$P_D = \text{พลังงานที่สารประกอบดูดซับไว้ได้มีหน่วย วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (watt/ cm}^3\text{)}$$

$$E = \text{ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตร (volt/cm}^3\text{)}$$

$$f = \text{ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ มีหน่วยเป็น เฮิร์ตซ์ (Hz)}$$

$$k' = \text{ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric)}$$

$$\tan \delta = \text{loss tangent}$$

2.6.2.2 ระยะความลึกที่คลื่นไมโครเวฟผ่านขึ้นอาหาร

อาหารจะเกิดความร้อนได้ก็ต่อเมื่อกระทบกับคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นการที่ไมโครเวฟจะทะลุผ่านเข้าไปในขึ้นอาหารได้มากก็นับเป็นการดีที่จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นแล้ว พลังงานจะลดลงยิ่งอาหารชนิดใดมีค่า loss factor สูงก็จะทำให้ความร้อนสูง แต่ขณะเดียวกันพลังงานในการเจาะทะลุเข้าไปในขึ้นอาหารก็จะยิ่งลดลงจึงทำให้ทะลุผ่านเข้าไปได้ในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ยังพบว่าคลื่นความถี่ในไมโครเวฟที่ต่างกันจะทะลุผ่านเข้าไปในขึ้นอาหารได้ระยะต่างกันด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 915 MHz จะทะลุผ่านเข้าไปในขึ้นอาหารได้ลึกกว่าคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 MHz ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทะลุผ่านเข้าไปในขึ้นอาหารนับว่ามีความสำคัญต่อการออกแบบหรือการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะอาหารเช่น ถ้าขึ้นอาหารที่จะแปรรูปด้วยไมโครเวฟมีความหนามาก ก็ควรจะเลือกคลื่นไมโครเวฟที่ต่ำกว่าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคลื่นและระยะทางที่คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านขึ้นอาหารไปได้ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$D = \frac{\lambda_0 \sqrt{k'}}{2\pi k''}$$

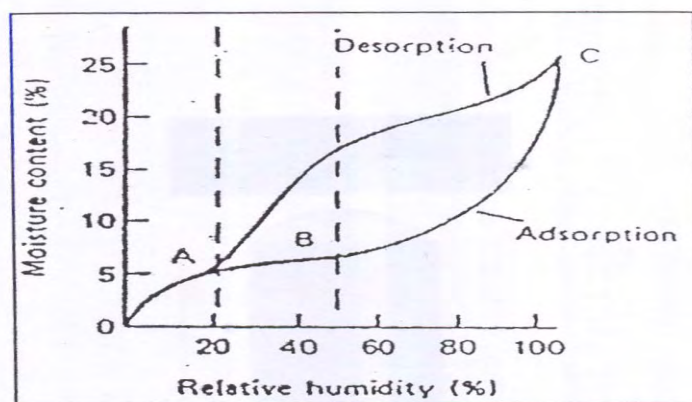
D = ระยะความลึกที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านขึ้นอาหาร หน่วยเป็น เซนติเมตร

λ_0 = ความยาวคลื่นในที่ว่างอิสระ (free space) หน่วยเป็น เซนติเมตร

2.6.3 Moisture sorption isotherms

โดยศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการดูด(Adsorption) และการคายความชื้น (desorption) ของอาหารที่อุณหภูมิและในเวลาที่กำหนด ปกติแล้วน้ำในอาหารเคลื่อนที่ไปยังอากาศรอบ ๆ โดยขึ้นกับความชื้นและองค์ประกอบของอาหาร ที่อุณหภูมิคงที่ความชื้นจะปรับตัวจนกว่าจะถึงสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบของบรรยากาศที่เก็บรักษา (debnath *et al.*, 2002)

Moisture sorption isotherms เป็นกราฟที่ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_w กับค่าความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์อาหาร กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปโค้ง (Sigmoids Curve) ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 Moisture Sorption isotherm

ที่มา : รัตนันท์, 2551

จากภาพที่ 2.2 ที่จุด C แสดงจุดที่อาหารมีความชื้นสัมพัทธ์สูง และที่จุด A แสดงจุดที่ความชื้นของอาหารมีค่าต่ำ เมื่อทำการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลงจากจุด C มีผลให้ความชื้นในอาหารลดลงด้วย หากทำการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่อไปจนกระทั่งความชื้นในอาหารลดถึงจุด A จะได้กราฟแสดงลักษณะการดึงความชื้นออกจากอาหาร หรือที่เรียกว่า desorption isotherm

สำหรับค่า adsorption isotherm จะเป็นกราฟแสดงลักษณะการดูดความชื้นจากอากาศเข้าสู่อาหาร เริ่มต้นจากจุด A ที่อาหารมีความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำ เมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นความชื้นสมดุลภายในอาหารจะเพิ่มขึ้นดังเช่นที่จุด B และจุด C จากกราฟ sorption isotherm จะเห็นว่า ระหว่าง จุด A ถึงจุด C ของกราฟ adsorption isotherm และ desorption isotherm เส้นกราฟจะแยกเส้นกัน ลักษณะปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Hysteresis

Moisture sorption isotherms มีความสำคัญในกระบวนการผลิตอาหารหลากหลายชนิด เช่น การทำแห้ง การเก็บรักษา และการบรรจุผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ข้อมูลที่ได้ moisture sorption

isotherms เมื่อใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังตารางที่ 2.3 สามารถนำไปคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ทำนายลักษณะของอาหารหลังเพิ่มส่วนผสมลงไป ใช้เป็นตัวเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในอาหารระหว่างเก็บรักษาประมาณอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารผง (Gabas, 2007)

ตารางที่ 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Sorption isotherms

Model		
Oswin	$X_{eq} = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$	(1)
Halsey	$a_w = \exp \left(\frac{-A}{X_{eq}^B} \right)$	(2)
BET	$X_{eq} = \frac{(X_m C a_w)(1 - (N + 1)a_w^N N a_w^{N+1})}{(1 - a_w)(1 - (C - 1)a_w - C a_w^{N+1})}$	(3)
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)}$	(4)
Peleg	$X_{eq} = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2}$	(5)
D'arcy Watt	$X_{eq} = \frac{K_1 K_2 a_w}{1 + K_1 a_w} + K_5 a_w + \frac{K_3 K_4 a_w}{1 - K_3 a_w}$	(6)

หมายเหตุ :	Xeq	คือ ปริมาณความชื้น(กรัมของน้ำ/กรัมน้ำหนักแห้ง)
	Xm	คือ ปริมาณความชื้นชั้นเดียวที่เกาะบนอาหาร(monolayer moisture content;กรัมของน้ำ/กรัมน้ำหนักแห้ง)
	a _w	คือ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี(กรัมของน้ำ/กรัมอากาศแห้ง)
	A, B, C, K, k, N, n	คือ ค่าคงที่

ที่มา : Cassini, 2006

2.6.4 วอเตอร์แอกติวิตี (Water activity)

วอเตอร์แอกติวิตีเป็นค่าที่มีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายชนิดของอาหาร และอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหารและการเน่าเสียของอาหาร โดยนิยาม

$$\text{วอเตอร์แอกติวิตี คือ } \frac{\text{ความดันไอของสารละลาย}}{\text{ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน}}$$

วอเตอร์แอคติวิตีสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง แสดงจากภาพที่ 2.3 ดังนี้

ช่วงที่ 1 บริเวณล่างสุดของกราฟ (a_w อยู่ ระหว่าง 0 – 0.2)

ช่วงบริเวณล่างสุดของกราฟนี้เป็นระดับ a_w ต่ำสุดของอาหารแห้ง โดยอาหารจะดูดซับน้ำที่เป็น Monomolecular layer ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ๆ ชั้นเดียวเอาไว้อย่างเหนียวแน่น (Bound Moisture) น้ำนี้ไม่เคลื่อนที่ในอาหาร โดยน้ำชั้นนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของอาหารและมีความเสถียรมาก โดยเชื่อมต่อกับองค์ประกอบของอาหารในส่วนของ Polar ด้วยแรงดึงดูด Water-ion หรือ Water-dipole interaction เช่น การยึดกันระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ NH_3^+ และ COO^- ของโปรตีน

น้ำชั้นนี้ไม่มีส่วนต่อกิจกรรมทางชีววิทยาหรือการทำปฏิกิริยาในโมเลกุลของอาหาร โดยช่วงรอยต่อระหว่างช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่เรียกว่า BET (Brunaur Emmett Teller Monolayer) ที่สมมุติให้การดูดซึมของโมเลกุลมี 1 ชั้น เมื่ออาหารดูดความชื้นมากขึ้นโมเลกุลของน้ำชั้นแรกเชื่อมต่อกันมากขึ้นและเชื่อมต่อกับโมเลกุลของอาหารด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้น้ำชั้นแรกนี้สามารถเคลื่อนที่ได้น้อยกว่าน้ำทั่วไปเล็กน้อย

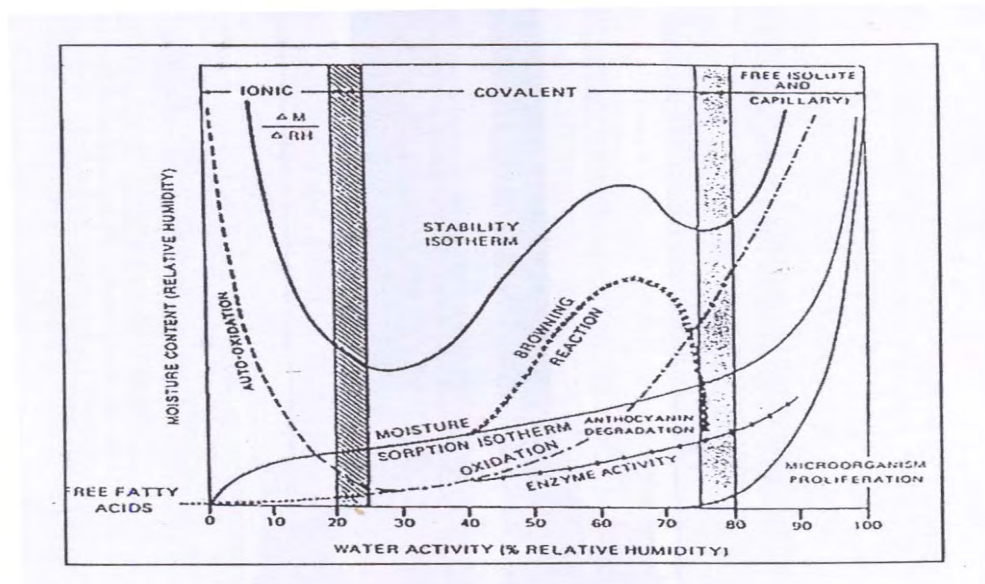
ช่วงที่ 2 บริเวณตอนกลางของกราฟ (a_w อยู่ ระหว่าง 0.25 – 0.8)

ช่วงบริเวณตอนกลางของกราฟนี้ อาหารดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้นหลายชั้นถัดจากชั้น Monolayer Film ในช่วง ระหว่าง 0.25 – 0.75 น้ำนี้เกาะอย่างหลวม ๆ (Unbound moisture) และดูดยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กับหมู่ OH^- ของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ทำให้ค่า a_w เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่น้ำเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง น้ำในชั้นนี้สามารถกำจัดออกไปได้ง่ายซึ่งจะทำให้หน้าที่ละลายตัวถูกละลายและเร่งปฏิกิริยาเคมี ปลายช่วงที่ 2 และ 3 มีปริมาณน้ำที่มากพอจนทำให้ชั้น monolayer เปียกเต็มที่ น้ำส่วนนี้สามารถทำละลายและถ่ายเทได้ภายในและระหว่างเซลล์จุลินทรีย์สามารถใช้ส่วนนี้เพื่อการเจริญได้

ช่วงที่ 3 บริเวณตอนบนของกราฟ (a_w อยู่ ระหว่าง 0.25 – 0.8)

ช่วง บริเวณตอนบนของกราฟ อาหารมีน้ำอิสระ (Free Moisture) เพียงพอที่สามารถควบแน่นภายในเซลล์ของอาหารในช่วง a_w มีค่า 0.75 – 1.00 มีชั้นน้ำหลายชั้นบนโปรตีนและพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต น้ำชั้นนี้มีความดันไอต่ำเพราะในอาหารมีตัวถูกละลายอยู่ ตัวอย่างเช่น น้ำตาลหรือกรดอะมิโนอิสระ เป็นต้น ในช่วงนี้ความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ a_w กลับ

เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยน้ำเหล่านี้จะรวมตัวกันแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเซลล์และถูกกักในอาหารด้วยแรงอ่อน ๆ ซึ่งเพียงพอแก่การเจริญเติบโตของยีสต์และรา อีกทั้งน้ำอิสระนี้จะถูกใช้เพื่อเร่งปฏิกิริยาทางเคมีและใช้ในปฏิกิริยาของเอนไซม์ การอบแห้งสามารถกำจัดน้ำในชั้นน้ำได้โดยง่าย อาหารแห้งต้องระวังความชื้นและ a_w ในช่วงนี้ เพราะอาหารจะดูดความชื้นเข้าไปมากพอให้เชื้อยีสต์และราเจริญจนกระทั่งทำให้อาหารเสื่อมเสียได้ง่าย (Debnath, 2002)



ภาพที่ 2.3 ค่า a_w กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เอนไซม์และจุลินทรีย์ภายในอาหาร
ที่มา : Rockland and Nishi, 1980

2.6.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.5.1 การใช้เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศในการแปรรูปอาหาร

ในปี 2005 Hymavathi and Khader ทำการศึกษาการทำมะม่วงผง โดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน พบว่า มีการสูญเสียปริมาณบีตาแคโรทีนในมะม่วงผง ประมาณ 51-66 % การเสื่อมสลายของปริมาณบีตาแคโรทีน อาจจะเป็นผลจากความไวในการสลายตัวเนื่องจากแสง, การเกิดไอโซเมอไรเซชัน(Isomerization) และการเกิดอีพอกไซด์ (Epoxide formation) ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ต่อมาในปี 2006 Java and Mani ได้ศึกษาการทำมะม่วงผง โดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน พบว่า มีการสูญเสียปริมาณ บีตาแคโรทีนในมะม่วงผง ประมาณ 51-66 %

2.6.5.2 การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร

จากการศึกษาการทำแห้งชิ้นแครอท (Cui *et al.*, 2004) โดยเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งที่ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ พบว่า การทำแห้งชิ้นแครอทโดยใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ, การใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศร่วมกับเตาอบลมร้อน การใช้ไมโครเวฟระบบสุญญากาศร่วมกับเตาอบระบบสุญญากาศ มีการลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ภายในผลิตภัณฑ์แครอทชิ้นน้อยมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการทำแห้งด้วยระบบไมโครเวฟระบบสุญญากาศมีอัตราเร็วการทำแห้งที่สูงและใช้เวลาสั้น เป็นผลให้เอนไซม์ไลโปออกซิจีเนส (lipoxygenase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ไปเร่งปฏิกิริยาการสลายของแคโรทีนอยด์ลดลง และด้วยระบบสุญญากาศทำให้ไม่มีออกซิเจนสำหรับใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลแคโรทีนอยด์ นอกจากนี้ ผลการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ในผลิตภัณฑ์แครอทแห้งให้ผลไม่แตกต่างกันในการทำแห้งด้วยไมโครเวฟระบบสุญญากาศกับการทำแห้งด้วยระบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer)

ในปี 2007 Li และคณะ ได้ศึกษาการทำกระเทียมผง โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟระบบสุญญากาศร่วมกับเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ พบว่า สภาวะที่ใช้ โดยให้กำลังของไมโครเวฟที่ 376.1 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นใช้กำลัง 282.1 วัตต์ 3 นาที แล้วใช้ กำลังวัตต์ 188.1 วัตต์ 9 นาที และสุดท้ายใช้กำลัง 94 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที ในการทดลองควบคุมอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทำแห้งได้ผลิตภัณฑ์ผงที่มีสารอัลลิซิน (allicin)หลงเหลืออยู่ 90.2 % ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากการทำกระเทียมผงด้วยด้วยระบบแช่เยือกแข็ง แต่เสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าและสูญเสียพลังงานน้อยกว่า

ในปี 2545 พรรณจิราและคณะ ผลิตน้ำผักและผลไม้รวมผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเปรียบเทียบกับเทคนิคไมโครเวฟระบบสุญญากาศ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำน้ำผักและผลไม้รวมผง โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟระบบสุญญากาศ คือการใช้กำลังไฟ 210 วัตต์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่ลักษณะเป็นผงที่ให้สีเข้ม และปริมาณวิตามินซีสูงกว่า การทำผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

บทที่ 3

วัตถุดิบและวิธีการศึกษา

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 น้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองได้รับการสนับสนุนจาก บริษัทชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) 296 ม.2 ต.สลูย อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร 86140

3.1.2 แป้งข้าวเจ้า ชนิดไม่ผ่านการขัดสีพิเศษ ตราทานตะวัน ผลิตโดยบริษัทไทยอินเตอร์เนชันแนลไรซ์ฟลาว

3.1.3 แป้งข้าวเหนียว ชนิดไม่ผ่านการขัดสีพิเศษ ตราทานตะวัน ผลิตโดยบริษัทไทยอินเตอร์เนชันแนลไรซ์ฟลาว

3.1.4 แป้งถั่วเขียว ตราต้นสน ผลิตโดยบริษัท บริษัทสิทธิพันธ์

3.1.5 แป้งมันสำปะหลัง ตราดอกไม้ไทย ผลิตโดยบริษัท บริษัทกรุงเทพสตาซอินดัสเทรีย

3.2 อุปกรณ์/เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 เครื่องระเหยแบบสุญญากาศ (Rotary Evaporater “Buchi”, Switzerland)

3.2.2 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer “PerkinElmerTM”, UV WINLAB version 2.85.04)

3.2.3 เครื่องเขย่าสาร (Vortex ; Scientific Industries : G-560E, USA)

3.2.4 เครื่องฆ่าเชื้ออาหาร (Autoclave ; Gallencamp, England)

3.2.5 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven “Termaks”, England)

3.2.6 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius : CP224S, Germany)

3.2.7 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Percisa ; BJ610C, Switzerland)

3.2.8 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH meter “Sartorius”, series PB10)

3.2.9 เครื่องบรรจุสุญญากาศ (Supervac : GK100, Australia)

3.2.10 เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลาย (a_w meter ; Aqualab : Serie 3, USA)

3.2.11 เครื่องวัดสี (Colorimeter ; Minolta Chroma meter : CR-300, Japan)

3.2.12 ตู้ถ่ายเชื้อ (Laminar flow ; Heal Force : HFsafe 1200/C, China)

3.2.13 ตู้บ่มเชื้อ (Incubator ; Gallenkamp, England)

3.2.14 เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven ; Sharp, Thailand)

- 3.2.15 ปิเปตถ่ายสาร (Transfer Pipette ; Transferpette, Germany)
- 3.2.16 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath ; GFL : 1032, Germany)
- 3.2.17 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
- 3.2.18 เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

3.3 สารเคมี

- 3.3.1 กรดซิตริก (“Merk” Citric acid, food grade, AR Grade, Germany)
- 3.3.2 กรดฟอสฟอริก (“Merk” Phosphoric acid, AR Grade, Germany)
- 3.3.3 โพรพิลีนไกลคอล (“Baker” propylene glycol, AR Grade, U.S.A)
- 3.3.4 เฮกเซน (Hexane, Commercial grade, Etalmar, Thailand)
- 3.3.5 เอทานอล (95% Ethanol, Commercial grade, Imported denatured ethyl alcohol 95%)
- 3.3.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (98% Sodium hydroxide, Commercial grade, Thasco chemical, Thailand)
- 3.3.7 บีตาแคโรทีนมาตรฐาน (“Fluka” Standard β -carotene, U.S.A)
- 3.3.8 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (“Baker” Potassium iodide, AR Grade, U.S.A)
- 3.3.9 โซเดียมคลอไรด์ (“Lascan” Sodium hydroxide, AR Grade, Ireland)
- 3.3.10 แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride ; $MgCl_2$, Merck, Germany)
- 3.3.11 โพแทสเซียมอะซิเตรต (Potassium acetate ; CH_3COOK , Merck, Germany)
- 3.3.12 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate ; K_2CO_3 , Merck, Germany)
- 3.3.13 แมกนีเซียมไนเตรต (Magnesium nitrate ; $Mg(NO_3)_2$, Fluka, Switzerland)
- 3.3.14 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide ; KI, UNIVAR APS Finechem, Australia)
- 3.3.15 แอมโมเนียมซัลเฟต (Amonium sulfate; $(NH_3)_2SO_4$, Merck, Germany)
- 3.3.16 โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate ; KNO_3 , Fluka, Switzerland)
- 3.3.17 เปปโตน (Peptone water ,Merck, Germany)
- 3.3.18 Plate Count agar (PCA ; Merck, Germany)
- 3.3.19 Potato Dextrose agar (PDA ; Merck, Germany)
- 3.3.20 ทวิน 20 (Tween 20)

3.4 วิธีการศึกษา

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างแคโรทีนอยด์

3.4.1.1 การกำจัดกัม (degumming) ในน้ำมันปาล์มดิบ

ทำการกำจัดกัมน้ำมันปาล์มดิบตามวิธีของพัชรินทร์และคณะ (2548) โดยนำน้ำมันปาล์มดิบ เทลงหม้อ ตั้งไฟ แล้วเติมกรดซิตริก 0.02% และ กรดฟอสฟอริก 0.08% จากนั้นกวนผสมสารละลายจนสารละลายมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 นาที แล้วนำมารองระบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาดกรองน้ำตาล

3.4.1.2 การสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ทำการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบตามวิธีของพัชรินทร์และคณะ (2548) ดังนี้

ทำการป้อนโพรพิลีนไกลคอลจน เข้าถึงผสม แล้วเติมเฮกเซนจำนวน 4,300 มิลลิลิตร ลงถึงสกัด จากนั้นชั่งน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากข้อ 3.4.1.1 จำนวน 1,434 กรัม ทำให้อุ่น จนมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของถังสกัดเท่ากับ -10 องศาเซลเซียส ป้อนน้ำมันปาล์มดิบที่ทำให้ร้อนแล้วเข้าสู่เครื่องสกัด โดยใช้ความเร็วของใบพัดในการกวนเท่ากับ 250 รอบ/นาที เมื่ออุณหภูมิของถังสกัดคงที่ที่ -10 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการกรองโดยระบบสุญญากาศ เพื่อเอาไขมันเหลือทิ้งออก สารที่ได้ เรียกว่า สารผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน

3.4.1.3 การระเหยตัวทำละลายออกจากสารผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน

ทำการระเหยตัวทำละลายออกจากสารผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน โดยเทสารผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน ที่ได้จากข้อ 3.4.1.2 ลงอ่างสำหรับบรรจุสารสกัด จากนั้นเปิดเครื่องระเหยระบบสุญญากาศ เพื่อทำการระเหยตัวทำละลายออก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนตัวทำละลายระเหยไปจนหมด (พัชรินทร์และคณะ, 2548) สารที่ได้เรียกว่าสารสกัดแคโรทีนอยด์

3.4.1.4 การเตรียมตัวอย่างแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน

นำสารสกัดแคโรทีนอยด์ที่ได้จากข้อ 3.4.1.3 มาทำปฏิกิริยาอิมัลซิฟิเคชัน(ประยุกต์จากวิธีของ Thanasukarn และคณะ, 2006) โดยตวงน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในโถกระบอกตวงขนาด 1000 มิลลิลิตร เติม 0.1 M โซเดียมอะซิเตรดบัฟเฟอร์ pH 5.5 จำนวน 18 กรัม ทวีน 20 จำนวน 0.2 กรัม และ BHT 0.05 กรัม ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่น จากนั้นเติมแคโรทีนอยด์สกัด 350 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยเครื่อง Sonicator แล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ได้ 35 % แคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน ต่อมาเตรียม 40 และ 45 % แคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน โดยใช้ปริมาณแคโรทีนอยด์สกัด

เป็น 400 และ 450 ตามลำดับ จากนั้นบรรจุแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชันที่ได้ในขวดสีชาเก็บรักษาในที่มืด ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.4.2 การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบในรูปละลายในน้ำมัน

วางแผนการทดลองแบบ 2x3 factorial in CRD โดยนำแคโรทีนอยด์สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบในการทดลองที่ 3.4.1.3 ทำการดูดซับด้วยแป้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้แป้งในปริมาณเท่ากันคือ 50 กรัม ทำการดูดซับโดยใช้ปริมาณแคโรทีนอยด์ 3 ระดับ คือ 15.0 17.5 และ 20.0 มิลลิกรัม ทำการคัดเลือกชนิดแป้งดูดซับและปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เหมาะสม โดยคัดเลือกจากประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ (ภาคผนวก 2.5) และค่า a_w (ภาคผนวก 2.1)

3.4.3 การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบในรูปอิมัลชัน

3.4.3.1 ศึกษาระดับอิมัลชันที่เหมาะสมต่อการดูดซับในแป้งชนิดต่าง ๆ

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยนำแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 35 40 และ 45 โดยปริมาตร จากการทดลองที่ 3.4.1.4 มาทำการดูดซับในแป้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว และแป้งถั่วเขียว ทำการคัดเลือกระดับอิมัลชันที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบจากประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.5 ปริมาณความชื้นตามวิธีในภาคผนวก ข.1.1, ค่า a_w ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.1 และ ค่า $L a^* b^*$ ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.2

3.4.3.2 การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบรูปอิมัลชันโดยใช้เครื่องไมโครเวฟแบบสุญญากาศ

วางแผนการทดลองแบบ 3x3 factorial in CRD โดยใช้แป้งดูดซับ 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งถั่วเขียว ทำการดูดซับโดยใช้ระดับอิมัลชันของแคโรทีนอยด์ที่คัดเลือกแล้ว ศึกษาผลของกำลังเครื่องไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 720,960 และ 1200 วัตต์ และเวลาในการอบแห้ง 3 ระดับ คือ 5,10 และ 15 นาที โดยคงระดับความดันของระบบไว้ที่ 210 มิลลิเมตรปรอท คัดเลือกชนิดแป้งดูดซับ กำลังวัตต์ของเครื่องไมโครเวฟ และเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่เหมาะสม ในการผลิตแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ทำการคัดเลือกจากประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.5 และค่า a_w ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.1

3.4.3.3 การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบรูปอิมัลชันโดยใช้เตาอบแบบ

สุญญากาศ

วางแผนการทดลองแบบ 3x3 factorial in CRD โดยใช้แป้งคุดชับ 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งถั่วเขียว ทำการคุดชับโดยใช้ระดับอิมัลชันของแคโรทีนอยด์ที่คัดเลือกแล้ว ศึกษาอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 40,50 และ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบแห้ง 3 ระดับ คือ 30,45 และ 60 นาที โดยคงระดับความดันของระบบไว้ที่ 210 มิลลิเมตรปรอท คัดเลือกชนิดแป้ง อุณหภูมิ และเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสม การผลิตแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ทำการคัดเลือกจากประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.5 และค่า a_w ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.1

3.4.3.4 คัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบรูป

อิมัลชัน

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยทำการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ได้จากการทำแห้งด้วยเครื่องเตาอบแบบสุญญากาศ กับผลิตภัณฑ์จากเครื่องไมโครเวฟแบบสุญญากาศ โดยคัดเลือกจากประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.5 และค่า a_w ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.1

3.4.4 ศึกษาแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยนำแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชันจากการทดลองที่ 3.4.2 และ 3.4.3 ตามลำดับ นำมาเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมฟรอยด์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน สุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณบีตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.4 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตามวิธีในภาคผนวก ข.3.1, ปริมาณยีสต์และราตามวิธีในภาคผนวก ข.3.2

3.4.5 ศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยนำแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชันจากการทดลองที่ 3.4.2 และ 3.4.3 ตามลำดับ ทำการควบคุมที่ความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน 8 ระดับ ตามภาคผนวก ก.3 เมื่อผลิตภัณฑ์เข้าสู่จุดสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ทำการสร้างกราฟ Sorption isotherm ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.6 ก่อนนำมาผลิตภัณฑ์มาเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมฟรอยด์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน ทำการสุ่มตัวอย่างทุก 15 วัน เพื่อ

วิเคราะห์ปริมาณปีตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์ตามวิธีในภาคผนวก ข.2.4 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตามวิธีในภาคผนวก ข.3.1 ปริมาณฮีสต์และราตามวิธีในภาคผนวก ข.3.2

3.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 การศึกษาการทำแห้งแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้เครื่องสกัดแคโรทีนอยด์ด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำ แคโรทีนอยด์ที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของน้ำมัน จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปแคโรทีนอยด์ให้อยู่ในรูปผงซึ่งเหมาะสมจะเป็นทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ในรูปผง

ในการศึกษาการทำแห้งแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมันได้เลือกแป้งชนิดต่าง ๆ ที่มีขายในท้องตลาดซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย ทำการคัดเลือกเบื้องต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า แป้งที่เหมาะสมในการดูดซับแคโรทีนอยด์ในรูปน้ำมันที่ได้จากการสกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว และแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นทดลองคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปริมาณแป้งกับปริมาณแคโรทีนอยด์ โดยใช้สัดส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ (กรัม) ต่อ แป้ง (กรัม) 3 ระดับ คือ 3.0 : 10, 3.5 : 10 และ 4.0 : 10 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับแคโรทีนอยด์ ซึ่งคำนวณจากร้อยละของผลผลิตแคโรทีนอยด์รวมที่คงเหลือ (% Recovery of Total Carotenoids) ของแป้งทั้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว และแป้งมันสำปะหลัง ให้ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อใช้อัตราส่วนของแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ร้อยละของบิตาแคโรทีนมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้การใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวดูดซับที่อัตราส่วนต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ แป้ง 4:10 โดยน้ำหนัก ได้ผลผลิตคงเหลือสูงสุด คือ 97.44 % ของน้ำหนักแคโรทีนอยด์เริ่มต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงและมีสีเหลืองส้ม (ตารางที่ 4.3)

การศึกษาดอนี้สรุปได้ว่า การใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวดูดซับมีความเหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากให้ผลผลิตคงเหลือสูงกว่าการใช้แป้งดูดซับชนิดอื่นที่ศึกษา และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา วินันทา (2003) ได้ทำการแยกแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มโดยการดูดซับบนดินเหนียวชนิดต่างๆที่มีในประเทศไทย 6 ชนิด ได้แก่ เบนโทไนต์ ไดอะตอมไมต์ เทลลัม ดินขาว จังหวัดลำปาง ดินขาวจังหวัดระนอง และบอลเคลย์ ซึ่งดินเหนียวได้ผ่านการปรับสภาพดินด้วยการกระตุ้นด้วยกรด และการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ที่สภาวะที่ดีที่สุดเมื่อทำการชะด้วยเตตระไฮโดรฟูลอแรน ที่อุณหภูมิห้อง สามารถสกัดสารแคโรทีนอยด์ได้ผลผลิตคงเหลือ เท่ากับ 73.73 % ของน้ำหนักแคโรทีนอยด์รวมเริ่มต้นในน้ำมันปาล์มดิบ ดังนั้นการใช้แป้งข้าวเหนียวจึงเป็นตัวดูดซับสารสกัดแคโรทีนอยด์ที่ดีกว่าการใช้ดินเหนียวที่ศึกษาโดยวินันทา

เมื่อนำสารสกัดแคโรทีนอยด์ที่ดูดซับด้วยแป้งข้าวเหนียว ที่อัตราส่วนแคโรทีนอยด์ต่อแป้ง 4:10 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ดีที่สุด ไปหาค่า a_w พบว่า ผลิตกัณฑ์ที่ได้มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเพียงพอต่อการเก็บรักษาที่สภาวะปกติได้

ตารางที่ 4.1 การคัดเลือกแป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์ชนิดละลายในไขมัน

ชนิดแป้ง	อัตราส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อแป้งโดยน้ำหนัก		
	3.0:10	3.5:10	4.0:10
ข้าวเจ้า	+	+	+
ข้าวเหนียว	+	+	+
ถั่วเขียว	+	-	-
มันสำปะหลัง	+	+	+
ข้าวสาลี	+	-	-
ข้าวโพด	-	-	-

หมายเหตุ : + หมายถึง ลักษณะอนุภาคที่ได้เป็นผงไม่จับตัวเป็นก้อน

- หมายถึง อนุภาคที่ได้จับตัวเป็นก้อน

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของบีตาแคโรทีนที่ได้กลับคืนมา (% Recovery of beta-carotene) เมื่อใช้แป้งชนิดต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับที่อัตราส่วนของแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมันต่อแป้งอัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนปริมาณ แคโรทีนอยด์ต่อแป้ง โดยน้ำหนัก	ร้อยละของบีตาแคโรทีนที่ได้กลับคืนมา		
	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งมันสำปะหลัง
3.0:10	57.55 ^c ± 3.02	73.56 ^c ± 2.80	76.11 ^b ± 1.67
3.5:10	72.76 ^b ± 2.12	92.48 ^b ± 2.18	77.55 ^b ± 1.70
4.0:10	86.37 ^a ± 2.15	97.44 ^a ± 1.50	94.81 ^a ± 2.88

ตารางที่ 4.3 ค่า a_w และลักษณะปรากฏของแคโรทีนอยด์ชนิดละลายในน้ำมันที่ทำให้แห้งโดยใช้แปรงดูดซับชนิดต่าง ๆ

ชนิดแปรง	อัตราส่วน ปริมาณ แคโรทีนอยด์ ต่อแปรง โดยน้ำหนัก	ค่า a_w	ลักษณะปรากฏ
แปรงข้าวเจ้า	3.0:10	$0.52^a \pm 0.00$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองจาง ๆ
	3.5:10	$0.52^a \pm 0.00$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองอ่อน
	4.0:10	$0.52^a \pm 0.01$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองส้ม
แปรงข้าวเหนียว	3.0:10	$0.41^a \pm 0.00$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองส้ม
	3.5:10	$0.41^a \pm 0.00$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองส้ม
	4.0:10	$0.42^a \pm 0.01$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองส้ม
แปรงมัน สำปะหลัง	3.0:10	$0.51^a \pm 0.00$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองจาง ๆ
	3.5:10	$0.51^a \pm 0.00$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองอ่อน
	4.0:10	$0.52^a \pm 0.00$	เป็นผงละเอียด และมีสีเหลืองส้ม

4.2 การศึกษาการทำแห้งแคโรทีนอยด์รูปอิมัลชันหรือแคโรทีนอยด์อิมัลชัน

4.2.1 การคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของแคโรทีนอยด์อิมัลชันต่อแปรงดูดซับ

4.2.1.1 ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อค่าสีของแปรงที่ดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน

แคโรทีนอยด์เริ่มต้นที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบอยู่ในรูปของน้ำมัน ดังนั้นเมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการแยกชั้น จึงไม่สามารถนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก ได้จำเป็นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอิมัลชัน โดยใช้อิมัลซิไฟเออร์เป็นตัวกลางเพื่อให้แคโรทีนอยด์สามารถกระจายตัวในน้ำได้ (Thanasukarn, 2006) จากนั้นจึงทำการคัดเลือกเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าชนิดแปรงที่เหมาะสมในการดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน คือ แปรงข้าวเจ้า แปรงข้าวเหนียว และแปรง

ถั่วเขียว จากนั้นคัดเลือกอัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 3 ระดับ คือ 35, 40 และ 45 % โดยปริมาตร โดยใช้สัดส่วนของแป้ง (กรัม) ต่อปริมาณแคโรทีนอยด์อิมัลชัน (กรัม) คือ 2:1 คัดเลือกอัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับด้วยแป้งชนิดต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการทำแห้งในการทดลองต่อไป สำหรับการคัดเลือกอัตราส่วนอิมัลชันที่เหมาะสมนี้ พิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังนี้

ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่าง ๆ ต่อค่าสี L^* ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชันชนิดต่าง ๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนของแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ใช้เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าสี L^* ของแคโรทีนอยด์ที่ดูดซับในแป้งชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 4.1) โดยค่าสี L^* เป็นค่าสีที่บ่งบอกถึงความสว่างของผลิตภัณฑ์ หากค่าสี L^* ยิ่งมาก ความสว่างของผลิตภัณฑ์ยิ่งสูง (Mcguire, 1992) จากข้อมูลที่ได้พบว่า ค่าสี L^* มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสี L^* ของวัตถุดิบ (ตารางที่ 4.5) แสดงว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความสว่างของผลิตภัณฑ์ลดลง แสดงว่าแคโรทีนอยด์มีผลทำให้ความสว่างของอิมัลชันลดลง และพบว่าค่าสี L^* ที่อัตราส่วนอิมัลชันร้อยละ 35 %โดยปริมาตร มีความแตกต่างกับระดับอิมัลชันอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากภาพที่ 4.2 พบว่า เมื่ออัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ใช้เพิ่มขึ้น ค่าสี a^* ของแคโรทีนอยด์ที่ดูดซับโดยแป้งชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าสี a^* เป็นค่าสีที่บ่งบอกถึงสีแดงและสีเขียวของผลิตภัณฑ์ หากค่าสีเป็นบวกแสดงว่าผลิตภัณฑ์นั้นมีสีแดง หรือหากมีค่าลบแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีสีเขียว (Mcguire, 1992) จากการทดลอง พบว่า ค่าสี a^* มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ใช้เพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีแดงมากขึ้น และพบว่าค่าสี a^* ที่อัตราส่วนอิมัลชันร้อยละ 35 %โดยปริมาตร มีความแตกต่างกับระดับอิมัลชันอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.4 การคัดเลือกแป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน

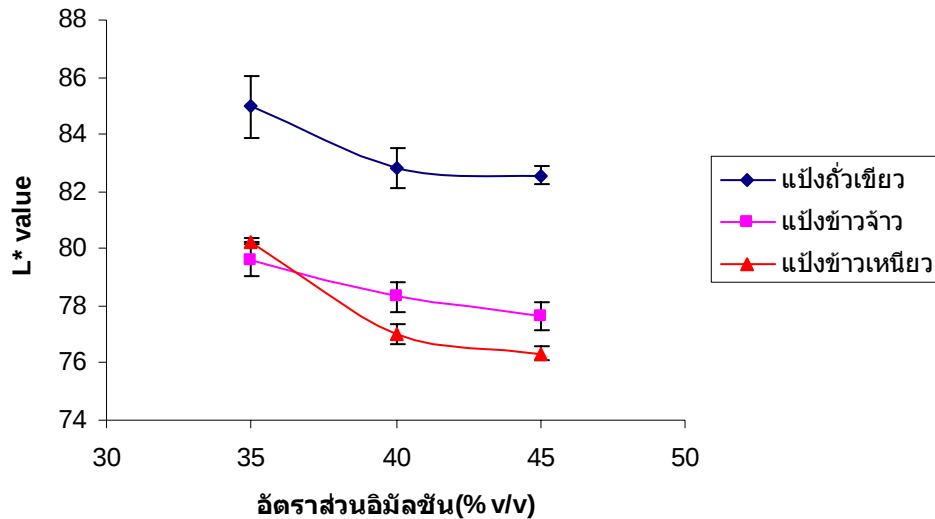
ชนิดแป้ง	อัตราส่วนปริมาณแคโรทีนอยด์ต่อแป้งโดยน้ำหนัก		
	3.0:10	4.0:10	5.0:10
ข้าวเจ้า	+	+	+
ข้าวเหนียว	+	+	+
ถั่วเขียว	+	+	+
มันสำปะหลัง	+	-	-
ข้าวสาลี	-	-	-
ข้าวโพด	-	-	-

หมายเหตุ : + หมายถึง อนุภาคที่ได้มีขนาดน้อยกว่า 1.19 มิลลิเมตร

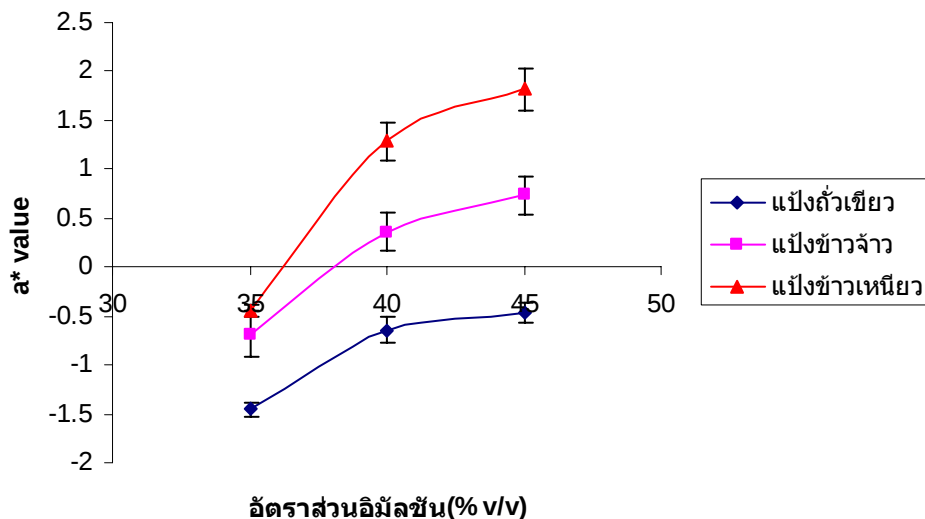
- หมายถึง อนุภาคที่ได้มีขนาดมากกว่า 1.19 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.5 คุณภาพทางเคมี และกายภาพของแป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์

ตัวอย่าง	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว	แป้งมันสำปะหลัง
ค่าสี L	97.00 ± 0.05	97.29 ± 0.04	98.43 ± 0.18	97.60 ± 0.06
ค่าสี a*	-0.25 ± 0.01	-0.34 ± 0.02	-0.18 ± 0.01	0.46 ± 0.04
ค่าสี b*	3.77 ± 0.03	4.13 ± 0.04	1.72 ± 0.01	3.83 ± 0.01
ค่า a_w	0.49 ± 0.00	0.40 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.38 ± 0.00
ปริมาณความชื้น (% wet basis)	11.86 ± 0.02	11.21 ± 0.05	12.10 ± 0.03	14.53 ± 0.11
ความพรุน	0.25 ± 0.00	0.26 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.32 ± 0.01

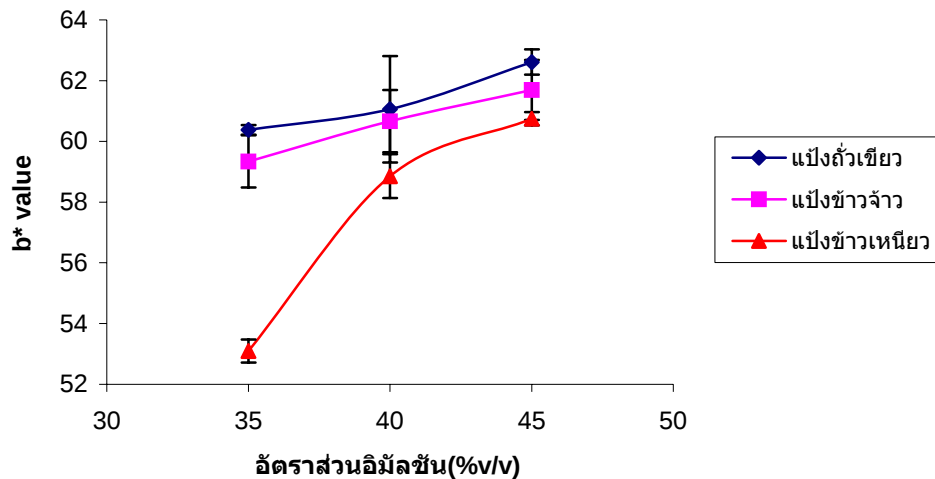


ภาพที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนน้ำมันต่อค่าสี L^* ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์น้ำมัน



ภาพที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนน้ำมันต่อค่าสี a^* ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์น้ำมัน

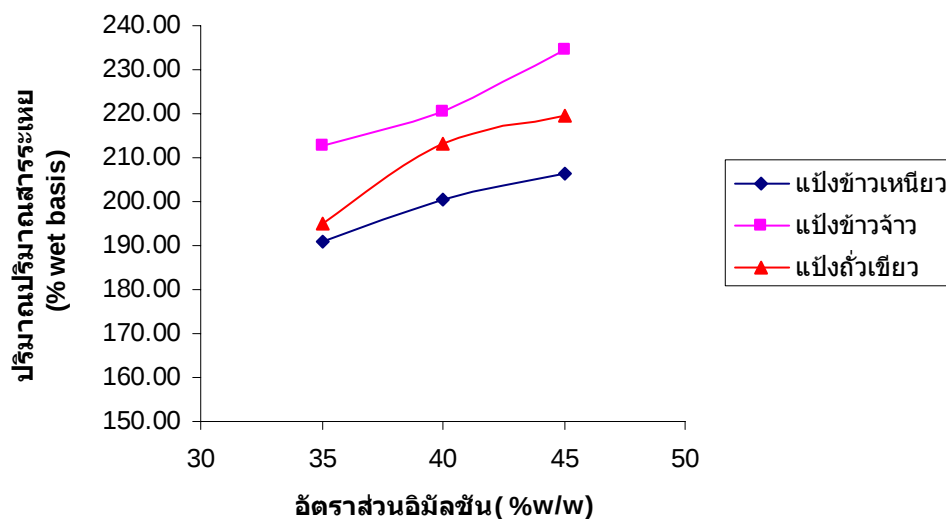
จากการศึกษาค่าสี b^* (ภาพที่ 4.3) พบว่าเมื่ออัตราส่วนแคโรทีนอยด์น้ำมันที่ใช้เพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าสี b^* ของแคโรทีนอยด์น้ำมันที่ดูดซับในแป้งชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าสี b^* เป็นค่าสีที่บ่งบอกถึงสีเหลืองและสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ หากค่าสีเป็นบวกแสดงว่าผลิตภัณฑ์นั้นมีสีเหลือง หรือหากมีค่าลบแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาล (Mcguire, 1992) จากการทดลอง พบว่า ค่าสี b^* มีการเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนแคโรทีนอยด์น้ำมันที่ใช้เพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณ แคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเหลืองมากขึ้นและพบว่าค่าสี b^* ที่อัตราส่วนแคโรทีนอยด์น้ำมันร้อยละ 35 % โดยปริมาตร มีความแตกต่างกับระดับน้ำมันอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อค่าสี b^* ของแป้งที่คูดซับกแคโรทีนอยด์อิมัลชัน

4.2.1.2 ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อปริมาณสารระเหยของแป้งที่คูดซับกแคโรทีนอยด์อิมัลชัน

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อปริมาณสารระเหยของแป้งคูดซับกแคโรทีนอยด์ พบว่า ปริมาณสารระเหยของแป้งคูดซับกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.4) เมื่ออัตราส่วนอิมัลชันที่ใช้เพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณสารระเหยมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้แป้งคูดซับกมีปริมาณสารระเหยสูงขึ้น และอัตราส่วนอิมัลชันทั้ง 3 ระดับมีปริมาณปริมาณสารระเหยความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปริมาณสารระเหยกับอัตราส่วนอิมัลชัน

4.2.1.3 ผลของอัตราส่วนอิมัลชันต่อค่า a_w ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราส่วน แคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ใช้เพิ่มขึ้น แสดงว่าอัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ และค่าวอเตอร์แอคทีวิตีของการทดลองที่ใช้อัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันทั้ง 3 ระดับในผลิตภัณฑ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.6 ค่า a_w ของแป้งที่ดูดซับแคโรทีนอยด์ที่ใช้อัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันต่าง ๆ

อัตราส่วนอิมัลชัน (%v/v)	ค่า a_w		
	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
35	$0.891^a \pm 0.00$	$0.890^a \pm 0.00$	$0.893^a \pm 0.00$
40	$0.895^a \pm 0.00$	$0.893^a \pm 0.00$	$0.894^a \pm 0.00$
45	$0.899^a \pm 0.00$	$0.895^a \pm 0.00$	$0.897^a \pm 0.00$

เมื่อนำปริมาณบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์แป้งดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชันต่าง ๆ มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ (ภาคผนวกที่ ก.2.5) พบว่าร้อยละของประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ (% Encapsulation Efficiency) จากการทดลองในแป้งข้าวเจ้า และแป้งถั่วเขียว ให้ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ที่อัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 35 % โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ต่ำกว่าที่อัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 40 และ 45 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้การใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นตัวดูดซับที่อัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 40 % โดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์สูงสุด คือ 55.41 % (ตารางที่ 4.7) ซึ่งประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ที่ศึกษานี้ให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับการทดลองทำแคโรทีนอยด์ผงจากกากของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งได้ประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์เฉลี่ย เท่ากับ 51 ± 1 % (Chen and Tang, 1998)

ตารางที่ 4.7 ร้อยละประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์ (% Encapsulation Efficiency) ในการดูดซับแคโรทีนอยด์อิมัลชันด้วยแป้งชนิดต่าง ๆ

อัตราส่วนอิมัลชัน (%v/v)	% Encapsulation Efficiency		
	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
35	$42.06^b \pm 1.45$	$20.29^a \pm 2.24$	$32.39^b \pm 2.74$
40	$55.41^a \pm 0.73$	$21.73^a \pm 0.71$	$45.63^a \pm 0.80$
45	$53.49^a \pm 1.37$	$19.28^a \pm 0.09$	$42.63^a \pm 2.01$

จากการคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของแคโรทีนอยด์อิมัลชันต่อแป้งคุดชับ พบว่า การใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นตัวคุดชับที่ระดับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 40 % โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์อิมัลชันสูงที่สุด คือ 55.41 % (ตารางที่ 4.7) และอัตราส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่เลือก คือ 40 % โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพในการกักเก็บแคโรทีนอยด์อิมัลชันสูงกว่าอัตราส่วนอื่น โดยเมื่ออัตราส่วนส่วนแคโรทีนอยด์อิมัลชันเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสว่างลดลง มีสีเหลืองและสีแดงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าแป้งคุดชับแคโรทีนอยด์มีค่า a_w สูงกว่า 0.6 ซึ่งจุลินทรีย์สามารถเจริญได้ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอายุการเก็บรักษาที่ไม่นาน (สุคนธ์ชื่น, 2546) ดังนั้นหลังจากคุดชับแคโรทีนอยด์ด้วยแป้งชนิดต่าง ๆ แล้วจึงต้องนำไปทำให้แห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศเปรียบเทียบกับการทำงานแห้งโดยใช้ไมโครเวฟระบบสุญญากาศในการทดลองที่ 4.2.2 และ 4.2.3

4.2.2 การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

การทำแห้งแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชันโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ใช้แป้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว และแป้งถั่วเขียว ในอัตราส่วนแป้งต่อแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 2:1 โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 40, 50 หรือ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำแห้ง 30, 45 หรือ 60 นาที

จากตารางที่ 4.8 พบว่า การให้ความร้อนหรือใช้อุณหภูมิสูงขึ้นร่วมกับการใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น มีผลทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.2.4) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และ จากตารางที่ 4.9 พบว่า ค่า a_w ของตัวอย่างมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) เมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น

จาก การศึกษาสัดส่วนของอิมัลชัน (ตอนที่ 4.2.1) และการอบแห้งระบบสุญญากาศ (ตอนที่ 4.2.2) สรุปได้ว่า ควรใช้แป้งถั่วเขียวเป็นตัวคุดชับแคโรทีนอยด์อิมัลชัน โดยใช้อัตราส่วนแป้งต่อแคโรทีนอยด์อิมัลชัน 2:1 โดยน้ำหนัก ใช้สัดส่วนอิมัลชัน 40 % โดยปริมาตร และใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ในการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศ เนื่องจากได้ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดสูงสุด คือ 315.72 $\mu\text{g/g}$ ได้ผลผลิตคงเหลือสูงสุด คือ 63.75 % ของน้ำหนักแคโรทีนอยด์รวมเริ่มต้น (ตารางที่ 4.10) และผลิตภัณฑ์มีค่า a_w เท่ากับ 0.50 ซึ่งต่ำกว่า 0.60 ซึ่งสามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีสีเหลืองส้ม (ภาพ ก.2.3)

ตารางที่ 4.8 ปริมาณปีตาแคโรทีน ($\mu\text{g/g}$) ในแป้งดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการผลิต
แคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

สภาวะที่ใช้		ปริมาณปีตาแคโรทีน ($\mu\text{g/g}$) ในแป้งดูดซับ		
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
40	30	$312.47^{\text{aB}} \pm 6.66$	$304.00^{\text{aB}} \pm 9.29$	$355.68^{\text{aA}} \pm 3.60$
	45	$295.45^{\text{bB}} \pm 12.91$	$290.44^{\text{abB}} \pm 20.29$	$337.53^{\text{abcA}} \pm 19.82$
	60	$287.75^{\text{bB}} \pm 12.05$	$287.46^{\text{abcB}} \pm 14.74$	$334.86^{\text{abcA}} \pm 1.95$
50	30	$265.88^{\text{cB}} \pm 6.17$	$283.87^{\text{abcB}} \pm 3.13$	$343.43^{\text{abA}} \pm 23.88$
	45	$262.09^{\text{cB}} \pm 3.67$	$267.15^{\text{cdeB}} \pm 1.53$	$331.71^{\text{abA}} \pm 4.89$
	60	$241.52^{\text{dB}} \pm 2.29$	$247.87^{\text{efB}} \pm 6.77$	$315.72^{\text{cA}} \pm 3.63$
60	30	$245.99^{\text{dB}} \pm 5.10$	$264.22^{\text{defB}} \pm 22.99$	$318.35^{\text{cA}} \pm 13.81$
	45	$239.64^{\text{dB}} \pm 8.56$	$243.77^{\text{efB}} \pm 1.54$	$265.22^{\text{dA}} \pm 3.95$
	60	$231.89^{\text{dA}} \pm 5.99$	$241.97^{\text{fA}} \pm 15.93$	$261.47^{\text{dA}} \pm 10.81$

หมายเหตุ: a, b, c, d, e และ f เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

A และ B เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

ตารางที่ 4.9 ค่า a_w ของแคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งที่ทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

สภาวะที่ใช้		a_w ของแคโรทีนอยด์อิมัลชัน ในแป้งดูดซับ		
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
40	30	$0.88^{\text{eC}} \pm 0.00$	$0.85^{\text{hB}} \pm 0.01$	$0.83^{\text{hA}} \pm 0.00$
	45	$0.76^{\text{dB}} \pm 0.00$	$0.75^{\text{gA}} \pm 0.00$	$0.78^{\text{gC}} \pm 0.01$
	60	$0.75^{\text{dB}} \pm 0.00$	$0.73^{\text{fA}} \pm 0.00$	$0.73^{\text{fA}} \pm 0.00$
50	30	$0.77^{\text{dC}} \pm 0.00$	$0.76^{\text{gB}} \pm 0.00$	$0.71^{\text{eA}} \pm 0.00$
	45	$0.66^{\text{cB}} \pm 0.00$	$0.61^{\text{dA}} \pm 0.02$	$0.67^{\text{dC}} \pm 0.01$
	60	$0.53^{\text{bC}} \pm 0.00$	$0.46^{\text{bA}} \pm 0.00$	$0.50^{\text{bB}} \pm 0.00$
60	30	$0.76^{\text{dB}} \pm 0.00$	$0.71^{\text{eA}} \pm 0.00$	$0.71^{\text{eA}} \pm 0.00$
	45	$0.54^{\text{bB}} \pm 0.01$	$0.58^{\text{cC}} \pm 0.01$	$0.51^{\text{cA}} \pm 0.00$
	60	$0.43^{\text{aC}} \pm 0.02$	$0.39^{\text{aB}} \pm 0.00$	$0.32^{\text{aA}} \pm 0.00$

หมายเหตุ a, b, c, d, e, f, g, และ h เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

A, B, และ C เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

ตารางที่ 4.10 ร้อยละของบีตาแคโรทีนที่ได้กลับคืนมา (% Recovery of beta-carotene) ของ
แคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

สถานะที่ใช้		ร้อยละของบีตาแคโรทีนที่ได้กลับคืนมา		
อุณหภูมิ(°C)	เวลา (นาที)	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
40	30	63.09 ± 1.35	61.38 ± 1.88	71.82 ± 0.73
	45	59.66 ± 2.61	58.64 ± 4.10	68.15 ± 4.00
	60	58.10 ± 2.43	58.04 ± 2.98	67.61 ± 0.39
50	30	53.69 ± 1.25	57.32 ± 0.63	69.34 ± 4.82
	45	52.92 ± 0.74	53.94 ± 0.31	66.98 ± 0.99
	60	48.77 ± 0.46	50.05 ± 1.37	63.75 ± 0.73
60	30	49.67 ± 1.03	53.35 ± 4.64	64.28 ± 2.79
	45	48.39 ± 1.73	49.22 ± 0.31	53.55 ± 0.80
	60	46.82 ± 3.23	48.86 ± 3.22	52.80 ± 2.18

4.2.3 การทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาการทำแห้งแคโรทีนอยด์ด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ได้ใช้แป้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว และแป้งถั่วเขียว เป็นตัวดูดซับ ได้ใช้อัตราส่วน แคโรทีนอยด์อิมัลชัน 40 % โดยปริมาตร (ตอนที่ 4.2.1) และใช้กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 720, 960 หรือ 1200 วัตต์ ใช้เวลาในการทำแห้งที่ใช้ 5, 10 หรือ 15 นาที

ผลการศึกษา (ตารางที่ 4.11 และ 4.12) พบว่า ปริมาณบีตาแคโรทีนในตัวอย่าง แคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้ง มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อได้รับความร้อน เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มกำลังวัตต์ขึ้น และจากการใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น และพบว่า ค่า a_w สัมพันธ์กับระดับกำลังวัตต์ที่ใช้และระยะเวลาในการอบแห้ง โดยกำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการอบแห้งนานขึ้นเป็นผลให้ ค่า a_w ในตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เหลืออยู่ภายหลังการอบแห้ง และค่า a_w สรุปได้ว่าการใช้แป้งถั่วเขียวเป็นตัวดูดซับ และใช้การอบแห้งที่ กำลังวัตต์ 720 เป็นเวลา 15 นาที เป็นสถานะที่เหมาะสมในการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ เนื่องจาก มีปริมาณแคโรทีนอยด์ ทั้งหมดหลงเหลืออยู่สูงสุด คือ 371.42 $\mu\text{g/g}$ ได้ผลผลิตคงเหลือสูงสุด คือ 75.00 % ของน้ำหนัก แคโรทีนอยด์เริ่มต้น (ตารางที่ 4.13) และให้ค่า a_w เท่ากับ 0.52 ซึ่งต่ำกว่า 0.6 ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นอนุภาคนขนาดเล็ก มีสีเหลืองส้ม (ภาพ ค.25)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณบิตาแคโรทีน ($\mu\text{g/g}$) ในแป้งดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการผลิต
แคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

สถานะที่ใช้		ปริมาณบิตาแคโรทีน ($\mu\text{g/g}$) ในแป้งดูดซับ		
กำลัง (watt)	เวลา (นาที)	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
720	5	$357.17^{aA} \pm 10.42$	$361.73^{aA} \pm 11.11$	$386.09^{aA} \pm 42.13$
	10	$352.32^{aB} \pm 1.18$	$357.99^{aB} \pm 11.32$	$374.50^{abA} \pm 7.43$
	15	$339.12^{bA} \pm 10.97$	$353.33^{aA} \pm 42.24$	$371.42^{abcA} \pm 8.13$
960	5	$357.27^{aA} \pm 1.18$	$353.21^{aA} \pm 22.79$	$369.27^{abcA} \pm 7.39$
	10	$322.17^{cC} \pm 1.43$	$348.16^{aB} \pm 2.94$	$362.86^{abcdA} \pm 4.68$
	15	$309.86^{dC} \pm 1.18$	$348.29^{aB} \pm 32.58$	$350.21^{bcdA} \pm 5.32$
1200	5	$335.96^{bC} \pm 4.07$	$345.77^{aB} \pm 0.62$	$369.12^{abcA} \pm 1.33$
	10	$283.40^{eC} \pm 2.26$	$321.76^{aB} \pm 13.97$	$344.32^{cdA} \pm 5.59$
	15	$286.71^{eB} \pm 5.32$	$264.67^{bC} \pm 14.86$	$338.00^{dA} \pm 4.21$

หมายเหตุ a, b, c, d และ e เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

A, B, และ C เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

ตารางที่ 4.12 ค่า a_w ของแคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งที่ทำแห้งโดยใช้เครื่องไมโครเวฟระบบ
สุญญากาศ

สถานะที่ใช้		ค่า a_w ของแคโรทีนอยด์อิมัลชัน ในแป้งดูดซับ		
กำลัง (watt)	เวลา (นาที)	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
720	5	$0.87^{fC} \pm 0.00$	$0.84^{fB} \pm 0.00$	$0.78^{fA} \pm 0.01$
	10	$0.85^{fC} \pm 0.00$	$0.84^{fB} \pm 0.00$	$0.70^{eA} \pm 0.00$
	15	$0.81^{dC} \pm 0.01$	$0.76^{dB} \pm 0.00$	$0.52^{dA} \pm 0.01$
960	5	$0.86^{fC} \pm 0.01$	$0.83^{fB} \pm 0.00$	$0.78^{fA} \pm 0.01$
	10	$0.85^{fC} \pm 0.00$	$0.80^{eB} \pm 0.00$	$0.70^{eA} \pm 0.01$
	15	$0.70^{cC} \pm 0.00$	$0.60^{cB} \pm 0.00$	$0.46^{cA} \pm 0.00$
1200	5	$0.83^{eC} \pm 0.02$	$0.80^{eB} \pm 0.00$	$0.70^{eA} \pm 0.02$
	10	$0.48^{bB} \pm 0.01$	$0.55^{bC} \pm 0.00$	$0.42^{bA} \pm 0.01$
	15	$0.23^{aC} \pm 0.00$	$0.20^{aB} \pm 0.00$	$0.14^{aA} \pm 0.00$

หมายเหตุ a, b, c, d, e และ f เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

A, B, และ C เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติในแนวนอน

ตารางที่ 4.13 ร้อยละของผลผลิตบีตาแคโรทีนที่ได้กลับคืนมา (% Recovery of beta-carotene) ของ
แคโรทีนอยด์อิมัลชันที่ทำแห้งโดยใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

สภาวะที่ใช้		ปริมาณบีตาแคโรทีน ($\mu\text{g/g}$) ในแป้งดูดซับ		
กำลัง (watt)	เวลา (นาที)	แป้งข้าวเจ้า	แป้งข้าวเหนียว	แป้งถั่วเขียว
720	5	72.12 ± 2.10	73.04 ± 2.24	77.96 ± 8.51
	10	71.14 ± 0.24	72.28 ± 2.29	75.62 ± 1.50
	15	68.47 ± 2.21	71.34 ± 8.53	75.00 ± 1.64
960	5	72.14 ± 0.36	71.32 ± 4.60	74.56 ± 1.49
	10	65.05 ± 0.29	70.30 ± 0.59	73.27 ± 0.95
	15	62.57 ± 0.24	70.33 ± 6.58	70.71 ± 1.07
1200	5	67.84 ± 0.82	69.82 ± 0.13	74.53 ± 0.27
	10	57.22 ± 0.46	64.97 ± 2.82	69.52 ± 1.13
	15	57.89 ± 1.07	53.44 ± 3.00	68.25 ± 0.85

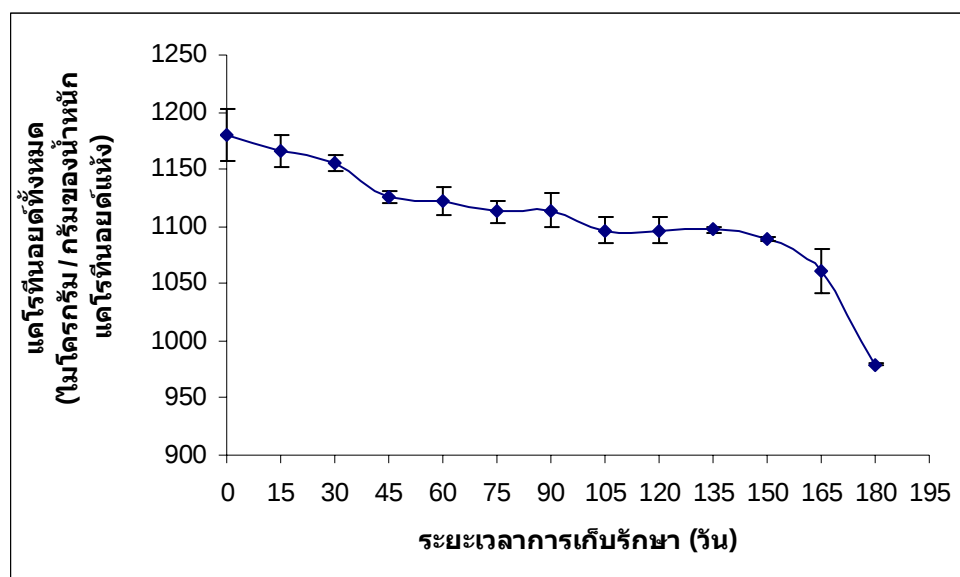
จากการทดลองตอนที่ 4.2.2 และ 4.2.3 พบว่า ควรใช้แป้งถั่วเขียวเป็นตัวดูดซับ
แคโรทีนอยด์อิมัลชัน โดยใช้อัตราส่วนแป้งต่อ แคโรทีนอยด์อิมัลชัน 2:1 โดยน้ำหนัก ใช้สัดส่วน
อิมัลชัน 40 % โดยปริมาตร สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ และเครื่อง
ไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ได้ผลผลิตคงเหลือสูงสุด คือ 63.75 % และ 75.00 % ของน้ำหนัก
แคโรทีนอยด์รวมเริ่มต้น ตามลำดับ ดังนั้นการทำแห้งแคโรทีนอยด์อิมัลชันที่เหมาะสมที่สุด คือ ใช้
เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ที่กำลังวัตต์ 720 เป็นเวลา 15 นาที

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งระหว่างการเก็บรักษา

4.3.1 แคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมันที่ทำแห้งโดยใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวดูดซับระหว่างการเก็บรักษา

4.3.1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีน

จากภาพที่ 4.5 พบว่า ปริมาณของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยในช่วง 3 เดือนแรก ปริมาณบีตาแคโรทีนมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากนั้นปริมาณบีตาแคโรทีนยังคงลดลงจนกระทั่งเดือนที่ 5 แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และจะลดลงอย่างมากในเดือนที่ 6



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีนของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4.3.1.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ในแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน

ในช่วงเก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียส นอกจากจะได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์แล้ว ยังได้ทำการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ตลอดจนปริมาณยีสต์และรา แม้ว่าผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งจะไม่มีข้อกำหนดคุณภาพของจุลินทรีย์ แต่เมื่อเทียบกับคุณภาพมาตรฐานของอาหารแห้ง ซึ่งกำหนดให้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 4 log cfu/g, ราและยีสต์ไม่

เกิน 2 log cfu/g (ภาคผนวก ข.3.3) จึงสรุปได้ว่าแคโรทีนอยด์แห้งที่ละลายในน้ำมันยังมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์ได้มาตรฐานเมื่อเก็บไว้นาน 6 เดือน

จากการที่ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ตาราง 4.14) อาจเป็นผลมาจากการใช้บรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมฟรอยด์ในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งมีออกซิเจนต่ำ ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ใช้ออกซิเจน (aerobe) อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobe) ยังสามารถเจริญได้ (Hymavathi and Khader, 2005)

จากตารางที่ 4.15 พบว่า ปริมาณยีสต์และราของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันตลอดที่การเก็บรักษามีแนวโน้มคงที่ โดยเมื่อเก็บนาน 6 เดือน พบปริมาณยีสต์และราในผลิตภัณฑ์ไม่เกินค่ามาตรฐาน แสดงว่า ยีสต์และราในแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมัน อาจมีออกซิเจนที่จำเป็นต้องใช้ในการเจริญไม่เพียงพอของยีสต์และรา (Hymavathi and Khader, 2005)

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน โดยใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวดูดซับแคโรทีนอยด์ ระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ปริมาณบีตาแคโรทีนมีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน มีอายุการเก็บมากกว่า 6 เดือน

ตารางที่ 4.14 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายตัวในน้ำมันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาเก็บรักษา(วัน)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/g)
0	1.00
15	2.11
30	2.35
45	2.38
60	2.42
75	2.51
90	2.57
105	2.60
120	2.63
135	2.74
150	2.77
165	2.80
180	1.86

ตารางที่ 4.15 ปริมาณยีสต์และราของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายตัวในน้ำมันตลอดระยะเวลา
การเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

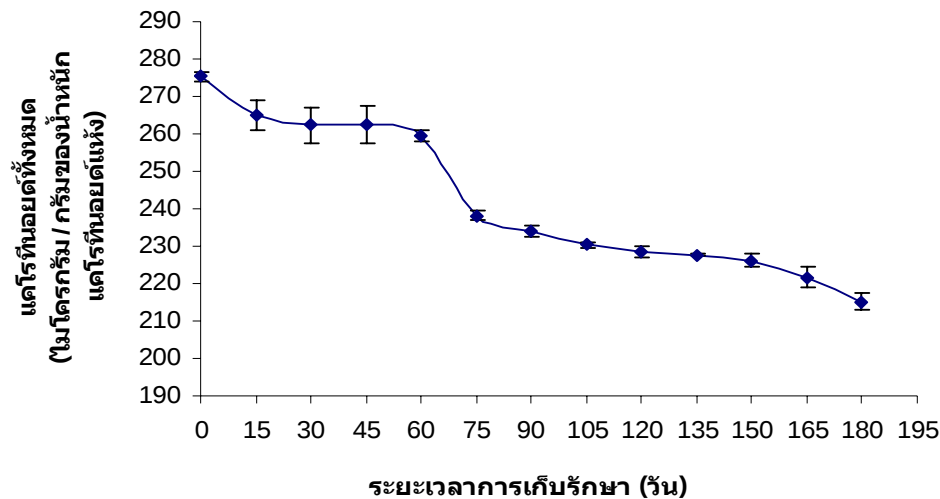
ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ปริมาณยีสต์และรา (log cfu/g)
0	< 1
15	< 1
30	< 1
45	< 1
60	< 1
75	1.00
90	1.00
105	1.00
120	1.05
135	1.20
150	1.30
165	1.30

หมายเหตุ : < 1 = มีปริมาณน้อยกว่า 1 log cfu/g

4.3.2 แคโรทีนอยด์รูปอิมัลชันที่ทำแห้งโดยใช้แป้งข้าวเปียกเป็นตัวดูดซับระหว่างการเก็บรักษา

4.3.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีน

จากภาพที่ 4.6 พบว่า ปริมาณของบีตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชันที่เก็บรักษาในช่วง 3 เดือนแรก ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน ในช่วง 3 เดือนแรก มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากนั้นปริมาณบีตาแคโรทีนยังคงลดลงจนกระทั่งเดือนที่ 6 อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบิตาแลคโธของแลคโธโนยด์แห่งรูปอิมัลชัน
ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4.3.2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์

ในช่วงเก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียส นอกจากจะได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแลคโธโนยด์แล้ว ยังได้ทำการศึกษากิจกรรมจุลินทรีย์ทั้งหมด ตลอดจนปริมาณยีสต์และรา แม้ว่าผลิตภัณฑ์แลคโธโนยด์แห่งจะไม่มีข้อกำหนดคุณภาพของจุลินทรีย์ แต่เมื่อเทียบกับคุณภาพมาตรฐานของอาหารแห้ง ซึ่งกำหนดให้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน $4 \log \text{cfu/g}$, ราและยีสต์ไม่เกิน $2 \log \text{cfu/g}$ (ภาคผนวก ข.3.3) ดังนั้นแลคโธโนยด์แห่งที่สกัดจากแลคโธโนยด์รูปอิมัลชันยังมีคุณภาพได้มาตรฐานเมื่อเก็บไว้นาน 6 เดือน

จากตารางที่ 4.16 พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแลคโธโนยด์แห่งที่ผลิตจากแลคโธโนยด์รูปอิมัลชันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน มีจำนวนเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น แต่พบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน $2.65 \log \text{cfu/g}$ การที่ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากการใช้บรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมฟรอยด์ในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งได้อธิบายไปแล้วข้างต้น (Hymavathi and Khader, 2005)

จากตารางที่ 4.17 พบว่า ยีสต์และราในแลคโธโนยด์แห่งรูปอิมัลชันมีการเจริญได้ไม่ดี โดยพบไม่เกิน $1.00 \log \text{cfu/g}$ ดังนั้นผลิตภัณฑ์แลคโธโนยด์แห่งรูปอิมัลชัน จึงมีอายุการเก็บได้มากกว่า 6 เดือน เหมือนในกรณีของแลคโธโนยด์ในรูปละลายในน้ำมัน

ตารางที่ 4.16 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห่งรูปอิมัลชันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/g)
0	< 1
15	1.10
30	1.74
45	1.86
60	1.92
75	2.15
90	2.25
105	2.34
120	2.40
135	2.43
150	2.51
165	2.65
180	1.88

หมายเหตุ : < 1 = มีปริมาณน้อยกว่า 1 log cfu/g

ตารางที่ 4.17 ปริมาณยีสต์และราของแคโรทีนอยด์แห่งรูปอิมัลชันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ปริมาณยีสต์และรา (log cfu/g)
0	< 1
15	< 1
30	< 1
45	< 1
60	< 1
75	1.00
90	1.00
105	1.00
120	1.00
135	1.00
150	1.00
165	1.00

หมายเหตุ : < 1 = มีปริมาณน้อยกว่า 1 log cfu/g

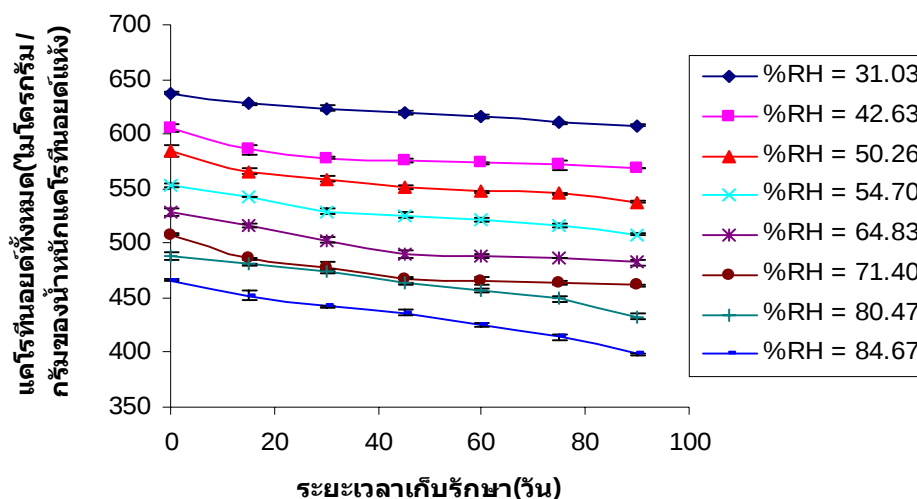
4.4 การศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งระหว่างการเก็บรักษา

4.4.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน

4.4.1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีน

ระหว่างการเก็บรักษาแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมันในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ระดับต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน พบว่า ปริมาณบีตาแคโรทีนมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 4.7

เนื่องจากปริมาณเริ่มต้นของแคโรทีนอยด์แห้งที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นการวัดผลของความชื้นสัมพัทธ์จึงประเมินโดยใช้อัตราการลดลงของบีตาแคโรทีน ซึ่งพบว่า การเก็บแคโรทีนอยด์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าจะมีอัตราการลดลงต่ำกว่า (ตาราง 4.18) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงอาหารจะเกิดการดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ดีกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า (Shrestha *et al.*, 2007) เมื่ออาหารดูดความชื้นจากอากาศมากขึ้นปริมาณน้ำในอาหารสูงขึ้น เป็นผลให้แคโรทีนอยด์สลายตัวจากปฏิกิริยาไฮโดรไลเซชันและการสร้างอีพอกไซด์มากขึ้น (Hymavathi & Khader, 2005) ดังนั้นการเก็บรักษาแคโรทีนอยด์แห้ง ควรใช้ภาชนะบรรจุที่สามารถป้องกันความชื้นได้ดี และ ควรเก็บในที่แห้ง



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีนของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือนในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

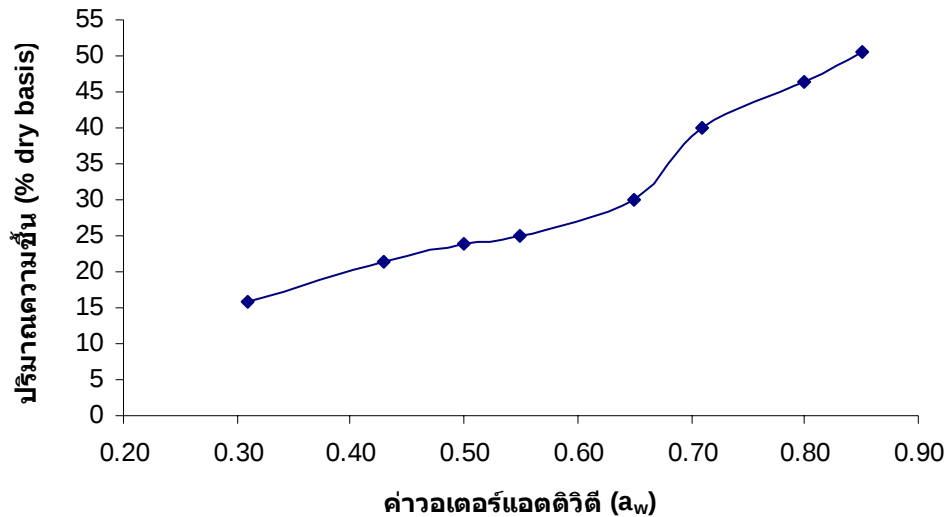
ตารางที่ 4.18 การลดลงของปีตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ร้อยละการลดลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (%)	อัตราการลดลง (($\mu\text{g/g}$)/ เดือน)
31.03	$2.88^a \pm 0.77$	9.50
42.63	$3.18^a \pm 0.02$	10.38
50.26	$4.89^b \pm 0.48$	13.60
54.70	$5.10^b \pm 0.13$	13.97
64.83	$6.43^c \pm 0.15$	14.78
71.40	$6.50^c \pm 0.23$	15.02
80.47	$10.00^d \pm 0.45$	17.53
84.67	$11.81^e \pm 0.93$	21.04

4.4.1.2 Moisture sorption isotherms ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน

จากภาพที่ 4.8 เป็นกราฟ Sorption Isotherms ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งกราฟ Sorption Isotherm ที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปโค้ง (sigmoidal curve) ประกอบด้วย เส้นกราฟ Adsorption isotherm ที่ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.51 – 0.85 และเส้นกราฟ Desorption isotherm ที่ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.31 – 0.51 ทั้งนี้ที่ค่า a_w ระหว่าง 0.31 ถึง 0.55 กราฟจะมีความชันต่ำ แสดงว่า ช่วงนี้อาหารดูดความชื้นได้ต่ำ จนถึงที่ a_w มากกว่า 0.55 กราฟเริ่มมีความชันเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถในการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น โดยน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอาหารจะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาของเอนไซม์ และถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ และใช้ในปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเป็นเหตุให้อาหารเสียได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงควรเก็บแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 54.70 % หรือทำให้ผลิตภัณฑ์ มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.55 (Debnath *et al.*, 2002)

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบการศึกษาที่ผ่านมาของ Goula *et al.* ในปี 2008 พบว่า แคโรทีนอยด์จากเนื้อมะเขือเทศที่ทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้กราฟ Sorption Isotherm ที่มีลักษณะเป็นรูปโค้ง คล้ายกับการทดลองนี้ แต่กราฟที่ได้จะดูดความชื้นอย่างรวดเร็วที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 60 %



ภาพที่ 4.8 Moisture sorption isotherm ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน
ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.4.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ความชื้น สัมพัทธ์ต่าง ๆ

ในช่วงเก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ นอกจากจะได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์แล้ว ยังได้ทำการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตลอดจนปริมาณยีสต์และราด้วย พบว่า แคโรทีนอยด์แห้งที่สกัดจากแคโรทีนอยด์ที่ละลายในน้ำมัน ยังมีคุณภาพทางจุลินทรีย์ได้มาตรฐานเมื่อเก็บไว้นาน 3 เดือน (ตาราง 4.19) ทั้งนี้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งที่ผลิตจากแคโรทีนอยด์ที่ละลายในน้ำมันที่เก็บที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 2.34-3.92 log cfu/g เมื่อเก็บนาน 3 เดือน และสำหรับที่ระดับร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงจะมีปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์สูงด้วย เป็นเหตุให้จุลินทรีย์มีน้ำที่ใช้ในการเจริญได้ดีกว่าระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่า

จากตารางที่ 4.20 พบว่า ปริมาณยีสต์และราของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน มีแนวโน้มคงที่ โดยเมื่อเก็บนาน 3 เดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 64.83 ขึ้นไปพบ ปริมาณยีสต์และราในผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 1.33 log cfu/g

จากการการศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน โดยใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวดูดซับแคโรทีนอยด์ ระหว่างการเก็บรักษาพบว่า อัตราการสูญเสียปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด คือ 9.50 ($\mu\text{g/g}$) ต่อเดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 31.03 % โดยการเก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะทำให้แคโรทีนอยด์ลดลงมากขึ้น ($p > 0.05$) และผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 84.76 % สามารถเก็บไว้ได้อย่างน้อย 3 เดือน แต่การเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 54.70 % จะช่วยให้มีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น

ตารางที่ 4.19 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันระหว่างการเก็บรักษา ในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการเก็บรักษา	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/g) ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (%)							
	31.03	42.63	50.26	54.70	64.83	71.40	80.47	84.67
0	1.71	1.98	3.08	3.20	3.17	3.21	3.30	3.34
15	1.76	2.03	3.13	3.22	3.23	3.29	3.34	3.42
30	1.85	2.13	3.17	3.23	3.24	3.30	3.35	3.44
45	1.93	2.17	3.24	3.25	3.31	3.34	3.41	3.53
60	2.21	2.27	3.35	3.42	3.43	3.54	3.74	3.81
75	2.25	2.27	3.36	3.43	3.44	3.55	3.74	3.82
90	2.34	2.34	3.39	3.44	3.50	3.66	3.82	3.92

ตารางที่ 4.20 ปริมาณยีสต์และราของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายตัวในน้ำมันระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน

ระยะเวลาในการเก็บรักษา	ปริมาณยีสต์และรา (log cfu/g) ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (%)							
	31.03	42.63	50.26	54.70	64.83	71.40	80.47	84.67
0	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00
15	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.10
30	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.13
45	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.13
60	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.13
75	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.13	1.13
90	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.13	1.13

หมายเหตุ : < 1 = มีปริมาณน้อยกว่า 1 log cfu/g

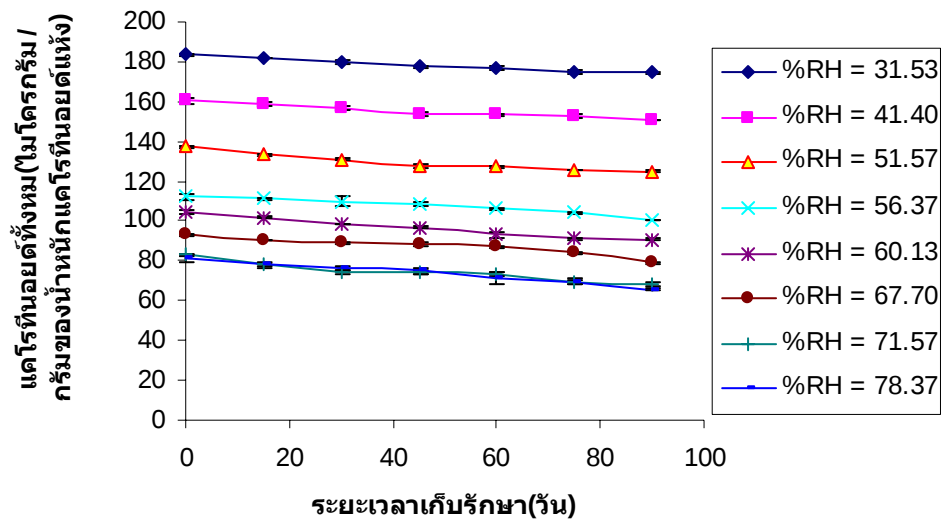
4.4.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแคโรทีนอยด์รูปอิมัลชัน

4.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีน

จากภาพที่ 4.9 พบว่า ระหว่างการเก็บรักษาแคโรทีนอยด์ในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ระดับต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน พบว่า ปริมาณบีตาแคโรทีนมีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เนื่องจากปริมาณเริ่มต้นของการทำแห้งแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันมีความแตกต่างของปริมาณบีตาแคโรทีนเริ่มต้น ดังนั้นการวัดผลของความชื้นสัมพัทธ์จึงประเมินโดยใช้อัตราการลดลงของบีตาแคโรทีน โดยการเก็บแคโรทีนอยด์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าจะมีอัตราการลดลงต่ำกว่า (ตาราง 4.21) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงอาหารจะเกิดการดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ดีกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า (Shrestha *et al.*, 2007) เช่นเดียวกับการทดลองในแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน

จากตารางที่ 4.3.8 แสดงถึง อัตราการสูญเสียปริมาณบีตาแคโรทีนมีค่ามากที่สุด คือ 4.94 ($\mu\text{g/g}$) ต่อเดือนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 78.37 % และมีค่าน้อยสุด คือ 3.06 ($\mu\text{g/g}$) ต่อเดือนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 31.53 % สรุปได้ว่า การลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าจะมีการสลายตัวของบีตาแคโรทีนน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงอาหารจะเกิดการดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ดีกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า (Shrestha *et al.*, 2007) เมื่ออาหารดูดความชื้นจากอากาศมากขึ้นปริมาณน้ำในอาหารสูงขึ้น เป็นผลให้แคโรทีนอยด์สลายตัวจากปฏิกิริยาไฮโดรไลเซชันและการสร้างอีพอกไซด์มากขึ้น (Hymavathi & Khader, 2005) ดังนั้น การเก็บรักษาแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันควรใช้ภาชนะบรรจุที่สามารถป้องกันความชื้นได้ดี และ ควรเก็บในที่แห้ง



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบิตาแคโรทีนของแคะโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือนในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

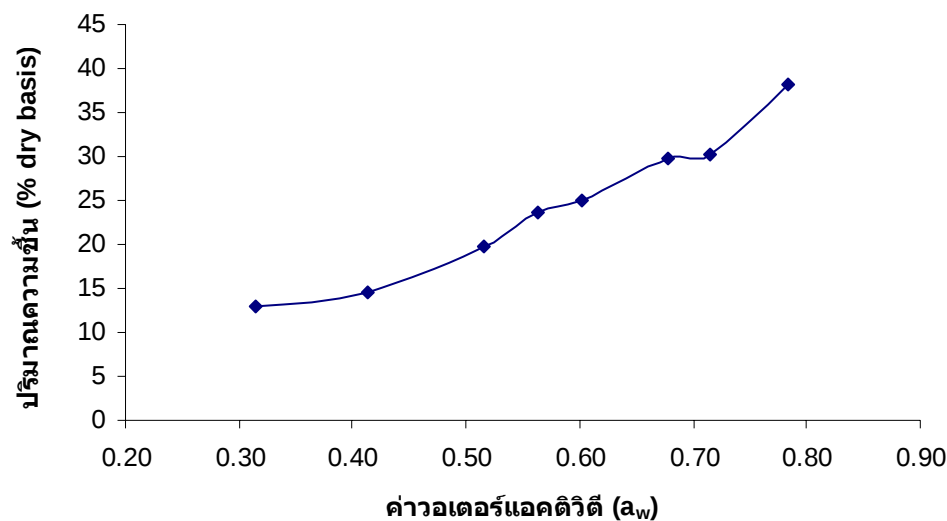
ตารางที่ 4.21 การลดลงของบิตาแคโรทีนในแคะโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ร้อยละการลดลงเมื่อเก็บรักษา เป็นเวลา 3 เดือน	อัตราการลดลง (µg/g)/ เดือน
31.53	4.92 ^a ± 0.70	3.06
41.40	5.78 ^a ± 0.82	3.24
51.57	9.07 ^b ± 0.42	3.57
56.37	10.15 ^b ± 1.24	3.71
60.13	13.11 ^c ± 0.52	4.11
67.70	15.37 ^d ± 0.94	4.40
71.57	17.70 ^e ± 1.33	4.53
78.37	19.56 ^e ± 1.96	4.94

4.4.2.2 Moisture sorption isotherms ของแคะโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชัน

จากภาพที่ 4.10 เป็นกราฟ Sorption Isotherms ของแคะโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งกราฟ Sorption Isotherm ที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปโค้ง เช่นเดียวกับการทดลองของแคะโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ประกอบด้วย เส้นกราฟ Adsorption isotherm ที่ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.51 – 0.78 และเส้นกราฟ Desorption isotherm ที่ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.32 – 0.51 ทั้งนี้ที่ค่า a_w

ระหว่าง 0.31 ถึง 0.60 กราฟจะมีความชันต่ำ แสดงว่า ช่วงนี้อาหารดูดความชื้นได้ต่ำ จนที่ a_w มากกว่า 0.60 กราฟเริ่มมีความชันเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถในการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น โดยน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอาหารจะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาของ เอนไซม์ และถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ และใช้ในปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเป็นเหตุให้อาหารเสียได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงควรเก็บแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 60.13 % หรือทำให้ผลิตภัณฑ์ มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 (Debnath *et al.*, 2002)



ภาพที่ 4.10 Moisture sorption isotherm ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.4.2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์

ในช่วงเก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ นอกจากจะได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณบิตาแคโรทีนแล้ว ยังได้ทำการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตลอดจนปริมาณยีสต์และราด้วย พบว่า แคโรทีนอยด์แห้งที่สกัดจากแคโรทีนอยด์อิมัลชันยังมีคุณภาพทางจุลินทรีย์ได้มาตรฐานเมื่อเก็บไว้นาน 3 เดือน (ตาราง 4.22)

ทั้งนี้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งที่ผลิตจากแคโรทีนอยด์ที่ละลายในน้ำมันที่เก็บที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 56.37 % พบปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่า 56.37 % จุลินทรีย์มีการเจริญน้อยมากและไม่แตกต่างกัน ซึ่งเหล่านี้เป็นผลจากบรรจุภัณฑ์ใช้และที่สภาวะสุญญากาศ ซึ่งได้กล่าวถึงในการทดลองของแคโรทีนอยด์ที่ละลายในน้ำมันแสดงถึงผลิตภัณฑ์

จากตารางที่ 4.23 พบว่า ปริมาณยีสต์และราของแคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้งตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน ไม่แตกต่างกัน โดยเมื่อเก็บนาน 3 เดือน พบปริมาณยีสต์และราในผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 1.00 log cfu/g แต่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 64.83 ขึ้นไปปริมาณยีสต์และรามีการเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นแต่ปริมาณ ไม่เกิน 1.33 log cfu/g

จากการการศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน โดยใช้แป้งถั่วเขียวเป็นตัวดูดซับแคโรทีนอยด์ ระหว่างการเก็บรักษา พบว่า อัตราการสูญเสียปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด คือ 3.06 ($\mu\text{g/g}$) ต่อเดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 31.53 % โดยการเก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะทำให้แคโรทีนอยด์ลดลงมากขึ้น ($p > 0.05$) และผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 84.76 % สามารถเก็บไว้ได้น้อย 3 เดือน แต่การเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 60.13 % จะช่วยให้มีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น

ตารางที่ 4.22 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน

ระยะเวลาในการเก็บรักษา	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/g) ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)							
	31.53	41.40	51.57	56.37	60.13	67.70	71.57	78.37
0	< 1	1.00	1.00	1.00	1.10	1.43	1.75	2.07
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.20	1.53	1.80	2.11
30	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.16	2.22	2.38
45	1.00	1.00	1.00	1.00	2.07	2.21	2.30	2.42
60	1.00	1.00	1.00	1.00	2.15	2.23	2.30	2.45
75	1.00	1.00	1.00	1.00	2.16	2.25	2.32	2.49
90	1.00	1.00	1.00	1.00	2.23	2.27	2.33	2.51

หมายเหตุ : < 1 = มีปริมาณน้อยกว่า 1 log cfu/g

ตารางที่ 4.23 ปริมาณยีสต์และราของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษาใน
สถานะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เป็นเวลา 3 เดือนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการ	ปริมาณยีสต์และรา (log cfu/g) ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (%)							
เก็บรักษา	31.53	41.40	51.57	56.37	60.13	67.70	71.57	78.37
0	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00
15	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00
30	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00
45	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00
60	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00
75	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00
90	< 1	< 1	< 1	< 1	1.00	1.00	1.00	1.00

หมายเหตุ : < 1 = มีปริมาณน้อยกว่า 1 log cfu/g

เอกสารอ้างอิง

- จินดา สนิทวงศ์ ณ อยุธยา. 2548 .การใช้กากน้ำมันเป็นอาหารโค-กระบือ.รายงานผลงานวิจัยกองอาหารสัตว์ ประจำปี 2548 กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.หน้า 383-395.
- นิธิยา รัตนานนท์ .2548.วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพมหานคร หน้า 84-95
- ปัญญา ธรรมศาล นพวรรณ ชมชัย และ ประยูร ครองยุดิ. 2535. การใช้กากปาล์มน้ำมันจากโรงงานของศูนย์ศึกษาพัฒนาพิภพทองเป็นอาหารสัตว์ : การใช้เป็นอาหารไก่พื้นเมืองลูกผสม. รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2535 กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. หน้า 53-69.
- พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์ มณฑิรา นพรัตน์ ดวงพร ตั้งบำรุงพงษ์ สุเทพ อภินันท์จารุพงศ์ .2545 .กระบวนการผลิตน้ำผักและผลไม้รวมผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายและไมโครเวฟสุญญากาศ วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีที่ 25 ฉบับที่ 3 .หน้า 257-276.
- พนัส บุรณศิริปิ่น .ปาล์มทำไวน์และน้ำตาล[ระบบ ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://library.dip.go.th/multim/edoc/04138.pdf> (26 กุมภาพันธ์ 2551).
- พัชรินทร์ ระวิชัย สุรศักดิ์ เหลี้ยวไชยพันธุ์ ดวงสมร ลิ้มปิติ ประมวล ศรีกาหลง.2548. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำเพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร.สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- รัตนันท์ พรรณารุโณทัย. บทบาทของ Water Activity (a_w) ในอุตสาหกรรมอาหาร.[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.tws.ac.th/thoenwit/Library/charpa/www.charpa.co.th/bulletin/water_activity.html (20 กุมภาพันธ์ 2551).
- วินันtha พูพันธ์พานิช. 2003. บทคัดย่อ : การแยกแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มโดยการดูดซับบนดินเหนียว.แหล่งที่มา <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/3345> (20 กุมภาพันธ์ 2551).

แสงโสม สีนะวัฒน์. “สถานการณ์โรคขาดวิตามินเอในประเทศไทย”. [ระบบออนไลน์].

แหล่งที่มา <http://www.anamai.moph.go.th/factsheet> (7 มีนาคม 2548).

สุคนธ์ชื่น ศรีงาม. 2546. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร: กระบวนการทำแห้งอาหาร

ภาควิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 187 -192.

สายสนม ประดิษฐ์ดวงงาม. 2546. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร: การให้ความร้อนด้วย

พลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสี ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะ

อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 197 -207.

ศิริวรรณ สุทธิจิต.2545. วิตามิน อาหาร ยา และเครื่องสำอาง. ภาควิชาเภสัชเวช คณะเภสัชศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หน้า 58-69.

อรชุน เลียววัฒนะผล .2539.ด้านโรคด้านมะเร็งด้วยปีศาจโรทิน รวมพรรณ กรุงเทพมหานคร

หน้า 9-10.

เอกชัย พุกภัยอำไพ.2548. คู่มือปาล์มน้ำมัน.พืช-แพลงค์น พบบลิซซิง.กรุงเทพมหานคร หน้า 16-20.

AOAC. (2000). Official Method of AOAC international. 17th ed. The association of Official Analytical Chemists. Code 9411. 25.

Baff Corporation. (2001). Baff Corporation 3000 Technical bulletin. Continental Drive-North

Mount Olive, New Jersey.

Bauernfeind, J.C. (1981). Carotenoids as colorants and vitamin A precursors. Academic Press,

New York.

Bhosale, P., Jogdand, V.V. and Grade, R.V. (2003). Stability of β -carotene in spray dried

preparation of *Rhodotorula glutinis* mutant 32. Journal of Applied Microbiology. 95.

584-590.

- Britton, G. (1995). Structure and properties of carotenoids in relation to function. *The FASEB Journal* . 9. 1551-1558.
- Chen, B. H. and Tang, Y. C. (1998). Processing and stability of carotenoid powder from carrot pulp waste. *Journal Agriculture Food Chemistry*. 46. 2312-2318.
- Crawley, H. (1993). Natural occurrence of vitamins in food. *The Technology of Vitamins in Food* . Blackie Academic & Professional. Glasgow, England. 19-41.
- Corley, R.H.V and Tinker, P.B. (2003). *The Oil Palm*. Blackwell Science, Oxford.
- Cui, Z.W., Xu, S.Y. and Sun, D.W. (2004). Microwave-vacuum drying kinetic carrot slices. *Journal of food Engineering*. 65. 157-164.
- Cassini, A.S., Marczak, L.D.F., and Norena, C.P.Z. (2006). Water adsorption isotherms of texturized soy protein. *Journal of Food Engineering* . [77](#). 194-199.
- Debnath, K., Hemavathy, J. and Bhat K.K. (2002). Moisture sorption studies on onion powder. *Food chemistry*. 78. 479-482.
- Ekechukwu, O.V. (1999). Review of solar-energy Drying System I: an Overview of Drying Principles an Theory. *Energy Conservation and Management*. 40. 593-613.
- Farombi, E.O. and George, B. (1999). Antioxidant activity of palm oil carotenes in organic solution: effects of structure and chemical reactivity. *Journal of Food Chemistry*. 64. 315-321.
- Fellows, P.J. (1997). *Food processing technology : Principle and Practice*. Woodhead Publishing. Cambridge. England.

- Gabas, A.L., Telis, V.R.N., Sobral, P.J.A. and Telis R.J. (2007).Effect of maltrodextrin and Arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. 82. 246-252.
- Gireesh, T.,Nair, P.P. and 1Sudhakaran. P.R. (2004). Studies on the bioavailability of the provitamin A carotenoid, β -carotene, using human exfoliated colonic epithelial cells. British Journal of Nutrition. 92. 241–245.
- Goodwin, T.W. (1980).The Biochemistry of the Carotenoids. Ed 2. Chapman and Hall.London.
- Goula, A.M., Karapantsios, T.D., Achilias, D.S. and Adamopoulos, K.G. (2008). Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. Journal of Food Engineering. 74. 37-46.
- Gross, J. (1987) .Carotenoids: Pigments in Fruits. Academic Press.London.
- Handelman, G.J.,Packer, L. and Cross, C.E. (1996).Destruction of tocopherols, carotenoids, and retinol in human plasma by cigarette smoke. American Journal of Clinical Nutrition.63. 559-565.
- Hymavathi, T.V. and 1 Khader V. (2005). Carotene,ascorbic acid and sugar content of vacuum dehydrated ripe mango powders stored in flexible packaging material. Journal of Food composition and Analysis. 18. 81–192.
- Java, S. and Das, H. (2004).Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. Journal of Food Engineering .63. 125-143.
- Jimenez, M., Garcia H.S. and Beristain. (2004). Spray-drying microencapsulation and oxidative stability of conjugated linoleic acid. European Food Research Technology. 219. 588-592.

- Kiokias, S. and Gordon, M.H. (2003). Antioxidant properties of annatto carotenoids. *Food chemistry*. 83. 523-529.
- Lakshmia, S., Chakkaravarthia, A., Subramaniana, R. and Singhc, V. (2006). Energy consumption in microwave cooking of rice and its comparison with other domestic appliances. *Journal of Food Engineering* . 78. 715-722.
- Li, Y., Xu, S.Y. and Sun D.W. (2007). Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave–vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. *Journal of Food Engineering*. 83. 76-83.
- Lietz, G. and 1 Henry, C. J. K. (1997). A modified method to minimise losses of carotenoids and tocopherols during HPLC analysis of red palm oil. *Food Chemistry*. 60. 109-117.
- Madhavi, D. L., Deshpand 1e, S. S., & Salunkhe, D. K. (1996). Food antioxidants: technological, toxicological and 1 health perspectives . New York:Marcel Dekker Inc. 2-7.
- Maskan, M., Gogus, F., Collingnan, A. and Rivier, M. (1999). Water Adsorption Properties of Coated and Noncoated Popcorns. *Journal Food Processing and Preservation*. 23. 499-513.
- McGuire, R.G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience*. 27. 1254-1255.
- Morais, F.,KuhnK, K.,Steward D.H.,Barber, J.,Brudvig, G.W. and Nixon P.J. (2001). *Journal of biological chemistry*. 276. 31986-31993.
- Mortensen, A. (2005). Analysis of a complex mixture of carotenes tfrom oil palm (*Elaeis guineensis*) fruit extract. *Food Research International*. 38. 847-853.
- Na, J.C., Song, J.Y., Lee, B.D., Lee, S. J., Lee, C.Y. and An, G.H. (2004).Effect of polarity on absorption and accumulation of carotenoids by laying hens. *Animal Feed Science andTechnology*. 117. 305-315.

- Onwulata, C.I., Konstance, R.P. and Holsinger, V.H. (1996). Flow Properties Of Encapsulated Milkfat Powders as Affected by Flow Agent. *Journal of Food Science*. 61. 1211-1215.
- Regier, M., Mayer-Miebach, E., Benhsnnilian, D., Neff, E. and Schuchmann, H.P. (2005). Influences of drying and storage of lycopene-rich carrot on the carotenoid content. *Drying Technology*. 23. 989-998.
- Rockland, L.B. and Nishi, S.K.(1980).Influence of water activity on food Product Quality and stability .*Food technology* . 34(4). 42-59.
- Sambanthamurthi, R., Sundaram, K. and Tan, Y.A. (2000).Chemistry and biochemistry of palm oil.*Progress in Lipid Research*. 39. 507-558.
- Shrestha, A.K., Howes, T., Adhikari, B.P. and Bhandari, B.R. (2007).Water sorption and glass transition properties of spray dried lactose hydrolysed skim milk powder. *Food Science and Technology*. 40. 1593-1600.
- Shu, B., Yu, W., Zhao, Y. and Liu, X.(2006). Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying. *Journal of Food Engineering*. 76. 664-669.
- Sofia, F., Klas, E. and Jana, P. (2006). Fatty acid and carotenoid composition of egg yolk as an effect of microalgae addition to feed formula for laying hens. *Journal of Food Chemistry*. 99. 530-537.
- Szpylka, J. and Devaries J.W. (2005). Determination of β -carotene in supplement and raw materials by reverse-phase high pressure liquid chromatography: Collaborative Study. *Journal of AOAC international*. 88. 1279-1291.
- Tan, L.H., Chan, L.W. and Heng P.W.S. Effect of oil loading on microspheres produced by spray drying. *Journal of Microencapsulation*. 22(3). 253-259.

- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R. and McClements, D.J.(2006). Impact of fat and water crystallization on the stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions stabilized by a non ionic Surfactant. *Journal Agriculture Food Chemistry*. 54. 3591-3597.
- Tang, Y.C. and Chen, B.H. (2000). Pigment change of freeze-dried carotenoid powder during storage. *Food Chemistry*. 69. 11-17.
- Teixeira G.HT., Rodriguez A.DB. (1998). Carotenoid Composition of Brazilian Nectarine (*Prunus perica*). *Revista do Instituto Adolfo Lutz*. 57. 73-79.
- Thurmann, P.A. Steffen, J., Zwernemann, C., Aebischer, C.P., Cohn, W., Wend, G. and Schalch, W.(2002).European Journal Nutrition. 41. 228-235.
- Varavinit, S., Chaokasem, N. and Shobsngob, S.(2001). Studies of flavor encapsulation by agents produced from modifies sago and 1 tapioca starches. *Starch*. 53. 281-287.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก**การเตรียมแคโรทีนอยด์สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ**

วิธีการศึกษา

1. การเตรียมแคโรทีนอยด์ในรูปน้ำมัน

1.1 การสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ทำการสกัดน้ำมันปาล์มดิบตามวิธีของพัชรินทร์และคณะ (2548) โดยนำน้ำมันปาล์มดิบ เทลงหม้อ ตั้งไฟ แล้วเติมกรดซิตริก 0.02% และ กรดฟอสฟอริก 0.08% จากนั้นกวนผสม สารละลาย จนสารละลายมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 นาที แล้วนำมากรองระบบ สูญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองน้ำตาล

1.2 การสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ทำการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบตามวิธีของพัชรินทร์และคณะ (2548) ดังนี้

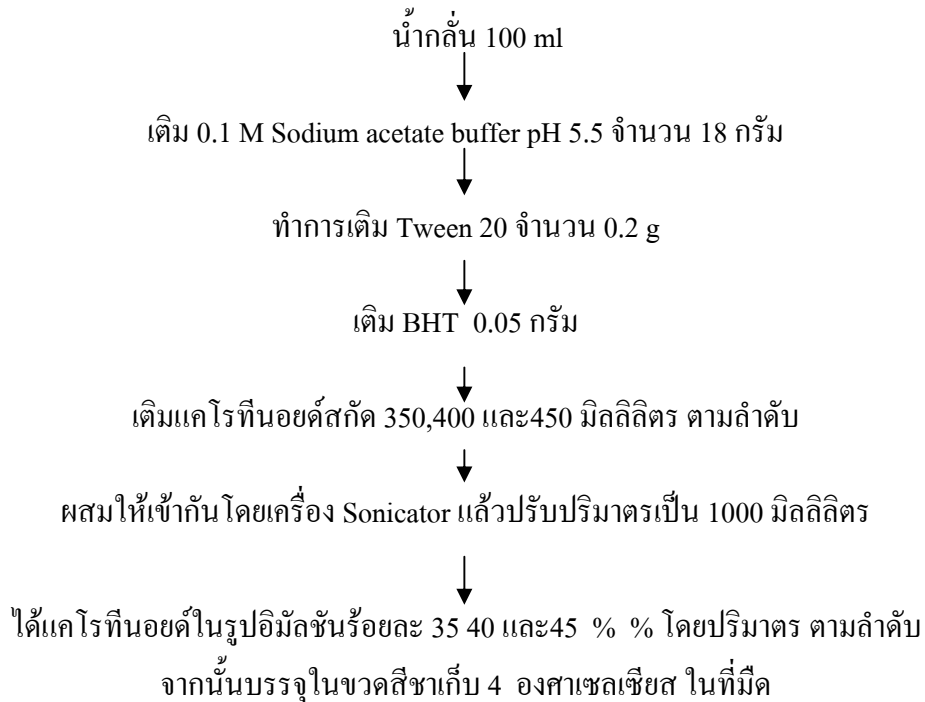
ทำการป้อน propylene glycol เข้าถึงผสม แล้วเติมเฮกเซนจำนวน 4,300 มิลลิลิตร ลงถึงสกัด จากนั้นชั่งน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากข้อ 3.4.1 จำนวน 1,434 กรัม ทำให้อุ่น จนมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของถึงสกัดเท่ากับ -10 องศาเซลเซียส ป้อนน้ำมันปาล์มดิบที่ทำให้ ร้อนแล้วเข้าสู่เครื่องสกัด โดยใช้ความเร็วของใบพัดในการกวนเท่ากับ 250 รอบ/นาที เมื่ออุณหภูมิ ของถึงสกัดคงที่ที่ -10 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการกรองโดยระบบ สูญญากาศ เพื่อเอาไขมันเหลือทิ้งออก สารที่ได้เรียกว่า สารผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน

1.3 การระเหยตัวทำละลายออกจากสารผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน

ทำการระเหยตัวทำละลายออกจากสารผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน โดยเทสาร ผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเฮกเซน ที่ได้จากข้อ 1.2 ลงอ่างสำหรับบรรจุสารสกัด จากนั้นเปิด เครื่องระเหยระบบสูญญากาศ เพื่อทำการระเหยตัวทำละลายออก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จน ตัวทำละลายระเหยไปจนหมด (พัชรินทร์และคณะ, 2548) สารที่ได้ เรียกว่า สารสกัดแคโรทีนอยด์ จากน้ำมันปาล์มดิบ

2. เตรียมแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน

วิธีการเตรียมแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชันประยุกต์จากวิธีของ Thanasukarn และคณะ ดังนี้



3. การเก็บรักษาในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ประยุกต์จากวิธีของ Ashok และคณะ ทำโดยชั่งสารละลายเกลืออิ่มตัว 8 ชนิด ได้แก่ CH_3COOH , MgCl_2 , K_2CO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, KI , NaCl , KNO_3 และ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (ซึ่งทำให้ได้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์เป็น 23.1, 33.2, 44.1, 52.9, 68.9, 75.3, 81.3 และ 95.69 % ตามลำดับ) 500 กรัม เติลงใน Sorption Bottle ดังภาพผนวก ก ภาพที่ 8 จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปให้สูงเหนือเกลืออิ่มตัวประมาณ 3 เซนติเมตรทิ้งไว้ 2 วัน ทำการใส่ฐานรองและชั้นตะแกรง ก่อนชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ถ้วยพลาสติก ทำการปิดฝาให้สนิท หุ้มด้วยกระดาษฟรอยด์และกระดาษสีดำเพื่อป้องกันแสง ทำการสุ่มตัวอย่างทุก 4 วัน เพื่อวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีของตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่นำไปหาปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) เพื่อนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟ Adsorption Isotherm

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์คุณภาพกายภาพ ทางเคมีและจุลชีววิทยา

1. คุณภาพทางกายภาพ

1.1 การหาปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นทั้งหมด ใช้วิธีวิเคราะห์หมายเลข 920.151 (AOAC, 2000) โดยอบ Moisture Can และ ฝา ด้วย ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น นาน 30 นาที ชั่งน้ำหนัก Moisture Can และ ฝา ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่อง (Satorius A102S, Germany) ที่ความละเอียด 4 ตำแหน่ง ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัมใส่ลงใน Moisture Can นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยไม่ปิดฝา Moisture Can เมื่อครบเวลา ปิดฝา Moisture Can แล้วนำไปใส่ไว้ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที นำไปอบต่อ และนำมาชั่งน้ำหนักทุกชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่ ใช้วิธีคำนวณดังนี้

วิธีการคำนวณ

$$\text{ความชื้น (\% wet basis)} = \frac{\text{น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง}}{\text{น้ำหนักอาหารเริ่มต้น}} \times 100$$

หรือ

$$\text{ความชื้น (\% dry basis)} = \frac{\text{น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง}}{\text{น้ำหนักของแข็งแห้ง}} \times 100$$

1.2 การหาความพรุน

การหาความพรุน(ประยุกต์จากวิธีของ Onwulata และคณะ, 1996) คำนวณจากสูตร ดังนี้

$$\text{ความพรุน} = \frac{\text{ความหนาแน่นจริง} - \text{ความหนาแน่นจากการเคาะ}}{\text{ความหนาแน่นจริง}}$$

โดย ความหนาแน่นจริง (มิลลิกรัม) คือ ปริมาตรจริงของตัวอย่างที่อ่านได้จากกระบอกตวง และความหนาแน่นจากการเคาะ (มิลลิกรัม) คือ ปริมาตรของตัวอย่างที่อ่านได้หลังเคาะกระบอกตวง

2. คุณภาพทางเคมี

2.1 การวัดค่า a_w

ค่า a_w วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Aqualab model series 3 (Decagon Device Inc., Pullman, USA.) เปิดเครื่องวัด a_w ไว้เป็นเวลา 30 นาที ก่อนการวิเคราะห์ ใส่ตัวอย่างลงในตลับให้มีความสูงไม่เกินครึ่งตลับ ใส่ตลับตัวอย่างในเครื่องรอจนเครื่องแสดงค่าที่คงที่ บันทึกค่า a_w และ อุณหภูมิ

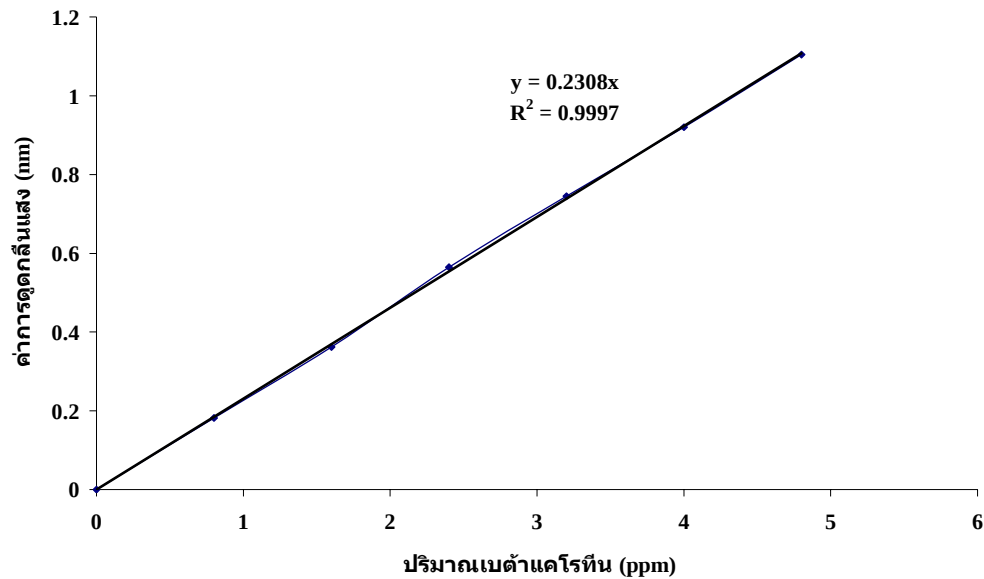
2.2 การวัดค่าสี

ค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี Minolta colorimeter (CR-300) (Minolta co.,Ltd, Osaka, Japan) เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของค่าสีด้วย Stand lard Calibration Plate ตั้งค่า illuminant เท่ากับ C ใส่ตัวอย่างลงในภาชนะให้มีความสูง 1 cm ใช้หัววัดสีวางทาบลงบนตัวอย่างในแนวตั้งฉากและอ่านค่าแสดงผลการวัดในระบบ CIELAB (L^*, a^*, b^*) โดยค่า L หมายถึงความสว่าง ค่า a^* หากเป็น + หมายถึงสีแดง หากเป็น - จะเป็นสี เขียว ค่า b^* เป็น + หมายถึง สี เหลือง หากเป็น - จะเป็นสีน้ำเงิน

2.3 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานบิตาแคโรทีน

สร้างกราฟมาตรฐานบิตาแคโรทีน ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก AOAC (2002) ดังนี้

1. ชั่งบิตาแคโรทีนมาตรฐาน 0.0100 กรัม ลงในปิកเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ละลายด้วยเฮกเซนจำนวน 2.5 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรสารละลายในข้อ 1 ให้ครบ 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร ด้วยเฮกเซน
3. ปิเปิดสารละลายในข้อ 2 มา 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร ด้วยเฮกเซน
4. ปิเปิดสารละลายในข้อ 3 มา 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร ปรับปริมาตรให้ครบ 25 มิลลิลิตร ด้วยเฮกเซน
5. นำสารละลายมาตรฐานบิตาแคโรทีนในข้อ 4 ทั้งหมด มาที่เตรียมไว้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer “PerkinElmer” series Lambda 35, UK) ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยใช้เฮกเซนเป็น blank บันทึกค่าที่วัดได้
6. นำค่าที่วัดได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิตาแคโรทีน (ppm) กับค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ แล้วทำสมการเส้นตรงจากกราฟ



ภาพ ข.1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบีตาแคโรทีน (ppm) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร

2.4 การวิเคราะห์หาปริมาณบีตาแคโรทีน

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณบีตาแคโรทีน (ประยุกต์จากวิธีของ Ribeiro *et al*, 2008)

สมมติซ้ดตัวอย่าง 0.100 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเฮกเซน นำสารละลายตัวอย่าง ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายเฮกเซนเป็นเบลงค์ สามารถหาค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (ไมโครกรัม/กรัม) ของตัวอย่างได้ดังนี้

จากภาพ ข.1 กราฟมาตรฐานบีตาแคโรทีน ได้สมการเส้นตรง คือ $y = 0.2308x$

แทนค่า $A_{450} = 0.5167$ ลงในค่า y ของสมการจะได้ค่า x คือปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.2387 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร

ปริมาตรสารละลายเฮกเซน 1 มิลลิลิตร มีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด 2.2387 ไมโครกรัม ดังนั้น ปริมาตรสารละลายเฮกเซนที่ใช้ คือ 100 มิลลิลิตร จะมีปริมาณบีตาแคโรทีน

$$= 2.2387 \times 100 \text{ ไมโครกรัม}$$

$$= 223.87 \text{ ไมโครกรัม}$$

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ 0.100 กรัม มีปริมาณบีตาแคโรทีน 223.87 ไมโครกรัม

ดังนั้น ปริมาณตัวอย่าง 1 กรัม มีปริมาณบีตาแคโรทีน

$$= \frac{223.87}{0.1} \text{ ไมโครกรัม}$$

$$0.1$$

$$= 2,238.7 \text{ ไมโครกรัม/กรัมตัวอย่าง}$$

2.5 การหาร้อยละของประสิทธิภาพในการกักเก็บสาร (% Encapsulation efficiency)

การหาร้อยละของประสิทธิภาพในการกักเก็บสาร สามารถคำนวณได้จากสูตร(ประยุกต์จากวิธีของ Shu และคณะ, 2006) ดังนี้

$$\text{ร้อยละของประสิทธิภาพในการกักเก็บสาร} = \frac{\text{ปริมาณบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์}}{\text{ปริมาณบีตาแคโรทีนเริ่มต้นในผลิตภัณฑ์}} \times 100$$

ทำการชั่งตัวอย่าง 0.1000 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยเฮกเซน นำสารละลายตัวอย่าง ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายเฮกเซน เป็นแบลนด์ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างที่อ่านได้ นำไปคำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดตามวิธี 2.4

2.6 การสร้างกราฟ Sorption Isotherm

การสร้างกราฟ Adsorption Isotherm ตามวิธีของ Debnath *et al* (2002)

ทำการวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) ของตัวอย่าง ตามวิธี 2.1 และหาปริมาณความชื้น ตามวิธี 1.1 ในระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 8 ระดับ จากนั้นทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอคติวิตีกับปริมาณความชื้น กราฟที่ได้เรียกว่า Sorption isotherm

3. คุณภาพทางจุลชีววิทยา

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) ตามวิธี AOAC (2000) ดังนี้

ละลายอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) 23.5 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร นำสารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อไปต้มจนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้มเป็นช่วงๆ ถ่ายอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้มแล้วในขวดอาหารเลี้ยงเชื้อและฆ่าเชื้อ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที รอให้อาหารเลี้ยงเชื้อเย็นตัว

ใส่ตัวอย่างลงในถุง polypropylene ที่ผ่านการฆ่าเชื้อและซั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 10 กรัม ใส่ลงในขวดที่มีน้ำ Maximum Recovery Diluents (MRD) แล้ว 90 มิลลิลิตร เขย่าเบา (Dilution ที่ 10^{-1}) ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างขึ้นมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร ที่มี MRD 9 มิลลิลิตร ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างขึ้นมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร ที่มี MRD 9 มิลลิลิตร (Dilution ที่ 10^{-2}) ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างขึ้นมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร ที่มี MRD 9 มิลลิลิตร (Dilution ที่ 10^{-3}) ดูดตัวอย่างจากแต่ละ dilution 10^{-3} มา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จำนวน 3 จาน ดูดตัวอย่างจากแต่ละ dilution 10^{-2} มา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จำนวน 3 จาน ดูดตัวอย่างจากแต่ละ dilution 10^{-1} มา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จำนวน 3 จาน เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar ที่ผ่านการฆ่าเชื้อและหลอมเหลวแล้ว 10-15 มิลลิลิตรเขย่าจานเพาะเชื้อเบาๆ ให้อาหารเลี้ยงเชื้อรวมกันกับตัวอย่างให้กระจายเข้ากันดี ปล่อยให้อาหารเลี้ยงเชื้อให้แข็งตัวกลับจานแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 48-72 ชั่วโมง นับจำนวนจุลินทรีย์ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่อยู่ในช่วง 30-300 colony แสดงผลการคำนวณเป็นจำนวนจุลินทรีย์/กรัมตัวอย่างอาหาร (log cfu/g)

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และรา (Yeast and Mould Count) ตามวิธี AOAC (2000) ดังนี้

ละลายอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) 39.0 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร นำสารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อไปต้มจนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้มเป็นช่วงๆ ถ่ายอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้มแล้วในขวดอาหารเลี้ยงเชื้อและฆ่าเชื้อ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที รอให้อาหารเลี้ยงเชื้อเย็นตัว เติมกรดทาร์ทาริก (tartaric acid) ความเข้มข้น 1 % เป็นปริมาณ 0.8% ผสมให้เข้ากัน

ใส่ตัวอย่างลงในถุงโพลีโพรพิลีน (polypropylene) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อและซั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 10 กรัม ใส่ลงในขวดที่มีน้ำ Maximum Recovery Diluents (MRD) แล้ว 90 มิลลิลิตร เขย่าเบา (Dilution ที่ 10^{-1}) ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างขึ้นมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง

ขนาด 10 มิลลิลิตร ที่มี MRD 9 มิลลิลิตร ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างขึ้นมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร ที่มี MRD 9 มิลลิลิตร (Dilution ที่ 10^{-2}) ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างขึ้นมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร ที่มี MRD 9 มิลลิลิตร (Dilution ที่ 10^{-3}) ดูดตัวอย่างจากแต่ละ dilution 10^{-3} มา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จำนวน 3 จาน ดูดตัวอย่างจากแต่ละ dilution 10^{-2} มา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จำนวน 3 จาน ดูดตัวอย่างจากแต่ละ dilution 10^{-1} มา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จำนวน 3 จาน เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar ที่ผ่านการฆ่าเชื้อและหลอมเหลวแล้ว 10-15 มิลลิลิตร เขย่าจานเพาะเชื้อเบาๆ ให้อาหารเลี้ยงเชื้อรวมกันกับตัวอย่างให้กระจายเข้ากันดี ปล่อยให้อาหารเลี้ยงเชื้อให้แข็งตัวกลับจานแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง นับจำนวนจุลินทรีย์ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่อยู่ในช่วง 30-300 colony แสดงผลการคำนวณเป็นจำนวนยีสต์และรา/กรัมตัวอย่างอาหาร (log cfu/g)

3.3 มาตรฐานเชื้อจุลินทรีย์

จุลินทรีย์จะมีได้ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปนี้

1. ราและยีสต์

ต้องไม่เกิน 1×10^2 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

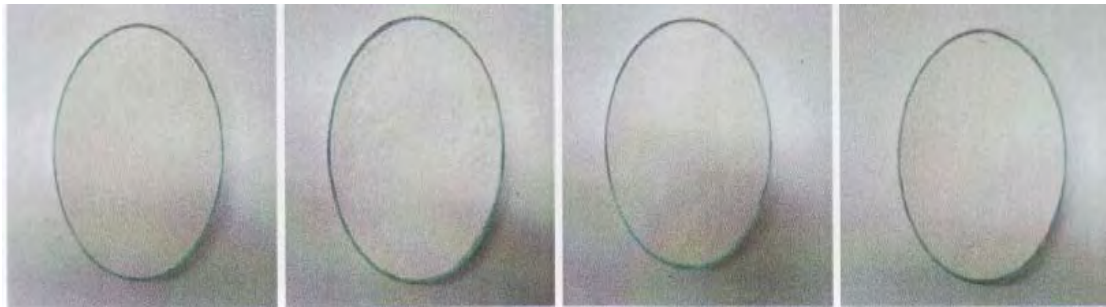
2. จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด

ต้องไม่เกิน 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

ภาคผนวก ค.

ภาพวัตถุดิบ เครื่องมือที่ใช้และผลิตภัณฑ์

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการทำแท่งแคโรทีนอยด์สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ



แป้งข้าวเหนียว

แป้งถั่วเขียว

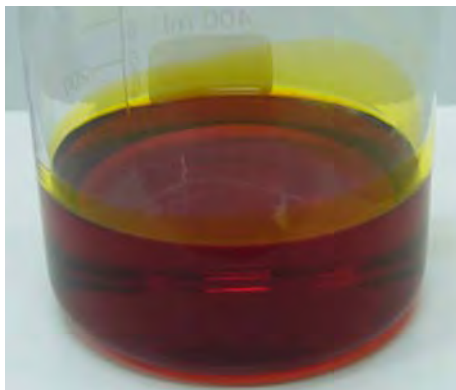
แป้งข้าวเจ้า

แป้งมันสำปะหลัง

ภาพ ค. 1 แป้งที่ใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์



ภาพ ค. 2 น้ำมันปาล์มดิบ(ซ้าย) และน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการดีกัมแล้ว(ขวา)



ภาพ ค. 3 แคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ



ภาพ ค. 4 แคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบและเตรียมในรูปอิมัลชันร้อยละ 35, 40 และ 45 โดยปริมาตร (จากซ้ายไปขวา)

2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองทำแห้งแคโรทีนอยด์สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ



ภาพ ค.5 เครื่องสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ



ภาพ ค.6 เครื่องระเหยตัวทำละลายเฮกเซน



ภาพ ค.7 เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ



ภาพ ค.8 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟระบบสุญญากาศ



ภาพ ค.9 Sorption bottle

3. ผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้ง

3.1 ผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชัน

3.11 แป้งดูดซับข้าวเหนียว



ภาพ ค.10 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.11 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.12 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.13 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 720 วัตต์เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)

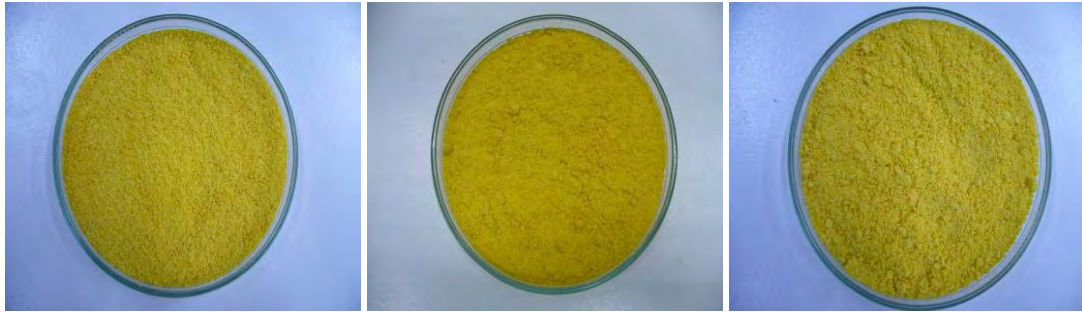


ภาพ ค.14 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 960 วัตต์ เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.15 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 1200 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)

3.12 แป้งดูดซับข้าวเจ้า



ภาพ ค.16 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.17 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.18 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.19 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 720 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.20 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 960 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.21 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 1200 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)

3.13 แป้งดูดซับถั่วเขียว



ภาพ ค.22 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.23 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.24 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.25 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 720 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)



ภาพ ค.26 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 960 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)

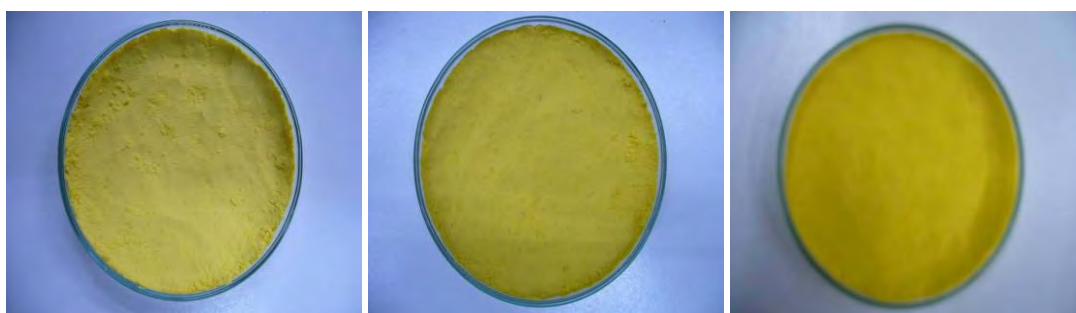


ภาพ ค.27 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ
ที่กำลัง 1200 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที (จากซ้ายไปขวา)

3.2 ผลลัพท์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมัน



ภาพ ค.28 แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ใช้แป้งข้าวเหนียวดูดซับ ที่ระดับอิมัลชัน 30, 35 และ 45 % โดยปริมาตร (จากซ้ายไปขวา)

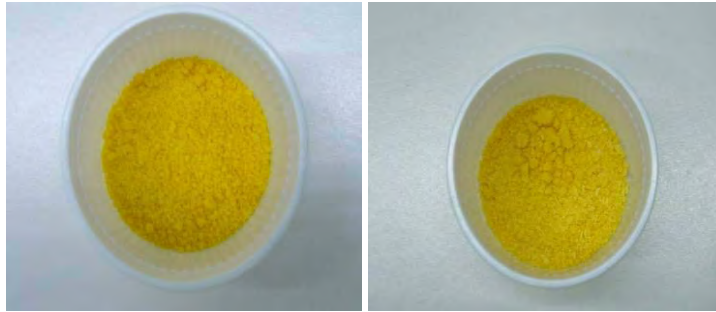


ภาพ ค.29 แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ใช้แป้งข้าวเจ้าดูดซับ ที่ระดับอิมัลชัน 30, 35 และ 45 % โดยปริมาตร (จากซ้ายไปขวา)

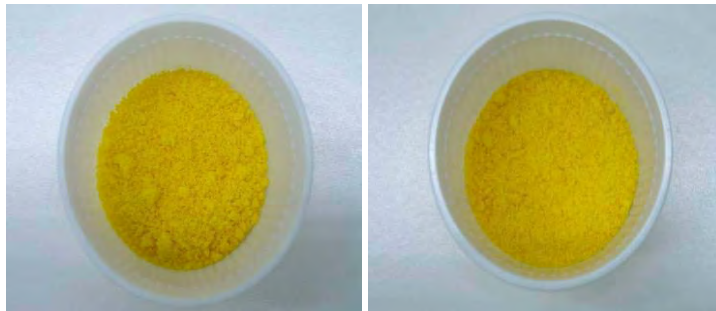


ภาพ ค.30 แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ใช้มันสำปะหลังดูดซับ ที่ระดับอิมัลชันร้อยละ 30, 35 และ 45 % โดยปริมาตร (จากซ้ายไปขวา)

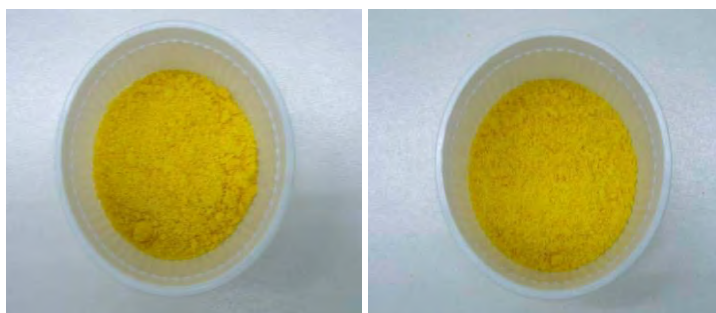
3.3 ผลกระทบแคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชัน ที่ระดับความเข้มข้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ



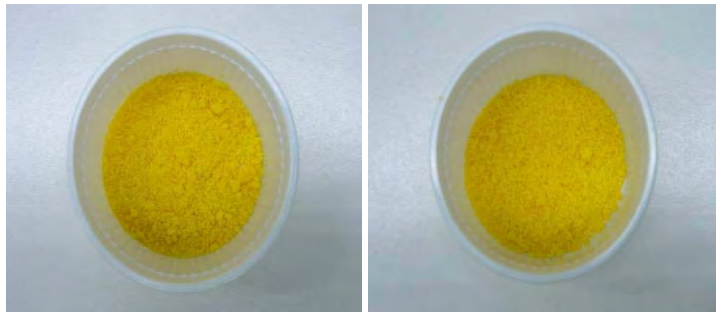
ภาพ ค.31 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเข้มข้นสัมพัทธ์ 20 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



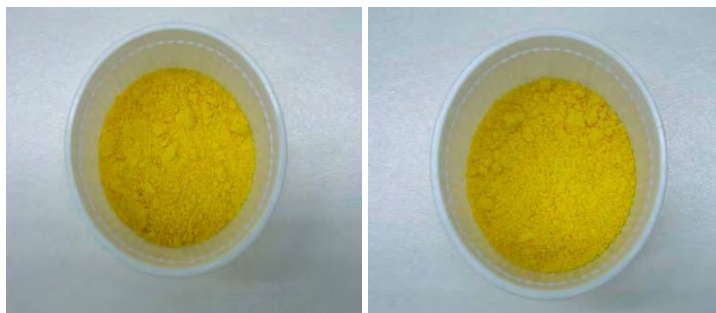
ภาพ ค.32 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเข้มข้นสัมพัทธ์ 30 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา(ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



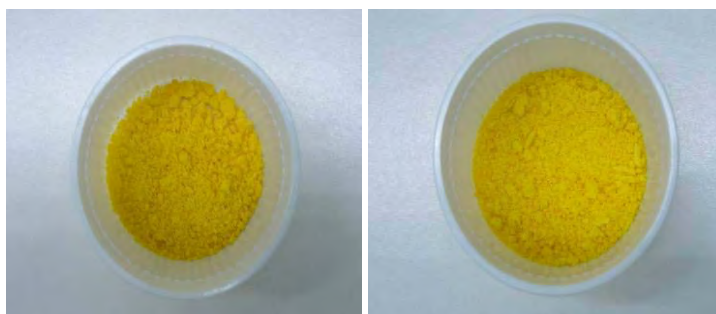
ภาพ ค.33 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเข้มข้นสัมพัทธ์ 40 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



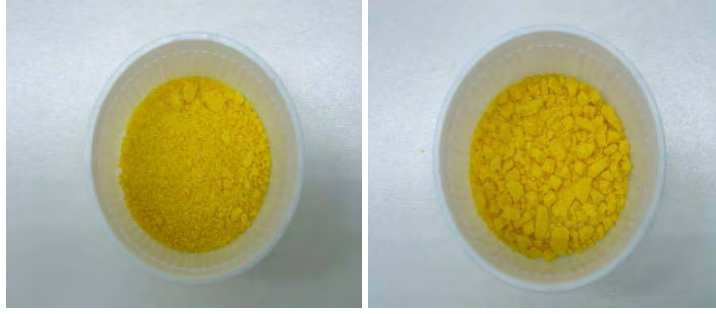
ภาพ ค.34 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



ภาพ ค.35 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 60 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



ภาพ ค.36 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 70 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



ภาพ ค.37 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 80 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน

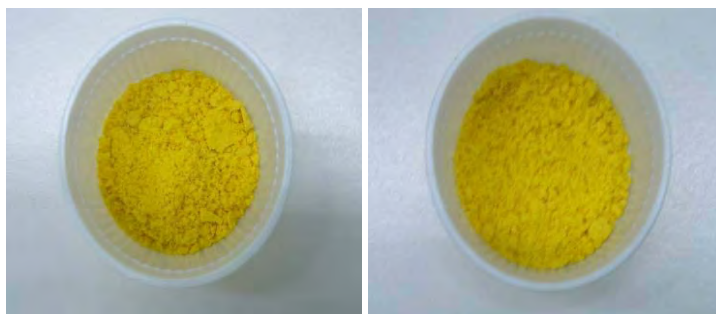


ภาพ ค.38 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 90% ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน

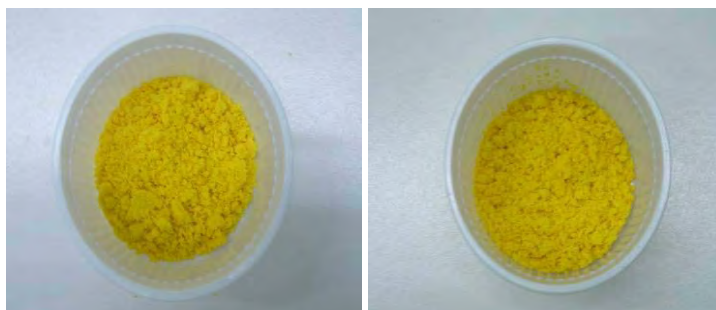
3.4 ผลิตกัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ



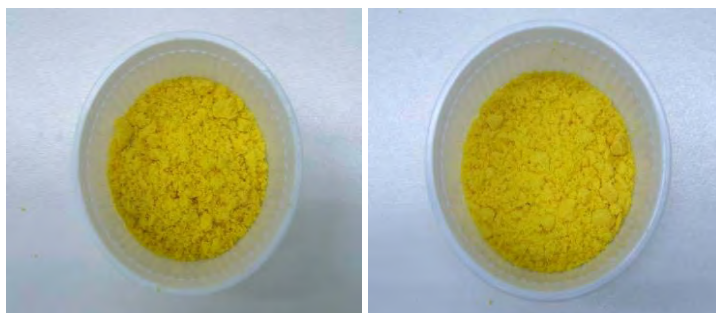
ภาพ ค.39 แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



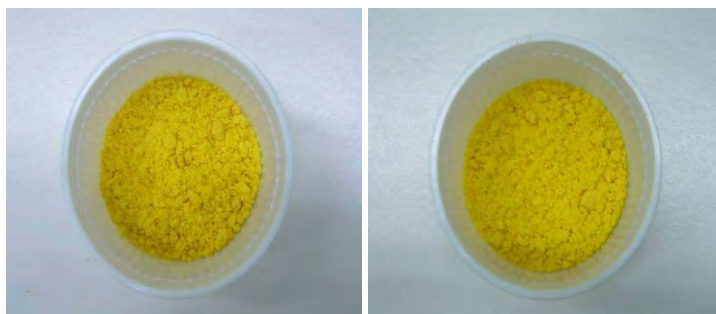
ภาพ ค.40 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 30 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



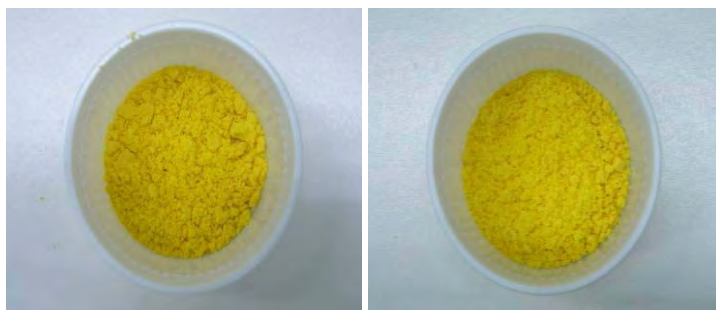
ภาพ ค.41 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 40 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



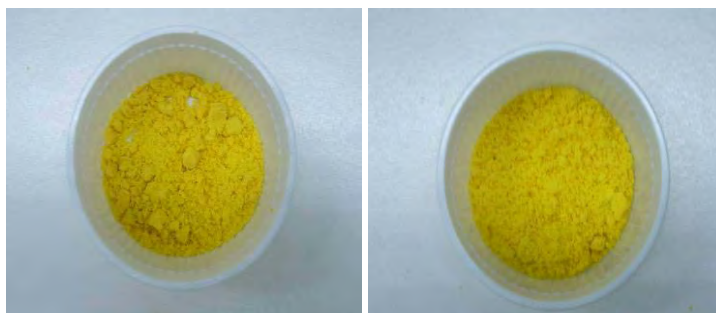
ภาพ ค.42 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



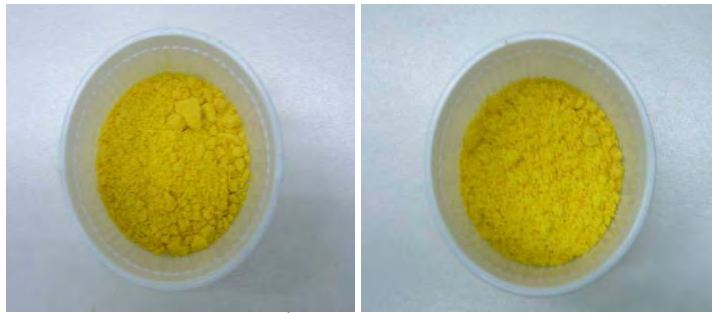
ภาพ ค.43 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 60 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



ภาพ ค.44 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 70 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน

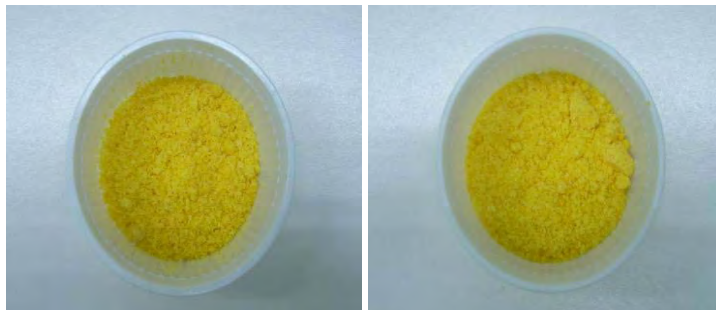


ภาพ ค.45 แคลโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 80 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน



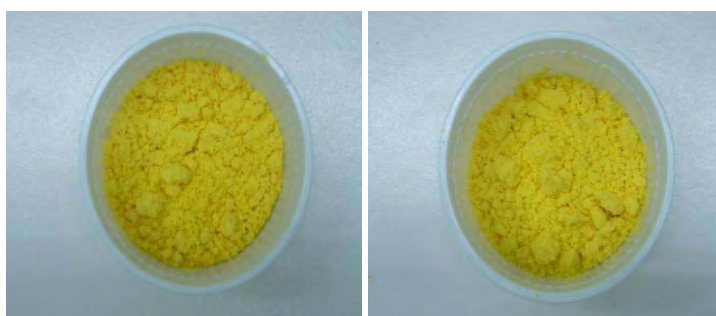
ภาพ ค.46 แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 90 % ก่อนเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 3 เดือน

3.5 ผลิตกัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชัน



ภาพ ค.47 แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ก่อนการเก็บรักษา (ซ้าย) และ หลังการเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 6 เดือน

3.6 ผลิตกัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมัน



ภาพ ค.48 แคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ก่อนการเก็บรักษา (ซ้าย) และหลังการเก็บรักษา (ขวา) เป็นเวลา 6 เดือน

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตาราง ง.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ beta-carotene recovery (%) ในการผลิต
แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลายในน้ำมัน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Sticky_rice	Between Groups	953.108	2	476.554	96.528	.000
	Within Groups	29.622	6	4.937		
	Total	982.729	8			
Rice	Between Groups	1246.875	2	623.438	102.539	.000
	Within Groups	36.480	6	6.080		
	Total	1283.355	8			
Tapioca	Between Groups	649.671	2	324.836	69.617	.000
	Within Groups	27.996	6	4.666		
	Total	677.667	8			

ตารางที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปีตาแคโรทีนและค่า a_w ในการผลิตแคโรทีนอยด์
แห่งรูปมัลชันโดยใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Total_carotenoids	65236.968(a)	26	2509.114	10.618	.000
	water_activity	3.657(b)	26	.141	2127.314	.000
	Total_carotenoids	9537123.357	1	9537123.357	40358.052	.000
	water_activity	35.652	1	35.652	539190.481	.000
	Total_carotenoids	17813.134	2	8906.567	37.690	.000
	water_activity	.309	2	.155	2337.894	.000
	Total_carotenoids	22625.545	2	11312.773	47.872	.000
	water_activity	1.342	2	.671	10147.487	.000
	Total_carotenoids	12727.270	2	6363.635	26.929	.000
	water_activity	1.388	2	.694	10498.499	.000
	Total_carotenoids	2327.874	4	581.969	2.463	.056
	water_activity	.020	4	.005	74.045	.000
	Total_carotenoids	1447.748	4	361.937	1.532	.206
	water_activity	.031	4	.008	118.869	.000
	Total_carotenoids	4065.754	4	1016.439	4.301	.004
	water_activity	.529	4	.132	1999.371	.000
	Total_carotenoids	4229.643	8	528.705	2.237	.038
	water_activity	.038	8	.005	71.658	.000
	Total_carotenoids	12760.890	54	236.313		
	water_activity	.004	54	6.61E-005		
	Total_carotenoids	9615121.215	81			
	water_activity	39.313	81			
	Total_carotenoids	77997.858	80			
	water_activity	3.661	80			

a R Squared = .836 (Adjusted R Squared = .758)

b R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .999)

ตารางที่ ๓.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของบิตาแคโรทีน และค่า a_w ในการผลิต

แคโรทีนอยด์แห้งรูปอัดชั้นโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Total_carotenoids	104870.254(a)	26	4033.471	29.710	.000
	water_activity	.644(b)	26	.025	808.486	.000
	Total_carotenoids	6549134.983	1	6549134.983	48239.284	.000
	water_activity	50.779	1	50.779	1656515.209	.000
	Total_carotenoids	46849.564	2	23424.782	172.541	.000
	water_activity	.117	2	.058	1907.203	.000
	Total_carotenoids	40525.704	2	20262.852	149.251	.000
	water_activity	.166	2	.083	2700.063	.000
	Total_carotenoids	10212.805	2	5106.403	37.612	.000
	water_activity	.224	2	.112	3660.012	.000
	Total_carotenoids	3872.485	4	968.121	7.131	.000
	water_activity	.003	4	.001	21.966	.000
	Total_carotenoids	877.744	4	219.436	1.616	.183
	water_activity	.014	4	.004	115.693	.000
	Total_carotenoids	978.630	4	244.658	1.802	.142
	water_activity	.118	4	.030	963.778	.000
	Total_carotenoids	1553.321	8	194.165	1.430	.205
	water_activity	.002	8	.000	10.040	.000
	Total_carotenoids	7331.230	54	135.764		
	water_activity	.002	54	3.07E-005		
	Total_carotenoids	6661336.467	81			
	water_activity	51.425	81			
	Total_carotenoids	112201.484	80			
	water_activity	.646	80			

a R Squared = .935 (Adjusted R Squared = .903)

b R Squared = .997 (Adjusted R Squared = .996)

ตารางที่ ๓.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของบิตาแคโรทีน ในการผลิตแคโรทีนอยด์

แห้งรูปละลายในน้ำมัน เก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ANOVA

Total carotenoids

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	92202.374	12	7683.531	35.649	.000
Within Groups	5603.814	26	215.531		
Total	97806.188	38			

ตาราง ง.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของบีตาแคโรทีน ในการผลิตแคโรทีนอยด์
แห้งรูปอิมัลชัน เก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 6 เดือน

ANOVA

Total carotenoids

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14288.764	12	1190.730	116.055	.000
Within Groups	266.761	26	10.260		
Total	14555.525	38			

ตาราง ง.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของบีตาแคโรทีนในการผลิตแคโรทีนอยด์
แห้งรูปละลายในน้ำมัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน
ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
aw_0.31	Between Groups	9418.496	6	1569.749	306.743	.000
	Within Groups	71.645	14	5.117		
	Total	9490.141	20			
aw_0.43	Between Groups	6590.660	6	1098.443	228.406	.000
	Within Groups	67.328	14	4.809		
	Total	6657.989	20			
aw_0.50	Between Groups	5897.859	6	982.976	145.964	.000
	Within Groups	94.281	14	6.734		
	Total	5992.140	20			
aw_0.55	Between Groups	4871.136	6	811.856	62.307	.000
	Within Groups	182.420	14	13.030		
	Total	5053.555	20			
aw_0.65	Between Groups	4267.571	6	711.262	203.149	.000
	Within Groups	49.017	14	3.501		
	Total	4316.587	20			
aw_0.71	Between Groups	4295.675	6	715.946	114.528	.000
	Within Groups	87.518	14	6.251		
	Total	4383.193	20			
aw_0.80	Between Groups	2945.938	6	490.990	68.342	.000
	Within Groups	100.580	14	7.184		
	Total	3046.517	20			
aw_0.85	Between Groups	1954.497	6	325.749	125.026	.000
	Within Groups	36.476	14	2.605		
	Total	1990.973	20			

ตาราง ง.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของบีตาแคโรทีน ในการผลิตแคโรทีนอยด์
แห้งรูปอัดชั้น ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน
ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
aw_0.32	Between Groups	522.438	6	87.073	20.540	.000
	Within Groups	59.350	14	4.239		
	Total	581.788	20			
aw_0.41	Between Groups	458.451	6	76.408	86.851	.000
	Within Groups	12.317	14	.880		
	Total	470.768	20			
aw_0.52	Between Groups	445.362	6	74.227	64.652	.000
	Within Groups	16.073	14	1.148		
	Total	461.436	20			
aw_0.56	Between Groups	364.377	6	60.729	75.853	.000
	Within Groups	11.209	14	.801		
	Total	375.585	20			
aw_0.60	Between Groups	300.299	6	50.050	22.990	.000
	Within Groups	30.478	14	2.177		
	Total	330.777	20			
aw_0.68	Between Groups	278.269	6	46.378	103.661	.000
	Within Groups	6.264	14	.447		
	Total	284.532	20			
aw_0.72	Between Groups	231.210	6	38.535	35.933	.000
	Within Groups	15.014	14	1.072		
	Total	246.224	20			
aw_0.78	Between Groups	201.717	6	33.619	69.543	.000
	Within Groups	6.768	14	.483		
	Total	208.485	20			

ภาคผนวก จ

บทความสำหรับการเผยแพร่

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรม
ที่ดำเนินมา ผลที่ได้รับตลอดโครงการ และงานวิจัยสำหรับตีพิมพ์

1) บทความสำหรับการเผยแพร่

ผลของวิธีการทำแห้งและการเก็บรักษาต่อสมบัติของแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ

พัชรินทร์ ระวียัน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในน้ำมันปาล์มดิบ มีส่วนประกอบของแคโรทีนอยด์อยู่หลายชนิด เช่น อัลฟาแคโรทีน (α -carotene), บีตาแคโรทีน (β -carotene), ไลโคพีน (lycopene) และไฟโทอิน (phytoene) เป็นต้น โดยสารแคโรทีนอยด์เหล่านี้มีความสามารถในการต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน แต่ที่มีได้รับความสนใจที่สุด คือ อัลฟาแคโรทีนและบีตาแคโรทีน ที่มีปริมาณมากกว่า 90 % ของปริมาณสารประกอบแคโรทีนอยด์ทั้งหมด

จากการที่ประเทศไทยสามารถผลผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้มาก การสกัดสารแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์ม เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารคนและสัตว์ จึงจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำมันปาล์มดิบอีกทางหนึ่ง โดยแคโรทีนอยด์มีจำหน่ายในต่างประเทศในรูปแบบที่ละลายในน้ำมัน แบบของอิมัลชัน และรูปที่เป็นผง เป็นต้น โดยพบว่า แคโรทีนอยด์ในรูปผงเป็นรูปแบบที่สะดวกต่อการใช้งาน และสามารถเก็บรักษาได้ง่าย แต่เนื่องจากแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปน้ำมัน ดังนั้น การทำให้อยู่ในรูปผงจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงวิธีการทำให้แห้งที่เหมาะสม ที่จะทำให้อัลฟาแคโรทีนสูญเสียน้อยที่สุด และได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน

การทำแห้งแคโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน โดยใช้แปรงข้าวเหนียวเป็นตัวดูดซับ ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงมีสีส้มเหลือง มีแคโรทีนอยด์ 97% ของปริมาณตั้งต้น และมีความชื้นต่ำ ซึ่งป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี ส่วนการทำแห้งแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน ควรใช้แปรงข้าวเหนียวดูดซับ แล้วอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ซึ่งจะมีแคโรทีนอยด์คงเหลือหลังการอบแห้ง 75.00 % และผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีสีเหลืองส้ม และมีความชื้นต่ำ

การเก็บผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน พบว่า ยังมีบีตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์เหลืออยู่ 83.02 และ 78.19 % ตามลำดับ และพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา ไม่เกินค่ามาตรฐานของอาหารแห้ง การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชันให้นานขึ้น ควรเก็บในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 54.70 และ 60.13 % ตามลำดับ

2) กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

1. ได้ให้ข้อมูลแก่ผู้ประกอบการที่ผลิตน้ำมันปาล์มดิบ และผู้สนใจทั่วไปผ่านโครงการ ปาล์มน้ำมัน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
2. ได้เตรียมต้นฉบับเพื่อส่งตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับชาติที่มี peer review

3) ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง	ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับน้ำมันปาล์มดิบ การสกัด แคลโรทีนอยด์และเตรียม แคลโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน	ปฏิบัติตามกิจกรรมตาม ที่วางแผนไว้	ได้ข้อมูลพื้นฐานในการ ทำงานวิจัย
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งผลิตภัณฑ์แคลโรทีนอยด์รูปละลายในน้ำมัน	ศึกษาปริมาณแคลโรทีนอยด์ ที่ใช้ และใช้ชนิดแป้งดูดซับ แตกต่างกัน 3 ชนิด	ปฏิบัติตามกิจกรรมตาม ที่วางแผนไว้	ได้สภาวะที่เหมาะสมใน การ ทำแห้งผลิตภัณฑ์ แคลโรทีนอยด์รูปละลาย ในน้ำมัน
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้ง ผลิตภัณฑ์แคลโรทีนอยด์รูปอิมัลชัน	ศึกษาปริมาณแคลโรทีนอยด์ ที่ใช้และชนิดแป้งดูดซับ แตกต่างกัน 3 ชนิด รวมถึง วิธีการทำแห้งที่เหมาะสม	ปฏิบัติตามกิจกรรมตาม ที่วางแผนไว้	ได้สภาวะที่เหมาะสมใน การ ทำแห้งผลิตภัณฑ์ แคลโรทีนอยด์รูปอิมัลชัน
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ แคลโรทีนอยด์แห้งรูป ละลายในน้ำมันและใน รูปอิมัลชันระหว่างการ เก็บรักษา 6 เดือน	ศึกษาคุณภาพทางเคมี และ จุลชีววิทยา ของผลิตภัณฑ์ แคลโรทีนอยด์แห้งรูปละลาย ในน้ำมันและในรูปอิมัลชัน ระหว่างเก็บรักษา 6 เดือน	ปฏิบัติตามกิจกรรมตาม ที่วางแผนไว้	ทราบการเปลี่ยนแปลง ของ ผลิตภัณฑ์แคลโรทีนอยด์แห้งระหว่างเก็บรักษา 6 เดือน

5. ศึกษาผลของความ ขึ้นสัมพันธ์ที่ระดับ ต่างๆ ต่อการเปลี่ยน แปลงของแคโรทีนอยด์ แห่งรูปละลายในน้ำมัน และรูปอิมัลชันระหว่าง การเก็บรักษา 3 เดือน	ศึกษาคุณภาพทางเคมี และ จุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ แคโรทีนอยด์แห่งรูปละลาย ในน้ำมันและในรูปอิมัลชัน ที่ความขึ้นสัมพันธ์ที่ระดับ ต่าง ๆ ระหว่างเก็บรักษา 3 เดือน	กิจกรรมได้ปฏิบัติ เพิ่มเติมจากที่เสนอใน proposal เพื่อให้งานวิจัย สมบูรณ์ขึ้น	ทราบการเปลี่ยนแปลง ของ ผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ แห่งที่ความขึ้นสัมพันธ์ที่ ระดับต่าง ๆ ระหว่างเก็บ รักษา 3 เดือน
---	---	--	--

4) งานวิจัยสำหรับตีพิมพ์

ผลของวิธีการทำแห้งและการเก็บรักษาต่อสมบัติของแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ

Effects of Drying Methods and Storage on Properties of Carotenoids from Crude Palm Oil

พัชรินทร์ ะวียน¹ และ ชยานนท์ ชีระเจตกุล¹

Patcharin Raviyan¹ and Chayanon.Theerajetkul¹

บทคัดย่อ

การทำแห้งแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดละลายในน้ำมันโดยใช้แป้งคุดชับ ควรใช้แป้งข้าวเหนียว ที่อัตราส่วนแป้งต่อแคโรทีนอยด์ 10 : 4 โดยน้ำหนัก ซึ่งแคโรทีนอยด์ถูกดูดซับได้ 97.44 % มีค่า $a_w = 0.41$ ส่วนการทำแห้งแคโรทีนอยด์ชนิดอิมัลชัน ควรใช้แป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่อแคโรทีนอยด์ 2:1 โดยน้ำหนัก แล้วทำแห้งต่อโดยใช้ไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ที่กำลัง 720 วัตต์ นาน 15 นาที ซึ่งแคโรทีนอยด์ถูกดูดซับได้ 75.00 % และมีค่า $a_w = 0.52$ การเก็บแคโรทีนอยด์ผงในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ 30 °C นาน 6 เดือน ทำให้บิตาแคโรทีนในแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมัน และรูปอิมัลชันลดลง 23.55% และ 9.85 % ตามลำดับ ส่วนการเก็บแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 23 ถึง 80 % ที่ 30 °C นาน 3 เดือน พบว่า การลดลงของบิตาแคโรทีนเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) การเก็บแคโรทีนอยด์แห้งในรูปน้ำมันและรูปอิมัลชัน ควรเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 54.70 % และ 60.13 % ตามลำดับ ตัวอย่างที่ศึกษาทั้งหมดมีจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราตามเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้ง

คำสำคัญ: แคโรทีนอยด์ น้ำมันปาล์มดิบ เตาอบแบบสุญญากาศ เตาอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ บิตาแคโรทีน

Key Words: carotenoids, crude palm oil, microwave-vacuum dryer, vacuum dryer, beta-carotene

P. Raviyan:p.charin@chiangmai.ac.th

คำนำ

ประเทศไทยมีการผลิตน้ำมันปาล์มดิบสูง การสกัดสารแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์ม เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารคนและสัตว์ จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการเพิ่มมูลค่าน้ำมันปาล์มดิบ นอกจากนี้สารสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มยังมีสารสำคัญคือ บิตาแคโรทีน ซึ่งเป็นแหล่ง

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร ต.แม่เหียะ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50100

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry Chiangmai University Maeae, Amphur Muang, Chiang Mai 50100

ของวิตามินเอ ซึ่งการขาดวิตามินเอเป็นปัญหาสำคัญของเด็กไทยในขณะนี้ (แสงโสม, 2548) แต่การเสริมวิตามินเอในอาหารยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากประเทศไทยต้องนำเข้าวิตามินเอจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง มีงานวิจัยถึงการเสริมแคโรทีนอยด์ในอาหารไก่ พบว่านอกจากจะช่วยเสริมคุณค่าทางอาหารของไก่แล้ว ยังทำให้สีส้มของไข่ไก่เข้มขึ้น ซึ่งเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค (Na *et al.*, 2004)

แคโรทีนอยด์มีการผลิตออกมาหลายรูปแบบ เช่น ในรูปที่ละลายในน้ำมัน ในรูปคอลลอยด์ ในรูปอิมัลชัน และในรูปผง เป็นต้น โดยพบว่าแคโรทีนอยด์ในรูปผงเป็นรูปที่สะดวกต่อการใช้งาน และสามารถเก็บรักษาได้ง่าย ได้มีการศึกษาการทำแห้งเซลล์ยีสต์ *Rhodotorula glutinis* ที่ผลิตบีตาแคโรทีนได้ พบว่า การใช้เครื่องอบแห้งระบบแบบพ่นฝอย สามารถให้ผลผลิตบีตาแคโรทีนที่มีความเข้มข้นสูงออกมา (Bhosale *et al.*, 2003) หรือการทำแห้งแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำแครอทด้วยระบบแช่เยือกแข็ง (Tang and Chen., 2000) ซึ่งจะเห็นว่าการอบแห้งทั้งสองวิธีมีข้อจำกัด คือเป็นเทคนิคในการทำผงซึ่งใช้ค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาสูงและมีการใช้งานในวงแคบ

การทำแห้งโดยใช้ระบบสุญญากาศ มีการทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งทำให้แห้งได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน (Regier *et al.*, 2005) ส่วนการทำแห้งด้วยไมโครเวฟระบบสุญญากาศทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้อย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และเป็นระบบที่มีออกซิเจนต่ำจึงช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Cui *et al.*, 2004) การศึกษานี้ได้ใช้แป้งดูดซับร่วมกับเตาอบแบบสุญญากาศ (Vacuum dryer) และเตาอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ (Microwave-vacuum dryer) ในการทำแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มให้แห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ

น้ำมันปาล์มดิบ ได้รับความอนุเคราะห์ จากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว จากบริษัท ไทยอินเตอร์เนชันแนลไรซ์ฟลาว ส่วนแป้งถั่วเขียว และแป้งมันสำปะหลัง ได้จากบริษัท สิทธิพันธ์ และกรุงเทพสตาชอินดัสเทรีย จำกัด ตามลำดับ

2. การเตรียมตัวอย่างแคโรทีนอยด์

2.1 การเตรียมตัวอย่างแคโรทีนอยด์สกัด

นำน้ำมันปาล์มดิบมากำจัดกัมและสกัดด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำ ตามวิธีของ พัชรินทร์ และคณะ (2548) สารที่ได้เรียกว่า สารสกัดแคโรทีนอยด์

2.2 การเตรียมตัวอย่างแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชัน

นำสารสกัดแคโรทีนอยด์ที่ได้จากข้อ 2.1 มาทำอิมัลชันฟิเคชันตามวิธีของ Thanasukarn *et al.*, 2006 บรรจุแคโรทีนอยด์รูปอิมัลชันที่ได้ในขวดสีชาเก็บรักษาในที่มืดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3. การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ

3.1 การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบในรูปละลายในน้ำมัน

ในการทดลองนี้ใช้การวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยนำแคโรทีนอยด์สกัดในการทดลองที่ 2.1 ผสมกับแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของสารสกัดแคโรทีนอยด์ : แป้งในอัตราส่วน 3.0:10 3.5:10 และ 4.0:10 จากนั้นคัดเลือกผลิตภัณฑ์ผงที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ค่า a_w (Aqualab รุ่น CX3, USA.); ค่าสีในสเกล $L^* a^* b^*$ (Minolta รุ่น CR-30, Japan) และร้อยละของบีตาแคโรทีนที่ได้กลับคืนมา (Shu *et al.*, 2006)

3.2 การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบในรูปอิมัลชัน

การทำแห้งแคโรทีนอยด์ในรูปอิมัลชันจากการทดลองที่ 2.2 โดยใช้แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งถั่วเขียว เป็นสารตั้งต้นในการจับกับสารแคโรทีนอยด์ จากนั้นศึกษาสภาวะการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง 2 แบบ คือ เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

3.2.1 การทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชัน วางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial) ขนาด 3x3 โดยแปรค่าอุณหภูมิ และเวลาในการอบแห้งเป็น 3 ระดับเป็น 40, 50, 60 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ 30, 45, 60 นาที ตามลำดับ โดยคงระดับความดันของระบบไว้ที่ 210 มิลลิเมตรปรอท นำผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชันที่ได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี พิจารณาคัดเลือกชนิดแป้งที่ใช้ และสภาวะที่เหมาะสม ค่า a_w (Aqualab รุ่น CX3, USA) และ ปริมาณบีตาแคโรทีน (Ribeiro *et al.*, 2008)

3.2.2 การทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

ศึกษาผลของกำลังไฟฟ้า และเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปอิมัลชันจากการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระบบสุญญากาศ โดยกำหนดสภาวะความดันที่ 210 mmHg วางแผนการทดลองแบบ Factorial ขนาด 3x3 โดยแปรค่ากำลังไฟฟ้าเป็น 720, 960, 1200 วัตต์ และเวลาที่ใช้ 5, 10, 15 นาที ตามลำดับ โดยคงระดับความดันของระบบไว้ที่ 210 มิลลิเมตรปรอท นำผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์แห้งมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี เพื่อคัดเลือกรูปแบบและสภาวะที่เหมาะสม

4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างเก็บรักษาแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและในรูปอัดขึ้น เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและรูปอัดขึ้นมารวม 5 กรัม ทำการเก็บในระบบปิดที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 23.1, 33.2, 44.1, 52.9, 68.9, 75.3 และ 95.69 % ในสารละลายเกลืออิ่มตัวของ CH_3COOH , MgCl_2 , K_2CO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, KI , NaCl และ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืด ทำการสุ่มตัวอย่างทุก 4 วัน เพื่อวัดค่า a_w ของตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างมีค่า a_w คงที่ นำไปคำนวณปริมาณความชื้นโดยชั่งตัวอย่าง 5 กรัม นำไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟ Sorption Isotherm

5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างเก็บรักษาแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันและในรูปอัดขึ้น เป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำแคโรทีนอยด์แห้งบรรจุในอะลูมิเนียมฟรอยด์ เก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน สุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณบิตาแคโรทีนและหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา (AOAC, 2000)

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for window 11.0 วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ผลการทดลองและวิจารณ์

1 ศึกษาสถานะการทำแห้งแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ

1.1 การทำแห้งแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบในรูปละลายในน้ำมัน

ประสิทธิภาพในการดูดซับแคโรทีนอยด์ ซึ่งคำนวณจากร้อยละของบิตาแคโรทีนที่ได้กลับคืนมา (% Recovery of Beta-carotene) ของแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลัง ค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อใช้อัตราส่วนของแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น การใช้แป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วนของแคโรทีนอยด์ต่อแป้ง 4:10 โดยน้ำหนัก เป็นตัวดูดซับและสถานะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด (Table 1) และดีกว่าการใช้ดินเหนียวเป็นตัวดูดซับ (วินันทา, 2003) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงและมีสีเหลืองส้ม (Figure 1) และมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเพียงพอต่อการเก็บรักษาที่สภาวะปกติได้

Table 1 Recovery of β -carotene in powders of oil soluble carotenoids

Carotenoids : Flour (wt: wt)	Recovery of β -carotene (%)		
	Non-sticky rice flour	Sticky rice flour	tapioca flour
3.0:10	57.55 ^c ± 3.02	73.56 ^c ± 2.80	76.11 ^b ± 1.67
3.5:10	72.76 ^b ± 2.12	92.48 ^b ± 2.18	77.55 ^b ± 1.70
4.0:10	86.37 ^a ± 2.15	97.44 ^a ± 1.50	94.81 ^a ± 2.88

**Figure 1 Powders of oil soluble carotenoids (left) carotenoids emulsion dried by vacuum**

drying (middle) and carotenoids emulsion dried by microwave-vacuum drying (light)

1.2 การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศและเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

จาก Table 2 และ 3 พบว่า การให้ความร้อนสูงขึ้นรวมกับการใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น มีผลทำให้ปริมาณบีตาแคโรทีนและค่า a_w ของตัวอย่างมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้การใช้แป้งถั่วเขียวเป็นตัวดูดซับแคโรทีนอยด์อีมีลชัน ในสัดส่วน 40 % โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนแป้งต่อแคโรทีนอยด์อีมีลชัน 2:1 โดยน้ำหนัก และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งคือ การอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ที่ 720 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที เนื่องจากได้ปริมาณบีตาแคโรทีนทั้งหมดสูงสุด และผลิตภัณฑ์มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 ซึ่งสามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นอนุภาค ขนาดเล็ก มีสีเหลืองส้ม (Figure 1)

Table 2 Comparison of drying Temperatures and drying times for vacuum drying of β -carotene and water activity (in parentheses) of carotenoids emulsion powders

Drying condition		β -carotene ($\mu\text{g/g dry wt}$) (a_w)		
Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Time (min)	Non-sticky rice flour	Sticky rice flour	Mungbean flour
40	30	312.47 ^{aB} (0.88)	304.00 ^{aB} (0.85)	355.68 ^{aA} (0.83)
	45	295.45 ^{bB} (0.76)	290.44 ^{abB} (0.75)	337.53 ^{abcA} (0.78)
	60	287.75 ^{bB} (0.75)	287.46 ^{abcB} (0.73)	334.86 ^{abcA} (0.73)
50	30	265.88 ^{cB} (0.77)	283.87 ^{abcB} (0.76)	343.43 ^{abA} (0.71)
	45	262.09 ^{cB} (0.66)	267.15 ^{cdeB} (0.61)	331.71 ^{abA} (0.67)
	60	241.52 ^{dB} (0.53)	247.87 ^{efB} (0.46)	315.72 ^{cA} (0.50)
60	30	245.99 ^{dB} (0.76)	264.22 ^{defB} (0.71)	318.35 ^{cA} (0.71)
	45	239.64 ^{dB} (0.54)	243.77 ^{efB} (0.58)	265.22 ^{dA} (0.51)
	60	231.89 ^{dA} (0.43)	241.97 ^{fa} (0.39)	261.47 ^{dA} (0.32)

a Each value represents triplicate analyses of the samples.

b Values in the same row bearing different letters (a-f) are significant different ($p < 0.05$)

c Values in the same column bearing different letters (A-B) are significant different ($p < 0.05$)

Table 3 Comparison of drying Temperatures and drying times for microwave-vacuum drying of β -carotene and water activity (in parentheses) of carotenoids emulsion powders

Condition		β -carotene ($\mu\text{g/g dry wt}$)(a_w)		
Power (watt)	Time (min)	Non-sticky rice flour	Sticky rice flour	Mungbean flour
720	5	357.17 ^{aA} (0.87)	361.73 ^{aA} (0.84)	386.09 ^{aA} (0.78)
	10	352.32 ^{aB} (0.85)	357.99 ^{aB} (0.84)	374.50 ^{abA} (0.70)
	15	339.12 ^{bA} (0.81)	353.33 ^{aA} (0.76)	371.42 ^{abcA} (0.52)
960	5	357.27 ^{aA} (0.86)	353.21 ^{aA} (0.83)	369.27 ^{abcA} (0.78)
	10	322.17 ^{cC} (0.85)	348.16 ^{aB} (0.80)	362.86 ^{abcdA} (0.70)
	15	309.86 ^{dC} (0.70)	348.29 ^{aB} (0.60)	350.21 ^{bcdA} (0.46)
1200	5	335.96 ^{bC} (0.83)	345.77 ^{aB} (0.80)	369.12 ^{abcA} (0.70)
	10	283.40 ^{eC} (0.48)	321.76 ^{aB} (0.55)	344.32 ^{cdA} (0.42)
	15	286.71 ^{eB} (0.23)	264.67 ^{bC} (0.20)	338.00 ^{dA} (0.14)

a Each value represents triplicate analyses of the samples.

b Values in the same row bearing different letters (a-e) are significant different ($p < 0.05$)

c Values in the same column bearing different letters (A-C) are significant different ($p < 0.05$)

3.2 Moisture sorption isotherms ของแคโรทีนอยด์แห้งในรูปละลายในน้ำมันและรูปอิมัลชัน

Sorption Isotherms ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Figure 2) มีลักษณะเป็นรูปโค้ง (sigmoidal curve) ประกอบด้วย เส้นกราฟ adsorption isotherm ที่ค่า a_w ช่วง 0.51 – 0.85 และเส้นกราฟ desorption isotherm ที่ค่า a_w ช่วง 0.31 – 0.51 ทั้งนี้ที่ค่า a_w ระหว่าง 0.31 ถึง 0.55 กราฟจะมีความชันต่ำ แสดงว่า ช่วงนี้อาหารดูดความชื้นได้ต่ำ จนที่ a_w มากกว่า 0.55 กราฟเริ่มมีความชันเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถในการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ดังนั้นจึงควรเก็บแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 54.70% หรือทำให้ผลิตภัณฑ์ มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.55 (Debnath *et al.*, 2002)

Sorption Isotherms ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Figure 2) แสดงว่าควรเก็บแคโรทีนอยด์แห้งรูปละลายในน้ำมันที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 60.13% หรือทำให้ผลิตภัณฑ์ มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 (Debnath *et al.*, 2002) ซึ่งการที่แคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันสามารถเก็บรักษาได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่ารูปละลายในน้ำมัน เนื่องจาก ในรูปน้ำมัน การจับกันระหว่างแคโรทีนอยด์กับแป้งคุดซ์มีเฉพาะที่ตำแหน่ง Hydrophobic เท่านั้น ขณะที่ในรูปอิมัลชันมีการจับกันระหว่างแคโรทีนอยด์อิมัลชันกับแป้งคุดซ์ที่ตำแหน่ง Hydrophobic และ Hydrophilic เป็นผลให้แคโรทีนอยด์อิมัลชันแห้ง มีตำแหน่งในการดูดซับน้ำน้อยลง จึงทำให้สามารถดูดความชื้นได้น้อยกว่าแคโรทีนอยด์แห้งรูปน้ำมัน ดังจะเห็นจากปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ ที่ $a_w = 0.50$ ของแคโรทีนอยด์แห้งรูปอิมัลชันและรูปน้ำมัน 20 และ 25% ตามลำดับ

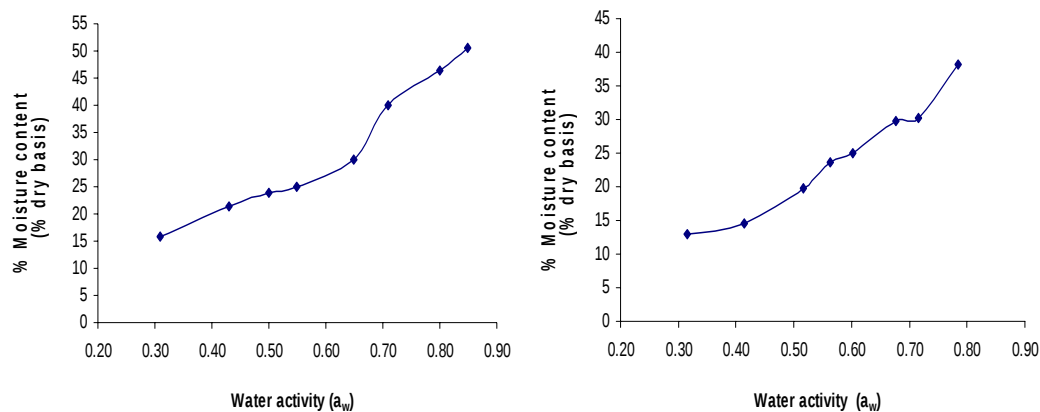


Figure 2 Sorption Isotherms of powders of oil soluble carotenoids (left) and carotenoids emulsion (light) under equilibrium relative humidity at 25°C

3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ระหว่างการเก็บรักษา

จาก Figure 3 พบว่า ปริมาณของแคโรทีนอยด์ทั้งในรูปละลายในน้ำมันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในช่วง 3 เดือนแรก ปริมาณบีตาแคโรทีนมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากนั้นปริมาณบีตาแคโรทีนยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการเก็บรักษาอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งผลการทดลองที่ได้เช่นเดียวกับการทดลองการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ทั้งรูปอิมัลชันระหว่างการเก็บรักษา

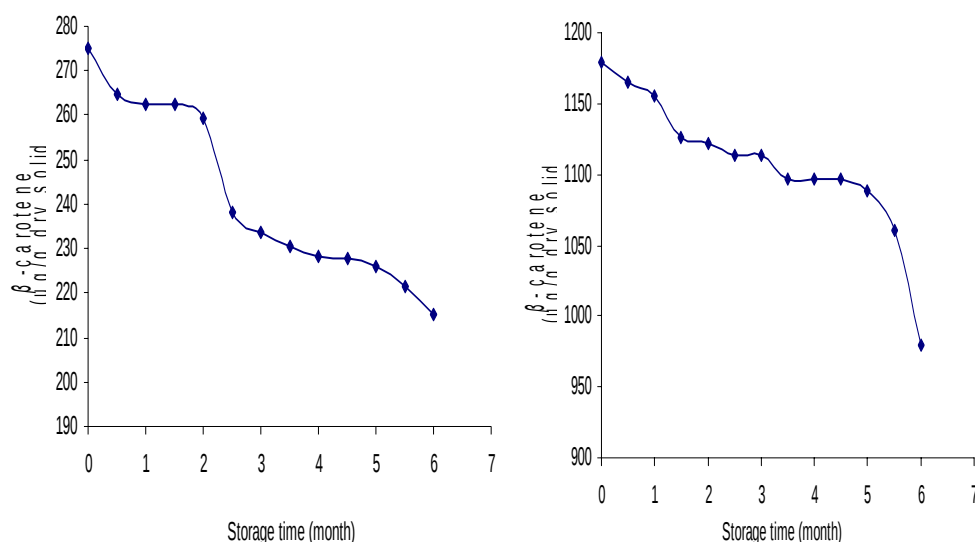


Figure 3 Concentration changes of β -carotene in powders of oil soluble carotenoids (left) and carotenoids emulsion (light) during storage at 30°C for 6 months

ในช่วงเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นอกจากศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีนแล้ว ยังได้ทำการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ตลอดจนปริมาณยีสต์และรา แม้ว่าผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ทั้งจะไม่มีการกำหนดคุณภาพของจุลินทรีย์ แต่เมื่อเทียบกับคุณภาพมาตรฐานของอาหารแห้ง ซึ่งกำหนดให้ปริมาณ จุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 6 log cfu/g, ราและยีสต์ไม่เกิน 2 log cfu/g (มอก. 639-2548) พบว่าแคโรทีนอยด์ทั้งที่ละลายในน้ำมันและในรูปอิมัลชันยังมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์ได้มาตรฐานเมื่อเก็บไว้นาน 6 เดือน

คำนิยม

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และขอขอบคุณ บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด ที่สนับสนุนน้ำมันปาล์มดิบ

เอกสารอ้างอิง

- พัชรินทร์ ระวีชัย, สรศักดิ์ เหลี้ยวไชยพันธุ์, ดวงสมร ลิ้มปิติ และประมวล ศรีกาหลง. 2548. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำเพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร. สำนักงานสนับสนุนการวิจัย.
- วินันตา พุพันธ์พานิช. 2546. บทคัดย่อ : การแยกแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มโดยการดูดซับบนดินเหนียว.[ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/3345> (20 กุมภาพันธ์ 2551).
- แสงโสม สีนะวัฒน์. 2539. “สถานการณ์โรคขาดวิตามินเอในประเทศไทย”. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.anamai.moph.go.th/factsheet> (7 มีนาคม 2548).อรชุน เลียววัฒนะผล . 2539. ด้านโรคด้านมะเร็งด้วยปีศาจโรทีน รวมพรรณศรี กรุงเทพมหานคร หน้า 9-10.
- AOAC. (2000). Official method of AOAC international. 17th ed. The association of Official Analytical Chemists. Code 9411. 25.
- Bhosale, P., Jogdand, V.V. and Grade, R.V. (2003). Stability of β -carotene in spray dried preparation of *Rhodotorula glutinis* mutant 32. Journal of Applied Microbiology. 95. 584-590.
- Cui, Z.W., Xu, S.Y. and Sun, D.W. (2004). Microwave-vacuum drying kinetic carrot slices. Journal of Food Engineering. 65. 157-164.
- Debnath, K., Hemavathy, J. and Bhat K.K. (2002). Moisture sorption studies on onion powder. Food Chemistry. 78. 479-482.
- Na, J.C., Song, J.Y., Lee, B.D., Lee, S. J., Lee, C.Y. and An, G.H. (2004). Effect of polarity on absorption and accumulation of carotenoids by laying hens. Animal Feed Science and Technology. 117. 305-315.
- Regier, M., Mayer-Miebach, E., Benhsnnilian, D., Neff, E. and Schuchmann, H.P. (2005). Influences of drying and storage of lycopene-rich carrot on the carotenoid content. Drying Technology. 23. 989-998.
- Ribeiroa, H.S., Chua, B.S., Ichikawab, S. and Nakajima M.(2008). Preparation of nanodispersions containing β -carotene by solvent displacement method. Food Hydrocolloids . 22. 12-17.
- Shu, B., Yu, W., Zhao, Y. and Liu, X. (2006). Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying. Journal of Food Engineering. 76. 664-669.

- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R. and McClements, D.J. (2006). Impact of fat and water crystallization on the stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions stabilized by a non ionic Surfactant. *Journal of Agriculture Food Chemistry*. 54. 3591-3597.
- Tang, Y.C. and Chen, B.H. (2000). Pigment change of freeze-dried carotenoid powder during storage. *Food Chemistry*. 69. 11-17.