บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยเฮกเซนที่อุณหภูมิต่ำ

ผลการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าเมื่อนำน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการกำจัดกัมแล้วซึ่งมีบีตาแคโรทีน 552.44 ไมโครกรัมต่อกรัม มาผ่านกระบวนการสกัดแคโรทีนอยด์ด้วยเครื่องสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อระเหยแยกเอาเฮกเซนออกไปแล้ว จะได้สารสกัดแคโรทีนอยด์ร้อยละ 43.032 โดยมวลของน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการสะปอนิฟิเคชันจะได้ปริมาณสารสกัด แคโรทีนอยด์ร้อยละ 0.016 ของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการกำจัดกัม ซึ่งปริมาณที่ได้ใกล้เคียงกันกับที่พัชรินทร์และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาไว้

4.2 ความคงตัวของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ หลังการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ

4.2.1 ความคงตัวของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน หลังการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ

การเตรียมสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน โดยเลือกใช้น้ำมันดอกทานตะวันเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากน้ำมันดอกทานตะวันประกอบด้วยกรดโอเลอิกและวิตามินอีสูง (นิธิยา, 2548) ซึ่ง Goulson and Warthesen (1999) พบว่าบีตาแคโรทีนจะมีความคงตัวมากเมื่อละลายอยู่ในน้ำมันที่มีองค์ประกอบของกรดโอเลอิกสูง และวิตามินอียังมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันการสลายตัวของบีตาแคโรทีนได้ (Heinonen *et al.*, 1997) นอกจากนี้สีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมันที่จำหน่ายโดยทั่วไปนิยมใช้น้ำมันดอกทานตะวันเป็นตัวทำละลายอีกด้วย (BASF Corp., 2005; Allied Biotech Corp., 2006) เมื่อนำสีผสมอาหารไปตรวจวัดความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี พบว่าสีผสมอาหารที่ได้ทั้งชุดควบคุมและชุดที่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระมีความเข้มข้นบีตาแคโรทีนไม่แตกต่างกัน (p>0.05) เนื่องจากได้ทำการเตรียมตัวอย่างในคราวเดียวกัน แล้วจึงแบ่งตัวอย่างไปเติมสารต้านอนุมูลอิสระชนิดต่างๆ ดังนั้นสีผสมอาหารที่ได้จึงมีความเข้มข้นบีตาแคโรทีนใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1,359.58-1,396.54 ไมโครกรัมต่อกรัม รวมทั้งค่ากรด และค่าเพอร์ออกไซด์ก็ไม่แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในตาราง 4.1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.1 ความเข้มข้นของบีตาแคโรทีน และสมบัติทางเคมีของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน หลังการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ

สิ่งทดลอง	ความเข้มข้นของบีตาแคโรทีน[1, ns] (ไมโครกรัมต่อกรัม)	ค่ากรด[1, ns] (มิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ค่าเพอร์ออกไซด์[1, ns] (มิลลิกรัมสมมูลต่อกิโลกรัม)
ชุดควบคุม	1,387.74±21.57	0.668±0.035	6.5346±0.964
เติม BHA	1,366.16±33.31	0.642±0.017	6.1970±0.626
เติม BHT	1,359.58±14.13	0.683±0.012	6.2473±0.775
เติม TBHQ	1,396.54±20.91	0.659±0.019	7.0237±0.835

หมายเหตุ: [ns] ข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

[1] ผลการวิเคราะห์เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ

4.2.2 ความคงตัวของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน หลังการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ

การเตรียมสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ได้สีผสมอาหารที่มีความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตาราง 4.2) เนื่องจากในการเตรียมตัวอย่างอิมัลชันจะต้องนำสีผสมอาหารที่อยู่ในรูปน้ำมันซึ่งเติมสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิด มาผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ของแต่ละชุดทดลอง ซึ่งในการผสมแต่ละครั้งอาจทำให้ขนาดอนุภาคของน้ำมันกระจายตัวในส่วนสารละลายบัฟเฟอร์ได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นสีผสมอาหารที่ได้จึงมีความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนแตกต่างกัน และผลการตรวจปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของสีผสมอาหารทั้งหมด พบว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 250 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และปริมาณเชื้อยีสต์และราน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อมิลลิลิตร แต่ทั้งนี้ยังไม่สามารถเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานได้ เนื่องจากยังไม่มีการระบุมาตรฐานปริมาณเชื้อสำหรับสีผสมอาหาร อย่างไรก็ตามปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในสีผสมอาหารถือว่ามีค่าต่ำมาก เนื่องจากน้ำมันมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) ต่ำมาก และเมื่อผ่านกระบวนการสกัดด้วยเฮกเซนซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ จึงทำให้พบเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในปริมาณน้อยมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.2 ความเข้มข้นของบีตาแคโรทีน และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน หลังการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ

สิ่งทดลอง	ความเข้มข้นของบีตาแคโรทีน[1] (ไมโครกรัมต่อกรัม)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด[1] (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณเชื้อยีสต์ และรา[1] (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)
ชุดควบคุม	1,408.08^{a} ±65.13	น้อยกว่า 250	น้อยกว่า 100
เติม BHA	1,241.75^{bc} ±18.07	น้อยกว่า 250	น้อยกว่า 100
เติม BHT	1,235.09^{bc} ±53.10	น้อยกว่า 250	น้อยกว่า 100
เติม TBHQ	1,172.96^{c} ±36.43	น้อยกว่า 250	น้อยกว่า 100
เติม BHA และสารกันเชื้อรา	1,297.24^{b} ±93.88	น้อยกว่า 250	น้อยกว่า 100
เติม BHT และสารกันเชื้อรา	1,177.22^{c} ±85.82	น้อยกว่า 250	น้อยกว่า 100
เติม TBHQ และสารกันเชื้อรา	1,219.85^{bc} ±15.29	น้อยกว่า 250	น้อยกว่า 100

หมายเหตุ: $^{a,b,c,\ldots}$ ในแถวแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

[1] ผลการวิเคราะห์เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ

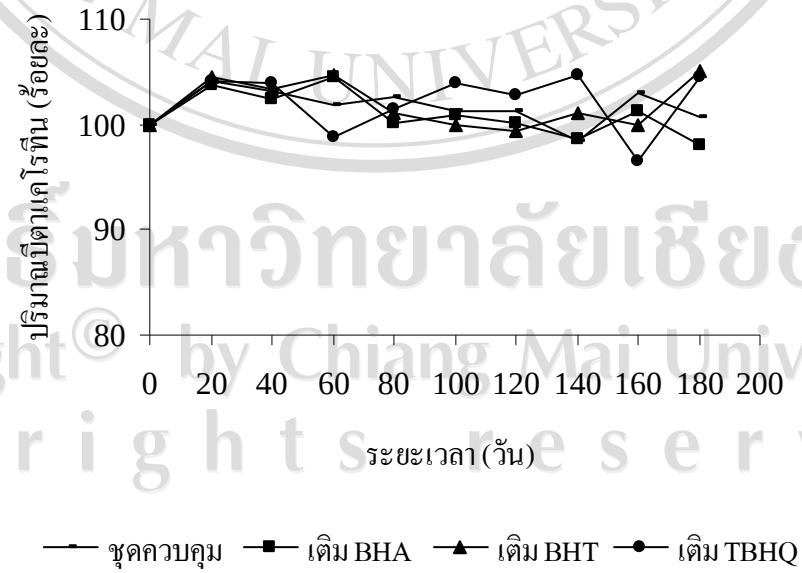
4.3 ผลของสารต้านอนุมูลอิสระต่ออายุการเก็บรักษาของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์

4.3.1 ผลของสารต้านอนุมูลอิสระต่ออายุการเก็บรักษาของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30±5 องศาเซลเซียส

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30±5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้องเฉลี่ยสำหรับประเทศแถบร้อน เป็นระยะเวลา 180 วัน พบว่าตลอดระยะเวลาที่ทำการเก็บรักษา ปริมาณบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารที่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระทั้งสามชนิด และชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ มีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างจากปริมาณบีตาแคโรทีนที่ตรวจวัดได้หลังการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (p>0.5) ดังแสดงในภาพ 4.1 และพบว่าค่ากรด และค่าเพอร์ออกไซด์ของสีผสมอาหารมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 180 วัน (ภาพ 4.2 และ 4.3) ซึ่งค่ากรดจะบ่งชี้ถึงการสลายตัว และการหืนของน้ำมัน โดยถ้าค่ากรดสูง แสดงว่าโมเลกุลของ

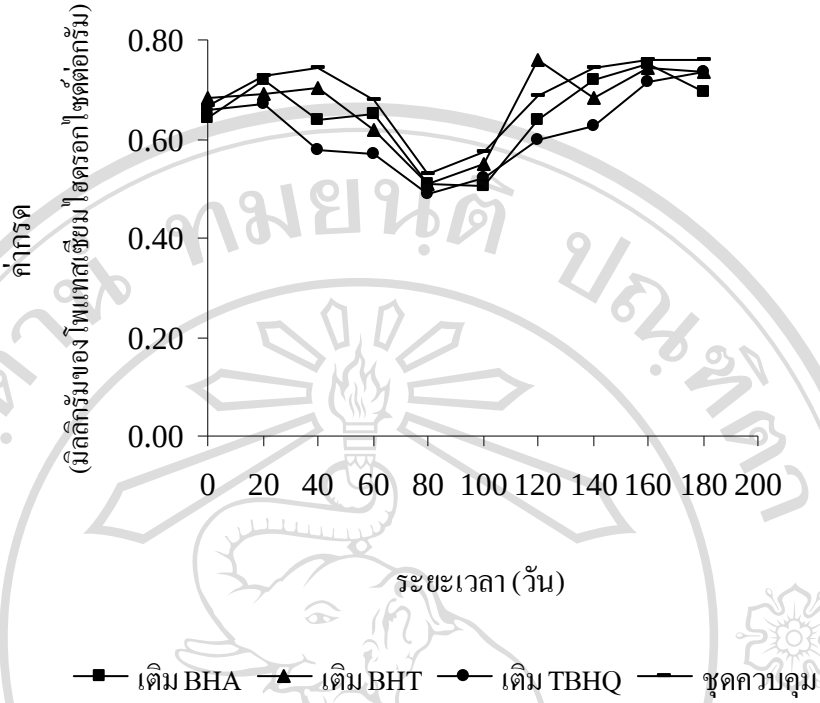
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไตรเอซิลกลีเซอรอลสลายตัวได้เป็นกรดไขมันอิสระมาก และค่าเพอร์ออกไซด์จะบ่งชี้ถึงการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันเนื่องจากเพอร์ออกไซด์เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน (นิธิยา, 2548) ผลที่ได้นี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการบรรจุขวดได้มีการพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้าก่อนทำการปิดฝา ซึ่งเป็นการกำจัดออกซิเจนออกไป และป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของบีตาแคโรทีน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระทั้งสามชนิด กับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารต้านอนุมูลอิสระจึงไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ขวดที่ใช้บรรจุซึ่งเป็นขวดสีชาทึบแสง และการเก็บรักษาในตู้บ่มที่มืด ยังช่วยป้องกันการสลายตัวของบีตาแคโรทีนเนื่องจากแสงได้ด้วย โดยผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาการใช้แก๊สไนโตรเจนเพื่อเพิ่มความคงตัวของน้ำมันมะกอกในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งพบว่าการเก็บรักษาน้ำมันมะกอกที่อุณหภูมิ 12-20 องศาเซลเซียส ในที่มืด โดยพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ถึง 24 เดือน ในขณะที่การเก็บรักษาที่ไม่มีการพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้านั้น ค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันมะกอกจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐาน (Giovacchino *et al.*, 2002) นอกจากนี้ Ramírez *et al.* (2001) ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และแสงต่ออายุการเก็บรักษาของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่บรรจุในขวดพลาสติกใสและพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า พบว่าเมื่อทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในที่มืด น้ำมันดอกทานตะวันจะมีอายุการเก็บรักษามากกว่า 2 ปี แต่เมื่อทำการเก็บรักษาในที่ที่มีแสง อายุการเก็บรักษาจะลดลงเหลือประมาณ 281 วัน

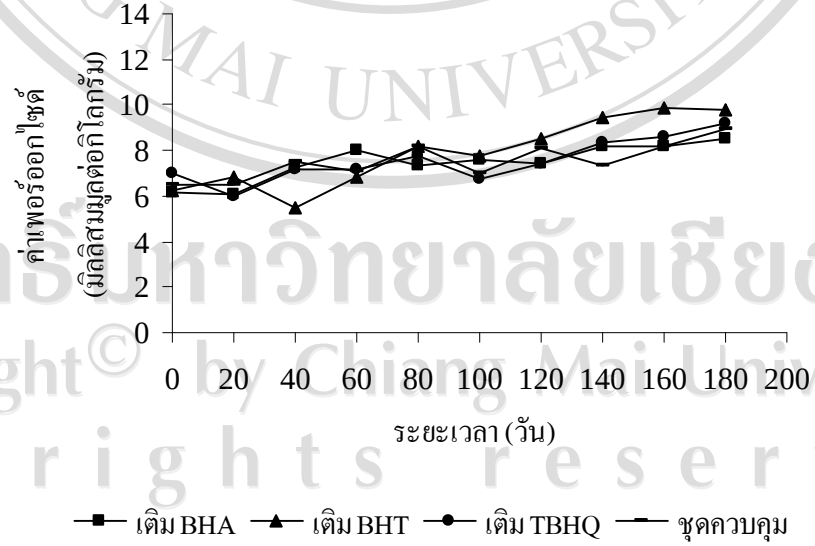


ภาพ 4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีนของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ซึ่งทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30±5 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่ากรดของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ซึ่งทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30±5 องศาเซลเซียส



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์ออกไซด์ของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ซึ่งทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30±5 องศาเซลเซียส

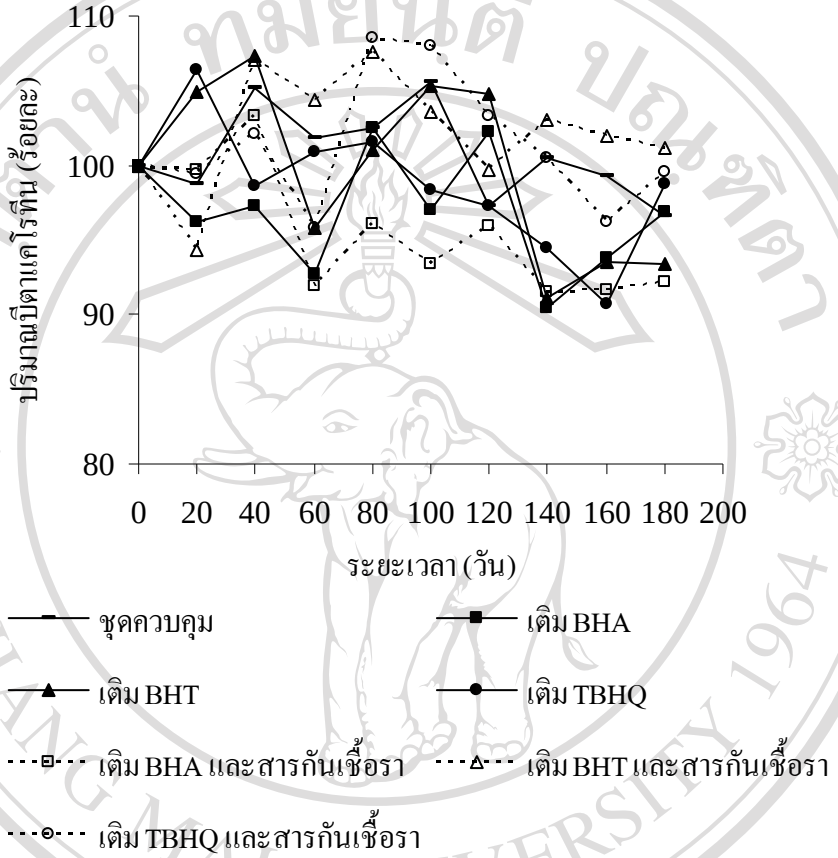
เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน บีตาแคโรทีนจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว โดย Goulson and Warthesen (1999) ได้ศึกษาความคงตัวของบีตาแคโรทีนในน้ำมันคาโนลา ซึ่งเก็บรักษาในสภาวะเร่งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในที่มืด และปล่อยให้น้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ พบว่าอัตราการสูญเสียบีตาแคโรทีนในน้ำมันจะสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการเก็บรักษาโดยในวันที่ 12 อัตราการสูญเสียบีตาแคโรทีนจะสูงถึงร้อยละ 25.7 และเมื่อความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนในน้ำมันมากขึ้น อัตราการสูญเสียบีตาแคโรทีนในน้ำมันก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เมื่อเก็บรักษาน้ำมันที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในที่มีแสง และปล่อยให้น้ำมันสัมผัสกับออกซิเจน เป็นระยะเวลา 21 วัน พบว่าอัตราการสูญเสียบีตาแคโรทีนจะสูงถึงร้อยละ 27.3

4.3.2 ผลของสารต้านอนุมูลอิสระต่ออายุการเก็บรักษาของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5±2 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5±2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บรักษาสีผสมอาหารที่อยู่ในรูปอิมัลชันเพื่อป้องกันการแยกชั้นในส่วนของน้ำกับน้ำมัน เป็นระยะเวลา 180 วัน พบว่าผลที่ได้ก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน นั่นคือการเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารทุกชุดทดลอง ไม่แตกต่างกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (p>0.5) ดังภาพ 4.4 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องผลของการบรรจุและสภาวะการเก็บรักษาต่อสี และปริมาณบีตาแคโรทีนที่เหลืออยู่ในเนื้อมะม่วงเข้มข้นพาสเจอไรส์ (Vásquez-Caicedo *et al.*, 2007) ซึ่งพบว่าเมื่อทำการเก็บรักษาเนื้อมะม่วงเข้มข้นบรรจุกระป๋อง และพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า ที่อุณหภูมิ 25±5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 168 วัน จะช่วยรักษาปริมาณบีตาแคโรทีนในเนื้อมะม่วงเข้มข้นได้ดีกว่าการเก็บรักษาเนื้อมะม่วงเข้มข้นบรรจุกระป๋องที่ไม่ได้พ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า โดยปริมาณบีตาแคโรทีนในเนื้อมะม่วงเข้มข้นลดลงน้อยกว่าร้อยละ 20 ของปริมาณบีตาแคโรทีนในเนื้อมะม่วงเข้มข้นเริ่มต้น และยังพบว่าปริมาตรของช่องว่างในขวดบรรจุที่น้อย จะช่วยให้เกิดสภาวะการเก็บรักษาภายใต้แก๊สไนโตรเจนได้ดีขึ้น ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้บรรจุสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ในขวดสีชาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร สูง 3.5 เซนติเมตร ทำให้ปริมาตรของช่องว่างในขวดบรรจุน้อย จึงช่วยทำให้การเก็บรักษาได้ดี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Nenadis *et al.* (2003) ได้เปรียบเทียบผลของสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในอาหารทั่วไปที่เป็นรูปอิมัลชัน โดยไม่พ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า พบว่า BHA และ BHT จะช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชันในอิมัลชันได้ดีกว่า TBHQ



ภาพ 4.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีนของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ซึ่งทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5±2 องศาเซลเซียส

เนื่องจากสีผสมอาหารในรูปอิมัลชันจะมีเชื้อจุลินทรีย์เจริญได้ การศึกษานี้จึงทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์ รา พบว่าเมื่อเก็บรักษา 180 วัน จุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์ ราในสีผสมอาหารมีแนวโน้มลดลงจากวันที่ 0 (ตาราง 4.3 และ 4.4) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสภาวะในการบรรจุโดยการพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า ซึ่งเป็นการกำจัดออกซิเจนออกไป ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศ แต่ในการนำไปใช้งานจริงอาจเกิดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงอาจจำเป็นต้องเติมสารกันเชื้อราลงในสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชันได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ทั้งชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน และชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ระหว่างชุดที่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระกับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารต้านอนุมูลอิสระจะมีแนวโน้มเหมือนกัน เมื่อทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 180 วัน แต่ยังคงไม่สามารถสรุปได้ว่าควรเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ทั้งสองชนิดหรือไม่ เนื่องจากสารต้านอนุมูลอิสระอาจมีผลต่อความคงตัวต่อความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ ซึ่งผลการศึกษาความคงตัวต่อความร้อนแสดงในตอนที่ 4.4 และ 4.5

ตาราง 4.3 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา 180 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนีต่อมิลลิลิตร) ในสีผสมอาหาร						
	ชุดควบคุม	เติม BHA	เติม BHT	เติม TBHQ	เติม BHA และสารกันเชื้อรา	เติม BHT และสารกันเชื้อรา	เติม TBHQ และสารกันเชื้อรา
0	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250
20	1.06×10^{3}	3.07×10^{2}	1.51×10^{3}	< 250	< 250	< 250	< 250
40	< 250	< 250	8.33×10^{2}	< 250	2.67×10^{2}	< 250	< 250
60	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	9.17×10^{2}
80	2.80×10^{3}	3.64×10^{4}	5.42×10^{4}	< 250	4.67×10^{2}	< 250	< 250
100	1.67×10^{3}	9.00×10^{3}	7.53×10^{4}	< 250	< 250	< 250	< 250
120	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250
140	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250
160	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250
180	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250	< 250

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.4 ปริมาณเชื้อยีสต์และราในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ระหว่างการเก็บรักษา 180 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณเชื้อยีสต์และรา (โคโลนีต่อมิลลิลิตร) ในสีผสมอาหาร						
	ชุดควบคุม	เติม BHA	เติม BHT	เติม TBHQ	เติม BHA และสารกันเชื้อรา	เติม BHT และสารกันเชื้อรา	เติม TBHQ และสารกันเชื้อรา
0	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
20	2.72×10^{3}	5.92×10^{2}	1.16×10^{3}	< 100	< 100	< 100	< 100
40	1.20×10^{3}	4.42×10^{3}	7.45×10^{3}	< 100	< 100	< 100	< 100
60	3.13×10^{3}	3.43×10^{3}	5.75×10^{3}	< 100	< 100	< 100	< 100
80	2.33×10^{2}	3.22×10^{3}	4.95×10^{3}	< 100	< 100	< 100	< 100
100	1.67×10^{2}	1.30×10^{3}	8.07×10^{3}	< 100	< 100	< 100	< 100
120	< 100	< 100	2.28×10^{3}	< 100	< 100	< 100	< 100
140	< 100	< 100	1.70×10^{3}	< 100	< 100	< 100	< 100
160	< 100	< 100	3.26×10^{2}	< 100	< 100	< 100	< 100
180	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100

4.4 การทดสอบความคงตัวต่อความร้อนของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน

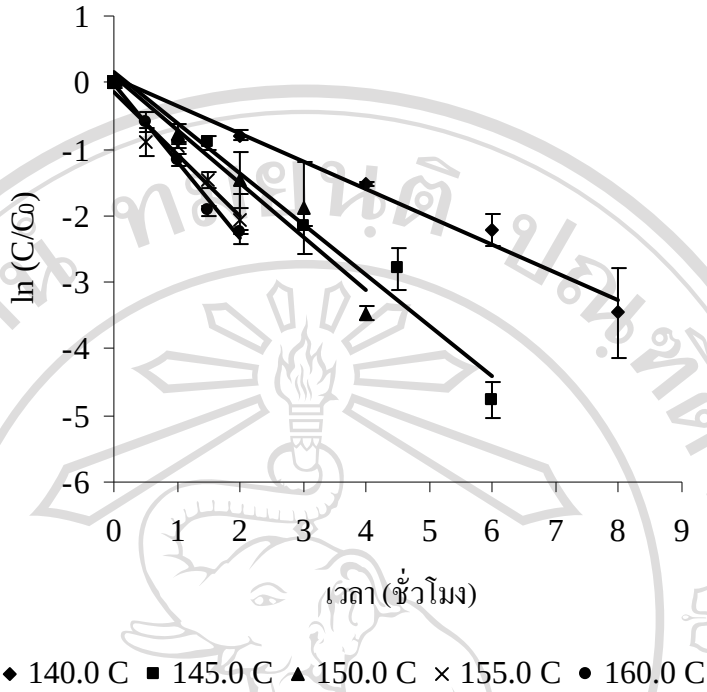
การศึกษาความคงตัวต่อความร้อนของสีผสมอาหาร ได้ทำการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิ 140.0-160.0 องศาเซลเซียส เนื่องจากสีผสมอาหารในรูปน้ำมันนี้นิยมใช้กับขนมอบซึ่งต้องผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 140.0 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยในการทดลองจะให้ความร้อนกับสีผสมอาหารแล้วทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อตรวจวัดปริมาณบีตาแคโรทีนที่เปลี่ยนแปลงไปของสีผสมอาหาร จนกระทั่งปริมาณบีตาแคโรทีนในตัวอย่างลดลงมากกว่าร้อยละ 80 พบว่าการสลายตัวของบีตาแคโรทีนเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reaction) นั่นคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามค่าความเข้มข้นของสาร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าการการสลายตัวของบีตาแคโรทีนในปาปริก้าโอลิโอเรซิน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

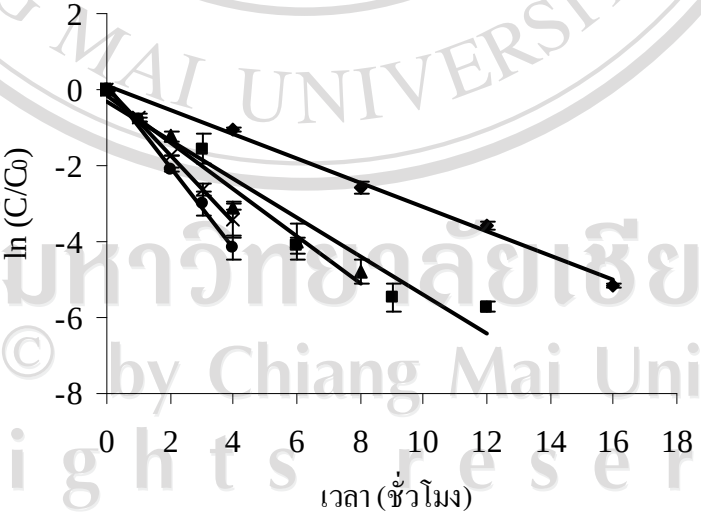
ก็เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเช่นกัน (Pérez-Gálvaz *et al.*, 2005) จากสมการอาร์รีเนียสเมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ln (C/Co) กับเวลา จะได้เส้นกราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังภาพ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 ซึ่งปริมาณบีตาแคโรทีนที่ลดลงต่ำกว่าร้อยละ 80 จะมีค่า ln (C/C_0) ต่ำกว่า -1.6 จากกราฟสามารถหาค่า k และ ค่า D ได้ดังตาราง 4.5 ซึ่งค่า R^2 มากกว่า 0.83 แสดงว่าการสลายตัวของบีตาแคโรทีนมีความสอดคล้องกับสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมาก เมื่อเปรียบเทียบภายในชุดทดลอง พบว่าค่า k มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าสีผสมอาหารชุดที่เติม TBHQ จะมีค่า k ต่ำที่สุด ที่ทุกระดับอุณหภูมิ ซึ่งค่า k นี้ แสดงถึงความไวของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิหนึ่งๆ (รุ่งนภา, 2540) โดยถ้าค่า k มีค่ามาก แสดงว่าปฏิกิริยาการสลายตัวของบีตาแคโรทีนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าค่า k มีค่าน้อย จะแสดงว่าปฏิกิริยาการสลายตัวของบีตาแคโรทีนเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมันชุดที่เติมสาร TBHQ จะเกิดการสลายตัวของบีตาแคโรทีนช้าที่สุด ส่วนสีผสมอาหารชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระนั้น มีค่า k สูง แสดงว่าการสลายตัวของบีตาแคโรทีนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั่นเอง

สำหรับค่า D นั้น แสดงถึงระยะเวลาที่ความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนลดลงร้อยละ 90 (Vikram *et al.*, 2005) โดยถ้าตัวอย่างมีค่า D สูง หมายถึงจะต้องใช้ระยะเวลานานกว่าที่บีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจะสลายตัวไป หรือสีผสมอาหารมีความคงตัวสูงนั่นเอง ส่วนตัวอย่างที่มีค่า D ต่ำ หมายถึงบีตาแคโรทีนจะใช้ระยะเวลาน้อยในการสลายตัว ซึ่งผลการศึกษาค่า D นี้จะได้ผลในแนวทางเดียวกันกับค่า k นั่นคือสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชุดควบคุมจะมีค่า D ต่ำที่สุด หรือมีความคงตัวของบีตาแคโรทีนต่ำ สีผสมอาหารชุดที่เติมสาร BHA กับชุดที่เติมสาร BHT จะมีค่า D ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า D สูงกว่าชุดควบคุม แสดงว่ามีความคงตัวของบีตาแคโรทีนสูงกว่า และสีผสมอาหารชุดที่เติมสาร TBHQ จะมีค่า D สูงที่สุด หรือบีตาแคโรทีนจะมีความคงตัวมากที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

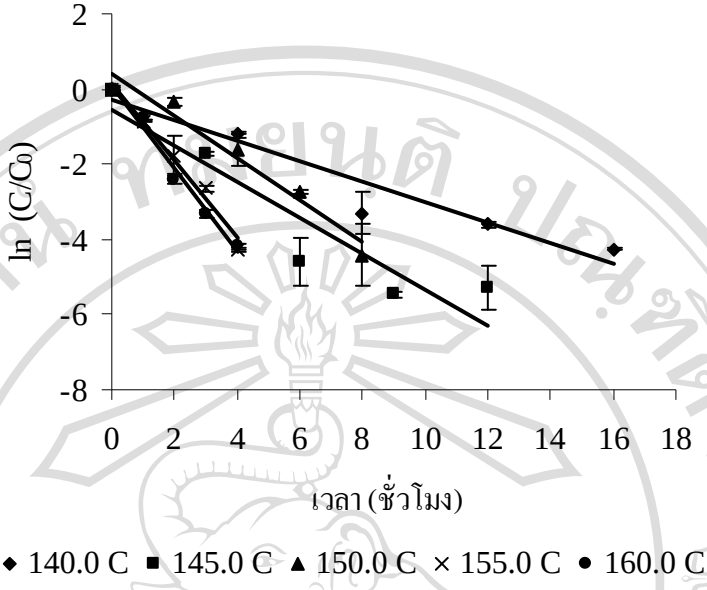


ภาพ 4.5 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ในชุดควบคุมซึ่งไม่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

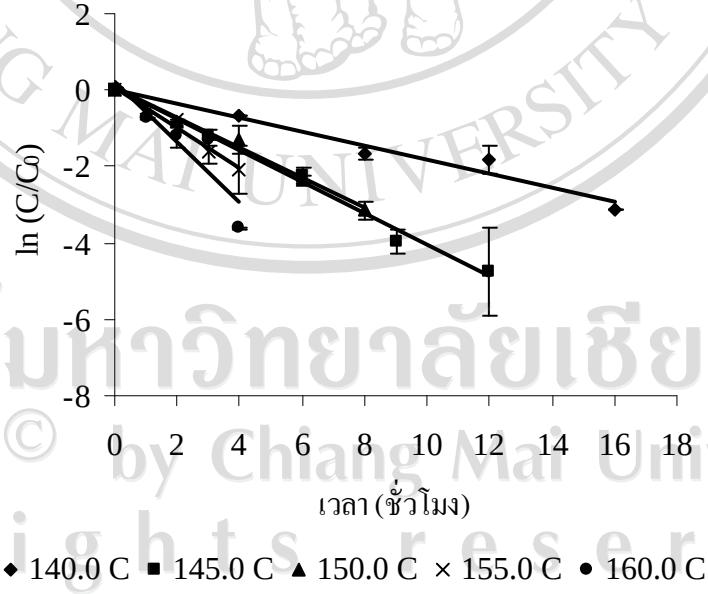


ภาพ 4.6 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ในชุดที่มีการเติมสาร BHA ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 4.7 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ในชุดที่มีการเติมสาร BHT ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ



ภาพ 4.8 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน ในชุดที่มีการเติมสาร TBHQ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ

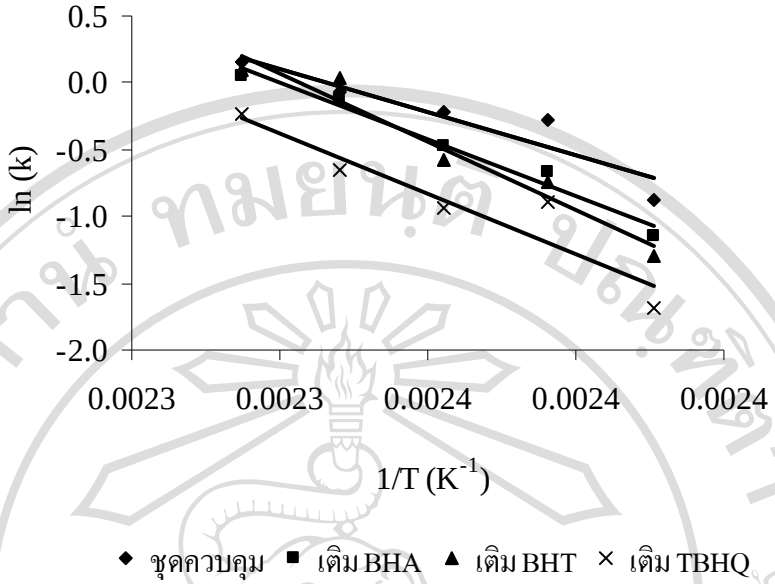
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.5 ค่า k และ ค่า D ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน

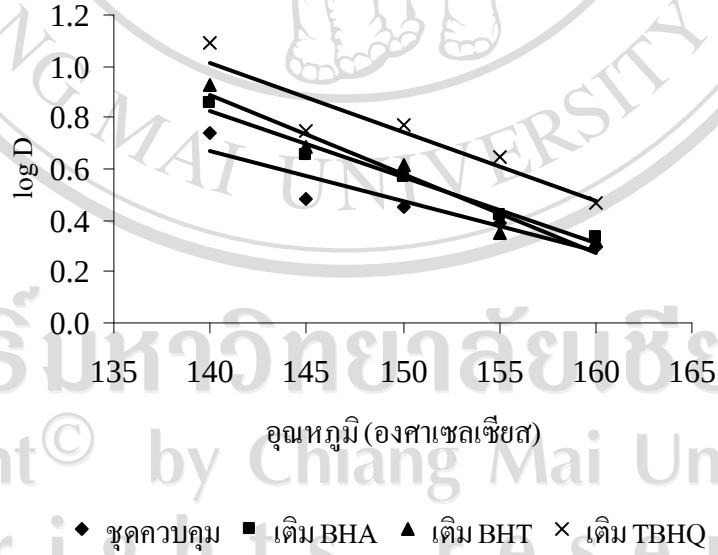
สิ่งทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตรา (k) (ต่อชั่วโมง)	Decimal reduction time (D value) (ชั่วโมง)	R^2
ชุดควบคุม	140.0	0.4163	5.5311	0.99
	145.0	0.7625	3.0198	0.97
	150.0	0.8069	2.8536	0.95
	155.0	0.9361	2.4598	0.94
	160.0	1.1614	1.9826	0.99
เติม BHA	140.0	0.3196	7.2046	0.99
	145.0	0.5109	4.5069	0.94
	150.0	0.6189	3.7204	0.98
	155.0	0.8735	2.6360	1.00
	160.0	1.0584	2.1755	1.00
เติม BHT	140.0	0.2724	8.4530	0.92
	145.0	0.4770	4.8272	0.87
	150.0	0.5595	4.1154	0.96
	155.0	1.0314	2.2325	0.98
	160.0	1.0953	2.1022	0.98
เติม TBHQ	140.0	0.1855	12.4129	0.96
	145.0	0.4099	5.6174	0.99
	150.0	0.3922	5.8710	0.99
	155.0	0.5234	4.3993	0.98
	160.0	0.7880	2.9221	0.83

จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/T กับ ln k ได้กราฟดังภาพ 4.9 เมื่อนำค่าความชันที่ได้มาคำนวณหาค่า E_a พบว่าอยู่ในช่วง 67.40-105.94 กิโลจูลต่อโมล และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log D กับอุณหภูมิ (ภาพ 4.10) นำมาคำนวณค่า z พบว่าอยู่ในช่วง 32-51 องศาเซลเซียส ดังตาราง 4.6 โดยค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.87-0.98 ซึ่งจากค่า R^2 ที่มากกว่า 0.80 แสดงว่าค่า z ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการทำนายความคงตัวของบีตาแคโรทีนที่อุณหภูมิอื่นๆ ได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยพบว่าค่า E_a ของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชุดที่มีการเติมสาร BHT จะมีค่ามากที่สุด และชุดควบคุมจะมีค่า E_a น้อยที่สุด ในทางกลับกันพบว่าค่า z ของสีผสมอาหารชุดที่เติม BHT จะมีค่าต่ำที่สุด และชุดควบคุมจะมีค่า z สูงที่สุด ซึ่งค่า E_a และค่า z นี้จะแสดงถึงความไวต่ออุณหภูมิของบีตาแคโรทีนในตัวอย่าง (รุ่งนภา, 2540) โดยตัวอย่างที่มีค่า E_a ต่ำ หรือค่า z สูง จะไวต่ออุณหภูมิมากกว่าตัวอย่างที่มีค่า E_a สูง หรือค่า z ต่ำ ดังนั้นสีผสมอาหารชุดที่มีการเติม BHT จึงมีความคงตัวของบีตาแคโรทีนมากที่สุด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป รองลงมาคือชุดที่เติม TBHQ ชุดที่เติม BHA และชุดควบคุมมีความคงตัวของบีตาแคโรทีนต่ำที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln k กับ 1/T ของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log D กับอุณหภูมิ ของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน

ตาราง 4.6 ค่า E_a และค่า z ของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมันในช่วงอุณหภูมิ 140.0-160.0 องศาเซลเซียส

สิ่งทดลอง	พลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) (กิโลจูลต่อโมล)	ค่า z (องศาเซลเซียส)	R^2
ชุดควบคุม	67.40	51.02	0.87
เติม BHA	87.36	39.22	0.98
เติม BHT	105.94	32.36	0.94
เติม TBHQ	93.51	36.63	0.88

Pérez-Gálvez *et al.* (2005) ได้ศึกษาค่า k ของบีตาแคโรทีนในปาปริก้าโอลิโอเรซินที่อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่า k ของบีตาแคโรทีนก็สูงขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกัน โดยค่า k มีค่าอยู่ในช่วง 10.16-50.67 $\times 10^{-4}$ ต่อชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยนี้มาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ทำการศึกษาต่ำกว่าระดับอุณหภูมิที่งานวิจัยนี้ทำการศึกษา และจากแผนการทดลองพบว่าในการศึกษานั้นได้ทำในระบบปิด ซึ่งตัวอย่างจะไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจน ดังนั้นการสลายตัวที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว ในขณะที่งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำในระบบปิด เพื่อควบคุมให้มีสภาวะใกล้เคียงกับการผลิตอาหารทั่วไป ดังนั้นการสลายตัวที่เกิดขึ้นในงานที่ศึกษานี้ จึงเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย ทำให้ค่า k ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่า อย่างไรก็ตาม Pérez-Gálvez *et al.* (2005) ยังพบว่าบีตาแคโรทีนในปาปริก้าโอลิโอเรซินที่ได้จากวัตถุดิบคนละชุด และผ่านกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันนั้นจะมีค่า k แตกต่างกันด้วย ดังนั้นตัวอย่างที่แตกต่างกันจึงอาจมีค่า k แตกต่างกัน

4.5 การทดสอบความคงตัวต่อความร้อนของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน

การศึกษาความคงตัวต่อความร้อนของสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชันได้ทำการศึกษาที่ระดับอุณหภูมิ 90.0-100.0 องศาเซลเซียส เนื่องจากสีผสมอาหารชนิดนี้นิยมใช้กับเครื่องดื่มซึ่งผ่านกระบวนการพาสเจอไรส์ หรือสเตอริไลเซชัน โดยใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-130 องศาเซลเซียส และสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชันนี้มีน้ำอยู่ถึงร้อยละ 90 ดังนั้นในการให้ความร้อนกับตัวอย่างสูงเกินกว่า 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลานานจะทำให้น้ำในตัวอย่างระเหยออก การศึกษานี้จึงเลือกศึกษาในระดับอุณหภูมิ 90.0-100.0 องศาเซลเซียส

การทดลองได้ให้ความร้อนกับสีผสมอาหารแล้วทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อตรวจวัดปริมาณบีตาแคโรทีนที่เปลี่ยนแปลงไปของสีผสมอาหาร จนกระทั่งปริมาณบีตาแคโรทีนในตัวอย่างลดลงมากกว่าร้อยละ 80 พบว่าการสลายตัวของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารเป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

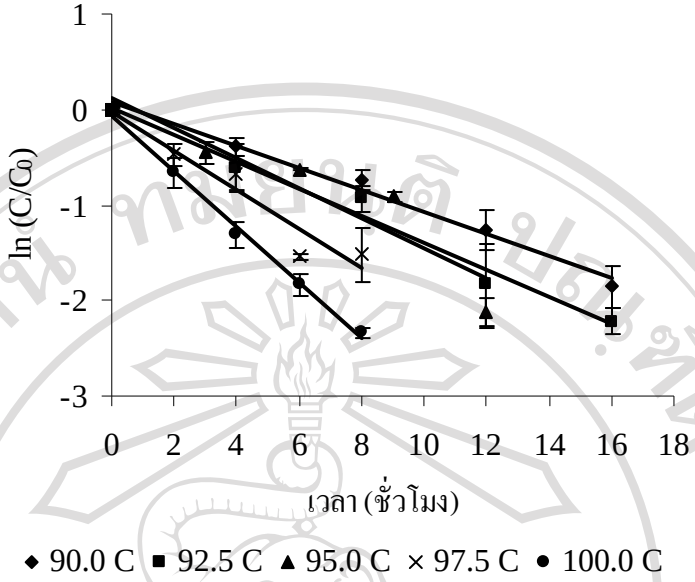
ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเกี่ยวกับการสลายตัวของบีตาแคโรทีนในน้ำผลไม้และเนื้อผลไม้เข้มข้น (Vikram *et al.*, 2005; Dhuique-Mayer *et al.*, 2007; Rattanathanalerk *et al.*, 2005; Dutta *et al.*, 2006)

จากสมการอาร์รีเนียสเมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ln (C/Co) กับเวลา จะได้เส้นกราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังภาพ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 ซึ่งปริมาณบีตาแคโรทีนที่ลดลงต่ำกว่าร้อยละ 80 จะมีค่า ln (C/C_0) ต่ำกว่า -1.6 จากกราฟสามารถหาค่า k และ ค่า D ได้ดังตาราง 4.7 โดยค่า R^2 มากกว่า 0.83 แสดงว่าการสลายตัวของบีตาแคโรทีนสอดคล้องอย่างมากกับสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

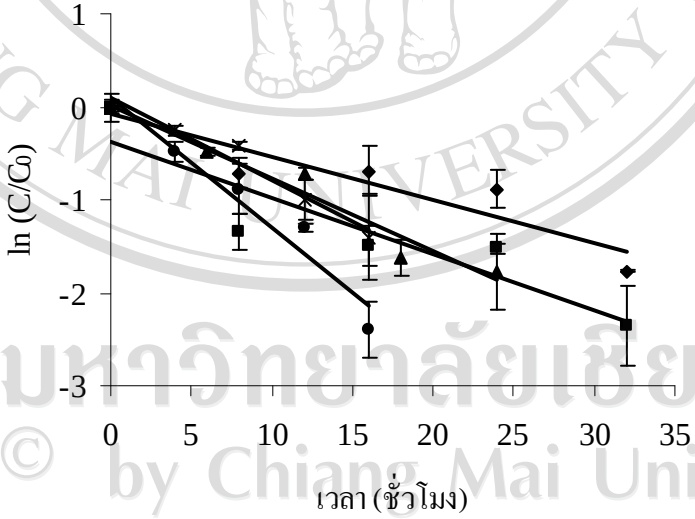
เมื่อเปรียบเทียบภายในชุดทดลอง พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันกับสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน นั่นคือค่า k มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่า D จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าตัวอย่างชุดที่เติม BHA จะมีค่า k ต่ำที่สุด และค่า D สูงกว่าตัวอย่างชุดอื่นๆ ที่ทุกระดับอุณหภูมิ นั่นแสดงว่าสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ชุดที่เติมสาร BHA จะช่วยให้การสลายตัวของบีตาแคโรทีนเกิดช้าที่สุด หรือบีตาแคโรทีนจะมีความคงตัวมากที่สุด ส่วนสีผสมอาหารชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระนั้นมีค่า k สูง และค่า D ต่ำที่สุด แสดงว่าการสลายตัวของบีตาแคโรทีนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั่นเอง

Dutta *et al.* (2006) ได้ศึกษาค่า k ของบีตาแคโรทีนในเนื้อฟักทองบดที่อุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส พบว่าค่า k ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็น 0.0080 ต่อนาที ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า k ของสีผสมอาหารในรูปอิมัลชันนี้ ที่ผ่านความร้อนระดับอุณหภูมิเดียวกัน โดยในสีผสมอาหารชุดควบคุมที่ศึกษานี้ มีค่า k เป็น 0.2923 ต่อชั่วโมง หรือเท่ากับ 0.0049 ต่อนาที การที่ผลการศึกษาแตกต่างกันอาจเนื่องจากเนื้อฟักทองบดได้ผ่านกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการทำลายเนื้อเยื่อจึงทำให้บีตาแคโรทีนสลายตัวได้ง่ายยิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

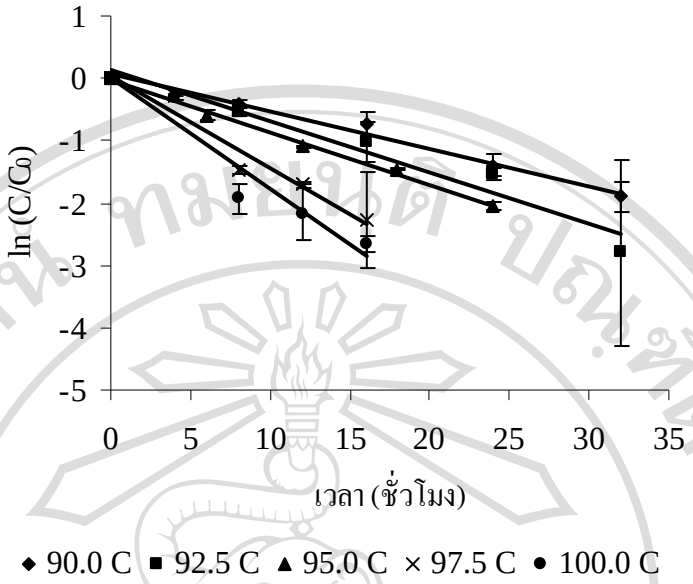


ภาพ 4.11 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ในชุดควบคุมซึ่งไม่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

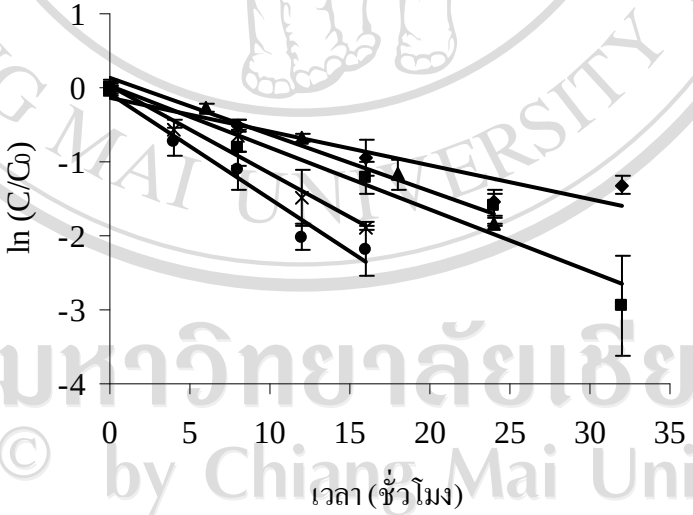


ภาพ 4.12 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ในชุดที่มีการเติมสาร BHA ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 4.13 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ในชุดที่มีการเติมสาร BHT ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ



ภาพ 4.14 การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ในชุดที่มีการเติมสาร TBHQ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.7 ค่า k และ ค่า D ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน

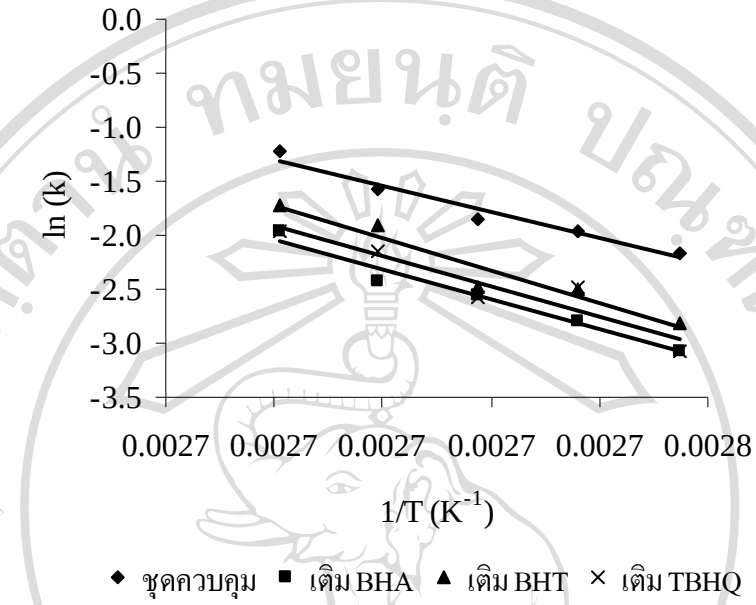
สิ่งทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตรา (k) (ต่อชั่วโมง)	Decimal reduction time (D value) (ชั่วโมง)	R^2
ชุดควบคุม	90.0	0.1146	20.0924	0.99
	92.5	0.1416	16.2612	0.98
	95.0	0.1571	14.6568	0.87
	97.5	0.2057	11.1939	0.93
	100.0	0.2923	7.8775	1.00
เติม BHA	90.0	0.0464	49.6247	0.86
	92.5	0.0609	37.8093	0.83
	95.0	0.0778	29.5962	0.96
	97.5	0.0886	25.9885	0.96
	100.0	0.1398	16.4706	0.95
เติม BHT	90.0	0.0597	38.5693	0.98
	92.5	0.0825	27.9101	0.95
	95.0	0.0833	27.6421	0.99
	97.5	0.1486	15.4952	0.95
	100.0	0.1792	12.8492	0.92
เติม TBHQ	90.0	0.0459	50.1653	0.87
	92.5	0.0835	27.5759	0.94
	95.0	0.0766	30.0599	0.97
	97.5	0.1173	19.6299	0.96
	100.0	0.1412	16.3073	0.97

จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/T กับ ln k ได้กราฟดังภาพ 4.15 ค่าความชันที่ได้นำมาคำนวณหาค่า E_a พบว่าอยู่ในช่วง 101.07-125.48 กิโลจูลต่อโมล และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log D กับอุณหภูมิ (ภาพ 4.16) นำมาคำนวณค่า z พบว่าอยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส ดังตาราง 4.8 โดยค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.89-0.97 ซึ่งจากค่า R^2 ที่มากกว่า 0.80 แสดงว่าค่า z ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการทำนายความคงตัวของบีตาแคโรทีนที่อุณหภูมิอื่นๆ ได้อย่างน่าเชื่อถือ เช่นเดียวกับสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมันพบว่าค่า E_a ของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชุดที่มีการเติมสาร BHT จะ มีค่ามากที่สุด และค่า z น้อยที่สุด ส่วนชุดควบคุมจะมีค่า E_a น้อยที่สุด และมีค่า z สูงที่สุด แสดงว่าสีผสมอาหารชุดที่มีการเติม BHT มีความคงตัวของบีตาแคโรทีนมากที่สุด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป รองลงมาคือ ชุดที่เติม TBHQ ชุดที่เติม BHA และชุดควบคุมมีความคงตัวของบีตาแคโรทีนต่ำที่สุด

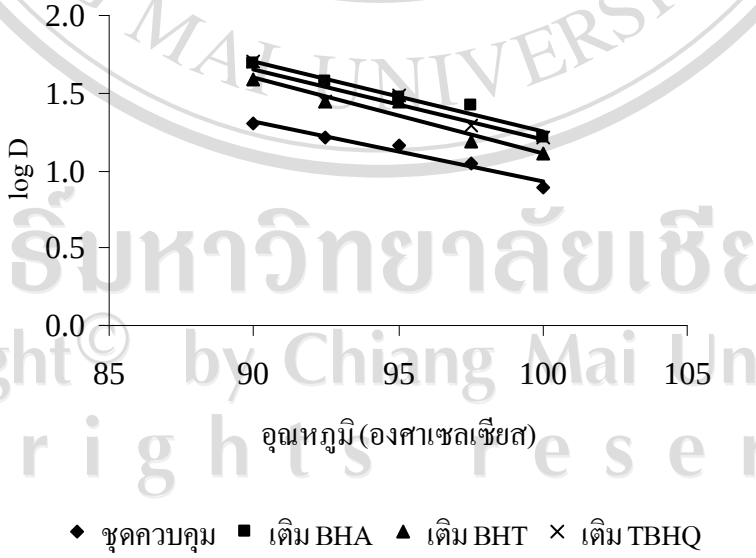
ค่า E_a และค่า z ของสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชันนี้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาการสลายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนของบีตาแคโรทีนในน้ำส้ม ที่ระดับอุณหภูมิ 75-100

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าได้ค่า E_a และค่า z เท่ากับ 110 กิโลจูลต่อโมล และ 22.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Dhuique-Mayer *et al.*, 2007)



ภาพ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln k กับ 1/T ของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน



ภาพ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log D กับอุณหภูมิ ของบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.8 ค่า E_a และค่า z ของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ในช่วงอุณหภูมิ 90.0-100.0 องศาเซลเซียส

สิ่งทดลอง	พลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) (กิโลจูลต่อโมล)	ค่า z (องศาเซลเซียส)	R^2
ชุดควบคุม	101.07	25.64	0.96
เติม BHA	116.20	22.32	0.97
เติม BHT	125.48	20.66	0.93
เติม TBHQ	116.68	22.27	0.89

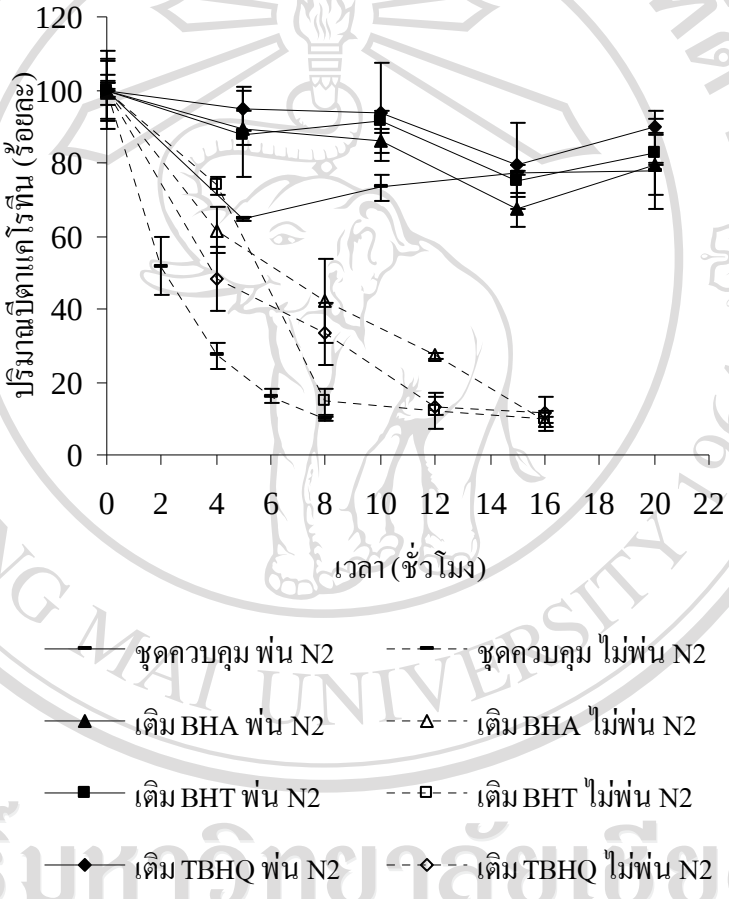
ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Nenadis *et al.* (2003) ซึ่งได้เปรียบเทียบผลของสารต้านอนุมูลอิสระทั้งสามชนิด ทั้งใน Phosphatidylcholine liposome และในอิมัลชัน ซึ่งพบว่า BHT จะช่วยต้านอนุมูลอิสระได้ดีที่สุด ทั้ง liposome และในอิมัลชัน เนื่องจากมีสภาพขั้วต่ำที่สุด อีกทั้ง German (2002) ยังได้รายงานไว้ว่า BHT จะมีความคงตัวมากที่อุณหภูมิสูง จึงสามารถต้านอนุมูลอิสระในอาหารที่ต้องผ่านการอบได้ดีอีกด้วย นอกจากนี้ liposome ยังเกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าอิมัลชัน เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ที่เมื่อเปรียบเทียบค่า z ของสีผสมอาหารทั้งสองชนิด พบว่าสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชันจะมีค่า z ต่ำกว่าสีผสมอาหารชนิดที่อยู่รูปน้ำมัน ซึ่งหมายถึงสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชันจะมีความไวต่ออุณหภูมิน้อยกว่าสีผสมอาหารชนิดที่อยู่ในรูปน้ำมัน

4.6 ผลของการพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้าต่อการสลายตัวของบีตาแคโรทีน

การศึกษานี้ได้เลือกสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน มาทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100.0 องศาเซลเซียส เนื่องจากระดับความร้อนที่ใช้ศึกษาความคงตัวของสีผสมอาหารชนิดนี้ไม่สูงเกินไป จึงเหมาะสำหรับศึกษาผลการพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า ซึ่งต้องคำนึงถึงระดับความดันภายในขวดบรรจุที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ทำการพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้าก่อนปิดฝา กับตัวอย่างที่ไม่มีการพ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้าก่อนปิดฝา ผลการศึกษาแสดงดังภาพ 4.17 ซึ่งพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสีผสมอาหารชุดที่พ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้าเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ปริมาณบีตาแคโรทีนในสีผสมอาหารลดลงจากปริมาณเริ่มต้นน้อยกว่าร้อยละ 25 ในขณะที่สีผสมอาหารชุดที่ไม่พ่นแก๊สไนโตรเจนที่ผิวหน้า มีปริมาณบีตาแคโรทีนลดลงมากกว่าร้อยละ 85 เมื่อให้ความร้อนเพียง 8 ชั่วโมง สำหรับชุดควบคุม และ 16 ชั่วโมง สำหรับชุดที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระทั้งหมด แสดงว่าบีตาแคโรทีนจะมีความคงตัวต่อความร้อนมาก เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งสอดคล้อง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กับผลการศึกษาเรื่องอายุการเก็บรักษาของสีผสมอาหาร ในตอนที่ 4.2 ผลการทดลองนี้ยังชี้ให้เห็นว่าหากทำการเก็บรักษาสีผสมอาหารภายใต้แก๊สไนโตรเจนแล้ว บีตาแคโรทีนจะมีความคงตัวดี แม้ว่าอุณหภูมิในการเก็บรักษาจะสูงขึ้น และถ้าในกระบวนการผลิตมีการป้องกันการสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะช่วยลดการสลายตัวของบีตาแคโรทีนได้มาก โดยไม่ต้องเติมสารต้านอนุมูลอิสระ



ภาพ 4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณบีตาแคโรทีนของสีผสมอาหารจากแคโรทีนอยด์ชนิดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100.0 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved