

บทที่ 2

สรุปสาระสำคัญของเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หอมหัวใหญ่

หอมหัวใหญ่ (Onions , *Allium cepa* L.) เป็นพืชล้มลุกขนาดเล็ก สูงประมาณ 30-40 cm ลำต้นสั้น อวบน้ำ มีลำต้นอยู่ใต้ดิน ส่วนหัวเกิดจากโคนกาบใบที่รวมจนมีลักษณะอัดกันแน่นเป็นกาบซ้อนกันสีขาวหรือขาวอมเขียว มีเปลือกนอกบางหุ้มอยู่ เมื่อแห้งมีสีน้ำตาล รูปร่างเป็นทรงกลมป้อมหรือไข่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-6 cm ลักษณะของหัว สีและน้ำหนักแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ หอมหัวใหญ่เป็นพืชพื้นเมืองของเอเชียตะวันตกเฉียงใต้แต่ได้นำไปปลูกในหลายภูมิภาค (นิจศิริ, 2534; สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2541; สำนักงานข้อมูลสมุนไพร มหาวิทยาลัยมหิดล, 2545)

2.1.1 แหล่งเพาะปลูกและภาวะการผลิตของหอมหัวใหญ่

ในประเทศไทย จังหวัดเชียงใหม่เป็นแหล่งเพาะปลูกหอมหัวใหญ่ที่สำคัญ ปริมาณผลผลิตมีมากที่สุดในประเทศไทย หอมหัวใหญ่ที่ปลูกได้มีหัวขนาดใหญ่ พันธุ์หอมหัวใหญ่ที่นิยมปลูกในประเทศไทยคือพันธุ์กรานิกซ์สีขาว (White Granex) อำเภอที่ปลูกหอมหัวใหญ่ของจังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่ อำเภอสันป่าตอง อำเภอแม่วาง อำเภอฝางและอำเภอไชยปราการ ฤดูกาลเพาะปลูกหอมหัวใหญ่ปกติใช้เวลาประมาณ 160 วัน โดยเพาะกล้า 45-50 วันและนำมาปลูกอีก 3 เดือน ซึ่งเวลาเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวออกสู่ตลาดแตกต่างกันตามแหล่งผลิตคือหอมหัวใหญ่จากอำเภอสันป่าตองและอำเภอแม่วางเพาะกล้าปลายเดือนตุลาคม ปลูกเดือนธันวาคม-มกราคม เริ่มเก็บเกี่ยวปลายเดือนมกราคม-มีนาคม ผลผลิตมีมากในเดือนกุมภาพันธ์ เกษตรกรขายทันทีและส่งออกจำหน่ายที่ประเทศญี่ปุ่นในรูปหอมหัวใหญ่สดแช่เย็น ส่วนหอมหัวใหญ่จากอำเภอฝางและอำเภอไชยปราการเพาะกล้าเดือนพฤศจิกายน ปลูกเดือนมกราคม-มีนาคม เก็บเกี่ยวเดือนมีนาคม-พฤษภาคม ผลผลิตมีมากในเดือนเมษายน หอมหัวใหญ่ที่ผลิตได้จากแหล่งนี้มีคุณภาพดี เกษตรกรนิยมเก็บไว้ให้แห้งก่อนนำออกขายและมีพ่อค้ามารับซื้อแล้วนำไปเก็บในห้องเย็น (สำนักงานเกษตรจังหวัดเชียงใหม่, 2545)

หอมหัวใหญ่มีปริมาณผลผลิตออกสู่ตลาดมากเดือนกุมภาพันธ์-เมษายนและมีการลักลอบนำเข้ามาเมล็ดหอมหัวใหญ่ตามบริเวณชายแดนมาปลูกแข่งขันกับเกษตรกรภายในประเทศทำให้ปริมาณหอมหัวใหญ่มีมากขึ้นจนเกิดปัญหาหอมหัวใหญ่ล้นตลาดและราคาต่ำสร้างความเดือดร้อนให้แก่เกษตรกรผู้ปลูก การแก้ปัญหาดังกล่าวทางรัฐบาลได้จับกุมผู้ลักลอบนำเมล็ดหอมหัวใหญ่เข้ามาอย่างผิดกฎหมายและจำกัดปริมาณเมล็ดหอมหัวใหญ่ที่นำเข้าจากต่างประเทศ สำหรับในประเทศได้วางแผนการผลิตเพื่อการส่งออกในรูปหอมหัวใหญ่สดและเก็บรักษาในห้องเย็นเพื่อให้เพียงพอแก่การบริโภคภายในประเทศตลอดทั้งปี (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2542)

2.1.2 การบริโภคหอมหัวใหญ่

ความต้องการบริโภคหอมหัวใหญ่ภายในประเทศไทยมีประมาณ 47,000 ตันปี อัตราการบริโภคหอมหัวใหญ่ของคนไทยโดยเฉลี่ยประมาณ 0.588 kg/ปี/คน (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2542) หอมหัวใหญ่นอกจากนำมาบริโภคสดแล้วสามารถแปรรูปเป็นหอมหัวใหญ่อบแห้ง (Dried Onion) เพื่อใช้เป็นเครื่องปรุงรส (Seasoning) ในอาหารกึ่งสำเร็จรูป เนื้อและผลิตภัณฑ์จากเนื้อ สอสพริก ซอสมะเขือเทศ ซุปกระป๋อง ซุปแห้งผง ขนมขบเคี้ยว มันฝรั่งทอดกรอบ (นิจศิริ, 2534; บริษัททีทีไอเอส จำกัด, 2540; รัตนาและพีไลรัก, 2541; สิงหนาท, 2537; Adam *et al.*, 2000; Liwicki *et al.*, 1998 a; Torringa *et al.*, 2001) ซุปก้อน เครื่องปรุงรสสำเร็จรูป เครื่องแกงสำเร็จรูป เพื่อเสริมกลิ่นและรสชาติของอาหารหลักให้ดีขึ้น ภัตตาคารและร้านอาหารที่ทำ Pizza และ Hamburger ใช้หอมหัวใหญ่สดและอบแห้งปรุงรสและประดับอาหารเพื่อให้ชวนรับประทาน เฉพาะอุตสาหกรรมอาหารกึ่งสำเร็จรูปที่มีอัตราการขยายตัว 20-30%/ปี ทำรายได้ 5,000-6,000 ล้านบาทมีความต้องการใช้ผักอบแห้งเป็นเครื่องปรุงรสอาหาร (Flavour Ingredient) ในบะหมี่ เส้นหมี่ ก๋วยเตี๋ยว วุ้นเส้น ทั้งในรูปซองที่มีราคาถูกและถ้วยซามที่มีราคาค่อนข้างสูง (บริษัททีทีไอเอส จำกัด, 2540) ปริมาณความต้องการผักอบแห้งของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารโดยรวมมีมากถึง 5,000 ตันปี และมีแนวโน้มเพิ่มปริมาณมากขึ้นในอนาคต (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2542)

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.3 คุณค่าทางโภชนาการและประโยชน์ทางยาของหอมหัวใหญ่

หอมหัวใหญ่สดมีคุณค่าทางโภชนาการในส่วนที่รับประทานได้ 100 g (ธัญนิติ, 2542) ดังนี้

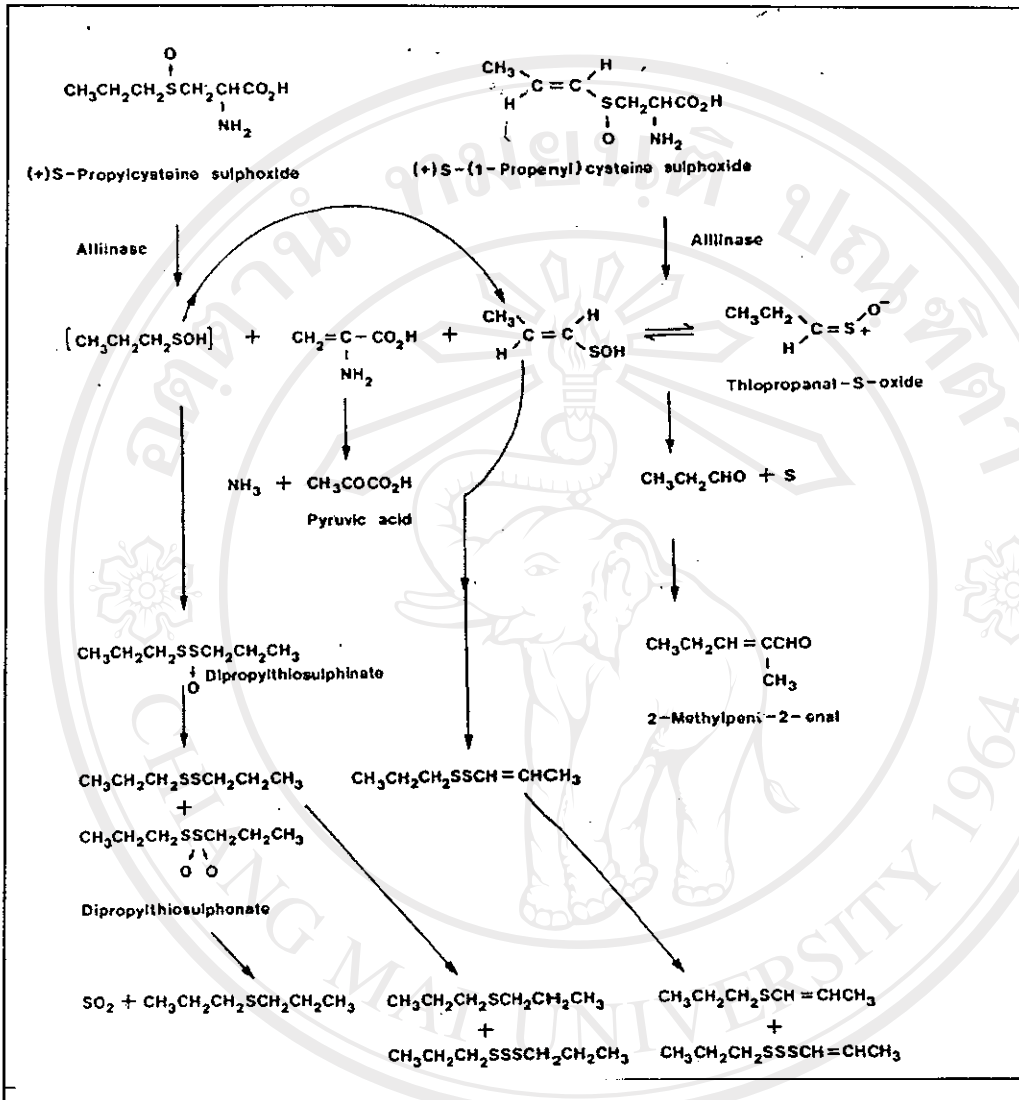
พลังงาน	26	kcal	แคลเซียม (Ca)	8	mg
ความชื้น	91.8	g	ฟอสฟอรัส (P)	27	mg
โปรตีน	1.4	g	เหล็ก (Fe)	8	mg
ไขมัน	0.1	g	วิตามินบี 1	0.02	mg
คาร์โบไฮเดรต	5.0	g	วิตามินบี 2	0.02	mg
เส้นใย	0.6	g	ไนอะซิน	0.4	mg
			วิตามินซี	22	mg

การบริโภคหอมหัวใหญ่สดมีประโยชน์ทางยาได้แก่ ลดปริมาณน้ำตาลในเลือด ป้องกันการแข็งตัวของเม็ดเลือดแดงในหลอดเลือด ป้องกันหลอดเลือดแข็งตัว (Atherosclerosis) รักษาโรคบิดจากเชื้อแบคทีเรีย ขับปัสสาวะ แก้อาการเกร็ง ลดไขมัน ลดไข้ ลดความดันโลหิตสูง รักษาแผลอักเสบ บาดแผล แผลเป็น ขับลม ขับพยาธิ ขับเสมหะ บำรุงธาตุ กระตุ้นน้ำดีและช่วยเจริญอาหาร (นิจศิริ, 2534; สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2541 ; สำนักงานข้อมูลสมุนไพรมหาวิทยาลัยมหิดล , 2545) Flavonoids ชื่อ Quercetin ในหอมหัวใหญ่สดสามารถลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งปอด (Marchand *et al.*, 2000) และเกี่ยวข้องกับการเพิ่มความต้านทานของสาย DNA (Deoxyribonucleic Acid) ที่จะแตกสลาย (Boyle *et al.*, 2000) หอมหัวใหญ่มีเส้นใยอาหาร (Dietary Fiber) (Ng *et al.*, 1998) สามารถนำมาสกัด Pectic Polysaccharides (Ishii, 1982; Mankarios *et al.*, 1980) สกัด Fructo-oligosaccharides (FOSs) เพื่อใช้เป็น Prebiotics ให้กับ Bifidobacterias ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ทางเดินอาหารของมนุษย์ (Gibson, 1998) เช่นเดียวกับไพโรจีน (2546) ที่ได้สกัดเอา Oligosaccharides จากหอมหัวใหญ่ของจังหวัดเชียงใหม่เพื่อใช้เป็นสาร Prebiotic และมีการสกัดเอาน้ำมันหอมระเหย (Onion Oil) ที่มีความสามารถเป็น Antioxidant ต้านทานการเกิด Lipid Peroxidation ในหนูทดลองที่ได้รับสาร Nicotin ได้ใกล้เคียงกับวิตามินอี (Helen *et al.*, 2000) ในทางการค้าหอมหัวใหญ่เป็นได้ทั้งอาหารและยา (Nutraceuticals) (Debnath *et al.*, 2002) แต่การรับประทานหอมหัวใหญ่สดอย่างต่อเนื่องควรระวังสาร Diphenyl Amine ที่เป็นพิษต่อไต การบริโภคหอมหัวใหญ่สดไม่ควรเกิน 0.035 g/วัน หรือเทียบเท่ากับหอมหัวใหญ่อบแห้ง 100 g (สำนักงานข้อมูลสมุนไพรมหาวิทยาลัยมหิดล , 2545)

2.1.4 การเกิดกลิ่นของหอมหัวใหญ่

หอมหัวใหญ่มีกลิ่นเฉพาะซึ่งสารประกอบที่ให้กลิ่นในหอมหัวใหญ่ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบกำมะถันที่ระเหยได้ (Volatile Sulfur Compounds) พบว่าสารประกอบของหอมหัวใหญ่มีมาก 120 ชนิด การสร้างสารประกอบให้กลิ่นของหอมหัวใหญ่เริ่มจากการสร้าง Flavour Precursors ด้วยกระบวนการ Sulfur Metabolism ในขณะที่เพาะปลูก หอมหัวใหญ่รับเอา Sulfate (SO_4^{2-}) จากดินที่เพาะปลูก เมื่อ Sulfate เข้าสู่หอมหัวใหญ่แล้วเปลี่ยนเป็น Sulfide (S^{2-}) ปฏิกิริยาการสังเคราะห์โดยอาศัยแสง (Light Reaction of Photosynthesis) สังเคราะห์กรดอะมิโนที่ชื่อ Cysteine และส่งผ่าน Sulfide เข้าไปอยู่ในลำดับย่อยของกรดอะมิโนนี้ หลังจากนั้นสังเคราะห์ Glutathione ซึ่งเป็น Tripeptide ของ Cysteine และมีการเปลี่ยนแปลง Sulfur Peptide Intermediates หลายชนิดและสุดท้ายได้ Sulfur Precursors หลายชนิดเช่นกัน Sulfur Precursors เหล่านี้สะสมอยู่ในหอมหัวใหญ่ (Ketter and Randle, 1998) ตามปกติการสร้างกลิ่นในหอมหัวใหญ่ถูกระงับการทำงานไว้เพราะเอนไซม์ Alliinase (S-alk(en)yl-L-cysteine sulfoxide Lyase, E.C. 4.4.1.4) ที่มีใน Vacuole แยกจาก Sulfur Precursors ที่มีใน Cytoplasm หากตัดเนื้อเยื่อหอมหัวใหญ่จะทำลายระบบป้องกันนี้ Vacuole ปล่อยน้ำและเอนไซม์ Alliinase ที่อยู่ในเนื้อเยื่อออกมาทำงานโดยทำหน้าที่เป็น Catalyst เร่งปฏิกิริยา Hydrolysis ของ Substrates คือ S-oxide Amino Acids ชื่อ S-alk(e-n)yl-L-cysteine S-oxide (Endogeneous S-alk(e-n)yl-L-cysteine sulfoxide Flavour Precursors, ACSOs) ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีกลิ่น ในหอมหัวใหญ่สด Flavour Precursors ที่มีมากคือ *trans*-(+)-S-(1-propynyl)-L-cysteine sulfoxide (1-PECSO, PRENCOS) ส่วน (+)-S-methyl-L-cysteine sulfoxide (MCSO) และ(+)-S-propyl-L-cysteine sulfoxide (PCSO) มีปริมาณน้อยกว่า Precursors นี้เกิด Catabolism แตกตัวอย่างรวดเร็วไปเป็น Alk(en)yl Sulfenic Acid, NH_3 , Pyruvic Acid ที่สำคัญคือ Thiopropanal-S-oxide (Lachrymatory Factor) สารนี้ทำให้น้ำตาไหล (Tear-causing Factor) และเกิดความรู้สึกร้อนที่ปากและคอ (Burning Sensation) Thiopropanal-S-oxide สร้างจาก PRENCOS เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อมา Alk(en)yl Sulfenic Acid นั้นสามารถควบแน่นต่อไปจนกลายเป็น Dialk(en)yl Sulfinates หรือสลายตัวไปเป็น Aliphatic Aldehydes ส่วน Thiosulfinates นั้นไม่เสถียรและสามารถแตกตัวโดยไม่ต้องอาศัยเอนไซม์เป็น Symmetrical และ Mixed Alkyl และ Alkenyl Monosulfides, Disulfides, Trisulfides หรือ Oxidation เป็น Sulfonates เวลาและอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการสลาย Substrates ที่เร่งโดยเอนไซม์ Alliinase การใช้ความร้อนที่สูงมาก ตัวอย่างเช่น การลวก (Blanching) มีผลต่อการเสียสภาพ (Denature) และระงับกิจกรรมการทำงาน (Activity) ของเอนไซม์ Alliinase ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารประกอบที่ให้กลิ่น

กลไกการเกิดสารประกอบที่ให้กลิ่นแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 การสร้างสารประกอบให้กลิ่นของเอนไซม์ *Alliinase* ในพืชกลุ่ม *Alliums*

ที่มา : Fenwick and Hanley, 1985

กระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดจากการทำงานของเอนไซม์ Alliinase นี้ได้สารประกอบที่เกิดกลิ่นในหอมหัวใหญ่สดหลายชนิดที่สำคัญได้แก่ Methylpropyl Disulfide, Methylpropyl Trisulfide, Dipropyl Disulfide, Dipropyl trisulfide ส่วนในหอมหัวใหญ่แปรรูป (Cooked Onion) สารให้กลิ่นได้แก่ Dipropyl Disulfide, Dipropyl Trisulfide และ (E)-and(Z)-1-propenyl Propyl Disulfide และ 3,4-dimethyl-2,5-dioxo-2,5-dihydrothiophene ที่มีกลิ่นคล้าย H_2S สามารถตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่ให้กลิ่นเหล่านี้จากการนำหอมหัวใหญ่มากลั่นด้วยไอน้ำ (Steam Distillation) หรือกลั่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum Distillation) หรือสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ให้ได้สารสกัด (Onion Extract) แล้วนำไปตรวจโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) ส่วนปริมาณ Pyruvic Acid แสดงถึงแนวโน้มความฉุน (Pungency) ของหอมหัวใหญ่ (นิจศิริ, 2534; Bacon *et al.*, 1999 ; Bandyopadhyay *et al.*, 1970; Järvenpää *et al.*, 1998; Ketter and Randle, 1998; Lancaster and Collin, 1981; Maarse, 1991 ; Schwimmer, 1968; Uddin and MacTavish, 2003; Yoo and Pike, 1999,2001)

Pyruvic Acid ของหอมหัวใหญ่ไม่ใช่กลิ่นแต่เป็นผลผลิตขั้นแรกที่ได้จากการทำงานของเอนไซม์ Alliinase (Enzymatically Pyruvic Acid) และมีความสัมพันธ์มากกับระดับการรับรู้ของผู้ทดสอบความฉุนของหอมหัวใหญ่สด (Schwimmer and Guadagni,1962) การวิเคราะห์ปริมาณ Pyruvic acid นี้ ได้พัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1961 (Schwimmer and Weston, 1961) ซึ่งเป็นวิธี Spectrophotometry และเป็นที่ยอมรับหลายควบคู่กับการศึกษาเคมีของกลิ่นหอมหัวใหญ่ (Onion Flavour Chemistry) ด้วยวิธีการอื่นๆจนถึงปัจจุบัน ไม่มีวิธีวิเคราะห์ทางเคมีที่วัดปริมาณสารให้กลิ่นในหอมหัวใหญ่ได้ทั้งหมด การวิเคราะห์สาร Flavour Precursors กระทำได้ยุ่งยากเพราะสารเหล่านี้ไม่เสถียรสามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบอื่นได้ง่าย วิเคราะห์ตัวอย่างได้ไม่มากต่อวัน ปัจจุบันสามารถประยุกต์การวิเคราะห์ปริมาณ Pyruvic Acid เพื่อใช้ควบคุมคุณภาพหอมหัวใหญ่สดได้ในปริมาณมาก ง่าย สะดวก และรวดเร็วด้วยระบบอัตโนมัติ (Yoo and Pike, 1999) แต่การวิเคราะห์ปริมาณ Enzymatically Pyruvic Acid แสดงแนวโน้มการเกิดกลิ่นของหอมหัวใหญ่ไม่ได้วิเคราะห์กลิ่นของหอมหัวใหญ่โดยตรง (Katter and Randle, 1998 ; www.mkseed.com; www.vidiallab.com) และการวิเคราะห์ปริมาณ Pyruvic Acid ใช้วิเคราะห์กับพืชกลุ่ม *Alliums* อื่นๆ ตัวอย่างเช่น หอมแดง ต้นหอมและกระเทียมได้

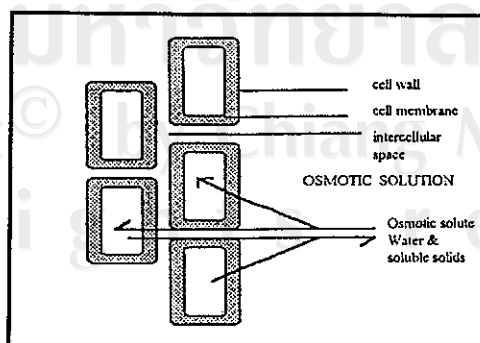
สภาพแวดล้อมมีอิทธิพลมากต่อปริมาณ Pyruvic Acid ในช่วงแรกของการเพาะปลูก ถ้าเพิ่มธาตุอาหารที่มีสารประกอบ Sulfur ในรูป $CaSO_4$ หรือ $(NH_4)_2SO_4$ ในดินที่ใช้ปลูกหอมหัวใหญ่มีโอกาสเพิ่มความฉุนได้ (Halmilton *et al.*,1998) และจำกัดปริมาณน้ำที่ใช้รดหอมหัวใหญ่ให้น้อยลง การเพาะปลูกกระทำในสภาวะแห้ง อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่สูง จำนวนต้นหอมหัวใหญ่ต่อหน่วยพื้นที่

ที่เพาะปลูกมาก การเก็บรักษาหอมหัวใหญ่สดเป็นเวลานานช่วยเพิ่มความฉุนได้ หอมหัวใหญ่มีน้ำตาล Sucrose Glucose Fructose และ Polymer ของ Fructose คือ Fructan มาก ปริมาณน้ำตาลในหอมหัวใหญ่เกี่ยวข้องกับเวลาเพาะปลูก หอมหัวใหญ่ที่ปลูกในฤดูหนาวช่วงกลางวันสั้น (Short Day Cultivars) แนวโน้มมีปริมาณน้ำตาลมากและ Fructan น้อย หอมหัวใหญ่ปลูกในฤดูร้อนช่วงกลางวันนาน (Long Day Cultivars) มีปริมาณน้ำตาลน้อยและ Fructan มาก สันนิษฐานว่า Fructan ไม่ให้รสหวานแต่ช่วยควบคุมความชื้นและปริมาณของแข็งในหอมหัวใหญ่ ปริมาณน้ำตาลเกี่ยวข้องกับความฉุน แนวโน้มพบว่าหอมหัวใหญ่ที่มีน้ำตาลสูงมีความฉุนน้อย หอมหัวใหญ่สดกลุ่มนี้เก็บรักษาได้ยากเพราะความชื้นสูงทำให้จุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับดินสามารถเข้าไปที่บริเวณรอยชำรอยตัดที่บริเวณคอหอมหัวใหญ่และเจริญเติบโตได้ หอมหัวใหญ่กลุ่มนี้มีรสหวาน (Sweet Onion) เหมาะสำหรับรับประทานสดหรือนำไปประกอบอาหาร หอมหัวใหญ่ที่มีปริมาณน้ำตาลน้อยมีความฉุนมาก หอมหัวใหญ่สดกลุ่มนี้มีความชื้นน้อย ปริมาณของแข็งมากและเก็บรักษาได้ดีเป็นปีซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของหอมหัวใหญ่สดที่ใช้อบแห้งเพราะได้กลิ่นแรง (Ketter and Randle, 1998 ; www.mkseed.com; www.vidalialab.com)

ในต่างประเทศได้สกัดเอาน้ำมัน (Onion Oil) โดยวิธี Supercritical Carbon Dioxide (Saengcharoenrat and Guyer , 2004) เพื่อใช้เป็นสารปรุงแต่งอาหาร (Flavour Additive) โดยเฉพาะเนื้อหอมหัวใหญ่สดซึ่งส่วนใหญ่เป็นส่วนบนและล่างของหอมหัวใหญ่ที่ไม่ได้นำไปอบแห้ง มาสกัดเพราะมีปริมาณของ *trans-(+)-S-(1-propenyl)-L-cystein Sulfoxide (1-PECSO)* ซึ่งเป็น Flavour Precursors และ Pyruvic Acid ในปริมาณมาก โดยเฉพาะหอมหัวใหญ่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0°C -0.5°C เป็นเวลา 6 เดือน ในที่มีด วิธีนี้ช่วยลดของเสีย ประหยัดและนำของเหลือมาเพิ่มมูลค่า (Bacon et al, 1999; Simándi et al., 2000)

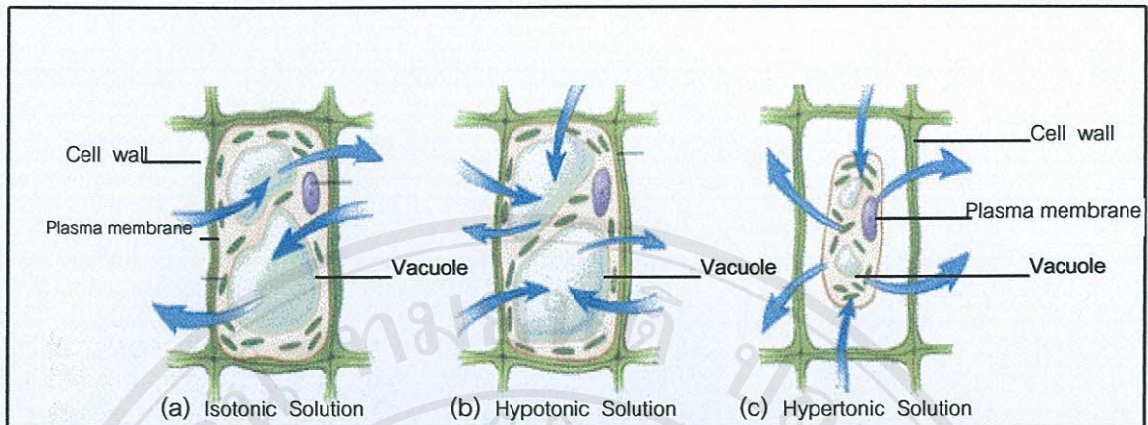
2.2 การลดน้ำด้วยวิธีออสโมติก

การลดน้ำด้วยวิธีออสโมติก (Osmotic Dehydration (OD) , Osmotic Concentration, Dewatering and Impregnation Soaking in Concentrated Solutions (DIS)) เป็นวิธีทำแห้งด้วยการแช่ชิ้นอาหารในสารละลายความเข้มข้นสูง (Hypertonic Solution) หรือสารละลายที่มีค่า a_w ต่ำกว่าอาหารก็เกิดการออสโมติกขึ้นทันทีเพราะความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ระหว่างภายในเซลล์และสารละลายภายนอกเกิดเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving Force) และศักย์ทางเคมี (Chemical Potential) ทำให้มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างอาหารและสารละลายภายนอก น้ำที่อยู่ภายในอาหารซึมผ่านผนังเซลล์ (Cell Wall) และเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) ออกมาในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ขณะเดียวกันตัวถูกละลายในสารละลายซึมผ่านผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไป การแพร่ของน้ำจากภายในอาหารและตัวถูกละลายในสารละลายเข้มข้นภายนอกเกิดขึ้นพร้อมกันแต่ในทิศทางตรงกันข้าม (Counter-current Diffusion) และกระบวนการนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ปริมาณน้ำในอาหารลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงแรก เพราะมีความแตกต่างของแรงดันออสโมติกอย่างมากและอาหารมีความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลสารไม่มาก ส่วนช่วงเวลา 2-6 ชั่วโมงต่อมาการแพร่ของน้ำลดลง อัตราการแพร่ของตัวถูกละลายเข้าไปในเนื้อเยื่ออาหารช้ากว่าการแพร่ของน้ำจึงทำให้ตัวถูกละลายส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นอาหาร การออสโมติกดำเนินไปจนกระทั่งสารละลายเจือจางลง อัตราการถ่ายเทมวลสารลดลงและระบบปรับเข้าสู่สมดุล วิธีนี้ทำให้ชิ้นอาหารเปลี่ยนแปลงปริมาตรและหดรัดตัว มวลของตัวถูกละลายในชิ้นอาหารเพิ่มขึ้น (รัตนานาและพิไลรัก, 2541; อ่อนรวี, 2533; Barat *et al.*, 1998; Cánovas and Mercado, 1996; Kowalska and Lenart, 2001 ; Lazarides, 1994; Lazarides *et al.*, 1995 b; Marouzè *et al.*, 2001 ; Rastogi *et al.*, 2002; Sereno *et al.*, 2001 ; Spiazzi and Mascheroni, 1997; Torreggiani and Bertolo, 2001) กลไกการออสโมติกแสดงในรูป 2.2



รูป 2.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลสารระหว่างเนื้อเยื่ออาหารและสารละลายออสโมติกผ่านเยื่อหุ้มทางชีวภาพ (Biological Membrane)

ที่มา : Lazarides, 1994



รูป 2.3 การเปลี่ยนแปลงเซลล์พืชในสารละลายความเข้มข้นต่างๆ

ที่มา : <http://faculty.stoc.ce.tn.us/jiwillianis/plasmolysis.htm>

จากรูป 2.3 (a) โครงสร้างเซลล์พืชในสภาวะปกติเป็นเหลี่ยม ผนังเซลล์ (Cell Wall) ที่อยู่รอบเซลล์เป็นโครงสร้างที่เพิ่มความแข็งแรงและป้องกันส่วนประกอบภายในให้กับเซลล์พืช ผนังเซลล์เป็นเยื่อที่ยอมให้สารเกือบทุกอย่างผ่านได้สะดวก (Permeable Membrane) ส่วนเยื่อหุ้มเซลล์ (Plasma Membrane, Plasmalemma) ที่ติดผนังเซลล์มีหน้าที่แสดงขอบเขตของเซลล์และห่อหุ้มองค์ประกอบต่างๆในเซลล์ทั้งหมดให้คงรูป เยื่อนี้มีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Differentially Permeable Membrane, Selectively Permeable Membrane) คือคัดเลือกชนิดของสารและปริมาณสารที่ผ่านเข้าออกจากเซลล์ให้ผ่านเข้าได้เร็ว ช้า หรือสารบางชนิดอาจไม่ให้ผ่าน (เกษม, มปป.; นิพนธ์, 2534; สมาน, มปป.) ภายในเซลล์มี Vacuole ซึ่งในเซลล์พืชชั้นสูงเมื่อเจริญเต็มที่ที่มีปริมาตรถึง 90-95% ของเซลล์ ภายใน Vacuole มีองค์ประกอบของ กลีโอสินทรีย์ กลีโอสินทรีย์ กรดอะมิโน น้ำตาล วิตามิน หydrocarbon ผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำ สารโมเลกุลต่ำ O_2 CO_2 และน้ำ Vacuole มีเยื่อหุ้มชั้นเดียวและมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่านมีชื่อว่า Tonoplast เซลล์พืชในสภาวะปกติที่แช่ในระบบที่มีความเข้มข้นของสารละลายภายนอกและภายในเซลล์ใกล้เคียงกัน (Isotonic Solution) มีการถ่ายเทน้ำเข้าและออกจากเซลล์ใกล้เคียงกัน แต่ในระบบที่มีความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเซลล์ต่ำกว่าสารละลายภายในเซลล์ (Hypotonic Solution) เช่น การแช่เซลล์พืชในน้ำกลั่น แสดงในรูป 2.3 (b) น้ำจากภายนอกจะแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์โดยเฉพาะที่ Vacuole มากขึ้นทำให้เกิดแรงดันเต่ง (Turgor Pressure) เพิ่มขึ้นภายในเซลล์ ทำให้เซลล์ยืดขยายขนาดออกไปและเซลล์มีปริมาตรเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า *Plasmoptysis* แต่แรงดันเต่งที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้เซลล์พืชแตกออกเพราะมีแรงต้านของผนังเซลล์ (Cell Wall Pressure) (นิพนธ์, 2534; สมาน, มปป.) ในทางตรงกันข้ามการแช่เซลล์พืชในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง Vacuole สูญเสียน้ำออกไปทำให้ Vacuole หดตัว และชักนำให้เยื่อหุ้มเซลล์แยกออกจากผนังเซลล์ ปริมาตรของ Vacuole ลดลงและก่อให้เกิดช่องว่าง (Free Space) ภายในเซลล์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า *Plasmolysis*

2.2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นและตัวถูกละลายของการออสโมติก

การออสโมติกเป็นการแพร่ซึมของโมเลกุล (Molecular Diffusion) ของของเหลวแพร่ซึมผ่านช่องว่างหรือรูพรุนของของแข็งเพราะความเข้มข้นที่แตกต่างกัน การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและตัวถูกละลายซึ่งเป็นการแพร่ซึมในสภาวะที่ไม่คงตัว (Unsteady State) อาหารมีความชื้นเริ่มต้นที่ผิวหน้าคงที่ การกระจายความชื้นภายในชิ้นอาหารสม่ำเสมอ ความชื้นเคลื่อนที่จากภายในอาหารออกมา ความชื้นที่บริเวณต่างๆในอาหารจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา สารละลายออสโมติกมีความเข้มข้นคงที่ ไม่พิจารณาความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นอาหารและสารละลายที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร การแพร่ที่สภาวะไม่คงตัวจะเป็นตามกฎการแพร่ของฟิคส์ข้อที่ 2 (Fick's Second Law of Unsteady State Diffusion) แสดงในสมการ 2.1

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ

c คือ ความเข้มข้น

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)

x คือ ระยะทางในการแพร่ในแนวแกน x

t คือ เวลา

จากสมการที่ 2.1 สามารถแก้สมการและหาคำตอบของสมการ ได้ดังสมการ 2.2 และ 2.3

$$E_m = \frac{m - m_e}{m_o - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp [-(2n+1)^2 \pi^2 Fo_m] \quad (2.2)$$

$$E_s = \frac{s - s_e}{s_o - s_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp [-(2n+1)^2 \pi^2 Fo_s] \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$Fo_m = \frac{D_m t}{a^2} \quad (2.4)$$

$$Fo_s = \frac{D_s t}{a^2} \quad (2.5)$$

E_m	คือ Moisture Ratio
E_s	คือ Solute Ratio
Fo_m	คือ Fourier Number ของการแพร่ของความชื้น
Fo_s	คือ Fourier Number ของการแพร่ของตัวถูกละลาย
m, m_0, m_e	คือ ความชื้นที่เวลา t (s) ใดๆ, เวลาเริ่มต้น และเวลาสมดุล ตามลำดับ
s, s_0, s_e	คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่เวลา t (s) ใดๆ, เวลาเริ่มต้น และเวลาสมดุล ตามลำดับ
D_m	คือ Moisture Diffusion Coefficient (m^2/s)
D_s	คือ Solute Diffusion Coefficient (m^2/s)
a	คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของอาหารที่มีรูปทรงแผ่นบาง (m)
n	คือ จำนวน 0,1,2,3,...

สมการที่ 2.2 และ 2.3 เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและตัวถูกละลายได้แต่จากสมการ 2.2 และ 2.3 พิจารณาการแพร่ 1 ทิศทางคือด้านหน้าของอาหารแผ่นบางเท่านั้น แต่ถ้าอาหารเกิดการแพร่ของความชื้นและตัวถูกละลายทั้งด้านหน้า (2a) ด้านกว้าง (2b) และด้านยาว (2c) สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและตัวถูกละลายได้อีกวิธีคือหาค่า E_m จาก Moisture Ratio ในสมการที่ 2.2 และค่า E_s จาก Solute Ratio ในสมการที่ 2.3 ที่สัมพันธ์กับการแพร่ของด้านทั้ง 3 ดังแสดงในสมการ 2.6 และ 2.7

$$E_m = E_{ma} E_{mb} E_{mc} = f\left(\frac{D_{ma} t}{a^2}\right) f\left(\frac{D_{mb} t}{b^2}\right) f\left(\frac{D_{mc} t}{c^2}\right) \quad (2.6)$$

$$E_s = E_{sa} E_{sb} E_{sc} = f\left(\frac{D_{sa} t}{a^2}\right) f\left(\frac{D_{sb} t}{b^2}\right) f\left(\frac{D_{sc} t}{c^2}\right) \quad (2.7)$$

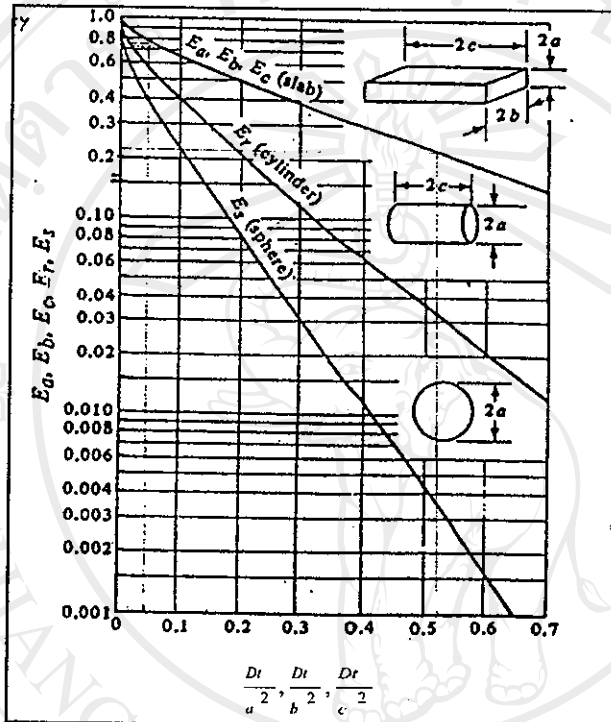
สามารถเขียนตามกฎการแพร่ของฟิคส์ข้อที่ 2 ได้ดังสมการ 2.8

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ x, y, z คือ ระยะทางในการแพร่ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ

คำนวณค่า E_m และ E_s ที่เวลา t (s) ใดๆ นำค่า E_m และ E_s ไปอ่านค่าแกน X ในรูป 2.4

ซึ่งการคำนวณค่า E_m และ E_s และอ่านค่าจากรูปที่ 2.4 กระทำได้สะดวกกว่าการแก้สมการที่ 2.2 และ 2.3 ทั้งพิจารณาการแพร่ได้ใน 3 ทิศทาง กำหนดให้ D คือ Diffusion Coefficient (m^2/s) และ $2a, 2b, 2c$ คือ ความหนา ความกว้างและความยาวของอาหารแผ่นบางตามลำดับ แก้สมการเพื่อหาค่า Moisture Diffusion Coefficient, D_m (m^2/s) และ Solute Diffusion Coefficient, D_s (m^2/s)



รูป 2.4 Unsteady-state Diffusion

ที่มา: Treybal, 1968

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงของผักในระหว่างการออสโมติกด้วยสารละลายเกลือแกง

เกลือแกง เป็นสารทางการค้าที่นิยมใช้เตรียมเป็นสารละลายออสโมติกเพื่อใช้กับผักเพราะเกลือแกงที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น ป้องกันการเกิดปฏิกิริยา Enzymatic Browning เพราะทำให้ความสามารถในการละลายของ O_2 ในน้ำลดลง ทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ช้าลงเพราะเกลือแกงแตกตัวเป็นคลอไรด์ไอออน (Cl^-) และทำให้เซลล์จุลินทรีย์เกิด Plasmolysis ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ จัดเป็นหนึ่งใน Physico-chemical Hurdles ที่ช่วยถนอมอาหาร มีความปลอดภัยจัดว่าเป็น GRAS (Generally Recognized as Safe) สารละลายเกลือแกงที่มีความเข้มข้นไม่มากไม่เป็นผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภคและไม่ทำให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเปลี่ยนไป เกลือแกงมีราคาต่อหน่วยถูก ไม่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นมาก (ประสาร, 2538; รัตนาและพิไลรัก, 2541; วราวุฒิ, 2538; วณิดาและปราณี, 2544; Cánovas and Mercado, 1996; Leistner and Gorris, 1995)

การออสโมติกผักด้วยสารละลายเกลือแกงเริ่มจากคัตขนาดและตัดแต่งผักให้มีรูปร่างตามต้องการ นำขึ้นผักมาแช่ในภาชนะที่บรรจุสารละลายออสโมติก ในอัตราส่วนของผักต่อสารละลายออสโมติกในช่วง 1:3-1:5 หรือต่ำกว่านี้ อุณหภูมิ 30-50°C และเวลาแช่ 150-240 นาที อาจวนตลอดเวลาแช่ (รัตนและพิไลรัก, 2541) ในระหว่างออสโมติกเกิดกลไกการแทรกซึมของเกลือแกงเข้าไปในผักซึ่งมีอยู่ 3 ช่วงตามลำดับดังนี้ (กัลฉัตรรงค์, 2521)

ช่วงที่ 1 การดึงน้ำออกจากชั้นผักโดยผ่านเยื่อเลือกผ่านของเซลล์ออกมาเพราะความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายเกลือแกงและผัก น้ำแพร่ซึมได้เร็วกว่าเกลือแกง ช่วงแรกน้ำหนักผักลดลง อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักขึ้นกับลักษณะของเซลล์และพื้นที่ที่ชั้นผักสัมผัสกับสารละลายเกลือแกง Pectin บางส่วนที่ละลายออกมานอกชั้นผักทำให้โครงสร้างของเซลล์อ่อนตัวลง อากาศที่มีในช่องว่างระหว่างเซลล์และใน Vacuole แทรกซึมออกมานอกเซลล์ได้ง่ายขึ้น

ช่วงที่ 2 เกลือแกงแทรกซึมจนความเข้มข้นของเกลือแกงภายในชั้นผักสูงขึ้นอีก เมื่อความเข้มข้นถึงจุดหนึ่งเกลือแกงแทนที่อากาศที่อยู่ภายในช่องว่างของเซลล์จนหมด สีของชั้นผักที่บวมขึ้น

ช่วงที่ 3 เกลือแกงแทรกซึมเข้าไปในชั้นผักจนเข้าสมดุล ความเข้มข้นของเกลือแกงสูงที่สุดเมื่อชั้นผักมีเกลือแกงเพิ่มขึ้นผักมีน้ำหนักเพิ่มตาม

หลังจากแช่ชั้นผักในสารละลายเกลือแกงจนเข้าสมดุลแล้ว กรองแยกเอาชั้นผักออกมาล้างน้ำเพื่อชะล้างเอาเกลือแกงที่ผิวหน้าออกให้หมด วางบนตะแกรงก่อนนำไปผ่านการแปรรูปต่อไป

ในระหว่างการออสโมติกอาจติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยตัวบ่งชี้กระบวนการ (Process Indices) แสดงด้วยค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss) ปริมาณตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้น (Solute Gain) และน้ำหนักลดลง (Weight Reduction) (รัตนและพิไลรัก, 2541)

$$\% \text{ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำเริ่มต้น} - \text{ปริมาณน้ำที่เวลาวัด}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.9)$$

$$\% \text{ ปริมาณตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้น (Solute Gain)} = \frac{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด} - \text{ปริมาณของแข็งเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.10)$$

$$\% \text{ น้ำหนักลดลง (Weight Reduction)} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักที่เวลาวัด}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.11)$$

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกสโมติกผักด้วยสารละลายเกลือแกง

- ความเข้มข้นของสารละลายเกลือแกง

เกลือแกงที่ใช้สโมติกควรเป็นเกลือบริสุทธิ์เตรียมให้มีความเข้มข้นไม่มากกว่า 10% เพราะสารละลายเกลือแกงที่มีความเข้มข้นสูง อัตราการสูญเสียความชื้นสูงขึ้นแต่อัตราการซึมของเกลือแกงเพิ่มขึ้นตามทำให้สี กลิ่น รสชาติของผักเปลี่ยนไป (รัตนานะและพิไลรักษ์, 2541) Baroni and Hubinger (1999) ศึกษาการออกสโมติกหอมหัวใหญ่พันธุ์ Balia Piriforme หั่นเป็นทรงลูกบาศก์แช่ในสารละลายเกลือแกง พบว่าความชื้นลดลงได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารละลายเกลือแกงความเข้มข้นสูง แต่มีปริมาณเกลือแกงในหอมหัวใหญ่สูงสุดเช่นกัน

- อุณหภูมิ

อุณหภูมิเร่งให้อากาศแพร่เร็วขึ้น อากาศแพร่ออกจากมาเซลล์ได้เร็วและทำให้เกลือแกงมีโอกาสแทรกซึมแทนที่ได้เร็วขึ้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายออกสโมติกให้สูงขึ้นประมาณ 30 - 50°C อัตราการออกสโมติกเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสูงเกิน 70°C มีผลต่อเนื้อเยื่อของผัก (กล้านรงค์, 2521) การออกสโมติกสามารถกระทำที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิไม่เกิน 60°C (Lazarides *et al.*, 1995 b) Ozen *et al.* (2002) ศึกษาการออกสโมติกพริกเขียวหั่นเป็นทรงลูกบาศก์แช่ในสารละลายเกลือแกง 2-10% และ Sorbital 0-10% อุณหภูมิ 20-50°C พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการออกสโมติกใน 2 ชั่วโมงแรก แต่เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิกับความเข้มข้นของสารละลายปัจจัยสำคัญที่สุดต่อการออกสโมติกพริกเขียวคือความเข้มข้นของสารละลายออกสโมติก ข้อเปรียบเทียบนี้สอดคล้องกับการทดลองกับหอมหัวใหญ่ (Baroni and Hubinger, 1999)

- อัตราส่วนผักต่อสารละลายเกลือแกง

อัตราส่วนผักต่อสารละลายออกสโมติกที่เหมาะสมคือ 1:5 หรือต่ำกว่านี้ เพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายให้คงที่ (Rosa and Girox, 2001) ถ้าอัตราส่วนของผักต่อสารละลายเกลือแกงมากทำให้ความเข้มข้นของสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้แรงดันออสโมติกลดลง แต่มีรายงานว่าปัจจัยนี้มีผลไม่มากต่อการออกสโมติกพริกเขียว (Ozen *et al.*, 2002)

- การกวน

การกวนระหว่างการออกสโมติกช่วยรักษาความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้แช่ให้สม่ำเสมอโดยเฉพาะบริเวณรอบๆ ผัก มิฉะนั้นสารละลายรอบชิ้นผักจะเจือจางทำให้การถ่ายเทความชื้นลดลง (Lazarides *et al.*, 1995 a) อัตราการออกสโมติกของระบบกวนตลอดเวลาเร็วกว่าของระบบนิ่ง การศึกษาผลของการกวนที่มีต่อการออกสโมติกมันฝรั่ง การกวนทำให้ความชื้นลดลงและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการไม่กวน (Azuaara *et al.*, 1996) แต่มีผลไม่มากต่อการออกสโมติกพริกเขียว (Ozen *et al.*, 2002)

- รูปร่างและขนาดของขึ้นผัก

รูปร่างและขนาดของขึ้นผักมีผลต่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร ถ้าอัตราส่วนนี้มากความชื้นแพร่ออกมาได้เร็ว ผักขึ้นใหญ่หรือมีทรงกลมความชื้นแพร่ออกได้น้อยเพราะอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรมีค่าน้อย ผักที่ตัดให้มีลักษณะเป็นวงแหวน (Rings) มีผลอย่างมากต่อการลดลงของความชื้นและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับผักที่ตัดให้เป็นวงกลมหรือแท่ง ผักที่ตัดให้เป็นทรงลูกบาศก์มีความชื้นลดลงน้อยแต่ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นมากทำให้น้ำหนักของขึ้นผักลดลงไม่มาก (อ๋อนรวิ, 2533; Lazarides, 1994)

2.2.4 ข้อดีและข้อเสียของการออสไมติกผัก

ข้อดี - ผักที่ผ่านการออสไมติกก่อนอบแห้งช่วยลดเวลาอบแห้ง ช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้ง ผักมีสี กลิ่น รสชาติที่ดีโดยไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง เห็ดที่ผ่านการออสไมติกด้วยสารละลายเกลือแกงแล้วนำไปอบแห้งด้วยระบบ Microwave-hot-air พบว่าการออสไมติกลดความชื้นเริ่มต้นของเห็ดได้ 30% ผลิตภัณฑ์อบแห้งได้รับความร้อนสม่ำเสมอ ลดการไหม้ที่บริเวณตรงกลางขึ้นเนื้อเห็ด ความสามารถในการคืนรูปของเห็ดดีเพราะการออสไมติกลดการหดตัว เพิ่มรูพรุนและใช้เวลาอบแห้งสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับเห็ดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบ Microwave-hot-air เพียงวิธีการเดียว (Torrington *et al.*, 2001)

- สารละลายออสไมติกที่มีความเข้มข้นสูงทำให้เอนไซม์ที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา Enzymatic Browning ในผักทำงานลดลง สีของผักจึงไม่เปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลและผักแช่อยู่ในสารละลายไม่ได้สัมผัสกับอากาศจึงไม่ต้องใช้สารเคมี ตัวอย่างเช่น SO_2 หรือ Ascorbic Acid เพื่อช่วยรักษาสีผัก (อ๋อนรวิ, 2533; Lazarides, 1994)

- การเพิ่มตัวถูกละลายช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการหรือปรับปรุงรสชาติผลิตภัณฑ์ให้ยอมรับประทาน (Torreggiani and Bertolo, 2001)

ข้อเสีย - การออสไมติกผักหากใช้เวลานานอาจสูญเสียสารอาหารตามธรรมชาติบางส่วน ตัวอย่างเช่น น้ำตาล กรดอะมิโนบางชนิดและแร่ธาตุ ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณค่าทางอาหาร ปริมาณเกลือแกงที่อยู่ในขึ้นผักมากส่งผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายให้มีรสเค็มมาก

- การใช้สารละลายออสไมติกที่มีความเข้มข้นมากเกินไปเสี่ยงสารเคมี อัตราส่วนระหว่างสารละลายออสไมติกต่อผักถ้ามากเกินไปเสี่ยงน้ำและน้ำบาดยาก ควรใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมและใช้ร่วมกับวิธีอื่นที่ช่วยรักษาสารละลายออสไมติกให้สามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้ง (Reuse) เพื่อประหยัดน้ำ บำบัด

ง่ายและรักษาสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น การปรับความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกให้ได้ระดับเดิม ด้วยการเติมตัวถูกละลายเพิ่มลงไป (Reconcentration) การทำให้สารละลายออสโมติกที่เจือจางนั้นเข้มข้นขึ้นด้วยการระเหยน้ำ (Evaporation) หรือ กรองด้วย Membrane (Rosa and Giroux, 2001)

การออสโมติกช่วยลดความชื้นที่มีมากในอาหารก่อนแปรรูปด้วยวิธีอื่น การออสโมติกกระทำที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C จัดได้ว่าเป็น Minimal Processing (Lazarides *et al.*, 1995 b) แนวทางนี้ใช้บำบัด (Pretreatment) ผักก่อนการอบแห้งเพื่อลดเวลาอบแห้ง ลดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวเคมี ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพที่ดีขึ้นกว่าการอบแห้งด้วยวิธีเดียว ซึ่งแนวโน้มของผู้บริโภคในปัจจุบันต้องการผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความเป็นธรรมชาติมากที่สุด

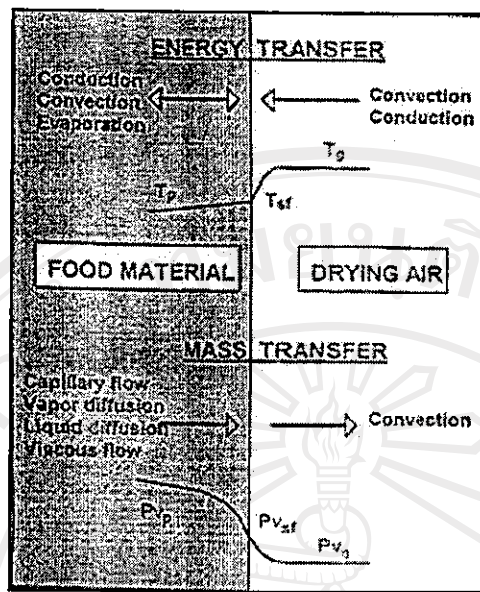
2.3 การอบแห้งหอมหัวใหญ่

การแปรรูปหอมหัวใหญ่ออบแห้งเป็นวิธีที่นิยมทำในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา อินเดีย จีน ตุรกี มีผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น ชี้นวงแหวน (Ring) เกล็ด (Flaked) สับละเอียด (Chopped) บด (Minced) เม็ด (Granulated) ผงแป้ง (Powder) (ศิริทรัพย์, 2542; Adam *et al.*, 2000; Arsdel *et al.*, 1973) แต่ในประเทศไทยการผลิตไม่แพร่หลาย สาเหตุหนึ่งมาจากความชื้นของหอมหัวใหญ่ที่ปลูกในประเทศไทยมีมากกว่า 90% ต้องใช้เวลาอบแห้งนาน (ศิริทรัพย์, 2542; สิงหนาท, 2537) การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอากาศร้อนเสียค่าพลังงานสูงทำให้การผลิตหอมหัวใหญ่ออบแห้งในประเทศไทยจำกัดด้วยต้นทุนค่าพลังงานที่สูง

อุตสาหกรรมหอมหัวใหญ่ออบแห้งส่วนใหญ่พบในภาคเหนือของประเทศไทยในระดับครัวเรือนใช้ตู้อบแบบกระบะที่ใช้ในการอบลำไย จากนั้นจึงส่งจำหน่ายต่อให้โรงงานในเขตกรุงเทพมหานครเป็นผงก่อนจำหน่ายแก่อุตสาหกรรมต่อเนื่อง โรงงานขนาดเล็กใช้เครื่องอบแห้งแบบกระบะ (Bed Dryer) แต่พบว่าหอมหัวใหญ่ออบแห้งที่ผลิตได้มีปัญหาเรื่องสูญเสียกลิ่น เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในระหว่างอบแห้งและเก็บรักษา โรงงานขนาดใหญ่ทำหอมหัวใหญ่ออบแห้งที่มีคุณภาพดีโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบสายพาน (Conveyer Drying) เครื่องอบแห้งแบบ Fluidized Bed หรือ แบบ Freeze Drying ถึงแม้จำหน่ายผลิตภัณฑ์ได้ราคาสูงแต่ต้องเสียค่าเทคโนโลยีและพลังงานเพิ่ม ต้นทุนการผลิตจึงสูงเช่นกัน (บริษัททีไอเอส, 2540)

2.3.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

ปรากฏการณ์ในขณะอบแห้งอาหารเกิดการถ่ายเทพลังงานและมวลสารพร้อมกันดังแสดงในรูป 2.5 (สุคนธ์สิน, 2543; Valentus *et al.*, 1997) ได้แก่



รูป 2.5 ปฏิกิริยาการถ่ายเทความร้อนในขณะอบแห้งอาหาร

ที่มา : Valentus *et al.*, 1997

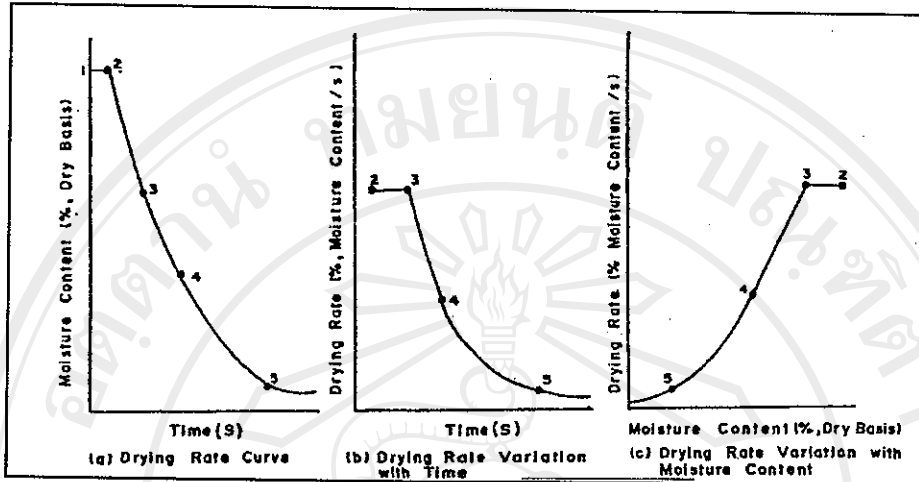
เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกไปที่พื้นผิวอาหารและการส่งผ่านความร้อนภายในอาหาร เพราะผลต่างของอุณหภูมิอากาศ (T_g) อุณหภูมิผิวหน้าอาหาร (T_{sf}) และอุณหภูมิภายในอาหาร (T_p) พลังงานส่วนใหญ่ที่ถ่ายเทเกิดจากการพาความร้อน (Convection) น้ำในอาหารได้รับพลังงานจากอากาศร้อนจะระเหยเป็นไอน้ำลอยเหนืออาหาร อากาศที่ร้อนจัดทำให้ไอน้ำกระจายตัวได้ดี อาหารแห้งในเวลาสั้น การนำความร้อน (Conduction) เกิดจากผิวหน้าถ่ายเทไปในเนื้ออาหารที่อยู่ลึกลงไป

เกิดการถ่ายเทความชื้นจากผิวหน้าอาหารไปที่อากาศ โดยความชื้นที่ผิวหน้าได้รับความร้อนจากอากาศระเหยกลายเป็นไอและอากาศที่เคลื่อนที่พาเอาไอน้ำออกไป ความดันของไอน้ำที่แตกต่างระหว่างภายในอาหาร (P_{vp}) ที่ผิวอาหาร (P_{vsf}) และอากาศ (P_{vg}) เป็นแรงขับให้เกิดการถ่ายเทความชื้นออกจากอาหาร

2.3.2 กราฟการอบแห้งและลักษณะการอบแห้ง

กราฟการอบแห้ง (Drying Curves) สร้างจากข้อมูลความชื้นของอาหารที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง โดยมีอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วและทิศทางของอากาศร้อนผ่านผิวอบแห้งที่ แสดงข้อมูลด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา หรืออัตราการ

เปลี่ยนแปลงความชื้นกับความชื้น (รุ่งนภา, 2535; สุคนธ์ชื่น, 2543; Fellow, 1997, Ekechukwu, 1999) แสดงในรูป 2.6 จากกราฟการอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงตามลำดับดังนี้



รูป 2.6 กราฟการอบแห้งและช่วงการอบแห้ง : 1-2 ช่วงให้ความร้อน ; 2-3 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ; 3 ความชื้นวิกฤต ; 3-5 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ที่มา : Ekechukwu, 1999.

ช่วงที่ 1 เริ่มต้นการอบแห้ง (Setting Down Period)

อาหารที่มีความหนุมิต่ำหรือสูงปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุลทำให้ผิวหน้าอาหารมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ อัตราการอบแห้งไม่คงที่

ช่วงที่ 2 อัตราการระเหยความชื้นคงที่ (Constant Rate Period)

ความชื้นที่พื้นผิวอาหารอยู่ในสภาวะอิ่มตัว อุณหภูมิผิวหน้าอาหารมีค่าคงที่และใกล้เคียงอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ อาหารมีความชื้นมาก ปริมาณความร้อนที่อาหารได้รับเท่ากับที่ใช้ไปในการระเหยความชื้นพอดี โดยความชื้นในอาหารที่มีมากกระจายขึ้นมาบนผิวหน้าของอาหารอย่างสม่ำเสมอ การเคลื่อนที่ของความชื้นในอาหารที่มีเซลล์โปร่ง มีรูพรุนมากและมีขนาดใหญ่ ความชื้นเคลื่อนที่ได้สะดวก รวดเร็ว และมากขึ้นโดยเซลล์ที่อยู่ติดกับรูพรุนเล็กได้รับความร้อนทำให้อากาศขยายตัว ความชื้นเริ่มซึมออกจากเซลล์ขึ้นไปตามรูพรุนเล็กทำให้ภายในเซลล์นั้นมีความเข้มข้นมากขึ้น เกิดแรงดึงดูดและมีการซึมของความชื้นผ่านเซลล์ที่อยู่ติดกันเข้าไปในเซลล์ที่ติดกับรูพรุนแล้วระเหยออกไปทางรูพรุน ส่วนไอน้ำแพร่เข้าไปในที่ว่างอากาศและทำให้เกิดผลต่างของความดันไอ เรียกช่วงนี้ว่าอัตราการระเหยความชื้นหรืออัตราการอบแห้งคงที่ และความชื้นช่วงที่สองเปลี่ยนเป็น

ช่วงสุดท้ายเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) ลักษณะอากาศที่จำเป็นต่อการอบแห้งในช่วงนี้คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความเร็วอากาศร้อนสูง ความชื้นสัมพัทธ์อากาศร้อนต่ำ

ช่วงที่ 3 อัตราการระเหยความชื้นลดลง (Falling Rate Period)

ความชื้นที่เหลืออยู่ในอาหารน้อยเคลื่อนไปที่ผิวหน้าอาหารช้าๆ ประกอบกับรูพรุนบนผิวอาหารเริ่มแห้งตีบลงทำให้ความชื้นที่เหลือออกมาได้ยาก ความชื้นเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ที่ช้ามากมาที่ผิวอาหาร อากาศยังคงถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารในปริมาณคงที่แต่อาหารใช้ความร้อนในการระเหยน้ำไม่หมดทำให้อุณหภูมิที่ผิวหน้าอาหารสูงขึ้น อัตราการระเหยของความชื้นต่อหน่วยพื้นที่ลดลง ประกอบกับตัวถูกละลายที่ความชื้นพาขึ้นมาที่ผิวหน้าอุดรูอาหารก่อให้เกิดเปลือกแข็งและหยุดการเคลื่อนที่ของความชื้นออกไปสู่อากาศภายนอก ส่วนน้ำตาลและเกลือกลับมีแนวโน้มแพร่กระจายเข้าไปตรงกลางชั้นอาหารทำให้เกิดสีน้ำตาลบริเวณตรงกลางอาหาร อัตราการระเหยน้ำควบคุมด้วยความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำภายในชั้นอาหาร อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในอาหารมาที่ผิวอาหารต่ำกว่าอัตราการระเหยกลายเป็นไอที่ผิวอาหาร อัตราการอบแห้งจึงต่ำลง เรียกช่วงนี้ว่าอัตราการระเหยความชื้นหรืออัตราการอบแห้งลดลง การอบแห้งช่วงนี้ใช้เวลานานจนกระทั่งถึงจุดที่น้ำในอาหารไม่สามารถเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าได้ถือว่าสิ้นสุดการอบแห้ง การระเหยความชื้นเกิดไม่ได้ก็เพราะไม่มีแรงขับ ความชื้นที่อยู่ในอาหารที่จุดสุดท้ายของการอบแห้งเรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) เพราะเป็นความชื้นที่อาหารดูดซับเอาไว้ อย่างเหนียวแน่น ความชื้นสมดุลไม่สามารถกำจัดได้ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้เป็นตัวกลางอบแห้งในขณะนั้น

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยระหว่างการอบแห้ง

ระหว่างการอบแห้ง ผักเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง สี กลิ่น คุณค่าทางโภชนาการ (รัตนและพิไลรัก, 2541; รุ่งนภา, 2535; สุนทรชิติน, 2543 ; Adam *et al.*, 2000; Kendall and Allen, 2002) ดังต่อไปนี้

- การเกิดเปลือกแข็ง (Case Hardening) ที่ผิวหน้าอาหาร

ลักษณะผิวอาหารแข็งเป็นเปลือกหุ้มส่วนที่ยังไม่แห้งไว้เพราะในช่วงแรกของการอบแห้งให้ความชื้นระเหยเร็วและใช้ความเร็วอากาศร้อนสูง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำมากและอาหารมีชั้นบาง ความชื้นจากภายในอาหารเคลื่อนที่มาไม่เท่ากับความเร็วที่ระเหยออกจากผิวหน้าอาหาร การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงทำให้สารประกอบแป้ง โปรตีน Pectin ในผักจับตัวเป็นเปลือกแข็งที่ผิวหน้าอาหาร ความชื้นในผักซึมผ่านออกมาได้ยากจึงมีความชื้นเหลืออยู่ในผักสูง คุณภาพของผักอบแห้งไม่

ดี ไม่เป็นที่ยอมรับ อายุการเก็บรักษาสั้นและมีโอกาสที่ราเจริญได้ สามารถหลีกเลี่ยงโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งไม่สูงหรือใช้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเพื่อไม่ให้อาหารแห้งก่อนเวลาและอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้งควรมีความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-80% จึงไม่เสี่ยงต่อการเกิดเปลือกแข็ง หากอุณหภูมิเริ่มต้นอบแห้งต่ำเกินไปจุลินทรีย์อาจเจริญได้ก่อนที่อาหารแห้งถึงระดับที่ต้องการและใช้เวลาอบแห้งนาน ทำให้อัตราการผลิตต่ำ

- การหดตัว (Shrinkage)

ระหว่างการอบแห้งความชื้นในเซลล์ฝักระเหยออกไปทำให้เกิดช่องว่างและเซลล์เกิดการหดตัวจากผิวนอก การหดตัวของผนังเซลล์ไม่สามารถหดตัวเข้าไปโดยเท่ากันทุกส่วนได้ ส่วนที่ไม่สามารถหดตัวเข้าไปได้เกิดการยืดตัวออก การยืดตัวของผนังเซลล์สามารถทนต่อแรงได้ขนาดหนึ่ง ถ้าเกินขนาดทำให้ผนังเซลล์ตรงบริเวณนั้นขาด การหดตัวทำให้พื้นที่ระเหยความชื้นออกจากผิวดลดลง อาหารแห้งช้าและฝักสูญเสียความสามารถในการคืนรูป ผักที่มีน้ำมากหดตัวและบิดเบี้ยวมาก กรณีหอมหัวใหญ่สูญเสียความชื้นที่มีมากออกไปในขณะที่อบแห้งเกิดการหดตัวของโครงสร้าง ขึ้นหอมหัวใหญ่ที่มีขนาดเล็กหดตัวได้ง่ายกว่าขึ้นขนาดใหญ่ ขึ้นหอมหัวใหญ่ทรงลูกบาศก์ที่ความชื้นสามารถถ่ายเทจากชั้นผิวน้ำจนถึงใจกลางสามารถถ่ายเทออกจากผนังเซลล์ได้เกือบทุกด้านทำให้โครงสร้างทุกด้านยุบตัวได้ใกล้เคียงกัน ส่วนขึ้นหอมหัวใหญ่รูปร่างแบนยาวความชื้นระเหยออกจากด้านความหนาได้ง่ายทำให้โครงสร้างส่วนนี้ยุบตัวเข้าหากันแต่ด้านที่มีความยาวมากโค้งตัวลง (Elustondo, 1996)

- การเกิดสีน้ำตาล (Browning)

ระหว่างการอบแห้ง ความชื้นภายในเนื้อฝักเคลื่อนออกมาสู่ผิวน้ำและพาเอาของแข็งที่ละลายได้ตัวอย่างเช่น น้ำตาล กรดอะมิโน ออกมาสู่ผิวน้ำ เมื่อการอบแห้งดำเนินไปความเข้มข้นของสารดังกล่าวที่ผิวน้ำฝักเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปฏิกิริยา Non-enzymatic Browning ให้สารสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้เกิดเร็วที่อุณหภูมิสูง ผักอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกิดสีน้ำตาลหรือสีเหลืองเข้ม ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงให้ลดระดับอุณหภูมิเพื่อป้องกันปฏิกิริยานี้ กรณีการอบแห้งหอมหัวใหญ่หากควบคุมกระบวนการผลิตไม่เหมาะสมอาจเกิดการเปลี่ยนเป็นสีชมพู (Pink Discolouration) สันนิษฐานว่าเกิดจากการตัดเนื้อเยื่อหอมหัวใหญ่ทำให้ เอนไซม์ Alliinase ที่ทำงานได้ดีที่ pH 7-8 ทำปฏิกิริยากับ alk(en)yl-L-cysteine sulfoxide (ACSO) ได้ Ether-soluble Organosulfur Component (Colour Developer) และเปลี่ยนไปเป็น Thiosulfinate (Intermediate) สารนี้ทำปฏิกิริยาอัตโนมัติกับกรดอะมิโนและสารประกอบ Carbonyl ได้ดีที่ pH 2.5-5.5 ได้เม็ดสีที่มีสีเหลืองจนถึงสีแดง (Lee and Parkin, 1998)

- การสูญเสียกลิ่น

ระหว่างการอบแห้งถ้าใช้อุณหภูมิสูงสารให้กลิ่นที่มีจุดเดือดต่ำในผักจะเหวี่ยงออกไปทำให้ผักแห้งมีกลิ่นแตกต่างจากผักสด ในกรณีหอมหัวใหญ่สดการวิเคราะห์กลิ่นโดยตรงกระทำได้ยาก ใช้เวลานานจึงใช้ปริมาณ S-alk(en)yl Cysteine Sulphoxides ที่เป็น Flavour Precursor และ Enzymatically Pyruvic Acid เป็นค่ามาตรฐานในการวัดระดับความฉุนของหอมหัวใหญ่สด (Bacon *et al.*, 1999) แต่หอมหัวใหญ่อบแห้งปริมาณ Enzymatically Pyruvic Acid จะเหลืออยู่ในปริมาณที่น้อยมาก จึงอาจใช้ Total Pyruvic Acid เป็นค่าแสดงความฉุนแทน ดังเช่น Pezzutti และ Crapiste (1997) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การลดลงของความฉุนในระหว่างการอบแห้งกระเทียมโดยใช้ Total Pyruvic Acid เป็นดัชนีการเสื่อมเสียของความฉุน

- การเปลี่ยนแปลงคุณค่าทางโภชนาการ

การอบแห้งผักลดคุณค่าทางโภชนาการบางส่วน ปริมาณแคลอรี (Calory Content) และเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลง วิตามินเอ บี 1 และบี 2 อาจสูญเสียบางส่วน วิตามินซีถูกทำลายในระหว่างอบแห้งอย่างมากและแร่ธาตุอาจหายไปในช่วงการนำผลิตภัณฑ์มาแช่ในน้ำเพื่อคืนรูป

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งอาหาร

ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งพิจารณาจาก(สุคนธ์ชื่น, 2543)

- ธรรมชาติของอาหาร และขนาดรูปร่าง

อาหารเนื้อโปร่งมีรูพรุนมากอบแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่นเพราะความชื้นเคลื่อนที่จากภายในอาหารเนื้อโปร่งผ่านช่องแคบเร็วกว่าในอาหารเนื้อแน่น ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสอาหารกับอากาศที่เกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้น้ำหนักมีผลต่อการอบแห้ง อาหารชิ้นเล็กมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าอาหารชิ้นใหญ่จึงอบแห้งได้เร็ว ชั้นความหนาของอาหารที่มากทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

- ปริมาณอากาศต่อถาด และตำแหน่งของอาหารในเครื่องอบแห้ง

ปริมาณอากาศต่อถาดที่มากทำให้อาหารส่วนล่างสัมผัสกับอากาศร้อนได้ไม่ทั่วถึงหรือได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้าโดยเฉพาะบริเวณตรงกลางถาดที่ความร้อนเข้าไปไม่ถึงความชื้นจึงระเหยออกได้ยาก

- อุณหภูมิ ความเร็ว ความสามารถรับไอน้ำ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อน

การเพิ่มอุณหภูมิอากาศเพิ่มความสามารถรับไอน้ำจึงมีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอุณหภูมิสูงทำให้การแพร่กระจายของความชื้นดีจึงมีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ถ้าอุณหภูมิอบ

แห้งลดลงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น อัตราการระเหยความชื้นลดลง อัตราการอบแห้งลดลงและช้า ถ้าความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะเคลื่อนย้ายความชื้นได้เร็ว แต่ถ้าความเร็วอากาศต่ำ การเคลื่อนย้ายความชื้นเกิดช้า อัตราการอบแห้งลดลง

2.3.5 การอบแห้งหอมหัวใหญ่ด้วยเครื่องอบแห้งอากาศร้อน

หอมหัวใหญ่ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่ออบแห้งควรคัดเลือกให้เหมาะสมเพราะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ในทางการค้าอัตราส่วนของหอมหัวใหญ่สดต่อหอมหัวใหญ่อบแห้ง (Shrinkage Ratio) อยู่ในช่วง 7/1-17/1 อัตราส่วนนี้มีช่วงกว้างมีสาเหตุจากความแตกต่างของ ปริมาณของแข็งในหอมหัวใหญ่ (Solid Content) ของแต่ละพันธุ์ การเพาะปลูก การปล่อยให้วัตถุดิบถูกแสงอาทิตย์หรือฝนชะภายหลังเก็บเกี่ยว ความแก่ ขนาดของหอมหัวใหญ่และการแปรรูป คุณภาพและลักษณะของหอมหัวใหญ่สดที่ใช้อบแห้งพิจารณาจากเกณฑ์ดังนี้ (Arsdel et al., 1973)

- ปริมาณของแข็งทั้งหมดต้องสูง ในทางการค้าควรอยู่ในช่วง 5-20% ค่านี้กำหนดราคาวัตถุดิบและการผลิตต่อหน่วยหอมหัวใหญ่อบแห้ง
- หอมหัวใหญ่ควรมีขนาดใหญ่ ลักษณะรูปร่าง Full-Globe จนถึง Tall-Globe เหมาะแก่การแปรรูป (ตัดยอดและราก) มากกว่า Flat-Globe (ภาคผนวก ก รูป ก 2)
- หอมหัวใหญ่ควรมีเนื้อสีขาว ไม่เกิดจุดดำ เหี่ยว งอก และมีกลิ่นฉุนมาก

เครื่องอบแห้งแบบถาดมีลักษณะเป็นตู้ทรงสูงสี่เหลี่ยมผืนผ้าบุฉนวน ภายในวางถาดได้ 5-8 ชั้น การอบแห้งอาศัยอากาศร้อนโดยแหล่งให้ความร้อนอาจเป็น ขดลวดให้ความร้อน ท่อไอน้ำ ก๊าซหุงต้ม ไฟฟ้าหรือน้ำมันเตา อากาศร้อนไหลผ่านชั้นของถาดหรือแผ่นตะแกรงที่มีอาหารบรรจุเป็นชั้นบางๆ (หนา 2-6 cm) แหล่งกำเนิดความร้อนอาจติดตั้งอยู่ด้านบนและมีใบพัดในบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อกระจายและหมุนเวียนอากาศร้อน อาจมีระบบบังคับทิศทางไหลของอากาศร้อนภายในเครื่องเพื่อให้การไหลของอากาศร้อนสม่ำเสมอและทั่วถึงทุกส่วน ทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนอาจอยู่ในแนวนอนขนานกับถาดหรือแนวตั้งผ่านทะลุถาด ความเร็วอากาศร้อน 0.5-5 m/s อุณหภูมิ 50-70°C ถ้าอากาศร้อนผ่านเข้าไปที่ชั้นอาหารที่ไม่หนาแน่นมาก พื้นที่ผิวสัมผัสอากาศร้อนได้เกือบทุกด้าน การอบแห้งเกิดได้เร็ว ตัวอย่างชุดสาริตการอบแห้งแบบถาดแสดงในภาคผนวก ก รูป ก 3

การศึกษาการอบแห้งหอมหัวใหญ่พันธุ์ Asgro ของศิริทรัพย์ (2544) โดยใช้เครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด (Electrical Tray Dryer) หอมหัวใหญ่มีขนาด 0.3x0.3 cm ความหนา 1 cm ความเร็ว

อากาศร้อนคงที่ 0.3 m/s อุณหภูมิคงที่ 3 ระดับ คือ 60°C, 70°C, 80°C พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C มีอัตราการอบแห้งสูงสุดและใช้เวลาอบแห้งสั้นที่สุด คือ 7 ชั่วโมง 15 นาที สามารถลดความชื้นจาก 92.36%w.b. ลงเหลือประมาณ 12%w.b. มี a_w 0.43-0.52 ได้หอมหัวใหญ่อบแห้งที่มีสีใกล้เคียงกับการคั่วมากที่สุดและได้ศึกษาการลดเวลาอบแห้งหอมหัวใหญ่โดยวิธีลดอุณหภูมิอากาศร้อน (80-70-60°C) ด้วยเครื่องอบแห้งไฟฟ้าประเภทถาดพบว่าไม่สามารถลดเวลาอบแห้งได้ เวลาในการอบแห้งยังเท่ากับการอบแห้งด้วยอุณหภูมิคงที่ 60°C โดยใช้เวลา 11 ชั่วโมง 15 นาที หอมหัวใหญ่มีความชื้นสุดท้าย 12%w.b. แต่ได้หอมหัวใหญ่ที่มีสีอ่อนกว่าหอมหัวใหญ่ในทางการค้า สิ่งนาท (2537) ศึกษาการอบแห้งหอมหัวใหญ่พันธุ์ Yellow Granex ความชื้น 91.32% หนักราก 0.3 cm เป็นหอมหัวใหญ่สดและที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลาย 0.3% Potassium Metabisulfite (KMS) นาน 10 นาที หรือผ่านการแช่ด้วยสารละลาย 0.1% Ascorbic Acid นาน 10 นาที เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านสีก่อนอบแห้งด้วยตู้อบไฟฟ้าแบบถาด (Cabinet Tray Dryer) ที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C, 70°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50-60% พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C, 70°C คือ 6, 5, 4 ชั่วโมงตามลำดับ หอมหัวใหญ่ที่ผ่านการแช่ด้วย KMS อบแห้งที่ 50°C ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิสูง การบำบัดด้วยสารเคมีก่อนการอบแห้งและอุณหภูมิการอบแห้งไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งและอัตราการดูดน้ำกลับคืนมารีนาและอภิญญา (2545) ศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการอบแห้งหอมหัวใหญ่พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งหอมหัวใหญ่ด้วยตู้อบแห้งแบบถาดคือที่อุณหภูมิประมาณ 50 °C อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 40.50 kg อากาศแห้ง/ชั่วโมง-กิโลกรัมหอมหัวใหญ่ และเวลาอบแห้งคือ 13 ชั่วโมง ในต่างประเทศมีรายงานของ Sarsavadia และคณะ (1999) ศึกษาการอบแห้งหอมหัวใหญ่พันธุ์ Agrifound White-1 หนักราก 0.5 cm และแช่ด้วยสารละลายเกลือแกงความเข้มข้น 5% นาน 10 นาที อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ที่อัตราเร็วของอากาศร้อนเป็น 0.25m/s, 0.50m/s, 0.75m/s และ 1.00m/s ความชื้นสัมพัทธ์ 10%, 15% และ 20% พบว่าอุณหภูมิสูงมีผลต่อการอบแห้งเช่นเดียวกับรายงานของศิริทรัพย์ (2544) และ สิ่งนาท (25 37) Lewicki *et al.* (1998 b) ศึกษาการอบแห้งหอมหัวใหญ่พันธุ์ Oporto ขนาด 0.3 cm ปริมาณหอมหัวใหญ่ 5 kg/m² ด้วย Convective Dryer ที่อุณหภูมิ 60-80°C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วอากาศเพิ่มอัตราการอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและเวลาอบแห้งลดลง มีรายงานว่าความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วอากาศร้อนมีผลต่อการอบแห้งหอมหัวใหญ่น้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของอากาศและความหนาของชั้นวัตถุดิบ (Krokida *et al.*, 2003; Rapusas and Driscoll, 1995 c) การอบแห้งหอมหัวใหญ่หนักรากเป็นวงแหวนพันธุ์ Cobra ของ Adam *et al.* (2000) พบว่าควรเตรียมหอมหัวใหญ่ให้มีความหนาในช่วง 0.2-0.6 cm อบแห้งที่

อุณหภูมิไม่เกิน 60°C ความเร็วอากาศ 0.1-0.5 m/s และความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 40% เพื่อลดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลจากปฏิกิริยา Maillard ที่ทำให้ปริมาณ Glucose และ Fructose ในหอมหัวใหญ่ลดลง และสูญเสียวิตามินซี การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและหันหอมหัวใหญ่ให้ความหนามากที่สุด เสียปริมาณ Pyruvic Acid และการไม่ยอมรับทางประสาทสัมผัส ปริมาณ Sucrose ของหอมหัวใหญ่อบแห้งไม่เปลี่ยนแปลง ผลิตภัณฑ์ คั้นรูปได้ 90% จากความชื้นเริ่มต้น

สภาวะการอบแห้งหอมหัวใหญ่โดยทั่วไปใช้อุณหภูมิ 50-80°C ความชื้นสัมพัทธ์ 10-50% อัตราเร็วอากาศร้อน 0.25-2.6 m/s ชั้นความหนาของหอมหัวใหญ่ 0.2-1.5 cm (มารีนาและอภิญา, 2544; ศิริทรัพย์, 2544; สิงหนาท, 2537; Adam *et al.*, 2000; Krokida *et al.*, 2003; Sarsavadia *et al.*, 1999)

2.3.6 แนวทางการอบแห้งหอมหัวใหญ่ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจอย่างมากเพราะเป็นพลังงานตามธรรมชาติ มีปริมาณมาก ไม่มีวันหมด ประวัติศาสตร์การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีมานาน ปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้กันอยู่และจะเป็นวิธีการถนอมอาหารที่สำคัญในศตวรรษที่ 21 (สมยศและคณะ, 2533; Gallali *et al.*, 2000)

ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นและเป็นแหล่งเพาะปลูกพืชเมืองร้อนที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ผลผลิตที่สำคัญทางการเกษตรหลายชนิดจำเป็นต้องผ่านการอบแห้งเพื่อแปรรูปและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ก่อนส่งไปจำหน่ายหรือบริโภค (วัฒนา, 2541; Khedari *et al.* 2002.) หอมหัวใหญ่เป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกมากในจังหวัดเชียงใหม่ ปริมาณผลผลิตมากในช่วงเดือนกุมภาพันธ์-เมษายนซึ่งเป็นช่วงที่มีพลังงานแสงอาทิตย์มากดังแสดงในตาราง 2.1 และ 2.2 จึงเป็นแนวทางที่แปรรูปหอมหัวใหญ่อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดปัญหาการสูญเสียผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวและเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิต

ตาราง 2.1 ช่วงเวลาที่มีแสงอาทิตย์ต่อวัน (ชั่วโมง/วัน) ของจังหวัดเชียงใหม่

ช่วงเวลา	จำนวนชั่วโมงที่มีแสงอาทิตย์ (ชั่วโมง/วัน)
14 ม.ค.-26 ก.พ.	9.1
27 ก.พ.-12 เม.ย.	9.3
13 เม.ย.- 28 พ.ค.	8.3
29 พ.ค.- 15 ก.ค.	5.4
16 ก.ค.- 31 ส.ค.	4.5
1 ก.ย.- 15 ต.ค.	6.1
16 ต.ค.- 29 พ.ย.	8.3
30 พ.ย.-13 ม.ค.	8.7

ที่มา : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544

ตาราง 2.2 พลังงานแสงอาทิตย์ต่อชั่วโมง($\text{Cal}/\text{cm}^2\text{-h}$)ของจังหวัดเชียงใหม่

ช่วงเวลานาฬิกา	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
14 ม.ค.-26 ก.พ.	16	32	47	59	65	63	58	45	30	14
27 ก.พ.-12 เม.ย.	18	34	48	61	67	67	60	46	31	16
13 เม.ย.- 28 พ.ค.	25	42	56	65	72	69	60	46	33	19
29 พ.ค.- 15 ก.ค.	23	36	48	54	57	58	53	43	30	17
16 ก.ค.- 31 ส.ค.	20	34	44	49	51	51	47	38	26	14
1 ก.ย.- 15 ต.ค.	19	34	48	57	63	61	55	46	31	17
16 ต.ค.- 29 พ.ย.	14	29	43	55	62	61	55	43	29	14
30 พ.ย.-13 ม.ค.	11	27	42	53	58	57	52	41	27	13

ที่มา : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อาศัยวัสดุสีดำที่มีความสามารถดูดซับพลังงานความร้อนได้สูง ชนิดเครื่องอบแห้งสามารถแบ่งได้สองแบบคือ แบบการไหลของอากาศเป็นแบบธรรมชาติ (Natural Convection System) อาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศภายนอกและภายในเครื่องอบแห้ง เมื่อปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ต่ำอัตราการไหลของอากาศและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีต่ำเหมาะสำหรับการอบแห้งขนาดเล็กที่มีการลงทุนไม่มาก และแบบการไหลของอากาศที่ถูกบังคับ (Forced Flow System) โดยใช้พัดลมทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศ อากาศที่ไหลเวียนได้ดีทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีสูงขึ้น ตัวอย่างเช่นเครื่องอบแห้งมาตรฐานที่ออกแบบโดย Institute for Agricultural Engineering มหาวิทยาลัย Hohenheim ประเทศเยอรมัน ที่มีชื่อเรียกว่า Solar Tunnel Dryer แสดงในภาคผนวก ก รูป ก 4 และข้อมูลเฉพาะของเครื่องในตาราง 2.3 ซึ่งพัฒนารูปแบบมาเพื่อการเกษตร ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมี 3 ส่วน คือ แผงรับรังสีอาทิตย์ (Solar Air Collector) บริเวณที่ใช้อบอาหาร (Drying Tunnel) และพัดลม (Fan) เครื่องอบแห้งชนิดนี้เชื่อมแผงรับรังสีอาทิตย์และอุโมงค์อบแห้ง อากาศที่สภาวะปกติเข้าเครื่องอบแห้งผ่านแผงรับรังสีอาทิตย์ที่เป็นพื้นเรียบมีพื้นผิวสีดำ ด้านล่างของแผงนี้เป็นฉนวนป้องกันการนำความร้อนจากเครื่องไปสู่พื้น และแผ่นพลาสติกใสบิดเครื่องอบแห้งด้านบน (Plastic Cover) แผ่นพลาสติกนี้ให้รังสีจากดวงอาทิตย์ผ่านเข้าไปถึงแผงรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์สู่บรรยากาศภายนอกและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับแผงรับรังสีอาทิตย์และอาหารในบริเวณอบแห้ง แผงรับรังสีอาทิตย์ทำให้อากาศร้อนและสะสมความร้อน พัดลมช่วยถ่ายเทและกระจายความร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์ไปสู่อาหารที่วางไว้ในบริเวณอบแห้ง อากาศร้อนไหลผ่านอาหารที่วางบนตะแกรงทั้งด้านบนและล่างและกำจัดความชื้นออกจากเครื่องอบแห้งทางช่องระบายอากาศที่อยู่ปลายสุดของเครื่องอบแห้ง โดยเวลาอบแห้งขึ้นกับชนิดของอาหาร ความหนาของชั้นอบแห้ง อุณหภูมิ สภาวะความโปร่งใสของบรรยากาศ ความยาวนานของเวลากลางวันและมุมที่แสงอาทิตย์ส่องกระทบพื้นโลก ลักษณะการอบแห้งแบบนี้ใช้กับอาหารแข็งที่มีความชื้นเริ่มต้นปานกลางถึงสูง ขนาดชิ้นอาหารปานกลาง อัตราการอบแห้งช้าและผลิตภัณฑ์อบแห้งมีความชื้นต่ำถึงปานกลาง (สมยศและคณะ, 2533; Adam and Mühlbauer, 1998; Pryor, 2001)

ตาราง 2.3 ข้อมูลเฉพาะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ (Solar Tunnel Dryer)

ค่า	ลักษณะ
พลังงาน	แบบการไหลของอากาศที่ถูกบังคับ
ความยาวแผงรับรังสีอาทิตย์	8.00 m
ความยาวของส่วนอบแห้ง	10.00 m
ความยาวของเครื่อง	18.00 m
ความกว้างของส่วนอบแห้ง และแผงรับรังสีอาทิตย์	2.00 m
พื้นที่แผงรับรังสีอาทิตย์	16.00 m ²
พื้นที่ของส่วนอบแห้ง	20.00 m ²
ความเร็วรอบของพัดลม	สูงสุด 70 W, 1,400 rpm
อัตราการไหลของอากาศ	400-1,200 m ³ /h
อุณหภูมิอากาศ	30-80 °C
พลังงานที่เครื่องอบแห้ง ต้องการ	20-40 W
ประสิทธิภาพ	15-20 kg อาหารสด/m ² (รวม 600-800 kg)
อายุการใช้งาน	มากกว่า 20 ปี แผ่นพลาสติกใสปิดเครื่องอบแห้ง (0.2 mm Polyethylene แผ่นบาง) 2-3 ปี

ที่มา : Adam and Mühlbauer, 1998

ข้อดีของการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ คือเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมากในประเทศที่กำลังพัฒนา ไม่ต้องใช้พลังงานรูปอื่น ใช้พลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ให้เป็นประโยชน์ได้ในแหล่งที่ไม่มีไฟฟ้า สะดวกแก่การสร้าง ปรับระดับการผลิตให้มีขนาดกลางหรือใหญ่ได้ เครื่องอบแห้งที่มีการออกแบบดีมีอุณหภูมิสูงใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่านำอาหารมาตากแดด ป้องกันการเน่าเสียระหว่างอบแห้ง ไม่เกิดการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง สิ่งสกปรก นก แมลง จุลินทรีย์ ไมโครทอกซิน (Microtoxin) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสี เนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติที่ดี ลดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารปลอดภัย สะอาดถูกต้องตามสุขลักษณะ มีอายุการเก็บรักษานาน ใช้แรงงานน้อย คุ่มค่าแก่การลงทุน

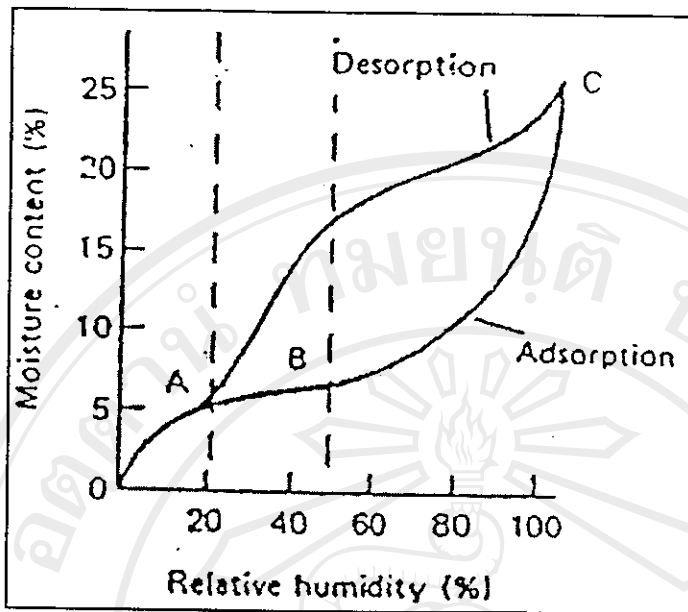
และค่าใช้จ่ายเพื่อดำเนินการ แต่เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ใช้เวลาคั้นทุนนาน 1-5 ปี การควบคุมสภาวะการอบแห้งยากกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานรูปอื่นและถ้าอาหารไวต่อแสงต้องปิดด้วยวัสดุกรองแสงอาทิตย์ (สมยศและคณะ, 2533; Adam and Mühlbauer, 1998; Pryor, 2001)

2.3.8 Moisture Sorption Isotherms

Moisture Sorption Isotherm คือการศึกษาความสามารถในการดูด (Adsorption) และคายความชื้น (Desorption) ของอาหารที่อุณหภูมิและในเวลาที่กำหนด ปกติแล้วน้ำในอาหารเคลื่อนที่ไปยังอากาศรอบๆโดยขึ้นกับความชื้นและองค์ประกอบของอาหาร ที่อุณหภูมิคงที่ความชื้นของอาหารปรับตัวจนกว่าจะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่เก็บรักษาโดยรอบ อาหารไม่มีน้ำหนักเพิ่มหรือลดลงภายใต้การเก็บรักษาในสภาวะดังกล่าว โดยนิยามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่เก็บรักษาที่สมดุล (Equilibrium Moisture Content, ERH) คือ

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (\%)} = \frac{\text{ความดันไอของน้ำในบรรยากาศ}}{\text{ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน}} \times 100 \quad (2.12)$$

Moisture Sorption Isotherm ที่มีกราฟเป็นรูปโค้ง (Sigmoid Curve) ดังแสดงในรูป 2.7 ที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูง ความชื้นสมดุลของอาหารมีค่าสูงเช่นที่จุด C เมื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ลง ความชื้นสมดุลของอาหารลดลงเช่นที่จุด A เส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารจากจุด C ลดลงมาถึงจุด A คือ Isotherm of Desorption ที่เป็นลักษณะของการดึงความชื้นออกจากอาหาร (Drying Process) ในตอนเริ่มต้นถ้าอาหารมีความชื้นสมดุลต่ำและอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเช่นที่จุด A เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ความชื้นสมดุลของอาหารจะเพิ่มขึ้น (Moistening Process) เช่นที่จุด B คือ Isotherm of Adsorption (Resorption) และบริเวณช่องว่างระหว่างจุด A และ C ซึ่ง Isotherm of Desorption อยู่เหนือ Isotherm of Adsorption เกิดการแยกของเส้น Isotherm ทั้งสองเส้นเป็นลักษณะปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Hysteresis



รูป 2.7 Moisture Sorption Isotherm Curves

ที่มา: Forks and Okos, 1980

Moisture Sorption Isotherms ใช้ในทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นและกำหนดสภาวะอบแห้ง คัดเลือกบรรจุภัณฑ์ ทำนายอายุระหว่างการเก็บรักษาอาหารแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างเนื้อสัมผัสที่ดี ลดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมีและปลอดภัยจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มากที่สุด (Ayranci *et al.*, 1990; Debnath *et al.*, 2002)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับทำนาย Sorption Isotherms แสดงดังตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Sorption Isotherms

แบบจำลอง	สมการ
BET	$M = \frac{CM_0}{[(1 - a_w)(1 - a_w + Ca_w)]^{a_w}}$
GAB	$M = \frac{CkM_0}{[(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)]^{a_w}}$
Iglesias and Chirife	$Ca_w + k = \ln[M + \sqrt{M^2 + M_{0.5}}]$
Halsey	$M = \left[\frac{A}{\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{n}}$
Henderson	$M = \left[-\frac{1}{k} \ln(1 - a_w) \right]^{\frac{1}{n}}$
Oswin	$M = C \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^n$
Smith	$M = A - B \ln(1 - a_w)$

หมายเหตุ : M คือ ความชื้น (g น้ำ/ g ของแข็งแห้ง)

M_0 คือ ความชื้นชั้นเดียวที่เกาะบนอาหาร
(The Monolayer Moisture) (g น้ำ/ g ของแข็งแห้ง)

$M_{0.5}$ คือ ความชื้นที่ $a_w = 0.5$

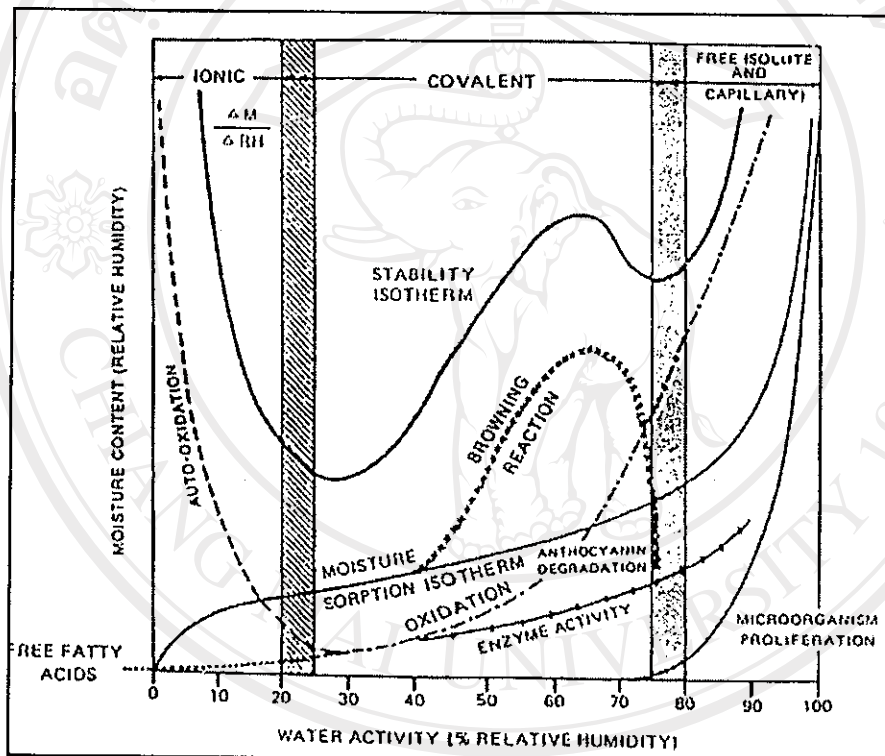
C, k, n, A, B คือ ค่าคงที่

ที่มา : Mascan and GÖĞÜŞ, 1999

2.3.9 Water Activity (a_w)

a_w เป็นค่าที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีหลายชนิดของอาหารและอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญต่อคุณภาพและการเน่าเสียของอาหาร โดยนิยามของค่า a_w คือ

$$a_w = \frac{\text{ความดันไอของน้ำในอาหาร}}{\text{ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน}} \quad (2.13)$$



รูป 2.8 อิทธิพลของ a_w และคุณสมบัติการดูดซับน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เอนไซม์ จุลินทรีย์ของอาหาร

ที่มา : Rockland and Nishi, 1980

จากรูป 2.8 ที่แสดงค่า a_w ที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติการดูดซับน้ำที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เอนไซม์ จุลินทรีย์ของอาหาร พิจารณาจาก Moisture Sorption Isotherm ถึงรายละเอียด 3 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 บริเวณล่างสุดของกราฟ (a_w 0-0.2)

อาหารดูดซับน้ำที่เป็น Monomolecular Layer ซึ่งมีลักษณะเป็น Film บางๆ ชั้นเดียวเอาไว้ อย่างเหนียวแน่น (Bound Moisture) น้ำนี้ไม่เคลื่อนที่ในอาหาร มีคุณสมบัติเป็นส่วนหนึ่งของอาหาร และมีความเสถียรมากโดยเชื่อมต่อกับองค์ประกอบของอาหารในส่วน Polar ด้วยแรงดึงดูด Water-ion หรือ Water-dipole Interaction น้ำยึดกันด้วยพันธะ Ionic กับหมู่ NH_3^+ และ COO^- ของโปรตีน น้ำนี้ไม่มีส่วนต่อกิจกรรมทางชีววิทยาหรือการทำปฏิกิริยา ช่วงรอยต่อระหว่างช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่เรียกว่า BET (Brunauer Emmett Teller Monolayer) ที่สมมติให้การดูดซับของโมเลกุลมี 1 ชั้น เมื่ออาหารดูดความชื้นมากขึ้นโมเลกุลของน้ำชั้นแรกเชื่อมต่อกันมากขึ้นและเชื่อมต่อกับโมเลกุลของอาหารด้วยพันธะ Hydrogen น้ำนี้สามารถเคลื่อนที่ได้น้อยกว่าน้ำทั่วไปเล็กน้อย ช่วงนี้เป็นระดับ a_w ต่ำสุดของอาหารแห้ง

ช่วงที่ 2 บริเวณตอนกลางของกราฟ (a_w 0.25-0.8)

อาหารดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นหลายชั้นจาก Monolayer Film ในช่วง a_w 0.25-0.75 น้ำนี้เกาะกันอย่างหลวมๆ (Unbound Moisture) และดูยึดน้อยกว่าน้ำในช่วงที่ 1 น้ำยึดกันด้วยพันธะ Covalent กับหมู่ OH^- ของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตทำให้ค่า a_w เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่น้ำเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง น้ำนี้กำจัดออกไปได้ ความสามารถของน้ำนี้คือละลายตัวถูกละลายและเร่งปฏิกิริยาเคมีได้ ปลายช่วงที่ 2 และ 3 มีปริมาณน้ำที่มากพอจนทำให้ชั้น Monolayer เบียดเต็มที่ น้ำส่วนนี้สามารถทำละลายและถ่ายเทได้ภายในและระหว่างเซลล์ จุลินทรีย์สามารถใช้ น้ำนี้เพื่อการเจริญเติบโตได้

ช่วงที่ 3 บริเวณส่วนบนสุดของกราฟ (a_w 0.8-1.0)

อาหารมีน้ำอิสระ (Free Moisture) เพียงพอที่สามารถควบแน่นภายในเซลล์ของอาหาร ในช่วงค่า a_w 0.75-1.00 มีชั้นน้ำหลายชั้นบนโปรตีนและ Polymer ของคาร์โบไฮเดรต น้ำนี้มีความดันไอต่ำเพราะในอาหารมีตัวถูกละลายอยู่ ตัวอย่างเช่น น้ำตาล กรดอะมิโนอิสระ ในช่วงนี้ความชื้นเพิ่มอย่างรวดเร็วในขณะที่ค่า a_w กลับเพิ่มเล็กน้อย น้ำนี้รวมตัวกันอยู่ตามช่องว่างระหว่างเซลล์ อาหารกักน้ำนี้เอาไว้ด้วยแรงอ่อนๆ น้ำส่วนนี้พอแก่การเจริญเติบโตของยีสต์ รา หรือใช้น้ำอิสระนี้เพื่อเร่งปฏิกิริยาเคมีและเอนไซม์ การอบแห้งกำจัดน้ำนี้ออกไปได้โดยง่าย อาหารแห้งต้องระวังความชื้นและ a_w ในช่วงนี้เพราะอาหารจะดูดความชื้นเข้าไปจนเชื้อยีสต์ ราเจริญขึ้นมาและทำให้อาหารเสื่อมเสียได้ โดยง่าย (วราวุฒิ, 2538; Ayranci et al, 1990; Dabnath et al., 2002 ; Pezzutti and Crapisk, 1997; Rapusas and Driscoll, 1995 a)

2.3.10 การเก็บรักษาหอมหัวใหญ่อบแห้ง

ผักอบแห้งดูดความชื้นได้ดี หลังจากแห้งควรปล่อยให้เย็นและบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ทนที่บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ควรป้องกันความชื้นไม่ให้ผ่านเข้าไปได้เพราะความชื้นทำให้เชื้อราเจริญ บรรจุภัณฑ์ที่ดีต้องไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร ไม่เป็นพิษ ราคาไม่แพง สะดวกใช้ มีความแข็งแรง ทนทานในระหว่างการเก็บรักษา ขนส่ง จำหน่าย และป้องกันแมลงทำลาย (รัตนและพิไลรัก, 2541; Arsdel *et al.*, 1973; Kendall and Allen , 2002)

หอมหัวใหญ่อบแห้งบรรจุในถุงขนาดใหญ่ที่ป้องกันความชื้นได้ดีก่อนบรรจุลงในกล่องกระดาษลูกฟูก อาจบรรจุภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Packing) ที่ 27 นิ้วปรอทขึ้นไป ควรเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำ (5°C) มืดและแห้ง (ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 30%) โดยระบุชื่อผลิตภัณฑ์ วัน ที่ผลิต วิธีอบแห้ง ผักอบแห้งที่เก็บรักษาดีมีอายุ 3-12 เดือน โดยคงความเปราะ กรอบ กลิ่นรสไว้ ไม่เปลี่ยนแปลงสีน้ำตาลจากปฏิกิริยา Non-enzymatic Browning ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดได้ดีเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25-45°C ความชื้นสัมพัทธ์ 33-53% และเก็บรักษานาน (Ahmed and Shivhare, 2001; Rapusas and Driscoll , 1995 a; Sa' and Sereno, 1999) ถ้าเป็นหอมหัวใหญ่ผงอาจเติม Anti-caking Agent ตัวอย่างเช่น 0.25-0.5% Calcium Stearate เพราะหอมหัวใหญ่ผงอบแห้งดูดความชื้นและเกาะเป็นก้อนได้ดีมาก (Very Hygroscopic)