บทที่ 2
เอกสารอ้างอิง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

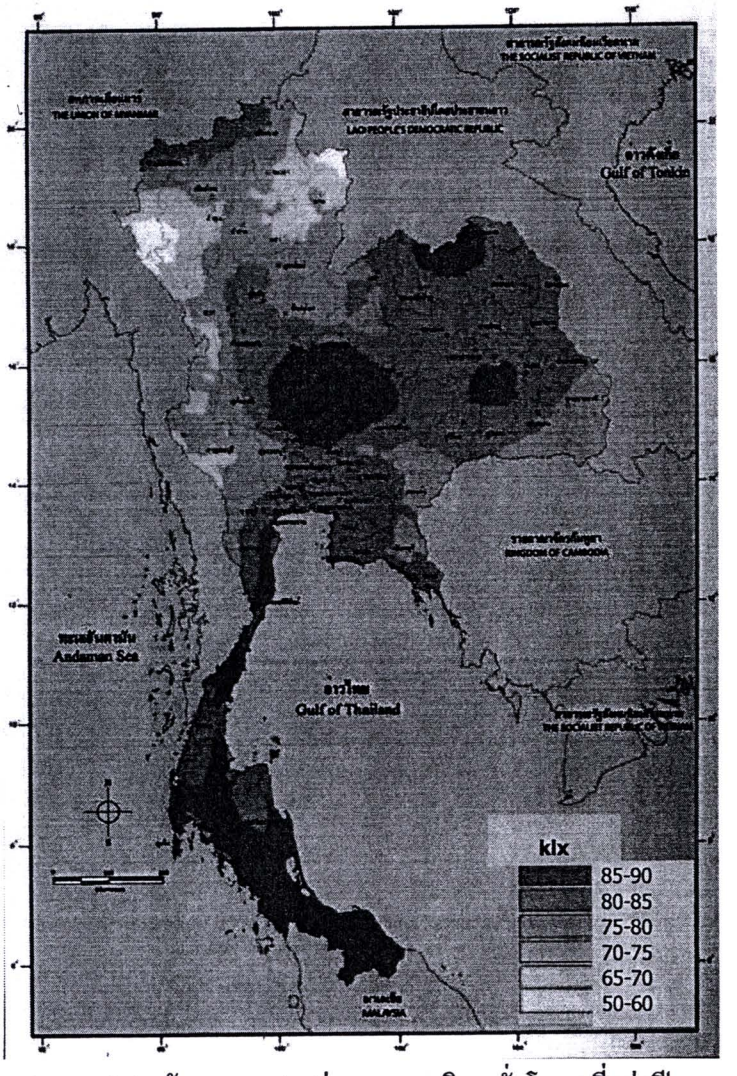
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ซึ่งพลังงานที่ส่งออกมาสู่โลกอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กัน ที่ความยาวคลื่นช่วง 0.3-3.0 ไมโครเมตร จะเป็นช่วงที่ให้พลังงานมากที่สุด ดวงอาทิตย์ประกอบด้วยกลุ่มก๊าซร้อนกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.39×10^6 กิโลเมตรและมีระยะห่างจากโลกโดยประมาณ 1.5×10^8 กิโลเมตร แหล่งกำเนิดพลังงานจะอยู่บริเวณ 0.23 เท่าของรัศมีโดยวัดจากจุดศูนย์กลาง มีมวล 40 % ของมวลดวงอาทิตย์ คิดเป็น 15 % ของปริมาตรและ 90 % ของพลังงานที่เกิดขึ้น พลังงานนี้ได้จากการที่ไฮโดรเจน (4 โปรตรอน) ทำปฏิกิริยากันเองกลายเป็นธาตุฮีเลียม ซึ่งมีมวลน้อยกว่าไฮโดรเจน มวลของไฮโดรเจนที่หายไปจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งถ่ายเทออกสู่ที่ผิวภายนอกโดยการกระจาย การนำ การพา และกระจายรังสีในรูปของรังสี X-ray และ Gamma (ชัชวาล, 2530)

ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซรูปทรงกลมมีความหนาแน่นสูงประมาณ 100 เท่าของความหนาแน่นของน้ำ ดวงอาทิตย์เปรียบเทียบได้เท่ากับเตาปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชันของก๊าซที่เป็นส่วนประกอบต่อเนื่อง ปฏิกิริยาที่สำคัญคือ การรวมตัวของก๊าซไฮโรเจนกลายเป็นก๊าซฮีเลียม ซึ่งมวลของนิวเคลียสของก๊าซฮีเลียมนั้นมีค่าน้อยกว่ามวลของก๊าซไฮโดรเจนดังนั้นมวลของไฮโดรเจนที่หายไปจากกระบวนการฟิวชันนั้น จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเองนี้ จะเกิดภายในดวงอาทิตย์ ซึ่งมีอุณหภูมิหลายล้านองศาเคลวิน จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนมาที่ผิวของดวงอาทิตย์ และแผ่ออกสู่อวกาศจนถึงโลก (จงจิตร์, 2541)

ในปัจจุบันได้นำความรู้เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์โดยใช้เทคโนโลยีและออกแบบเครื่องมือในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด สำหรับประเทศไทยมีพื้นที่ประมาณ 500,000 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ในเขตใกล้เคียงเส้นศูนย์สูตร หรืออยู่ในแถบ

ร้อน มีค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยค่อนข้างสูงประมาณวันละ 4.7 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร หากสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนประเทศไทยเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดต่อปี จะได้พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบประมาณ 700 ล้านตัน การค้นคว้าเพื่อนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้แทนพลังงานเชื้อเพลิงอื่นซึ่งเป็นพลังงานที่หมดไปจากโลกได้จึงมีความจำเป็นต้องวิจัยและพัฒนา เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานให้ได้ต่อไป การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ โดยการประดิษฐ์เครื่องมือต่างๆ เช่น การกลั่นน้ำด้วยแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และการแปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงหรือที่เรียกว่าโซล่าเซลล์



ภาพ 2.1 ศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปี

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2552)

จากภาพ 2.1 จากผลการพัฒนาแผนที่และฐานข้อมูลศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติ พบว่า ความเข้มแสงสว่างธรรมชาติที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัด โดยมีค่า Root mean square difference (RMSD) เท่ากับ 8.1% หลังจากนั้น ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองดังกล่าวคำนวณค่าความเข้มแสงสว่างธรรมชาติทั่วประเทศ แล้วนำผลที่ได้มาจัดแสดงในรูปแผนที่ศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติของประเทศไทย ทั้งในรูปของข้อมูลรายชั่วโมง รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน และรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปี จากแผนที่รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับแสงสว่างธรรมชาติสูงสุดในเดือนเมษายน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 80-100 klx เมื่อพิจารณาจากแผนที่รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีพบว่า 44.1% ของพื้นที่ของประเทศได้รับแสงสว่างธรรมชาติในช่วง 75-80 klx โดยบริเวณที่มีค่าความเข้มแสงสว่างสูงสุดที่ตอนกลางของภาคกลางและภาคใต้ตอนล่าง สำหรับบริเวณภูเขาในภาคเหนือ ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 9.7 % ของพื้นที่ของประเทศได้รับแสงสว่างธรรมชาติคอนข้างต่ำ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 50-65 klx ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติค่อนข้างสูง นอกจากนี้ จากตาราง 2.1 พบว่า จ. เชียงใหม่ มีศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ตาราง 2.1 ศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติจากภาพถ่ายดาวเทียมของ จ. เชียงใหม่
ละติจูด : 18° 47° 49°, ลองติจูด : 98° 59° 07°

เดือน	ศักยภาพแสงสว่าง (กิโลลักซ์)						
	9.00-10.00	10.00-11.00	11.00-12.00	12.00-13.00	13.00-14.00	14.00-15.00	15.00-16.00
มกราคม	34.0	50.7	64.8	74.2	68.2	56.5	40.6
กุมภาพันธ์	34.0	51.4	66.1	76.5	70.4	58.5	42.3
มีนาคม	44.6	64.4	79.4	82.8	82.7	70.2	51.2
เมษายน	63.8	83.8	88.4	95.9	94.6	76.6	58.2
พฤษภาคม	70.8	86.0	87.1	106.9	104.9	92.2	61.8
มิถุนายน	78.2	91.7	92.3	105.6	94.2	85.9	77.1
กรกฎาคม	70.0	86.3	84.8	94.9	87.0	87.3	63.9
สิงหาคม	67.6	78.9	82.8	96.6	86.7	96.5	57.5
กันยายน	62.1	81.2	80.6	92.4	83.7	72.8	54.2
ตุลาคม	56.0	70.3	74.7	86.1	83.1	67.0	52.1
พฤศจิกายน	54.8	71.1	81.3	90.8	80.1	66.2	47.6
ธันวาคม	41.5	58.3	71.1	84.0	72.6	59.2	40.6

ที่มา : นภาภรณ์ (2547)

2.2 การแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์

วิจิตร (2524) ได้อธิบายว่า พลังงานจากดวงอาทิตย์มีหลายรูปแบบ แต่ที่เป็นที่รู้จักกันมาก ได้แก่ แสงและ ความร้อน รังสีแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ตลอดปี เป็นค่าความเข้มในรูปของพลังงานต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร รังสีแสงอาทิตย์มีค่า 380 ล้านล้านเมกะวัตต์ เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศมาถึงโลกจะเหลืออยู่เพียง 170 ล้านเมกะวัตต์

การแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ จะแผ่รังสีผ่านชั้นบรรยากาศของโลก และแผ่รังสีลงสู่พื้นโลกอีกครั้งหนึ่ง การแผ่รังสีนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) การแผ่รังสีตรง (beam or direct radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และตกลงผิวรับแสงมีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์

2) รังสีกระจาย (diffuse radiation) คือ รังสีดวงอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลกและวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในแนวทางเดินของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางของท้องฟ้า

3) รังสีรวม (total or global radiation) คือ ผลรวมของรังสีกระจายที่ตกกระทบผิวรับแสงในกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง รังสีจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและผิวโลกเรียกรังสีรวมนี้ว่า total radiation (จงจิตร์, 2541)

บรรยากาศของโลกประกอบด้วย ก๊าซหลายชนิด หยดน้ำ และอนุภาคของของแข็ง ซึ่งกั้นแสงแดดที่แผ่เข้ามายังพื้นผิวโลก ส่วนหนึ่งของแสงแดดประมาณร้อยละ 30 จะถูกสะท้อนกลับสู่อวกาศนอกโลกในทันที เรียกพลังงานส่วนที่สะท้อนกลับนี้ว่า อัลเบโด (albedo) ซึ่งเป็นพลังงานส่วนที่ไม่มีประโยชน์ในโลก ขณะที่ส่วนที่สามารถผ่านชั้นบรรยากาศเข้ามาภายในโลกได้ประมาณร้อยละ 70 ก็จะถูกดูดซับ แพร่ หรือสะท้อนกกลับโดยชิ้นวัตถุ ดังแสดงในตาราง 2.2

พลังงานที่ตกกระทบถึงผิวโลกจะกระจายมากน้อยต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ช่วงเวลาของปี ระยะห่างจากเส้นศูนย์สูตร และอื่นๆ ได้แก่

- องค์ประกอบของบรรยากาศ เช่น ปริมาณเมฆ หรืออนุภาคของของแข็ง

- ความหนาของชั้นบรรยากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวบนโลก มุมรับรังสีที่ส่งผ่านเข้ามาในชั้นบรรยากาศ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลา และช่วงปี
- มุมตกกระทบของรังสีกับพื้นผิวโลกที่ต้องการวัดปริมาณพลังงาน ยิ่งมุมใหญ่หรือยิ่งรังสีแสงอาทิตย์ทำมุมเอียงมากเท่าใด ความเข้มแสงยิ่งน้อย (วิจิตร, 2524)

ตารางที่ 2.2 พลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกสะท้อนและดูดซับ

การสะท้อน กระจาย และการดูดซับ	ร้อยละ
พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ	100
คลื่นสั้นทีรับแล้วสะท้อนกลับสู่อวกาศทันที (อัลเบโด)	30
คลื่นยาวที่ถูกดูดเก็บโดยบรรยากาศใกล้ผิวโลก	20
แสงส่วนที่ตกมาถึงผิวโลก	50
พลังงานที่ระบายออกสู่บรรยากาศ	100
คลื่นสั้นที่ถูกสะท้อนกลับโดยทันที	30
คลื่นยาวที่โลกแผ่รังสีกลับออกไป	70

ที่มา : วิจิตร (2524)

2.3 การทำแห้ง

การทำแห้งวัสดุโดยทั่วไปนั้น ใช้อากาศแห้งเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุพร้อมๆ กับการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังอากาศ ความร้อนจากอากาศที่วัสดุได้รับนั้นทำให้น้ำในวัสดุระเหยซึ่งวัสดุที่เป็นสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่มีโครงสร้าง ภายในเป็นรูพรุน หากผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุจะคงที่ หากอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศมีค่าคงที่ จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลง โดยอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้นและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุจะลดลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของวัสดุในขณะที่อัตราการอบแห้งเริ่มเปลี่ยนแปลงจากอัตราการอบแห้งคงที่ไปเป็นอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Hall, 1980) ในการทำแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่อาหารเพื่อทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วระเหยออกจากอาหาร ถ้าใช้พลังงานจากแสงแดด

จะเรียกว่า การตากแห้ง ถ้าใช้พลังงานจากไฟฟ้า ก๊าซ หรือไอน้ำในเครื่องอบแห้งจะเรียกว่า การอบแห้ง เรียกทั้งสองวิธีว่า การทำแห้ง (สุคนธ์ชื่น, 2539) วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการอบแห้ง คือ เพื่อเก็บรักษา ถนอมผลิตภัณฑ์ระหว่างการยืดอายุการเก็บรักษา โดยการลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จนถึงระดับที่สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาอื่นๆ นอกจากนี้การลดปริมาณความชื้นยังมีผลต่อการเก็บรักษา กลิ่นรส และคุณค่าทางอาหารอีกด้วย วัตถุประสงค์อีกประการหนึ่ง คือ การลดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยในการขนส่ง และการเก็บรักษา องค์ประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารสามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและวัตถุประสงค์สุดท้ายของการอบแห้งเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่สะดวกต่อการใช้ของผู้บริโภค

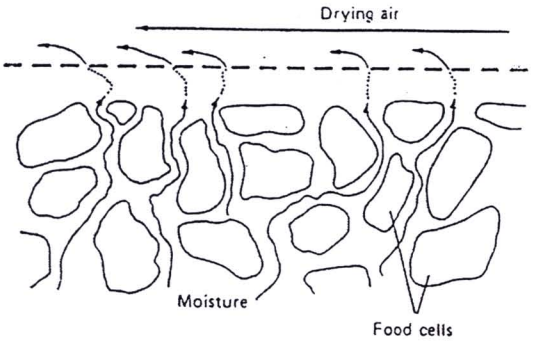
ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ด้วยวิธีการทำแห้ง จำเป็นต้องคำนึงถึงรูปร่างโครงสร้างของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพื่อให้การกำจัดความชื้นเกิดขึ้นในลักษณะที่ทำลายคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด โดยผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้จากกระบวนการทำแห้ง สามารถกลับมีคุณภาพใกล้เคียงกับสภาพเริ่มต้นหลังการเติมน้ำ (rehydration) แล้วกระบวนการทำแห้งนี้ต้องมีการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เหมาะสมภายในผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผักและผลไม้แห้งมีคุณภาพเป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นในการออกแบบกระบวนการดังกล่าว จำเป็นต้องวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (รุ่งนภา, 2541)

2.3.1 หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง (basic principles of dehydration)

สิ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ คือน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เมื่อกล่าวถึงคุณสมบัติทางเคมี ภายภาพ และเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำที่ยึดเกาะอาหาร Rockland (1969) ได้ชี้ให้เห็นว่ามีน้ำอยู่ 3 ประเภทคือ (1) โมเลกุลน้ำที่ยึดกับอิออนิกกรุ๊ป (ionic group) ได้แก่ กลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) และอมิโน (amino group) (2) โมเลกุลน้ำที่ยึดกับกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และเอไมด์ (amide) (3) น้ำอิสระพบในช่องว่างอินเตอร์สทิเชียล (interstitial pores) ซึ่งแรงคาพิลลารี่และองค์ประกอบที่ละลายอยู่ทำให้ความดันไอลดลงระหว่างกระบวนการอบแห้ง ระดับความยากในการกำจัดความชื้นออกไปจะลดลงตามลำดับ และโอกาสที่น้ำจะถูกกำจัดออกไปเป็นปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นตามลำดับ กล่าวคือน้ำอิสระจะระเหยและกำจัดออกไปในตอนแรก จากนั้นจะเป็นโมเลกุลที่ยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน สุดท้ายจะเป็นน้ำที่ยึดเกาะด้วยพันธะอิออนิก ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการกำจัดความชื้นจากน้ำแต่ละชนิด จะใช้ปริมาณพลังงานที่แตกต่างกันในการกำจัดออกไป เนื่องจากความต้องการพลังงานในการกำจัดความชื้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์

และชนิดของน้ำ ดังนั้น การออกแบบเครื่องอบแห้งต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ให้มาก ประสิทธิภาพของเครื่องที่ออกแบบขึ้นอยู่กับว่าสามารถกำจัดความชื้นตามที่ต้องการได้หรือไม่ (รุ่งนภา, 2535)

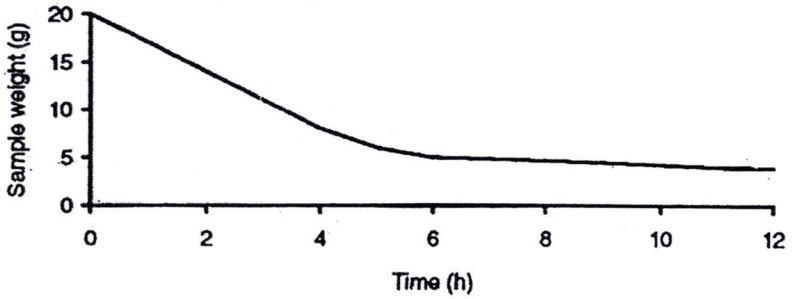
เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียกหรือมีความชื้น ความร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ (Fellow , 1990) ดังแสดงในภาพ 2.2



ภาพ 2.2 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชิ้นอาหารระหว่างการอบแห้ง
ที่มา : Fellow (1990)

2.3.2 กราฟอัตราการทำแห้ง (drying rate curve)

ลักษณะการทำแห้งอาหารทั่วไป มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการทำแห้ง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวล ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนของอากาศไปยังผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น พร้อมทั้งเกิดการระเหยของของเหลวที่ผิว และใต้ผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งปริมาณการถ่ายเทขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารว่ามีมากน้อยเพียงใด จากลักษณะดังกล่าว ทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทำแห้งที่อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม และทิศทางการไหลของอากาศที่ผ่านผลิตภัณฑ์คงที่ เมื่อเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาในการทำแห้งจะได้กราฟ ดังแสดงในภาพ 2.3



ภาพ 2.3 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบแห้ง

ที่มา : Barbosa-Canovas and Vega-Mercado (1996)

จากภาพ 2.3 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการทำแห้ง น้ำหนักของผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักจะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อนำน้ำหนักที่เวลาต่างๆ มาหาปริมาณความชื้นต่อน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในชิ้นผลิตภัณฑ์โดยใช้สูตร ดังนี้

$$X_t = \frac{W_t - F_s}{F_s} \qquad \text{..... สมการที่ 1}$$

X_t คือ ปริมาณความชื้นต่อน้ำที่เวลาใดๆ ของผลิตภัณฑ์

W_t คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ

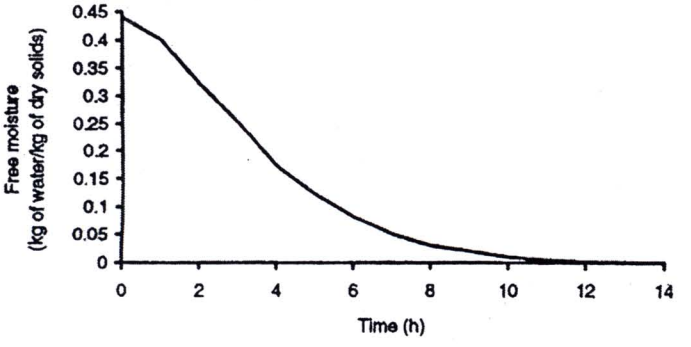
F_s คือ น้ำหนักของของแข็งของผลิตภัณฑ์

$$X = X_t - X_{eq} \qquad \text{..... สมการที่ 2}$$

X คือ ปริมาณความชื้นต่อน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์

X_{eq} คือ ปริมาณความชื้นสมดุลในผลิตภัณฑ์

จากค่าในสมการที่ 2 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นต่อน้ำอิสระกับเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง จะได้ลักษณะกราฟดังแสดงในภาพ 2.4



ภาพ 2.4 ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้ง

ที่มา : Barbosa-Canovas and Vega-Mercado (1996)

จากกราฟภาพที่ 2.3 นำมาหาค่าอัตราการทำแห้ง (R; Drying Rate Curve) จะได้ว่า อัตราการทำแห้ง เป็นปริมาณความชื้นต่อน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นกับเวลา

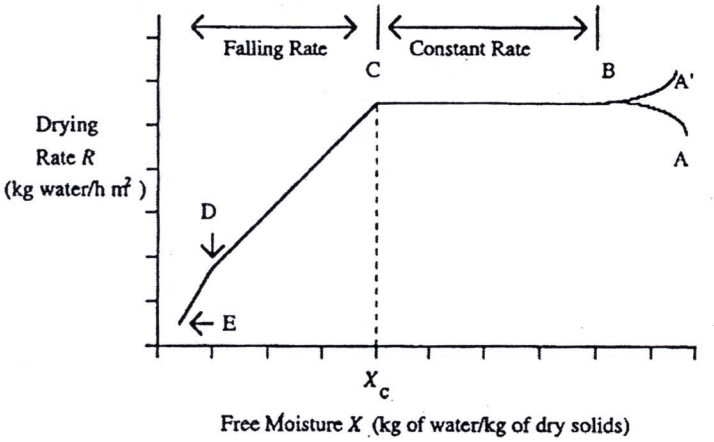
$$R \alpha \frac{dx}{dt}$$ ..... สมการที่ 3

เพราะฉะนั้น $$R = -\left(\frac{F_s}{A}\right)\left(\frac{dx}{dt}\right)$$ ..... สมการที่ 4

A = คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์

เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการที่ 4 มาเขียนกราฟระหว่างอัตราการทำแห้งกับปริมาณความชื้นต่อน้ำอิสระ (X) จะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.5

กราฟอัตราการอบแห้ง เป็นกราฟที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสามารถใช้หาเวลาในการอบแห้งที่สภาวะเดียวกันได้ ในกระบวนการอบแห้ง จะมีการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น จะใช้หลักการทั้งสองอย่างนี้เป็นพื้นฐานในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัตถุ การเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัตถุ นิยมแสดงในรูปของกราฟอัตราการแห้ง (drying rate) ดังภาพ 2.5 และสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วงที่แตกกันดังนี้



ภาพ 2.5 กราฟอัตราการแห้งสำหรับอาหารชนิดหนึ่งๆ

ที่มา : Barbosa-Canovas and Vega-Mercado (1996)

ช่วง AB = ช่วงเริ่มแรกเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของของแข็ง ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิที่จะเริ่มเกิดการระเหย จึงทำการปรับอุณหภูมิโดยรับความร้อนจากอากาศ จนกระทั่งเกิดการระเหยขึ้นและจะค่อยๆ เพิ่มจนกระทั่งถึงช่วงอัตราการแห้งคงที่

ช่วง A'B = ช่วงเริ่มแรกซึ่งเป็นกรณีที่บริเวณผิวหน้าของแข็ง มีอุณหภูมิสูงกว่าที่จะเริ่มเกิดการระเหยซึ่งการระเหยในตอนแรกจะสูง และค่อยๆ ลดลงจนคงที่

ช่วง BC = ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) เป็นช่วงที่น้ำในสารชื้น ระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่อง คล้ายกับการระเหยโดยทั่วไป ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำเกิดขึ้นเป็นพวก unbound water เป็นน้ำที่บริเวณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดการระเหยกลายเป็นไอ และเคลื่อนที่ไปกับอากาศร้อน การเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์น้อยกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผิวจะเท่ากับอัตราการระเหยที่ผิวของผลิตภัณฑ์ และสามารถใช้เป็นอัตราการทำแห้งได้ ปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการทำแห้งในช่วงนี้คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราเร็วอากาศ ดังนั้น การระเหยในช่วงนี้จึงไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร แต่ชนิดของสารจะเป็นตัวกำหนดจุดสุดท้ายของช่วงอัตราการแห้งคงที่นี้ ซึ่งเป็นจุดที่อัตราการแห้งเริ่มลดลง เรียกว่า จุดวิกฤต (critical point) คือจุด C ในกราฟ โดยความชื้นเฉลี่ยของอาหารมีค่าเท่ากับจุด X_C ซึ่งเป็นความชื้นวิกฤต เกิดเนื่องจากในตอนแรกผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง เมื่อทำแห้งไปเรื่อยๆ ปริมาณความชื้นที่ผิวลดลง

จนกระทั่งน้ำที่บริเวณผิวระเหยไปหมด และความชื้นในผลิตภัณฑ์ต่ำลงจนทำให้อัตราการทำแห้งเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถพบการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน

ช่วง CD = ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เป็นช่วงที่ความชื้นเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าของของแข็งอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ชั้นของของเหลวที่ปกคลุมอยู่มีไม่สม่ำเสมอ อัตราการอบแห้งจึงลดลง ซึ่งการถ่ายเทความร้อน และมวลไม่ได้เกิดที่ผิวของผลิตภัณฑ์ แต่เกิดที่ภายในเนื้อของผลิตภัณฑ์ การเคลื่อนที่เป็นลักษณะของการแพร่ (diffusion) ของน้ำหรือไอน้ำที่อยู่ใน pore หรือ capillary ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ไปที่ผิวของผลิตภัณฑ์แล้วจึงเคลื่อนที่ไปกับอากาศร้อนซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ช้ากว่าแบบการพา ทำให้อัตราการทำแห้งช่วงนี้ลดลง ปัจจัยที่ควบคุมการทำแห้งช่วงนี้ คือ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในผลิตภัณฑ์และในช่วงนี้อุณหภูมิในผลิตภัณฑ์จะสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ จากกราฟจะพบว่า มีช่วงอัตราการทำแห้งลดลง 2 ช่วง เนื่องจากช่วง C ถึง D ยังคงมีความชื้นหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย แต่ที่จุด D ความชื้นที่ผิวระเหยไปหมดทำให้ผิวแห้งสนิท อัตราการระเหยจึงช้าลงไปอีก

เมื่อทำการอบแห้งต่อไปจะสามารถกำจัดน้ำอิสระที่อยู่ภายในอาหารจนหมด คือ ความชื้นลดลงจากจุด D ไปยังจุด E (ความชื้นสมดุล) การระเหยจะเกิดต่อเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิวหน้าอาหารและภายในอาหารอัตราการกำจัดน้ำจะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำลดลงไปอย่างมากจากการอบแห้ง และเมื่อถึงจุด E กระบวนการอบแห้งจะสิ้นสุดลง (Treybal, 1968)

กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

1) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period)

ในการทำแห้งโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางทำให้แห้ง (drying medium) ที่สภาวะอุณหภูมิและความชื้นคงที่ เมื่อวัตถุที่เปียกชื้นสัมผัสกับอากาศร้อน วัตถุจะปรับอุณหภูมิของวัตถุจนเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ (steady state) แล้วผิวหน้าของวัตถุจะชุ่มด้วยของเหลว เมื่ออุณหภูมิที่ผิวหน้าของวัตถุเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb) ของอากาศร้อน จึงเริ่มเกิดการระเหยของน้ำเป็นไอ และถ่ายเทไปยังกระแสตัวกลางทำให้แห้ง ถ้าน้ำยังมีพอเพียงที่จะคลุมผิวหน้าของของแข็งเป็น

ฟิล์มบางๆ อัตราการอบแห้งในช่วงเวลานี้จะมีค่าคงที่ และการระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นได้เสมือนกับไม่มีของแข็งอยู่เลย ปรากฏการณ์นี้จะทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าคงที่ เรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate) ในช่วงนี้โครงสร้างของวัตถุจะไม่มีผลต่ออัตราการระเหยของของเหลวที่อยู่บนผิวหน้าของวัตถุเลย ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ ไอน้ำจะระเหยออกจากเนื้อของวัตถุ ต่อมาเมื่อน้ำไม่พอเพียงที่จะปกคลุมผิวหน้าของของแข็ง พื้นที่ที่เกิดการระเหยลดลงทำให้อัตราการแห้งไม่คงที่อีกต่อไป ความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยตรงให้แก่ผิวของของแข็ง นอกจากผิวของของแข็งแห้งแล้วอุณหภูมิที่ผิวของของแข็งจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นด้วย นั่นคือช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่สิ้นสุดลง ความชื้นในช่วงสุดท้ายของ constant rate period เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ในวัตถุชนิดเดียวกันที่ถูกทำภายใต้ภาวะของระบบเดียวกัน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าความชื้นวิกฤตสูงกว่าสารที่มีอนุภาคขนาดเล็ก

2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period)

เมื่อช่วง constant rate period สิ้นสุดลง อุณหภูมิของวัตถุจะเริ่มสูงขึ้น ของเหลวที่อยู่ผิวหน้าของวัตถุจะหมดไป ทำให้อัตราการแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว และสัมพันธ์กับการลดลงของความชื้น เรียกว่า อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) การอบแห้งในช่วงนี้พบว่า ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของสารเป็นอย่างมาก จนกระทั่งไม่อาจทำนายได้ด้วยวิธีทางทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากระนาบที่เกิดการระเหยเป็นไอจะเคลื่อนที่ถอยลึกเข้าไปในชั้นของของแข็ง ไอน้ำที่ระเหยจะแพร่ซึมผ่านชั้นของแข็งไปยังผิวหน้าก่อนแพร่ซึมเข้าไปในกระแสตัวกลาง อุณหภูมิของชั้นของของแข็งแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และอุณหภูมิจะลดลงจากผิวนอกที่สัมผัสกับตัวกลางทำความร้อนไปจนถึงตำแหน่งที่เป็นระนาบที่เกิดการระเหยของน้ำ การถ่ายเทของน้ำในของแข็งนี้มีผู้พยายามอธิบายโดยอาศัย ทฤษฎี 2 ทฤษฎี คือ การแพร่ซึม (diffusion) ซึ่งน้ำจะแพร่ซึมมายังระนาบที่เกิดการระเหย และแคปิลลารี (capillary) ซึ่งน้ำจะเกิดการถ่ายเทภายใต้ภาวะของแรงแคปิลลารี (capillary force) อย่างไรก็ตามก็พบว่า ทั้ง 2 ทฤษฎียังไม่อาจทำนายการแห้งตัวได้อย่างถูกต้อง (Van Arsdel, 1973)

2.3.3 กลไกของการถ่ายเทมวลในอาหาร

กลไกของการถ่ายเทมวลในอาหารมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยการเคลื่อนที่ของน้ำภายในจะเกิดขึ้นได้หลายแบบ ดังนี้

1. Liquid diffusion ความชื้นที่ผิวหน้าลดลงต่ำกว่าความชื้นที่เหลืออยู่ภายในอาหาร จะทำให้เกิดแรงขับให้การเคลื่อนที่จากภายในมาสู่ผิวหน้าอาหารโดยการแพร่ของน้ำ อัตราการแพร่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอาหาร อุณหภูมิ ความแตกต่างของความเข้มข้นภายใน และผิวหน้าอาหาร

2. Vapor diffusion ระหว่างการอบแห้งอาจเกิดการระเหยใต้ผิวหน้าอาหารโดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบแห้งที่ใช้เวลานาน โมเลกุลของน้ำจะแพร่ผ่านอาหารออกมาสู่อากาศร้อน การแพร่ของไอนี้เกิดจากความแตกต่างของความดันไอของอาหาร และความดันไอเหนืออาหาร

3. Capillary flow แรงตึงผิวมีผลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในโครงสร้างอาหารโดย เฉพาะอย่างยิ่งอาหารที่มีรูพรุน น้ำอิสระจะเคลื่อนที่ผ่านแคปิลลารี หรือช่องว่างเล็กๆ ระหว่างของแข็งด้วยกลไกของแรงตึงผิว เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของน้ำมันในไส้ตะเกียง โดยแคปิลลารี จะเป็นรูเปิดที่เชื่อมระหว่างน้ำภายในอาหาร และผิวหน้าอาหาร

4. Pressure flow ความแตกต่างระหว่างความดันของอากาศร้อน และโครงสร้างภายในอาหาร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำได้

5. Thermal flow ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวหน้าอาหาร และภายในอาหาร อาจจะมีความสำคัญต่อการอบแห้งอาหารในช่วงหลัง ซึ่งช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำมาสู่ผิวอาหาร

อย่างไรก็ตาม ระหว่างการอบแห้งอาจเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำตั้งแต่หนึ่งกลไกหรือมากกว่า และรายละเอียดของกลไกต่างๆ อาจเปลี่ยนได้ระหว่างการอบแห้ง (Heldman and Hartel, 1996 ; Treybal, 1968)

2.4 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่วิธีหนึ่ง เป็นวิธีการถนอมอาหารที่มีต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานน้อยและเป็นวิธีที่ใช้อยู่จนทุกวันนี้ การศึกษานี้ได้รับแรงกระตุ้นจากวิกฤตการณ์ทางน้ำมันของโลก ผลิตผลทางการเกษตรโดยเฉพาะธัญพืช ผักและผลไม้ สัตว์น้ำชนิดต่างๆ จะทำแห้งโดยการตากแดด ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกจากการบริโภคภายในประเทศแล้ว ยังสามารถส่งไปจำหน่ายยังต่างประเทศได้ การทำแห้งโดยการตากแดดนอกจากจะมี

ความสำคัญต่อประเทศไทยแล้ว ประเทศออสเตรเลียและประเทศอื่นๆ ในแถบเอเชีย อาฟริกา ยังใช้วิธีนี้ในการถนอมอาหารอยู่ (Yaciuk, 1982) แม้ว่าการตากแห้งด้วยแสงแดดจะเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ถูกสุขลักษณะนัก เพราะมีการปนเปื้อนจากแมลง ฝุ่น และจุลินทรีย์ รวมทั้งคุณค่าทางอาหารบางอย่าง เช่น สี กลิ่น รส อาจสูญเสียไป (จรรยาและพิพัฒน์, 2523) และไม่สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ ไม่ได้มาตรฐานตามที่ตลาดต้องการ นอกจากนี้ปัญหาในการตากยังขึ้นอยู่กับฤดูกาล จากปัญหาเหล่านี้จึงต้องใช้เครื่องมือตากแห้งที่มีประสิทธิภาพมาทดแทนวิธีการตากแบบพื้นบ้าน มีการปรับปรุงวิธีการตากแห้งโดยใช้แสงแดด โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับวัตถุที่มีสี ซึ่งสามารถสะสมความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุที่มีสีดำสามารถดูดและเก็บความร้อนได้ดีมาก ส่วนการตากแห้งในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เวลาน้อย เพราะอุณหภูมิภายในตู้เป็นการป้องกันการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์ได้ดี คือ ไม่เกิดการเน่าเสียในระหว่างการตาก ไม่มีการปนเปื้อนจากฝุ่น แมลง นก แม้ว่าจะมีไข่แมลงหรือแมลงเล็กรอดเข้าไปก็ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้จึงสะอาดและสะดวกกว่า โดยไม่จำเป็นต้องเก็บเมื่อฝนตกจึงเป็นการประหยัดแรงงาน และยังเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงหรือไฟฟ้าด้วย (จรรยาและพิพัฒน์, 2523)

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งเป็นรูปแบบการเก็บกักความร้อนแบบหนึ่ง โดยมีการจัดการให้ความร้อนจากดวงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศมาให้ความอบอุ่นยังพื้นโลก แต่จะไม่ให้ความร้อนสะท้อนจากพื้นผิวโลกกลับไปยังชั้นบรรยากาศได้ เนื่องจากความร้อนที่ผ่านมายังพื้นผิวโลกจะแตกต่างกับความร้อนที่กลับออกไปจากพื้นผิวโลก เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ก็จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งในลักษณะดังกล่าว (วิจิตร, 2524) และ Szulmayer (1971) ได้ให้นิยามการอบแห้งด้วยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ว่า เป็นกระบวนการผสมผสานระหว่างการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับการควบคุมอุณหภูมิ และควบคุมการไหลของกระแสลมซึ่งการทำเช่นนี้จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์แล้ว ยังเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการการทำแห้งอีกด้วย

2.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เป็นเครื่องอบแห้งที่มีการพัฒนาโดยอาศัยหลักการการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบตู้ โดยการใช้แสงแดดเป็นพลังงานความร้อนให้กับตู้อบ ซึ่งมีความเหมาะสมกับประเทศไทย ทำให้ไม่ต้อง

เสียต้นทุนพลังงาน ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้กับตู้อบแสงอาทิตย์ สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้มากและรวดเร็วขึ้น เช่น เครื่องอบแห้งระบบ Active เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ และเครื่องอบแห้งระบบ Hybrid เป็นต้น (สมบัติ, 2544)

2.5.1 หลักการทำงาน

พลังงานที่ต้องการสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ สามารถตรวจสอบได้จากปริมาณความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด อัตราการอบแห้งและการใช้อุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ พลังงานที่เหมาะสมต่อการอบแห้งเพื่อง่ายต่อการคำนวณพื้นที่ของ solar panel ที่ต้องการเพื่อผลิตความร้อนอย่างเพียงพอ เพื่อทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ใช้อบแห้ง ซึ่งใส่ตัวอย่างที่ต้องการอบแห้ง และส่วนที่เป็นตัวรับรังสีดวงอาทิตย์เพื่อทำให้อากาศร้อน นอกจากนี้อาจมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น พัดลม

แผงรับรังสีเป็นอุปกรณ์รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยดูดพลังงานแสงอาทิตย์ และแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน และแผงรับแสงอาทิตย์เป็นแผ่นแบนราบ (flat plate collector) ทำหน้าที่เป็นตัวดูดพลังงาน (absorber plate) โดยรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ และแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนให้กับอากาศ เพื่อประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์จึงทาแผ่นดูดพลังงานด้วยสีดำด้าน ทำให้มีค่าการดูดรังสีสูงที่ความยาวคลื่นของรังสีต่ำ แต่ให้การส่งออก (emissivity) ต่ำที่ความยาวคลื่นรังสีสูง และเพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพื่อให้ความร้อนกระจายภายในจึงต้องมีแผ่นกั้นด้านบน (top cover) เป็นแผ่นพลาสติกใส (ธีระชัยและคณะ, 2532)

การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบการไหลของอากาศเป็นแบบธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของระดับที่จุดเข้า ออกของเครื่องอบแห้ง ความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศภายนอกและภายในเครื่องอบแห้ง การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบที่

2 คือ แบบการไหลของอากาศเป็นแบบบังคับ ซึ่งโดยทั่วไปใช้พัดลมเป็นตัวสร้างความแตกต่างของความดันรวมระหว่างทางเข้า และทางออกของเครื่องอบแห้ง

การอบแห้งแบบการไหลของอากาศเป็นแบบธรรมชาติ เหมาะกับงานขนาดเล็กในไร่นาหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กทั้งนี้เพราะเครื่องอบแห้งแบบนี้มีราคาถูก สร้างได้ง่าย ส่วนการอบแห้งแบบการไหลของอากาศเป็นแบบบังคับเหมาะกับงานทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ ต้องลงทุนมากขึ้น (วีนัส, 2542)

2.5.2 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งออกได้หลากหลายประเภท แต่จากการสำรวจ สามารถสรุปการแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (สมชาติ, 2540) ได้ดังนี้

1) แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง (direct type) มีส่วน ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ช่องอากาศเข้า ใช้วัสดุทำเป็นหลังคาและช่องระบายอากาศ รังสีดวงอาทิตย์จะทะลุผ่านหลังคา และกระทบกับวัสดุที่นำมาอบแห้งโดยตรง การระเหยน้ำออกจากวัสดุเกิดขึ้น จากความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ และอากาศภายในสามารถระบายออกไปทางช่องระบายอากาศ และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรงยังสามารถแบ่งประเภทตามรูปแบบการไหลของอากาศ ได้ดังนี้

ก. การไหลของอากาศแบบธรรมชาติ การเคลื่อนที่ของอากาศตามธรรมชาติแบบนี้ สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ กล่าวคือ อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ เครื่องอบแห้งแบบนี้มีต้นทุนต่ำ ดูแลรักษาง่าย แต่มีข้อจำกัดคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของสารมีค่าน้อย ทำให้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งต่ำ

ข. การไหลของอากาศแบบบังคับ เครื่องอบแห้งชนิดนี้ จะใช้พัดลมช่วยในการไหลเวียนของอากาศ ทำให้อากาศมีสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งแต่มีข้อจำกัดคือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของพัดลมและเรื่องของการดูแลรักษาพัดลม

2) แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยอ้อม (indirect type) เครื่องอบประเภทนี้ประกอบด้วยส่วนรับรังสีแสงอาทิตย์ พัดลมและห้องอบแห้ง ส่วนของห้องอบแห้งนั้นจะป้องกันไม่ให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามากระทบกับวัสดุที่นำมาอบโดยตรง การอบแห้งจะอาศัยความร้อนจากพื้นที่รับแสงเป็นหลักคือ ส่วนรับแสงจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ จากนั้นจึงไหลผ่านไปยังวัสดุในห้องอบแห้ง

ก. การไหลของอากาศแบบธรรมชาติ ลักษณะการไหลของอากาศจะเป็นไปโดยธรรมชาติ เครื่องอบประเภทนี้ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ พื้นที่รับแสง ห้องอบแห้ง ช่องระบายอากาศ จุดเด่นของเครื่องอบแห้งนี้ ที่ห้องอบแห้งจะทำด้วยวัสดุทึบแสงที่ป้องกันแสงอาทิตย์ผ่านทะลุได้

ข. การไหลของอากาศแบบบังคับ การบังคับอากาศทำได้โดยการใช้พัดลม คือการใช้พัดลมช่วยให้อากาศเคลื่อนที่ ทำให้อากาศมีสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลของสารสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งแต่มีข้อเสียคือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของพัดลมและเรื่องของการดูแลรักษา

3) แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยผสม (mixed type) เป็นการนำหลักการของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง และแบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยอ้อมมาใช้ร่วมกันคือ ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรงและได้จากอากาศร้อนที่ไหลผ่านส่วนที่รับรังสี

ก. การไหลของอากาศร้อนเป็นแบบธรรมชาติ จะมีทั้งแบบมีปล่องระบายอากาศ แบบไม่มีปล่องระบายอากาศ จะใช้ช่องระบายอากาศซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องอบทำหน้าที่ระบายอากาศภายในเครื่องอบสู่ภายนอก

ข. การไหลของอากาศร้อนเป็นแบบถูกบังคับ เพื่อทำให้การไหลของอากาศมีสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของสารสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งนั้นดียิ่งขึ้น

4) แบบ green house เครื่องอบแห้งประเภทนี้มีลักษณะคล้ายบ้านหรือโรงเรือน มีจุดเด่นคือ หลังคาจะปิดด้วยวัสดุโปร่งแสงเช่น กระจกหรือพลาสติกใส เพื่อให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาในเครื่องอบ และมีช่องให้อากาศได้ระบายออกได้ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่และถ่ายเทอากาศภายในโรงเรือนดีขึ้น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ green house ยังสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

4.1) แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง คือ ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ green house นี้บางชนิดจะปิดด้วยกระจกหรือพลาสติกใส เพื่อเพิ่มปริมาณแสงอาทิตย์ให้เข้ามายังภายในได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณความร้อนที่ได้รับเพิ่มมากขึ้น เครื่องอบแห้งประเภทนี้ยังสามารถแบ่งตามการไหลของอากาศได้ดังนี้

ก. การไหลของอากาศเป็นแบบธรรมชาติ

- แบบมีปล่องระบายอากาศ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ green house แบบนี้จะเพิ่มปล่องระบายอากาศ เพื่อทำให้การไหลของอากาศภายในโรงเรือนดีขึ้น ซึ่งเป็นส่วนประกอบแทนในส่วนของช่องระบายอากาศภายในโรงเรือน ลักษณะปล่องระบายจะทำให้มีความต้องการไหลไปที่ที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจึงลอยตัวสูงขึ้น ปล่องระบายอากาศจึงต้องติดตั้งอยู่เหนือสุดของโรงเรือน

- แบบไม่มีปล่องระบายอากาศ จะใช้ช่องระบายอากาศซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้ง จะติดตั้งอยู่บริเวณบนสุดของโรงเรือนโดยทำเป็นช่องขนาดพอเหมาะตามขนาดของโรงเรือนทำหน้าที่เช่นเดียวกับปล่องระบายอากาศ เครื่องอบแบบนี้อาจสร้างได้ง่ายในแบบลักษณะเต็นท์ทั่วไป ซึ่งอาจเป็นทรงกลมหรือทรงเหลี่ยมก็ได้

ข. การไหลของอากาศร้อนเป็นแบบบังคับ อาศัยหลักการการใช้พัดลมสร้างแรงดันให้อากาศภายในเกิดการเคลื่อนที่ สามารถออกแบบการบังคับให้อากาศไหลของอากาศได้โดยสามารถติดตั้งพัดลมได้หลายแบบ เช่น ในแบบลักษณะดูดอากาศร้อนภายในเครื่องอบให้ผ่านวัสดุที่นำมาอบแห้ง หรือใช้อากาศร้อนภายในเครื่องอบเป่าผ่านวัสดุอบแห้ง

4.2) แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยทางอ้อม (indirect type) เครื่องอบแบบนี้ประกอบด้วย ส่วนรับรังสีแสงอาทิตย์ พัดลม และห้องอบแห้ง ห้องอบแห้งนี้จะป้องกันไม่ให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบได้โดยตรง การอบแห้งจะอาศัยความร้อนจากพื้นที่

รับแสงเป็นหลักคือ ส่วนรับแสงจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศแล้วจึงไหลผ่านไปยังวัสดุในห้องอบแห้ง

ก. การไหลของอากาศร้อนเป็นแบบธรรมชาติ ลักษณะการไหลของอากาศเป็นไปโดยธรรมชาติ การเคลื่อนที่ของอากาศสามารถเกิดขึ้นเองได้ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ

ข. การไหลของอากาศเป็นแบบบังคับ มีหลังคาเป็นพื้นที่รับแสงจะทาสีดำและปิดด้วยกระจก พัดลมจะดูดอากาศร้อนจากพื้นที่รับแสงเข้าสู่ห้องอบแห้ง วัสดุที่นำมาอบแห้งจะได้รับอากาศร้อนจากพื้นที่รับแสงเพียงอย่างเดียว

4.3) แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยผสม (mixed type) เครื่องอบชนิดนี้ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ทั้งโดยตรงและโดยอ้อมร่วมกัน

ก. การไหลของอาการแบบธรรมชาติ

ข. การไหลของอากาศแบบบังคับ ใช้พัดลมดูดอากาศร้อนภายในโรงเรือนให้ไหลผ่านวัสดุที่นำมาอบแห้งและไหลออกสู่ภายนอกโรงเรือน โดยได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์และพื้นที่รับแสง

2.5.3 ตัวรับรังสีทำอากาศร้อน

ตัวรับรังสีที่ต้องการผลิตอากาศร้อนสามารถแบ่งได้หลายประเภท ดังนี้

1) ตัวรับรังสีแบบอัดลม ตัวรับรังสีแบบนี้ทำด้วยพลาสติก ซึ่งอาจมีเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ ชั้นนอกมักทำด้วยพลาสติกใส ส่วนชั้นในทำด้วยพลาสติกสีดำซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นความร้อน พลาสติกใสมีคุณสมบัติที่ยอมให้รังสีดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้นส่งผ่าน แต่ให้ผลตรงข้ามสำหรับความร้อนซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นยาว หรืออาจยอมให้ผ่านเป็นบางส่วน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก ดังนั้นพลาสติกใสจึงทำให้การสูญเสียความร้อนลดน้อยลง ตัวรับรังสีแบบอัดลมจะแฟบเมื่อไม่มีอากาศไหลและจะพองตัวเมื่อเป่าลมเข้าในตัวรับรังสี ตัวรับรังสีแบบนี้ราคาถูก สามารถพับม้วนเก็บได้เมื่อไม่ต้องการใช้งาน แต่มีอายุการใช้งานสั้น

2) ตัวรับรังสีแบบรูปทรงสามเหลี่ยม ตัวรับรังสีแบบนี้ทำด้วยฟิล์มพลาสติกใสยึดติดบนโครงเหล็ก ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมภายในมีพลาสติกสีดำทำหน้าที่ดูดกลืนรังสี การทำงานคล้ายกับตัวรับรังสีแบบอัดลม

3) ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ นิยมใช้มากกว่าแบบอื่นๆ ใช้ในการรับรังสีแสงอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทให้กับของไหลซึ่งของไหลได้แก่ น้ำหรืออากาศ ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบนิยมใช้อย่างแพร่หลาย มีความเหมาะสมกับงานที่ไม่ต้องการอุณหภูมิสูง คือ 50-60 องศาเซลเซียส หรืออาจทำให้สูงถึง 80–90 องศาเซลเซียส ถ้าเป็นตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่มีแผ่นปิดด้านบน (cover plate) ของตัวรับรังสีมากกว่าหนึ่งชั้น

ตัวรับรังสีแบบนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

3.1) แผ่นดูดรังสี (absorber) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แล้วถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่านไปยังส่วนของเครื่องอบแห้ง

3.2) แผ่นปิดใสด้านบน (cover plate) ซึ่งอยู่ชั้นบนสุด ทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อน โดยจะไม่ยอมให้รังสีความร้อนส่งผ่านแผ่นปิดใสแต่มีข้อจำกัดคือ ไม่เหมาะสมในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงข้อดีคือ สามารถรับได้ทั้งรังสีตรง และรังสีกระจาย ไม่ต้องมีกลไกในการบังคับให้ตัวรับรังสีหันเข้าหาดวงอาทิตย์ บำรุงรักษาน้อย คุ้มค่าการใช้งาน

3.3) ฉนวนความร้อน อยู่ส่วนล่างสุดของตัวรับรังสี ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนทางด้านล่างของตัวรับรังสี

รูปแบบของตัวรับสังสีแบบแผ่นเรียบ มีหลายแบบ ได้แก่

1. แบบเปลือย ราคาถูกและสร้างง่าย แต่มีข้อเสีย คือ มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อความเร็วลมเหนือตัวรับรังสีมาก

2. แบบมีแผ่นใสปิด นิยมใช้มากใช้ปิดด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์ โดยยอมรับให้รังสีจากดวงอาทิตย์ผ่านเข้าไปถึงแผ่นดูดได้โดยตรง มีประสิทธิภาพสูง มีการสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดสู่บรรยากาศภายนอกลดลง เพราะมีแผ่นใสปิดและแผ่นใสยังป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับแผ่นดูดอีกด้วย

3. แบบมีแผ่นใสปิดและมีชั้นอากาศนิ่ง มีประสิทธิภาพสูงมาก แต่มีความยุ่งยากในการก่อสร้างกว่าแบบอื่น

4. แบบติดตั้งบนเครื่องอบแห้ง มีพื้นที่ติดตั้งประมาณ 2 ใน 3 ส่วนของพื้นที่ทั้งหมด สามารถลดต้นทุนโดยใช้ผนังเป็นตัวดูดรังสี แล้วปิดด้วยแผ่นปิดใส

5. แบบติดตั้งบนหลังคาและผนังโรงเรือน สามารถลดต้นทุนได้

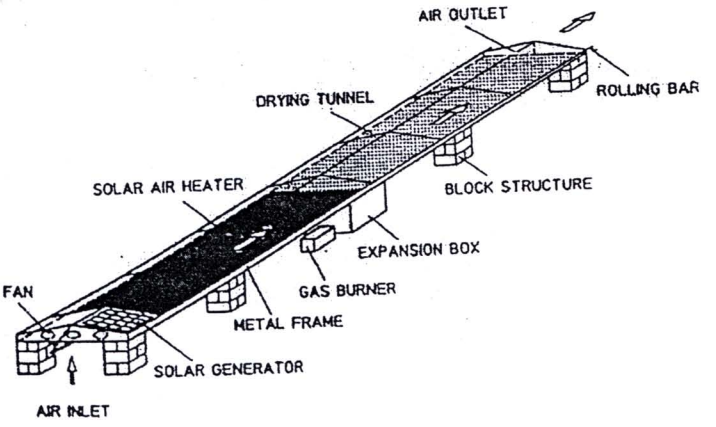
6. แบบตัวรับรังสีและตัวเก็บความร้อน ตัวเก็บความร้อนสร้างจากก้อนหิน ซึ่งทาสีดำด้านที่รังสีตกกระทบ ด้านบนสุดปิดด้วยแผ่นปิดใส อากาศจะไหลผ่านชั้นก้อนหินก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง ตัวเก็บความร้อนจะทำหน้าที่คอยปรับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่อบแห้งลดลง

2.5.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ (solar tunnel dryer)

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้พัฒนาโดย Institute for Agricultural Engineering in the Tropics and Subtropics มหาวิทยาลัย Hohenheim ประเทศเยอรมัน

ผลิตเพื่อใช้ในครัวเรือน เป็นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม คือ สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบทางตรง และทางอ้อม พลังงานที่ใช้เป็นการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้พัดลมขนาด 70 วัตต์ ความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 1,400 รอบต่อนาที อัตราการไหลโดยมวลของอากาศอยู่ในช่วง 0–1,360 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ความยาวของเครื่องเท่ากับ 18 เมตร และมีความกว้าง 2 เมตร เหมาะกับพื้นที่เขตร้อนและร้อนชื้นที่ห่างไกลไฟฟ้า และพลังงานรูปแบบอื่นไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแดดจะลดเวลาการอบแห้งได้ถึงร้อยละ 50 และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพที่ดีกว่าทั้งทางด้านสี รสชาติ เนื้อสัมผัส และอายุการเก็บรักษานานกว่า

เครื่องอบแห้งจะมีลักษณะเป็นหลังคาพลาสติกคลุม ส่วนตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แผ่นเรียบและส่วนอุโมงค์อบแห้ง อากาศเย็นจะถูกดูดเข้าเครื่องโดยพัดลมผ่าน heating area จากนั้นส่งไปยัง drying area การไหลของอากาศร้อนจะผ่านชิ้นตัวอย่างอาหารทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นอากาศชื้นจะออกทางด้านปลายเครื่อง และวางอาหารที่อบแห้งให้เต็มตาข่ายในอุโมงค์ เพื่อให้ได้รับพลังงานจากนั้นอากาศร้อนจากตัวรับรังสี และจากการตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ผิวสีดำของแผ่นดูดในส่วนของ collector แล้วทำให้อากาศผ่านส่วนสีดำร้อนขึ้น ดังแสดงในภาพ 2.6



ภาพ 2.6 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์

ที่มา : Schirmer *et al* (1995)

1) ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์

1.1) Heating area คือ ส่วนของพื้นที่ที่ทาสีดำ คลุมด้วยพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน ความหนา 0.2 มิลลิเมตร มีพื้นที่ทั้งหมด 14 ตารางเมตร

1.2) Drying area คือ ส่วนของอุโมงค์อบแห้ง หรือส่วนของพื้นที่ที่ใช้วางอาหารที่จะอบแห้ง ปูด้วยตาข่ายเพื่อให้อากาศไหลผ่านด้านล่างของตัวอย่างคลุมด้วยพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน ความหนา 0.2 มิลลิเมตร มีพื้นที่ทั้งหมด 20 ตารางเมตร

1.3) Fan คือ พัดลมดูดอากาศเข้าสู่เครื่องอบแห้งมีทั้งหมด 3 ตัว

1.4) Air inlet คือ ช่องที่อากาศถูกดูดเข้าเครื่อง โดยพัดลมดูดอากาศ

1.5) Solar generator คือ แผง solar cell ที่ให้พลังงานขับเคลื่อนแก่พัดลม

1.6) Metal frame คือ โครงโลหะ

1.7) Gas burner คือ ส่วนของพลังงานเสริมจากก๊าซ กรณีที่พลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ

1.8) Solar air heater คือ ส่วนที่ทาสีดำ ใช้เก็บพลังงานแสงอาทิตย์ และให้ความร้อนแก่อากาศที่ผ่านไปยังอุโมงค์อบแห้ง

1.9) Air outlet คือ ทางออกของอากาศชื้น

1.10) Rolling bar คือ ไม้หมุนโลหะ ใช้เปิดปิดส่วนอุโมงค์อบแห้ง โดยการหมุนแผ่นพลาสติกที่คลุมเครื่องขึ้นลง

1.11) Block structure คือ ส่วนฐานที่ก่อด้วยอิฐใช้วางเครื่องเหนือพื้นดินป้องกันการนำความร้อนจากเครื่องไปสู่พื้น (Schirmer et al., 1995)

การสร้างเครื่องอบแห้งอย่างง่าย และลดต้นทุนทำได้โดยเชื่อมแผ่นรวมแสงโดยตรงกับอุโมงค์อบแห้ง โดยไม่ให้อากาศเข้าพื้นผิวชั้นบนของแผ่นรวมแสงสีดำ และแผ่นพลาสติกนี้จะยึดกับเฟรมเพื่อทำให้พลาสติกที่หนีบแข็งแรง ตัวอุโมงค์อบแห้งประกอบด้วยลวดที่เป็นตะแกรง จะนำอาหารที่ต้องการอบแห้งมาวางบนนี้ เพื่อให้อากาศไหลผ่านพื้นที่ผิวด้านล่างของวัตถุได้ อุโมงค์อบแห้งทำด้วยหลังคาที่เป็นพลาสติก เพื่อให้รังสีผ่านอย่างสม่ำเสมอ พลาสติกด้านหนึ่งยึดกับโครงของอุโมงค์ และอีกด้านหนึ่งยึดกับท่อโลหะเพื่อใช้ม้วนแผ่นพลาสติกขึ้นลงได้ เพื่อที่จะบรรจุอาหารเข้าและนำอาหารออกได้ง่าย

การขึงพลาสติกที่ใช้ยึดแผ่นพลาสติกกับท่อ และการยึดพลาสติกกับโครงของอุโมงค์ วิธีการยึดติดแบบนี้ได้ถูกออกแบบมา เพื่อที่จะทำให้การเปลี่ยนแผ่นพลาสติกทำได้สะดวก โดยทั่วไปแผ่นพลาสติกมีอายุการใช้งานนาน 1–2 ปี พัดลมแสงอาทิตย์ถูกติดไว้ด้านหลังของแผ่นรวมรังสี เพื่อดูดอากาศรอบๆ ให้เข้ามาในแผ่นรวมแสง ส่วนอุโมงค์ตั้งอยู่บนบล็อกคอนกรีต พื้นที่ของการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีขนาดที่เท่ากับพื้นที่ในการตากแห้งภายในอุโมงค์

2) คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้กับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์

2.1) Absorber (แผ่นดูดรังสี)

- สามารดูดกลืนรังสีได้สูง
- ทนต่อความร้อนสูง
- มีการกระจายที่ต่ำ
- สามารถนำความร้อนได้สูง
- สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี
- จับฝุ่นน้อย
- มีอายุการใช้งานได้นาน

2.2) ฉนวนความร้อน

- สามารถนำความร้อนได้ต่ำ

- สามารถทนความร้อนได้ดี
- ดูดน้ำได้น้อย
- สามารถป้องกันแมลงและสัตว์ได้
- ทนไฟ

2.3) Cover (แผ่นปิดใสด้านบน)

- สามารถทนความร้อนและสามารถลดการสูญเสียความร้อนได้ดี
- ยอมให้รังสีแสงอาทิตย์ผ่านได้สูง
- ทนต่อการเสื่อมเสียจากรังสีอัลตราไวโอเลต หรือฝุ่นละออง
- ทนต่อแรงฉีกขาดจากลม หิมะ ลูกเห็บ
- ทนน้ำและอากาศ
- ง่ายและปลอดภัยในการติดตั้ง
- ทำความสะอาดง่าย
- น้ำหนักเบา

3) ความต้านทานการไหลของอากาศ

เนื่องจากใช้พัดลมเป็นตัวขับอากาศซึ่งอาจมีความต้านทานการไหลขึ้นอยู่กับ

3.1) รูปร่างของ solar air heater

3.2) ชนิดของ solar air heater

3.3) ความเร็วลม

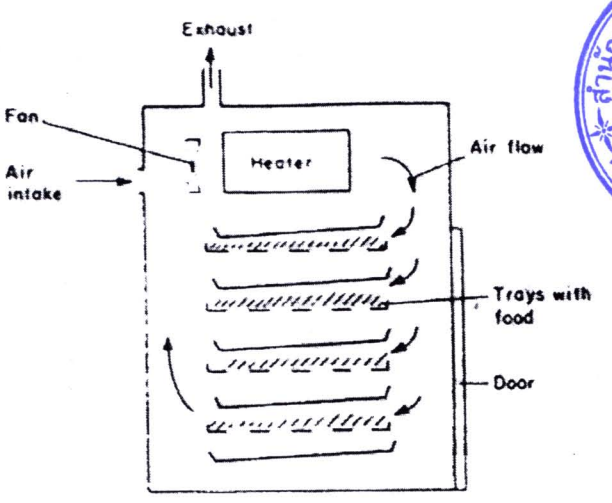
3.4) อัตราการไหล

3.5) ความขรุขระของ collector และ drying chamber

2.6 เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด

เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดประกอบด้วยถาดเตี้ยๆ ที่มีช่องตาข่ายอยู่ด้านล่างและบุเครื่องด้วยฉนวนในแต่ละถาดจะบรรจุอาหารชิ้นบางๆ ขนาด 2-6 เซนติเมตร อากาศร้อนจะไหลหมุนเวียนอยู่ในตู้ที่ความเร็วลม 0.5-5 เมตร/วินาที/เมตร^2 ของพื้นที่ผิวของถาด มีระบบท่อเพื่อนำลมร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดเพื่อให้ลมร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มด้านบนหรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการทำแห้ง นิยมใช้สำหรับการผลิตอาหารในปริมาณต่ำ หรือสำหรับใช้ในโรงงานต้นแบบ เครื่องอบชนิดนี้ใช้เงินลงทุนและค่าดูรักษาต่ำแต่

ควบคุมดูแลยาก และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ดังภาพ 2.7 แสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดทั่วไป



ภาพ 2.7 การทำงานของเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดทั่วไป

ที่มา : Karel (1975)

เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด เป็นเครื่องอบแห้งแบบชั้นมีลักษณะเป็นตู้สูงทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ภายในอาจวางถาดได้ตั้งแต่ 5-8 ชั้น มีส่วนประกอบดังนี้

1) ตู้เหล็กฉนวนสูงรูปสี่เหลี่ยม ภายในวางถาดอาหารที่จะอบแห้งได้ 5-8 ชั้น (ในอุตสาหกรรมอาจใช้ตู้ใหญ่มีจำนวนเป็นสิบๆ ชั้น)

2) ถาดที่ใช้วางอาหารควรทำจากเหล็กปลอดสนิม

3) มอเตอร์ (เพื่อทำหน้าที่หมุนเวียนลมร้อน)

4) ขดลวดร้อนที่ให้ความร้อนสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส

5) เครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ (โดยทั่วไปควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส) หากอุณหภูมิสูงเกิน 70 องศาเซลเซียส อาหารจะแห้งเร็วเกินไป โปรตีนตกตะกอนและอาหารจะมีสีคล้ำ

2.6.1 ระบบการทำงาน

เป็นเครื่องมือทำแห้งลมร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทำงานที่ความดันบรรยากาศ ลักษณะของเครื่องจะเป็นตู้บุฉนวน มีถาดสำหรับใส่อาหารเรียงเป็นชั้นอยู่ภายใน ลมร้อนจะถูกบังคับให้หมุนเวียนโดยพัดลม การหมุนเวียนของอากาศจะเป็นในแนวนอนขนานกับถาดใส่อาหารหรือในแนวดิ่งผ่านทะลุถาดใส่อาหาร ความเร็วของลมร้อนที่นิยมใช้สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวนอน คือ 2-5 เมตร/วินาที ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งนิยมใช้ปริมาณอากาศร้อน 0.5-1.25 ลูกบาศก์เมตร/วินาทีต่อตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัดของถาด แหล่งความร้อนที่ใช้อาจเป็นการเผาไหม้ของก๊าซ ไอน้ำ หรือจากขดลวดให้ความร้อน (ภูธร, 2541)

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด เป็นการอบที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้สำหรับพาความชื้นออกจากวัตถุดิบค่อนข้างสูง ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารที่จะอบ ดังนั้นวัตถุดิบควรเป็นประเภทที่ไม่ไวต่อความร้อนและเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย ราคาไม่แพงเพื่อการเพิ่มมูลค่าการตลาด สำหรับข้อดีของตู้อบแห้งแบบถาดคือ เสียค่าใช้จ่ายในการสร้างและการบำรุงรักษาต่ำ มีความยืดหยุ่นของการใช้งานสูง นิยมใช้ในการอบแห้งผักและผลไม้ นอกจากนั้นยังนิยมใช้ในกระบวนการผลิตขนาดเล็กหรือในโรงงานขนาดเล็ก แต่เนื่องจากเป็นวิธีดั้งเดิมในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีการให้ความร้อนสูงและใช้เวลานาน จึงทำให้เกิดข้อเสียต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการเสียไป

2.7 เครื่องอบไมโครเวฟสุญญากาศ

การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ เป็นกระบวนการทำแห้งที่ใช้ระบบไมโครเวฟร่วมกับระบบการทำแห้งภายใต้สุญญากาศ (สายสนมและคณะ, 2546) ใช้หลักการลดจุดเดือดของน้ำในผลิตภัณฑ์ลงโดยใช้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งสามารถทำให้น้ำเดือดที่อุณหภูมิต่ำเพื่อรักษาสี รูปทรง รส กลิ่น และสารอาหารให้ได้ใกล้เคียงกับของสด การให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟแตกต่างจากการให้ความร้อนโดยวิธีปกติ ที่ความร้อนจะเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกเข้าสู่ใจกลางของผลิตผลแล้วทำให้ไอน้ำระเหยออกมาผลผลิตจะค่อยๆ แห้ง จากผิวนอกเข้าไปสู่แกนกลาง ผิวซึ่งแห้งแล้วก็จะเป็นฉนวนความร้อน ทำให้การนำความร้อนลดลงจึงต้องใช้เวลาอบแห้งนานแล้วยังมีผลให้ผิวนอกแข็งและมีสีคล้ำ ส่วนวิธีการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟนั้นทุกส่วนของผลิตผลที่นำมาอบแห้งจะได้รับพลังงานพร้อมกัน ทำให้ไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์

เคลื่อนที่จากภายในออกสู่ผิวนอก ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปทรงคล้ายรูปเดิม และการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาน้อยกว่าวิธีอื่นมาก ทำให้ประหยัดพลังงานในการอบแห้ง และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีใกล้เคียงกับของเดิม เพราะได้รับความร้อนเป็นเวลาสั้นๆ เท่านั้น (วีระชัย, 2544) นอกจากนั้นการอบแห้งโดยวิธีนี้ยังสามารถทำได้ตลอดเวลาไม่ว่าสภาวะอากาศจะเป็นอย่างไร

2.7.1 ระบบการทำงาน

เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน เป็นการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศ ซึ่งมีส่วนประกอบของเครื่องที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1) ถังอบไมโครเวฟ ถังอบไมโครเวฟ มีลักษณะเป็นห้องอบแห้งทรงกระบอก และมีท่อนำคลื่นไมโครเวฟต่ออยู่ด้านข้างของผนังถัง เพื่อนำคลื่นไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิด (แมกนีตรอน) มาสู่บริเวณภายในห้องอบที่มีถังหมุน ซึ่งเป็นส่วนที่ใส่วัตถุดิบที่ต้องการอบแห้ง โดยได้มีการออกแบบให้มีครีบอยู่ภายใน ทำหน้าที่พาผลิตภัณฑ์ขึ้นไปแล้วปล่อยให้ตกลงมาอย่างอิสระ ทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานไมโครเวฟอย่างทั่วถึง และไอน้ำที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์สามารถเคลื่อนที่ออกไปได้สะดวก ทำให้การอบแห้งใช้เวลาน้อย

2) เครื่องดักจับไอน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ลดอุณหภูมิของไอน้ำ เนื่องจากในสภาวะสุญญากาศ มีแรงดันต่ำ น้ำจะสามารถกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อปั๊มสุญญากาศทำหน้าที่ดูดออกและถ่ายเทออกสู่บรรยากาศ ไอน้ำที่ดูดออกมานี้จะไปผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นในปั๊ม ทำให้ประสิทธิภาพของปั๊มลดลง และส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของปั๊มอีกด้วย การมีเครื่องดักจับไอน้ำ เป็นการลดอุณหภูมิของไอน้ำลงต่ำจนเกิดการควบแน่นกลายเป็นน้ำ จึงเหลือเฉพาะส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้เท่านั้นที่ผ่านไปยังปั๊มสุญญากาศ เช่น สารประกอบระเหยชนิดต่าง ๆ

3) ปั๊มสุญญากาศ เครื่องปั๊มสุญญากาศเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ดูดอากาศทำให้เกิดสภาพสุญญากาศภายในถังอบ

อย่างไรก็ตาม การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศก็ยังมีข้อจำกัดอย่างหนึ่งคือ มีการใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูง หากมีการใช้ระบบที่ผสมผสานกันระหว่างการอบแห้งวิธีดั้งเดิมที่ใช้ระบบลมร้อน สำหรับใช้ในการกำจัดความชื้นที่ระเหยได้ง่ายออกไป ตามด้วยการอบแห้งด้วยระบบไมโครเวฟแบบสุญญากาศสำหรับกำจัดความชื้นที่ระเหยได้

ยากออกไปในขั้นตอนสุดท้ายของการอบแห้ง อาจช่วยลดต้นทุนได้มากกว่าการอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟแบบสุญญากาศเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลิตภัณฑ์และต้นทุนของแหล่งพลังงาน ก็เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณา เนื่องจากมีผลต่อการเลือกกระบวนการในการทำแห้ง และต้องมีการพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งต้องมีคุณภาพสูงและเป็นที่ต้องการในท้องตลาด

2.8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง

ในการทำแห้งอาหารทั่วๆ ไป มีปัจจัยหลายประการที่ทำให้การอบแห้งนั้นเกิดได้เร็ว และช้า ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

2.8.1 ลักษณะธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมากๆ จะมีอัตราการอบแห้งเร็ว นอกจากนั้นพื้นที่ผิวของอาหารก็จะมีผลต่ออัตราการอบแห้งมาก อาหารที่มีพื้นที่ผิวมากๆ การอบแห้งก็จะทำได้เร็ว

2.8.2 ขนาดและรูปร่างของอาหาร ส่วนใหญ่จะคำนึงถึงเฉพาะความหนาของอาหารเนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร ยิ่งอาหารมีความหนามากขึ้นการอบแห้งจะเกิดได้ช้าลง

2.8.3 ปริมาณอาหาร อาหารที่ใส่ในเครื่องอบแห้งและการจัดเรียงเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งการใส่ปริมาณอาหารมากเกินไปในเครื่องอบแห้งจะทำให้การอบแห้งทำได้ไม่ทั่วถึงโดยเฉพาะบริเวณช่วงกลางๆ น้ำจะระเหยออกได้ไม่ดี ความร้อนเข้าไปไม่ค่อยถึง ยิ่งถ้าจัดเรียงไม่ดีแล้ว จะทำให้อัตราการอบแห้งเกิดได้ช้ามาก

2.8.4 ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) เมื่อทำการอบแห้งโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ ความชื้นของผลผลิตจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่ง ซึ่งผลผลิตมีค่าความชื้นคงที่หรือความชื้นในผลผลิตมีความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ เรียกความชื้นนี้ว่า “ปริมาณความชื้นสมดุล” ค่าปริมาณความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิต อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.8.5 คุณสมบัติอากาศชื้น อากาศชื้นประกอบด้วย อากาศแห้งและไอน้ำ โดยปกติจะใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการอบแห้ง ส่วนอากาศที่ไม่มีไอน้ำอยู่ เรียกว่า "อากาศแห้ง"

2.8.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ความชื้นของอากาศเป็นสิ่งสำคัญ การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศ และความเร็วลม

2.8.7 ความดันที่เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากที่ความดันต่ำๆ น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น (นิธิยา, 2544)

2.9 ผลของการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของอาหารอบแห้งในด้านต่าง ๆ

2.9.1 ผลการอบแห้งที่มีต่อคุณค่าอาหาร

การอบแห้งจะระเหยไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากอาหาร และเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบของอาหาร เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน การถนอมอาหารโดยวิธีการอบแห้งจะทำให้คุณภาพอาหารลดลง โดยเฉพาะวิตามินที่ละลายน้ำจะสูญเสียไปกับน้ำ และถ้ามีการลวกหรือการแช่สารเคมีก่อนการอบแห้งเพื่อหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ วิตามินก็จะลดลงอีกโดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบแห้งโดยการตากแดด จะส่งผลให้วิตามินลดลงไปมากกว่าการอบแห้งโดยใช้เครื่องมืออบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งโดยการตากแดดไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้ง เช่น ความชื้น อากาศ แสงแดด อุณหภูมิ ส่วนการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้

2.9.2 ผลการอบแห้งที่มีต่อโปรตีน

อาหารที่มีโปรตีนจะสูญเสียคุณค่าไปมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับวิธีการอบอาหารให้แห้ง ถ้าใช้เวลานานเกินไป และใช้อุณหภูมิสูงโปรตีนจะเปลี่ยนสภาพและคุณค่าทางโภชนาการจะลดลง แต่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อทำให้อาหารแห้งจะสามารถใช้ประโยชน์จากโปรตีนได้มากกว่า แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีนด้วย

2.9.3 ผลของการอบแห้งที่มีต่อคาร์โบไฮเดรต

การทำให้อาหารแห้งมีผลต่ออาหารที่เป็นคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากจะเกิดปัญหาเรื่อง การเปลี่ยนแปลงสีของผลไม้ตากแห้งซึ่งเกิดจาก non-enzymatic browning หรือ caramelization ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดจากปฏิกิริยาของกรดอะมิโนในอาหารกับน้ำตาลรีดิวซิง (reducing sugar) ทำให้เกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งป้องกันโดยใช้สารเคมี เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือ โซเดียมเม-ตาไบซัลไฟต์ การรมควันจะสามารถควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในอาหารได้ แต่อาหารนั้นต้องมีความชื้นต่ำมากๆ อาหารแห้งจะเกิดสีน้ำตาลถ้าอาหารนั้นมีความชื้นประมาณร้อยละ 30

2.9.4 ผลของการอบแห้งต่อปริมาณไขมัน

ถ้าใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงจะทำให้อาหารที่อบแห้งเกิดการเหม็นหืน ดังนั้นจึงควรใช้อุณหภูมิต่ำหรือใช้สารเคมีบางชนิดป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้พวกสารกันหืน เช่น BHT (butylated hydroxyl toluene)

2.9.5 ผลของการอบแห้งต่อเอนไซม์

เอนไซม์จะหยุดกิจกรรมเมื่อใช้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซสเซียส เป็นเวลา 1 นาที แต่ถ้าใช้ความร้อนในกระบวนการอบแห้ง (dehydration) ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะทนทานถึง 204 องศาเซลเซียส ดังนั้นในกระบวนการอบแห้ง จึงต้องลวกน้ำร้อนก่อนหรือใช้สารเคมีเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ในอาหารที่จะนำไปอบแห้ง นอกจากนี้ปฏิกิริยาของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของอาหาร ถ้าความชื้นในอาหารลดลงปฏิกิริยาก็ลดลงด้วย แต่อัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้นข้นของเอนไซม์และอาหาร ถ้าความชื้นลดลงต่ำกว่าร้อยละ 1 ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะไม่เกิดขึ้น

2.9.6 ผลของการอบแห้งต่อเม็ดสีในอาหาร

อาหารอบแห้งจะมีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป สีของอาหารจะเปลี่ยนไป เม็ดสีพวกแคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานินจะซีดจางลง ถ้าใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลานาน หรือใช้สารอาหารบางชนิดในการอบแห้ง เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ เช่น รมควัน

ด้วยกำมะถัน จะทำให้สีของอาหารจางลง ดังนั้นพวกผักและผลไม้จึงมีการตรึงสีก่อนอบแห้ง โดยการลวกน้ำร้อนหรือแช่สารเคมี เช่น สารละลายด่างอ่อน จะไม่ทำให้ผักผลไม้มีสีจางลงหรือมีสีน้ำตาล แต่อาหารจะแข็งกระด้างขึ้น การอบแห้งยังสามารถเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ นั่นคือ Maillard reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางอินทรีย์ที่เกิดจากกรดอะมิโนทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซิงซึ่งจะทำให้เกิดสีน้ำตาล และทำให้กลิ่นรสของอาหารเปลี่ยนไป (กุลยา, 2540)

2.9.7 ผลของการอบแห้งต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร

การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่แข็ง เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพ ลักษณะและการจัดการเบื้องต้น เช่น การเติมแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำที่ใช้ลวก ชนิดและลักษณะการลดขนาดและการปอกเปือก ล้วนมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ที่นำมาดูดคืนน้ำใหม่ในอาหารที่ผ่านการลวกอาจเกิดการสูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัส เนื่องจากการเกิดเจลของแป้ง การตกผลึกของเซลลูโลส การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการทำแห้ง ส่วนต่างๆ ของอาหารทำให้เกิดความเครียดภายใน ปัจจัยเหล่านี้จะอัดและเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอาหารที่ค่อนข้างแข็งทำให้อาหารมีลักษณะเหี่ยวย่น อาหารจะดูดกลืนความชื้นอีกครั้งในระหว่างการดูดคืนน้ำอย่างช้าๆ แต่จะไม่มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แน่นเหมือนวัตถุดิบเดิม

อุณหภูมิและอัตราการทำแห้งมีผลมากต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยทั่วไปการทำแห้งโดยรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิและอัตราการทำแห้งที่ต่ำกว่า ตัวทำละลายจะเคลื่อนที่จากภายในของอาหารไปที่ผิว ระหว่างที่น้ำจะถูกกำจัดออกระหว่างการทำแห้ง กลไกและอัตราการเคลื่อนที่มีความจำเพาะสำหรับตัวทำละลายแต่ละชนิดและขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและสภาวะการทำแห้ง การระเหยน้ำทำให้ตัวทำละลายที่ผิวอาหารมีความเข้มข้นมากขึ้น อุณหภูมิที่สูงของอากาศทำให้อาหาร โดยเฉพาะผลไม้ ปลา และเนื้อ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพอย่างซับซ้อนที่ผิวหน้าอาหาร ทำให้ผิวอาหารแห้งแข็งหรือที่เรียกว่า การเกิดผิวแห้งแข็ง (case hardening) ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะไปลดอัตราการทำแห้ง และทำให้อาหารมีผิวหน้าแห้งแต่ภายในชื้น การควบคุมสภาวะการอบแห้งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นภายในและที่ผิวของอาหาร จะช่วยลดเหตุการณ์ดังกล่าวได้

2.9.8 ผลของการอบแห้งต่อกลิ่นรส

ความร้อนนอกจากจะทำให้น้ำระเหยแล้ว ยังทำให้สารหอมระเหยบางชนิดสูญเสียไป ปริมาณการสูญเสียสารหอมระเหยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความเข้มข้นของของแข็งในอาหาร ความดันไอ และความสามารถในการละลายในไอน้ำของสารหอมระเหย สารหอมระเหยที่มีความสามารถในการระเหย และการแทนที่สูงจะเกิดการสูญเสียในช่วงแรกของการอบแห้ง มีสารระเหยปริมาณน้อยที่เกิดการสูญเสียช่วงหลังของการทำแห้ง การควบคุมสภาวะการทำแห้งในแต่ละขั้นตอนจะช่วยลดการสูญเสียให้น้อยที่สุด อาหารให้กลิ่นรสที่มีมูลค่าสูง เช่น สมุนไพร และเครื่องเทศ จะใช้อุณหภูมิในการกำจัดน้ำต่ำ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของรงควัตถุ วิตามิน และไขมันในอาหารระหว่างการเก็บรักษาก็เป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียกลิ่น อาหารแห้งซึ่งมีรูอยู่มากจะทำให้มีก๊าซออกซิเจนอยู่มากด้วย อุณหูมิในการเก็บรักษาและค่าวอเตอร์แอคติวิตี (water activity; a_w) จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเสื่อมเสียของอาหาร ปฏิกิริยาออกซิเดชันของนมผงแห้งทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืน ส่วนผักและผลไม้เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันจะทำให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน ดีไฮเดรชัน หรือออกซิเดชันและกลายเป็นแอลดีไฮด์ คีโตน และกรดซึ่งทำให้เกิดการเหม็นหืน สามารถลดปฏิกิริยาเหล่านี้ได้โดยการบรรจุผลิตภัณฑ์ในสุญญากาศ หรือเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำ การกำจัดแสงอุลตร้าไวเลต การรักษาความชื้นให้ต่ำ และเติมสารที่สามารถป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน อัตราการเกิดสีน้ำตาลในนมหรือผลิตภัณฑ์ผลไม้ในระหว่างการเก็บรักษานั้น ขึ้นอยู่กับค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ของอาหารและอุณหภูมิการเก็บรักษา อัตราการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิการทำแห้งสูง เมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงกว่าร้อยละ 4-5 และอุณหภูมิการเก็บรักษาเกิน 38 องศาเซลเซียส

2.9.9 ผลของการอบแห้งต่อการดูดคืนน้ำ

การดูดคืนน้ำไม่ใช่ปฏิกิริยาย้อนกลับของการทำแห้ง การเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะเนื้อสัมผัส การเคลื่อนที่ของตัวละลายและการสูญเสียสารระเหยไม่สามารถเกิดการย้อนกลับไปเหมือนเดิมได้ ความร้อนลดระดับการดูดคืนน้ำของแป้งและความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ ทำให้โปรตีนจับตัวกัน และลดความสามารถในการอุ้มน้ำ อัตราเร็วและระดับของการดูดคืนน้ำอาจใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของอาหารได้ อาหารที่ทำแห้งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมมากกว่าจะเกิดความเสียหายน้อยกว่า และดูดคืนน้ำได้เร็วกว่าอาหารที่ทำแห้งที่สภาวะที่เหมาะสมน้อยกว่า (วิไล, 2546)

2.9.10 ผลของการอบแห้งต่อจุลินทรีย์

แม้ว่าจุลินทรีย์บางชนิดจะตายระหว่างการทำแห้ง แต่โดยทั่วไปแล้วการทำแห้งไม่มีผลต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ และการสูญเสียของอาหารแห้งมักมีจุลินทรีย์เป็นสาเหตุสำคัญ เนื่องจากแบคทีเรียต้องการปริมาณค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ หรือ a_w มากกว่า 0.90 ดังนั้นแบคทีเรียจึงไม่มีบทบาทในการเสียของอาหารแห้ง ยีสต์ และราเท่านั้นที่มีบทบาทสำคัญต่อการเสียของอาหารแห้ง อาหารที่มี a_w ช่วง 0.80-0.85 จะเสียภายใน 1-2 อาทิตย์ โดยมีราเป็นสาเหตุ ถ้าอาหารมี a_w ต่ำกว่า 0.75 การเสียจะเกิดช้า และมีจุลินทรีย์เพียงไม่กี่ชนิดที่ทำลายได้ ถ้าอาหารมี a_w 0.7 การเสียจะเกิดช้ามาก และหากอาหารมี a_w 0.65 การเสียแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย สามารถเก็บอาหารนี้ได้นานมากกว่า 2 ปี ดังนั้นถ้าต้องการเก็บอาหารแห้งไว้นานๆ ควรทำแห้งอาหารจนมี a_w อยู่ระหว่าง 0.65-0.70 (อรัญ, 2530)

2.10 น้ำในอาหาร

น้ำเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในอาหารธรรมชาติทั่วไป คือมีอยู่ระหว่างร้อยละ 70-95 น้ำที่มีอยู่ในอาหารมักเรียกว่า "ความชื้น" น้ำเป็นส่วนประกอบหลักของอาหารทุกชนิดโดยอยู่ในรูปอิสระ (free water) และเกาะเกี่ยวกับสารอื่น (bound water) น้ำอิสระเป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างอาหาร อาจมีการเกาะตัวกับองค์ประกอบของอาหารบ้าง ด้วยแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก มีคุณสมบัติเหมือนน้ำปกติ สามารถเป็นตัวทำละลายได้ มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี และจุลินทรีย์สามารถนำน้ำไปใช้ในการดำรงชีวิตได้ แต่น้ำส่วนนี้ก็ยังมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับน้ำอิสระในธรรมชาติอย่างแท้จริง จึงนิยมเรียกน้ำอิสระนี้ว่า "แอกทีฟวอเตอร์" (active water) ซึ่งหมายถึงน้ำที่ยังคงรักษาคุณสมบัติของน้ำอิสระไว้ได้ (ณรงค์, 2538) ส่วนน้ำที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่นเป็นน้ำที่เกาะติดกับอาหารด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก อาจเป็นพันธะโควาเลนต์หรือพันธะอื่นๆ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย ไม่มีส่วนในปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์ ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Duckworth, 1972)

ในอาหารมีองค์ประกอบที่ละลายน้ำ หรือเกิดคอลลอยด์กับน้ำได้หลายชนิด องค์ประกอบเหล่านี้จะสร้างพันธะกับน้ำ น้ำซึ่งอยู่ในสถานะเกาะเกี่ยวกับพันธะอื่น ส่วนที่เหลือเป็นน้ำอิสระ น้ำอาจถูกดูดซับด้วยสารคอลลอยด์ และอยู่ในสภาพของเจลที่พองตัวเนื่องจากคุณสมบัติการมีขั้วของน้ำ น้ำชนิดนี้เรียกว่า น้ำของไฮเดชัน นอกจากนั้นน้ำอาจจับตัวกับเกลือบางชนิดซึ่งสามารถไล่ออกไปได้ด้วยวิธีการแปรรูปธรรมดา ถ้าองค์ประกอบของอาหารหรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อ

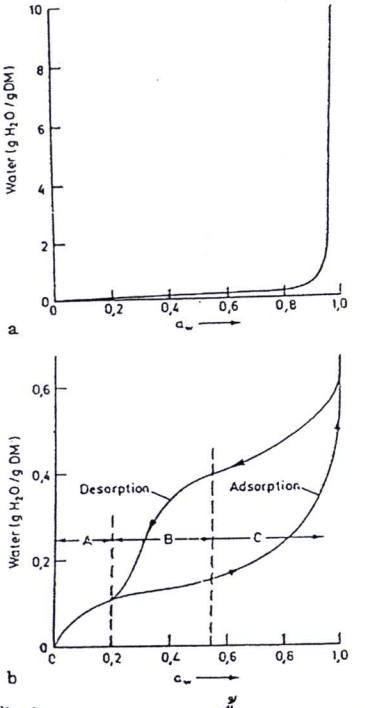
น้ำอิสระโดยทางอ้อม จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระไม่คงที่ อาหารต่างชนิดกันซึ่งมีความชื้นเท่ากันจึงไม่จำเป็นต้องมีน้ำอิสระเท่ากัน ถ้าอาหารมีน้ำอิสระมากจะเน่าเสียง่าย เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ การทราบปริมาณน้ำอิสระในอาหารจึงสำคัญมากในการคาดคะเนว่า อาหารจะเกิดการเสื่อมเสียโดยจุลินทรีย์หรือไม่ (ณรงค์, 2538)

การวัดปริมาณน้ำอิสระโดยตรงทำได้ยาก อย่างไรก็ตามน้ำอิสระมีความสัมพันธ์กับความดันไอตามกฎของเราท์ (Raoult's low) กล่าวคือ ความดันไอเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณน้ำอิสระ ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ค่าความดันไอเป็นตัววัดความเป็นอิสระของน้ำ โดยที่ความเป็นอิสระของน้ำหรือวอเตอร์แอกติวิตี้จะมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนน้ำอิสระต่อน้ำที่มีอยู่ทั้งหมดในอาหาร (วิไล, 2546)

2.11 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี

วอเตอร์แอกติวิตี (water activity : a_w) หรือปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เป็นน้ำที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลทางเคมีของอาหาร (bound water) และยังเป็นอิสระ (free water) อยู่ในอาหาร หากมีมากจะทำให้อาหารเก็บไว้นานไม่ได้ หรือทำให้ว่าอายุการเก็บรักษา (shelf life) สั้น การวิเคราะห์หาความชื้นในอาหาร หาได้จากการนำอาหารไปอบแล้วชั่งหาน้ำหนักของของแข็งที่เหลือ ทำให้ทราบความชื้นหรือปริมาณน้ำที่หายไป แล้วคำนวณออกมาเป็นร้อยละของความชื้นหรือร้อยละของน้ำที่อยู่ในอาหาร อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำหรือความชื้นในอาหาร ไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ดังนั้น แม้อาหารบางชนิดจะมีความชื้นสูงกว่าอาหารอีกชนิดหนึ่ง แต่อาหารที่มีความชื้นสูงกว่านี้อาจมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่าก็เป็นได้ ขึ้นกับอาหารชนิดนั้น ๆ จะมีคุณสมบัติการเก็บกักน้ำ (hygroscopicity) ได้มากน้อยเพียงใด สารที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำ ได้แก่ น้ำตาล เกลือ หรือสารโพลีอัลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจเรียกสารเหล่านี้ว่า humectants สำหรับค่าวอเตอร์แอกติวิตีนี้ ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น การเกิดออกซิเดชัน การเกิดสีน้ำตาล ตลอดจนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากภาพ 2.8 a จะเห็นได้ว่า โดยทั่วไป หากอัตราส่วนของน้ำต่อของแห้งสูงกว่า 1 ต่อ 2 หรือมีความชื้นสูงกว่า 33 % ค่าวอเตอร์แอกติวิตีจะมีค่าสูงกว่า 0.90 แต่เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อของแห้งลดลงต่ำกว่า 1 ต่อ 2 จะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อของแห้งลดลงต่ำกว่า 0.25 ต่อ 2 หรือมีความชื้นต่ำกว่า 20 %

สำหรับภาพ 2.8 b แสดงให้เห็นว่า การลดความชื้น (desorption) ในอาหารลง จะส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลงได้มากกว่าการนำอาหารแห้งมาเพิ่มความชื้นเพื่อให้มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีเดียวกัน ทั้งนี้ ปรากฏการณ์ดังกล่าว จะเกิดเมื่อมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูงกว่า 0.2 (ช่วง B และ C)



ภาพ 2.8 ไอโซเธอมของความชื้น (moisture isotherm)

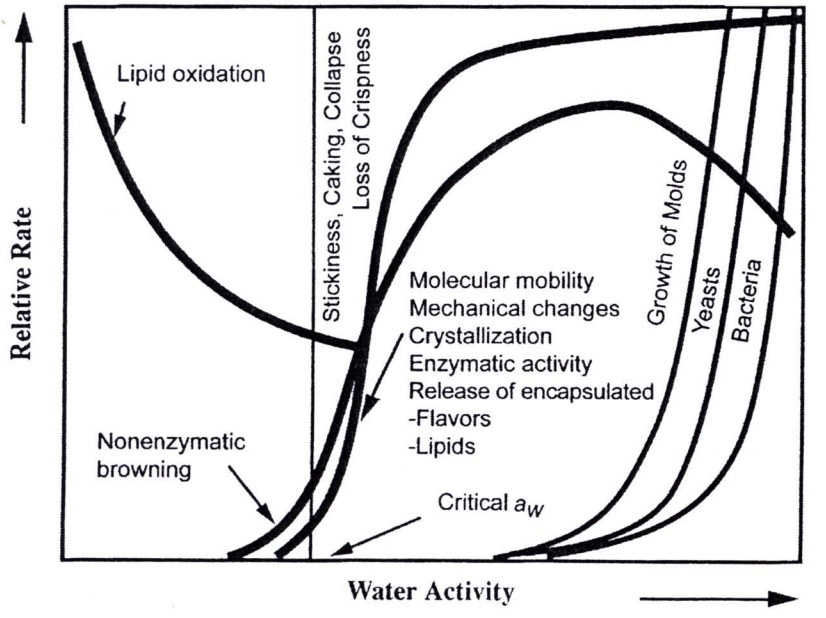
ที่มา : Fennema (1996)

เมื่ออาหารมีความชื้นลดลงประมาณร้อยละ 50 ของทั้งหมด จะทำให้ค่า aw ลดลงอย่างรวดเร็ว ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และ a_w ยังขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ดังนั้นเมื่อนำค่า aw มาเขียนกราฟกับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ กราฟนี้เรียกว่า sorption isotherm ซึ่งมีกระบวนการลดความชื้น (desorption) และการเพิ่มความชื้น (adsorption) เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และจะมีผลต่อ a_w ด้วย

กราฟ desorption isotherm เป็นการแสดงระดับความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นหรือลดต่ำลงจนถึงจุดสมดุลกับสภาวะแวดล้อม หรือความชื้นของอากาศขณะนั้น

สำหรับกราฟ absorption หรือ resorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และอาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก เส้นกราฟ absorption isotherm จะมีความชันมาก อาหารประเภทนี้เรียกว่า hygroscopic product และถ้าอาหารไม่มีความไวต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น เส้นกราฟจะมีความชันน้อย อาหารประเภทนี้เรียกว่า non-hygroscopic product

อาหารที่มีค่า a_w ต่ำจะทำให้จุลินทรีย์เจริญได้ช้าลง ลดปฏิกิริยาของเอนไซม์จึงลดการเกิดสีน้ำตาล และลดการเหม็นหืน อย่างไรก็ตาม หากค่า a_w ต่ำมาก ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดสูงขึ้นด้วย ดังนั้น ค่า a_w ที่ส่งผลให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์มียาวนาน ควรมีค่า aw อยู่ในช่วงกลางค่อนข้างต่ำ ดังภาพ 2.9



ภาพ 2.9 ผลของวอเตอร์แอคติวิตี ต่อปฏิกริยาต่าง ๆ ในอาหาร

ที่มา : Bell and Labuza (2000)

2.12 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุอบแห้ง

สมชาติ (2540) ได้อธิบายถึงคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุอบแห้งว่า มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้ง ซึ่งในการวิเคราะห์การอบแห้งจำเป็นต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนมาเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณ แต่คุณสมบัติบางอย่างมีผลกระทบน้อยจึงไม่สามารถนำมาพิจารณาได้ คุณสมบัติทางความร้อนที่จะกล่าวถึงในที่นี้ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ และความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำภายในวัสดุ

2.12.1 ความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ โดยส่วนใหญ่แล้วในกระบวนการอบแห้งมักเกี่ยวข้องกับความดันคงที่มากกว่าปริมาตรคงที่ วิธีการหาค่าความร้อนจำเพาะมีหลายแบบแต่วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ วิธีผสม โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวทำด้วยโลหะหุ้มฉนวนอย่างดี และมีแท่งกวนของผสมให้เข้ากันระหว่างวัสดุที่ต้องการหาค่าความร้อนจำเพาะกับของเหลวซึ่งโดยมากใช้น้ำ ส่วนวิธีที่ใช้การคำนวณหานั้นจะพิจารณาให้ตัวแคลอรีมิเตอร์และของผสมอยู่ภายในนั้นเป็นระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถเขียนสมดุลความร้อนได้ดังนี้

$$m_c C_c (T_c + T_m) + m_p C_p (T_p + T_m) + m_w C_w (T_w - T_m) = 0$$

เมื่อ

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg.C°)

C_c คือ ความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์ (kJ/kg. C°)

C_w คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg. C°)

m_w คือ มวลของน้ำ (kg)

m_c คือ มวลของแคลอรีมิเตอร์ (kg)

m_p คือ มวลของวัสดุ (kg)

T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ (C°)

T_c คือ อุณหภูมิของแคลอรีมิเตอร์ (C°)

T_m คือ อุณหภูมิของของผสมที่สภาวะสุดท้าย (C°)

T_p คือ อุณหภูมิของวัสดุ (C°)

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่เพื่อใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_p = \frac{(T_w - T_m)(m_w C_w + m_c C_c)}{(T_m - T_p)m_p}$$

ค่าความร้อนจำเพาะในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หรืออาหารมักขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุ หรือมีสัดส่วนของส่วนประกอบอื่นๆ ในวัสดุ โดยทั่วไปจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิถ้ามีการนำค่าดังกล่าวไปใช้ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างมากนัก ความร้อนจำเพาะของวัสดุมีค่าเท่ากับผลรวมความร้อนจำเพาะของน้ำและวัสดุแห้งจะได้ดังนี้

$$C_{pw} = \frac{m_{wp} C_w + m_{pd} C_{pd}}{m_{wp} + m_{pd}}$$

เมื่อ

C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุชื้น (kJ/kg. C°)

C_{pd} คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (kJ/kg. C°)

m_{wp} คือ มวลของน้ำในวัสดุ (kg)

m_{pd} คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ซึ่งจากหลักการดังกล่าว Mohsenin (1980) ได้นำสมการมาจัดรูปใหม่ โดยจะพบว่าค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นในวัสดุในลักษณะเชิงเส้นดังสมการต่อไปนี้

$$C_{pw} = (C_w - C_{pd})M_w + C_{pd}$$

2.12.2 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในวัสดุ

ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ หมายถึง ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวให้เป็นไอที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ในกระบวนการอบแห้งจะมีการระเหยน้ำจากภายในวัสดุ และความร้อนแฝงในการระเหยน้ำในวัสดุนี้มีค่าสูงกว่าน้ำที่อยู่อย่างอิสระ

โดยเฉพาะเมื่อความชื้นในวัสดุยิ่งมีค่าต่ำลง การระเหยน้ำก็จะเป็นไปได้ยากขึ้นและต้องใช้พลังงานมากขึ้นนั้น คือความร้อนแฝงของน้ำในวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับที่อยู่อย่างอิสระด้วย

2.13 ใบมะกรูด

มะกรูด (*Citrus hystrix* DC) เป็นไม้ยืนต้นขนาดเล็ก ตามกิ่งและต้นมีหนาม ใบมีสีเขียว ผลมีสีเขียว มะกรูดมีน้ำมันหอมระเหยเป็นจำนวนมาก น้ำมันหอมระเหยแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ เทอร์พีน (terpenes) และ ไม่ใช่เทอร์พีน (non-terpene) หรือ oxygenated compounds โดยเทอร์พีนเป็นสารพวก unsaturated hydrocarbons ซึ่งเป็นสารที่ไม่คงตัว สามารถเกิดปฏิกิริยา photochemical และปฏิกิริยา oxidation ได้ง่าย ทำให้น้ำมันหอมระเหยเสื่อมลงอย่างช้า ๆ โมโนเทอร์พีน (monoterpene, C10) เป็นเทอร์พีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด แบ่งเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม คือ acyclic, monocyclic และ bicyclic เช่น ocimene, di-limonene และ camphene ตามลำดับ sesquiterpenes (C15) เป็นองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยที่มีจุดเดือดสูง เป็นสารประกอบไม่อิ่มตัวประเภท acyclic หรือ cyclic เช่น farnesol และ d-bisabolene ตามลำดับ ส่วน non-terpenes เป็นส่วนที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะตัวของกลิ่นน้ำมันหอมระเหย ได้แก่ สารประกอบอัลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ คีโตน อีเธอร์ กรดคาร์บอกซิลิค และเอสเทอร์ เป็นต้น สารเหล่านี้ ได้แก่ geraniol, linalool เป็นต้น

ในใบมะกรูด มีสารสำคัญในน้ำมันหอมระเหยจำนวน 22 ชนิด โดยมี citronellal สูงที่สุด 16.10 % และมีส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ β-mycene 9.25% d-limonene 7.75% citronellol 5.24% citronellyl acetate 4.62% isopulegol 4.60% linalol 3.90% เป็นต้น น้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากใบมะกรูดมี 1.0-1.2 มิลลิลิตรต่อ 100 กรัมใบสด โดยองค์ประกอบสำคัญในน้ำมันหอมระเหยใบมะกรูดมี citronellal 74.59% sabinene 3.20% และ citrolellol 1.43% (ศิริเพ็ญ และคณะ, 2548)

2.14 อายุการเก็บรักษา

อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนการจำหน่าย ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อผู้บริโภค อายุการเก็บสามารถเข้าใจและแปลความหมายได้หลายแบบ ในแง่ผู้บริโภค มักหมายถึงระยะเวลาที่อาหารที่สามารถเก็บไว้ที่บ้านก่อนที่อาหารนั้นจะเสียไป ผู้ค้าปลีกอาจให้ความสนใจถึงระยะเวลาที่สินค้าจะสามารถวางจำหน่ายบนชั้นวาง (Man, 2002) ในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษา อาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในด้านต่าง ๆ ซึ่งขึ้นกับสภาวะในการผลิตและการเก็บรักษา สำหรับการเก็บรักษาในช่วงระยะเวลาหนึ่งนั้น คุณภาพบางประการ

ของอาหารอาจถึงจุดที่ไม่เป็นที่ยอมรับ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการบริโภคอีกต่อไป ระยะเวลาที่จุดนี้ เรียกว่า วันหมดอายุ (Singh, 1994) การกำหนดอายุการเก็บของอาหารนั้น อาจกำหนดได้จาก 1) ข้อมูลที่มีการตีพิมพ์ 2) เทียบเคียงกับผลิตภัณฑ์เดียวกันในท้องตลาด 3) ใช้ข้อมูลจากผู้บริโภคที่ร้องเรียน 4) การทดสอบในสภาวะเร่ง (Accelerated shelf-life testing; ASLT) (Singh and Cadwallader, 2004)

สาเหตุของการเสื่อมคุณภาพของอาหารเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนย้ายที่ไม่เหมาะสมในระหว่างการเก็บเกี่ยว การแปรรูปและการกระจายสินค้า การเก็บอาหารแห้งในที่ที่มีความชื้นสูงอาจทำให้อาหารดูดความชื้นและแข็งเป็นก้อนได้ การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะการเกิดออกซิเดชันของไขมันและน้ำมัน จะส่งผลต่อกลิ่นรส เมื่อกลิ่นรสเกิดขึ้นมากพอ ผู้บริโภคจะรับรู้ได้ว่าเกิดการหืนขึ้น ในขณะเดียวกัน อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นยังก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์อื่นๆ เช่น การสูญเสียไวตามิน การเปลี่ยนสี การเสื่อมสภาพของโปรตีน และการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ เป็นต้น นอกจากนี้ การเปลี่ยนทางด้านจุลินทรีย์ สามารถทำให้เกิดการเน่าเสีย ก่อให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ และอาจก่อให้เกิดอันตรายในบางกรณี (Singh, 1994)

อัตราการเสื่อมคุณภาพลงเป็นจลนศาสตร์ปฏิกิริยา (reaction kinetics) ลำดับศูนย์ (zero order) และลำดับหนึ่ง (first order) เป็นส่วนใหญ่ โดยปฏิกิริยาลำดับศูนย์ หมายถึงปฏิกิริยาที่มีอัตราการเสื่อมเสียคงที่ที่อุณหภูมิที่คงที่ดังสมการที่ 1 และสมการที่ 2 (Labuza, 1982)

$$-\frac{dA}{d\theta} = k \qquad (1)$$

เมื่อ A = คุณภาพ; θ = ระยะเวลา

k = อัตราการเสื่อมคุณภาพ

$$k = \frac{A_0 - A}{\theta} \qquad (2)$$

เมื่อ A_0 = ระดับคุณภาพเริ่มต้น

A = ระดับคุณภาพที่เหลือที่เวลา θ

θ = ระยะเวลาที่คุณภาพระดับ A

k = อัตราการเสื่อมคุณภาพ

อัตราการเสื่อมคุณภาพของอาหารอาจมีได้หลายลำดับตั้งแต่ศูนย์จนถึงเศษส่วนใด ๆ หรือเลขจำนวนเต็มจนถึง 2 ในอาหารหลายชนิดอัตราการเสื่อมจะลดลงเมื่อคุณภาพลดลงซึ่งปฏิกิริยาลำดับ 1 ดังสมการที่ 3 และ 4 (Labuza, 1982)

$$-\frac{dA}{d\theta} = kA^1 \qquad (3)$$

จะได้

$$\ln\frac{A_E}{A_0} = -k\theta_s \qquad (4)$$

เมื่อ A = ระดับคุณภาพที่เหลือที่เวลา θ

A_E = ระดับคุณภาพที่เหลือเมื่อหมดอายุ θ_s (ไม่เท่ากับ 0)

θ = ระยะเวลาที่คุณภาพระดับ A

k = อัตราการเสื่อมคุณภาพเป็นส่วนกลับของเวลา

การเสื่อมด้านคุณภาพที่เป็นปฏิกิริยาลำดับหนึ่งได้แก่ การหืน การเจริญเติบโตและการตายของจุลินทรีย์ การสร้างกลิ่นไม่พึงประสงค์และเมือกโดยจุลินทรีย์ การสูญเสียไวตามิน และการเสื่อมคุณภาพของโปรตีน (Labuza, 1982) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ทางด้านคณิตศาสตร์ข้างต้นเกี่ยวกับการเสื่อมคุณภาพนั้น ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิที่คงที่ ซึ่งอุณหภูมิเป็นส่วนหนึ่งของสมการลำดับศูนย์หรือหนึ่งของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k ในทางทฤษฎี ค่า k แสดงความสัมพันธ์ของ Arrhenius ดังสมการที่ 5 (Labuza, 1982)

$$k = k_0 e^{-E_A/RT} \qquad (5)$$

เมื่อ k_0 = pre-exponential factor

Ea = พลังงานก่อกัมมันต์ (jule/ mole K)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (= 8.314 jule/mole K)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K)

การวาดกราฟอัตราการเสื่อมคุณภาพในแต่ละอุณหภูมิ จะทำให้ทราบถึงความไวต่อการเสื่อมคุณภาพของอาหารที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หน่วยที่ใช้วัดความไวนี้เรียกว่า Q_{10} ของปฏิกิริยา แสดงได้ดังสมการที่ 6 (Labuza, 1982)

$$Q_{10} = \frac{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ}(T+10\ ^{\circ}C)}{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ}(T\ ^{\circ}C)} \qquad (6)$$

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบผู้บริโภค(consumer testing) หมายถึง การทดสอบผลิตภัณฑ์โดยการใช้ผู้บริโภคที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน ซึ่งเป็นหรือกำลังจะเป็นผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์เหล่านั้นจะถูกประเมินจากลักษณะปรากฏ รสชาติ กลิ่น การสัมผัส และการได้ยิน (ASTM, 1979) ส่วนการประเมินทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation) คือ วิธีการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้เพื่อวัด วิเคราะห์และแปลความ ขณะที่รับความรู้สึกสัมผัสโดยการเห็น การได้ยิน การได้กลิ่น การชิมรส และการสัมผัส (Stone and Sidel, 2004) คำจำกัดความนี้ได้เป็นที่ยอมรับและรับรองโดยคณะกรรมการประเมินทางประสาทสัมผัสในองค์กรวิชาชีพต่างๆ เช่น The Institute of Food Technologists (IFT) และ The American Society for Testing and Materials หรือ ASTM (สุจินดา, 2547) การทดสอบผู้บริโภคเป็นหนึ่งในกิจกรรมที่สำคัญยิ่งในการประเมินความรู้สึกของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค (Meiselman 1994).

ในการประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้มีหลายงานวิจัยที่ใช้การทดสอบผู้บริโภคในการประเมินการสิ้นสุดอายุการเก็บรักษา (Dethmers, 1979; Duyvesteyn et al., 2001; Cardelli and Labuza, 2001; Grosso and Resurreccion, 2002; Hough, et al., 2002). Kilcast (2000) ระบุว่าการทดสอบผู้บริโภคเป็นการประเมินความชอบโดยตรง ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินอายุการเก็บรักษา โดยวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การให้คะแนนความชอบ 9 คะแนน หรือ 9 – point hedonic scale (ASTM 1996) ซึ่งพัฒนาโดย Peryam and Pilgrim (1957) โดย 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 5 = บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ และ 9 = ชอบมากที่สุด Grosso and Resurreccion (2002) ได้ใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยของคะแนนความชอบของผู้ทดสอบน้อยกว่า 5 ถือว่าผลิตภัณฑ์นั้นไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค หรือเป็นจุดที่สิ้นสุดอายุการเก็บในการประเมินอายุการเก็บรักษาของถั่วลิสงเคลือบ

และถั่วลิสงคั่ว ส่วน Lee and Resurreccion (2006) ได้ใช้คะแนนความชอบที่ต่ำกว่า 5 เช่นกัน ในการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อถั่งลิสงคั่ว ในการเก็บที่อุณหภูมิและสภาวะต่างๆ นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ใช้คะแนนความชอบน้อยกว่า 5 เป็นจุดสิ้นสุดอายุการเก็บรักษา Labuza and Schmidl, 1985; Labuza and Schmidl, 1988)

Balladin and Headley (1999) ได้ทำการทดลองอบแห้งกลีบดอกกุหลาบเป็นเวลา 2 วันที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หรือใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อบเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพื่อให้ถึงความชื้นสมดุล ผลการทดลองพบว่า กลีบดอกกุหลาบมีความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 65.7 เปอร์เซ็นต์ และ 25.2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การทดสอบหาคุณสมบัติทางชีวเคมีของกลีบดอกกุหลาบ คือ การหาปริมาณรงควัตถุสีแดงที่อยู่ภายในกลีบกุหลาบ (pelargonidin) ซึ่งพบว่าปริมาณรงควัตถุนี้จะลดลงเป็น 2.5 เท่าของกลีบดอกกุหลาบที่ผ่านการอบแห้ง โดยสาร pelargonidin ethanoic ที่สกัดได้นั้นจะเป็นตัวที่แสดงค่าความเป็นกรดเบส โดยมีค่า K_a เท่ากับ $1x10^{-4}$ mol^{-1} และค่า pH ณ จุดสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 4 และเมื่อซับด้วยกระดาษกรอง แล้วทิ้งไว้ให้แห้งภายในเวลา 5 นาทีจะมีคุณสมบัติในการเป็นอินดิเคเตอร์ด้วย

Janjai and Tung (2005) ทำการศึกษาการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ในการอบสมุนไพรและเครื่องเทศพบว่า อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าไปในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูง เหมาะสำหรับการอบแห้งสมุนไพรและเครื่องเทศ เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศธรรมดา ในสภาพอากาศที่โปร่งใส ความชื้นของ rosella flower ในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ลดลงจากค่าเริ่มต้น 92 เปอร์เซ็นต์ (wb) ไปจนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์ (wb) ภายในเวลา 4 และ 30 ชั่วโมง การตรวจสอบคุณภาพพบว่า สีของ rosella flower ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้มีค่าเทียบเท่ากับ rosella flower แห้งคุณภาพสูงที่ขายตามท้องตลาด

Bala *et al.* (2003) ทำการศึกษาการอบแห้งสับปะรดด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งในช่วงระหว่างการอบแห้งเมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากทำให้ การสะสมความร้อนมีมากขึ้นและส่งผลให้อุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น จากการทดลองเมื่อใช้ความเร็วลมที่สูงขึ้นความสามารถในการไหลผ่านจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งจะดีกว่า นอกจากนั้นความเร็วลมที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดกระแสลมที่ปั่นป่วนภายในตู้อบ ทำให้การพาความร้อนจากพืชสมุนไพรสู่อากาศเป็นไปได้ดีกว่า และอุณหภูมิภายในตู้อบจะมีความสม่ำเสมอมากกว่าที่ความเร็วลมต่ำซึ่งส่งผลต่ออัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นด้วย

Balladin and Headley (1999) ศึกษาองค์ประกอบของกระเพราภายหลังการอบแห้งโดยใช้เครื่องแห้งอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบตะแกรงลวดและเครื่องอบแห้งแบบธรรมดา (Oven drying) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนมีปริมาณความชื้นถึงจุดสมดุลซึ่งใช้เวลา 12 ชั่วโมง และ 9.5 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าใบกระเพราที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตะแกรงลวดและเครื่องอบแห้งแบบธรรมดามีค่าเปอร์เซ็นต์ของ essential oils ที่สกัดได้ ค่าเปอร์เซ็นต์ของ oleoresin และปริมาณเถ้า เท่ากับ 0.6, 27, 2.25 เปอร์เซ็นต์ และ 0.5, 27, 2.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Diaz–Maroto *et al.* (2002) ศึกษาการใช้วิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสารประกอบพวกน้ำมันหอมระเหยใน parsley พบว่า การอบแห้ง parsley ด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ลดความเข้มข้นขององค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยของ parsley ลงรวมถึง Ablanco *et al.* (2002) ที่ให้ความเห็นว่าการใช้อุณหภูมิสูงอบใบเปปเปอร์มิ้นท์ที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส นั้นจะมีผลทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงจาก 1.0 เปอร์เซ็นต์ (40 องศาเซลเซียส), 0.14 เปอร์เซ็นต์ (60 องศาเซลเซียส) และ 0.12 เปอร์เซ็นต์ (80 องศาเซลเซียส) รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยก็จะลดลงด้วย

Doymaz *et al.* (2006) ศึกษาการอบแห้ง dill และ parsley leaves โดยใช้เครื่องอบลมร้อนที่ความเร็วลม 1.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิในการทำแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง และในระหว่างกระบวนการอบแห้งพบเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น จากการวิเคราะห์คุณภาพด้านสี พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแห้ง dill และ parsley leaves คือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Karabulut *et al.* (2007) ศึกษาผลของการอบแห้งแอปริคอท (apricot) โดยใช้เครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ต่อค่าสีและปริมาณเบตา-แคโรทีน (β-carotene) พบว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนมีค่าน้อยกว่าการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ปริมาณเบตา-แคโรทีนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การอบแห้งแอปริคอทโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ให้ค่าสีเป็นที่น่าพอใจและมีการสูญเสียองค์ประกอบทางโภชนาการลดลง ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศา-เซลเซียส จะทำให้เกิดรอยไหม้บนผิวผลิตภัณฑ์ และการเติมสารประกอบซัลไฟต์จะช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลบนผิวผลิตภัณฑ์และช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้

Soysal (2004) ศึกษาการอบแห้ง parsley leaves โดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟที่มีกำลังไมโครเวฟในช่วง 390-900 วัตต์ พบว่า ในการอบแห้งมีการสูญเสียความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ทำให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟลดลงเป็นผลให้อัตราเร็วในการอบแห้งลดลง การเพิ่มกำลัง

ไมโครเวฟจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง จากการประเมินค่าสี พบว่า ไม่มีความแตกต่างระหว่างผลิตภัณฑ์สดและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงค่าสีไม่ขึ้นกับกำลังไมโครเวฟ และถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งโดยไมโครเวฟจะเกิดสีดำขึ้นเป็นบางแห่ง แต่ก็ยังสามารถรักษาสีเขียวให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดไว้ได้ การอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟ 900 วัตต์ แทน 360 วัตต์ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี เนื่องจากลดเวลาในการทำแห้งได้ถึง 64 เปอร์เซ็นต์

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

Lin *et al.* (1998) ศึกษาผลของการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ ต่อการคืนรูป (rehydration) สี ความหนาแน่น คุณค่าทางโภชนาการ และคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของแครอทแผ่นเปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบลมร้อน และเครื่อง freeze-dry พบว่า แครอทแผ่นที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศมีการคืนรูป ปริมาณแอลฟา-แคโรทีน (α-carotene) และวิตามินซีสูงกว่า แต่มีความหนาแน่นต่ำกว่า และมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่าแครอทแผ่นที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบลมร้อน ให้สี เนื้อสัมผัส และกลิ่นรสที่เท่ากับหรือดีกว่าการทำแห้งโดยใช้เครื่อง freeze-dry

Yousif *et al.* (1999) ศึกษาการอบแห้งใบโหระพาโดยใช้เครื่องอบลมร้อนและเครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ จากการวิเคราะห์สารระเหยที่ปรากฏในตัวอย่างสดและตัวอย่างแห้งพบว่า มีสารระเหยสองชนิดที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ linalool และ methylchavicol (estragole) โดยตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศมีปริมาณ linalool เป็น 2.5 เท่า และmethylchavicol เป็น 1.5 เท่า ของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบลมร้อน และพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศให้ผลผลิตที่เป็นสารระเหยมากกว่าตัวอย่างสด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในระหว่างการอบแห้ง และมีอัตราเร็วในการคืนรูปมากกว่า ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบลมร้อนไม่สามารถคืนรูปได้ แต่มีสีเข้มกว่า และมีสีเขียวน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศ

Akoy et al. (2008) และ Phupaichitkun et al. (2008) ได้ใช้ model ต่าง ๆ ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น(moisture ratio, MR) ต่อระยะเวลาการอบแห้ง model ที่ใช้คือ Newton model ของ Lewis Henderson and Pabis model และ Page model โดยใช้ค่า coefficient of determination (R^2) sum square error (SSE), reduced chi-square (χ^2) และ root mean square error (RMES) เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของ model โดยที่ model และค่าต่าง ๆ ข้างต้น มีสูตรในการคำนวณดังนี้

1) Newton หรือ Lewis model

$$MR = \exp(-kt)$$

2) Henderson and Pabis model

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

3)Page model

$$MR = \exp(-kt^n)$$

4) sum square error

$$= 1/N \sum_{i=1}^{N} (MR_{exp,i} - MR_{pred\,i})^2$$

5) reduced chi-square

$$= \frac{\sum_{i=1}^{N} (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N-n} \quad (2)$$

6) root mean square error

$$= (1/N \sum_{i=1}^{N} (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2)^{1/2}$$

7) อัตราส่วนความชื้น ณ เวลาใดๆ

$$MR(t) = \frac{MC(t) - MC(eq)}{MC(ini) - MC(eq)}$$

โดยที่

exp. = ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

pred. = ข้อมูลที่ได้จากการทำนายของสมการที่ใช้

N = จำนวนค่าสังเกต

n = จำนวนค่าคงที่

MC(eq) = ปริมาณความชื้น ณ จุดสมดุล

MC(ini) = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น

MC(t) = ปริมาณความชื้น ณ เวลา t

Jiu Ai (1997) ได้ใช้วิธี Solid phase micro extraction (SPME) ในการวิเคราะห์สารบางชนิดในสภาวะไม่อิ่มตัว ซึ่งวิธี SPME จะใช้ซิลิกาไฟเบอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มโพลีเมอร์ชนิดพิเศษ ที่ช่วยดูดซับสารระเหยที่สนใจในตัวอย่างที่ศึกษา Jiu Ai (1997) พบว่า model แสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างสารที่ดูดซับไว้กับความเข้มข้นของสารเริ่มต้น นอกจากนี้ ยังพบว่า วิธี SPME สามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ดีแม้ตัวอย่างจะอยู่ในสภาวะที่ยังไม่ถึงจุดสมดุลย์ เพียงแต่ต้องควบคุมอัตราการกวนและระเวลาในการสุ่มตัวอย่างให้คงที่

Park et al (2007) ได้ปริมาณกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ใน *Cheonggukjang* และใช้ SMPE ร่วมกับ gas chromatography และ mass spectrometry พบสารอินทรีย์ที่ระเหยได้หลายชนิดได้แก่ acetic acid, propanoic acid, 2-methylpropanoic acid, butanoic acid และ 3-methylbutanoic acid