

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย

2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Elaeis guineensis* เป็นพืชที่ได้รับความนิยมสนใจอย่างมากในปัจจุบัน พบว่ามีการปลูกอย่างแพร่หลายในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และทวีปแอฟริกาบริเวณแนวเส้นศูนย์สูตร จากการที่ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชที่ให้น้ำมันชนิดอื่น อีกทั้งน้ำมันที่ได้ยังมีความเสถียรสูง และราคาถูกอีกด้วย ทำให้มีการนำเอาน้ำมันปาล์มไปใช้ทั้งด้านการอุปโภคและบริโภคอย่างกว้างขวาง และจากการสำรวจพบว่าการใช้น้ำมันปาล์มในการบริโภคในปริมาณมากเป็นอันดับสองของโลก รองจากน้ำมันถั่วเหลือง (Sambanthamurthi *et al.*, 2000)

ปาล์มน้ำมันจัดว่าเป็นพืชที่สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น นำไปสกัดเอาน้ำมันปาล์มมาใช้ในการบริโภคและเป็นส่วนประกอบในอาหารชนิดต่าง ๆ เส้นใยที่มีสามารถนำมาทำเป็นกระดาษ ส่วนกากที่เหลือนำไปทำเป็นเชื้อเพลิง ในแถบแอฟริกาจะพบว่าการนำส่วนลำต้นและก้านใบของต้นปาล์ม ทำเป็น ไม้กวาด ไม้เท้า และเชือก ในประเทศบราซิลและแอฟริกาจะมีการนำน้ำหวานจากต้นปาล์มไปทำเป็นไวน์และน้ำตาล (พนัส, 2551) หลังจากสกัดเอาน้ำมันออกแล้วกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม และกากเยื่อใยปาล์มถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์จำพวกโค กระบือและแพะ นอกจากนี้ยังพบว่าปาล์มน้ำมันสามารถนำไปใช้ในการเพาะเห็ดและใช้เป็นอาหารในการเลี้ยงโปรตีนเซลล์เดียวได้อีกด้วย (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 แอลฟาแคโรทีน (α -carotene), บีตาแคโรทีน (β -carotene), ไลโคพีน (lycopene)

และ ไฟโทอิน (phytoene) เป็นต้น แต่ที่มีปริมาณสูงและได้รับความสนใจที่สุด คือ สารประกอบแคโรทีนอยด์ซึ่งมีความสามารถในการต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน โดยพบว่าปริมาณอัลฟาแคโรทีนและ บีตาแคโรทีน มีปริมาณมากกว่า 90% ของปริมาณสารประกอบแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในน้ำมันปาล์ม เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตปาล์มน้ำมันการสกัดเอาสารประกอบแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบก็ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ในปัจจุบันพบว่าเริ่มมีการนำเอาสารสกัดแคโรทีนอยด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้เป็นสารให้สีจากธรรมชาติหรือใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารเสริมเพื่อช่วยบำรุงสุขภาพ (Mortensen, 2005) บีตาแคโรทีนเป็นสารตั้งต้นที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นวิตามินเอหรือที่เรียกว่า โปรวิตามินเอ ดังนั้นเมื่อเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ บีตาแคโรทีนจึงมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของประสาทตาที่ใช้ในการมองเห็น ระบบสืบพันธุ์ การถ่ายถอดลักษณะทางพันธุกรรม 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 และทำการระเหยเพื่อแยกเฮกเซนออก และจากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) แยกเอาสบู่และแคโรทีนอยด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันออก แล้วระเหยเฮกเซนออกอีกครั้ง จะได้แคโรทีนอยด์เข้มข้น (พัชรินทร์ และคณะ, 2548)

สำหรับความคงตัวของบีตาแคโรทีนและสารประกอบแคโรทีนอยด์ชนิดอื่น ๆ พบว่า เมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่นเมื่อได้รับแสง อุณหภูมิสูง สัมผัสกับอากาศและโอโซน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ทำให้สูญเสียสมบัติในการเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน รวมถึงสูญเสียสมบัติการเป็นโปรวิตามินเอของบีตาแคโรทีนด้วย จากเหตุผลนี้เองจึงมีการนำเอาวิธีการมาประยุกต์ใช้ในต้นชาด (annatto) โดยนำเอาแอลฟาไซโคลเดกทริน (α -cyclodextrin) มาใช้ในการจับกับแคโรทีนอยด์ในรูปเอสเทอร์ที่ละลายน้ำได้หรือที่เรียกว่าไบซิน (bixin) เพื่อที่จะเพิ่มความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Lyang *et al.*, 2005) นอกจากนี้จะเห็นว่าที่นิยมใช้กันในการเพิ่ม

ความเสถียรให้กับบีตาแคโรทีนที่สกัดจากน้ำแครอท คือ การทำไมโครเอนแคปซูลชัน (micro encapsulation) ภายในเจลาติน หรือการคูดซับไว้ในแป้ง ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปผงที่ละลายน้ำได้ (water-dispersible powder) เพื่อเพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนผง (Thurmann *et al.*, 2002)

จากการที่ผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน ทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีหลายรูปแบบ เช่น ในรูปผง รูปละลายในน้ำมัน และในรูปอิมัลชัน เป็นต้น โดยแคโรทีนอยด์ในรูปผง สามารถเก็บรักษาได้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน

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

2.2 สารแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นสารที่อยู่ในคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) ถือเป็นรงควัตถุที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) ของพืช ในธรรมชาติจะพบว่าแคโรทีนอยด์จะอยู่ร่วมกับคลอโรฟิลล์ เพื่อเพิ่มความเสถียร (Bauernfeind, 1981) ในรูป pigment-protein complex ภายในคลอโรพลาสต์ โดย เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ 40 อะตอม สูตรโครงสร้างพื้นฐานของแคโรทีนอยด์ จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มเทอร์พรีน (terpene group) เกิดจากหมู่ไอโซพรีน 8 หน่วย ซึ่งเป็นสารประกอบแอลคีน (alkene) ที่มีพันธะคู่จำนวนมาก ในโมเลกุลมาเรียงต่อกันเป็นสายยาว มีลักษณะที่สำคัญ คือ 2 พันธะคู่จะถูกแบ่งโดยพันธะเดี่ยว และมีการเชื่อมต่อกับหมู่เมทิล โดยการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไอโซพรีนในโครงสร้างโมเลกุลมี 2 แบบ คือ แบบหัวโมเลกุลต่อท้ายโมเลกุล (head to tail) และท้ายโมเลกุล

ต่อท้ายโมเลกุล (tail to tail) ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่างหมู่ไอโซพรีนของแบบที่ 2 จะพบที่บริเวณ ส่วนกลางของโมเลกุลแคโรทีนอยด์ (Gross, 1987)

นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ยังประกอบด้วย วงแหวนที่มี คาร์บอนอยู่ 5 อะตอม หรือ 6 อะตอม (ส่วนใหญ่พบ 6 อะตอม) เป็นแบบวงแหวน (cyclic) โดยต่ออยู่ที่ปลายของโครงสร้างด้านใดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น บีตาแคโรทีน แอลฟาแคโรทีน ไวโอเลทริน (violerythrin) และอาจมี อนุพันธ์อื่น ๆ ที่มี ออกซิเจนอะตอมมาเกาะอยู่ด้วย ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) คีโต (keto) อีพอกซี (epoxy) เมทอกซี (methoxy) หรือหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic group) เช่น ลูเทอีน (lutein) (Britton, 1995)

ลักษณะการเชื่อมต่อกันของหมู่ไอโซพรีน ทำให้เกิดการสมมาตรของโครงสร้างโมเลกุล ของแคโรทีนอยด์ และพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลเกิดการหมุน หรือเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะ (rotation) ในโครงสร้างได้ (Handelman, 1996) ทำให้สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถ เปลี่ยนแปลงรูปแบบ geometric ได้หลายไอโซเมอร์ คือ Z-E isomer โดย Z isomer ทั้งใน รูปแบบ *cis* form และ *trans* form จะมีความคงตัวสูง เช่น บีตาแคโรทีน ในธรรมชาติจะพบรูป *trans* ประมาณร้อยละ 90

2.2.1 การจำแนกสารกลุ่มแคโรทีนอยด์

สารกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถแบ่งตามโครงสร้างทางเคมี ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ (Goodwin, 1980) ดังนี้

กลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน (Hydrocarbon carotene) เป็นกลุ่มที่โครงสร้างภายใน โมเลกุลของแคโรทีน ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมและไฮโดรเจนอะตอมเท่านั้น เช่น บีตาแคโรทีน ลูเทอีน และไลโคพีน เป็นต้น

กลุ่มออกซิเจนเตดแซนโทฟิลล์ (Oxygenated xanthophylls) เป็นกลุ่มของสารแคโรทีนอยด์ที่มีหมู่อนุพันธ์ที่ประกอบด้วยออกซิเจนอะตอมอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล ได้แก่ แซนโทฟิลล์ เช่น ซีแซนทิน (zeaxanthin) ที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของไฮดรอกซิล และสไปลิลโลแซนทิน (spililloxanthin) เป็นต้น

นอกจากลักษณะโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ทั้ง 2 กลุ่มจะแตกต่างกันแล้ว จะเห็นได้ว่า กลุ่มออกซิเจนเตดแซนโทฟิลล์มีความเป็นขั้วมากกว่ากลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน จากคุณสมบัติ นี้จึงใช้ตัวละลายในการแยกสารแคโรทีนอยด์ทั้ง 2 กลุ่มออกจากกัน

2.3 ผลผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีน

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

2.3.1 บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปน้ำมัน

บีตาแคโรทีนในน้ำมัน (Beta-carotene in oil) คือ ผลิตภัณฑ์ของบีตาแคโรทีนที่ กระจายตัวอยู่ในน้ำมันซึ่งปกติเป็นน้ำมันพืช มีการเติมสารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer) หรืออาจไม่เติมก็ได้ การบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ก่อนปิดผนึกจะต้องมีการแทนที่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนในรูปของน้ำมันโดยทั่วไป มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลแดง จนถึงสีน้ำตาลเข้ม สามารถละลายได้เฉพาะในน้ำมันเท่านั้น การเก็บรักษาควรเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดหรือบริเวณที่ไม่ได้รับแสงแดด ซึ่งจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้ 12 - 36 เดือน ขึ้นกับชนิดของน้ำมันพืช บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปน้ำมันส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจำพวกที่มีส่วนประกอบของไขมัน หรือน้ำมัน โดยใช้เป็นสารให้สีเหลืองหรือส้ม ผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เนยเทียม (margarine) เนยแข็ง (cheese) ไอศกรีม (ice cream) ซุป (soup) และในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

2.3.2 บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปอิมัลชัน

บีตาแคโรทีนในรูปอิมัลชัน (Beta-carotene emulsion) คือ ผลิตภัณฑ์ของบีตาแคโรทีนที่ผ่านกระบวนการอิมัลซิฟิเคชัน (Emulsification) ซึ่งจะเริ่มจากการเติมอิมัลซิฟายเออร์ (Emulsifier) เช่น ลิงโนบีตาแคโรทีนที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมัน จากนั้นเติมตัวทำละลายลงไป ในสถานะดังกล่าว เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ สุดท้ายจะเติมสารเพิ่มความคงตัว แล้วบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ โดยก่อนปิดผนึกจะต้องมีการแทนที่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนในรูปอิมัลชันโดยทั่วไป มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาล สามารถละลายในน้ำมันและกระจายตัวในน้ำได้ การเก็บรักษาควรเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส ในที่มีดหรือบริเวณที่ไม่ได้รับแสงแดด ซึ่งจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้ 12 เดือน

ในปัจจุบันถูกใช้เป็นสารให้สีเหลือง ส้ม ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มจำพวกน้ำผลไม้ (fruit juice beverage) น้ำมะนาวอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (carbonated lemonades) และในอาหารที่มีส่วนประกอบของน้ำผลไม้เข้มข้น (fruit juice concentrate)

2.2.3 บีตาแคโรทีนที่อยู่ในรูปผง

บีตาแคโรทีนในรูปผง (Beta-carotene powder) คือ ผลิตภัณฑ์ของบีตาแคโรทีนที่ผ่านกระบวนการอิมัลชันซีฟิเคชัน ซึ่งจะเริ่มจากการเติมอิมัลชันไฟเออร์ (Emulsifier) ลงในบีตาแคโรทีนที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมัน จากนั้นเติมตัวทำละลายลงไปในสภาวะดังกล่าวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอิมัลชันซีฟิเคชันได้สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์บีตาแคโรทีนในรูปอิมัลชันที่ได้ เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้ง (drying process) สุดท้ายจึงเติมสารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer) ผลิตภัณฑ์ บีตาแคโรทีนในรูปผงโดยทั่วไป มีลักษณะเป็นผงสีแดงเข้มแล้วมีจุดสีขาวกระจายประปราย ซึ่งมีคุณสมบัติละลายในน้ำมันและกระจายตัวในน้ำได้ และในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียส บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ที่มีการหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ แล้วเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส ในที่มีแดดหรือบริเวณที่ไม่ได้รับแสงแดด ซึ่งจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้ 36 เดือน ในปัจจุบันถูกใช้เป็นโปรวิตามินเอในอุตสาหกรรมยา โดยจะนำไปอัดให้อยู่ในรูปเม็ดของสารเสริมวิตามินเอ หรือนำไปผสมกับวิตามิน ที่จำเป็นเพื่อให้ได้เป็นวิตามินรวม นอกจากนี้ก็ยังนำไปทำเป็นแคปซูลอีกด้วย

2.4 ประโยชน์ของสารแคโรทีนอยด์

2.4.1. สีผสมอาหาร

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

ลักษณะของแคโรทีนอยด์ที่ใช้เป็นสีผสมอาหารในรูปละลายในน้ำมัน (Bauernfeind, 1981) ที่ผลิตจากเซลล์ยีสต์ *Cryptococcus albidus* สามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เนย มาการีน และผลิตภัณฑ์ขนมอบ เป็นต้น หรืออาจอยู่ในรูปอิมัลชัน เช่นในไอศกรีม และเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ

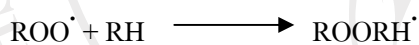
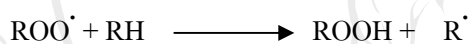
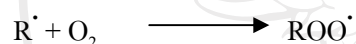
2.4.2. สารต้านการออกซิเดชัน

สารต้านการออกซิเดชัน (Antioxidation) หมายถึง สารที่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ โดยในแคโรทีนอยด์สามารถยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมี (Handelman, 1996) เช่น การเกิดปฏิกิริยา singlet oxygen (1O_2) เนื่องจากแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่ภายในโมเลกุลที่สามารถจับกับออกซิเจนอะตอมเดี่ยวได้ เช่น ในไลโคพีน มีพันธะคู่อยู่ 11 ตำแหน่ง และบีตาแคโรทีนมีตำแหน่งพันธะคู่อยู่ 9 ตำแหน่ง เป็นต้น อีกทั้งยังป้องกันสารเคมีและอนุมูลอิสระที่จะส่งผลกระทบต่อร่างกายในกระบวนการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation) ชนิดไม่อิ่มตัวรวมถึงสารอื่นที่ไวต่อการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งมีกลไกการเกิด 3 ขั้นตอน (Madhavi *et al*, 1996) ดังนี้

1. กระบวนการเริ่มต้น (Initiation)

เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) R^\cdot

2. กระบวนการแพร่ขยาย (Propagation)



3. กระบวนการสิ้นสุด (Termination)



กระบวนการเกิดออกซิเดชันของไขมัน เป็นการเริ่มต้นของความผิดปกติภายในร่างกาย โดยเมื่อเกิดอนุมูลอิสระขึ้น (R^\cdot) จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมาในรูป อนุมูลเพอร์ออกซิล (ROO^\cdot) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการแพร่ขยายของปฏิกิริยาลูกโซ่ ที่จะเข้าไปทำลายกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวภายในร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาลูกโซ่นี้สามารถถูกยับยั้งได้โดยการเติมสารต้านการออกซิเดชัน เช่น บีตาแคโรทีน วิตามินอีและสารประกอบฟีนอล เป็นต้น

2.4.3. สารโปรวิตามินเอ

การศึกษาสารแคโรทีนอยด์ในปัจจุบัน พบว่าแคโรทีนอยด์มีมากกว่า 600 ชนิด แต่มีเพียง 50 ชนิดเท่านั้น ที่มีสมบัติเป็นโปรวิตามินเอ (Pro vitamin A) โดยบีตาแคโรทีนเป็นแคโรทีนอยด์ที่ใน 1 โมเลกุลสามารถเปลี่ยนไปเป็นวิตามินเอได้ถึง 2 โมเลกุล (Farombi, 1999) ซึ่งจะมีแอกติวิตีของวิตามินเอสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารแคโรทีนอยด์ชนิดอื่น ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กิจกรรมของวิตามินเอของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์

สารแคโรทีนอยด์	Activity (%)
all- <i>trans</i> - β -carotene	100
9- <i>cis</i> - β -carotene	38
13- <i>cis</i> - β -carotene	53
all- <i>trans</i> - α -carotene	53
9- <i>cis</i> - α -carotene	13
13- <i>cis</i> - α -carotene	16
all- <i>trans</i> -cryptoxanthin	57
9- <i>cis</i> -cryptoxanthin	27
15- <i>cis</i> -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 โดยเป็นสารไกลโคโปรตีน (glycoprotein) ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์รูปแท่ง (rod cells) สำหรับการเห็นภาพขาวดำในแสงสว่างและเป็นส่วนประกอบของไอโอดอปซิน (iodopsin) ที่อยู่ในเซลล์รูปกรวย (cone cells) สำหรับการเห็นภาพสีบนจอประสาทตา จากความสามารถนี้จึงทำให้บีตาแคโรทีน ช่วยในการป้องกันความผิดปกติ ทางสายตา เช่น อาการตาบอดกลางคืน (night blindness) หรือทางการแพทย์เรียกว่า Xerophthalmia ซึ่งมีสาเหตุมาจากการขาดวิตามินเอ โดยจะแสดงอาการ คือ กระจกตาเป็นแผล เชื้อบุตาขาวแห้งมีรอยขุ่นที่เรียกว่าเกร็ดกระดี่ เป็นต้น (ศิริวรรณ, 2545)

2.4.3.2 ด้านการเจริญเติบโตของกระดูกและเนื้อเยื่อผิว

สารโปรวิตามินเอในรูปของกรดเรติโนอิก (retinoic acid) ในร่างกายจะทำงานร่วมกับวิตามินดี ในการส่งเสริมความแข็งแรงของกระดูก โดยกรดเรติโนอิกจะช่วยในการควบคุมเซลล์ออสทีโอคลาสต์ (osteoclast) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระดูกและฟันในร่างกายให้มีการเจริญเติบโตอย่างเป็นปกติ ส่วนสารโปรวิตามินเอในรูปเรติโนล (retinol) จะทำหน้าที่ช่วยควบคุมรูปร่างและความแข็งแรงให้แก่เยื่อผิวภายในเซลล์ นอกจากนี้การรับประทานสารที่มีโปรวิตามินเอเข้าไปยังสามารถป้องกันโรคทางผิวหนัง ในลักษณะความผิดปกติจากการเพิ่มจำนวนของเซลล์ชั้นผิว การเกิดผิวหนังอักเสบแห้งหรือแห้ง จนถึงเกิดการหลุดลอก รวมถึงในส่วนของเนื้อเยื่อต่างๆ ที่เกิดจากภูมิคุ้มกันของร่างกายต่ำลง การอักเสบหรือติดเชื้อได้ง่าย ตลอดจนความผิดปกติของเนื้อเยื่อในระบบทางเดินอาหารและระบบทางเดินหายใจ (อรชุน, 2539)

2.4.3.3 ด้านระบบสืบพันธุ์

โปรวิตามินเอเมื่อถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของวิตามินเอ ในเพศชายจะมีบทบาทในการเปลี่ยนสภาพของเซลล์เริ่มต้นเพื่อใช้ในการสร้างอสุจิ รวมทั้งส่งผลต่อการพัฒนาและการเจริญเติบโตของตัวอ่อนให้เป็นไปอย่างปกติในหญิงที่กำลังตั้งครรภ์ โดยหากได้รับวิตามินเอน้อยจะส่งผลทำให้เยื่อผิวต่อมลูกหมากและถุงเก็บน้ำอสุจิเกิดการเปลี่ยนแปลงผิดปกติ จนถึงการสร้างอสุจิจากเจอมินัลอีพิทีเลียม (germinal epithelium) ลดลง

ในเพศหญิงจะแสดงอาการบวมที่บริเวณชั้นใต้ผิวหนังภายในเซลล์ของท่อรังไข่ มดลูก รวมถึงช่องคลอด นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดการหลุดลอกของเยื่อผิวมดลูก ซึ่งกระทบต่อการเจริญของทารกและสายรกในระหว่างตั้งครรภ์ (อรชุน, 2539)

2.4.3.4 ป้องกันโรคมะเร็ง

สารโปรวิตามินเอ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและมีความสามารถในการจับกับออกซิเจนโดยตรง โดยอนุมูลอิสระ คือโมเลกุลที่ขาดอิเล็กตรอนไปหนึ่งอิเล็กตรอน ทำให้สารดังกล่าวมีความไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี และจะทำการแย่งอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่น เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ จนทำให้ความสมดุลภายในร่างกายสูญเสียไป โดย อนุมูลอิสระจะเข้าไปทำลายสารประกอบจำพวกไขมัน ที่เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ สารจำพวกโปรตีนซึ่งเป็นโครงสร้างของร่างกายรวมถึงเอ็นไซม์ นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้

ปฏิกิริยาขนาดเล็กที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตภายในเซลล์ผิดปกติ และก่อให้เกิดความผิดปกติของดีเอ็นเอในหน่วยพันธุกรรม สาเหตุดังกล่าวล้วนเป็นจุดเริ่มต้นของโรคมะเร็ง ในการทดลอง พบว่าโปรวิตามินเอ เช่น บีตาแคโรทีน มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระแก่อนุมูลอิสระแล้วเสื่อมสลายไปโดยไม่เกิดอันตรายต่อร่างกาย (Madhavi *et al.*, 1996) และจากการศึกษาเกี่ยวกับโรคมะเร็งในผู้รับประทานวิตามินเอสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งในช่องปาก มะเร็งกระเพาะอาหาร รวมถึงมะเร็งปอด โดยพบว่า ในการทดลองให้ปริมาณบีตาแคโรทีนแก่กลุ่มคนที่เป็นโรคมะเร็งและคนที่สูบบุหรี่จัดเป็นประจำ พบว่า ปริมาณบีตาแคโรทีนในเลือดต่ำจะต่ำกว่ากลุ่มคนที่ไม่เป็นโรคมะเร็ง (อรชุน, 2539)

2.5 การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์มีปัจจัยดังนี้

2.5.1 ออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทางตรง (direct oxidation) เกิดขึ้นเมื่อแคโรทีนอยด์สัมผัสกับอากาศ ตำแหน่งพันธะคู่ในโครงสร้างของโมเลกุลจะไปจับกับออกซิเจนเกิดเป็นสารสีน้ำตาลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) สารประกอบคาร์บอนิลและสารระเหยอื่นๆ โดยอัตราการสูญเสียแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนแล้ว ความเข้มของแสง อุณหภูมิ และความชื้น ก็เป็นปัจจัยร่วมในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Crawley, 1993) การป้องกันการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากอากาศ สามารถกระทำได้โดยการเติม สารต้านการเกิดออกซิเดชัน (นิธิยา, 2548) เช่น BHA (Butylated hydroxyanisole) BHT (Butylated Hydroxytoluene) TBHQ (Tertiary Butyl Hydroquinone) และ PG (propyl gallate) เป็นต้น และการทำไฮโดรจิเนชัน คือ กระบวนการเติมไฮโดรเจนให้กับตำแหน่งพันธะคู่ภายในโมเลกุลของ กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เพื่อเพิ่มความคงตัวและลดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนลง อีกวิธีคือการป้องกันการเข้าไปสัมผัสอากาศ เช่น การใช้บรรจุภัณฑ์ที่บรรจุแก๊สเฉื่อย การเก็บรักษาภายในระบบสุญญากาศ และการใช้น้ำมันเคลือบที่ผิวผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Bauernfeind, 1981)

2.5.2 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบแบบทางอ้อม (indirect oxidation) เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสามารถรวมตัวกับออกซิเจน และทำให้แคโรทีนอยด์ ถูกออกซิไดส์ไปด้วย โดยสามารถแก้ไขได้จากการใช้กรดไขมันชนิดอิ่มตัวในการผสมกับสาร แคโรทีนอยด์ (นิธิยา, 2548)

2.5.3 ไอออนของโลหะ

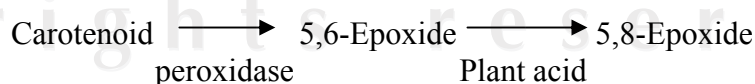
หากในผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ ประกอบด้วย ไอออนของโลหะซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย พบว่าการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ ยิ่งรวดเร็วขึ้น เช่น ในมะเขือเทศ พบว่า หากมีโลหะทองแดง ภายในส่วนประกอบ ผลิตภัณฑ์จะมีการเสื่อมสลายของไลโคพีนจะเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.5 เท่า เนื่องจากโลหะทองแดงเป็นตัวเร่งการเกิดอนุมูลอิสระได้อย่างดี (นิธิยา, 2548)

2.5.4 แสงสว่าง

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

2.5.5 เอนไซม์

การเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากเอนไซม์ (ปราณี, 2543) เป็นผลมาจาก ภายในเซลล์แคโรทีนอยด์จะอยู่ในรูปซึ่งก่อพันธะเชิงซ้อนอยู่กับโมเลกุลของโปรตีน โดยเอนไซม์หลักที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ 3 ชนิดคือ เปรอร์ออกซิเดส (peroxidase) หรือ POD เป็นเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแคโรทีนอยด์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังสมการ



เอนไซม์นี้จะไปเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอากาศ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับแคโรทีนอยด์ ทำให้แคโรทีนอยด์ลดลงและในเอนไซม์ไลโปเปอร์ออกซิเดส (lipoperoxidase) เอนไซม์ตัวนี้จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการสลายของสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งเกิดต่อเนื่องมาจากสารเปอร์ออกไซด์ ที่ได้จากการออกซิเดชันโดยอาศัยเอนไซม์ไลโปออกซิเดส (นิริยา, 2548)

2.5.6 น้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่ช่วยในกิจกรรมของเอนไซม์ โดยพบว่า หากมีการลดปริมาณน้ำลง จะทำให้เอนไซม์ทำงานได้ลดลง เนื่องจากสารตั้งต้นสามารถเคลื่อนที่ได้น้อย และไม่สามารถแพร่ไปยังตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ หากกำจัดน้ำออกไปหมดจะทำให้ผิวนอกของตัวอย่างสัมผัสกับอากาศโดยตรง จะทำให้แคโรทีนอยด์สามารถเกิดออกซิเดชันด้วยอากาศได้มากขึ้น (Bauernfeind, 1981)

2.6 กระบวนการทำแห้ง

การทำแห้งเป็นวิธีในการถนอมอาหารวิธีหนึ่งที่มีการใช้มาตั้งแต่อดีต โดยเริ่มต้นจากการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ จนมาในปัจจุบันมีการใช้แหล่งพลังงานหลากหลายชนิดทั้ง พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า แก๊ส ไอน้ำ 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

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

1) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถาด

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถาด (vacuum shelf dryer) ตัวเครื่องประกอบด้วยตู้สุญญากาศ ซึ่งภายในมีชั้นรองรับถาดวางผลิตภัณฑ์ ตัวชั้นอาจได้รับความร้อนจากไฟฟ้า ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหาร โดยการนำความร้อน หรือใช้อากาศร้อนเป็นตัวพาความร้อนไปยังชั้นผลิตภัณฑ์ ตัวตู้สุญญากาศจะต่อกับอุปกรณ์สร้างระบบสุญญากาศที่อยู่ภายนอกตู้ ซึ่งอาจเป็นปั๊มสุญญากาศ หรือปั๊มไอน้ำ อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบ คือ คอนเดนเซอร์ซึ่งเป็นตัวเก็บไอน้ำจากอยู่ภายใน หรือนอกตู้ แต่ควรติดตั้งอยู่ก่อนหน้าปั๊มสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำเข้าไปในปั๊ม เครื่องนี้จะเหมาะสำหรับการผลิตแบบครั้งเดียว สามารถบำรุงรักษาได้ง่าย เหมาะสำหรับการใช้ที่ระดับสุญญากาศสูง ๆ สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ในทุกรูปแบบ ตั้งแต่รูปของเหลว ของเหลวข้น และเป็นผง

2) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถัง

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถัง (rotary vacuum dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง มีลักษณะเป็นลูกกลิ้งแนวนอนไม่เคลื่อนที่ หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อน เป็นการทำงานแบบครั้งเดียว ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลากหลาย และเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการระดับสุญญากาศสูง ๆ

3) เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถังหมุน

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศชนิดถังหมุน (conical rotating vacuum dryer) ตัวเครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นถังสุญญากาศทรงกระบอก เมื่อเกิดการหมุน จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเคลื่อนที่ติดกับผนังของถังสุญญากาศที่หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อนรอบ ๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง และชื้น ที่ไม่เกิดการเกาะติดกัน หรือที่ติดผนังของถังสุญญากาศ ซึ่งจะช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง

4) เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศชนิดต่อเนื่อง

เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศชนิดต่อเนื่อง (continuous vacuum dryer) อุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบต่อเนื่อง โดยการอบแห้งจะใช้รังสีอินฟราเรด หรือให้ความร้อนจากแผ่นความร้อนด้านบน หรือด้านล่างของสายพานร่วมกับการใช้ระบบสูญญากาศ จากนั้นจะมีการกลับผลิตภัณฑ์ระหว่างการลำเลียง จากสายพานหนึ่งไปสายพานอีกอันหนึ่ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับการทำแห้งผลไม้เป็นชิ้น

2.6.2 การทำแห้งด้วยระบบไมโครเวฟ

การทำแห้งด้วยระบบไมโครเวฟ (microwave drying) เป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างทันสมัยและก้าวหน้ามาก ไมโครเวฟเริ่มรู้จักในปี พ.ศ. 2483 และพัฒนาออกมาในรูปของเตาไมโครเวฟ ปัจจุบันไมโครเวฟกลายเป็นของใช้ภายในครัวเรือนที่ใช้การหุงต้มอาหาร เนื่องจากสามารถใช้เวลาในการปฏิบัติงานไม่นาน ประหยัดพลังงาน และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ (สายสนม, 2546) ในการศึกษาวิจัยนี้ จึงได้เลือกเอาพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการทำแห้งแคโรทีนอยด์

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)

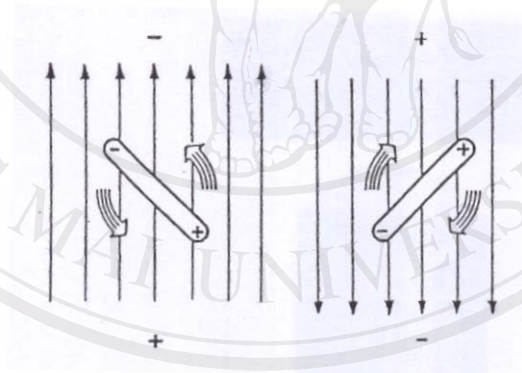
คลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะเหมือนลำแสงเดินทางเป็นเส้นตรงเมื่อกระทบโลหะจะสะท้อนกลับแต่สามารถทะลุผ่านอากาศ แก้ว กระจกและพลาสติกได้ ถูกดูดซับไว้ได้ดีในสารประกอบที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric) เมื่อคลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับจะไม่ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นกับวัสดุนั้น แต่ถ้าสารใดสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟไว้ได้จะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนภายในสารนั้น โดยเปลี่ยนจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สารใดที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้สูงและเกิดความร้อนได้รวดเร็วจะเรียกสารนั้นว่ามี 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 2.2



ภาพที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบของสารภายในสนามแม่เหล็ก
ที่มา : สายสนม, 2546.

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปกลับมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ คือ 915-2450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งผลของความถี่ในการหมุนตัวและการเสียดสีกันทำให้เกิดความร้อนขึ้นและเป็นลักษณะการเกิดความร้อนที่สำคัญ

ความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งสองรูปแบบดังกล่าวที่จุดซึ่งอาหารสัมผัสกับไมโครเวฟแล้วจึงค่อยกระจายตัวออกไปยังส่วนอื่นเนื่องจากผลของการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนด้วยแลเป็นไป

อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเกิดความร้อนจากสาเหตุต่าง ๆ ดังกล่าวนี้ ทำให้เกิดได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการหุงต้มโดยความร้อนแบบดั้งเดิม (Lakshmia *et al.*, 2006)

ปริมาณพลังงานที่เกิดจากเครื่องไมโครเวฟสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในสารประกอบไดอิเล็กทริกได้โดยคำนวณจากสมการ (Decareau and Peterson, 1986)

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

P_D = พลังงานที่สารประกอบดูดซับไว้ได้มีหน่วย วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (watt/ cm³)

E = ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตร (volt/cm³)

f = ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

k' = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric)

$\tan \delta$ = loss tangent

2.6.2.2 ระยะเวลาที่คลื่นไมโครเวฟผ่านชั้นอาหาร

อาหารจะเกิดความร้อนได้ก็ต่อเมื่อกระทบกับคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นการที่ไมโครเวฟจะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นอาหารได้มากก็นับเป็นการดีที่จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นแล้ว พลังงานจะลดลงยิ่งอาหารชนิดใดมี ค่า loss factor สูงก็จะทำให้ความร้อนสูง แต่ขณะเดียวกันพลังงานในการเจาะทะลุเข้าไปในชั้นอาหารก็จะยิ่งลดลงจึงทำให้ทะลุผ่านเข้าไปได้ในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ยังพบว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ต่างกันจะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นอาหารได้ระยะต่างกันด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 915 MHz จะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นอาหารได้ลึกกว่าคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 MHz ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทะลุผ่านเข้าไปในชั้นอาหารนับว่ามีความสำคัญต่อการออกแบบหรือการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะอาหารเช่น ถ้าชั้นอาหารที่จะแปรรูปด้วยไมโครเวฟมีความหนามาก ก็ควรที่จะเลือกคลื่นไมโครเวฟที่ต่ำกว่าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคลื่นและระยะทางที่คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านชั้นอาหารไปได้ สามารถคำนวณได้จากสูตร

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

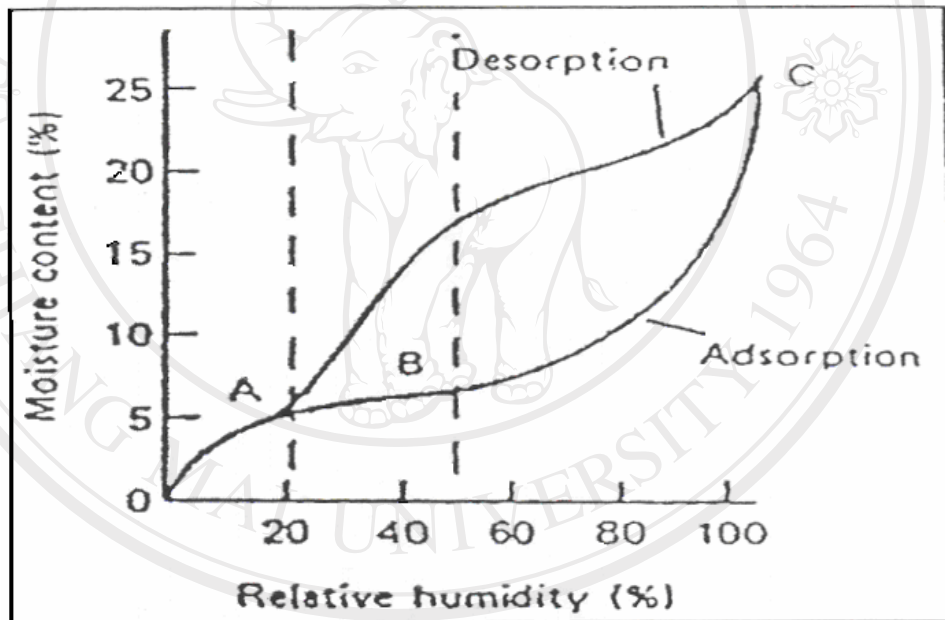
D = ระยะเวลาที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านชั้นอาหาร หน่วยเป็น เซนติเมตร

λ_0 = ความยาวคลื่นในที่ว่างอิสระ (free space) หน่วยเป็น เซนติเมตร

2.6.3 Moisture sorption isotherms

ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับความชื้น (adsorption) และการคายความชื้น (desorption) ของอาหารที่อุณหภูมิและในเวลาที่กำหนด ปกติแล้วน้ำในอาหารเคลื่อนที่ไปยังอากาศรอบ ๆ โดยขึ้นกับความชื้นและองค์ประกอบของอาหาร ที่อุณหภูมิคงที่ความชื้นจะปรับตัวจนกว่าจะถึงสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบของบรรยากาศที่เก็บรักษา (Debnath *et al.*, 2002)

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



ภาพที่ 2.2 Moisture Sorption isotherm

ที่มา : รัตน์นท์, 2551

จากภาพที่ 3 ที่จุด C แสดงจุดที่อาหารมีความชื้นสูง และที่จุด A แสดงจุดที่ความชื้นของอาหารมีค่าต่ำ เมื่อทำการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลงจากจุด C มีผลให้ ความชื้นในอาหารลดลงด้วย หากทำการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่อไปจนกระทั่งความชื้นในอาหารลดถึงจุด A จะได้กราฟแสดงลักษณะการดึงความชื้นออกจากอาหาร หรือที่เรียกว่า desorption isotherm

สำหรับค่า adsorption isotherm จะเป็นกราฟแสดงลักษณะการดูดความชื้นจากอากาศเข้าสู่อาหาร เริ่มต้นจากจุด A ที่อาหารมีความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำ เมื่ออากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น ความชื้นสมดุลภายในอาหารจะเพิ่มขึ้นดังเช่นที่จุด B และจุด C จากกราฟ sorption isotherm จะ

เห็นว่า ระหว่าง จุด A ถึงจุด C ของกราฟ adsorption isotherm ปริมาณน้ำในอาหารเริ่มต้นมีน้อย และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น กราฟจึงค่อย ๆ เพิ่ม ขณะที่กราฟ desorption isotherm ปริมาณน้ำในอาหารเริ่มต้นมีสูงการลดลงของปริมาณน้ำในอาหารจึงเกิดได้ง่าย ทำให้เส้นกราฟที่ได้จะแยกเส้นกัน ลักษณะปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Hysteresis

Moisture sorption isotherms มีความสำคัญในกระบวนการผลิตอาหารหลากหลายชนิด เช่น การทำแห้ง การเก็บรักษา และการบรรจุผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ข้อมูลที่ได้ moisture sorption isotherms เมื่อใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังตารางที่ 2.3 สามารถนำไปคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ทำนายลักษณะของอาหารหลังเพิ่มส่วนผสมลงไป ใช้เป็นตัวเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในอาหารระหว่างเก็บรักษา ประมาณอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารผง (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	$X_{eq} = \frac{K_1 K_2 a_w}{1 + K_1 a_w} + K_3 a_w + \frac{K_3 K_4 a_w}{1 - K_3 a_w}$	(6)

หมายเหตุ : X_{eq} คือ ความชื้น (กรัมของน้ำ/กรัมของน้ำหนักแห้ง)
 X_m คือ ความชื้นชั้นเดียวที่เกาะบนอาหาร (monolayer moisture content ; กรัมของน้ำ/กรัมของน้ำหนักแห้ง)
 a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี
A, B, C, K, k, N, n คือ ค่าคงที่

ที่มา : Cassini, 2006

2.6.4 วอเตอร์แอกติวิตี

วอเตอร์แอกติวิตี (water activity) เป็นค่าที่มีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายชนิดของอาหารและอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหารและการเน่าเสียของอาหาร

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

วอเตอร์แอกติวิตีสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง แสดงจากภาพที่ 2.3 ดังนี้

ช่วงที่ 1 บริเวณล่างสุดของกราฟ (a_w อยู่ระหว่าง 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

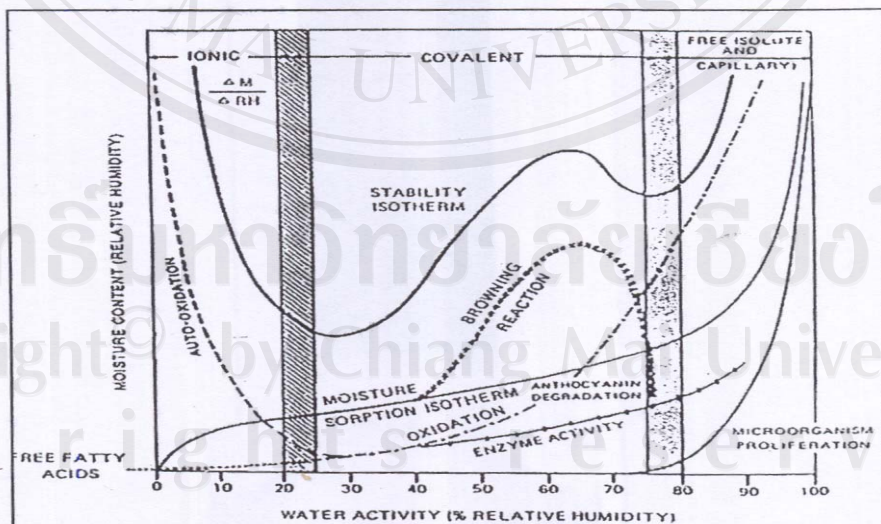
ช่วงที่ 2 บริเวณตอนกลางของกราฟ (a_w อยู่ระหว่าง 0.25 – 0.8)

ช่วงบริเวณตอนกลางของกราฟนี้ อาหารดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นหลายชั้นถัดจากชั้น Monolayer Film ในช่วง ระหว่าง 0.25 – 0.75 น้ำนี้เกาะอย่างหลวม ๆ (Unbound moisture)

และคูคยิดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กับหมู่ OH^- ของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ทำให้ค่า a_w เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่น้ำเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง น้ำในชั้นนี้สามารถกำจัดออกไปได้ง่ายซึ่งจะทำให้ชั้นที่ละลายตัวถูกละลายและเร่งปฏิกิริยาเคมี ปลายช่วงที่ 2 และ 3 มีปริมาณน้ำที่มากพอจนทำให้ชั้น monolayer เปียกเต็มที่ น้ำส่วนนี้สามารถทำละลายและถ่ายเทได้ภายในและระหว่างเซลล์ จุลินทรีย์สามารถใช้น้ำส่วนนี้เพื่อการเจริญได้

ช่วงที่ 3 บริเวณตอนบนของกราฟ (a_w อยู่ระหว่าง 0.25 – 0.8)

ช่วง บริเวณตอนบนของกราฟ อาหารมีน้ำอิสระ (Free water) เพียงพอที่สามารถควบแน่นภายในเซลล์ของอาหารในช่วง a_w มีค่า 0.75 – 1.00 มีชั้นน้ำหลายชั้นบนโปรตีนและพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต น้ำชั้นนี้มีความดันไอต่ำเพราะในอาหารมีตัวถูกละลายอยู่ ตัวอย่างเช่นน้ำตาลหรือกรดอะมิโนอิสระ เป็นต้น ในช่วงนี้ความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ a_w กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยน้ำเหล่านี้จะรวมตัวกันแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเซลล์และถูกกักในอาหารด้วยแรงอ่อน ๆ ซึ่งเพียงพอแก่การเจริญเติบโตของยีสต์และรา อีกทั้งน้ำอิสระนี้จะถูกใช้เพื่อเร่งปฏิกิริยาทางเคมีและใช้ในปฏิกิริยาของเอนไซม์ การอบแห้งสามารถกำจัดน้ำในชั้นน้ำนี้ได้โดยง่าย 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 ทำการเก็บรักษา 6 เดือน พบว่า มีการสูญเสียปริมาณบีตาแคโรทีนในมะม่วงผง ประมาณ 51-66% การเสื่อมสลายของปริมาณบีตาแคโรทีน อาจจะเป็นผลจากความไวในการสลายตัวเนื่องจากแสง การเกิดไอโซเมอไรเซชัน และการเกิดอีพอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ต่อมาในปี 2006 Java and Mani ได้ศึกษาการทำมะม่วงผง โดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน พบว่า มีการสูญเสียปริมาณบีตาแคโรทีนในมะม่วงผง ประมาณ 51-66%

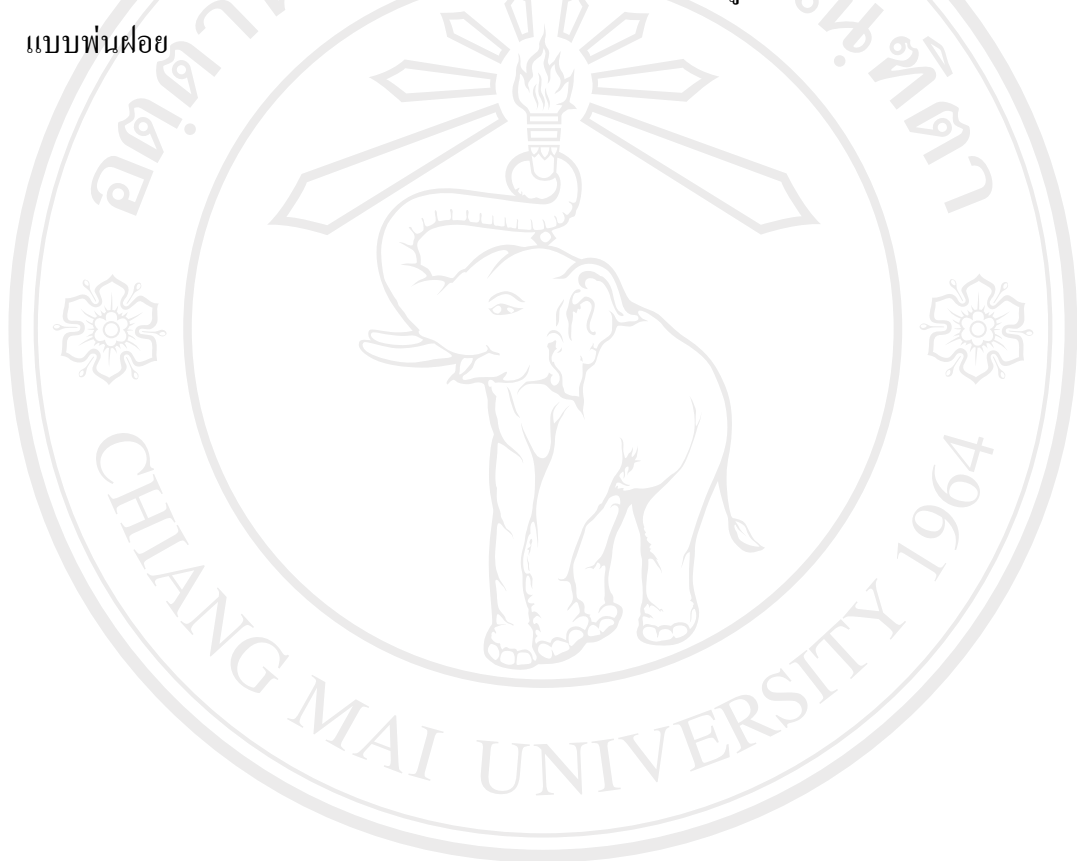
2.6.5.2 การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร

จากการศึกษาการทำแห้งชิ้นแครอท (Cui *et al.*, 2004) โดยเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งที่ส่งผลกระทบต่อลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ พบว่า การทำแห้งชิ้นแครอทโดยใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศ, การใช้เครื่องไมโครเวฟระบบสุญญากาศร่วมกับเตาอบลมร้อน การใช้ไมโครเวฟระบบสุญญากาศร่วมกับเตาอบระบบสุญญากาศ ปริมาณแคโรทีนอยด์ภายในผลิตภัณฑ์แครอทชิ้นมีการลดลงน้อยมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการทำแห้งด้วยระบบไมโครเวฟระบบสุญญากาศมีอัตราการแห้งที่สูงและใช้เวลาสั้น เป็นผลให้เอนไซม์ไลพอกซิเจเนส (lipoxygenase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ไปเร่งปฏิกิริยาการสลายของแคโรทีนอยด์ลดลง และด้วยระบบสุญญากาศทำให้ไม่มีออกซิเจนสำหรับใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลแคโรทีนอยด์ นอกจากนี้ ผลการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ในผลิตภัณฑ์แครอทแห้งให้ผลไม่แตกต่างกัน ในการทำแห้งด้วยไมโครเวฟระบบสุญญากาศกับการทำแห้งด้วยระบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)

ในปี 2007 Li *et al.* 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 เมื่อสิ้นสุดการทำแห้งได้ผลิตภัณฑ์ผงที่มี สารอัลลิซิน (allicin)

หลงเหลืออยู่ 90.2% ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากการทำกระเทียมผงด้วยด้วยระบบแช่เยือกแข็ง แต่เสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าและสูญเสียพลังงานน้อยกว่า

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



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved