

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. บัวบก

บัวบกมีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Centella asiatica* (L.) Urban อยู่ในวงศ์ Umbelliferae และยังมีชื่อเรียกอื่น เช่น ผักหนอก (เหนือ) ผักแว่น (ใต้ จันทบุรี) อักคัก, แจ๊ะเซาะเซ่า (จีน) จำปาเครือ กะบังนอก ปะหนะเอซาเด๊ะ (กระเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน) ผักเมืองช้าง แวนโคก (ละแวกเซี่ยงไฮ้) เป็นต้น บัวบกเป็นไม้พื้นเมืองในแอฟริกาใต้ แล้วแพร่พันธุ์มาทางประเทศอินเดีย อเมริกาใต้ อเมริกากลางและแถบโซนร้อนทั่วไป เช่น สิงคโปร์ มาเลเซีย ไทยและประเทศอื่นๆ ในทวีปเอเชีย

บัวบกเป็นไม้ล้มลุก ทอดเลื้อยไปตามดิน มีรากออกตามข้อ ชูใบตั้งตรงขึ้นมา ใบเป็นใบเดี่ยว ก้านชูใบยาว ลักษณะใบกลมหรือรูปไข่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 เซนติเมตร ขอบใบมีรอยหยัก มีรอยเว้าลึกที่ฐานใบ ผิวใบด้านบนเรียบ ด้านท้องใบมีขนสั้นๆ ก้านใบยาว 1.5-7 เซนติเมตร ดอกเป็นช่อคล้ายร่มออกจากข้อ แต่ละช่อมีดอกขาว 3-6 ดอก ดอกย่อยมีกลีบเลี้ยงหุ้มอยู่ 2 กลีบ แต่ละดอกมีกลีบดอก 5 ใบ ดอกมีสีม่วงแดงเข้ม มีเกสรตัวผู้สั้นๆ ออกระหว่างกลีบดอก จำนวน 5 อัน รังไข่มีก้านเกสรตัวเมีย 2 อัน เมล็ดมีขนาดเล็กมาก สีดำ บัวบกแช่น้ำไม่ตาย และทนน้ำขัง (กนกกาญจน์ แซ่จิ่ง และธนภรณ์ ศรีคุณ 2543)

1.1 ชนิดของบัวบก

บัวบกกลุ่มที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Centella asiatica* (L.) urban มีอยู่หลายชนิด ปัจจุบันได้มีการจำแนกบัวบกได้หลายแบบคือ

- 1) การจำแนกบัวบกตามการเจริญเติบโต ซึ่งยิ่งยง โพธิ์สุศาสนดิวัฒนา (2535) ได้จำแนกไว้ดังนี้
 - 1.1) บัวบกใบ ลำต้นเลื้อยไปตามดิน ก้านยาว ปลายใบกลมขอบหยัก ออกรากที่ข้อลำต้น
 - 1.2) บัวบกหัว มีหัวอยู่ใต้ดิน หัวทรงกรวยเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 ซม ลำต้นตั้งตรง ใบแตกเวียนรอบลำต้น ใบรูปร่างเกือบกลมใบขนาดประมาณ 1 นิ้ว ขอบใบหยักเป็นคลื่นเล็กน้อย
- 2) การจำแนกบัวบกตามแหล่งที่มา ซึ่งเดชา ศิริภัทร (2538) ได้แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ
 - 2.1) บัวบกพันธุ์ไทย ลำต้นเลื้อยไปตามดิน ก้านใบยาว ช่วงข้อห่างทำให้แต่ละใบอยู่ห่างกัน ก้านใบบางต้นสีเขียว บางต้นสีแดง ซึ่งพันธุ์นี้เป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกในปัจจุบัน
 - 2.2) บัวบกพันธุ์ศรีลังกา ลำต้นเลื้อยตามดิน ก้านใบสั้น ข้ออยู่ชิดกันทำให้แต่ละใบอยู่รวมเบียดกันจึงดูเหมือนบัวบกเกิดเป็นกอ

1.2 คุณค่าทางโภชนาการของบัวบก

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางอาหารของใบบัวบกสด 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ	หน่วย
พลังงาน	44	แคลอรี
น้ำ	86	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	7.1	กรัม
โปรตีน	1.8	กรัม
ไขมัน	0.9	กรัม
แคลเซียม	146	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	30	มิลลิกรัม
เหล็ก	3.9	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	10,962	IU
วิตามินบี1	0.24	มิลลิกรัม
วิตามินบี2	0.09	มิลลิกรัม
ไนอาซิน	0.08	มิลลิกรัม
วิตามินซี	4	มิลลิกรัม
เบต้า-แคโรทีน	238.23	RE
เส้นใย	2.6	กรัม
เถ้า	1.7	กรัม

ที่มา : สถาบันวิจัยสมุนไพร (2550)

1.3 สรรพคุณทางยาของบัวบก (กนกกาญจน์ แซ่จิ่ง และธนภรณ์ ศรีคุณ 2543)

น้ำคั้นจากบัวบกสดทั้งต้นใช้แก้ร้อนใน กระหายน้ำ บำรุงหัวใจ แก้อาการเมาค้าง อ่อนเพลีย ขับปัสสาวะ รักษาโรคเรื้อนและวัณโรคบางชนิดได้ แก้อาเจียนเป็นเลือด ลดอาการอักเสบ น้ำคั้นจากบัวบกสดทั้งต้นใช้แก้ช้ำใน แก้กษัย แก้กษัยไตอ่อนแอ แก้กษัยหัวใจ แก้อาเจียนเป็นเลือด แก้เลือดกำเดาไหล แก้อาการเป็นพิษ บัวบกสดทั้งต้นตำพอก แก้ฝีหัวขาด แก้ฟกช้ำ แก้บาดแผลสด แผลมีหนอง ตาบวมแดง แผลเน่าเปื่อย แผลจากซิฟิลิส โรคเท้าช้าง บัวบกสดทั้งต้นใช้เป็นยาฆ่าแมลงได้

น้ำคั้นจากใบและต้นบัวบกใช้เป็นเครื่องดื่มบำรุงหัวใจ แก้อาการเมาค้าง แก้อาการร้อนใน ขับปัสสาวะ แก้ท้องอืด ท้องเฟ้อ ขับปัสสาวะ แก้ท้องอืด ท้องเฟ้อ รักษาแผลในกระเพาะอาหาร ใบและต้นบัวบกใช้ตำพอกแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ช่วยห้ามเลือดและรักษาแผลให้หายเร็ว

ต้นบัวบกใช้รับประทานสดหรือนำคั้นแก้ปวดศีรษะข้างเดียว หรือตำพอกแผลไฟไหม้ลดอาการปวด แสบปวดร้อน พอกแผลสดห้ามเลือดช่วยให้แผลหายเร็ว

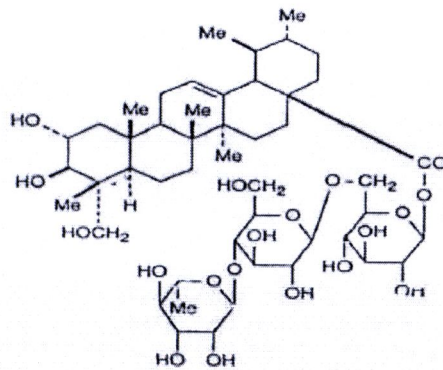
ใบบัวบกสดช่วยสมานแผล ลดรอยแผลเป็น เร่งการสร้างเนื้อเยื่อ ลดการอักเสบ ชะลอการเจริญของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดหนองฝี

เมล็ดบัวบกใช้แก้บิด แก้ไข้ แก้ปวดศีรษะ

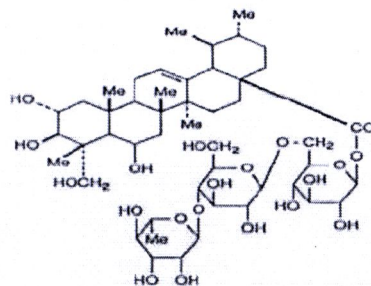
1.4 สารประกอบทางเคมีของบัวบก

สารเคมีในบัวบกหลายชนิดมีสรรพคุณในการรักษาโรคส่วนใหญ่ที่มีการศึกษากันมาก ได้แก่ madecassoside และ asiaticoside (รูปที่ 2.1) โดยมีปริมาณสารที่พบอยู่ระหว่างร้อยละ 1-8 ทั้งนี้ ขึ้นกับแหล่งวัตถุดิบ (สถาบันวิจัยสมุนไพร 2550)

Mahahpant and Chaicharoenthawekit (1987) รายงานว่าใบ ก้านและรากบัวบกที่ปลูกในประเทศไทยมี asiaticoside อยู่ ร้อยละ 1.07 0.16 และ 0.15 ตามลำดับ



Asiaticoside



Madecassoside

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของสารสำคัญในบัวบก (เอเชียติโคไซด์และมาเดคาสโซไซด์)

ที่มา : Asean countries (1993)

Cheng and Koo (2000) ได้ศึกษาสารสกัดจากบัวบก พบว่าสามารถยับยั้งแผลในกระเพาะอาหารของหนูได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสารในบัวบกช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังเยื่อในกระเพาะอาหาร ลดการบาดเจ็บอันเนื่องมาจากอนุมูลเสรี ในศตวรรษที่ 19 บริษัทร่วมทางด้านเภสัชตำรับของอินเดีย ได้แสดงให้เห็นถึงสรรพคุณในการช่วยรักษาโรคผิวหนังของบัวบก เช่น รักษาโรคแผลพุพองและโรคเรื้อนที่ขาของผู้ป่วย โดยเป็นผลมาจากบัวบกช่วยเพิ่มปริมาณสาร collagen ให้กับผิวหนัง และเพิ่มความต้านแรงดึง (tensile strength) ของบาดแผลได้

ถึงแม้ว่าบัวบกจะมีข้อดีดังกล่าว แต่ก็ยังไม่มีใครอธิบายถึงกลไกการทำงานได้อย่างชัดเจน หรืออาจจะเป็นผลมาจาก antioxidation ในธรรมชาติ

Chang and others (1977) ได้ทำการทดลองและพบว่า ethanol เป็น solvent ที่สามารถสกัดสาร antioxidative compound ได้มากที่สุดเพราะ ethanol มีสภาพความเป็นขั้วที่เหมาะสมกับ antioxidative compound ในบัวบก และแม้ว่า ethanol จะสกัดได้ดีที่สุด แต่น้ำก็สามารถสกัดสาร antioxidant ได้มากเช่นกัน หมายความว่าคุณสมบัติในการต้านอนุมูลเสรีของบัวบกสามารถละลายน้ำได้

Hamid and others (2002) ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายต่างชนิดกัน (เอทานอล น้ำ และไลทปิโตรเลียม (Light petroleum) บัวบกส่วนต่างๆ (ราก ใบ และก้าน) อุณหภูมิ (30 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส) และค่าความเป็นกรด-เบส (pH 1-11) ต่อสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดบัวบก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำสารสกัดบัวบกที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายต่างชนิดกัน วัดสมบัติการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี Conjugated diene ซึ่งเป็นการวัด Lipid Peroxidation เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน α -tocopherol พบว่าสารสกัดเอทานอลจากทุกส่วน (ราก ใบ และก้าน) มีสมบัติการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดน้ำและไลทปิโตรเลียมตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าสารสำคัญในบัวบกที่แสดงสมบัติการต้านออกซิเดชันเป็นสารประกอบที่สามารถละลายน้ำ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดเอทานอลจากราก ใบ ก้าน และรากของบัวบกด้วยวิธี 2-Thiobarbituric acid สารสกัดเอทานอลจากรากแสดงสมบัติต้านออกซิเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดเอทานอลจากราก ใบ และก้าน ตามลำดับ และเมื่อนำสารสกัดเอทานอลของทุกส่วน (ราก ใบ ก้าน) บ่มไว้ที่อุณหภูมิต่างๆ (30 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส) สารสกัดเอทานอลของทุกส่วน จะมีความคงตัวตั้งแต่อุณหภูมิที่ 30 จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดบัวบกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกตัวอย่าง ($p < 0.05$) และพบว่าที่ pH เท่ากับ 7 สารสกัดบัวบกมีสมบัติการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด จากผลดังกล่าวมีนัยว่า pH 7 เป็น pH ของสารประกอบในบัวบกที่แสดงสมบัติต้านการออกซิเดชัน

Zainol and others (2003) ศึกษาสมบัติการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของราก ใบ ก้านของ บัวบก 4 พันธุ์ (CA 01, CA 05, CA 08 และ CA 11) จากประเทศมาเลเซีย โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Ferric thiocyanate (FTC) และ Thiobarbituric acid (TBA) ตรวจสอบสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดบัวบก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบสมบัติการต้านออกซิเดชันของสารสกัดเอทานอลในแต่ละพันธุ์และแต่ละส่วน (ราก ใบ และก้าน) ของบัวบกพบว่าพันธุ์ต่างชนิดกันสมบัติการต้านออกซิเดชันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสารสกัดเอทานอลจากรากของทุกสายพันธุ์แสดงสมบัติการต้านออกซิเดชันสูงที่สุดหลังจากนั้นเมื่อนำสารสกัดบัวบกมาวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Total phenols พบว่าสารสกัดจากรากของบัวบกในทุกพันธุ์มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมากที่สุด (8.13-11.7 กรัมต่อ 100 กรัมแห้ง) รองลงมาคือสารสกัดจากราก (6.46-10.5 กรัมต่อ 100 กรัมแห้ง) สารสกัดจากรากบัวบกพบปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดน้อยที่สุด (3.23-4.91 กรัมต่อ 100 กรัม)

แห่ง) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการต้านออกซิเดชันไปในทางเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดจะเป็นสารสำคัญในบวบักที่แสดงสมบัติการต้านออกซิเดชัน

2. สารต้านออกซิเดชันและวิธีวิเคราะห์

สารต้านออกซิเดชัน หรือสารต้านอนุมูลเสรี หรืออาจเรียกได้ว่าตัวต้านออกซิเดชัน (antioxidants) คือ สารที่ทำหน้าที่ต่อต้านหรือยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) สารเหล่านี้อาจมีในอาหารตามธรรมชาติ เช่น วิตามินซี วิตามินอี และเบต้าแคโรทีน หรือเป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งอาหาร (food additive) เช่น BHA BHT และ gallate เป็นต้น โดยทำหน้าที่กำจัดอนุมูลเสรี (free radical scavengers) ป้องกันไม่ให้อนุมูลเสรีทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่างๆ ที่จะก่อผลเสียต่อร่างกาย (มลศิริ วิโรทัย 2545)

โดยตัวต้านออกซิเดชันเป็นสารที่จะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาโดยตรง อาจเกิดจากการให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลของกรดไขมันที่กำลังรับออกซิเจนอยู่ ซึ่งเป็นการตัดปฏิกิริยาลูกโซ่ เป็นการยับยั้งการเกิดอนุมูลเสรีใน โดยเป็น hydrogen donor แย่งจับกับอนุมูลเสรี ดังสมการ



ตัวต้านออกซิเดชัน (AH) ที่สำคัญจะต้องไม่แตกตัวเป็นอนุมูลเสรีเอง และ phenolic antioxidant มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านออกซิเดชัน

2.1 วิธีการวิเคราะห์ตัวต้านออกซิเดชัน

2.1.1 DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) scavenging assay (Brand-Williams and others 1995)

หลักการ เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการรวมตัวของอนุมูลเสรีDPPH โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ 515 นาโนเมตร ซึ่งเกิดเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยตัวต้านออกซิเดชัน (AH) หรือเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลเสรี (R[•]) ด้วยกัน ดังนี้



โดยทั่วไปรายงานผลเป็นค่าร้อยละการยับยั้ง ดังสมการที่ (2.3)

$$\% \text{inhibition} = \left[\frac{A_b - A_s}{A_b} \right] \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ A_b = ค่าการดูดกลืนแสงของ blank
 A_s = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

2.1.2 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content assay)

Prior and others (2005) รายงานว่า สารประกอบฟีนอลิก พบได้ในพืชทั่วไป หลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านออกซิเดชัน ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) มีความสามารถในการลดและกำจัดอนุมูลเสรี ถ้าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในพืชมีมากฤทธิ์ต้านอนุมูลเสรีในพืชชนิดนั้นจะมีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย

2.2 บทบาทของสารต้านออกซิเดชันในการรักษาโรค

2.2.1 บทบาทของตัวต้านออกซิเดชันต่อโรคมะเร็ง

ตัวต้านออกซิเดชันสามารถลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งได้หลายชนิด โดยมีวิธีที่แตกต่างกัน เช่น การยับยั้งการเกิดสารก่อมะเร็ง ป้องกันสิ่งต่างๆ ที่ส่งเสริมให้เกิดมะเร็ง หยุดการเจริญและการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็ง และเซลล์ที่กำลังจะกลายเป็นเซลล์มะเร็ง ลดอัตราการกลายพันธุ์ของเซลล์ และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายมีรายงานสนับสนุนว่าการได้รับตัวต้านออกซิเดชันที่ได้จากผักและผลไม้สามารถลดอัตราเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งได้ เช่น รายงานจากการศึกษาแบบติดตามคนไข้ในประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 11,546 คน เป็นเวลา 25 ปี พบว่าผักและผลไม้ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งกระเพาะอาหารได้ถึง 5.5 เท่า (นวลศรี รักษิระธรรม และอัญญา เจนวิถีสุข 2545) บางรายงานตรวจสอบชี้ชัดลงไปถึงชนิดของผักด้วย เช่น ผักที่มีสีเหลืองเข้มหรือส้ม เช่น แครอท มันฝรั่ง พบว่าสามารถลดอัตราเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดได้มากกว่าผักชนิดอื่น การรับประทานผักและผลไม้ที่มีเบต้าแคโรทีน วิตามินอี และวิตามินซีสูงสามารถที่จะลดการเกิดมะเร็งเต้านมได้จริงในสตรีวัยเจริญพันธุ์ ซึ่งผลดังกล่าวได้จากการติดตามคนไข้ 83,234 คน เป็นเวลา 14 ปี นอกจากนี้ยังมีรายงานอีกเป็นจำนวนมากที่ไม่ได้ยกตัวอย่างมาให้เห็น แต่โดยสรุปแล้ว ตัวต้านออกซิเดชันน่าจะมีผลดีต่อร่างกายและลดอัตราเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งชนิดต่างๆ ได้จริง

2.2.2 บทบาทของตัวต้านออกซิเดชันต่อโรคหัวใจและหลอดเลือด

ปัจจุบันโรคหัวใจเป็นสาเหตุการตายอันดับหนึ่งของประชากรโลก ซึ่งจากการศึกษา เชื่อกันว่าอนุมูลเสรีตัวร้ายสามารถทำปฏิกิริยากับไขมันในร่างกายที่อยู่ในรูปของไลโปโปรตีน LDL (Low Density Lipoprotein) ซึ่งเป็นไขมันที่ก่อให้เกิดหลอดเลือดแดงแข็ง และโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตันได้ จากการศึกษพบว่าตัวต้านออกซิเดชันสามารถลดการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด โดยการยับยั้งการรวมตัวกับออกซิเจนของ LDL ทำให้ไม่เกิดอนุมูลเสรี นอกจากนี้ สารต้านออกซิเดชันยังมีผลในการเพิ่มปริมาณของไขมันชนิด HDL (High Density Lipoprotein) ให้สูงขึ้น ซึ่งไขมันชนิดนี้เป็นไขมันที่ดี ทำให้ลดโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดแดงได้ (นวลศรี รักษิระธรรม และอัญญา เจนวิถีสุข 2545)

2.2.3 บทบาทของตัวต้านออกซิเดชันต่อการเสื่อมของเซลล์

รังสีอัลตราไวโอเลตในแสงแดดเป็นตัวการร้ายที่สามารถกระตุ้นให้เกิดอนุมูลเสรีที่ผิวหนังของเรา และยังทำปฏิกิริยาต่อเซลล์ข้างเคียง ทำให้เซลล์เสื่อมสภาพหรือตายเร็วกว่าปกติ เมื่อเซลล์ผิวหนังเสื่อมสภาพ ทำให้ผิวหนังเราดูสุขภาพไม่ดี เหี่ยวย่นหรือแก่ก่อนวัย จากรายงานพบว่า ตัวต้านออกซิเดชันสามารถป้องกันโรคและมีความสัมพันธ์กับความชรา เพราะตัวต้านออกซิเดชันมีคุณสมบัติบางประการ ที่สามารถป้องกันผนังเซลล์ไม่ให้มีปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนเกิดการทำลายและเกิดอนุมูลเสรี ซึ่งมีผลช่วยชะลอความเสื่อมชราของเซลล์ได้ ปัจจุบันเราจึงพบว่าเครื่องสำอางต่างๆ มีส่วนประกอบของตัวต้านออกซิเดชันรวมอยู่ด้วย แต่เราควรทราบแล้วว่าในพืชผัก-สมุนไพร และผลไม้อุดมไปด้วยตัวต้านออกซิเดชันเช่นกัน

ตัวต้านออกซิเดชันมีทั้งที่เป็นสารจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น สารประกอบฟีนอลิก แคโรทีนอยด์ วิตามิน เอ็นไซม์ และโคเอนไซม์บางชนิด เป็นต้น ซึ่งสารแต่ละชนิดก็มีหน้าที่แตกต่างกัน แหล่งของสารต้านออกซิเดชันที่สำคัญและนับว่าปลอดภัยที่สุดก็คือ อาหาร โดยในอาหารจำพวกผักและผลไม้มักพบสารประกอบฟีนอลิก สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ และวิตามิน ดังนั้น การบริโภคอาหารที่มีสารต่างๆ เหล่านี้ จึง

เป็นประโยชน์ต่อร่างกายที่จะนำไปใช้ต่อสู้กับอนุมูลเสรี ทำให้ลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่างๆ โดยแหล่งอาหารที่น่าสนใจคือ ผักพื้นบ้านและสมุนไพร เช่น บัวบก (นวลศรี รักษาริยะธรรม และอัญญา เจนวิศิษฐ์ 2545)

3. การลวก (Blanching) (ปิ่นนร ภัทรสถาพรกุล 2554)

การลวกเป็นกระบวนการหนึ่งในขั้นตอนของการเตรียมวัตถุดิบ (Preparation) ก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูปหลัก (Main process) ของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ต่อไป เช่น การทำแห้ง การแช่เยือกแข็ง เป็นต้น กระบวนการลวกประกอบด้วย ขั้นตอนการให้ความร้อนกับวัตถุดิบให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดที่กำหนด (Blanching temperature) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (Blanching time) จากนั้นทำให้เย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็ว ปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาในการลวก ได้แก่ ขนาดและชนิดของวัตถุดิบ อุณหภูมิของการลวก และวิธีการให้ความร้อน

โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้ คือ

1. ทำลายการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme inactivation) เนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดของกระบวนการแปรรูปหลัก ในกลุ่มของการทำแห้ง และการแช่เยือกแข็ง ไม่เพียงพอต่อการทำลายกิจกรรมของเอนไซม์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากผักและผลไม้เกิดการเสื่อมคุณภาพ มีการเปลี่ยนแปลงกลิ่นรส และคุณค่าทางโภชนาการระหว่างเก็บรักษา ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจึงต้องทำการลวกด้วยอุณหภูมิและเวลาที่เพียงพอต่อการทำลายเอนไซม์ และลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการสูญเสียคุณค่าเนื่องจากความร้อน

เอนไซม์ตัวสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพการบริโภค และคุณค่าทางโภชนาการของผักและผลไม้ ได้แก่ โพลีฟีนอล ออกซิเดส (Polyphenol oxidase) ลิพอกซิจีเนส (Lipoxygenase) นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ที่มีความคงตัวและทนความร้อนสูงอีก 2 ชนิด คือ คะตะเลส (Catalase) และ เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase) ในกลุ่มเอนไซม์ที่กล่าวมาทั้งหมด เปอร์ออกซิเดสจะมีความทนทานมากที่สุด ในการตรวจสอบ วัตถุดิบที่ผ่านการลวกมาแล้ว หากไม่พบเปอร์ออกซิเดส แสดงว่ามีการทำลายเอนไซม์ตัวอื่นหมดแล้ว

2. ทำลายและลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่บริเวณผิวของวัตถุดิบ ช่วยให้การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ในขั้นตอนถัดไป เช่น การสเตอริไลซ์ ทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากจำนวนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นลดลง นอกจากนี้การลวกยังช่วยให้เนื้อเยื่อของวัตถุดิบมีปริมาตรลดลง สามารถบรรจุลงในภาชนะได้ง่าย และช่วยให้อากาศออกจากช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในภาชนะลดลง และเกิดสภาวะสุญญากาศในภาชนะได้ง่ายขึ้น Kuiche and others (2007) กล่าวว่า การลวกโดยใช้น้ำร้อนหรือน้ำไอน้ำ ที่ใช้เวลาไม่นาน เป็นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทางด้านประสาทสัมผัส และคุณค่าทางอาหาร โดยการทำลายเอนไซม์ที่อยู่ในผักและผลไม้ และสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นลงได้ 60-90%

4. ทฤษฎีการทำแห้ง

การทำแห้ง (Drying) เป็นการใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุม เพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ออกในอาหาร โดยการระเหยน้ำออก หรือการระเหิดของแข็งในกระบวนการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) ความสำคัญในการกำจัดน้ำในอาหารนั้น ก็เพื่อเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยการลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity, a_w) ทำให้มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ได้ แต่โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง มักไม่สูงพอที่จะสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ แต่ข้อดีของการทำแห้ง คือ ทำ

ให้ลดน้ำหนักอาหาร สะดวกในการขนส่ง และง่ายต่อการเก็บรักษา โดยเครื่องทำแห้งที่ดี ต้องทำให้อาหารแต่ละชนิดแห้ง และมีการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการน้อยที่สุด โดยกระบวนการทำแห้งที่สภาวะที่เหมาะสม การทำแห้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตากแดด (Sun drying) การทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) การทำแห้งแบบใช้ลมร้อน (Hot air drying) การทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) การทำแห้งเยือกแข็ง และการอบ (Baking) เป็นต้น

อากาศที่ใช้ในการทำแห้งเรียกว่า อากาศชื้น เพราะประกอบด้วยอากาศแห้ง และไอน้ำ โดยอากาศแห้งประกอบด้วยแก๊สในโตรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ ส่วนปริมาณมวลของไอน้ำในอากาศที่ใช้ในการทำแห้ง มีน้อยกว่าร้อยละ 10 ของมวลทั้งหมด (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ 2540) โดยการที่อากาศจะกำจัดความชื้นออกจากอาหารนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำในอากาศ ซึ่งปริมาณไอน้ำในอากาศ แสดงด้วยค่าความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) คือ มวลของไอน้ำต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง หรือเรียกปริมาณความชื้น หรือแสดงในรูปความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) มีค่าเป็นร้อยละ โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันย่อย (Partial pressure) ของไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน และคูณด้วย 100 ส่วน อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่วัดโดยเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป ส่วน อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่วัดโดยเทอร์โมมิเตอร์ที่มีการเอาผ้าเปียกหุ้มกระเปาะ แล้วให้ลมร้อนเป่าผ่านกระเปาะ ซึ่งทำให้น้ำระเหยออกไป และอุณหภูมิจะลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ 2540)

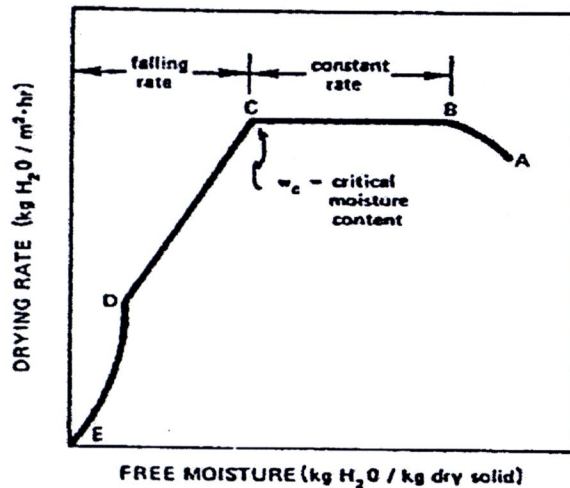
4.1 กลไกการทำแห้ง

อากาศหรือลมร้อนที่พัดผ่านผิวหน้าของอาหารที่เปียก ความร้อนจะถ่ายโอนไปที่ผิวอาหาร และน้ำในอาหารระเหยออกมาจากการเกิดความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ จากนั้นไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศ และโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่มาพัดพาไอน้ำออกไป ทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหารจึงเกิดความแตกต่างของความดันไอ อาหารชั้นด้านในจะมีความดันสูงและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ทำให้เกิดแรงขับเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร โดยน้ำมีการเคลื่อนที่ไปผิวหน้าด้วยกลไก ดังนี้

4.1.1 มีการเคลื่อนที่ของของเหลวด้วยแรงซึมตามรูเล็ก (Capillary force)

4.1.2 การแพร่ของของเหลว เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวทำละลายในอาหารส่วนต่างๆ

อาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้งนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วในการทำแห้งได้ 3 ระยะ ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงของอัตราการทำแห้งของอาหาร

ที่มา : Singh and Heldman (1993)

ระยะที่ 1 (จุด A-B) เป็นระยะที่อาหารจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ใช้ในการทำแห้ง โดยน้ำที่ระเหยออกจากอาหารเป็นน้ำอิสระ (Free water) ซึ่งอัตราการทำแห้งระยะที่ 1 นี้ จะเกิดขึ้นได้เร็วมากและสังเกตเห็นได้ยากขึ้นเมื่ออาหารที่ทำแห้งมีขนาดเล็ก

ระยะที่ 2 (จุด B-C) อาหารจะมีความชื้นลดลง โดยที่การระเหยระยะนี้ยังคงเป็นน้ำอิสระซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวจากภายในอาหารออกมาสู่ผิวอาหาร เป็นการทดแทนน้ำที่ระเหยออกตลอดเวลาทำให้ผิวของอาหารมีความชุ่มชื้น โดยค่า Water activity ที่ผิวอาหารนั้นมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนอัตราการทำแห้ง (Drying rate) ในระยะนี้จะมีความคงที่และสูงสุด ซึ่งเรียกว่า อัตราการทำให้แห้งคงที่ (Constant rate drying)

ระยะที่ 3 (จุด C-E) เป็นระยะที่น้ำภายในอาหาร เคลื่อนตัวออกมาที่ผิวอาหารได้ยากมากขึ้น เนื่องจากอาหารมีการลดความชื้นถึงจุดความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ทำให้น้ำไม่สามารถไปแทนที่น้ำที่ระเหยจากผิวหน้าของอาหาร ดังนั้น อัตราการทำให้แห้งจะลดลง (falling rate drying) และระยะที่ 3 นี้ อัตราการทำให้แห้งลดลงอาจมีมากกว่า 1 ระยะ คือ อัตราการทำให้แห้งลดลงระยะที่ 1 (จุด C-D) และอัตราการทำให้แห้งลดลงระยะที่ 2 (จุด D-E) (อ่อนรวี รัตนพันธุ์ และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์ พงศ์ 2533) ซึ่งอัตราการทำให้แห้งลดลงที่มี 2 ระยะมักเกิดในอาหารประเภทที่มีน้ำตาลสูง

5. วอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w)

Water activity หมายถึงอัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหาร (p) ต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่จุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน (p_0)

$$a_w = p/p_0 \quad (2.4)$$



ตัวละลายจะลดความดันของไอน้ำในอาหาร มีผลทำให้ค่า a_w ลดลงด้วย อาหารทุกชนิดมีน้ำเป็นส่วนประกอบ สถานภาพของน้ำในอาหาร อธิบายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่รอบๆ อาหารนั้น

ความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่สัมพันธ์กับค่าความชื้นจำเพาะหนึ่งๆ (specific moisture content) ของอาหาร เรียกว่า equilibrium relative humidity (ERH)

$$a_w = \text{ERH}/100 \quad (2.5)$$

น้ำในอาหารทำให้เกิดความดันไอ ซึ่งความดันไอที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร
2. อุณหภูมิ
3. ความเข้มข้นของตัวละลายที่อยู่ในน้ำ เช่น เกลือ และน้ำตาล

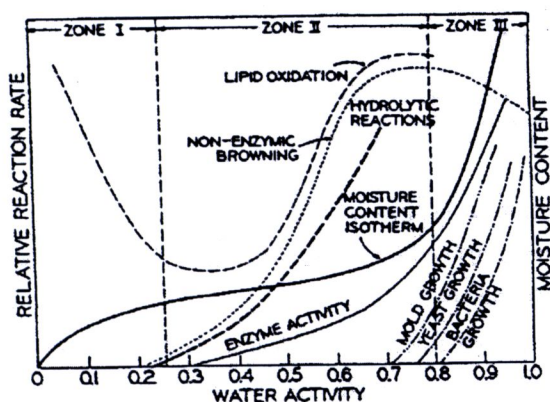
อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง จะมีค่า a_w เท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง ค่า a_w จะลดลงต่ำกว่า 1.0

เมื่ออาหารมีความชื้นลดลงประมาณร้อยละ 50 ของน้ำทั้งหมด จะทำให้ค่า a_w ลดลงอย่างรวดเร็ว ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และ a_w ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย การเปลี่ยนแปลง a_w จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำแห้ง หรือกระบวนการทำแห้งเยือกแข็ง

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง a_w กับอัตราการเน่าเสียของอาหาร

a_w เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพและการเน่าเสียของอาหารเพราะความชื้นในอาหารและค่า a_w จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีหรือปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์อย่างช้าๆ และการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเน่าเสีย ดังนั้น การลดปริมาณน้ำในอาหารให้น้อยลงเพื่อทำให้ค่า a_w ลดต่ำลง จึงเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี วิธีการลดปริมาณน้ำอาจใช้วิธีการทำแห้งแบบต่างๆ หรือการเติมตัวละลายลงไป เช่น การเติมน้ำตาลลงในแยม หรือผลไม้แช่อิ่ม หรือการเติมเกลือลงไปในผักดอง เป็นต้น

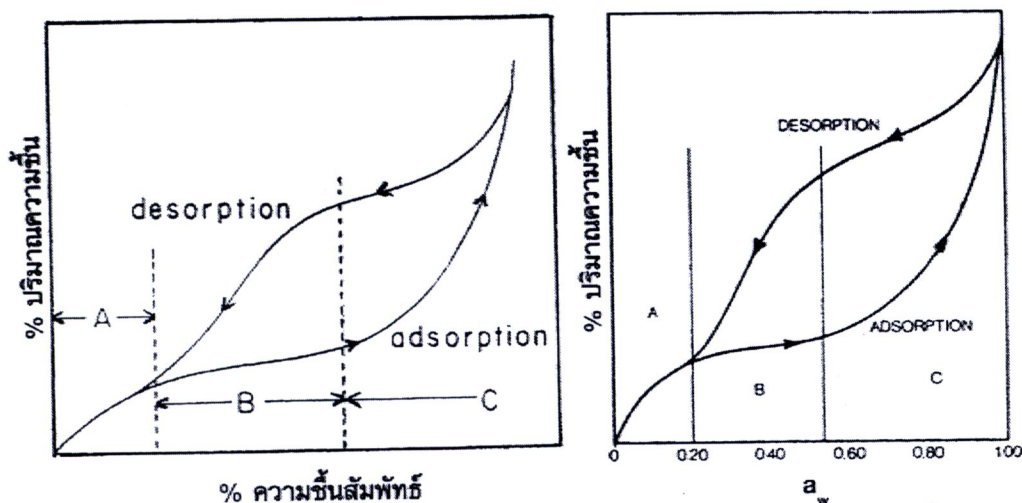
จุลินทรีย์ทุกชนิดจะหยุดการเจริญเมื่ออาหารมีค่า a_w เท่ากับ 0.6 หรือต่ำกว่า จุลินทรีย์ประเภทจะหยุดการเจริญเมื่อ a_w มีค่า 0.7 หรือต่ำกว่า และยีสต์จะเริ่มเจริญได้เมื่ออาหารมี a_w อยู่ในช่วง 0.7-0.8 ส่วนแบคทีเรียจะเริ่มเจริญเมื่อ a_w มีค่ามากกว่า 0.8 (ภาพที่ 2.3)



ภาพที่ 2.3 อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอาหาร และการเจริญของจุลินทรีย์ที่ผันแปรตามค่า a_w ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
ที่มา: Labuza (1971)

6. ขอร์พชั่นไอโซเทิร์ม

เมื่อนำค่า a_w มาเขียนเส้นกราฟกับปริมาณความชื้นในอาหาร จะได้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือกับ a_w กราฟนี้เรียกว่า sorption isotherms ซึ่งจะมีกระบวนการคาย (desorption) เป็นการลดความชื้น และการดูดซับ (adsorption) เป็นการเพิ่มความชื้น เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และจะมีผลต่อค่า a_w ด้วย (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.4 กราฟ Sorption isotherms ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอากาศกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือกับ a_w

ที่มา: นิธิยา รัตนานนท์ (2545)

กระบวนการดูดซับ (adsorption) และกระบวนการคาย (desorption) ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน หรือเป็นการเปลี่ยนกลับไปกลับมา แต่มีความแตกต่างกันระหว่าง adsorption และ desorption isotherms ซึ่งเรียกว่า hysteresis หรือ ณ ที่ค่า a_w หนึ่งๆ ปริมาณความชื้นของ desorption จะมากกว่า adsorption เสมอ

กราฟ desorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ระดับความแห้งของอากาศที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น หรือความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ ลดต่ำลง จนถึงจุดสมดุลกับสถานะแวดล้อม หรือความชื้นของอากาศขณะนั้น ดังนั้นจึงใช้ desorption isotherm สำหรับกระบวนการทำแห้ง

รูปกราฟของ sorption isotherm โดยทั่วไปจะเป็นรูป sigmoid และแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน

Zone I (A) ของ isotherm เส้นกราฟค่อนข้างชัน จะสอดคล้องกับ monomolecular layer ของน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะตัวอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่น และมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0-0.25 หรือ 0.3

Zone II (B) เส้นกราฟค่อนข้างราบ สอดคล้องกับ capillary water ที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้แต่ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่า a_w ลดลงและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอาหารได้ด้วยปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 3-7 ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.3-0.8

Zone III (C) เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งในจากพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้โดยง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย และใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารนี้จะมีน้ำประมาณร้อยละ 12-25 และมีค่า a_w มากกว่า 0.8-1.0

Van den Berg and Bruin (1981) กล่าวว่า มีแบบจำลองมากกว่า 200 แบบจำลองซึ่งมีการพัฒนาขึ้นมาทั้งทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี หรือแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลหรือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล และอุณหภูมิของวัสดุทางชีวภาพชนิดต่างๆ Chirife and Iglesias (1978) ได้ศึกษาแบบจำลองของซอร์พชันไอโซเทิร์มที่แตกต่างกัน 23 แบบจำลอง พบว่า แต่ละแบบจำลองมีความเหมาะสมในการทำนายข้อมูลปริมาณความชื้นสมดุลสำหรับอาหารแต่ละชนิด ที่ช่วงของปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่กำหนดเท่านั้น Boquet and others (1978;1979) พบว่า ไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถแสดงข้อมูลความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นสมดุลกับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุลได้สำหรับข้อมูลอาหารทุกชนิด Sun and Woods (1993) พบว่า ไม่มีจำลองซอร์พชันไอโซเทิร์มใดที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุลได้ถูกต้อง ครอบคลุมวัสดุทางชีวภาพทุกชนิด ทุกช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละชนิด

Chen and Morey (1989) ได้เสนอให้ใช้แบบจำลอง 4 แบบจำลองในการแสดงซอร์พชันไอโซเทิร์มสำหรับผลิตภัณฑ์การเกษตรชนิดต่างๆ พบว่า ไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถใช้ได้ครอบคลุมทั้งหมดสำหรับข้อมูลซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลผลิตทางการเกษตร แบบจำลอง Modified Henderson และ Modified Chung-Pfost เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับธัญพืชที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบและวัสดุที่มีเส้นใย แบบจำลอง Modified Halsey เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำมันและโปรตีนสูง แบบจำลอง Modified Oswin เหมาะสมสำหรับข้าวโพดคั่ว ถั่วลิสงทั้งฝัก ข้าวโพด และข้าวสาลีชนิดอื่นๆ

Mohamed and others (2005) ศึกษาชอร์พชั้นไอโซเทิร์มของใบส้ม (*Citrus aurantium*) โดยได้ใช้สมการเพื่อหาชอร์พชั้นไอโซเทิร์ม 6 สมการ ได้แก่ สมการ Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Modified Henderson, Modified BET และ GAB พบว่า สมการที่สามารถอธิบายดีชอร์พชั้นไอโซเทิร์มและแอคชอร์พชั้นไอโซเทิร์ม ของใบส้มได้ดีที่สุด คือ สมการ Modified Halsey และ GAB

แบบจำลองชอร์พชั้นไอโซเทิร์มที่ใช้ ดังแสดงในสมการที่ (2.6) ถึง (2.13)

แบบจำลอง Modified-Chung-Pfost (Pfost and others 1976)

$$X_e = \frac{1}{-C_3} \ln \left[\frac{(T + C_2) \ln(RH)}{-C_1} \right] \quad (2.6)$$

$$RH_e = \exp \left[-\frac{C_1}{T + C_2} \exp(-C_3 X) \right] \quad (2.7)$$

แบบจำลอง Modified-Henderson (Thompson and others 1968)

$$X_e = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-C_1(T + C_2)} \right]^{\frac{1}{C_3}} \quad (2.8)$$

$$RH_e = 1 - \exp[-C_1(T + C_2)X^{C_3}] \quad (2.9)$$

แบบจำลอง Modified-Halsey (Iglesias and Chirife 1976)

$$X_e = \left[\frac{-\ln RH}{\exp(C_1 + C_2 T)} \right]^{\frac{1}{C_3}} \quad (2.10)$$

$$RH_e = \exp[-\exp(C_1 + C_2 T)X^{-C_3}] \quad (2.11)$$

แบบจำลอง Modified-Oswin (Oswin 1946)

$$X_e = \frac{C_1 + C_2 T}{\left(\frac{1}{RH} - 1 \right)^{1/C_3}} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{RH_e} = \exp \left[\frac{C_1 + C_2 T}{X_e} \right]^{C_3} + 1 \quad (2.13)$$

โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเหมาะสมกับแบบจำลองดังกล่าว จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และ Standard error of estimate (SEE) (Sun and Woods 1994) ในการตรวจสอบ ซึ่ง SEE สามารถหาได้จาก Residual sum of square (RSS) การตรวจวัดและการทำนายข้อมูลในรูปของค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) สำหรับแบบจำลองที่ (2.7), (2.9), (2.11) และ (2.13) สามารถหาได้ ดังนี้

$$RSS = \sum_{i=1}^n (RH_m - RH_p)^2 \quad (2.14)$$

เมื่อ ค่า n เป็นจำนวนข้อมูล

และหาค่า Standard error of estimate (SEE) ได้ดังนี้

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RH_m - RH_p)^2}{df}} \quad (2.15)$$

เมื่อค่า df เป็น ระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) ของแบบจำลองมีค่า n-1

สำหรับสมการที่ (2.6), (2.8), (2.10) และ (2.12) สามารถหาสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้โดยใช้ค่า R^2 และ SEE ในการตรวจสอบเช่นเดียวกัน แต่ทำการวัดค่าและทำนายข้อมูลในรูปของค่าความชื้น (X)

7. เครื่องทำแห้ง

7.1 เครื่องทำแห้งแบบถาด(Tray dryer)

เป็นเครื่องทำแห้งที่ใช้ลมร้อนเป่าผ่านอาหาร เพื่อทำการกำจัดน้ำออกจากผิวหน้าอาหาร เหมาะสมกับการทำแห้งพวกของแข็ง เช่น เมล็ดพืช ผักและผลไม้แห้งบาง หรืออาหารที่มีลักษณะเป็นก้อนหรือแท่ง ส่วนใหญ่โรงงานอุตสาหกรรมมักใช้เครื่องทำแห้งประเภทนี้ เพราะสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิด (Vega-Mercado and others 2001)

Kaymak-Ertekin (2002) ได้ศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งแบบลมร้อนของพริกหยวกเขียวและแดง ที่สภาวะการทำแห้งต่างๆ พบว่า ไม่ปรากฏช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ อุณหภูมิมีผลต่อการทำแห้ง การลดอุณหภูมิให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น การทำแห้งโดยออสโมติกทำให้อัตราการทำแห้งลดลง ความเร็วลมมีผลต่อการทำแห้งน้อยมาก สภาวะการทำแห้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการลดน้ำกลับคืน ไม่มีผลต่ออัตราส่วนการลดน้ำกลับคืนของพริกหยวก ความสามารถในการลดน้ำกลับคืนของพริกหยวกค่อนข้างต่ำ และใช้เวลานาน

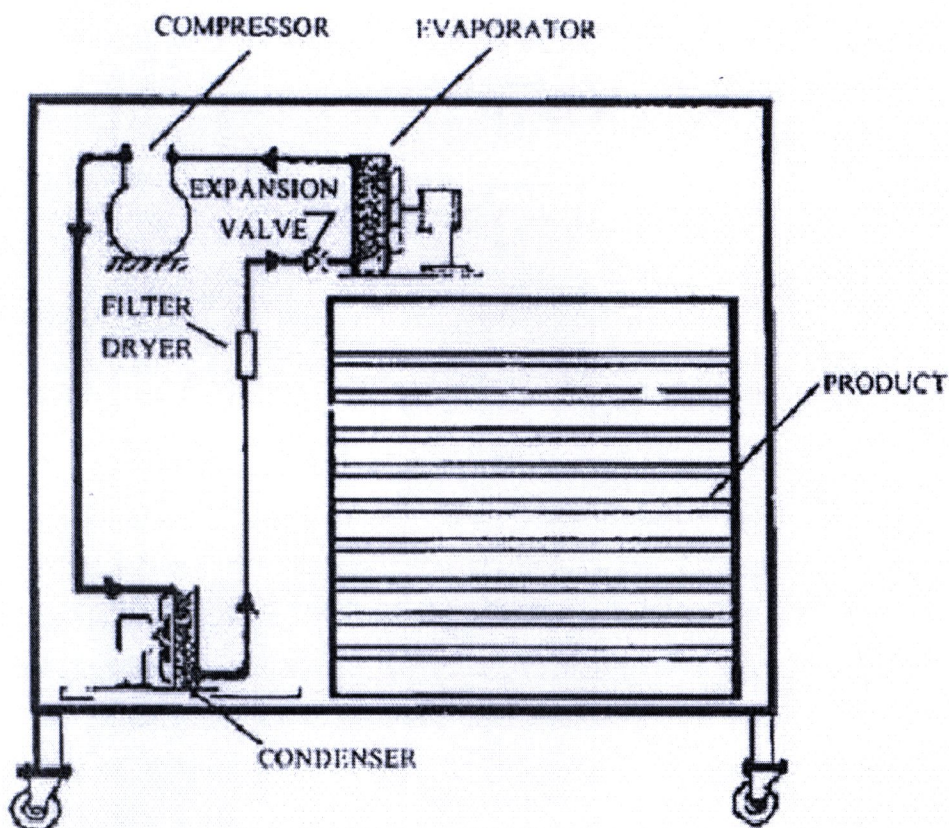
Gunhan and others (2005) ได้ศึกษาแบบจำลองการทำแห้ง 15 แบบ ในการหาแบบจำลองการทำแห้งของใบเบย์ (Bay) (*Laurus nobilis* L.) ที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลอง Modified Page สามารถอธิบายการทำแห้งของใบเบย์ได้ดีที่สุด ในช่วงอุณหภูมิการทำแห้งที่ 40-60 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 5-25

Katsube and others (2008) ได้ศึกษาอุณหภูมิในการทำแห้งชาใบหม่อน (Mulberry leaves) (*Morus alba* L.) ที่มีผลต่อสมบัติการต้านออกซิเดชัน และความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียสไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีสมบัติการต้านออกซิเดชันและความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิก ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Phoungchandang and Torchip (2008b) ได้ศึกษาการทำแห้งชาเขียวใบหม่อนพบว่าแบบจำลอง Modified Henderson สามารถทำนายดีซอร์พชันไอโซเทิร์มได้ดีที่สุดในรูปฟังก์ชัน $X_e = f(RH_e, T)$ และแบบจำลอง Modified Halsey สามารถทำนายดีซอร์พชันไอโซเทิร์มได้ดีที่สุดในรูปฟังก์ชัน $RH_e = f(X_e, T)$ และพบว่าแบบจำลอง Modified Page สามารถแสดงข้อมูลการทำนายการทำแห้งชาเขียวใบหม่อนได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าชาเขียวใบหม่อนที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีปริมาณสารรูตินมากกว่าชาเขียวใบหม่อนของผลิตภัณฑ์ชุมชนและชาเขียวใบหม่อนที่ผลิตระดับอุตสาหกรรมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

7.2 เครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำความร้อน (Heat pump dehumidified dryer)

เครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำความร้อน (ภาพที่ 2.5) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใส่อาหารสำหรับทำแห้ง และส่วนเครื่องทำความเย็น โดยเครื่องทำความเย็น ประกอบด้วย เครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องอัดไอ (Compressor) และ วาล์วขยายตัว (Expansion valve) (Hesses 1994)

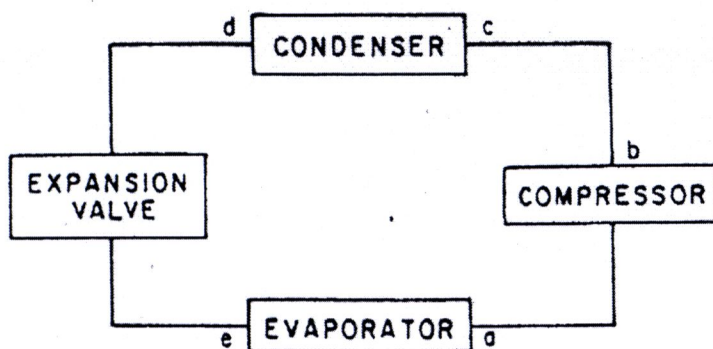


ภาพที่ 2.5 เครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำความร้อน

ที่มา : สิงหนาท พวงจันทร์แดง และคณะ (2546)

เครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำความร้อน เป็นการประยุกต์การทำงานของเครื่องทำแห้งกับการทำงานของเครื่องสูบน้ำความร้อนในระบบปิด โดยความร้อนจะระบายออกมาจากเครื่องควบแน่น (Condenser) สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้อากาศที่ใช้ในการทำแห้งและเครื่องระเหย (Evaporator) สามารถถ่ายโอนพลังงานความร้อนกลับในรูปความร้อนแฝง จากอากาศร้อนชื้นที่ออกมาจากกระบวนการทำแห้ง ซึ่งเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำความร้อน มีประโยชน์ต่อการใช้งาน เพราะสามารถควบแน่นน้ำออกจากอากาศชื้นได้ อากาศแห้งจึงสามารถนำมาใช้ในการทำแห้งอาหารที่ต้องการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำได้ (มนตรี เดชมา และคณะ 2544)

การทำงานของเครื่องทำความเย็น อาศัยการทำงานของสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ โดยมีการทำงานเป็นไปดัง ภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ระบบเครื่องเย็น

ที่มา: Singh and Heldman (1993)

ที่จุด (a) สารทำความเย็นจะเข้าสู่เครื่องอัดน้ำยา เครื่องอัดสารทำความเย็นที่เอนโทรปีคงที่ (isentropically) จนความดันเพิ่มขึ้นที่จุด (b) ไอของสารทำความเย็นจะอยู่ในสภาวะร้อนอย่างขจัดยิ่ง (Superheated vapor) ความร้อนของสารทำความเย็นจะเพิ่มขึ้น ในเครื่องควบแน่น ไอร้อนอย่างขจัดยิ่งจะเข้าเครื่องควบแน่นที่จุด (c-d) ซึ่งมีระบบหล่อเย็นอยู่ด้วย ตัวหล่อเย็นที่นิยมใช้คือน้ำหรืออากาศก็จะดึงความร้อนแฝงออกมา ทำให้สารทำความเย็นควบแน่นเป็นของเหลวอัมตัวที่จุด (d) จากนั้นสารทำความเย็นจะไหลผ่านวาล์วขยายตัว เพื่อลดความดันลงโดยไม่เปลี่ยนแปลงความร้อนที่จุด (e) สารทำความเย็นจะอยู่ในเฟสของผสมระหว่างของเหลวกับแก๊สแล้วจะเข้าสู่เครื่องระเหยเพื่อดึงความร้อนออกจากอาหาร สารทำความเย็นจะระเหยกลายเป็นไอ คือจุด (c-a) ความร้อนในสารทำความเย็นจะเพิ่มขึ้น (สิงหนาท พวงจันทน์แดง 2545)

ข้อดีของเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้น โดยใช้เครื่องสูบความร้อน คือ เป็นเครื่องทำแห้งที่สามารถลดความชื้นของอากาศในตู้อบที่ผ่านการทำแห้งให้กลับเป็นอากาศแห้งได้อีก โดยการลดความชื้นในอากาศ ซึ่งอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศ โดยทำให้อุณหภูมิของอากาศลดลง จนถึงจุดน้ำค้างทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำออกมา (Hesses 1994)

Queiroz and others (2004) ได้ศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งมะเขือเทศด้วยเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนและเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้น โดยใช้เครื่องสูบความร้อน ที่อุณหภูมิ 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที โดยใช้แบบจำลอง Page model ในการปรับเส้นโค้งการทำแห้ง พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทำแห้ง

Yan and others (2002) ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของแอปเปิ้ลวงแหวนที่ทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้น โดยใช้เครื่องสูบ ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 20-25 40-45 และ 60-65 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ พบว่า ความพรุนปรากฏของชิ้นแอปเปิ้ลเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นลดลง ที่อุณหภูมิการทำแห้งระดับสูงสุด พบว่าเกิดเปลือกแข็ง และรอยแตกที่ผิวหน้าของชิ้นแอปเปิ้ลวงแหวน

สิงหนาท พวงจันทร์แดง และคณะ (2546) ได้ศึกษากรรมวิธี และแบบจำลองการทำแห้งใบกะเพรา พบว่า ดิซอร์พชันไอโซเทิร์มของกะเพราที่ได้จากการทำแห้งด้วยอากาศร้อน สมการ Modified Henderson และสมการ Modified Oswin ในรูปฟังก์ชัน $X_e = f(RH_e, T)$ และ $RH_e = f(X_e, T)$ เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดลองได้ทั้งกะเพราขาว และกะเพราแดง แบบจำลอง Henderson and Perry สามารถทำนายกระบวนการทำแห้งได้เหมาะสม ทั้งการทำแห้งแบบใช้ลมร้อน และแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อน อัตราส่วนการดูดน้ำกลับคืนของกะเพราที่ผ่านการลวก มีค่าอัตราส่วนการดูดน้ำกลับคืนสูงกว่ากะเพราที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ อัตราส่วนการทำแห้งของกะเพราขาวมีค่าสูงกว่ากะเพราแดง อีกทั้งการลวกจะทำให้อัตราส่วนการทำแห้งสูงกว่า และอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนการทำแห้งสูงขึ้น ตามลำดับ ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าของสิรวมของกะเพราหลังการทำแห้ง พบว่ากะเพราที่ผ่านการลวกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างของสิรวม (ΔE^*) มีค่าน้อยกว่ากะเพราที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ กะเพราที่ผ่านการลวกจะมีปริมาณ Eugenol และ Methyl eugenol ลดลงอย่างชัดเจน การทำแห้งโดยเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อน สามารถรักษารสชาติของ Eugenol และ Methyl eugenol ได้มากกว่าการทำแห้งแบบลมร้อน อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อน สามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาของอาหารที่อาจเกิดการเสียหายทางโครงสร้างได้เนื่องจากการใช้เครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อน สามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และเหมาะสมสำหรับอาหารที่ไวต่อความร้อน (Heat sensitive) เพราะเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อน ต้องการพลังงานน้อยสามารถหมุนเวียนความร้อนแฝงมาใช้ได้ใหม่ และทำงานได้โดยไม่ขึ้นต่อสภาพอากาศ Strommen and others (2002) รายงานว่า โดยทั่วไปเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อนอาจใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (Conventional dryer) ร้อยละ 60-80 ที่อุณหภูมิการทำแห้งเดียวกัน และอาหาร เช่น หัวหอมหั่นบางที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อนจะมีคุณภาพดีกว่าการทำแห้งแบบลมร้อน

Potisate and Phoungchandang (2010) ได้ศึกษาการทำแห้งใบตำลึงพบว่าแบบจำลอง Modified Henderson สามารถอธิบายดิซอร์พชันไอโซเทิร์มของใบตำลึงทำแห้งที่อุณหภูมิ 20 35 และ 50 องศาเซลเซียสได้ดีที่สุดและแบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายการทำแห้งใบตำลึงสดใบตำลึงลวกในน้ำเดือดและใบตำลึงลวกในสารเคมีเดือดด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาดและเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ใบตำลึงลวกในสารเคมีเดือดและทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสในเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อนจะมีคุณภาพดีที่สุด

Phoungchandang and others (2008b) ศึกษาการทำแห้งชาเขียวใบหม่อนโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบใช้ลมร้อนและเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบน้ำร้อนโดยศึกษาแบบจำลองที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้แบบจำลอง Newton, Modified Page, Henderson and Pabis และ Zero Model พบว่าแบบจำลอง Modified Page สามารถแสดงข้อมูลการทำแห้งชาเขียวใบหม่อนได้ดีที่สุดในเครื่องทำแห้งทั้งสองชนิดโดยค่าคงที่การทำแห้ง (K, min^{-1}) ที่ได้จากแบบจำลอง Modified Page มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามแบบจำลองของ Arrhenius และค่าคงที่ N (Drying exponent) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการทำแห้งแบบ exponential และจากข้อมูลการทำแห้งหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแต่ละอุณหภูมิของเครื่องทำแห้งแบบใช้ลมร้อนมีค่าระหว่าง $1.032\text{--}2.611 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และเครื่องทำแห้ง

แบบลดความชื้น โดยใช้เครื่องสูบลมความร้อนมีค่าระหว่าง $1.496-2.70 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ อีกทั้งหาเขียวใบหม่อนที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้น โดยใช้เครื่องสูบลมความร้อนมีปริมาณสารรูตินมากกว่าการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบใช้ลมร้อน

ประกาศกร กองพิมพ์ (2552) ศึกษาการทำแห้งใบโหระพาพบว่าสำหรับฟังก์ชัน $RH_e = f(X_e, T)$ แบบจำลอง Modified Chung-Pfost สามารถอธิบายดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของใบโหระพาสดได้ดีที่สุด ส่วนใบโหระพาลวก แบบจำลอง Modified Henderson สามารถอธิบายได้ดีที่สุด สำหรับฟังก์ชัน $X_e = f(RH_e, T)$ แบบจำลอง Modified Henderson สามารถอธิบายดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของทั้งใบโหระพาสดและใบโหระพาลวกได้ดีที่สุด และแบบจำลอง Henderson and Pabis สามารถทำนายการทำแห้งใบโหระพาสดได้ดีที่สุด และแบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายการทำแห้งของใบโหระพาลวกได้ดีที่สุด ทั้งเครื่องทำแห้งแบบถาดและเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้น โดยใช้เครื่องสูบลมร้อน นอกจากนี้การทำแห้งใบโหระพาลวกด้วยเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะมีคุณภาพดีที่สุด

8. แบบจำลองการทำแห้ง

แบบจำลองที่ใช้อธิบายการทำแห้ง แบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ แบบจำลองทางทฤษฎี (Theoretical model) แบบจำลองกึ่งทฤษฎี (Semitheoretical model) และแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง (Empirical model) โดยค่าอัตราส่วนความชื้นของการทำแห้ง (Doymaz 2005) หาได้จาก

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2.16)$$

อัตราการทำแห้งหาได้จาก

$$\text{อัตราการทำแห้ง} = \frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{dt} \quad (2.17)$$

Lewis (1921) ได้เสนอแบบจำลองซึ่งคล้ายกับกฎของนิวตัน (Newton's law of cooling) เพื่อใช้เป็นแบบจำลองการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง มีหลักการว่า น้ำจากอาหารจะถ่ายโอนสู่บรรยากาศด้วยอัตราเร็วคงที่ค่าหนึ่งและการทำแห้งจะสิ้นสุดลง เมื่อน้ำในอาหารมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุล (X_e) โดย สมมติให้อัตราความชื้นที่สูญเสียไปเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างระหว่างความชื้นในอาหาร กับความชื้นสมดุล ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.18)

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \quad (2.18)$$

เมื่อทำการอินทิเกรต จะได้สมการดังนี้

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-Kt) \quad (2.19)$$

Park and others (2002) ได้ใช้หลักการของ Lewis (1921) และ Sherwood (1929) ที่ได้ประยุกต์แบบจำลองการแพร่ของ Fick ในการศึกษาการทำแห้ง พบว่า แบบจำลองนี้สามารถอธิบายการทำแห้งของวัสดุทางชีวภาพได้ดี โดยแบบจำลองการแพร่ของ Fick สามารถนำมาใช้ในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงได้ โดยถ้าสมมติ

ชั้นอาหารมีความหนา $2L$ และมีความชื้นเริ่มต้น X_0 ที่สม่ำเสมอทั้งในและนอกชั้น ภายใต้สภาวะการทำแห้งที่คงที่ สามารถนำมาประยุกต์เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นสมการของ Page (Page 1949) คือ

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-Kt^N) \quad (2.20)$$

อย่างไรก็ตามสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาแบบจำลองการทำแห้ง ได้แก่

1) แบบจำลอง Newton (Lewis 1921)

$$MR = \exp(-Kt) \quad (2.21)$$

2) แบบจำลอง Modified Page (Overhult and others 1973)

$$MR = \exp[-(Kt)^N] \quad (2.22)$$

3) แบบจำลอง Henderson and Pabis (Henderson and Pabis 1961)

$$MR = A \exp(-Kt) \quad (2.23)$$

4) แบบจำลอง Zero model (Phoungchandang and Woods 2000)

$$MR = \frac{X}{X_0} = \exp(-Kt) \quad (2.24)$$

ค่าคงที่การทำแห้ง (K) สามารถอยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการทำแห้ง หรืออุณหภูมิของอาหาร โดยใช้แบบจำลองของ Arrhenius (Chen and Johnson 1969) ดังนี้

$$K = A \exp\left(-\frac{B}{T + 273.15}\right) \quad (2.25)$$

นอกจากนี้สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ N (Drying exponent) ในแบบจำลอง Modified Page กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการทำแห้งตามแบบจำลองที่เสนอโดย Rapusas and Driscoll (1995)

$$N = A \times RH^B \times \exp(C/T) \quad (2.26)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivity) สามารถคำนวณได้จากสมการการแพร่ (Henderson and Perry 1976) ดังสมการที่ (2.27) โดยการเคลื่อนที่ของน้ำคล้ายคลึงกับการนำความร้อนในของแข็งที่เป็นแผ่นบาง (slab)

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (2.27)$$

เมื่อตัวแปรในสมการหมายถึง

K	คือ	ค่าคงที่การทำแห้ง (Drying constant) (นาที ⁻¹)
X	คือ	ปริมาณความชื้นในอาหาร (%d.b.)
X_0	คือ	ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในอาหาร (%d.b.)
X_e	คือ	ปริมาณความชื้นสมดุล (%d.b.)
RH	คือ	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
RH_e	คือ	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล
RH_m	คือ	ค่าความชื้นสัมพัทธ์จากการทดลอง

RH_p	คือ	ค่าความชื้นสัมพัทธ์จากการทำนายโดยแบบจำลอง
MR	คือ	อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio)
C_1, C_2, C_3, A, B	คือ	ค่าคงที่
N	คือ	Drying exponent
n	คือ	จำนวนข้อมูล
t	คือ	เวลา (นาท)
T	คือ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
D_{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivity) (m^2/s)
L	คือ	ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นบาง (เมตร)