

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อาร์ติโชค

อาร์ติโชคนิยมปลูกในหลายประเทศมีชื่อสามัญเรียกหลายภาษาเช่น ภาษาอังกฤษ เรียก globe artichoke และ ภาษาบราซิลเรียก alcachofra เป็นพันธุ์ไม้ในตระกูล (family) Asteraceae สกุล (genus) Cynara และมีชื่อชนิดว่า *Cynara scolymus* เป็นพืชที่มีคุณค่าทางยา สามารถบริโภคสดหรือปรุงเป็นอาหารหรือนำมาสกัดสารไซนาริน (synarin) รับประทานเพื่อบำรุงรักษาสุขภาพได้ดี ทุกส่วนของต้นอาร์ติโชคสามารถนำมาทำประโยชน์ได้ทั้งหมด มีรายงานการพบสารไซนาริน ซึ่งเป็นสารสำคัญในอาร์ติโชคโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวยุโรปเมื่อปี ค.ศ. 1970 ในยุคโบราณ อาร์ติโชคเป็นอาหารและยารักษาโรคของชาวอียิปต์ ชาวกรีก และชาวโรมัน ปัจจุบันปลูกเพื่อเป็นการค้าในหลายประเทศทั่วโลก (ศักดิ์, 2553) ลักษณะของอาร์ติโชคแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของอาร์ติโชค

สายพันธุ์อาร์ติโชคที่ใช้ปลูกแบ่งออกตามลักษณะการใช้บริโภคคือ

2.1.1 พันธุ์ที่นิยมบริโภคดอกเป็นหลัก ลำต้นมีลักษณะเตี้ย ทรงพุ่มมีขนาดเล็ก ระยะเวลาปลูก

ชิด ปลูกได้ปริมาณมาก มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น (ศักดิ์, 2553)

2.1.2 พันธุ์ที่บริโภคใบเป็นหลัก มีลักษณะลำต้นสูง ทรงพุ่มใหญ่ มีอายุการเก็บเกี่ยว

นาน ใบมีขนาดใหญ่ เป็นพันธุ์ที่มีสารไซนารินในใบมากที่สุด (ศักดิ์, 2553)

2.1.3 พันธุ์ที่บริโภคดอกและใบเป็นหลัก มีลักษณะความสูงของลำต้นขนาดกลาง ทรงพุ่มขนาดกลาง เป็นสายพันธุ์ที่มีแหล่งกำเนิดในประเทศฝรั่งเศสที่นิยมปลูกมี 3 พันธุ์ คือ A. 75 (ก่อนปี ค.ศ. 1975) A.80 (พันธุ์ลูกผสม ปี ค.ศ. 1980) และ A.85 (ปี ค.ศ. 1985) พันธุ์ A.85 เป็นสายพันธุ์ที่มีคุณลักษณะดีที่สุด ให้ผลผลิตสูง ดอกที่เก็บเกี่ยวสดสามารถเก็บไว้ได้นาน ทนทานต่อการขนส่ง แต่มีข้อเสียคือ ไม่ค่อยต้านทานโรค และเพาะขยายพันธุ์ได้ยาก โดยทั่วไปเกษตรกรจะนิยมปลูกพันธุ์ที่บริโภคดอกมาก เพราะดอกของอาร์ติโชคพันธุ์นี้ มีคุณค่าทางอาหารและสรรพคุณทางยาสูงที่สุด (ศักดิ์, 2553)

2.2 การขยายพันธุ์อาร์ติโชค

2.2.1 การใช้เมล็ดปลูกส่วนมากเป็นพันธุ์ลูกผสม ระยะเพาะปลูกระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน โดยการคัดเลือกเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ออกด้วยการแช่น้ำ คัดเอาเมล็ดที่ลอยน้ำออกทิ้ง หลังจากนั้นจึงคลุกด้วยสารเคมีที่ป้องกันเชื้อราและจึงหว่านเมล็ดลงในถาดเพาะหรือแปลงเพาะ ดินที่ใช้เพาะเมล็ดต้องผสมปุ๋ยหมักในอัตรา ดิน 3 ส่วน: ปุ๋ยหมัก 1 ส่วน เมื่อเมล็ดงอกแล้วต้นมีขนาดสูงประมาณ 1-2 นิ้ว ใช้ปุ๋ยน้ำฉีดพ่นต้นอ่อนเพื่อกระตุ้นให้เจริญเติบโตเร็วขึ้น (ศักดิ์, 2553)

2.2.2 การใช้พันธุ์จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ เป็นวิธีที่ดีที่สุดเพราะสามารถขยายพันธุ์ได้ในปริมาณมาก ลำต้นมีขนาดเท่ากัน มีการเจริญเติบโตเท่ากัน ให้ผลผลิตเก็บเกี่ยวได้พร้อมกัน แต่เป็นวิธียุ่งยากสำหรับเกษตรกรและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง (ศักดิ์, 2553)

2.2.3 การปลูกโดยใช้หน่อเป็นวิธีที่เกษตรกรนิยมใช้มาก แต่ต้องเลือกหน่อที่ดีสมบูรณ์มาทำพันธุ์และนำหน่อที่ได้หุบสารเคมีป้องกันเชื้อรา แปลงเพาะชำต้องใส่แคลเซียมคลอไรด์และคอปเปอร์ซัลเฟตคลุกเคล้าผสมกับดิน แล้วจึงชำหน่อลงในแปลงเพาะชำกล้าที่มีขนาด 1.2-1.3 เมตร โดยการชำเป็นแถว 4-5 แถวต่อแปลง ระยะต้นห่างประมาณ 15-20 เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงใช้หญ้าหรือฟางแห้งคลุมแปลงเพาะชำและให้น้ำวันละ 2 เวลา หลังจากนั้น 7-10 วัน จึงเอาหญ้าหรือฟางแห้งที่คลุมแปลงออก โดยในขณะคลุมเมล็ดพ่นประมาณ 2 ครั้ง อย่าใช้ปุ๋ยยูเรียมากเกินไป เพราะจะทำให้หน่อพันธุ์อวบอ้วนเกินไป อ่อนแอเป็นโรครากง่าย หลังจากนั้นควรหมั่นตรวจสอบติดตามสถานการณ์ศัตรูพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรคที่เกิดจากเชื้อราและแบคทีเรียอย่างสม่ำเสมอ และถอนหน่อกล้าพันธุ์ที่ตายหรือเป็นโรคออกจากแปลงไปทำลาย ระยะเวลาเพาะชำพันธุ์กล้าประมาณ 1 เดือน (ศักดิ์, 2553)

2.3 การเพาะปลูกอาร์ติโชค

2.3.1 ดินที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกอาร์ติโชคต้องเป็นดินที่อุ้มน้ำ และระบายน้ำได้ดี มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง มีอินทรีย์วัตถุไม่น้อยกว่าร้อยละ 5-7 ในช่วงฤดูแล้งความชื้นในดินต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 เพราะอาร์ติโชคเป็นพืชที่มีใบค่อนข้างใหญ่การคายน้ำของใบจึงสูง ในช่วงฤดูฝนหากน้ำในดินสูงเกินไป จะเป็นอันตรายต่ออาร์ติโชคที่มีอายุน้อยหรือต้นอ่อน อาร์ติโชคเป็นพืชที่ชอบขึ้นในดินที่ค่อนข้างเป็นด่าง มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-6.5 ดังนั้นหากในพื้นที่ดินมีคุณสมบัติเป็นกรด ควรปรับลดความเป็นกรดของดินด้วยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ก่อนจึงค่อยปลูกอาร์ติโชค (ศักดิ์, 2553)

2.3.2 ภูมิอากาศที่เหมาะสมสำหรับการปลูกอาร์ติโชคให้ได้ผลผลิตที่ดีคือ ต้องมีอากาศเย็นตลอดปี อยู่เหนือกว่าระดับน้ำทะเลไม่น้อยกว่า 1,200 เมตร อาร์ติโชคเป็นพืชที่ต้องปลูกในพื้นที่ที่มีแสงแดดมาก ราก ใบ ลำต้น และดอก จึงจะมีการเจริญเติบโตดี สม่าเสมอ และสะสมสารที่มีสรรพคุณทางยาได้มาก (ศักดิ์, 2553)

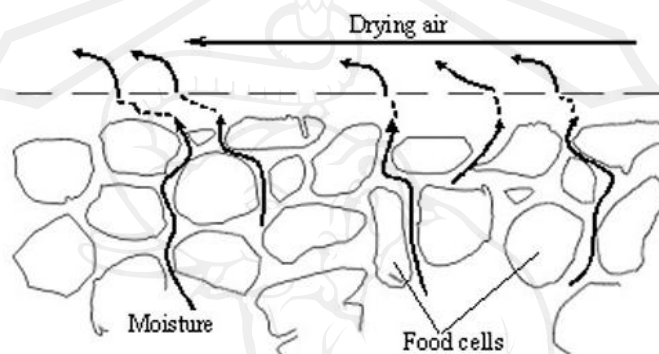
2.4 การอบแห้ง

การทำอาหารแห้งเป็นการดึงน้ำออกจากอาหาร เป็นการถนอมอาหารแบบหนึ่งที่ทำได้ง่าย เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่ง สามารถเก็บรักษาได้นานเป็นปี จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นที่จะป้องกันการเสื่อมเสียของอาหาร เนื่องจากจุลินทรีย์โดยทั่วไปควรจะต้องดึงน้ำออกให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบเป็นสำคัญ ถ้าจะป้องกันการเสื่อมเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีควรจะต้องลดต่ำลงจนถึงประมาณร้อยละ 5 (รุ่งนภา, 2535)

2.4.1 หลักการอบแห้ง

เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหนังของอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาพแวดล้อมจะทำให้ความดันที่ผิวหนังของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอของอาหารขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นของอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหนังด้วยกลไกดังต่อไปนี้ (ดังภาพที่ 2.2)

1. การเคลื่อนที่ของของเหลวด้วยแรงแคปิลารี
2. การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลายของอาหารในส่วนต่างๆ
3. การแพร่ของของเหลวซึ่งดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร
4. ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของอาหาร



ภาพที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นระหว่างการทำให้แห้ง
ที่มา : วิล (2546)

2.4.2 กระบวนการทำแห้งอาหาร

สมบัติ (2529) กล่าวว่า การทำแห้งคือการลดความชื้นในอาหารหรือการลดค่า a_w ของอาหาร ค่า a_w มาจากคำว่า available water หรือ water activity หมายถึง ปริมาณน้ำอิสระที่จุลินทรีย์จะสามารถนำไปใช้ในการเจริญได้ อาหารทุกชนิดจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบในปริมาณมากน้อยแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 10-95 โดยน้ำหนัก อาหารที่มีน้ำมากจะเกิดการเสื่อมเสียเร็ว แต่ปริมาณน้ำอย่างเดียวยังไม่สามารถที่จะบ่งชี้ว่าอาหารนั้นจะเสื่อมเสียได้เร็วหรือช้า เพราะองค์ประกอบของอาหารแตกต่างกัน น้ำที่มีอยู่ในอาหารแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

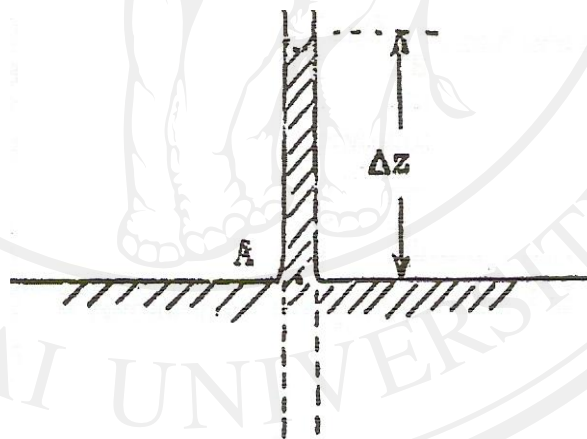
1. น้ำอิสระ (free water) น้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในเซลล์พืช เซลล์สัตว์ ไซโทพลาสซึม ช่องว่างระหว่างเซลล์ ท่อส่งน้ำ ท่ออาหาร น้ำอิสระสามารถดึงออกจากอาหารได้ง่ายๆ โดยใช้พลังงานความร้อนและแสงในช่วงการอบแห้งที่อัตราเร็วคงที่ น้ำอิสระเป็นน้ำที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเป็นน้ำที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญและการสืบพันธุ์ เรียกน้ำส่วนนี้ว่า available water หรือ water activity เป็นน้ำที่มีความสำคัญ มีบทบาทต่อการถนอมอาหารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2. น้ำไม่อิสระ (bound water) น้ำไม่อิสระเพราะโมเลกุลไปเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของสารเคมี หรือสารประกอบอื่นๆ ในอาหารด้วยพันธะต่างๆ เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะแวนเดอร์วาลส์ การจับตัวด้วยพันธะต่างๆ มีผลต่อความแข็งแรง ความยากง่ายในการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของสารอื่นๆ

2.4.3 การเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารเนื่องจากการทำแห้ง

สมบัติ (2529) กล่าวว่า การระเหยเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหาร 2 ระดับ คือ การเคลื่อนที่จากภายในอาหารไปสู่ผิวหน้าของอาหาร และจากผิวหน้าของอาหารไปสู่อากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

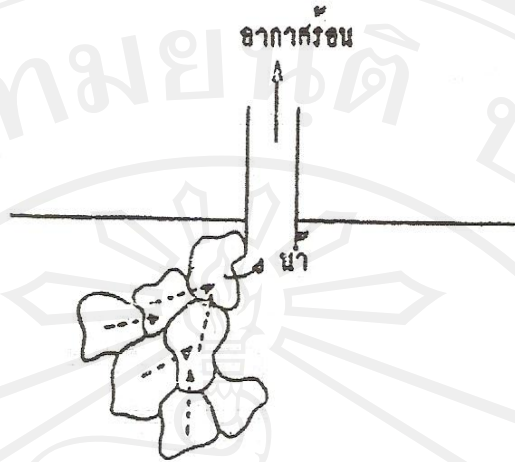
1. การเคลื่อนที่ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ของไอน้ำในอาหารที่มีเซลล์โปร่ง มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อส่งน้ำ และท่อแคปิลลารี เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็ว หยุดเมื่อน้ำในช่องแคบๆ ขาดตอนลง ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของน้ำด้วยแรงผ่านช่องแคบ

ที่มา : สมบัติ (2529)

2. การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ผ่านเซลล์ (diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ที่ต่อเนื่องเป็นทางแคบๆ หรือเกิดในอาหารที่อบแห้งไประยะหนึ่งแล้วที่แรงผ่านช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านผนังเซลล์จึงเคลื่อนที่ได้ช้า ซึ่งมีลักษณะเป็น semipermeable membrane จากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่ง น้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวอาหารแล้วจะระเหยไปกับกระแสลมร้อน ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของน้ำด้วยการแพร่ผ่านเซลล์
ที่มา : สมบัติ (2529)

2.4.4 อัตราการทำแห้งของอาหาร (drying rate)

ลักษณะการเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารมีผลต่ออัตราการทำแห้ง (การสูญเสียน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา) อาหารที่มีเนื้อโปร่งการเคลื่อนที่ของน้ำจะเป็นแบบการไหลผ่านช่องแคบ น้ำที่เคลื่อนมาที่ผิวอาหารจะเร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอ ผิวอาหารจะเปียกชุ่มด้วยน้ำ การระเหยน้ำเกิดอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ เรียกรการทำแห้งช่วงนี้ว่าอัตราการทำแห้งคงที่ เมื่อการไหลผ่านช่องแคบของน้ำหมดไป น้ำจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ที่ช้าลงมากจนผิวอาหารแห้ง การระเหยเกิดขึ้นช้าลงอัตราการทำแห้งจึงลดลง

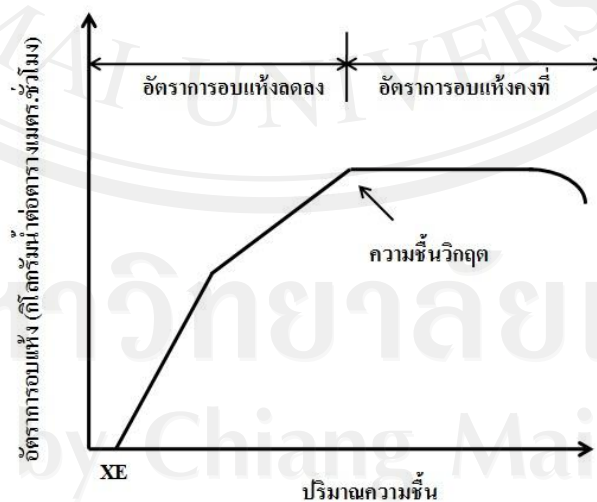
อัตราการอบแห้งเป็นการวัดความเร็ว หรือความสามารถในการระเหยของน้ำต่อเวลาหรือพื้นที่โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{อัตราการอบแห้ง} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยไป}}{\text{ระยะเวลา หรือพื้นที่}}$$

การทำแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของอากาศในเครื่องทำแห้งสมดุลกับความชื้นของอาหารหรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าเท่ากับค่า a_w ของอาหารคูณด้วย 100 เรียกว่าความชื้นสมดุล และการอบแห้งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- I : ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
 II : ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
 III : ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ โดยอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วง I ในช่วงเวลา II ที่ถัดไป อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ ทรายใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น อัตราส่วนความชื้นของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา ในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate) ในช่วง III ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป การถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย ในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate) การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ส่วนค่าของความชื้นที่จุดต่อระหว่างช่วง II และ III เรียกว่าความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งกับความชื้น
 ที่มา : คัดแปลงจากนิธิยา (2555)

สำหรับการวัดความชื้นของผลผลิต โดยทั่วไปปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุอบแห้ง คิดได้ 2 แบบดังนี้

(1) ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis); M_w จะใช้น้ำหนักของวัสดุที่ชื้น เป็นฐานในการคำนวณ ดังนี้

$$M_w = \left[\frac{(w-d)}{w} \right] \times 100 \quad (2.1)$$

(2) ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis); M_d จะใช้น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง เป็นฐานในการคำนวณ ดังนี้

$$M_d = \left[\frac{(w-d)}{d} \right] \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ	M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, ร้อยละ
	M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, ร้อยละ
	w	=	น้ำหนักน้ำรวมกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ, กิโลกรัม
	d	=	น้ำหนักวัสดุแห้ง (น้ำหนักวัสดุหลังจากอบจนน้ำระเหยหมดแล้ว), กิโลกรัม

ความชื้นมาตรฐานเปียกจะนิยมใช้กันในการค้า ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งจะนิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพื่อช่วยในการคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

2.4.5 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้น เมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นมากกว่าร้อยละ 230-300 (มาตรฐานแห้ง) ขึ้นไป (Brooker *et al.*, 1992) ที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุ และอากาศจะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือ เกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิววัสดุเท่านั้น และน้ำจะเกาะ

อยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการอบแห้ง คืออุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศที่มีความหนาลดลงเป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุ และอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของกระเปาะเปียก และที่อากาศรอบนอก (สมชาติ, 2540) ดังสมการที่ (2.3)

$$\dot{m}_w = h_D A (C_{wb} - C_\infty) \quad (2.3)$$

เมื่อ	$\dot{m}_w$	=	อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h
	h_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, m/h
	A	=	พื้นที่ที่เกิดการระเหย, m^2
	C_{wb}	=	ความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของกระเปาะเปียก, kg/m^3
	C_∞	=	ความเข้มข้นของไอน้ำที่กระแสการไหลอิสระของอากาศ, kg/m^3

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสามารถแบ่งเป็น สมการการอบแห้งทางทฤษฎี สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการการอบแห้งเอมไพริคัล แต่ละรูปแบบสมการมีรายละเอียดดังนี้

ก. สมการการอบแห้งทางทฤษฎี

ทฤษฎีนี้มักตั้งสมมติฐานว่า การเคลื่อนที่ความชื้นภายในวัสดุเกิดขึ้นโดยการแพร่ (diffusion) ตามกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's Second Law) ซึ่งดำเนินไปแตกต่างกันตามรูปร่างของวัสดุที่กำลังอบแห้ง ทำให้สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (effective diffusion coefficient, D_{eff}) และพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ความชื้น (activation energy for diffusion) โดยการประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส (arrhenius equation) ซึ่งเป็นหลักการของ Newman (1931) สมมติฐานของสมการนี้ อาทิ ค่า D_{eff} นี้ขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุในระหว่างการ

อบแห้ง และมีค่าคงที่ตลอดคาบเวลาการอบแห้ง อัตราการหดตัวของวัสดุในระหว่างการอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดคาบเวลาการอบแห้ง การอบแห้งเป็นแบบมิติเดียว อุณหภูมิในการอบแห้งมีค่าคงที่เป็นต้น (Adedeji *et al.*, 2008) กฎข้อที่สองของ Fick ในสภาวะการแพร่ความชื้นที่ไม่คงที่ เมื่อไม่พิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันไอรวม สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งวัสดุได้ดังนี้ (Kardum *et al.*, 2001; Janjai *et al.*, 2007)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (2.4)$$

เมื่อ ∇^2 คือ Laplace สำหรับเฟสของแข็งที่เคลื่อนที่ของความชื้นในทิศทางหนึ่ง มิติตามทิศทาง x มีค่า ถ้าพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทาง x , y และ z ซึ่งตั้งฉากกันและกัน จะได้ว่า

$$\nabla^2 = \frac{1}{x^s} + \frac{\partial}{\partial x} + \left(x^s \frac{\partial}{\partial x} \right) \quad (2.5)$$

สัมประสิทธิ์ s มีค่าเท่ากับ 0 สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก ๆ (infinite slab) เท่ากับ 1 สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก (cylinder) และเท่ากับ 2 สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม (sphere) (Kardum *et al.*, 2001) ในสมการ (2.4) เมื่อกำหนดภาระเริ่มต้นและภาวะขอบเขต จะได้คำตอบของสมการ (2.4) ดังนี้ (Park, 1998; Kardum *et al.*, 2001; Moyano *et al.*, 2002; Janjai *et al.*, 2007; Adedeji *et al.*, 2008; Chin *et al.*, 2008; Janjai *et al.*, 2008; Gachovska *et al.*, 2008; Vega-Galvez *et al.*, 2008)

- สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม (sphere) ที่มีระยะรัศมีเท่ากับ r_0 ตัวอย่างวัสดุที่มีรูปร่างทรงกลม เช่น ลำไย ลิ้นจี่ องุ่น เมล็ดถั่วเหลือง เป็นต้น

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp + \left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2} \right) \quad (2.6)$$

- สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก (cylinder) ที่มีระยะรัศมีเท่ากับ r ตัวอย่างวัสดุที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เช่น เมล็ดข้าวเปลือก ข้าวสาร พวักพืชเคี้ยวมัน (nuts) ดอกกะหล่ำหั่น เป็นต้น

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 (\alpha_n)^2} \exp \left(-(\alpha_n)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (2.7)$$

- สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งเท่ากับ z ตัวอย่างวัสดุทางการเกษตรที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ เช่น ผลไม้แผ่นกล้วยฉาบ เพื่อฉาบ สหรัยทะเลแผ่น เป็นต้น

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)^2} \exp \left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} \frac{D_{eff} t}{z^2} \right) \quad (2.8)$$

สมการ (2.6) ถึง (2.8) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้ายๆ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นเราอาจตัดเทอมท้ายๆ ออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก ($n = 1$) ซึ่งคำตอบที่ได้ อาจจะไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก จึงสามารถเขียนสมการใหม่สำหรับวัสดุทรงกลม วัสดุทรงกระบอกและวัสดุแผ่นระนาบ ตามลำดับ ได้ดังนี้ (Reyes *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2004; Gachovska *et al.*, 2008; Khazaei *et al.*, 2008; Vega-Galvez *et al.*, 2008)

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{4}{r^2 (\alpha)^2} \exp \left(-(\alpha)^2 \frac{D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (2.10)$$

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{D_{eff} t}{z^2} \right) \quad (2.11)$$

- เมื่อ n = ลำดับที่ของฟังก์ชัน (1, 2, 3,...)
 α_n = สัมประสิทธิ์ค่าฟังก์ชันเบสเซลออกเคอร์ศูนย์ตามลำดับที่ n ของฟังก์ชัน
 D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตรต่อวินาที)
 t = เวลาในการอบแห้ง (นาฬิกา)
 z = ความหนาของวัสดุ (มิลลิเมตร)

เมื่อทราบค่า D_{eff} และค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (activation energy for diffusion, E_a) โดยการประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส แนวคิดนี้คิดค้นครั้งแรกโดย Newman (1931) ซึ่งมีรูปแบบการคือ (Lee and Hsieh, 2008)

$$D_{eff} = D_0 \exp + \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (2.12)$$

- เมื่อ D_0 = ค่าคงที่เทียบเท่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อุณหภูมิอากาศ สูงไม่มีขอบเขต (ตารางเมตรต่อวินาที)
 E_a = พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-โมล องศาเคลวิน (kJ/kmol.K)
 T = อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (องศาเคลวิน)

ข. สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

Lewis (1921) กล่าวว่า พฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุนั้นจะคล้ายคลึงกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) จึงเรียกสมการนี้ว่าแบบจำลองของนิวตันหรือ Exponential Model หรือ Logarithmic Model หรือ Lewis Model (Lee and Hsieh, 2008) ซึ่งเป็นรูปแบบผลเฉลยอย่างง่ายของสมการการแพร่ความชื้นของ Fick ปัจจัยที่ควบคุมการทำแห้งมาจากตัววัสดุ กฎการเย็นตัวของนิวตันมีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$\frac{dT}{dt} = -k_t (T - T_{eq}) \quad (2.13)$$

จากการเทียบเคียงจึงสามารถเขียนสมการซึ่งเกี่ยวกับอัตราการอบแห้งได้ว่า

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -k(\bar{M} - M(eq)) \quad (2.14)$$

แยกสมการและอินทิเกรตโดยใช้ภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขต ดังนี้

$$\begin{aligned} M(r,0) &= M_0 && \text{สำหรับ } r < R \\ M(r,t) &= M(eq) && \text{สำหรับ } t < 0 \end{aligned}$$

จะได้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2.15)$$

ใส่ลอการิทึมธรรมชาติ (ln) ในสมการ (2.15) ทั้งสองข้างจะสามารถหาค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) ได้จากความลาดชันของเส้นกราฟที่พล็อตระหว่าง ln MR กับเวลาในการอบแห้ง (drying time, t) เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันเป็นลบ (ถ้าสมมุติฐานถูกต้อง) และค่าคงที่ k จะมีหน่วยเป็นเวลา⁻¹ ตามค่าหน่วยของ t ค่าคงที่การอบแห้งนี้จะบอกถึงระยะเวลาในการอบแห้ง หาก k มีค่ามากแสดงว่าการอบแห้งใช้เวลาสั้น Amellal and Benamara (2008) กล่าวว่าสมการนี้เหมาะกับวัสดุที่มีความพรุน (porous materials) เช่น อินทผลัมแห้ง เนื้อแครอทแห้ง เป็นต้น

$$\ln MR = -kt \quad (2.16)$$

ค. สมการการอบแห้งเอมไพริคัล

สมการนี้เป็นสมการที่ได้จากการฟิตข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เข้ากับสมการต้นแบบ ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยสมการที่รู้จักกันดีในการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารคือ สมการของ Page (Page's model) ซึ่งถูกพัฒนาในปี ค.ศ. 1949 เป็นสมการเริ่มแรกที่ใช้สำหรับเมล็ดข้าวโพด และพัฒนามาจาก Lewis model (Lee and Hsieh, 2008) ดังนี้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt^N) \quad (2.17)$$

ใส่ลอการิทึมธรรมชาติ (ln) ในสมการ (2.17) ทั้งสองข้าง 2 ครั้ง จะสามารถหาค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) ได้จากเส้นกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(-\ln MR)$ กับ $\ln t$ เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันเป็นบวก (ถ้าสมมุติฐานถูกต้อง) ค่าคงที่ของแบบจำลองของเพจ (Page's model constant หรือค่า N) หาได้จากความลาดชันของเส้นตรง ค่า k คือ จุดที่เส้นกราฟตัดแกนเมื่อ t มีค่าเท่ากับศูนย์นั่นก็คือ ที่ $\log 1$ นั่นเองในการพล็อตกราฟแบบ log-log และจะมีหน่วยเป็น เวลา⁻¹ ตามค่าหน่วยของค่า t ค่าคงที่การอบแห้งนี้จะบอกถึงระยะเวลาในการอบแห้ง หากค่า k มีค่ามากแสดงว่าการอบแห้งใช้เวลาสั้น ส่วนค่าคงที่ N นั้นไม่มีหน่วย แบบจำลองเอมไพริคัลการอบแห้งที่นิยมใช้แสดงในสมการดังต่อไปนี้

สมการ Henderson and Pabis มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$MR = a \exp(-kt) \quad (2.18)$$

สมการ Two – term expontial มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (2.19)$$

2.4.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารมีเนื้อโปร่ง น้ำจะเคลื่อนที่แบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ผ่านเซลล์ในอาหารเนื้อแน่น อาหารเนื้อโปร่งจะแห้งเร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารมีน้ำตาลสูงจะเหนียว กีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจะแห้งช้า อาหารที่ผ่านการลวก นวดคลึง จนเซลล์แตก จะแห้งได้เร็วขึ้น (ชมภู, 2550)

2. ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิว ต่อน้ำหนัก ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่ จึงแห้งได้เร็วกว่า ความหนาของอาหาร อาหารยิ่งหนามากเท่าไร การอบแห้งก็จะใช้เวลานานนอกจากนั้นต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่เคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย (ชมภู, 2550)

3. ตำแหน่งของอาหารในเตา อัตราการอบแห้งภายในตู้เกิดไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับชนิด ประสิทธิภาพ ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อน อาหารที่สัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำ (ลมร้อนมีอุณหภูมิสูง) ระเหยได้ดี (ชมภู, 2550)

4. ปริมาณอาหารต่อพื้นที่ในถาดมีความสัมพันธ์ กับพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับลมร้อน การอบแห้งอาหารโดยใส่อาหารเข้าไปในตู้อบครั้งละมากๆ ทำให้การอบแห้งไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะช่วงกลางๆ อาหารจะซ้อนทับกัน น้ำจะระเหยออกได้ไม่ดี อาหารจะสัมผัสกับอากาศร้อนไม่ทั่วถึง ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนได้จึงทำให้อาหารแห้งช้า การจัดเรียงอาหารเพื่อนำไปอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง การจัดเรียงอาหารให้แผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่ซ้อนทับกัน อาหารจะสัมผัสกับลมร้อนได้อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ อาหารจะแห้งได้อย่างทั่วถึง (ชมภู, 2550)

5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับอาหารมีผลต่อแรงขับเคลื่อนความชื้นออกจากอาหาร ในการอบแห้งลมร้อนยังมีความชื้นต่ำ อัตราการอบแห้งยิ่งสูง แต่ถ้าลมร้อนมีความชื้นเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (น้ำเยอะ) จะรับไอน้ำได้น้อย อัตราการอบแห้งจะต่ำ ความชื้นของอากาศจะเป็นตัวกำหนดว่าจะสามารถลดความชื้นของอาหารในกระบวนการอบแห้งให้ต่ำเท่าไร อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากจะรับไอน้ำเพิ่มได้น้อย ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนจะเป็นตัวกำหนดความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ที่อาหารและอากาศร้อนถึงจุดสมดุล การระเหยน้ำจะไม่เกิดขึ้นอีก (ชมภู, 2550)

6. อุณหภูมิของอากาศ เพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ เป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ เพิ่มแรงขับเคลื่อนน้ำหรือความชื้นออกจากผิวหน้าอาหาร ถ้าใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่สูงจนทำให้อาหารไหม้ หรือเกิดความเสียหายจากปฏิกิริยาทางเคมี หรือกายภาพ การกำหนดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ขึ้นกับลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนและระยะเวลาในการอบแห้ง การอบแห้งผักและผลไม้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45-70 องศาเซลเซียส ถ้าสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยเร็วเกินไป อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงซ้อนทางเคมี กายภาพที่ผิวหน้า ผิวหน้าเกิดเปลือกแห้งแข็งกระด้าง น้ำซึมผ่านไม่ได้ เรียกว่า case hardening อัตราการอบแห้งลดต่ำลง ผลิตภัณฑ์มีความชื้นอยู่ภายในสูง เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้จะเกิดการเน่าเสีย เกิดสีคล้ำ (ชมภู, 2550)

7. ความเร็วของลมร้อนในการอบแห้งลมร้อนให้กับอาหารพาความชื้นออกไป ถ้าใช้ความเร็วลมสูงก็จะพาไอน้ำจากผิวหน้าของอาหารสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น และยังช่วยป้องกันการเกิดสภาวะอึดตัวในบรรยากาศเหนือผิวของอาหาร ช่วยลดเวลาในช่วงการอบแห้งคงที่ (ชมภู, 2550)

2.5 พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานปฐมภูมิ (primary energy source) และเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่สุดของชีวิต ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซร้อนรูปทรงกลมที่มีความหนาแน่นสูงประมาณ 100 เท่าของความหนาแน่นน้ำ ดวงอาทิตย์เปรียบเสมือนวัตถุดำ (black body) ที่มีอุณหภูมิสูง 5,777 K พลังงานที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ เป็นผลจากปฏิกิริยาเทอร์โม-นิวเคลียร์ และทำให้มวลของดวงอาทิตย์ลดลงในอัตราประมาณ 4×10^9 กิโลกรัมต่อวินาที มีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่างๆ ในอัตรา 3.85×10^{23} กิโลวัตต์ จากปริมาณกำลังงานที่ปล่อยมา มีกำลังงานตกกระทบโลกในอัตรา 1.79×10^4 กิโลวัตต์ และพลังงานที่แผ่ออกมาจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2555)

พลังงานจากดวงอาทิตย์มีหลายรูปแบบแต่เป็นที่รู้จักกันมากได้แก่ แสง และความร้อน รังสีแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ตลอดปีเป็นค่าความเข้มในรูปของพลังงานต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร รังสีแสงอาทิตย์มีค่า 380 ล้านล้านเมกะวัตต์ เมื่อผ่านบรรยากาศมาถึงโลกจะเหลือเพียง 170 ล้านเมกะวัตต์ (จิตร, 2524) ช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้ความร้อนได้แก่ อินฟราเรด มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.8–200 ไมโครเมตร เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเลต แต่สั้นกว่าช่วงความยาวคลื่นของวิทยุและโทรทัศน์ บรรยากาศของโลกประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด หยดน้ำและอนุภาคของแข็ง ซึ่งกันแสงแดดที่แผ่เข้ามายังพื้นผิวโลก ส่วนหนึ่งของแสงแดดจะถูกสะท้อนกลับสู่อวกาศนอกโลกทันที ขณะที่ส่วนที่สามารถผ่านชั้นบรรยากาศเข้ามาในโลกได้ก็จะถูกดูดซับ แพร่หรือสะท้อนกลับโดยชั้นวัตถุ

การแผ่ความร้อนของดวงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของการแผ่รังสี โดยจะแผ่รังสีผ่านชั้นบรรยากาศ และแผ่รังสีลงสู่พื้นโลกอีกครั้งหนึ่ง การแผ่รังสีนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. การแผ่รังสีโดยตรง (beam or direct radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และตกลงผิวรับแสง มีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่งซึ่งทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์
2. รังสีกระจาย (diffuse radiation) คือรังสีดวงอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลก และวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในแนวทางเดินของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสงรังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางของท้องฟ้า
3. รังสีรวม (total or global radiation) คือผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบผิวรับแสง ในกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นเอียงรังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้ารังสีกระจายจากท้องฟ้า และผิวโลกเรียกรังสีรวมนี้ว่า total radiation (จงจิตร, 2540)

ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผ่ลงมายังโลกนั้น ยังขึ้นกับระยะห่างจากโลกกับดวงอาทิตย์และขึ้นอยู่กับมุมเอียงของโลก

ปัจจัยที่มีผลต่อการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์บนพื้นโลก

1. ความโปร่งใสของบรรยากาศ เนื่องจากบรรยากาศประกอบด้วยฝุ่น เมฆ ไอน้ำ แก๊ส ซึ่งมีส่วนในการกระจาย การสะท้อน และการดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ (วิจิตร, 2524)
2. ความยาวนานของเวลากลางวัน มีค่าแตกต่างกันตามฤดู ถ้าเป็นช่วงที่มีระยะเวลากลางวันยาวนานจะได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์มาก (วิจิตร, 2524)
3. มุมของแสงอาทิตย์ที่ส่องกระทบบนพื้นโลก ในตอนเที่ยงวันค่าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีมากที่สุดเพราะส่องกระทบเป็นมุมฉาก ในตอนเช้า และเย็นแสงอาทิตย์จะส่องเป็นมุมเอียง ดังนั้นค่าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีน้อย (วิจิตร, 2524)

2.6 การตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีมานานแล้ว และในปัจจุบันก็ยังเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เวลาที่ใช้ในการตากแห้งขึ้นอยู่กับชนิด และความชื้นของผลิตภัณฑ์ ความหนาของชั้นตากแห้ง และสภาวะอากาศ การอบแห้งด้วยแสงแดดจะเสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อเสียคือคุณค่าทางอาหารบางอย่าง เช่น สี กลิ่น รส อาจสูญเสียไป เกิดการปนเปื้อนจากฝุ่น แมลงต่างๆ และจุลินทรีย์ (ครุณี, 2532) นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารเน่าเสียในระหว่างการตากแดดเกิดขึ้น เนื่องจากมีแมลงมาไข่ทิ้งไว้แล้วเกิดเป็นตัวอ่อน ในบางครั้งเกษตรกรประสบปัญหาผลิตภัณฑ์ขึ้น และไม่สามารถทำได้ทันเวลา ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย เช่น มีเชื้อราและสารพิษสูงเกินมาตรฐาน เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงวิธีการตากแห้งโดยใช้แสงแดด โดยอาศัยหลักการของวัตถุดิบที่สามารถดูดและเก็บความร้อนได้ดีมาก การอบในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลา น้อยเพราะอุณหภูมิภายในตู้อบสูง เมื่อแห้งเร็วก็จะเป็นการป้องกันการเจริญเติบโตของพวก จุลินทรีย์ได้ดี คือไม่เกิดการเน่าเสียในระหว่างการตาก ไม่มีการปนเปื้อนจากฝุ่น แมลง นก แม้ว่าจะมีแมลงไข่ หรือแมลงเล็ดรอดเข้าไปก็ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ จึงสะอาดและสะดวกกว่าโดยไม่จำเป็นต้องเก็บเมื่อฝนตกเป็นการประหยัดแรงงาน และประหยัดเชื้อเพลิง หรือไฟฟ้าด้วย

2.7 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ซึ่งอาศัยการพาความร้อน โดยที่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะเสียต้นทุนด้านพลังงานน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ (ครุณี, 2532) นภกรณ์ (2547) ได้ศึกษาการอบแห้งเปปเปอร์มินต์ ยูเอสเอมินต์ และเลมอน-ไทม์ ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะเครื่องเป็นแบบพาความร้อนเข้าสู่ห้องอบ ทำ

การอบแห้งด้วยความเร็วลม 1.5 และ 1.8 เมตรต่อวินาที โดยใช้พืชสมุนไพร 2,068 และ 2,585 กรัม ต่อตารางเมตร คุณภาพหลังการอบพืชสมุนไพรที่ทำการตรวจวัดคือค่า สี ปริมาณน้ำมันหอมระเหย ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา ปริมาณโคลิฟอร์ม และ *Escherichia coli* จากการทดลองพบว่าความเร็วลมไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยูเอสเอ็มเอ็นท์ และเลมอนไทม์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่จะมีผลต่อเวลาในการอบแห้งเปปเปอร์มินท์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) นอกจากนั้นความเร็วลมยังมีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของพืชสมุนไพรทั้ง 3 ชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) จากการเปรียบเทียบคุณภาพหลังการอบของพืชสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด โดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน พบว่าคุณภาพหลังการอบด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ด้อยไปกว่าคุณภาพหลังการอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุนเป็น 2.35, 83.48 และ 15.45 บาทต่อ 1,800 กรัม ตามลำดับ

2.7.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบ่งตามแบบการไหลของกระแสอากาศเป็น 2 แบบ คือ

1. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับ (force convection solar dryer) เครื่องอบแห้งนี้จะใช้พัดลมเป็นตัวขับเคลื่อนอากาศให้ไหลภายในเครื่องอบแห้ง เนื่องจากการสร้างความดันให้เท่ากับความแตกต่างของความดันรวมระหว่างทางเข้าและทางออก เหมาะสมกับการอบแห้งขนาดเล็กและใหญ่ซึ่งขนาดใหญ่จะสร้างยากกว่า แต่สามารถออกแบบให้การทำงานมีประสิทธิภาพ และมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างมาก ถ้าต้องการอบแห้งจำนวนมากๆ ควรใช้พัดลมในการขับเคลื่อนอากาศทำให้การหมุนเวียนอากาศเป็นไปได้ด้วยดี ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ใช้พัดลม หรือ free convection dryer (จารุวัฒน์, 2555)

2. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ (force convection dryer) เครื่องอบแห้งชนิดนี้อาศัยหลักการขยายตัวของอากาศภายนอก ซึ่งมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ทำให้การหมุนเวียนเพื่อช่วยถ่ายเทอากาศขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการอบแห้งขนาดเล็กที่ต้องการลงทุนต่ำ เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศขึ้นกับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ (จารุวัฒน์, 2555)

2.7.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบ่งตามลักษณะการรับพลังงานความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง ประกอบกับลักษณะการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งประเภทได้เป็นลักษณะ ดังนี้

1. แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct mode solar dryer) เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะใช้วัสดุทำเป็นหลังคา รังสีดวงอาทิตย์จะทะลุผ่านไปยังวัสดุโดยตรง การระเหยน้ำออกจากตัววัสดุเกิดขึ้นเพราะความร้อน เช่น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง (จารุวัฒน์, 2555)

2. แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode solar dryer) เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบด้วย ตัวทำความร้อนด้วยรังสีดวงอาทิตย์ (solar air heater) พัดลม (fan) โบลว์เวอร์ (blower) และห้องอบแห้ง (drying chamber) รังสีดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนโดยตัวทำอากาศร้อนก่อนแล้วจึงส่งไปยังวัสดุ โดยมีอากาศเป็นตัวกลาง เช่น เครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบถังเก็บ (จารุวัฒน์, 2555)

3. แบบรับรังสีแสงอาทิตย์แบบผสม (mixed mode solar dryer) เครื่องอบประเภทนี้เกิดจากการพัฒนาโดยเอาสองแบบแรกมารวมกัน วัสดุจะได้รับความร้อนสองส่วนคือ ได้รับความร้อนจากการถูกแสงโดยตรงและได้จากอากาศร้อนที่มาจากตัวทำอากาศร้อน (จารุวัฒน์, 2555)

2.7.3 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ปัจจุบันมีการยอมรับใช้งาน 3 ลักษณะ คือ

1. การอบแห้งระบบ passive คือ ระบบที่เครื่องอบแห้งทำงานโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์และกระแสลมที่พัดผ่าน ซึ่งจารุวัฒน์ (2555) ได้กล่าวว่ามี 3 ระบบได้แก่

ก. เครื่องตากแห้งโดยธรรมชาติ เป็นการวางวัสดุไว้ที่กลางแจ้ง อาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์และกระแสลมในบรรยากาศในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ

ข. ตู้อบแห้งแบบได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง วัสดุที่อบจะอยู่ในเครื่องอบแห้งที่ประกอบด้วยวัสดุที่โปร่งใส ความร้อนที่ใส่อบแห้งได้มาจากการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ และอาศัยหลักการขยายตัวของอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้งทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศเพื่อช่วยถ่ายเทอากาศชื้น

ค. ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม เครื่องอบแห้งชนิดนี้วัสดุที่อยู่ภายในจะได้รับความร้อน 2 ทาง คือทางตรงจากดวงอาทิตย์และทางอ้อมจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้อากาศร้อนก่อนที่จะผ่านวัสดุอบแห้ง

2. การอบแห้งระบบ active คือ ระบบอบแห้งที่มีเครื่องช่วยให้อากาศไหลเวียนในทิศทางที่ต้องการ เช่น จะมีพัดลมติดตั้งในระบบเพื่อบังคับให้มีการไหลของอากาศผ่านระบบ

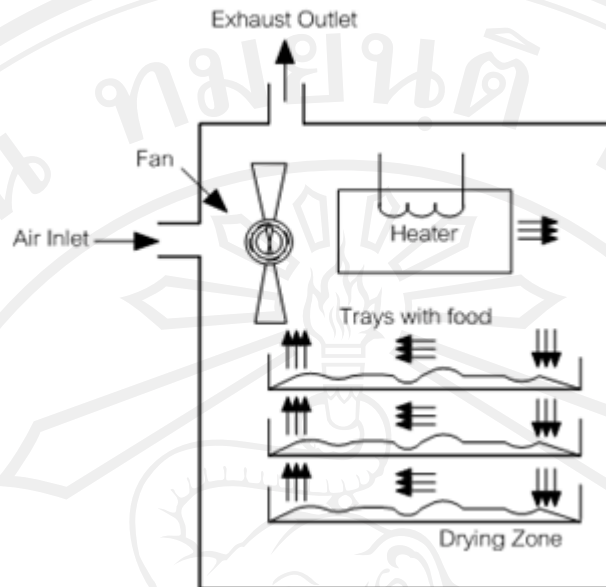
พัดลมจะดูดอากาศจากภายนอกให้ไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์ เพื่อรับความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ อากาศร้อนที่ไหลผ่านพัดลมและห้องอบแห้งจะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นของพืชผล จึงพาความชื้นจากพืชผลออกสู่ภายนอกทำให้พืชผลที่อบไว้แห้งได้ (จารุวัฒน์, 2555)

3. การอบแห้งระบบ hybrid คือ ระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และยังต้องอาศัยพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ช่วยในเวลาที่มิมีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอหรือต้องการให้ผลิตผลทางการเกษตรแห้งเร็วขึ้น เช่น ใช้ร่วมกับพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวมวล พลังงานไฟฟ้า วัสดุอบแห้งจะได้รับความร้อนจากอากาศร้อนที่ผ่านเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ และการหมุนเวียนของอากาศจะอาศัยพัดลมหรือเครื่องดูดอากาศช่วย (จารุวัฒน์, 2555)

2.8 การอบแห้งแบบถาด (tray drying)

การอบแห้งแบบถาดเป็นการอบแห้งโดยใช้กระแสนลมร้อนเคลื่อนที่สัมผัสกับอาหาร โดยอาหารอาจจะอยู่กับที่หรือมีการเคลื่อนที่ด้วย (สุคนธ์ชื่น และวรรณวิบูลย์, 2543) ซึ่งเครื่องอบแห้งนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเนื่องจากการทำแห้งแบบตากแดดมีข้อด้อยหลายข้อ เช่น พลังความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้อุณหภูมิที่ไม่สูงนักและกระแสนลมธรรมชาติไม่แรงพอ ทำให้ใช้เวลานานใช้พื้นที่มากและมักทำในที่เปิดโล่ง คุณค่าทางอาหารบางอย่าง เช่น สี กลิ่น รส อาจสูญเสียไป เกิดการปนเปื้อนจากฝุ่น แมลงต่างๆ และจุลินทรีย์ (ครุณี, 2532)

เครื่องอบแห้งแบบถาดเป็นเครื่องมือทำแห้งลมร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทำงานที่ความดันบรรยากาศ ลักษณะของเครื่องมือจะเป็นตู้บุนนวน มีถาดสำหรับใส่อาหาร มีระบบท่อหรือแบบเฟิลเพื่อนำความร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดเพื่อให้ลมร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องนำความร้อนเพิ่มขึ้นด้านบนหรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการทำแห้ง (วิไล, 2546) ส่วนปัญหาเครื่องอบแห้งที่พบ คือ ควบคุมดูแลยากจึงมีการอบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายลมไม่ทั่วถึง มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่อยู่บริเวณทางเข้าของลมมีลักษณะแห้งกว่าด้านทางออกของลม ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่มีความสม่ำเสมอกัน สามารถแก้ไขได้โดยสลับถาดหรือกลับทิศทางลม (ไพบุลย์, 2532) โดยลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบถาดทั่วไปแสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบถาดทั่วไป
ที่มา: ไพบุญย์ (2532)

2.9 การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ

การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ มีหลักการเดียวกันกับการให้ความร้อนในระบบไมโครเวฟทุกประการ แต่แตกต่างกันที่ระยะเวลาที่ใช้ เพราะในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น มีการใช้ความดันเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ระยะเวลาที่ใช้สั้นกว่าการใช้ไมโครเวฟแบบธรรมดา (ไพบุญย์, 2529)

คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเหมือนลำแสงเดินทางเป็นเส้นตรง เมื่อกระทบโลหะจะสะท้อนกลับแต่สามารถทะลุผ่านอากาศ แก้ว กระจก และพลาสติกได้ จะถูกดูดซับได้ดีในสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริก เมื่อคลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับจะไม่เกิดความร้อนกับวัตถุนั้น แต่ถ้าสารสามารถดูดซับไมโครเวฟได้จะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในสาร โดยเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า องค์ประกอบของอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาหารทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริก แต่การดูดซับไมโครเวฟได้แตกต่างกันไปนั้นขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีอาหาร พบว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมี กลือแร่ และรูปแบบน้ำของอาหารมีความสำคัญต่อการดูดซับคลื่นไมโครเวฟด้วย น้ำอิสระจะดูดซับน้ำได้ดีกว่าน้ำที่เกาะกับสารประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ส่วนปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของอาหาร อุณหภูมิและระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ สำหรับอาหารแห้ง อาหารที่มีไขมันและน้ำสูงจะดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่า

การอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยความร้อนที่ได้มาจากคลื่นไมโครเวฟ เมื่อคลื่นพุ่งเข้าสู่อาหารด้านในจะถูกคลื่นไว้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นการลดความร้อนที่เป็นความร้อนสัมผัส ทำให้อาหารทั้งด้านนอกและด้านในได้รับคลื่นความร้อนเท่ากัน จึงไม่ทำให้อาหารเกิดการไหม้เกรียม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีสีสวย สดงามและคงคุณค่าทางอาหารเหมือนเดิม นอกจากนี้การทำแห้งจะทำให้ทุกสภาวะโดยไม่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความสะอาดถูกสุขลักษณะ (ไพบูลย์, 2529)

2.9.1 ระบบการทำงาน

เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน เป็นการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศ ซึ่งมีส่วนประกอบของเครื่องที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ถังอบไมโครเวฟ มีลักษณะเป็นห้องอบแห้งทรงกระบอก และมีท่อนำคลื่นไมโครเวฟต่ออยู่ด้านข้างของผนังถัง เพื่อนำคลื่นไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิด (แมกนีตรอน) มาสู่บริเวณภายในห้องอบที่มีถังหมุน ซึ่งเป็นส่วนที่ใส่วัตถุดิบที่ต้องการอบแห้ง โดยได้มีการออกแบบให้มีใบกวาดเป็นครีบอกอยู่ภายใน ทำหน้าที่พาผลิตภัณฑ์ขึ้นไปแล้วปล่อยให้ตกลงมาอย่างอิสระ ทำให้อุณหภูมิได้รับพลังงานไมโครเวฟอย่างทั่วถึง และไอน้ำที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์สามารถเคลื่อนที่ออกไปได้สะดวก ทำให้การอบแห้งใช้เวลาสั้น

2. เครื่องดักจับไอน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดปริมาณของไอน้ำก่อนเข้าปั๊มสุญญากาศ เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำเมื่อปริมาณของน้ำที่กลายเป็นไอจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นหลายเท่า ทำให้อุปกรณ์ปั๊มสุญญากาศไม่สามารถที่จะดูดอากาศออกได้ทันกับปริมาณไอน้ำที่ขยายตัวในถังอบ จึงทำให้ความสามารถในการดูดอากาศลดลงมา ส่งผลให้ความดันที่เป็นสุญญากาศลดลง นอกจากนั้นยังทำให้ไอน้ำเกิดการกลั่นตัวภายในถังอบ และการอบแห้งไม่สามารถทำงานต่อได้หรือทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งเปลี่ยนสภาพไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องดักจับไอน้ำ เพื่อให้ปั๊มสุญญากาศทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพตลอดช่วงเวลารอบแห้ง

3. ปั๊มสุญญากาศ เครื่องปั๊มสุญญากาศเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ดูดอากาศทำให้เกิดสภาพสุญญากาศภายในถังอบ อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศก็ยังมีข้อจำกัดอย่างหนึ่งคือ มีการใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูง หากมีการใช้ระบบที่ผสมผสานกันระหว่างการอบแห้งวิธีดั้งเดิมที่ใช้ระบบลมร้อน สำหรับใช้ในการกำจัดความชื้นที่ระเหยได้ง่ายออกไป ตามด้วยการอบแห้งด้วยระบบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ สำหรับกำจัดความชื้นที่ระเหยได้ยากออกไปในขั้นตอนสุดท้ายของการอบแห้ง อาจช่วยลดต้นทุนได้มากกว่าการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟแบบสุญญากาศเพียงอย่างเดียว

ซึ่งผลิตภัณฑ์และต้นทุนของแหล่งพลังงานก็เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณา เนื่องจากมีผลต่อการเลือกกระบวนการในการทำแห้ง และต้องมีการพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งต้องมีคุณภาพสูงและเป็นที่ต้องการในท้องตลาด

2.10 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการอบแห้ง

การอบแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอาหารซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอาหาร และสถานะที่ใช้ในการอบแห้ง (ชมภู, 2550) คือ

2.10.1 การหดตัว

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยธรรมชาติจะมีลักษณะเต่ง พลังเซลล์มีความยืดหยุ่นสามารถต้านทานแรงได้ระดับหนึ่ง ถ้าแรงที่ได้รับมากเกินไปกว่าที่ผนังเซลล์จะรับได้ผนังเซลล์จะแตก เซลล์ผิดรูปไปในการอบแห้งเมื่อน้ำระเหยไปจะเกิดช่องว่างขึ้นทำให้เซลล์ของอาหารซึ่งเชื่อมโยงติดกันถูกดึงให้เข้าไปแทนที่ช่องว่างนั้น เซลล์หดตัวแต่ไม่สามารถหดตัวเข้าไปได้เท่าๆ กันทุกส่วน ส่วนที่หดตัวไม่ได้ก็จะเกิดการยืดตัวออกทำให้เกิดแรงดึง พลังเซลล์ทนต่อแรงดึงได้ระดับหนึ่ง ถ้าแรงที่ได้รับมากเกินไปกว่าที่ผนังเซลล์จะรับได้ทำให้เกิดการฉีกขาด ซึ่งมักเกิดกับอาหารที่มีโครงสร้างแข็งแรงหรือการอบแห้งที่เร็วเกินไป ถ้าทำการอบแห้งอย่างรวดเร็วโดยใช้อุณหภูมิสูง ผิวหน้าจะแห้งแข็งก่อนที่อาหารส่วนที่อยู่ใจกลางจะแห้ง ดังนั้นเมื่อบริเวณใจกลางแห้งและหดตัวจะดึงส่วนผิวหน้าทำให้เกิดการปริแตกภายในเกิดช่องว่าง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแข็ง มีผิวหน้าที่โค้งเล็กน้อย มีลักษณะเหี่ยวมากกว่า มีช่องว่างมากกว่า ถ้าอบอย่างช้าๆ จะมีผิวหน้าที่โค้งมากกว่า มีเนื้อแน่น การเสียน้ำทำให้เซลล์ของอาหารเกิดการหดตัวจากผิวนอก ส่วนที่แข็งจะคงสภาพส่วนที่อ่อนจะเหี่ยวลงไป อาหารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่มากจะหดตัวบิดเบี้ยวมาก การทำแห้งอย่างรวดเร็วอาหารจะหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งอย่างช้าๆ (ชมภู, 2550)

2.10.2 การเปลี่ยนสี

สีของอาหารหลังการอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการอบแห้งทำให้ลักษณะผิวหน้าของอาหารเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการสะท้อนแสง สีเปลี่ยน และยังมีผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของรงควัตถุ คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง อาหารที่ผ่านการทำแห้งจะมีสีเข้มขึ้น เนื่องจากความร้อน ปฏิกิริยาทางเคมี เกิดสารสีน้ำตาล อุณหภูมิ และความชื้นของอาหาร (ชมภู, 2550)

2.10.3 การเกิดเปลือกแข็ง

อาหารจะมีเปลือกแข็งหุ้มส่วนในที่ยังไม่แห้งไว้ ซึ่งเกิดจากในช่วงแรกที่ทำให้น้ำระเหยเร็วเกินไป น้ำจากด้านในของอาหารเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทันหรือมีสารละลายน้ำตาล โปรตีน เคลื่อนที่มาแข็งตัวที่ผิว สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยไม่ใช้อุณหภูมิสูงในการทำแห้ง (ชมภู, 2550)

2.10.4 การเสียความสามารถในการคืนรูป (rehydration)

อาหารแห้งบางชนิดต้องนำกลับมาคืนสภาพโดยการแช่น้ำ จะคืนน้ำกลับคืนได้ไม่ถึงร้อยละ 100 และใช้เวลานาน ผลกระทบที่อาหารหลังคืนสภาพจะมีเนื้อเหนียว สูญเสียความนุ่ม ความฉ่ำน้ำ ความกรอบ อาจมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหดตัว การบิดเบี้ยว การฉีกขาดของเซลล์ เซลล์อาหารจะเสียความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ โปรตีนเสียสภาพในการคืนน้ำ อัตราการคืนรูปอาจใช้เป็นดัชนีชี้คุณภาพของอาหาร อาหารถูกทำแห้งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะเสียหายน้อย คืนรูปได้เร็วและสมบูรณ์กว่าอาหารที่ทำแห้งไม่เหมาะสม อาหารทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็งจะมีความสามารถในการคืนสภาพดีที่สุด เพราะไม่ได้ใช้ความร้อนในการทำลายผนังเซลล์ หรือเปลี่ยนโครงสร้างของสตาร์ชโปรตีน (ชมภู, 2550)

2.10.5 การเสียคุณค่าทางอาหารและสารระเหย

คุณค่าทางอาหารที่เหลืออยู่ในอาหารแห้งมีความแตกต่างกันเป็นผลมาจากวิธีการเตรียมอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำแห้ง สภาวะในการเก็บรักษา มีการเสื่อมสลายของวิตามินซี แคโรทีน เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสลายไรโบฟลาวินจากแสง ส่วนไทอะมิน โปรตีน เกิดจากความร้อน เมื่อใช้เวลานานในการทำแห้งนานการสูญเสียก็จะยิ่งมาก การสูญเสียสารระเหยเนื่องจากความร้อนทำให้กลิ่นหอม กลิ่นรสของอาหารแห้งลดน้อยลงจากเดิม สารระเหยจะสูญเสียไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในอาหาร และความดันไอของสารละลาย (ชมภู, 2550)

2.11 ประโยชน์ของการทำแห้ง

รุ่งนภา (2535) ได้กล่าวว่าประโยชน์ของการทำแห้งมีดังต่อไปนี้

2.11.1 ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี การผลิตเอนไซม์ การเน่าเสียที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์

2.11.2 ทำให้มีผลิตภัณฑ์ไว้ใช้อุปโภคบริโภคในยามขาดแคลน นอกฤดูการผลิตหรือในแหล่ง

ห่างไกล

2.11.3 ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่ต้องใช้ตู้เย็นให้เปลืองค่าใช้จ่าย

2.11.4 เป็นการลดน้ำหนักอาหาร ขนาดของอาหาร ทำให้สะดวกในการบรรจุ การเก็บรักษา การขนส่ง ลดพื้นที่ และค่าใช้จ่าย

2.11.5 เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์อาหารชนิดใหม่ที่มีลักษณะ กลิ่นรสเฉพาะ เช่น ลูกเกด ซึ่งได้จากการทำแห้งองุ่น ลูกพรุน หมูแผ่น หมูหยอง กุนเชียง เป็นต้น

2.11.6 เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้อุปโภคบริโภค เช่น ชา โกโก้ กาแฟผงสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้องผ่านกระบวนการหมัก ต้ม บด มาก่อนการอบแห้ง ผู้บริโภคเพียงนำมาเติมน้ำร้อน ก็สามารถบริโภคได้ทันที

2.12 ข้อดีและข้อเสียของการทำให้อาหารแห้ง

รุ่งนภา (2535) ได้กล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของการทำให้อาหารแห้งไว้ดังนี้

2.12.1 ข้อดีของการทำให้อาหารแห้ง

1. น้ำหนักเบา การทำแห้งสามารถลดน้ำหนักลงได้ร้อยละ 60-90 ของอาหารสด ยกเว้นธัญพืชประกอบด้วยน้ำ และน้ำส่วนนี้เองจะถูกกำจัดออกโดยกระบวนการอบแห้งหรือตากแห้ง (รุ่งนภา, 2535)
2. มีความกระชับ คือ ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งต้องการเนื้อที่น้อยกว่าของอาหารสด อาหารแช่เยือกแข็ง หรืออาหารกระป๋อง โดยเฉพาะถ้าสามารถจัดเก็บในภาชนะบรรจุได้ (รุ่งนภา, 2535)
3. ความคงตัวที่สภาวะการเก็บ ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งไม่จำเป็นต้องใช้ตู้เย็นในการเก็บรักษา แต่มีข้อจำกัดของอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อให้ได้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น (รุ่งนภา, 2535)

2.12.2 ข้อเสียของการทำให้อาหารแห้ง

1. ความไวต่อความร้อน เนื่องจากอาหารส่วนมากมีความไวต่อความร้อนในระดับหนึ่ง อาจทำให้เกิดกลิ่นรสไหม้ขึ้นได้ ถ้าควบคุมสภาวะไม่เหมาะสม
2. เกิดการสูญเสียกลิ่นรส สารระเหยที่ระเหยได้ และเกิดการเปลี่ยนสี
3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงการเกิดการแห้งกรอบอันเนื่องมาจากการหดตัว
4. เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เกิดจากเอนไซม์ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ยังเกิดการหืนของไขมัน

5. เกิดการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ได้ ถ้าหากอัตราการอบแห้งเริ่มต้นช้า ปริมาณความชื้นสุดท้ายมีค่าสูง หรือเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง (รุ่งนภา, 2535)

2.13 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

2.13.1 สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)

สารประกอบฟีนอลิกมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นวงแหวน (aromatic ring) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เข้ามาแทนที่ซึ่งอาจเข้ามาแทนที่ 1 หมู่หรือมากกว่า สารประกอบฟีนอลิกสามารถจำแนกเป็นกลุ่มได้จากโครงสร้างที่แตกต่างกันได้แก่ จำนวนคาร์บอน และหมู่ที่เข้ามาแทนที่ในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งมีการจำแนกชนิดของสารประกอบฟีนอลิกแล้วมากกว่า 8,000 ชนิด (Kris-Etherton *et al.*, 2002) โดยจำแนกเป็นกลุ่มๆ ได้แก่ กรดฟีนอลิก (phenolic acids) ลิกนิน (lignin) กรดไฮดรอกซีซินนามิกและอนุพันธ์ (hydroxycinnamic acid and derivatives) และฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เป็นต้น สารประกอบฟีนอลิกแต่ละกลุ่มที่มีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันจะพบได้ในผักหรือผลไม้ต่างชนิดกัน สารประกอบฟีนอลิกสามารถเป็นได้ทั้งสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล และเป็นสารต้านออกซิเดชัน โดยจะทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันเมื่อมีอยู่ในปริมาณน้อย และหากมีอยู่ในปริมาณที่มากจะไวต่อการเกิดออกซิเดชัน โดยจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล สารประกอบฟีนอลิกจะทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันได้ดีทั้งในระบบอาหารและในร่างกาย ในขณะที่จะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในระบบอาหารหรือในเซลล์พืชเท่านั้น (Robards *et al.*, 1999)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารต้านออกซิเดชันตามธรรมชาติที่มีความสำคัญมากที่สุด โดยมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันทั้งในระบบอาหาร และในร่างกายมนุษย์ (Robards *et al.*, 1999) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันขึ้นกับโครงสร้างของสาร เช่น กรดฟีนอลิกมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันน้อยกว่าฟลาโวนอยด์ เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลมาแทนที่น้อยกว่าฟลาโวนอยด์ สารประกอบฟีนอลิกทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันได้หลายแบบ เช่น กำจัดอนุมูลอิสระ กำจัดไอออนของเหล็ก และกำจัดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

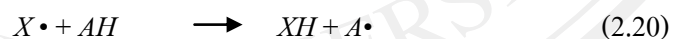
2.13.2 สารต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) หมายถึง สารที่ไปทำหน้าที่ลดหรือยับยั้งปฏิกิริยาที่จะก่อให้เกิดออกซิเจนหรือสารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) หรืออีกความหมายหนึ่ง คือ สารในอาหารที่มีผลในการลด reactive oxygen species (ROS) หรือ reactive nitrogen species

(RNS) ในร่างกาย (Huang *et al.*, 2005) โดยอนุมูลอิสระมีหลายประเภท ได้แก่ อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide radical, $O_2^{\cdot-}$) ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, $HO^{\cdot}$) กรดไฮโปคลอรัส (hypochlorous acid, $HOCl$) อนุมูลเพอร์ออกไซด์ (peroxyl radical, $ROO^{\cdot}$) ซิงเกิลตออกซิเจน (singlet oxygen, 1O_2) และเพอร์ออกไซด์ไนไตรท์ (peroxyl nitrite, $ONOO^-$) (Sanchez-Moreno, 2002) หลักการของวิธีการวัดกิจกรรมของการต้านออกซิเดชัน (Huang *et al.*, 2005) มีดังนี้

1. วิธีการวัดการแลกเปลี่ยนอะตอมไฮโดรเจน [(based on hydrogen atom transfer (HAT) reaction)]

วิธีการนี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันระหว่างสารต้านออกซิเดชันกับสารตั้งต้นของปฏิกิริยา โดยจะมีการกระตุ้นสารประกอบอะโซ (azo compounds) ด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดการสลายตัวกลายเป็นอนุมูลเพอร์ออกไซด์ เพื่อเป็นตัวแทนอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ วิธีการในกลุ่มนี้ได้แก่ oxygen radical absorbance capacity (ORAC) assay และ total radical trapping antioxidant parameter (TRAP) assay มีกลไกดังแสดงในสมการที่ 2.20 ซึ่งวิธีการกลุ่มนี้จะวัดปริมาณอะตอมไฮโดรเจนที่มีการแลกเปลี่ยน โดยจะวัดการเรืองแสงของสารฟลูออเรสเซนต์ที่ลดลงเมื่อเกิดการออกซิเดชัน เมื่อระบบมีสารต้านออกซิเดชัน สารต้านออกซิเดชันจะไปแย่งจับสารเรืองแสง ส่งผลให้ความเข้มสารฟลูออเรสเซนต์ลดลงด้วยความเร็วที่ช้าลง ส่วนกลไกในการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันแสดงในสมการที่ 2.21-2.28 (Huang *et al.*, 2005)



เมื่อ $X^{\cdot}$ = สารประกอบต่างๆ

AH = สารต้านออกซิเดชัน

Initiation



Propagation



Inhibition



Termination



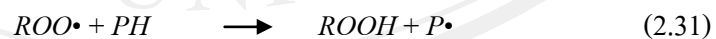
เมื่อ R_2N_2 = สารประกอบอะโซ (azo compound)

$ROO\bullet$ = อนุมูลเพอร์ออกซิล (peroxyl radical)

LH = สารตั้งต้น (substrate)

AH = สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant)

วิธีการวิเคราะห์ในกลุ่มนี้ได้แก่ ORAC และ TRAP จำเป็นต้องใช้สารตัวแทนเพื่อเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา (probes or substrates) โดยสารต้านออกซิเดชันจะแย่งกันทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น ในระบบการทดลองจะประกอบด้วยสารกลุ่มอะโซเพื่อผลิตอนุมูลอิสระ (AAPH) probes เพื่อติดตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (สารฟลูออเรสซิน) และสารต้านออกซิเดชันโดย AAPH จะถูกให้ความร้อนเพื่อสร้างอนุมูลเพอร์ออกซิล เมื่อใส่ฟลูออเรสซินและสารต้านออกซิเดชันแล้ว จะเกิดการแย่งกันทำปฏิกิริยากับอนุมูลเพอร์ออกซิล โดยสารต้านออกซิเดชันจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เมื่อสารต้านออกซิเดชันทำปฏิกิริยาจนหมดแล้วสารฟลูออเรสซินจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่อ การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์จึงค่อยๆ ลดลง กลไกการแย่งทำปฏิกิริยาของสารต้านออกซิเดชันและฟลูออเรสซินแสดงในสมการที่ 2.29-2.32 (Huang *et al.*, 2005)



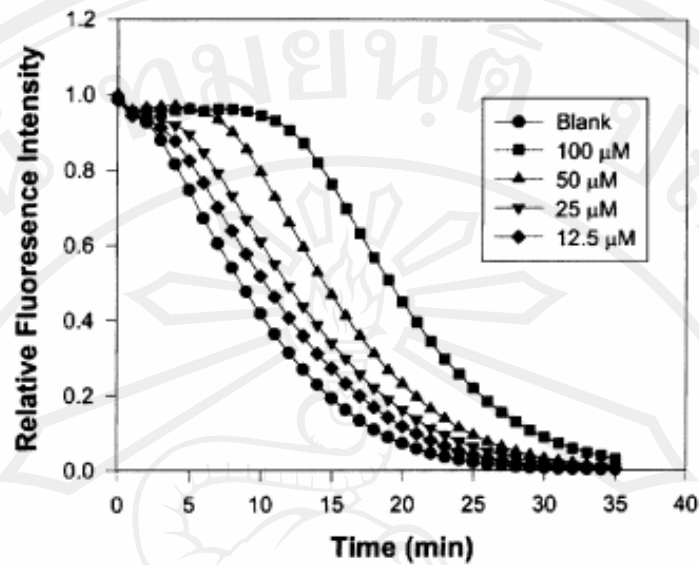
เมื่อ PH = สารตัวแทนสารตั้งต้น (oxidized probes)

1.1 oxygen radical absorbance capacity (ORAC) assay

วิธีนี้เป็นวิธีการวัดกิจกรรมของสารต้านออกซิเดชัน โดยอาศัยหลักการลดลงของแสงฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงฟลูออเรสเซนซ์ โดยเมื่อฟลูออเรสซินทำปฏิกิริยากับอนุมูลเพอร์ออกซิลแล้วความเข้มของแสงจะลดลง หากในระบบมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันน้อยจะทำให้ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าปริมาณสาร

ต้านออกซิเดชันมาก ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์จะลดลงช้า เนื่องจากอนุมูลอิสระต้องทำปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชันจนหมดก่อนแล้วจึงทำปฏิกิริยากับฟลูออเรสซิน วิธีนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางและสามารถใช้ได้ทั้งการวัดกิจกรรมของสารต้านออกซิเดชันในพืช และระบบร่างกายในช่วงแรกของการพัฒนาวิธีนี้ใช้ B-PE (B-phycoerythrin) เป็น probes ซึ่งทำหน้าที่เช่นเดียวกับสารฟลูออเรสซิน แต่ B-PE มีข้อเสียหลายประการ คือ B-PE ผลิตมาจาก *Porphyridium cruentum* ทำให้ในแต่ละครั้งการผลิตมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง นอกจากนั้น B-PE จะมีสีซีดลง (photobleached) เมื่ออยู่ในสถานะของการทดลองด้วย plate-reader และประการสุดท้าย B-PE จะทำปฏิกิริยากับสารฟอสฟิโนลแล้วสีซีดลง แม้ยังไม่ได้เติมสารที่ผลิตอนุมูลอิสระลงไปในระบบก็ตาม ทำให้ภายหลังเปลี่ยนมาใช้ฟลูออเรสซินซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ทดแทนการใช้ B-PE วิธี ORAC นี้เป็นการรวมกันระหว่างการหาค่าเวลาในการยับยั้งอนุมูลอิสระ (inhibition time) และปริมาณการยับยั้งอนุมูลอิสระ ในขณะที่วิธีการอื่นมักหาค่าเวลาในการยับยั้งเมื่อกำหนดปริมาณการยับยั้งอนุมูลอิสระ หรือหาปริมาณในการยับยั้งอนุมูลอิสระเมื่อกำหนดระยะเวลา (Huang *et al.*, 2005)

หลักการของวิธี ORAC คือนำตัวอย่างหรือตัวแทนควบคุมหรือสารมาตรฐานผสมกับสารฟลูออเรสซิน แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แล้วเติม AAPH เพื่อเริ่มปฏิกิริยา วัดความเข้มของแสง ฟลูออเรสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 485 nm excitation/525 nm emission เป็นเวลา 35 นาทีโดยประมาณ และตั้งอุณหภูมิภายในเครื่องที่ 37 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองใช้สาร trolox (สารจำลองของวิตามินอี) ความเข้มข้น 4-5 ระดับ เป็นสารมาตรฐาน ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 2.7 นำผลที่ได้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ (area under curve, AUC) แล้วคำนวณเป็นค่าพื้นที่ใต้กราฟสุทธิ (netAUC) นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของ trolox (Y) (μM) กับพื้นที่ใต้กราฟ (X) ค่าที่ได้แสดงเป็นไมโครโมลของ trolox ต่อตัวอย่างสด 100 กรัม (Huang *et al.*, 2005)



ภาพที่ 2.7 กราฟการลดลงของความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์สัมพันธ์กับเวลาของตัวอย่างและสารมาตรฐาน
ที่มา: Huang *et al.* (2005)

การวัดค่าด้วยวิธี ORAC นี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีขึ้นควรใช้ปเปตชนิดหลายทาง (multichannel) เพื่อใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างลงในไมโครเพลตให้สั้นที่สุด ควบคู่กับเครื่องอ่านค่าพร้อมถาดชนิด 96 หรือ 48 หลุม นอกจากนั้นวิธีนี้ค่อนข้างไวต่ออุณหภูมิ จึงต้องควบคุมทั้งอุณหภูมิภายในเครื่อง และอุณหภูมิของบัฟเฟอร์ที่นำมาใช้ให้อยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาละลายสาร AAPH สิ่งสำคัญอีกเรื่องหนึ่งคือในการทดลองแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 1 ชั่วโมง เนื่องจากสารหมดประสิทธิภาพ (Prior *et al.*, 2005)

1.2 total radical trapping antioxidant parameter (TRAP) assay

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้หลักการเดียวกับวิธี ORAC คือใช้สาร AAPH ในการผลิตอนุมูลเพอร์ออกซิด ผลที่ได้เปรียบเทียบกับ trolox และใช้สารฟลูออเรสซินเป็นสารเรืองแสงเช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันตรงที่วิธี ORAC สนใจความเข้มของแสงที่ลดลงเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงฟลูออเรสเซนซ์โดยเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟ ในขณะที่วิธี TRAP สนใจปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาโดยดูที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็นหลัก ผลที่ได้คำนวณออกมาเป็นค่าไมโครโมลของอนุมูลเพอร์ออกซิดที่ถูกจับไว้ต่อพลาสมา 1 ลิตร แต่วิธีการนี้มีปัญหาเนื่องจากมีจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยา (endpoint) หลายจุด ซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนในการทดลองได้ (Huang *et al.*, 2005)

2. วิธีการวัดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเดี่ยว (based on single electron transfer (SET) reaction)

วิธีการนี้จะวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในปฏิกิริยาการรับของตัวรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยานี้จะมีการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน โดยการเปลี่ยนสีจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารต้านออกซิเดชัน คือ ถ้าสารต้านออกซิเดชันมีความเข้มข้นมากสีของสารละลายก็จะลดลงเร็วขึ้น วิธีการในกลุ่มนี้ได้แก่ total phenols assay by folin-ciocalteu reagent (FCR), 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging capacity (DPPH) assay, trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assay หรือ ABTS และ ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) assay มีกลไกดังแสดงในสมการที่ 2.33 (Huang *et al.*, 2005)



2.1 วิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging capacity (DPPH) assay

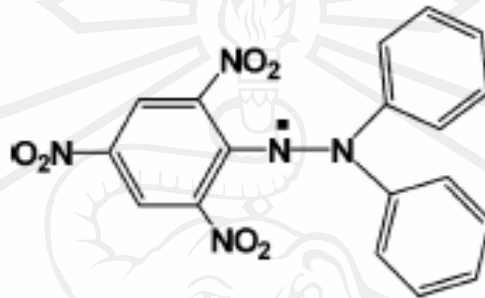
assay

วิธีนี้จะวัดความสามารถในการยับยั้ง 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical (DPPH) ดังภาพที่ 2.8 โดย DPPH เป็นสารอนุมูลในโตรเจนที่ค่อนข้างคงตัว โดยขณะเริ่มต้นการทดลองจะให้สารสีเข้ม เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นสารจะมีสีซีดจางลง ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ตามระยะเวลาที่กำหนด หากในระบบมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันมากสีของสารละลายก็จะลดลงเร็ว กลไกของการเกิดปฏิกิริยาแสดงในสมการที่ 2.34 ค่าที่ได้สามารถแสดงได้หลายรูปแบบ ได้แก่ แสดงเป็นร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ (% radical scavenging activity) ค่าความเข้มข้นของสารสกัดที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 จากปริมาณอนุมูลอิสระเริ่มต้น (IC_{50}) หรือค่าความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (antiradical efficiency, AE) (Huang *et al.*, 2005)



วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายมีความแม่นยำ ใช้เวลาน้อย และใช้เครื่องมือแค่เครื่องวัดการดูดกลืนแสงเท่านั้น เหมาะสำหรับการวัดกิจกรรมของสารต้านออกซิเดชันในน้ำผักและน้ำผลไม้หรือในสารสกัดผักและผลไม้ แต่ไม่เหมาะสำหรับการวัดกิจกรรมของสารต้านออกซิเดชันในพลาสมา เนื่องจากสาร DPPH ต้องละลายในเมทานอล จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของโปรตีน (Sanchez-

Moreno, 2002) วิธีการวัดกิจกรรมของสารต้านออกซิเดชันในกลุ่มนี้ เช่น DPPH, TEAC และ FRAP จะมีความสัมพันธ์ดีมาก ($R^2 > 0.99$) กับการวัดปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เนื่องจากกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเป็นกลไกเดียวกัน (Huang *et al.*, 2005) แต่ในบางกรณีสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดที่ประสิทธิภาพดีวัดผลได้รวดเร็วเมื่อวัดด้วยวิธีอื่น อาจให้ผลที่ไม่ดีหรือให้ผลการยับยั้งช้าเมื่อวัดด้วยวิธีนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการวัดกลไกที่แตกต่างกัน

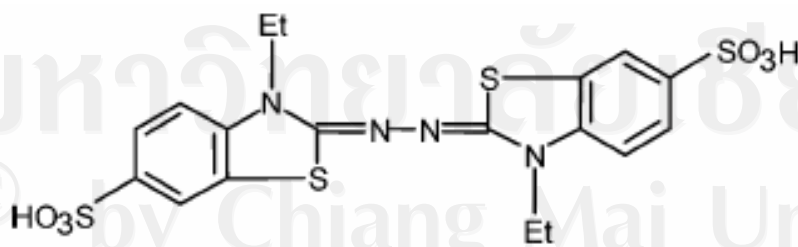


ภาพที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ DPPH

ที่มา: Prior *et al.* (2005)

2.2 trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assay หรือ ABTS assay

วิธีนี้เป็นวิธีการวัดความเข้มข้นของ trolox ที่ทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันต่อ 0.1 มิลลิโมลาร์ของสารตั้งต้นที่ยับยั้งอนุมูลอิสระของ ABTS (ABTS radical cation, $ABTS^{•+}$) สาร ABTS (2,2-azobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate)) มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งสภาวะปกติจะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 342 นาโนเมตร เมื่อถูกกระตุ้นให้ผลิตอนุมูลอิสระจะเปลี่ยนมาดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 414 นาโนเมตร หลักการของวิธีนี้คือวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการยับยั้งอนุมูลเพอร์ออกซิลของ ABTS วัดได้จากการลดลงของสีในสารละลาย



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของ ABTS

ที่มา: Prior *et al.* (2005)

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิชญา และคณะ (2553) ได้ศึกษาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบโรสแมรี่ ดอกลาเวนเดอร์ และกลีบดอกกุหลาบ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของ Lewis, Henderson and Pabis และ Page ได้ทำการทดลองอบแห้งใบโรสแมรี่ ดอกลาเวนเดอร์ และกลีบดอกกุหลาบที่ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที โดยใบโรสแมรี่ ดอกลาเวนเดอร์ และกลีบดอกกุหลาบมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 316.67, 354.55 และ 455.56 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองของ Page จะให้ผลดีที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบโรสแมรี่ ดอกลาเวนเดอร์ และกลีบดอกกุหลาบ สำหรับกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คุณภาพหลังการอบใบโรสแมรี่ ดอกลาเวนเดอร์ และกลีบดอกกุหลาบ ที่ทำการตรวจวัดคือ สี ความชื้นก่อนอบและหลังอบ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ปริมาณเถ้าทั้งหมด ปริมาณแทนนิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณฮิสต์และรา ปริมาณโคลิฟอร์มและ อี. โคไล จากการเปรียบเทียบคุณภาพหลังการอบแห้งของใบโรสแมรี่ ดอกลาเวนเดอร์ และกลีบดอกกุหลาบ โดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน พบว่าคุณภาพหลังการอบด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ด้อยไปกว่าคุณภาพหลังการอบด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดและผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบทั้ง 3 วิธีมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7

ณัฐพล และคณะ (2553) ได้ศึกษาคุณภาพของสับปะรดที่ผ่านการรีดน้ำและไม่รีดน้ำก่อนอบแห้ง โดยทำการอบแห้งแบบถาด และอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมในห้องอบ 0.5 เมตรต่อวินาที ทำการอบแห้งสับปะรดจนกระทั่งตัวอย่างมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 เมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าสี และค่าแรงเหวี่ยงพบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของตัวอย่างที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกันของสับปะรดที่ไม่รีดน้ำมีค่าความสว่างสูงกว่าสับปะรดที่รีดน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความสว่างลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความเป็นสีแดง (a^*) พบว่าสับปะรดที่ผ่านการรีดน้ำมีค่าความเป็นสีแดงสูงกว่าสับปะรดที่ไม่รีดน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้ง ส่วนค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของสับปะรดที่ผ่านการรีดน้ำมีค่าสูงกว่าสับปะรดที่ไม่รีดน้ำที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าแรงเหวี่ยงพบว่าสับปะรดที่ผ่านการรีดน้ำจะมีค่าสูงกว่าสับปะรดที่ไม่รีดน้ำที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เทอร์ตัน และสมยศ (2552) ได้ศึกษาหาค่าความชื้นสมดุลและจุดพบศาสตร์การอบแห้งของไพล ความชื้นสมดุลของไพลหาค่าโดยวิธีสถิตที่อุณหภูมิ 35, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0.06 ถึง 0.85 ส่วนการอบแห้งแบบชั้นบาง ทำการทดลองอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40 และ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 0.621 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ผลจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลของไพลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงขึ้นและแบบจำลอง Modified GAB สามารถทำนายผลการทดลองความชื้นสมดุลได้ดีที่สุด สำหรับจุดพบศาสตร์การอบแห้งของไพลพบว่า อัตราการอบแห้งของไพลอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและสมการของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งไพลแบบชั้นบางได้ดี

อิสรพงษ์ และพิชญ (2553) ได้ทำการศึกษาผลของกรรมวิธีการอบแห้งต่ออัตราการอบแห้ง เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทำแห้ง ปริมาณซิโตนัลลัส ค่าสี ความชื้น และค่า a_w ของใบมะกรูดอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบ และเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด โดยทำการอบแห้งใบมะกรูดที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 186.94 มาตรฐานแห้ง ควบคุมอุณหภูมิของห้องอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าในกระบวนการอบแห้งจะมีแต่ช่วงการอบแห้งลดลงเท่านั้น อัตราส่วนความชื้นลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลกับระยะเวลาในการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองของ Lewis, Henderson and Pabis และ Page ในการทำนายโดยพิจารณาจากค่า root means square error (RMSE), coefficient of determination (R^2) และ reduced chi-square (χ^2) พบว่าแบบจำลองของ Page สามารถพยากรณ์อัตราการลดความชื้นของใบมะกรูดได้ดีที่สุดสำหรับการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสามชนิด พบว่าคุณภาพหลังการอบแห้งใบมะกรูดโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถาดหมุนไม่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้หลังการอบทั้ง 3 วิธี มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7

อุษา และคณะ (2553) ได้ศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ และการอบแห้งด้วยเตาอบลมร้อนต่อสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของผักตบชว (*Gratoxylum formosum* (Jack.)) มะระขี้นก (*Momordica charantia* L.) มะกอก (*Spondias pinnata* Kurz) และฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* (Burm. F) Wall. ex Nees) สำหรับเงื่อนไขของการอบแห้งที่ศึกษา ได้แก่ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 และ 800 วัตต์ และอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total

phenol content : TPC) และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity และวิธี Ferric-reducing power : FRAP และจากการศึกษาพบว่า การทำแห้งด้วยไมโครเวฟ และการอบลมร้อนทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของผักตบชวา มะระจีน และมะกอกลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสดพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยค่า FRAP, TPC และ DPPH ในตัวอย่างผักตบชวา มะระจีน และมะกอกที่อบด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำสุด รองลงมาคือการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ 800 วัตต์ การอบด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ 600 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้อุณหภูมิต่ำช่วยรักษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าการใช้อุณหภูมิสูง เช่นเดียวกันกับการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ การใช้กำลังไฟฟ้าต่ำดีกว่าการใช้กำลังไฟฟ้าสูงที่เวลาการอบเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของการอบแห้งฟักทอง-ลายโจรด้วยวิธีเช่นเดียวกัน พบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟักทองลายโจรเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูง และกำลังไฟฟ้าที่สูงจะมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้น

Balladin and Headley (1999) ได้ทำการทดลองอบแห้งกลีบดอกกุหลาบเป็นเวลา 2 วัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หรือใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อบเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพื่อให้ถึงความชื้นสมดุล พบว่ากลีบดอกกุหลาบมีความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายร้อยละ 65.7 และ 25.2 ตามลำดับ การทดสอบหาคุณสมบัติทางชีวเคมีของกลีบดอกกุหลาบ คือ การหาปริมาณรงควัตถุสีแดงที่อยู่ภายในกลีบดอกกุหลาบ (pelargonidin) ซึ่งพบว่าปริมาณรงควัตถุนี้จะลดลงเป็น 2.5 เท่าของกลีบดอกกุหลาบที่ผ่านการอบแห้ง โดยสาร pelargonidin ethanoic ที่สกัดได้นั้นจะเป็นตัวที่แสดงค่าความเป็นกรดเบส และค่า pH ณ จุดสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 4 และเมื่อแช่ด้วยกระดาษกรองแล้วทิ้งไว้ให้แห้งภายในเวลา 5 นาทีจะมีคุณสมบัติในการเป็นอินดิเคเตอร์ด้วย

Janjai and Tung (2005) ทำการศึกษาการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบสมุนไพรและเครื่องเทศ พบว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าไปในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูง เหมาะสำหรับการอบแห้งสมุนไพรและเครื่องเทศ เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศธรรมดาในสภาพอากาศที่โปร่งใส ความชื้นของดอกกระเจี๊ยบในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงจากค่าเริ่มต้นร้อยละ 92 (มาตรฐานเปียก) ไปจนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 16 (มาตรฐานเปียก) ภายในเวลา 4 และ 30 ชั่วโมง การตรวจสอบคุณภาพพบว่าสีของดอกกระเจี๊ยบที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้มีค่าเทียบเท่ากับ rosella flower แห่งคุณภาพสูงที่ขายตามท้องตลาด

Bala *et al.* (2003) ทำการศึกษาการอบแห้งสับปะรดด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้ง

ในช่วงระหว่างการอบแห้งเมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากทำให้ การสะสมความร้อนมีมากขึ้น และส่งผลให้อุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น จากการทดลองเมื่อใช้ความเร็วลมที่สูงขึ้น ความสามารถในการไหลผ่านจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งจะดีกว่า นอกจากนั้นความเร็วลมที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดกระแสลมที่ปั่นป่วนภายในตู้อบ ทำให้การพาความร้อนจากพืชสมุนไพรสู่อากาศ เป็นไปได้ดีกว่า และอุณหภูมิภายในตู้อบจะมีความสม่ำเสมอมากกว่าที่ความเร็วลมต่ำซึ่งส่งผลต่อ อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นด้วย

Diaz-Maroto *et al.* (2002) ศึกษาการใช้วิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสารประกอบ น้ำมันหอมระเหยในผักชีฝรั่ง พบว่าการอบแห้งผักชีฝรั่งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ ความเข้มข้นขององค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยของผักชีฝรั่งลดลง

Doymaz *et al.* (2006) ศึกษาการอบแห้งใบผักชีลาวและผักชีฝรั่งโดยใช้เครื่องอบลมร้อนที่ ความเร็วลม 1.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิในการทำแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อ อุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง และในระหว่างกระบวนการ อบแห้งพบเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น จากการวิเคราะห์คุณภาพด้านสีพบว่า อุณหภูมิที่ เหมาะสมในการอบแห้งใบผักชีลาวและผักชีฝรั่ง คือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Doymaz (2005) ได้ศึกษาการทำแห้งแบบชั้นบาง และจลนพลศาสตร์ของถั่วลิสงเตาที่ปลูก ในประเทศตุรกี พบว่าเมื่ออบแห้งถั่วลิสงเตาด้วยตู้อบลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิในช่วง 50-70 องศา เซลเซียส ถั่วลิสงเตามีปริมาณความชื้นเฉลี่ยจากร้อยละ 90.53±0.5 ไปจนถึงร้อยละ 14±0.3 จะเห็นได้ ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson and Pabis, Lewis และ Page ถูกนำมาใช้ทำนายกลไกการอบแห้งของถั่วลิสงเตาด้วย เครื่องอบแห้งลมร้อน โดยพิจารณาความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองด้วยค่า RMSE, R^2 และ χ^2 พบว่าแบบจำลองของ Page จะสามารถพยากรณ์อัตราการลดความชื้นของถั่ว ลิสงเตาได้ดีที่สุด

Negi and Roy (2001) ได้ศึกษาผลของการอบแห้ง การบรรจุ และสภาวะการเก็บรักษาต่อ ความคงตัวของเบตา-แคโรทีน และกรดแอสคอร์บิก และการเกิดสีน้ำตาลในระหว่างการเก็บรักษา กะหล่ำปลีและผักโขม เปรียบเทียบกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และ เครื่องอบแห้งแบบถาด พบว่าการอบแห้งอาร์ติโชคโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีการ สูญเสียเบตา-แคโรทีน กรดแอสคอร์บิก และคลอโรฟิลล์มากกว่าเครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด ใน ระหว่างการเก็บรักษาจะพบว่าผักใบเขียวมีการสูญเสียอย่างอย่างต่อเนื่อง ทำให้คุณค่าทางโภชนาการ และคลอโรฟิลล์ลดลง และมีการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำและ บรรจุในถุงพอลิเอทิลีนจะทำให้สูญเสียคุณภาพน้อยลง

Kingsly and Singh (2007) ออบแห้งทับทิมด้วยเครื่องอบแห้งชั้นบางโดยใช้ตู้อบแบบถาดที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ในการอบแห้งทับทิมที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 271.80 (มาตรฐานแห้ง) จนมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 8.70 ± 1 จะใช้เวลา 11, 9 และ 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมากขึ้น จะพบว่าในกระบวนการอบแห้งทับทิมจะมีแต่ช่วงการอบแห้งลดลงเท่านั้น ในการทำแห้งจะใช้แบบจำลองต่างๆ ในการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชั้นบาง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลองของ Page เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายลักษณะการอบแห้งของทับทิมได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ

Soysal (2004) ศึกษาการอบแห้งใบผักชีฝรั่งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟที่มีกำลังไมโครเวฟในช่วง 390-900 วัตต์ พบว่าในการอบแห้งมีการสูญเสียความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ทำให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟลดลงเป็นผลให้อัตราเร็วในการอบแห้งลดลง การเพิ่มกำลังไมโครเวฟจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง จากการประเมินค่าสีพบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างผลิตภัณฑ์สดและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงค่าสีไม่ขึ้นกับกำลังไมโครเวฟ และถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งโดยไมโครเวฟจะเกิดสีดำขึ้นเป็นบางแห่ง แต่ก็ยังสามารถรักษาสีเขียวให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดไว้ได้ การอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟ 900 วัตต์ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีกว่าที่ 360 วัตต์

Ozkan *et al.* (2007) ศึกษาการอบแห้งผักโขม (spinach) โดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 90-1,000 วัตต์ จนกระทั่งปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์เหลือ 0.1 กิโลกรัมน้ำต่อ กิโลกรัมน้ำหนักสารแห้ง พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 290-4,005 วินาที ขึ้นอยู่กับระดับกำลังไมโครเวฟ ค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 500 และ 800 วัตต์ จะให้ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลืองดีที่สุด และที่กำลังไมโครเวฟ 750 วัตต์ เป็นระดับกำลังไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งผักโขม เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่ำ ประหยัดพลังงาน และคงปริมาณกรดแอสคอร์บิกและค่าสีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้มากที่สุด

Yousif *et al.* (1999) ศึกษาการอบแห้งใบโหระพาโดยใช้เครื่องอบลมร้อนและเครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ จากการวิเคราะห์สารระเหยที่ปรากฏในตัวอย่างสดและตัวอย่างแห้ง พบว่ามีสารระเหยสองชนิดที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ linalool และ methylchavicol (estragole) โดยตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศมีปริมาณ linalool เป็น 2.5 เท่า และ methylchavicol เป็น 1.5 เท่า ของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้ง โดยใช้เครื่องอบลมร้อน และพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศให้ผลผลิตที่เป็นสารระเหยมากกว่าตัวอย่างสด

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในระหว่างการอบแห้งและมีอัตราเร็วในการคืนรูปมากกว่า ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบลมร้อนไม่สามารถคืนรูปได้ แต่มีสีเข้มกว่า และมีสีเขียวน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ

Kouchakzadeh and Shafeei (2010) ได้ทำการอบแห้งพืชมะเขือเทศของประเทศอิหร่านสองสายพันธุ์ (Khany และ Abasaliy) ด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบพาความร้อน ทำการทดลองอบแห้งพืชมะเขือเทศด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ พบว่าในกระบวนการอบแห้งช่วงแรกอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองด้วยค่า R^2 และ means square of deviation พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page จะสามารถพยากรณ์สมการลดถอยไม่เชิงเส้นของพืชมะเขือเทศได้ดีที่สุด

Gil-Izquierdo *et al.* (2001) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ (0, 2, 5, 7 และ 10 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่ 14 วันต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (วิตามินซีและสารประกอบฟีนอลิก) ของอาร์ติโชคสายพันธุ์ Blanca de Tudela โดยตรวจสอบสารประกอบฟีนอลิก 3 ชนิด คือ chlorogenic acid, 1,5-dicaffeoylquinic acid (1,5 di-CQA)+3,5-dicaffeoylquinic acid (3,5 di-CQA) and 1,4-dicaffeoylquinic acid (1,4-di-CQA)+4,5-dicaffeoylquinic acid (4,5 di-CQA) พบว่าปริมาณวิตามินซีของกลีบดอกด้านในจะสูงกว่าด้านนอก (144 และ 193 มิลลิกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักสด ตามลำดับ) และลดลงหลังจาก 14 วันของการเก็บรักษาในทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของกลีบดอกด้านในจะสูงกว่าด้านนอก ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดที่เวลาเริ่มต้นมี 618 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม chlorogenic acid มี 143 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 1,4 di-CQA+4,5 di-CQA มี 207 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากการเก็บรักษาจะพบว่ากลีบดอกด้านในจะมีปริมาณ chlorogenic acid และ 1,4 di-CQA+4,5 di-CQA เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการเก็บที่อุณหภูมิ 2, 5, และ 7 องศาเซลเซียส ในทางตรงข้ามหลังจากเก็บรักษาจะพบว่าปริมาณ 1,5-di-CQA+3,5-di-CQA จะลดลงจาก 260 เป็น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

Cabezas-Serrano *et al.* (2009) ได้ศึกษาความไวของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของอาร์ติโชค 5 สายพันธุ์ (C3, Catanese, Tema, Violetto Foggiano และ Violetto Sardo) ในกระบวนการตัดแต่งสด เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 และ 20 องศาเซลเซียส พบว่าอาร์ติโชคสายพันธุ์ C3 มีปริมาณฟีนอลและสารต้านอนุมูลอิสระสูง แต่ลักษณะปรากฏและสี มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีกิจกรรมของ polyphenol peroxidase (PPO) สูง ส่วนสายพันธุ์ Catanese มีปริมาณวิตามินซีสูง (117.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณฟีนอลต่ำ แต่มีคุณภาพหลังการตัดแต่งดี

และสายพันธุ์ Tema, Violetto Foggiano และ Violetto Sardo มีปริมาณฟีนอลปานกลาง ลักษณะปรากฏและสีไม่เป็นที่ยอมรับ

Park *et al.* (2006) ได้ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและผลการยับยั้งอนุมูลอิสระในผลพลับสด ผลพลับที่ผ่านการทำให้แห้งโดยวิธีตากแดดและที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าในผลสดจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากกว่าผลพลับที่ผ่านการทำให้แห้งโดยวิธีตากแดดและที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเท่ากับ 1.3, 0.9 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ จากการตรวจสอบสมบัติการยับยั้งอนุมูลอิสระโดยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ในผลพลับสด ผลพลับที่ผ่านการทำให้แห้งโดยวิธีตากแดด และที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับร้อยละ 70, 59 และ 55 ตามลำดับ ส่วนวิธี 2,2-azobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate) (ABTS) มีค่าเท่ากับร้อยละ 58, 53 และ 46 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแปรรูปโดยการทำให้แห้งผลพลับมีผลทำให้ปริมาณฟีนอลิกและสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลพลับสด

Jung *et al.* (2005) ได้ศึกษาสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของผลพลับสดเปรียบเทียบกับผลพลับแห้ง พบว่าสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าลดลงจากร้อยละ 88 เป็น 84 เมื่อนำผลพลับสดมาผ่านกระบวนการทำให้แห้ง

Vinson *et al.* (2005) ได้ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในตัวอย่างผลไม้ 6 ชนิดโดยเปรียบเทียบระหว่างผลสดกับผลที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งได้แก่ แอปริคอต แคนเบอร์รี่ อินทผลัม พิก องุ่นและพลัม จากการทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในผลสดเท่ากับ 1,478, 2,344, 21,730, 2,859, 1,219 และ 1,754 มิลลิกรัมต่อตัวอย่างแห้ง 100 กรัม ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างผลไม้ทั้ง 6 ชนิดที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งพบว่ากระบวนการทำให้แห้งมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 497, 889, 2,129, 360, 592 และ 1,012 มิลลิกรัมต่อตัวอย่างแห้ง 100 กรัมตามลำดับ

Toor and Savage (2006) ได้ศึกษาผลของการทำมะเขือเทศกึ่งแห้งต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้มะเขือเทศ 3 สายพันธุ์ (Excell, Tradiro, and Flavourine) ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีระดับของ 5-hydroxymethyl-2-furfural ต่ำและมีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำ และค่า a^*/b^* สูงกว่ามะเขือเทศสด และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่างมะเขือเทศกึ่งแห้ง (300 มิลลิกรัม สมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง) น้อยกว่ามะเขือเทศสด (404 มิลลิกรัม สมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่าเฉลี่ยของปริมาณฟลาโวนอยด์และไลโคปีนในตัวอย่างมะเขือเทศสด ลดลงหลังจากนำมะเขือเทศไปทำให้แห้ง ปริมาณกรดแอสคอร์บิกในมะเขือเทศสดลดลงจาก 284 มิลลิกรัม/ 100 กรัมมวลแห้ง เป็น 223 มิลลิกรัม/100

กรัมมวลแห้ง หลังจากอบแห้ง กิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดของมะเขือเทศกึ่ง มีค่าต่ำกว่ามะเขือเทศสด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

Katsube *et al.* (2009) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อความสามารถของสาร antioxidant และความคงตัวของสารประกอบโพลีฟีนอลิกในใบหม่อนโดยนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 40, 60, 70, 80 และ 110 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจสอบกิจกรรมและระดับของสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl พบว่าการทำแห้งโดยใช้อากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าไม่แตกต่างจากการทำแห้งแบบเยือกแข็งของใบหม่อน ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าที่ได้จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นตัวสำคัญที่จะควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เพื่อที่จะรักษากิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระ และระดับของสารประกอบโพลีฟีนอลิก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Vega-Galvez *et al.* (2009) โดยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของพริกชี้หนูที่อุณหภูมิในการอบแห้งระหว่าง 50 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณวิตามินซีและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียวิตามินซีมากถึงร้อยละ 98.2 ที่อุณหภูมิสูง (80 และ 90 องศาเซลเซียส) จะมีสูญเสียค่ากิจกรรมสารต้านอนุมูลอิสระมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส)