

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

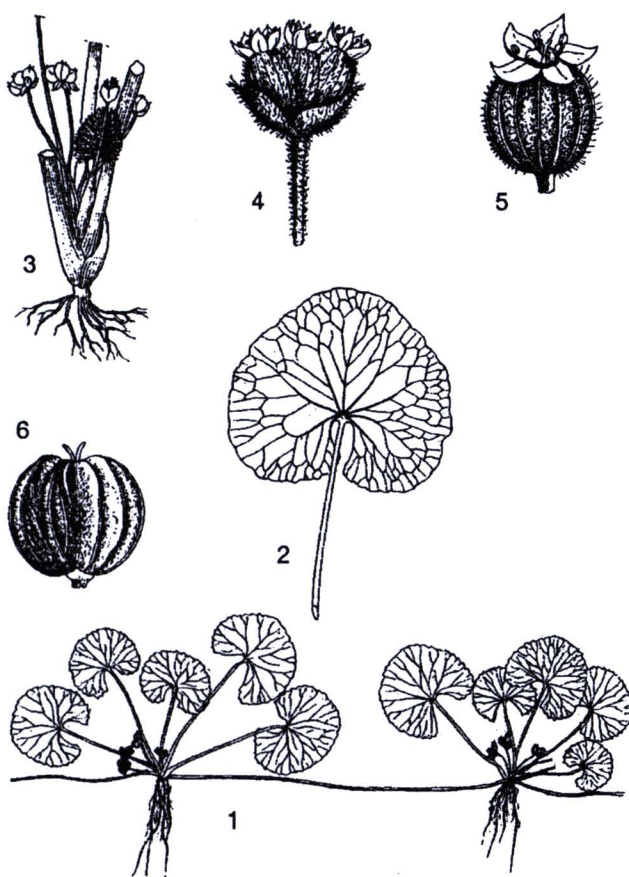
2.1 บัวบก

บัวบกมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Centella asiatica* (Linn.) Urban มีชื่อสามัญว่า Asiatic Pennywort, Indian pennywort, tiger herbal, Gotu Kola, Antanal, Pegaga, Kula kud, Tia Kum Chao, magic herbal และ Bua Bok (บัวบก) บัวบกเป็นพืชในสกุล *Centella* จัดอยู่ในวงศ์ *Apiaceae* ซึ่งพืชในสกุลนี้มีอยู่ประมาณ 40 ชนิด โดยมีความหลากหลายของชนิดอยู่มาก โดยมีการกระจายพันธุ์อยู่ทั่วไปในเขตร้อนรวมทั้งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และขึ้นลำเข้าไปในบางพื้นที่ในเขตกึ่งร้อน เช่นในประเทศศรีลังกา มาเลเซีย และประเทศไทย บัวบกสามารถพบได้ในทุกภาคของไทย โดยมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันออกไป เช่น ผักหนอก (เหนือ), ผักแว่น (ใต้), บัวบก (ภาคกลาง), จำปาเครือกะบังนอก (ลำปาง), ปะหนะ เอชาเคาะ (กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน) (sapkoet, 2007) บัวบกมีการเจริญเติบโตออกดอกทั้งปี ขึ้นบริเวณโล่งแจ้งหรือมีร่มเงาเล็กน้อย ที่ขึ้นแฉะ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ (ขึ้นได้ดีในสภาพดินร่วนทรายที่มีอินทรีย์วัตถุสูง) บริเวณชายน้ำสองข้างทางริมกำแพง รวมทั้งในบริเวณทุ่งหญ้าที่มีสภาพขึ้นแฉะ ในระดับความสูงของพื้นที่ระดับน้ำทะเลไปจนถึง 2,500 เมตร จัดเป็นพันธุ์ไม้ชนิดแรกๆ ที่ขึ้นอยู่ในพื้นที่ที่เพิ่งทำการแผ้วถางรวมไปถึงพื้นที่ที่มีสภาพดั้งเดิม อาจขึ้นปกคลุมพื้นที่หนาแน่น แต่ในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศแบบมรสุมจะขึ้นงอกงามเฉพาะในช่วงฤดูฝนเท่านั้น

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของบัวบก

ลำต้นของบัวบกมีลักษณะเป็นเถาเลื้อยไหลยาวประมาณ 2.5 เมตร ชอบเลื้อยไปตามพื้นดินที่ขึ้นแฉะออกรากตามข้อ ส่วนอ่อนของต้นมีขนปกคลุมประปราย ใบของบัวบกเป็นใบเดี่ยว ออกเป็นกระจุกที่ข้อข้อละ 2-10 ใบ มีลักษณะคล้ายรูปไต ใบกลม ริมขอบใบจะหยักเล็กน้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-7 เซนติเมตร เส้นใบมีลักษณะคล้ายรูปนิ้วมือกึ่งเกลี้ยง ก้านใบยาว 1-50 เซนติเมตร ผิวเกลี้ยงหรือมีขนประปราย ใบบานแผ่ออกไปสู่ก้านใบ ไม่มีหูใบ ดอกออกเป็นช่อคล้ายร่มเดี่ยวๆ หรือมีประมาณ 2-5 ช่อ ช่อหนึ่งมักจะมีประมาณ 3-4 ดอกดอกตรงกลางไม่มีก้านดอก และดอกด้านข้างมีก้านดอกสั้น ใบวงประดับย่อยมีใบประดับรูปไข่ 2 ใบ ก้านช่อดอก

จะมีความยาวประมาณ 0.5-5 เซนติเมตร มีใบลักษณะคล้ายเกล็ดในส่วนฐานของก้านข้อ ยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร ดอกสมบูรณ์เพศแต่ละส่วนของดอกมี 5 อัน กลีบเลี้ยงห่อ กลีบดอกกลมไปจนถึงรูปไข่ กลีบดอกกว้างและยาว 1-1.5 มิลลิเมตร ของกลีบเรียบ สีออกเขียว ชมพูหรือแดง เกสรตัวผู้เรียงสลับกับกลีบดอกจากฐานดอกเป็น 2 พูเรียบและส่วนขอบยกขึ้น รังไข่ได้วงกลีบ มี 2 ช่อง ก้านเกสรตัวเมีย 2 อัน เกสรตัวผู้สั้นกว่าเกสรตัวเมีย ผลเป็นซีกผล เชื่อมติดกันเป็นรอยต่อแคบๆ แยกออกจากกันเมื่อแก่ รูปกลมแป้นแบนด้านข้างชัดเจน ผลมี 7-9 สันชัดเจน ส่วนสันเชื่อมต่อกันด้วยเส้นใบ ผลอ่อนมีขนสั้นนุ่มปกคลุมแต่มีเกลี้ยง เมล็ดมีลักษณะแบน มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวประมาณ 3-4 มิลลิเมตร การงอกของเมล็ดชูใบเลี้ยงเหนือดิน คอรากยาว 2-4 มิลลิเมตร ผิวเกลี้ยงไม่มีลำต้นเหนือใบเลี้ยงดังแสดงในรูป 2.1



Centella asiatica (L.) Urb. – 1, plant habit; 2, leaf; 3, stem base with young leaf, flowers and fruits; 4, inflorescence; 5, flower; 6, fruit.

รูป 2.1 ส่วนประกอบของบัวบก

ที่มา: ฉวีกรรณ์ (2550)

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของบัวบก ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของบัวบก

องค์ประกอบหลัก	องค์ประกอบย่อย
สารกลุ่ม Triterpene	asiaticoside, medecassoside, asiatic acid และ medecassic acid
สารกลุ่ม volatile oils	camphor, cineole และ ally mustard oil
สารกลุ่ม flavonols	kaempferol และ quercetin
สารกลุ่ม sterols	β -sitosterol, stigmasterol และ campesterol
สารกลุ่ม sugars	glucose, fructose, sucrose, rhamnose, arabinose และ centellose
สารกลุ่ม alkaloid	hydrocotyline
สารกลุ่ม fatty acid	oleic acid, linoleic acid, lignoceric acid และ palmitic acid
สารกลุ่มอื่นๆ	vallarin (สารให้รสขม), resin, polyphenol, pectin, tannin, polyacetylene, chlorophyll, carotenoid และ myoinositol

ที่มา : Pramongkit (1995)

Terpenoid compounds

1) Mono-and sesquiterpene compounds

ประกอบด้วย α -pinene, β -pinene, myrcene, γ -terpinene, bornyl acetate, α -copaene, β -elemene, β -caryophyllene, *trans*- β -farnesene, germacrene-D และ bicycloelemene.

2) Triterpene compounds

triterpenes เป็นกลุ่มย่อยของ terpenes ในโครงสร้างโมเลกุลจะประกอบด้วย isoprene 6 หน่วย ซึ่งแบ่งออกเป็น glycosides และ triterpene acids โดย triterpenes ที่พบมากในบัวบก ได้แก่ asiaticoside, medecassoside, asiatic acid และ medecassic acid (Pichitchatri and Suntornkitjaraksa, 1999; Schaneberg *et al.*, 2003)

(1) Asiaticoside

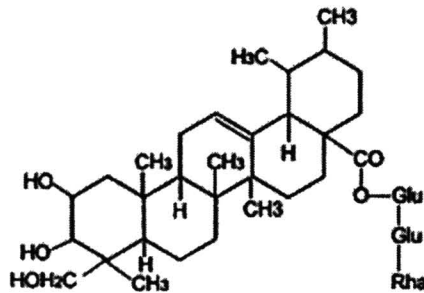
สูตรโมเลกุล : $C_{48}H_{78}O_{19}$

น้ำหนักโมเลกุล : 958

ชื่อทางเคมี : $2\alpha, 3\beta, 23\alpha$ -trihydroxy-urs-12-ene-28-oate O- α -L-rhamnopyranosyl-

(1 $\rightarrow$ 4)-O- β -D-glucopyranosyl-(1 $\rightarrow$ 6)-O- β -D-glucopyranose

จุดหลอมเหลว : 230-232 $^{\circ}$ C



รูป 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของ asiaticoside

ที่มา : <http://jadzuka.files.wordpress.com/2009/08/asiaticoside.jpg&imgrefurl>

(2) Madecassoside

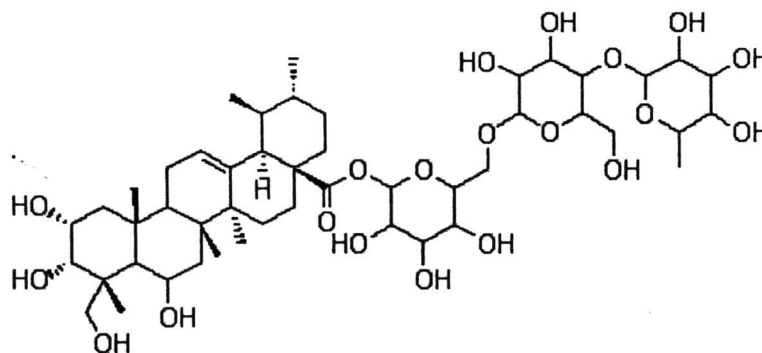
สูตรโมเลกุล : $C_{48}H_{78}O_{20}$

น้ำหนักโมเลกุล : 978

ชื่อทางเคมี : $2\alpha, 3\beta, 6\beta, 23$ -trihydroxy-urs-12-ene-28-oate O- α -rhamnopyranosyl-

(1 $\rightarrow$ 4)-O- β -D-glucopyranosyl-(1 $\rightarrow$ 6)-O- β -D-glucopyranose

จุดหลอมเหลว : $213-217^{\circ}\text{C}$



รูป 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของ madecassoside

ที่มา : <http://impag.en.chemnet.com/suppliers/product/976281/Madecassoside.html&usg>

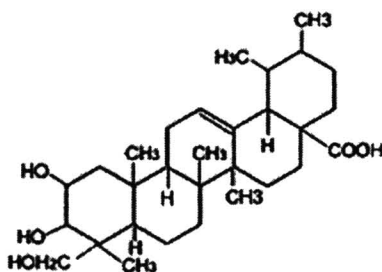
(3) Asiatic acid

สูตรโมเลกุล : $C_{30}H_{78}O_5$

น้ำหนักโมเลกุล : 488

ชื่อทางเคมี : $2\alpha, 3\beta, 23\alpha$ -trihydroxy-urs-12-ene-28-oic acid

จุดหลอมเหลว : $300-306^{\circ}\text{C}$



รูป 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของ madecassoside

ที่มา : <http://jadzuka.files.wordpress.com/2009/08/asiatic-acid1.jpg&imgrefurl>

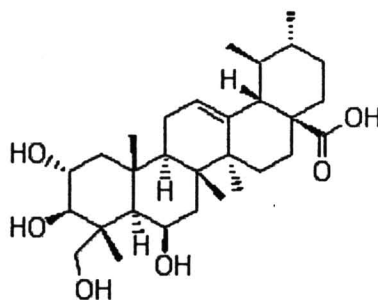
(4) Madecassic acid

สูตรโมเลกุล : $C_{30}H_{48}O_6$

น้ำหนักโมเลกุล : 504

ชื่อทางเคมี : $2\alpha, 3\beta, 6\beta, 23$ -trihydroxy-urs-12-ene-28-oic acid

จุดหลอมเหลว : $262-268^{\circ}\text{C}$



รูป 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของ madecassosic acid

ที่มา : <http://images.google.co.th/imglanding?q=madecassic%20acid&imgurl>

สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds)

สารประกอบฟีนอลหรือโพลีฟีนอลเป็นสารประกอบหลักที่มีมากกว่า 8,000 โครงสร้างสามารถพบได้ในพืชหลากหลายชนิด เช่น ผลไม้ ผัก ธัญชาติ พืชที่มีฝัก รวมไปถึงเครื่องดื่ม เช่น ชา โกโก้ และกาแฟ สารประกอบฟีนอลในธรรมชาตินั้นสามารถจำแนกได้ไม่น้อยกว่า 10 ประเภท ซึ่งโดยส่วนใหญ่พบในอาหาร ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ลิกแนน (lignans) สติลเบน (stilbenes) คูมาริน (coumarins) และแทนนิน (tannins) โดยกลุ่มฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบฟีนอลที่สำคัญที่สุด โครงสร้างหลักของสารประกอบฟีนอลจะมีหมู่ฟีนอลเป็นองค์ประกอบสำคัญและอาจมีหมู่อื่นๆ เข้ามาเกาะที่ตำแหน่งต่างๆ มีสมบัติเป็นสารอินทรีย์สามารถละลายได้ในน้ำ ที่พบในพืชมักจะรวมอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาล เช่น น้ำตาลกลูโคส กาแลคโตส แรมโนส และไซโลส ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) (Sapkoet, 2007) สารประกอบฟีนอลนอกจากมีสมบัติให้สี และรสชาติในผักผลไม้แล้ว ยังมีสมบัติในการเป็นสารต้านทานโรคด้วย โดยสารประกอบฟีนอลบางชนิดสามารถป้องกันและยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ (จริงแท้, 2542)

สารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ อาจทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นเมื่อเซลล์ของผักและผลไม้ถูกกระทบกระเทือนหรือมีบาดแผล เช่น เมื่อปอกเปลือกผลไม้แล้วปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ เนื้อของผลไม้จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO) ซึ่งเปลี่ยนโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลเป็นควิโนน (quinone) แล้วรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้น (polymerization) และมีสีน้ำตาล (จริงแท้, 2542)

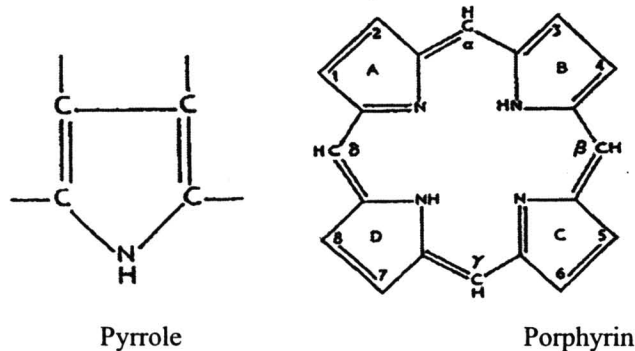
คลอโรฟิลล์ (chlorophylls) (Gross, 1987)

คลอโรฟิลล์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีสีเขียวในผักและผลไม้ สาหร่ายและแบคทีเรียกลุ่มที่สังเคราะห์แสงได้ ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงของพืช กระจายตัวอยู่ในคลอโรพลาสต์ (chloroplast) ซึ่งพบในส่วนไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ของเซลล์ ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสง โครงสร้างคลอโรฟิลล์ประกอบด้วยพอร์ไฟริน (porphyrin) ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนไพโรล (pyrrole ring) 4 วง เรียงตัวเป็นวง (รูป 2.6) และไฟทอล (phytol) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 20 อะตอม มีลักษณะโครงสร้างแบบไอโซพรีนอยด์ (isoprenoid) ส่วนตรงกลางโมเลกุลคลอโรฟิลล์มีธาตุแมกนีเซียมอยู่ ในธรรมชาติจะพบคลอโรฟิลล์อยู่ 2 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี

คลอโรฟิลล์เอ (chlorophyll a) จัดเป็นรงควัตถุกลุ่มแรก (primary pigment) ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงโดยตรง ส่วนรงควัตถุชนิดอื่นต้องรับแสงแล้วส่งต่อให้คลอโรฟิลล์เอ เรียกว่าเป็น

รงควัตถุเสริม (accessory pigment) ในพืชชั้นสูงต่างๆ ไป จะมีคลอโรฟิลล์เอนมากกว่าคลอโรฟิลล์บี ประมาณ 2-3 เท่า คลอโรฟิลล์เอนมีการดูดกลืนแสงมากในช่วง 420-660 นาโนเมตร พบ รงควัตถุชนิดนี้ในพืชชั้นสูงทุกชนิด และสาหร่ายบางชนิด

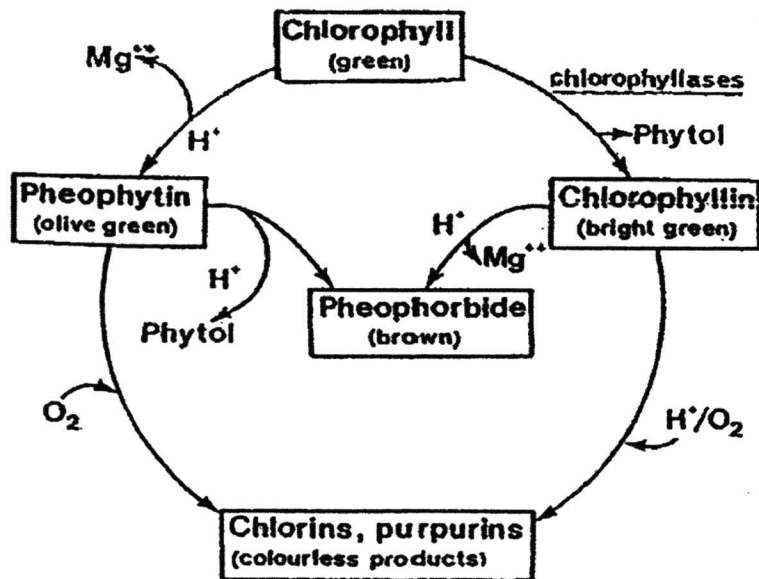
คลอโรฟิลล์ บี (chlorophyll b) เป็นคลอโรฟิลล์ที่มีสีเหลืองอมเขียว ช่วงในการดูดกลืน แสง 435-643 นาโนเมตร พบโดยทั่วไปในพืชชั้นสูงทุกชนิดและสาหร่ายสีเขียว โดยทั่วไปปริมาณ คลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บีจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและระยะของการพัฒนาของพืช



รูป 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไพโรล (pyrrole) และพอร์ไฟริน (porphyrin)

ที่มา: Gross (1987)

โมเลกุลของคลอโรฟิลล์จะถูกสร้างขึ้นและสลายตัวอยู่ตลอดเวลา โดยในระหว่างการเสื่อมสภาพของพืช การสลายตัวจะเกิดขึ้นมากกว่าทำให้คลอโรฟิลล์หมดไปมากที่สุด ซึ่งการสลายตัวของคลอโรฟิลล์เกิดขึ้นเนื่องจาก (1) สภาพที่เป็นกรดทำให้อะตอมของแมกนีเซียมหลุดออกไปจากส่วนหัวของโมเลกุลคลอโรฟิลล์เกิดเป็นสารฟีโอไฟติน (pheophytin) ซึ่งยังมีสีเขียวอยู่ (2) การทำงานของเอนไซม์คลอโรฟิลล์เลส (chlorophyllase) ซึ่งพบมากในขณะที่ผลกำลังสุก (Gross, 1987) (3) พันธะคู่ (double bond) ในวงแหวนพอร์ไฟรินถูกทำลายลง (รูป 2.7) ในผลไม้ส่วนใหญ่ การเปลี่ยนแปลงสีจะเริ่มจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ทำให้สีเขียวหายไป ตามปกติจะเกิดร่วมกับการเกิดรงควัตถุชนิดอื่นๆ เช่น แคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานิน ซึ่งในเนื้อเยื่อทั่วไป มักจะมี แคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานินปะปนอยู่ แต่สีของแคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานิน จะถูกสีเขียวของคลอโรฟิลล์บังไว้ เมื่อคลอโรฟิลล์สลายตัวไปสีของแคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานิน จึงปรากฏเด่นชัดออกมาได้ (Kays, 1991)



รูป 2.7 การสลายตัวของวัตถุดกลอโรฟิลล์

ที่มา: Wills *et al.* (1981)

แคโรทีนอยด์ (carotenoids)

แคโรทีนอยด์ มีสมบัติละลายได้ดีในน้ำมัน เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) ให้สีเหลืองอมส้มหรือสีแดงที่ผิวและเนื้อของผลไม้ แคโรทีนอยด์แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือแคโรทีน ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีออกซิเจน (oxygen free hydrocarbon) แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) ซึ่งมีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุลด้วย และไลโคพีน ซึ่งแคโรทีนอยด์จะมีอยู่ในผลไม้ตั้งแต่แรก แต่จะไม่ปรากฏให้เห็นเนื่องจากถูกสารสียกลอโรฟิลล์บดบังไว้ และสีของแคโรทีนอยด์จะปรากฏให้เห็นเมื่อสีเขียวของกลอโรฟิลล์สลายตัวไป ถึงแม้ว่าแคโรทีนอยด์จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว แต่แคโรทีนอยด์ มีสมบัติเป็นสารสีที่ค่อนข้างเสถียรเมื่ออยู่ภายในเซลล์ รงควัตถุแคโรทีนอยด์จะอยู่ภายในเม็ดโครโมพลาสต์ (chromoplast) ในเซลล์พืช ซึ่งเป็นรงควัตถุเสริมในกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยต้องถ่ายทอดพลังงานจากแสงที่ได้รับไปให้กับคลอโรฟิลล์เอ เพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงต่อไป (Gross, 1987) แคโรทีนอยด์จัดอยู่ในกลุ่มสารอาหารที่มีความสำคัญมาก ซึ่งกิจกรรมของแคโรทีนอยด์บางชนิด ส่งผลที่ดีต่อสุขภาพ เช่น ขับขี้สารก่อนมะเร็ง ขับขี้การเกิดเนื้องอก ชลอความแก่ มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกันโรค โดย

แคโรทีนอยด์มีการสลายตัวได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวสูง (unsaturated structure) ทำให้ไวต่อความร้อน ออกซิเจน และแสง (Rodriguez-Amaya, 1993)

2.1.3 ผลต่อสุขภาพของบัวบก

บัวบกเป็นพืชที่มีการใช้เป็นยารักษาโรคต่างๆ อย่างกว้างขวางในเอเชียใต้ ในตำราอายุรเวชของประเทศอินเดียและจีนมาตั้งแต่สมัยก่อนประวัติศาสตร์ สรรพคุณทางเภสัชวิทยาของบัวบก มีดังต่อไปนี้

1)ฤทธิ์ลดการอักเสบ

เมื่อป้อนสารสกัดน้ำจากทั้งต้น ขนาด 0.1 และ 0.25 กรัมต่อกิโลกรัม และ asiaticoside ขนาด 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้กับหนูขาว พบว่ามีผลลดการอักเสบในหนูขาวที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดแผลในกระเพาะอาหารด้วยกรดอะซิติค โดยจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ inducible nitric oxide synthase (iNOS) สาร madecassoside จากบัวบก มีฤทธิ์ลดการอักเสบที่เกิดจากการที่ผิวหนังแบ่งตัวผิดปกติ และฝี Madecassol ซึ่งประกอบด้วยสาร asiatic acid, madecassic acid และ asiaticoside สามารถลดการอักเสบ เมื่อใช้ทาที่ผิวหนังหนูซึ่งเกิดการอักเสบจากการฉายรังสี (Chen *et al.*, 1999)

ผงแห้งจากส่วนที่เหนือดินของบัวบกให้คนรับประทาน สามารถลดอาการอักเสบได้ อีกทั้งมีการจดสิทธิบัตรสารสกัดบัวบกซึ่งประกอบด้วยสาร madecassoside และ terminoloside ในการนำมาใช้ในเครื่องสำอางและยาเพื่อลดการอักเสบ และตำรับยาซึ่งมีบัวบกเป็นส่วนประกอบ เพื่อใช้ในการรักษาอาการอักเสบของไตและกรวยไต กระเพาะปัสสาวะ และทางเดินปัสสาวะ (Zhao *et al.*, 2006)

2) ฤทธิ์ต้านฮิสตามีน

สารสกัดใบบัวบกด้วยแอลกอฮอล์ผสมน้ำ (1:1) สามารถต้านอาการแพ้ได้ จึงช่วยบรรเทาอาการเจ็บปวด หรืออักเสบเนื่องจากแมลงกัดต่อย (Mokkhasmit *et al.*, 1971)

3) ฤทธิ์แก้ปวด

สารสกัดจากใบบัวบก ด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 60 ขนาด 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสารสกัดจากทั้งต้นของบัวบก ด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ขนาด 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีฤทธิ์แก้ปวดในหนูขาวและหนูถีบจักร แต่สารสกัดจากทั้งต้นบัวบก ด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 50 ในขนาด 125 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่มีฤทธิ์แก้ปวด เมื่อฉีดเข้าช่องท้องหนูถีบจักร (Dhar *et al.*, 1968)



4) ฤทธิ์สมานแผล

เมื่อทดลองให้หนูขาวกินสารสกัดจากใบด้วยเอทานอลร้อยละ 95 ขนาด 1 มิลลิลิตรต่อกิโลกรัม และทาที่แผลของหนูขาว พบว่ามีผลเพิ่มการเจริญเติบโตของเซลล์เยื่อบุผิว เพิ่มการสร้างคอลลาเจน ซึ่งสารสกัดจากบัวบก (titrated extract) ประกอบด้วยสาร asiatic acid, madecassic acid และ asiaticoside มีฤทธิ์สมานแผล โดยจะเร่งการสร้าง connective tissue เพิ่มปริมาณคอลลาเจนและกรด uronic ในหนูขาว และกระตุ้นการแสดงออกของยีนในเซลล์ human fibroblast ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหลอดเลือดและเนื้อเยื่อประสานในบริเวณที่เนื้อเยื่อถูกทำลาย (Maquart *et al.*, 1999) เมื่อนำสารสกัดมาใช้ทาภายนอกเพื่อรักษาแผลในหนูขาว พบว่าทำให้แผลหายเร็วขึ้น และแผลมีขนาดเล็กลง แต่ถ้าใช้รับประทานจะไม่ได้ผล ขณะที่รายงานของ Poizot *et al.* (1978) พบว่าเมื่อให้หนูขาวกินสารสกัดในขนาดวันละ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีผลในการรักษาแผลโดยทำให้การสร้างผิวหนังชั้นนอกเร็วขึ้น และบาดแผลมีขนาดเล็กลง

ครีม ขี้ผึ้ง และเจลที่มีสารสกัดน้ำจากบัวบกร้อยละ 5 เมื่อใช้ทาที่แผลของหนูขาว 3 ครั้งต่อวัน นาน 24 วัน สามารถเพิ่มการเจริญของเยื่อบุผิว การสร้างคอลลาเจน และ tensile strength ซึ่งสูตรที่อยู่ในรูปเจลจะให้ผลดีกว่าขี้ผึ้งและครีม (Sunikumar and Shivakumar, 1998) เจลที่ละลายน้ำได้ (hydrogel) ที่มีสารสกัดจากบัวบก (titrated extract) ซึ่งประกอบด้วย asiaticoside, asiatic acid และ madecassic acid มีฤทธิ์สมานแผลได้ โดยจะลดขนาดของแผลที่ผิวหนังของหนูขาวใน 9 วัน และเจลที่มีสารสกัดบัวบกอยู่ร้อยละ 0.5, 1 และ 2 มีฤทธิ์สมานแผลในเยื่อบุผิวในปากได้ (Prasertvithyarn *et al.*, 1998)

สาร asiaticoside มีฤทธิ์สมานแผล เร่งการหายของแผล เมื่อทดลองในหนูขาว หนูถีบจักร และในคน เมื่อให้สาร asiaticoside ขนาด 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทางปากแก่หนูตะเภา และใช้ทาที่ผิวหนังในหนูตะเภาปกติ และหนูขาวที่เป็นเบาหวานซึ่งแผลหายช้า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 0.4 ตามลำดับ พบว่ามีผลเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเยื่อ (tensile strength) เพิ่มปริมาณของคอลลาเจน และลดขนาดของแผล (Shukla *et al.*, 1999) ยาทิงค์เจอร์ (tincture) ที่มี asiaticoside เป็นส่วนประกอบร้อยละ 89.5 จะเร่งการหายของแผล เมื่อใช้ทาที่แผลของหนูตะเภา สาร ethoxymethyl 2-oxo-3,23-isopropylidene-asiate ซึ่ง เป็นอนุพันธ์ของ asiatic acid มีฤทธิ์ในการสมานแผลและลดการเกิดแผลเป็นหลังแผลหาย (Jeong, 1999)

สำหรับการทดลองในคน มีรายงานว่าครีมที่มีสารสกัดอัลกอสอลจากบัวบกเป็นส่วนประกอบ ร้อยละ 0.25-1 สามารถช่วยรักษา และสร้างผิวหนังขึ้นมาใหม่ ครีมที่มีสารสกัดจากบัวบก ร้อยละ 1 สามารถรักษาแผลอักเสบ และแผลแยกหลังผ่าตัดในผู้ป่วย ภายใน 2-8 สัปดาห์ (Anon, 1966) และรักษาแผลเรื้อรังที่เกิดจากอุบัติเหตุได้ภายใน 21 วัน นอกจากสารสกัดบัวบกใน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	30 พ.ย. 2554
เลขทะเบียน.....	242699
และเรียกคืนแล้ว	

รูปแบบครีมแล้ว ยังมีรายงานการใช้ทิงคเจอร์ที่มีส่วนผสมของ asiaticoside รักษาแผลของผู้ป่วย และการรับประทานสารสกัด triterpenoid ในขนาด 90 มิลลิกรัมต่อวัน ทานติดต่อกัน 3 สัปดาห์ ช่วยลดการเจริญของเซลล์เยื่อหลอดเลือดในผู้ป่วย postphlebotic syndrome ได้อีกด้วย (Montecchio *et al.*, 1991)

ตำรับยาซึ่งมีส่วนสกัดที่ละลายน้ำได้จากบัวบกที่มี asiaticoside อยู่ร้อยละ 60 นำมาใช้ในการรักษาแผลบาดเจ็บ แผลผ่าตัด ไฟไหม้ แผลเป็น ผิวหนังหนา รวมทั้งลดการสร้างเนื้อเยื่อเส้นใยที่ผิดปกติของตับและไต ยาเม็ดซึ่งมีสารซาโปนินจากบัวบกเป็นส่วนผสม มีผลในการเร่งการหายของแผล กระตุ้นการสร้าง granulation และหนังกำพร้าที่แผล (Song *et al.*, 2005)

5) ทำให้เลือดหยุดเร็ว

สารสกัดบัวบกด้วยน้ำทำให้เลือดหยุดเร็ว activated partial thromboplastin time และ prothrombin time ลดลง (Songsriphiphat *et al.*, 1968)

6) รักษาแผลในกระเพาะอาหาร

สารสกัดเอทานอลจากทั้งต้น ขนาด 21.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากราก ขนาด 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สารสกัดน้ำจากทั้งต้น และจากใบ ขนาด 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีฤทธิ์รักษาแผลในกระเพาะอาหารในหนูขาวที่เหนี่ยวนำให้เกิดแผลในกระเพาะอาหารด้วยความเครียดและกรดเกลือในเอทานอล (Tan *et al.*, 1997) เมื่อป้อนสารสกัดจากทั้งต้น ขนาด 0.05, 0.1 และ 0.25 กรัมต่อกิโลกรัม และสาร asiaticoside ขนาด 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แก่หนูขาวที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดแผลในกระเพาะอาหารด้วยกรดอะซิดิก พบว่ามีฤทธิ์รักษาแผลในกระเพาะอาหาร โดยจะลดขนาดของแผล เพิ่มจำนวนของหลอดเลือดขนาดเล็กในเนื้อเยื่อ เพิ่มจำนวนและการแพร่กระจายของเซลล์ที่แผล นอกจากนี้ยังเพิ่มการแสดงออกของ basic fibroblast growth factor และลดการทำงานของเอนไซม์ myeloperoxidase (Cheng *et al.*, 2004)

น้ำคั้นขนาด 200 และ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อป้อนให้หนูขาว วันละ 2 ครั้ง นาน 5 วัน มีผลรักษาแผลในกระเพาะอาหารหนูที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยเอทานอล แอสไพริน และความเย็นได้ น้ำคั้นที่ขนาด 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะเพิ่มการหลั่ง gastric juice mucin และเพิ่ม mucosal cell glycoproteins เมื่อให้น้ำคั้นขนาด 1, 2, 4 และ 8 กรัมต่อกิโลกรัม โดยการฉีดเข้าลำไส้เล็กหนูขาวที่ถูกกระตุ้นให้เกิดการหลั่งสารในกระเพาะอาหารด้วย histamine และ carbachol พบว่าไม่มีผลต่อการหลั่งกรด เอนไซม์เปปซิน เมื่อกลั้วกลืนในน้ำย่อย และเมื่อกลั้วเคลือบเยื่อกระเพาะอาหารที่ถูกกระตุ้นด้วย histamine แต่ที่ขนาด 4 และ 8 กรัมต่อกิโลกรัม มีแนวโน้มที่จะเพิ่มการหลั่งเมือกที่ละลายในน้ำย่อยที่กระตุ้นด้วย carbachol น้ำคั้นขนาด 4 กรัมต่อกิโลกรัม มีฤทธิ์กระตุ้นการไหลเวียนโลหิตบริเวณเยื่อกระเพาะอาหาร ขณะที่ขนาด 8 กรัมต่อ

กิโกรัม จะลดการกระตุ้นการไหลเวียนโลหิตบริเวณเยื่อกระดูกเพาะอาหารที่ถูกกระตุ้นด้วย histamine (Chuangcham, 2003) การทดลองในคนพบว่า สารสกัดจากบัวบก (Madecassol) มีฤทธิ์ในการรักษาแผลในกระเพาะอาหารและลำไส้ได้เช่นกัน (Cho *et al.*, 1981)

7) ฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ ดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ของสารสกัดจากบัวบก

ส่วนของพืช	ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
ราก	เฮกเซน	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Proteus vulgaris</i> และ <i>Pseudomonas cichorii</i>	อาร์รัตน์ (2531)
ส่วนเหนือดินของ บัวบก	เอทานอลและน้ำร้อน	<i>Staphylococcus aureus</i> , b-streptococcus group A, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> และ <i>B. subtilis</i>	
ใบ	เฮกเซน, ไดคลอโรมีเทน, เอทิลอะซิเตท, อีเทอร์และ เมทานอล	<i>S. aureus</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>Klebsiella aerogenes</i> , <i>P. vulgaris</i>	
ใบและลำต้น บัวบกทั้งต้น บัวบกทั้งต้น	เมทานอล	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i> ,และ <i>P. aeruginosa</i>	ณัฐพันธุ์ และ ตูลาภรณ์ (2000)
	แอลกอฮอล์	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>P. aeruginosa</i> และ <i>S. typhimurium</i>	
	เอทานอล	เชื้อราที่ทำให้เกิดโรคกล้าถั่ว <i>Trichophyton mentagrophytes</i> และ <i>T. rubrum</i>	
น้ำมันหอมระเหย	-	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Rhizopus oryzae</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Candida albicans</i> และ <i>Colletotrichum musae</i>	Ikegami et al. (1993) Minija and Thoppil, (2003)

2.2 เยลลี่

เยลลี่เป็นผลิตภัณฑ์ลูกกวาดชนิดเคี้ยว (confectionery products) ที่มีน้ำตาลเป็นส่วนผสมหลัก (sugar confectionery) (สุวรรณ, 2543) ลักษณะสำคัญของผลิตภัณฑ์ประเภทนี้คือ มีความยืดหยุ่น นุ่มเหนียว มีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันไปตั้งแต่อ่อนนุ่มแต่มีความยืดหยุ่นสูง ไปจนถึงเหนียว แข็งกักขาดได้ยาก ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีความชื้นค่อนข้างสูง อยู่ระหว่างร้อยละ 10-25 เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้มีความสามารถในการจับตัวกับน้ำสูง (water-binding) ซึ่งมีส่วนทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไป (สุวรรณ, 2543)

จากสมบัติการจับตัวกับน้ำ (water binding) ของไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งมีส่วนทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไปด้วย จึงสามารถใช้ปริมาณความชื้นเป็นตัวชี้บ่งชนิดของผลิตภัณฑ์ได้ ดังนี้ (สุวรรณ, 2543)

1) ผลิตภัณฑ์เยลลี่ จะมีความชื้นร้อยละ 18-25 มีเนื้อสัมผัสนุ่ม กัดขาดได้ง่าย ใช้มีดตัดได้ โดยไม่เหนียวติดใบมีด

2) ผลิตภัณฑ์กัม ชนิดแข็ง (hard gum) มีความชื้นร้อยละ 10-13 ลักษณะเนื้อแข็งและเหนียว กัดขาดได้ยาก หนึบมาก เคี้ยวได้นาน ชนิดนุ่ม (soft gum) มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 16-20 เนื้อจะนุ่มเหนียวมีความยืดหยุ่นสูง

3) พาสติลล์ (pastilles) เป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างกัมและเยลลี่ ที่พบในตลาดมักจะทำเป็นขอม

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ได้แบ่งผลิตภัณฑ์เยลลี่เป็น 3 ประเภท และได้นิยามของเยลลี่แต่ละประเภทดังนี้

1) เยลลี่เหลว หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ธัญชาติ หรือสมุนไพร มาคั้น หรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวานและสารที่ทำให้เกิดเจล เช่น เจลาติน คาร์ราจีแนน วุ้น ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะเหลว อาจผสมกับกรดผลไม้ และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ธัญชาติ หรือสมุนไพร เคี้ยวให้มีความชื้นเหนียวพอเหมาะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม อาจแต่งสี และกลิ่นรสด้วยก็ได้ บรรจุในภาชนะที่ปิดได้สนิท

2) เยลลี่อ่อน หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ธัญชาติ หรือสมุนไพร มาคั้นหรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวาน และสารที่ทำให้เกิดเจล เช่น เจลาติน คาร์ราจีแนน วุ้น ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะกึ่งแข็ง อาจผสมกรดผลไม้ และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ธัญชาติ หรือสมุนไพร เคี้ยวให้มีความชื้นเหนียวพอเหมาะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม อาจแต่งสีและกลิ่นรสด้วยก็ได้ บรรจุในภาชนะที่ปิดได้สนิท

3) เยลลี่แข็ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ธัญชาติ หรือสมุนไพรมาคั้นหรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวาน และสารที่ทำให้เกิดเจล เช่น เจลาติน คาร์ราจีแนน วุ้น ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะแข็งและเหนียว อาจผสมกรดผลไม้ และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ธัญชาติ หรือสมุนไพร เคี้ยว ให้มีความข้นเหนียวพอเหมาะ ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม อาจแต่งสีและกลิ่นรสด้วยก็ได้ อาจเทใส่พิมพ์หรือตัดเป็นชิ้นหลังจากทิ้งไว้ให้เย็นแล้วอาจลวกด้วยน้ำตาลหรือแป้งบริโกล



2.2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตเยลลี่

1) น้ำตาลซูโครส (sucrose)

น้ำตาลซูโครสหรือน้ำตาลทรายที่ผลิตเป็นอุตสาหกรรมนั้นจะผลิตจากอ้อย (sugar cane) ซึ่งเป็นพืชที่ปลูกในเขตร้อน ประมาณร้อยละ 60 และผลิตจากหัวบีท (beet root) ซึ่งปลูกในเขตอบอุ่น ประมาณร้อยละ 40 (Yudkin, 1971) กรรมวิธีการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยและหัวบีท มีหลักการคล้ายกัน คือสกัดเอาสารละลายน้ำตาลออกมา (ในกรณีที่เป็นอ้อย ใช้วิธีบีบคั้นเอาน้ำอ้อย ส่วนหัวบีทจะต้องใช้น้ำสกัด) นำมากรองให้สะอาด แล้วต้มระเหยเอาน้ำออกจนถึงระดับที่น้ำตาลสามารถตกผลึกแยกตัวออกมาได้

1.1 ชนิดของน้ำตาลซูโครส (สุวรรณา, 2543)

น้ำตาลที่ผลิตจากโรงงานผลิตจากโรงงานแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(1) น้ำตาลดิบ เป็นน้ำตาลที่ไม่ผ่านการฟอกสี ผลิตเพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับโรงงานผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ความบริสุทธิ์ของน้ำตาลดิบที่วัดโดยวิธีโพลาไรเซชัน (polarization) คิดเป็นน้ำตาลซูโครสร้อยละ 97.5 และมีค่าสีประมาณ 3,000 หน่วย (วัดที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร)

(2) น้ำตาลทรายขาวธรรมดา น้ำตาลชนิดนี้ถูกผ่านขั้นตอนการใช้สารจับรงควัตถุที่ทำให้เกิดสี แล้วตกตะกอนสารดูดซับออกไป ทำให้ผลึกน้ำตาลมีสีขาวขึ้น ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 มีค่าสีมากกว่า 45-100 หน่วย

(3) น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (refined sugar) มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.9 และค่าสีน้อยกว่าหรือเท่ากับ 45 หน่วย

น้ำตาลทรายมีหลายรูปแบบ เช่น น้ำตาลทรายเม็ด น้ำตาลไอซิ่ง หรือน้ำตาลทรายปั่น น้ำตาลทรายผงปั่นละเอียด นอกจากนั้นยังอาจใช้ในรูปของน้ำตาลไซรัป ซึ่งมีปริมาณของแข็ง

ทั้งหมดที่ละลายน้ำได้อยู่ประมาณร้อยละ 66 ในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเลือกใช้ในรูปแบบน้ำตาลทรายเม็ด

1.2 สมบัติของน้ำตาลซูโครส

(1) ให้รสหวาน เป็นลักษณะที่เด่นมากของผลิตภัณฑ์ในกลุ่มที่มีน้ำตาลเป็นส่วนผสมหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำตาลละลายในน้ำได้ง่าย ทำให้ขณะที่บริโภคผลิตภัณฑ์อยู่ในปาก จะรู้สึกหวานเร็วกว่าการบริโภคผลิตภัณฑ์กลุ่มที่มีไขมันเป็นส่วนผสมหลัก ในเฟสต่อเนื่องที่มีปริมาณน้ำตาลเท่ากัน ในผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจไม่ต้องการรสหวานมากเกินไป สามารถใช้สารอื่นๆ เช่น ไขมัน และสารก่อเจลเติมแต่งลงไปได้

(2) ให้เนื้อและน้ำหนักแก่ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากในสูตรส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ถูกกวาดโดยทั่วไปจะมีการใช้น้ำตาลถึงร้อยละ 70 ของน้ำหนักทั้งหมด แต่คิดเป็นราคาต้นทุนเพียงร้อยละ 30 เท่านั้น จึงถือว่าเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก แต่การผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ถูกกวาดที่ปราศจากน้ำตาล (sugar-free confectionery) โดยใช้สารให้รสหวานชนิดอื่นทดแทนน้ำตาล ซึ่งส่วนมากจะให้รสหวานมากกว่าน้ำตาล อาจเป็นร้อยหรือพันเท่า ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงการใช้สารที่ให้เนื้อ (bulking agent) แทนน้ำตาลด้วย

(3) การเกิดอินเวอร์ชัน เนื่องจากน้ำตาลซูโครสเป็นไดแซ็กคาไรด์ที่โมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส และฟรักโทสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมีชนิดที่ไม่แข็งแรงมาก จึงสามารถถูกแยกให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้เป็นน้ำตาลกลูโคส และฟรักโทสในปริมาณที่เท่าๆ กัน ซึ่งเรียกรวมว่า น้ำตาลอินเวิร์ต ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการเกิดน้ำตาลอินเวิร์ต คือ อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาการให้ความร้อน ปริมาณกรดหรือค่าพีเอชของสารละลาย และเอนไซม์อินเวอร์เทส โดยในระบบที่มีค่าพีเอชต่ำและอุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดน้ำตาลอินเวิร์ต ในปริมาณที่สูง (ศิริลักษณ์, 2525a) ตัวอย่างเช่น เมื่อเก็บรักษาสารละลายน้ำตาลความเข้มข้นร้อยละ 65 พีเอช 3.2 ไว้ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าเกิดอินเวอร์ชันขึ้นประมาณร้อยละ 10 แต่ที่พีเอช 5.5 จะเกิดเพียงร้อยละ 0.1 เท่านั้น ซึ่งหากต้องการเร่งปฏิกิริยาที่พีเอช 5.5 นี้ จะต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น และแม้ว่าจะเพิ่มสูงถึง 130°C ก็ยังเกิดอินเวอร์ชันได้ต่ำ แต่เมื่อนำสารละลายน้ำตาลไปต้มที่พีเอชต่ำกว่า 4 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 3.5 จะเกิดน้ำตาลอินเวิร์ตถึงร้อยละ 50 หรือมากกว่านั้น นอกจากนั้นการให้ความร้อนแก่สารละลายของน้ำตาลซูโครสยังสามารถทำให้เกิดสภาพเป็นกรดได้เช่นกัน ซึ่งน้ำตาลซูโครสบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทส (Brook, 1971)

(4) น้ำตาลอินเวิร์ตที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อการยับยั้งการตกผลึกของน้ำตาลซูโครส โดยเฉพาะในอาหารที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูง Howell and Hartel (2001) ได้ศึกษาผลของน้ำตาลอินเวิร์ตที่มีต่ออัตราการเพิ่มขนาดของผลึก พบว่าการเก็บสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 75 ในลักษณะเป็นฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 50°C ปริมาณของน้ำตาลอินเวิร์ตร้อยละ 0.5 และ 1.0 ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำตาล แต่มีปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ตร้อยละ 5 ทำให้อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกลดลงจาก 15 ไมโครเมตรต่อนาที่ เป็น 3.5-6.0 ไมโครเมตรต่อนาที่ อย่างไรก็ตาม หากมีน้ำตาลอินเวิร์ตมากเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการตกผลึกของน้ำตาลเดกซ์โทรสได้ และเนื่องจากน้ำตาลอินเวิร์ตมีสมบัติในการดูดความชื้นได้ง่าย ซึ่งอาจทำให้ลูกกวาดแข็งและเหนียวติดวัสดุที่ห่อ ดังนั้นในการทำผลิตภัณฑ์ลูกกวาด เยลลี่ หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีน้ำตาลสูง จึงต้องมีการควบคุมสภาพกรด พีเอช และการให้ความร้อนอย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าว

การละลาย (solubility) น้ำตาลละลายได้ดีที่อุณหภูมิห้อง โดยสามารถละลายได้จนมีความเข้มข้นสูงสุดถึงร้อยละ 66.4 ที่อุณหภูมิ 20°C และร้อยละ 76.4 ที่อุณหภูมิ 70°C (Brook, 1971) หากเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 100°C จะละลายได้ถึงร้อยละ 82 อัตราเร็วของการละลายของน้ำตาลจะลดลงขณะที่ความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น (สายสนมและศิริ, 2539)

(5) จุดเดือดของสารละลายน้ำตาล ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารละลายน้ำตาลที่อิ่มตัวแล้วน้ำตาลจะละลายได้เพิ่มขึ้น และจุดเดือดของสารละลายจะสูงขึ้นจากเดิม กล่าวได้ว่าสารละลายน้ำตาลซึ่งมีความเข้มข้นคงที่ จะมีจุดเดือดคงที่ที่จุดหนึ่งเสมอ ซึ่งกฎข้อนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตลูกกวาดให้ได้ลักษณะตามต้องการ

(6) ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลมีหน่วยเป็น บริกซ์ (Brix หรือ Balling, $^{\circ}\text{Bx}$) หมายถึง เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของน้ำตาลซูโครสในสารละลายน้ำตาล ที่วัดด้วยเครื่องแฮนด์รีแฟรกโตมิเตอร์ (hand refractometer)

โบเม (Baume, $^{\circ}\text{Be}'$) มีค่าเท่ากับ M-M/S

เมื่อ $M = 145$ (ใช้ในสหรัฐอเมริกาและบางประเทศในยุโรป)

$M = 144.3$ (ใช้เฉพาะในสหราชอาณาจักร)

$S =$ ความถ่วงจำเพาะของสารละลายน้ำตาล

การวัดค่า จะวัดที่อุณหภูมิมาตรฐาน คือ 20°C ดังนั้นในการวัดค่าจึงต้องทำให้สารละลายเย็นลงถึงอุณหภูมิดังกล่าวก่อน หรือวัดที่อุณหภูมิอื่น แล้วปรับค่าให้เป็นค่าที่ 20°C

การเป็นสารละลายอิมัลชันด้วยควย จากสมบัติการละลายของน้ำตาลที่ละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้น้ำตาลสามารถอยู่ในรูปของสารละลายอิมัลชันด้วยควย โดยน้ำตาลในสภาวะนี้จะอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) และเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง โมเลกุลของน้ำตาลเคลื่อนที่มาจับเรียงตัวกันได้ยาก ทำให้ยังไม่มีเกิดการเกิดผลึกขึ้นการเติม co-solute ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าน้ำตาลซูโครส เช่น สตาร์ช มอลโตเดกซ์ทริน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสตาร์ชด้วยกรดที่เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสเป็นองค์ประกอบเป็นการเพิ่มค่า Tg (glass transition temperature) ของสารละลายน้ำตาล (Slade and Levine, 1991) สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงดังกล่าว รวมทั้งน้ำตาลฟรักโทส น้ำตาลแลกโทส น้ำตาลเทรฮาโลส หรือน้ำตาลราฟิโนส จะจับล้อมรอบน้ำตาลซูโครสในรูปของอสัณฐานของสารผสม ซึ่งช่วยชะลอการเกิดผลึกของน้ำตาลซูโครส ทำให้สารละลายอิมัลชันด้วยควยของน้ำตาลมีความคงตัวมากขึ้น (Roos and Karel, 1991)

(7) การตกผลึกจากสารละลายอิมัลชันด้วยควย ในสภาวะที่สารละลายมีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งอยู่ในสภาวะที่ไม่อิมัลชัน ผลึกของน้ำตาลซูโครสยังคงละลายได้ดี เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลจนถึงค่าสูงสุด ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารละลาย จะเกิดความสมดุลระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลวของน้ำตาลซูโครส หากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีกเพียงเล็กน้อย สารละลายจะอยู่ในช่วงสภาวะอิมัลชันด้วยควยในระดับต่ำที่มีความคงตัวและมีการเกิดผลึกในช่วงเวลาหนึ่ง อาจนานเป็นสัปดาห์หรือเป็นเดือน แต่ผลึกที่มีอยู่ในสารละลายจะค่อยๆ เพิ่มขนาดขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้นอีก สารละลายจะอยู่ในสภาวะอิมัลชันด้วยควย ในช่วงนี้นิวเคลียสผลึกเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว และหากยังคงเพิ่มความเข้มข้นต่อไป สารละลายจะมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นทันที อัตราการถ่ายเทมวลสารลดลง ทำให้อัตราการเกิดผลึกช้าลงด้วย (Shastri and Hartel, 1996) เมื่อความหนืดมีค่าเท่ากับ 10^{12} Pa.s หรือ 10^{15} centipoise น้ำตาลซูโครสจะเปลี่ยนสถานะเป็นกลาส (glass transition) ซึ่งการทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้นกว่าจุดนี้ จะเกิดสภาวะกลาสได้โดยไม่ผ่านขั้นตอนการเกิดผลึก (Roos and Karel, 1991)

การตกผลึกนี้สามารถควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมได้โดยใช้ร่วมกับน้ำตาลอินเวิร์ตซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้ในกระบวนการการผลิตฟองดองต์ ครีม และฟิงค์ (ศิริลักษณ์, 2525a) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีพฤติกรรมเป็นแบบ non-Newtonian มีลักษณะข้นหนืดเนื่องจากแสงที่หักเหออกจากผลึกเล็กๆ จำนวนมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกจะมีผลต่อขนาดของผลึก การตกผลึกที่อุณหภูมิสูง ผลึกที่ได้จะมีลักษณะหยาบ ส่วนการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ที่อุณหภูมิ 40°C ผลึกที่ได้จะมีความละเอียด นอกจากนั้น การคนส่วนผสมจะช่วยให้เกิดผลึกที่ละเอียดกว่าการปล่อยตั้งทิ้งไว้ให้เกิดผลึกเอง (ศิริลักษณ์, 2525b)

(8) การเกิดโครงสร้างแบบเจล น้ำตาลเป็นส่วนผสมสำคัญที่ทำให้เกิดเจลในผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้เพกทินที่มีหมู่เมทอกซีสูง (high methoxyl pectin) เป็นสารก่อเจล โดยทำหน้าที่เป็น

ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำตาลต่อสมบัติทางรีโอโลยีของอะกาโรส (agarose) และคาร์ราจีแนน พบว่าการเติมน้ำตาลซูโครสจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในอะกาโรสเจล และแคลปา-คาร์ราจีแนนเจล โดยน้ำตาลจะไปช่วยเพิ่มจังก์ชันโซนโดยเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโพลีเมอร์กับกลุ่มไฮดรอกซิลของน้ำตาล และทำให้จังก์ชันโซนคงตัว (Nisginari *et al.*, 1995)

2) ไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids)

ไฮโดรคอลลอยด์หรือไฮโดรฟิลคอลลอยด์ หมายถึง สารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์กัม (polysaccharide gums) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในโมเลกุลอาจประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวกันทั้งหมด เป็นไฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น เดกซ์-แทรน (dextran) และฟอสโฟแมนแนน (phosphomannan) หรือประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์หลายชนิด เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น กัมอะราบิก (gum arabic) กัมแกตติ (gum ghatti) และกัมคารายา (gum karaya) เป็นต้น (นิธิยา, 2549)

คำว่า กัม (gums) เป็นภาษาฮิบส์ หมายถึง สารที่มีลักษณะเหนียว (sticky substance) ดังนั้นเมื่อพอลิแซ็กคาไรด์กัมละลายหรือกระจายอยู่ในน้ำจะทำให้สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงหรือมีลักษณะเป็นเจล ในอุตสาหกรรมอาหารจึงได้นำเอาพอลิแซ็กคาไรด์กัมไปใช้ประโยชน์เป็นเพิ่มความคงตัว (stabilizer) สารเพิ่มความหนืด (thickener) สารที่ทำหน้าที่ลดลงตึงผิว (emulsifier), สารที่ใช้ให้เกิดแขวนลอย (suspending agent), สารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent), สารที่ทำให้เกิดฟอง (film-forming agent) สารที่ทำหน้าที่กักเก็บ (encapsulating agent) และหน้าที่อื่นๆ ในผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีคุณภาพดีขึ้น เช่น มีลักษณะสัมผัสและลักษณะปรากฏที่ดีและมีอายุการวางขายได้นาน (นิธิยา, 2549)

2.1 สมบัติทั่วไปของไฮโดรคอลลอยด์ (นิธิยา, 2549)

1) การกระจายตัวในน้ำ (dispersibility in water)

ไฮโดรคอลลอยด์ส่วนใหญ่ละลายได้ดีในน้ำร้อน มีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น เช่น กัมอะราบิก และกัมบางชนิดละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ การที่

ไฮโดรคอลลอยด์ มีความสามารถในการละลาย หรือการกระจายตัวได้ในน้ำแตกต่างกัน เรียกว่า degree of solubility ซึ่งปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง คือ อุณหภูมิและความเข้มข้น พอลิแซ็กคาไรด์กัมส่วนใหญ่ละลายได้ดีที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 1-2 อนุพันธ์เซลลูโลสบางชนิดสามารถละลายได้ที่ความเข้มข้นสูงๆ เนื่องจากมีความหนืดต่ำ ส่วนกัมอะราบิก และสตาร์ชกัมละลายได้สูงถึงร้อยละ 50 และ 40 ตามลำดับ การละลายของไฮโดรคอลลอยด์ส่วนใหญ่ต้องใช้ความร้อน จึงจะทำให้เกิดการไฮเดรชันมากที่สุด เช่น โลคัสต์บินกัม และทราคาแคนต์ แต่ะการที่ต้องต้มจนเดือดจึงจะเกิดการละลาย หรือกระจายตัวได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม ในทางตรงกันข้าม เมทิลเซลลูโลสไม่ละลายในน้ำร้อน แต่ละลายได้ดีในน้ำเย็น

การละลายหรือการทำให้พอลิแซ็กคาไรด์กัมกระจายตัวในน้ำ ต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อไม่ให้กัมเกาะตัวกันเป็นก้อน การที่กัมเกาะตัวกันได้เนื่องจากกัมเหล่านี้มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก จึงคูดน้ำได้อย่างรวดเร็ว และเกาะตัวกันเป็นก้อน ข้อควรปฏิบัติเพื่อไม่ให้พอลิแซ็กคาไรด์กัมเกาะตัวกันเป็นก้อน มีหลายวิธีดังนี้

- ทำให้กัมกระจายตัวในแอลกอฮอล์หรือเอซีโตน หรือน้ำเชื่อม หรือกลีเซอริน จำนวนเล็กน้อยแล้วจึงเติมน้ำลงไป
- ผสมกับส่วนผสมอื่นๆ ที่เป็นของแข็ง เช่น น้ำตาล หรือน้ำตาลไอซิงเสียก่อน แล้วจึงเติมน้ำลงไป หรือนำไปเติมลงในส่วนผสมที่เป็นของเหลวอื่นๆ
- ค่อยๆ เติมน้ำลงในน้ำอย่างช้าๆ โดยการร้อนผ่านตะแกรงลงบนผิวน้ำ
- เติมน้ำเย็นลงไปในกัมเพียงเล็กน้อยพอให้กัมเปียกทั่วกัน แล้วคนให้เข้ากันดี หลังจากนั้นจึงค่อยๆ เติมน้ำร้อนลงไปเพื่อให้กัมละลายได้ดีขึ้น

2) ความหนืด (viscosity)

พอลิแซ็กคาไรด์กัมเมื่อละลายในน้ำ จะได้สารละลายที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น และสารละลายของกัมแต่ละชนิดจะมีความหนืดแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายกัม ได้แก่

- ธรรมชาติของพอลิแซ็กคาไรด์กัม
- อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลาย
- ความเข้มข้นของสารละลาย สารละลายกัมแต่ละชนิดจะให้ความหนืดสูงที่สุดที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เช่น ลาร์ชกัม และกัมอะราบิก จะให้ความหนืดสูงสุดเมื่อมีความเข้มข้นร้อยละ 10-20 แต่ทราคาแคนต์ โลคัสต์บินกัม และกัวร์กัมจะให้ความหนืดสูงสุดเมื่อมีความเข้มข้นเพียงร้อยละ 1 เท่านั้น

ระยะเวลาที่ใช้ในการละลายก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายกัม ตัวอย่างเช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม เมื่อละลายในน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุดอย่างรวดเร็ว ตรงกันข้ามกับทราคาแคนต์จะละลายน้ำได้อย่างช้าๆ จึงต้องใช้เวลานานในการละลาย เพื่อให้สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงสุด

3) การเกิดเจล (gel formation)

พอลิแซ็กคาไรด์กัมบางชนิด เช่น เพกทิน อะการ์ สตาร์ช แอลจิเนต และคาร์ราจีแนน สามารถเกิดเจลได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เพกทินจะเกิดเจลได้ดีในน้ำร้อนที่มีน้ำตาล และกรด จึงนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตแยมและเบลลี จึงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อเรียบ และเป็นเจลที่แผ่ออกได้ (spreadable gel) สำหรับเพกทินที่มีหมู่เมทอกซิลน้อยจะเกิดเจลได้ดีเมื่อมีแคลเซียมและไม่มีน้ำตาล

เมื่อนำสตาร์ชละลายในน้ำร้อนหรือต้มกับน้ำนมจะได้เจลที่มีเนื้อเนียนและขุ่น (smooth cloudy gel) แต่ถ้าใช้น้ำนมที่เย็นและมีฟอสเฟตอยู่ด้วย สตาร์ชจะเกิดเจลได้โดยไม่ต้องผ่านความร้อน หรือเกิดเจลได้ในเซชัน

อาการเกิดเจลได้ดีเช่นเดียวกัน และจะละลายได้ดีเมื่อต้มจนเกือบเดือด สามารถเกิดเจลได้ตั้งแต่อุณหภูมิระหว่าง 40-50°C และเจลที่เกิดขึ้นจะไม่หลอมเหลวจนกว่าจะได้รับความร้อนสูงถึงอุณหภูมิ 80-85°C

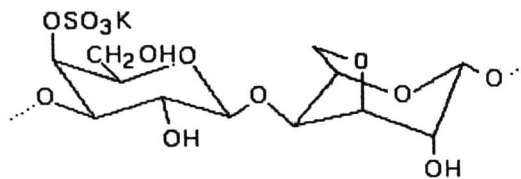
คาร์ราจีแนนและเฟอเซลลาแรนเมื่อละลายในน้ำร้อนและปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จะเกิดเจลชนิดเปลี่ยนกลับไปได้ด้วยความร้อน (irreversible gel) เมื่อละลายทั้งในน้ำร้อนหรือในน้ำเย็น การเกิดเจลของไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดยังต้องใช้สภาวะพิเศษ เช่น ต้องการโพแทสเซียมไอออน หรือแคลเซียมไอออน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดเจลของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด

2.2 ไฮโดรคอลลอยด์ธรรมชาติ

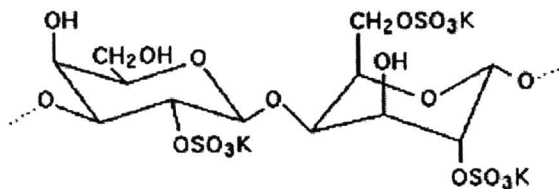
1) คาร์ราจีแนน (carrageenan)

คาร์ราจีแนน (carrageenan) เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ซัลเฟตที่สกัดจากสาหร่ายสีแดง คือ *Chrodrus crispus* และ *Gigartina stellata* ด้วยสารละลายค่างเจือจาง คาร์ราจีแนนแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ แคปปา-คาร์ราจีแนน ไคโอตา-คาร์ราจีแนน และแลมปีดา-คาร์ราจีแนน ซึ่งคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลแล็กโทส (galactose) ที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ตำแหน่งและระดับต่างๆ กัน เช่น แคปปา-คาร์ราจีแนนเป็น 1→ 4 3, 6-แอน-ไฮโดร-

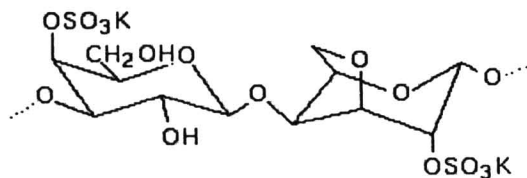
ดี-กาเล็กโทส- 2-ซัลเฟตสลับกัน สำหรับแลมบ้า-คาร์ราจีแนน ประกอบด้วย 1→3 ดี-กาเล็กโทส- 2-ซัลเฟต และ 1 → 4 กาเล็กโทส-2,6-ไดซัลเฟต สลับกัน หน่วยโครงสร้างย่อยในโมเลกุลของแคปปา- แลมบ้า- และไอโอตา-คาร์ราจีแนน ดังแสดงในรูป 2.8 (อรุณี, 2547)



แคปปา-คาร์ราจีแนน



แลมบ้า-คาร์ราจีแนน



ไอโอตา-คาร์ราจีแนน

รูป 2.8 หน่วยโครงสร้างย่อยในโมเลกุลของแคปปา- แลมบ้า- และไอโอตา-คาร์ราจีแนน

ที่มา: Imeson (1997)

สมบัติของคาร์ราจีแนนจะขึ้นอยู่กับประจุลบของหมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโมเลกุลเป็นสำคัญ และยังแตกต่างกันในแต่ละชนิดของคาร์ราจีแนนด้วย ทำให้มีสมบัติเด่นในการเกิดปฏิกิริยากับโปรตีน ทำให้คาร์ราจีแนนสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอาหารที่มีน้ำนมเป็นส่วนผสมได้ คาร์ราจีแนนละลายได้ดีและมีความคงตัวที่พีเอชสูงกว่า 7 ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7 ความคงตัวจะลดลง โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในภาวะที่มีน้ำตาลความเข้มข้นสูงปนอยู่ในสารละลายด้วย ทั้งแคปปา- และแลมบ้า-คาร์ราจีแนน จะยังคงละลายได้ดีเมื่อได้รับความร้อนเพียงพอ แต่ไอโอตาจะละลายหรือกระจายตัวได้น้อยกว่าสองชนิดแรก คาร์ราจีแนนแต่ละชนิดมีสมบัติในการเกิดเจลแตกต่างกัน สำหรับแคปปา- และไอโอตา-คาร์ราจีแนน จะเกิดเจลเป็นแบบ thermo-reversible โดยมีกลไกการเกิดเป็น double-helix carrageenan polymers แคปปา- และไอโอตา-คาร์ราจีแนน

ไม่ละลายในน้ำเย็น (ยกเว้นที่เป็นเกลือโซเดียม) แต่จะละลายได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 70°C คาร์ราจีแนนที่อยู่ในรูปสารละลายในน้ำจะมีโครงสร้างเป็น random coil เมื่อทำให้เย็นลงจะเกิดเป็นตาข่ายพอลิเมอร์ 3 มิติ แต่ละสายของพอลิเมอร์จะรวมตัวกันเข้ามาใกล้กันและเกิด junction point เมื่อปล่อยให้เย็นลงอีกจะมีการเกาะตัวของ junction point มากขึ้น ทำให้เกิดการแข็งตัวของเจลแบบปลา-คาร์ราจีแนน จะเกิดเจลที่เปราะแตกง่ายและมีซินเนอริซิสเกิดขึ้น ส่วนไอโอตา-คาร์ราจีแนนจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่นและไม่เกิดซินเนอริซิส สำหรับแลมบ์ดา-คาร์ราจีแนนละลายได้ในน้ำเย็นและมีสมบัติไม่เกิดเป็นเจล แคลปตา-คาร์ราจีแนนละลายได้ดีในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 60-70°C เจลที่ได้จะมีความเปราะ และเกิดการแยกตัวจากน้ำได้ง่าย จึงมักใช้ร่วมกับกัมชนิดอื่น เช่น โคลด์สตีปิ้งกัม เพื่อแก้ปัญหาส่วนนี้ สำหรับไอโอตา-คาร์ราจีแนนจะละลายในน้ำอุ่น 55°C เจลที่ได้จะมีความยืดหยุ่น (elastic gel) โดยไม่มีการแยกตัวของน้ำ ส่วนแลมบ์ดา-คาร์ราจีแนนนั้นสามารถละลายได้ในน้ำเย็น และใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดเท่านั้นเนื่องจากมีสมบัติไม่เกิดเจล (สุวรรณ, 2543)

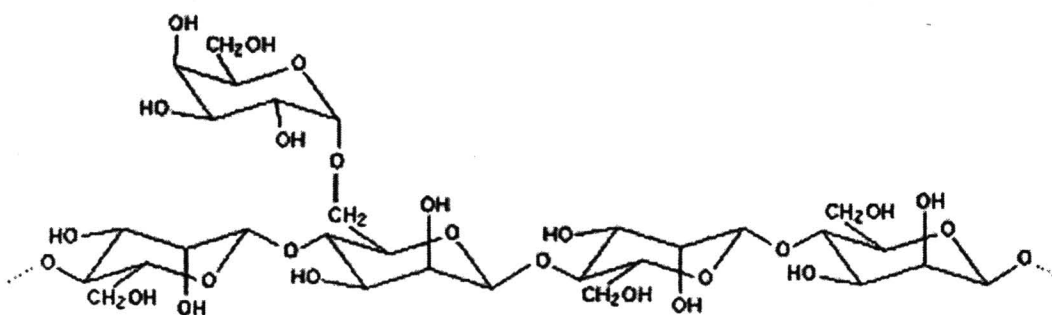
การใช้โคลด์สตีปิ้งกัมผสมกับแคลปตา-คาร์ราจีแนน จะช่วยเสริมให้เจลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เปลี่ยนเนื้อเจลจากที่เปราะและแตกง่ายเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่นดีขึ้น และเกิดซินเนอริซิสลดลง อัตราส่วนที่เหมาะสมของแคลปตา-คาร์ราจีแนนต่อโคลด์สตีปิ้งกัม คือ 2 : 1 จะทำให้เกิดเจลที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด และที่อัตราส่วน 1 : 4 จะทำให้เกิดซินเนอริซิสน้อยที่สุด ในการนำไปให้กับผลิตภัณฑ์อาหารต้องทำให้ทั้งคาร์ราจีแนนและโคลด์สตีปิ้งกัมละลายให้หมดเสียก่อนที่จะเกิดเจล นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น fish gels และ dessert gels การผสมโคลด์สตีปิ้งกัมกับไอโอตา-คาร์ราจีแนน จะมีผลต่อความแข็งแรงของเจลแต่จะมีผลต่ออุณหภูมิที่จะเกิดเป็นเจลและความหนืดของเจล เพราะเจลที่เกิดจากไอโอตา-คาร์ราจีแนน จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและมี thixotropic flow ถ้าผสมโคลด์สตีปิ้งกัม 1 ส่วนกับไอโอตา-คาร์ราจีแนน 10 ส่วน จะช่วยให้เกิดเจลที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเจลที่ได้มีสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (pseudoplastic)

ผลการศึกษาการใช้แป้งบุกร่วมกับคาร์ราจีแนนในผลิตภัณฑ์เยลลี่ พบว่าเยลลี่ที่ใช้แป้งบุกผสมคาร์ราจีแนนในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 ปริมาณน้ำตาล ซูโครส ร้อยละ 30 และใช้น้ำฝรั่งทดแทนน้ำที่เดิม จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี และได้รับคะแนนเฉลี่ยทางประสาทสัมผัสสูงสุด (สุธาสินี, 2543)

2) โลคัสต์บินกัม (locusbean gum)

เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ได้จากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดพืชตระกูลถั่ว มีชื่อสามัญว่า Carob (*Ceratonia siliqua* L.) มีโครงสร้างหลักเป็นโพลีแมนแนน (polymannan) ประกอบด้วย น้ำตาล แมนโนส (mannose) ต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 และมีแขนง แยกเป็นน้ำตาลกาแล็กโทส โมเลกุลเดี่ยวต่อกันด้วยพันธะ 1, 6 โครงสร้างโมเลกุลของโลคัสต์บินกัมมีอัตราส่วนของน้ำตาล แมนโนส ต่อน้ำตาลกาแล็กโทสเป็น 4 ต่อ 1 มีน้ำหนักโมเลกุล 310,000 ดาลตัน

โลคัสต์บินกัมมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำเย็นแต่ละลายในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80-85°C จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุด เมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 95°C แล้วทำให้เย็นลงโดยทั่วไป ไม่สามารถเกิดเจลได้เอง ต้องนำมาผสมกับแซนแทนกัมจึงจะเกิดเจลได้ และเมื่อรวมกับแคปไซคาร์ราจีแนนจะเพิ่มความแข็งแรงของเจล ทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไป และลดการเกิด ซินเนอริซิส ขณะที่ความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ข้อดีของการใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับ โลคัสต์บินกัม คือ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ตามความต้องการของผู้บริโภค คือตั้งแต่เจลเปราะ (brittle gel) จนถึงเจลเหนียวยืด (elastic gel) โลคัสต์บินกัม สามารถ ก่อเจลร่วมกับแคปไซคาร์ราจีแนนได้เจลมีลักษณะคล้ายเจลที่เกิดจากเจลาติน คือ มีความ ยืดหยุ่นและค่อนข้างเสถียรในขณะเก็บรักษา (อรุณี, 2547) ซึ่งจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางประสาทสัมผัสของเฮลลีนนิคปราศจากน้ำตาลที่ใช้แซนแทนกัมร่วมกับ โลคัสต์บินกัม พบว่าการใช้แซนแทนกัมร่วมกับโลคัสต์บินกัมในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 นอกจากจะช่วยเพิ่มความ คงตัว และความยืดหยุ่นแล้วยังสามารถลดการเกิดการแยกน้ำ (syneresis) ได้อีกด้วย (Khouryieh *et al.*, 2005) การใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสต์บินกัมถูกศึกษามานานแล้ว ตั้งแต่มีการพบว่า โลคัสต์บินกัมสามารถทำให้สารละลายคาร์ราจีแนนที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ เกินที่จะเกิดเจลได้ สามารถเกิดเป็นเจลได้ (Dea and Morrison, 1975) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Murayama *et al.* (1995) โดยรายงานว่า การเติมโลคัสต์บินกัมสัดส่วนน้อยๆ ลงในคาร์ราจีแนน จะสามารถดัดแปลง พฤติกรรมทางรีโอโลยี และ ได้เจลที่มีความคงตัวและความยืดหยุ่นสูง หน้าที่หลักของ โลคัสต์บินกัม คือ เพิ่มความหนืดและความคงตัวให้กับอิมัลชัน และช่วยยับยั้งการเกิดซินเนอริซิส ผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดที่ใช้โลคัสต์บินกัม ได้แก่ อาหารกระป๋อง ซอส ขนมหวาน ซอสบาร์บีคิว เครื่องดื่ม เนยแข็ง ไอศกรีม และผลิตภัณฑ์เนื้อ ในเนยแข็งโลคัสต์บินกัมจะช่วยเร่ง ให้เกิด coagulation เร็วขึ้น และทำให้ได้เนื้อตะกอนของโปรตีนนมเพิ่มมากขึ้นประมาณร้อยละ 10 ในไอศกรีมโลคัสต์บินกัมจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัวและช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ไอศกรีมมี ลักษณะเนื้อเนียน (Turquois *et al.*, 1992)



รูป 2.9 หน่วยโครงสร้างย่อยในโมเลกุลของโกลีโคสตีป็นกัม

ที่มา: Imeson (1997)

2.3 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือกระบวนการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ จนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ เพื่อให้วัสดุมีรูปทรงที่เหมาะสม และยืดอายุการเก็บรักษา การอบแห้งทั่วไปมักใช้ลมร้อน ซึ่งความร้อนส่วนใหญ่จะถ่ายเทไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยน้ำ (สมชาติ, 2540) โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวด้วย 2 ลักษณะ คือการเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลลารี (capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (surface force) จะเกิดกับวัสดุที่มีเซลล์โปร่ง ความพรุนสูง และมีความต่อเนื่องระหว่างเซลล์ โดยมักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการอบแห้ง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์ จะเกิดกับวัสดุที่มีเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือเกิดกับวัสดุที่ผ่านการอบแห้งไประยะหนึ่ง เซลล์เกิดการหดตัวทำให้แรงคาพิลลารีหมดไป น้ำจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ถ้าวัสดุมีเนื้อโปร่งการเคลื่อนที่ด้วยการไหลแบบคาพิลลารี น้ำจะเคลื่อนที่มาที่ผิวได้เร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้ผิววัสดุเปียกชุ่มไปด้วยน้ำ น้ำระเหยได้อย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ จึงเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ต่อมาเมื่อการไหลแบบคาพิลลารีหมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่จากภายในวัสดุมายังผิวหน้า ซึ่งจะช้ากว่าการพาความร้อนจากผิวไปยังอากาศ จึงทำให้ผิวของวัสดุแห้ง การระเหยน้ำเกิดขึ้นได้ช้าลงมีอัตราการอบแห้งลดลง จึงเรียกการอบแห้งช่วงนี้ว่า การอบแห้งลดลง สำหรับวัสดุที่มีเนื้อแน่น น้ำในวัสดุนั้นจะเคลื่อนที่มาสู่ผิวหน้าได้ช้า ซึ่งจะทำให้มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และเมื่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดหนึ่งๆ ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ที่จุดนี้ความดันไอของน้ำในวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้



เรียกความขึ้นในขณะนั้นว่า ความขึ้นสมดุล และจุดเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ไปยังอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความขึ้นวิกฤต (วิไล, 2546)

2.3.1 การทำแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศ เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือการเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิววัสดุเท่านั้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคงที่คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม (สมชาติ, 2540)

2.3.2 การทำแห้งในช่วงอัตราการการอบแห้งลดลง (falling rate)

ภายหลังจากที่ความชื้นลดลงถึงปริมาณความชื้นวิกฤต กระบวนการอบแห้งจะดำเนินไปในอัตราลดลง เนื่องจากการระเหยเกิดขึ้นด้วยอัตราลดลง หลังจากถึงที่จุดปริมาณความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะลดลงด้วยความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณความชื้นที่ลดลง ในบางผลิตภัณฑ์อาจจะมีช่วงอัตราลดลงมากกว่าหนึ่ง (สมชาติ, 2540) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงพื้นที่ผิวอัมตัวจะลดลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในของแข็งไม่เพียงพอต่อการระเหย อัตราการอบแห้งจึงลดลงขณะที่พื้นที่ผิวไม่อัมตัวเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากของแข็ง นอกจากอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายใน จนกระทั่งเมื่อพื้นที่ผิวทั้งหมดถึงสถานะไม่อัมตัว การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในจะกลายเป็นปัจจัยหลัก กลไกที่ทำให้ความชื้นเคลื่อนที่ภายในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การเคลื่อนที่ของเหลวด้วยแรงคาพิลลารี การแพร่ของของเหลว หรือการแพร่ของไอน้ำ

2.3.3 การถ่ายเทความร้อนและมวล (heat and mass transfer)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น การกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ จะมีการถ่ายเทความร้อน และเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของผลิตภัณฑ์ และผิวบางจุดภายในผลิตภัณฑ์ขณะที่ให้ปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่ง ซึ่งเพียงพอต่อการทำให้น้ำระเหย ไอที่เกิดขึ้นจะถูกส่งออกจากรูภายในผลิตภัณฑ์ ความแตกต่างที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของไอน้ำคือ ความดันไอที่ผิวน้ำเปรียบเทียบกับความดันไอของอากาศที่ผิวผลิตภัณฑ์ การถ่ายเทความร้อนและมวลภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์จะเกิดในระดับโมเลกุลโดยที่การถ่ายเทความร้อนจะถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ และการถ่ายเทมวลเป็นส่วนหนึ่งกับการแพร่กระจายโมเลกุลของไอน้ำในอากาศ ที่ผิวของผลิตภัณฑ์การถ่ายเทความร้อน และมวลจะ

เกิดขึ้นพร้อมกันและควบคุมด้วยกระบวนการพา การขนถ่ายไอน้ำจากผิวผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ และการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับความดันไอน้ำที่มีอยู่ และความแตกต่างของอุณหภูมิ ตามลำดับ ในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ การถ่ายเทความร้อนและมวลภายใน โครงสร้างผลิตภัณฑ์ จะเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลา

การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งตามวิธีการให้ความร้อน สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้ (สมบัติ, 2540)

1) การใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากวัสดุ เป็นวิธีการอบแห้งแบบ อากาศพาความร้อน (convection drying) เครื่องอบแห้งส่วนมากจะใช้วิธีนี้ เนื่องจากมี ประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูงเกินไป

2) การกระจายวัสดุออกเป็นชั้นบางบนพื้นผิวที่ให้ความร้อน เป็นวิธีการอบแห้งแบบการ นำความร้อน (conduction) ไอน้ำจะกระจายตัวสู่บรรยากาศแวดล้อมได้ดี วัสดุจะแห้งในระยะเวลา สั้น แต่การสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจทำให้วัสดุเกิดความเสียหายได้

3) การให้ความร้อนบริเวณรอบๆ ห้องอบแห้ง โดยวัสดุไม่สัมผัสกับแหล่งความร้อนเป็น วิธีการอบแห้งแบบการแผ่รังสี (radiation drying) บางครั้งอาจใช้ระบบดูดไอน้ำออกช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพหรือใช้สุญญากาศลดความดัน เพื่อประหยัดพลังงานความร้อนได้

4) การปรับสภาพความดันและอุณหภูมิ เมื่อให้น้ำในวัสดุเปลี่ยนเป็นของแข็งที่ระดับต่ำ กว่าจุดรวมสามสถานะ (triple point) แล้วให้พลังงานความร้อนหรือลดความดันจนกระทั่งเกิดการ ระเหิด น้ำเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอโดยตรง เรียกว่าการอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) วิธีการนี้จะช่วยรักษาคูณภาพ และการกินตัวของวัสดุได้ดีมาก แต่ค่าใช้จ่ายจะสูงตามไป ด้วย

5) การใช้ความดันออสโมซิสลดปริมาณน้ำภายในวัสดุ (osmotic dehydration) โดยการแช่ วัสดุลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า น้ำจะซึมผ่านผนังเมมเบรน (membrane) ออกมาจน ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางลง จนกระทั่งทั้งสองด้านเท่ากัน

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งอาหาร

ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นมีผลต่ออัตราการอบแห้งพิจารณาจาก (สุคนจีน, 2543)

1) ธรรมชาติของอาหาร และขนาดรูปร่าง

อาหารเนื้อโปร่งมีรูพรุนมากอบแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่นเพราะความชื้นเคลื่อนที่ จากภายในอาหารเนื้อโปร่งผ่านช่องแคบเร็วกว่าในอาหารเนื้อแน่น ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสอาหารกับ

อากาศที่เกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้น้ำหนักก็มีผลต่อการอบแห้ง อาหารชิ้นเล็กมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าอาหารชิ้นใหญ่จึงอบแห้งได้เร็ว ชั้นความหนาของอาหารที่มากทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

2) ปริมาณอาหารต่อถาด และตำแหน่งของอาหารในเครื่องอบแห้ง

ปริมาณอาหารต่อถาดที่มากทำให้อาหารส่วนล่างสัมผัสกับอากาศร้อนได้ไม่ทั่วถึงหรือได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้าโดยเฉพาะบริเวณตรงกลางถาดที่ความร้อนเข้าไปไม่ถึงความชื้นจึงระเหยออกได้ยาก

3) อุณหภูมิ ความเร็ว ความสามารถรับไอน้ำ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อน

การเพิ่มความสามารถรับไอน้ำ มีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และอุณหภูมิสูงทำให้การแพร่กระจายของความชื้นดี จึงมีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ถ้าอุณหภูมิลดลงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น อัตราการระเหยความชื้นลดลง อัตราการอบแห้งลดลงและช้า ถ้าความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะเคลื่อนย้ายความชื้นได้เร็ว แต่ถ้าความเร็วอากาศต่ำ การเคลื่อนย้ายความชื้นเกิดขึ้นช้า ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

2.3.5 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งอาหาร

ระหว่างการอบแห้ง อาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง สี กลิ่น และคุณค่าทางโภชนาการ (Adam *et al.*, 2000)

1) การเกิดเปลือกแข็งที่ผิวหน้าอาหาร (case hardening)

ลักษณะผิวอาหารแข็งเป็นเปลือกหุ้มส่วนที่ยังไม่แห้งไว้เพราะในช่วงแรกของการอบแห้งให้ความชื้นระเหยเร็วและใช้ความเร็วอากาศร้อนสูง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำมาก และอาหารมีชั้นบาง ความชื้นจากภายในอาหารเคลื่อนที่มาไม่เท่ากับความชื้นที่ระเหยออกจากผิวหน้าอาหาร การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงทำให้สารประกอบแป้ง โปรตีน เพกทิน ในผักจับตัวเป็นเปลือกแข็งที่ผิวหน้าอาหาร ความชื้นในผักซึมผ่านออกได้ยากจึงมีความชื้นเหลืออยู่ในผักสูง คุณภาพของอาหารอบแห้งไม่ดี ไม่เป็นที่ยอมรับ อายุการเก็บรักษาสั้นและมีโอกาสที่ราเจริญได้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้อุณหภูมิลดลงหรือใช้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์เพื่อไม่ให้อาหารแห้งก่อนเวลา และอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้งควรมีความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงร้อยละ 60-80 จึงไม่เสี่ยงต่อการเกิดเปลือกแข็ง หากอุณหภูมิเริ่มต้นอบแห้งต่ำเกินไป จุลินทรีย์อาจเจริญได้ก่อนที่อาหารแห้งถึงระดับที่ต้องการ และใช้เวลาอบแห้งนาน ทำให้อัตราการผลิตต่ำ

2) การหดตัว (shrinkage)

ระหว่างการอบแห้งความชื้นในเซลล์อาหารระเหยออกไปทำให้เกิดช่องว่าง และเซลล์เกิดการหดตัวจากผิวนอก การหดตัวของผนังเซลล์ไม่สามารถหดตัวเข้าไปโดยเท่ากันทุกส่วนได้ ส่วนที่ไม่สามารถหดตัวเข้าได้เกิดการยืดตัวออก การยืดตัวของผนังเซลล์สามารถทนต่อแรงได้ขนาดหนึ่งถ้าเกินขนาดทำให้ผนังเซลล์ตรงบริเวณนั้นขาด การหดตัวทำให้พื้นที่ระเหยความชื้นออกจากอาหารลดลง ทำให้อาหารแห้งช้า และสูญเสียความสามารถในการคืนรูป อาหารที่มีน้ำมากจะหดตัวและบิดเบี้ยวมาก

3) การเกิดสีน้ำตาล (browning)

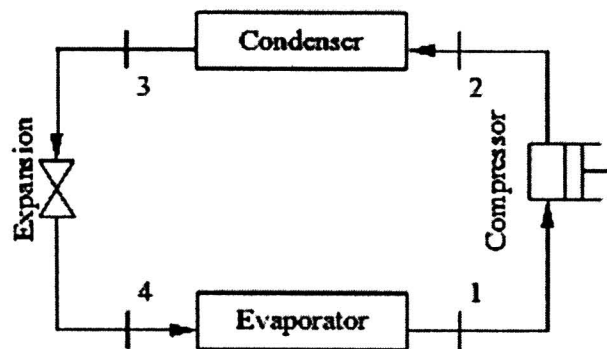
ระหว่างการอบแห้ง ความชื้นภายในเนื้ออาหารเคลื่อนที่ออกมาสู่ผิวหน้าและพาเอาของแข็งที่ละลายได้ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน ออกมาสู่ผิวหน้า เมื่อการอบแห้งดำเนินไปความเข้มข้นของสารดังกล่าวที่ผิวหน้าอาหารเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปฏิกิริยา non-enzymatic browning ให้สารสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้เกิดเร็วที่อุณหภูมิสูง อาหารอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเกิดสีน้ำตาลหรือสีเหลืองเข้ม เมื่อช่วงอัตราการอบแห้งลดลงให้ลดระดับอุณหภูมิเพื่อป้องกันปฏิกิริยานี้

2.4 การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน

2.4.1 หลักการทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

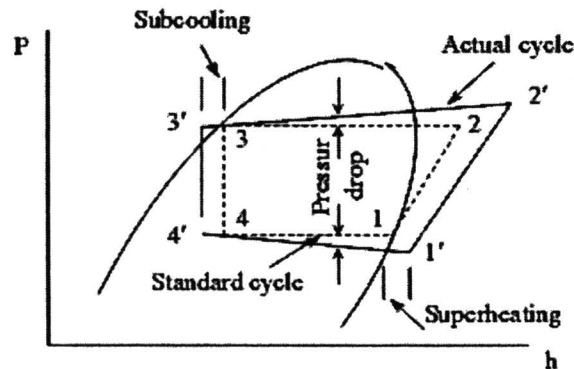
เครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ คือส่วนของห้องอบแห้ง ซึ่งต้องออกแบบให้มีการกระจายลมร้อนที่ดี และระบบปั๊มความร้อน ซึ่งก็คือระบบทำความเย็นนั่นเอง เพียงแต่นำความร้อนมาใช้งานแทนที่จะเป็นความเย็น รูปแบบของเครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 1) เครื่องอบแห้งที่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนการอบแห้ง (dehumidifying dryer) ซึ่งลักษณะเป็นระบบปิด (closed system) หรือเปิดบางส่วน (partially open system) 2) เครื่องอบแห้งที่มีการปรับคืนความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้งซึ่งมีลักษณะเป็นระบบเปิด (open system) โดยอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะผ่านเครื่องทำระเหย ก่อนทิ้งสู่บรรยากาศ (Pendyata *et al.*, 1990) ระบบปั๊มความร้อนโดยทั่วไปเป็นแบบอัดไอ ประกอบด้วยเครื่องอัดไอ (compressor) เครื่องควบแน่น (condenser) เครื่องทำระเหย (evaporator) และวาล์วขยายตัว (expansion valve) ดังแสดงในรูป 2.10 การทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอเป็นแบบวัฏจักรดังแสดงในแผนภูมิความดันและเอนทัลปี (รูป 2.11) วัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนซึ่งแสดงด้วยเส้นประเป็นวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ ประกอบด้วย 4 กระบวนการ คือ (1) กระบวนการอัดไอ (compression process) สารทำความเย็นที่ไหลออกจากเครื่องทำระเหยในสถานะไออิ่มตัวที่ความ

ดันและอุณหภูมิต่ำ (สภาวะที่ 1) ถูกเพิ่มความดันโดยการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิกในคอมเพรสเซอร์ไปสู่สภาวะที่ 2 ซึ่งเป็นไอร้อนยวดยิ่ง สารทำความเย็นที่สภาวะนี้จะถูกทำให้เย็นลงในคอนเดนเซอร์โดย (2) กระบวนการควบแน่น (condensation process) ซึ่งความร้อนจากสารทำความเย็นจะถ่ายเทไปสู่อากาศที่ใช้ระบายความร้อนจากคอนเดนเซอร์ เมื่อสารทำความเย็นผ่านคอนเดนเซอร์จะอยู่ในสภาวะของเหลวอิ่มตัว (สภาวะที่ 3) และถูกลดความดันขณะผ่าน (3) กระบวนการลดความดันในวาล์วขยายตัว (throttling process) ไปสู่สภาวะที่ 4 ซึ่งเป็นของผสมระหว่างสารทำความเย็นและไอของสารทำความเย็น สารทำความเย็นที่สภาวะนี้มีความดันและอุณหภูมิต่ำ และไหลเข้าสู่เครื่องทำระเหยเพื่อรับความร้อนจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็นทำให้เกิด (4) กระบวนการระเหยสารทำความเย็น (evaporation process) ซึ่งจะเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นไปเป็นไออิ่มตัวที่สภาวะที่ 1 วงจรจริงของปั๊มความร้อน ($1'-2'-3'-4'$) จะแตกต่างจากวงจรทางอุดมคติเนื่องจากการสูญเสียความดันในระบบ และข้อจำกัดทางเทคนิคในการทำงานของคอมเพรสเซอร์และวาล์วขยายตัว



รูป 2.10 ส่วนประกอบของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

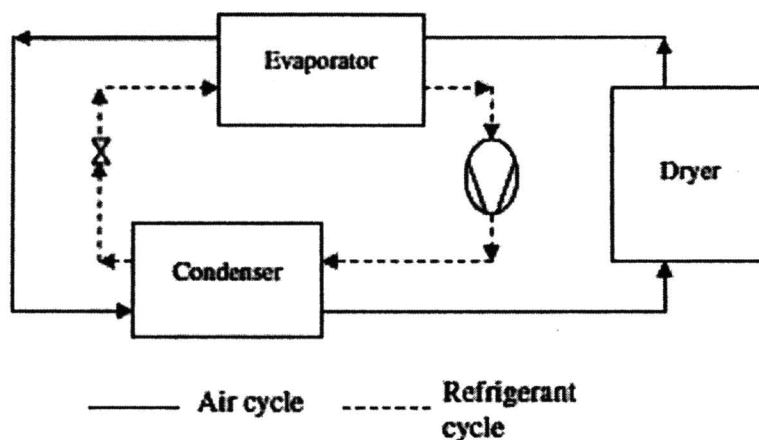
ที่มา: ศรีมา (2546)



รูป 2.11 แผนภูมิความดันและเอนทัลปีของวัฏจักรทำความร้อนแบบอัดไอ
ที่มา: ศรีมา (2546)

2.4.2 ลักษณะของระบบทำความร้อน

ระบบอบแห้งแบบทำความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบทำความร้อน และถังอบแห้ง (drying-chamber) ระบบทำความร้อนสามารถส่งผ่านความร้อนจากแหล่งให้พลังงานความร้อนรอบๆ เช่น อากาศ พื้นดิน น้ำ พลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยจากอุตสาหกรรมต่างๆ (industrial waste) ตัวถัง เช่น แบบถาด (tray) แบบ fluid bed rotary (แบบหมุน) หรือแบบสายพาน องค์ประกอบหลักของระบบทำความร้อนคือ evaporator, condenser, compressor และ expansion valve ซึ่งแสดงในรูป 2.12



รูป 2.12 แผนผังระบบวงจรของเครื่องอบแห้งแบบทำความร้อน
ที่มา: Colak and Hepbasli (2009)

ในระบบทำแห้งแบบปั๊มความร้อน จะมีตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (working fluid หรือ refrigerant) ซึ่งมีความดันต่ำจะเกิดการระเหยใน evaporator โดยความร้อนจากอากาศที่ออกเครื่องอบแห้ง จากนั้น refrigerant ซึ่งมีสถานะเป็นไอจะผ่านไปยัง compressor ทำให้ไอของ refrigerant มีค่า enthalpy สูงขึ้น และเพิ่มความดันทำให้ refrigerant จากนั้นจะผ่านเข้าไปยัง condenser ทำให้ปลดปล่อยความร้อนสูงออกมา ความร้อนจะถูกกำจัดออกจาก refrigerant และกลับเข้าไปในอากาศที่ใช้ในการผลิตที่ผ่าน condenser แล้วผ่านไปยังถังอบแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง และมีการลดความดันของ refrigerant โดยใช้ expansion valve และวนกลับสู่ evaporator อีกครั้ง ส่วนอากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้งจะเคลื่อนที่ผ่าน evaporator ทำให้น้ำควบแน่นออกไป จึงสามารถนำอากาศกลับไปใช้ใหม่ (Colak and Hepbasli, 2009)

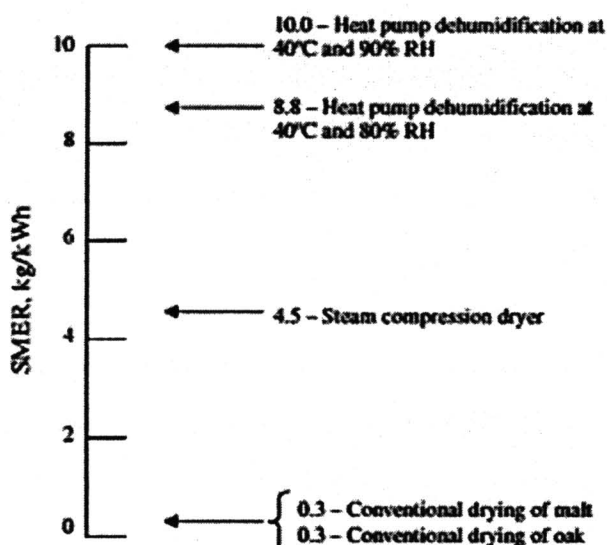
ข้อดีของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลังการอบแห้ง ได้แก่ สมบัติทางกายภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากเนื่องจากอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและปานกลาง สมบัติทางกายภาพ ด้านกลิ่น ยังคงสภาพกลิ่นเดิมได้มาก เนื่องจากอบแห้งระบบปิด และสมบัติทางกายภาพด้านโครงสร้างจะยังคงสภาพใกล้เคียงสภาพเดิมอยู่ เพราะวุ้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ค่อยๆ ถูกดึงออก ส่วนในด้านพลังงาน มีจุดเด่นคือสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากแทนที่อากาศร้อนขึ้นหลังการอบแห้งจะถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศเหมือนเครื่องอบแห้งทั่วไป แต่ปั๊มความร้อนสามารถดึงอากาศร้อนขึ้นกลับเข้าสู่ระบบที่เครื่องทำระเหย ขณะเดียวกันก็ดึงน้ำออกจากอากาศร้อนขึ้น ทำให้ได้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จึงไม่ต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงมากนัก ทำให้รักษากลิ่นรสของอาหาร และสารอาหารที่ไวต่อความร้อนไว้ได้มาก (ศิวะ และสมชาติ, 1998)

ถึงแม้การใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้งเป็นกรรมวิธีที่ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการนำความร้อนหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่อย่างไรก็ตาม ทางด้านต้นทุนของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนยังมีข้อได้เปรียบอยู่ เนื่องจากว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่มีเกรดสูง และมีราคาแพง จากการศึกษา การอบแห้งไม้อย่างพาราและกล้วยโดยใช้เครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน พบว่าอัตราการสกัดความชื้น (moisture extraction rates; MER) และอัตราการการสกัดความชื้นจำเพาะ (specific moisture extraction rates; SMER) ของไม้อย่างพาราและกล้วยลดลงอย่างรวดเร็ว ปริมาณความชื้นสุดท้ายของไม้อย่างพารามีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 ค่า moisture extraction rates มีค่าเท่ากับ 2.854 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีค่า specific moisture extraction rates เท่ากับ 0.572 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง กล้วยมีค่า moisture extraction rates เท่ากับ 2.710 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีค่า Specific moisture

extraction rates เท่ากับ 0.540 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง จากการเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนโดยคิดจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้พบว่า เครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนมีต้นทุนทางด้านไฟฟ้าต่ำกว่าเครื่องอบแห้งชนิดใช้ลมร้อน และเครื่องอบแห้งชนิดใช้ความร้อนโดยตรง (Prasertsan *et al.*, 1998)

2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

รูป 2.13 แสดงการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ (moisture removal efficiency) เพื่อใช้เลือกเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม พบว่าปั๊มความร้อนมีค่าประสิทธิภาพในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ (SMER) ประมาณ 10 เท่าของระบบอบแห้งแบบดั้งเดิม ซึ่งค่านี้ใช้ทำนายสมรรถนะของปั๊มความร้อน (Kudra and Mujumdar, 2002) Meyer and Greyvenstein (1992) ศึกษาความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ของการประยุกต์ใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้ง พบว่าใช้เวลาในการดำเนินการต่ำกว่าการอบแห้งโดยวิธีอื่น Strommen and Jonassen (1996) รายงานว่าการพัฒนานวัตกรรมปั๊มความร้อนแบบ fluidized-bed ที่มีค่า SMERs สูง เหมาะสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อน นอกจากนี้ Strommen *et al.* (2005) รายงานว่า ตัวอย่างค่า SMER ของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาพปกติ กับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน พบว่าอยู่ในช่วง 4.6–1.5 kg/kW.h หรือต่ำกว่า และค่า SMER ของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สุญญากาศอยู่ในช่วง 0.4 kg/kW.h Adapa and Schoenau (2005) ศึกษาการวิเคราะห์ด้านพลังงานของปั๊มความร้อนแบบ continuous bed พบว่า ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานมีค่าเท่ากับร้อยละ 22 และสามารถลดเวลาในการอบแห้งลงร้อยละ 65 เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบธรรมดา (conventional dryers) ที่ใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน และ Fatouh *et al.* (2006) ศึกษาการอบแห้งสมุนไพรโดยใช้ปั๊มความร้อน พบว่า สมุนไพรที่มีขนาดเล็กใช้พลังงานต่ำและเวลาน้อย



รูป 2.13 ประสิทธิภาพของวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ที่มา: Kudra and Mujumdar (2002)

โดยทั่วไปสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร มีผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารเกิดสีน้ำตาล เกิดการหดตัว สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น (Hawladar *et al.*, 2006) ซึ่งผักและผลไม้ส่วนประกอบของน้ำ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป (Sokhansanj and Jayas, 1987) ในระหว่างการอบแห้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของอาหารเนื่องจากการระเหยของน้ำในอาหาร ทำให้เกิดการหดตัวขององค์ประกอบที่เป็นโพลิเมอร์ เพราะไม่สามารถรองรับน้ำหนักได้ ทำให้โครงสร้างแตกหัก (Achanta and Okos, 2000) ข้อดีหลักของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในการอบแห้งอาหาร คือ มีศักยภาพในการผลิตอาหารอบแห้ง (Erera and Rahman, 1997) Van Blarcom and Mason (1998) รายงานว่าถั่วแมคคาเดเมียที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C ไม่พบการเกิดสีน้ำตาล Hawladar *et al.* (2006) พบว่าการใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้งหั่วหอมสามารถลดการใช้พลังงานลงร้อยละ 30 และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบธรรมดา Chua *et al.* (2001) พบว่า การใช้ปั๊มความร้อนสามารถลดเวลาในการอบแห้ง และช่วยปรับปรุงสีของกล้วยแผ่นได้ และ Perera (2001) ศึกษาการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่มีการดัดแปลงบรรยากาศ ในการอบแห้งแอปเปิล พบว่า ผลิตภัณฑ์แอปเปิลมีคุณภาพสูง คือ มีสีที่ดี และคงปริมาณวิตามินไว้ได้สูงเมื่อเทียบกับของสด

Britnell *et al.* (1994) ได้ทำการวิเคราะห์ทางด้านจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งโดยใช้ป้มนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 55°C พบว่า สามารถควบคุมปริมาณเชื้อที่ก่อโรคได้ นอกจากนี้ Namsanguan *et al.* (2004) ได้ทำการอบแห้งโดยใช้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดร่วมกับป้มนความร้อน โดยศึกษาอุณหภูมิต่อการลดลงของเวลาในการอบแห้ง เมื่อพิจารณาลักษณะการอบแห้ง และคุณภาพของกึ่งแห้ง พบว่า การใช้ป้มนความร้อนร่วมเป็นเทคนิคที่มีข้อดีในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ Alves-Filho *et al.* (2007) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อกลไกการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของพริกแดง โดยใช้ป้มนความร้อน พบว่า การใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 20°C ผลิตภัณฑ์สามารถคงสีเหลืองและแดงไว้ได้ รวมทั้งลดเวลาในการอบแห้งลง และลดค่าใช้จ่ายลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง Sunthonvit *et al.* (2007) พบว่า ป้มนความร้อนเป็นระบบที่ดีเยี่ยมในการรักษากลิ่นในลูกพีชอบแห้ง (lactones และ terpenoids) Jangam *et al.* (2008) กล่าวว่า ป้มนความร้อนเหมาะกับการทำแห้งพืชที่มีประโยชน์ทางการแพทย์ นอกจากนี้ Coogan and Wills (2008) พบว่า กลิ่นของหัวไชเท้าขาวเมื่ออบแห้งด้วยป้มนความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน นอกจากนี้ Hawlader *et al.* (2006) ศึกษาการอบแห้ง แอปเปิ้ล ฝรั่ง และ มันฝรั่งโดยใช้ป้มนความร้อนภายใต้สภาพแวดล้อมเฉื่อย โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งศึกษาผลของการอบแห้งต่อสี ลักษณะรูพรุนของผิวหน้า และการคินรูปของ แอปเปิ้ล ฝรั่ง และ มันฝรั่งอบแห้งโดยใช้น้ำมะนาวเป็นตัวช่วยยับยั้งตามธรรมชาติในการป้องกันปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของแอปเปิ้ล เปรียบเทียบการทำแห้งระหว่างการใช้ป้มนความร้อนและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุญญากาศ ผลการทดลองพบว่าการใช้อุณหภูมิประมาณ 45°C และมีความชื้นสัมพัทธ์ ประมาณร้อยละ 10 ให้คุณลักษณะทางกายภาพของ แอปเปิ้ล ฝรั่ง และ มันฝรั่งอบแห้งดีที่สุด เช่น ลดการหดตัว เพิ่มความยืดหยุ่น มีโครงสร้างของรูพรุนจำนวนมาก และสามารถคินรูปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อใช้ป้มนความร้อนร่วมกับการปรับปรุงบรรยากาศโดยใช้ก๊าซเฉื่อย พบว่า สีของแอปเปิ้ล ฝรั่ง และมันฝรั่งอบแห้ง ไม่มีความแตกต่างกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุญญากาศ

2.5 รังสีอัลตราไวโอเลต

รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1.0×10^{-7} ถึง 3.8×10^{-7} เมตร หรือมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 นาโนเมตร คลื่นนี้เกิดจากการที่กระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านตัวนำไฟฟ้า ดวงอาทิตย์เป็นต้นกำเนิดของรังสีอัลตราไวโอเลต ที่สำคัญเมื่อรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์มากระทบกับอะตอมของชั้นบรรยากาศ จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้นจำนวนมาก รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นประโยชน์ในการฆ่าจุลินทรีย์ และใช้ในทาง

การแพทย์ การจัดกลุ่มของรังสีอัลตราไวโอเลตตามความยาวคลื่น แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่ง UV-A (320-380 นาโนเมตร) กลุ่มที่สอง UV-B (280-320 นาโนเมตร) และกลุ่มที่สาม UV-C (200-320 นาโนเมตร) การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตช่วงความยาวคลื่น 250 - 270 นาโนเมตร (UV-C) มีประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรีย และสปอร์ของแบคทีเรีย สำหรับเชื้อ *E. coli* ความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ 265 นาโนเมตร ส่วนกลไกของความเสียหายทางชีววิทยาจากรังสีอัลตราไวโอเลตนั้น ขึ้นอยู่กับการดูดกลืนพลังงาน ซึ่งก่อให้เกิดอนุมูลอิสระสูงชัน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากแสง (photochemical reactions) นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสง และเนื้อเยื่อที่ถูกฉายแสง สำหรับในมนุษย์รังสีอัลตราไวโอเลตในช่วงความยาวคลื่น 290-320 นาโนเมตร เป็นสาเหตุทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง (Jagger, 1967)

2.5.1 ประโยชน์และข้อจำกัดของการฉายรังสี

1. ทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้นานยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งรังสีอัลตราไวโอเลต มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย
2. รังสีทำลายจุลินทรีย์ แมลง ที่เป็นสาเหตุให้เกิดโรคได้ ทำให้อาหารมีคุณภาพดีและลดปัญหาจากการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพของมนุษย์
3. สามารถควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงระยะบรรีบุรณ์ (mayuration) การชราภาพ (senescence) รวมทั้งการงอก (sprouting) ของผักและผลไม้สด
4. ทำให้องค์ประกอบทางเคมีบางอย่างของอาหารเปลี่ยนแปลง และช่วยปรับปรุงคุณภาพอาหารให้ดียิ่งขึ้น
5. ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในอาหาร
6. ช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร
7. ช่วยรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร หรือทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการถนอมอาหารโดยวิธีอื่นๆ

2.5.2 ผลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์

จากกรณีการเกิดโรคที่เกิดจากจุลินทรีย์ที่มีในอาหารมีเพิ่มมากขึ้นในประเทศต่างๆ ทั่วโลก ทำให้มีการศึกษาการฉายรังสีอาหารซึ่งสามารถทำลายเชื้อโรคเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนใหญ่จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุนั้นไม่ทนต่อการฉายรังสีหรืออาจทนได้ไม่เกินกว่า 10 kGy อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ที่ทนต่อการฉายรังสีปริมาณสูงจะลดปริมาณลง ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ อาจจะทนต่อปัจจัยอื่นๆ

ได้น้อยลง เช่น ความร้อน การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดค่า (pH) ความเข้มข้นของเกลือ และยาปฏิชีวนะ เป็นต้น ดังนั้นการถนอมรักษาอาหารโดยการฉายรังสีจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นถ้าใช้วิธีการถนอมอาหารอื่นๆ ร่วมด้วยในการทำลายหรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

Adam และ Moss (1995) รายงานว่าการฉายรังสีมีผลในการทำลายเชื้อแบคทีเรียซึ่งโดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่โครโมโซม (chromosome) ซึ่งมี DNA ที่มีลักษณะโมเลกุลวงแหวน ประกอบด้วยคู่เบส (base pairs) หลายล้านคู่ จากการศึกษาพบว่ารังสีทำให้ DNA เกิดการเปลี่ยนแปลง และไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้จุลินทรีย์ถูกทำลาย อย่างไรก็ตามรังสียังมีผลต่อโมเลกุลอื่นๆ ที่ไม่ทนต่อรังสี (เช่นในเมมเบรน) ซึ่งอาจเป็นผลให้จุลินทรีย์ถูกทำลายได้เช่นกัน ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจากการฉายรังสี ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในตัวจุลินทรีย์ ระยะการเจริญปริมาณของรังสี รวมทั้งความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง การทนต่อรังสีของจุลินทรีย์แตกต่างกันไปตามสปีชีส์ (species) หรือสายพันธุ์ (strain) แบคทีเรียชนิดแกรมลบ รวมทั้งพวกที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย พวกที่อยู่ภายในช่องทางเดินอาหาร และแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค จะทนต่อการฉายรังสีน้อยกว่าแบคทีเรียแกรมบวก การทนต่อการฉายรังสีสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

ในส่วนของสปอร์แบคทีเรียจะทนต่อรังสีมากกว่าเซลล์ปกติ (vegetative cells) ประมาณ 5-15 เท่า และโดยทั่วไปการทนต่อการฉายรังสีของเชื้อราจะใกล้เคียงกับเซลล์แบคทีเรียปกติ ส่วนยีสต์จะทนมากกว่าเชื้อราและแบคทีเรีย และไวรัสจะทนต่อการฉายรังสีมากที่สุดซึ่งรังสีปริมาณที่ใช้ทำลายแบคทีเรียจะไม่สามารถทำลายไวรัสได้ ประสิทธิภาพของรังสีในการทำลายแบคทีเรียชนิดและสปีชีส์ของแบคทีเรีย ปริมาณเริ่มต้นของเซลล์ (หรือสปอร์) สภาพของเชื้อ สภาพแวดล้อมของแบคทีเรีย เช่น ค่า pH อุณหภูมิและองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ปริมาณของออกซิเจน และสภาวะทางกายภาพ (physical state) ของอาหารฉายรังสี

ในส่วนเชื้อรานั้น การฉายรังสีจะช่วยลดปริมาณเชื้อราในอาหาร แต่มีรายงานที่ยังไม่สรุปชัดเจนเกี่ยวกับผลจากการฉายรังสีที่ทำให้เชื้อราบางส่วนถูกทำลายแต่ในเชื้อราที่รอดชีวิตนั้นสามารถผลิตสารพิษขึ้นได้ภายหลัง ซึ่งการฉายรังสีอาจไปกระตุ้นหรือไม่มีผล หรือมีผลในการลดปริมาณสารพิษลง และการทำลายเชื้อจุลินทรีย์คู่แข่งชนิดอื่นจะทำให้เชื้อราสามารถผลิตสารพิษได้ในปริมาณมากกว่าในขณะที่มีเชื้ออื่นปะปนอยู่ในช่วงที่ยังไม่ฉายรังสี การรอดชีวิตของราหลังจากการฉายรังสีอาจทำให้เชื้อราเจริญได้รวดเร็ว กว่าในอาหารที่มีเชื้อราคู่แข่งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย

2.6 การอบแห้งด้วยอินฟราเรด

การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จัดเป็นกระบวนการทำแห้งทางเลือกใหม่วิธีหนึ่งที่เริ่มได้รับความสนใจ และนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น (Ratti and Mujumdar, 1999) อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีไปยังอาหาร แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในตัวอาหารโดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลน้ำจนเกิดความร้อนถึงจุดที่น้ำระเหยกลายเป็นไอ (Meeso *et al.*, 2006) แล้วไอจะถูกกำจัดออกจากระบบ จัดเป็นระบบการให้ความร้อนที่สะดวก สามารถควบคุมได้ง่าย วัตถุได้รับพลังงานโดยตรง ทำให้มีประสิทธิภาพการให้ความร้อนสูง และถ้าเป็นระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแล้วยังสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานจากรังสีอินฟราเรดได้มากกว่าร้อยละ 88 (Infrared Heating Technologies LLC, 2008)

การทำแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นสิ่งจำเป็นในการยืดอายุการเก็บรักษา การนำกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรดไปประยุกต์ใช้ จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการลดเวลาในการทำแห้งให้น้อยลง เพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์ดีภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเครื่องต้นแบบในการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดเวลาทำแห้งให้ได้มากที่สุด จึงได้นำรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ร่วมกับป้อนความร้อน หรือการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับสุญญากาศ โดยคาดว่าจะช่วยลดเวลา และลดการใช้พลังงาน รวมทั้งช่วยในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งให้อยู่ในเกณฑ์ดี (ศรีมาและคณะ, 2547) อุปกรณ์การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ต่ำเช่นเดียวกับอุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อน (อำไพศักดิ์ และ ธนภัทร, 2550)

เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่มักได้รับความเสียหาย หรือสูญเสียคุณภาพเมื่อได้รับความร้อนสูง ในการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกวัสดุที่ต้องการทำแห้งดูดกลืนไว้โดยตรง มีอัตราการทำแห้งสูง ใช้เวลาในการทำแห้งสั้นลง และทำให้ใช้พลังงานในกระบวนการทำแห้งน้อย และมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีวิธีการทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ หรือใช้ความดันต่ำ การทำแห้งวิธีนี้จะทำให้น้ำในอาหารสามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำ การทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารผ่านกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำจึงส่งผลต่อการคงคุณลักษณะที่ดี และคุณค่าโภชนาการไว้ได้มากที่สุด (ศักดิ์มน, 2551) ดังนั้นจึงสามารถนำข้อเด่นของการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และการทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศมารวมเข้ากันเพื่อพัฒนาเป็นเครื่องมือที่ใช้ทำแห้งอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.6.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด (ศรีมา, 2546)

รังสีอินฟราเรด หมายถึงรังสีที่ไ้แดง หรือรังสีอยู่ใต้แถบสีแดง เป็นรังสีที่มองไม่เห็น (invisible radiation) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก คือมีช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นไมโครเวฟ และมีช่วงความยาวคลื่นยาวกว่าคลื่นแสง โดยมีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.75 ไมโครเมตร (หรือ 0.000075 เซนติเมตร) ถึง 1000 ไมโครเมตร(หรือ 0.1 เซนติเมตร) โดยที่ช่วงคลื่นสั้นอยู่ใต้คลื่นแสงสีแดง และช่วงคลื่นยาวมีส่วนความยาวคลื่นช่วงสุดท้ายที่ทับซ้อนกับคลื่นไมโครเวฟ (Simon, 1966) ในทางปฏิบัติมีการแบ่งช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมของรังสีอินฟราเรดให้อยู่ในช่วง 0.8 ไมโครเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ความยาวคลื่นในช่วงนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ระดับ ตามความยาวคลื่น คือ

- 1) รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near infrared, NIR)
- 2) รังสีอินฟราเรดกลาง (Middle infrared, mid-IR)
- 3) รังสีอินฟราเรดไกล (Far infrared, FIR)

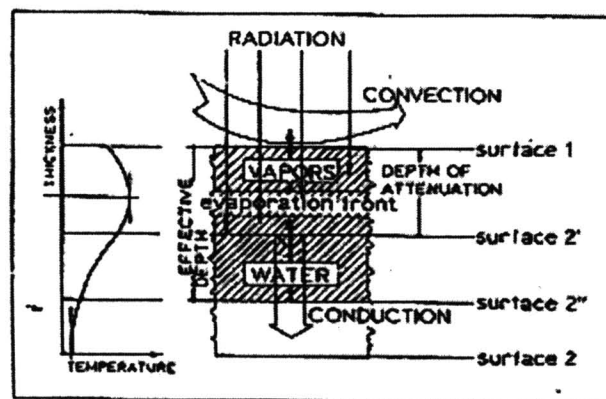
โดยรังสีอินฟราเรดใกล้จะมีความยาวคลื่นสั้น อินฟราเรดกลางมีความยาวคลื่นปานกลาง และอินฟราเรดไกลมีความยาวช่วงคลื่นมากที่สุด ความยาวช่วงคลื่นในแต่ละระดับมีการกำหนดแตกต่างกันไป Sandhu (1986) ได้กำหนดช่วง 0.75 ไมโครเมตร mid-IR อยู่ในช่วง 3-25 ไมโครเมตร และ FIR อยู่ในช่วง 25-100 ไมโครเมตร กำหนดความยาวคลื่นของ NIR, mid-IR และ FIR อยู่ในช่วง 0.78-1.4 ไมโครเมตร, 1.4-3 ไมโครเมตร และ 3-1000 ไมโครเมตร ตามลำดับ รังสีอินฟราเรดแต่ละช่วงความยาวคลื่น จะเหมาะสมกับวัสดุแต่ละประเภทที่จะใช้ดูดซับพลังงานแตกต่างกันไป (Bartley, 1999)

2.6.2 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด (ศรีมา, 2546)

เมื่อรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบและแพร่กระจาย (propagate) ผ่านวัสดุ ทำให้เกิดการสูญหายของรังสี (extinction of radiation) เนื่องจากรังสีบางส่วนจะถูกวัสดุดูดกลืน (absorption) และเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ บางส่วนเกิดการกระเจิง (scattering) ทำให้รังสีมีทิศทางแตกต่างจากทิศทางของรังสีจากแหล่งกำเนิด และส่วนที่เหลือจะเกิดการส่งผ่านวัสดุ (transmission)

Sandhu (1986) รายงานว่ากลไกการเปลี่ยนแปลงรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ โดยจำลองการแผ่รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิห้องเพื่ออบแห้งแผ่นของแข็งชื้น (moist solid plate) ดังแสดงในรูป 2.14 รังสีอินฟราเรดแบบโพลิโครเมติกจะแผ่ออกมาตก

กระทบบนพื้นผิวของแผ่นของของแข็งด้านหนึ่ง ขณะที่พื้นผิวด้านตรงข้ามจะสมมติว่าเป็นฉนวนแบบแอดิแบติก (adiabatic) มีกระบวนการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ และเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว (transient process) รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจะถูกแผ่นของแข็งชั้นดูดกลืน ทำให้ร้อนกำลังลงตามความลึก ซึ่งความลึกดังกล่าวนี้นี้เรียกว่า ความลึกของการร้อนกำลังลง (depth of attenuation) มีลักษณะเป็นชั้นตื้นๆ (superficial layer) และเป็นบริเวณที่เกิดความร้อนเกือบจะคงที่ ซึ่งโปรไฟล์อุณหภูมิ จะมีค่าสูงที่สุดในช่วงความลึกของการร้อนกำลังลงนี้ ขณะเดียวกันจะเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นของแข็งชั้น โดยพื้นผิว 1 จะสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศโดยการพาความร้อนซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนพื้นผิวที่ 2' จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในแผ่นของแข็งชั้นโดยการนำความร้อน



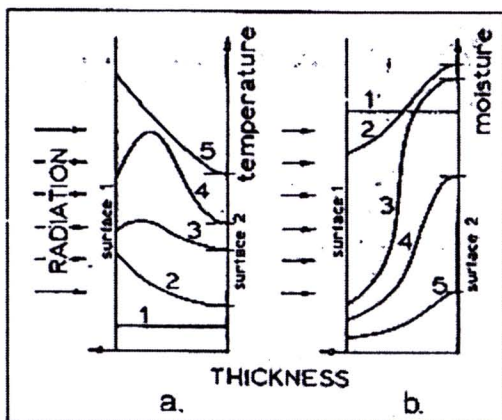
รูป 2.14 การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของแผ่นของแข็งชั้น

ที่มา: Sandhu (1986)

พิจารณารูป 2.15 ในสภาวะเริ่มต้น (หมายเลข 1) จะพิจารณาว่าแผ่นของแข็งมีปริมาณความชื้นสม่ำเสมอ น้ำจะเกิดการระเหยในช่วงความลึกของการร้อนกำลังลง (หมายเลข 2 และ 3) การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นภายในแผ่นของแข็งและด้านหน้าของบริเวณการระเหย น้ำในสถานะของเหลว และไอน้ำ เคลื่อนที่สู่ด้านหน้าของการระเหยเนื่องจากแรงผลักดัน (driving force) ต่างๆ เช่น การแพร่โมเลกุล (molecular diffusion) การแพร่ความร้อน (thermal diffusion) การแพร่คาพิลลารี (capillary diffusion) ที่กระทำพร้อมกัน ส่วนการเพิ่มของความชื้นที่ผิวที่ 2 (หมายเลข 2 และ 3) ซึ่งจะสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นของแข็ง (หมายเลข 1) จะเกิดขึ้นระหว่างช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากการแพร่ของน้ำในสถานะของเหลวเข้าสู่ภายในแผ่นของแข็ง ทำให้



ความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 เพิ่มขึ้นมากกว่าความชื้นเริ่มต้น จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิภาพ (effective depth) แพร่ออกมายังพื้นผิวที่ 1 ได้ช้า ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (พื้นผิวที่ 2") ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จะเรียกว่า ข้อจำกัดของการถ่ายเทมวลเนื่องจากกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรด ดังนั้นวัสดุที่อยู่ในทิศทางของการแผ่รังสีตกกระทบนั้นจะต้องไม่มีความหนามากกว่าความลึก ประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นชั้นที่ลึกที่สุดภายในวัสดุที่มีการเคลื่อนที่ของน้ำออกไปได้ดีที่สุด ส่วนน้ำที่อยู่ลึกประสิทธิภาพจะเคลื่อนที่ออกมาเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ถ้าวัสดุมีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิภาพ จะต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้ามาช่วย เช่น วิธีการแผ่รังสีเป็นช่วงๆ (intermittent irradiation method) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นความหนาที่ลึกกว่าความลึกประสิทธิภาพแพร่ออกมายังความลึกประสิทธิภาพและส่งผลให้สามารถอบแห้งได้เร็วขึ้น หรืออาจจะใช้วิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดมากกว่า 1 ทิศทางเป็นต้น (Sandhu, 1986)



รูป 2.15 โปรไฟล์อุณหภูมิ (a) และโปรไฟล์ความชื้น (b) ระหว่างการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของแผ่นของแข็งชั้นในรูป 2.13
เมื่อ 1 คือเงื่อนไขเริ่มต้น และ 2-5 คือสถานะไม่สม่ำเสมอ

ที่มา: Sandhu (1986)

2.6.3 การลดความชื้นโดยใช้รังสีอินฟราเรด

หลักการระเหยน้ำของระบบอินฟราเรด คือ รังสีจะผ่านทะลุเนื้ออาหาร ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วและทั่วถึงมากกว่ารังสีไมโครเวฟ ดังนั้นน้ำจึงถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำได้ด้วยอัตราเร็วสูงทำให้ใช้เวลาในการระเหยน้ำจากอาหารน้อย แต่ไอน้ำส่วนนี้จะต้องระบายออกจากตู้ระเหยน้ำอย่างรวดเร็วเช่นกันแสดงว่าต้องมีระบบระบายน้ำออกจากตู้ควบคู่กับการให้ความร้อนโดยพลังงานอินฟราเรด เพื่อให้การระเหยน้ำออกจากอาหารอย่างมีประสิทธิภาพสูง ระบบการระเหยน้ำออกนี้อาจกระทำโดยใช้ลมร้อน (Sandu, 1986) การทำให้วัสดุที่นำมาทำแห้งมีความชื้นลดลง โดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมนั้นวัสดุจะต้องมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำ และมีการดูดซับสูง นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ได้แก่ อุณหภูมิของผิวหน้าวัสดุให้ และ/หรือ วัสดุรับความร้อน คุณสมบัติของผิวหน้าวัสดุให้ และ/หรือ วัสดุรับความร้อน รูปร่างของวัสดุที่แผ่รับ และส่งรังสี

การลดความชื้นของวัสดุที่มีชั้นหนาและความชื้นสูง เช่น อาหาร มีความจำเป็นต้องมีค่าการส่งผ่านของรังสีสูงเพื่อที่ผิวหน้าจะไม่ถูกทำลายโดยรังสี สำหรับวัสดุชื้น (moist materials) นอกจากคุณสมบัติการดูดซับ และส่งผ่านพลังงานของวัสดุแล้วต้องศึกษาคุณสมบัติ ในแง่ของความยาวคลื่น และความหนาแน่นของวัสดุที่รับพลังงานซึ่งจะเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำในวัสดุด้วย แต่โดยทั่วไปวัสดุชื้นส่วนมากจะมีค่าการดูดซับพลังงานต่ำ แต่มีค่าการส่งผ่านพลังงานสูง โดยความสัมพันธ์ของการดูดซับคลื่นอินฟราเรดของน้ำในวัสดุ มักจะมีค่าการส่งผ่านพลังงานสูง ที่ความยาวคลื่นสั้น (ประพัฒน์, 2545; สุพรรณ, 2546) ปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ได้แก่ ระดับความเข้มข้นของการแผ่รังสี ปริมาณน้ำของวัสดุก่อนการทำแห้ง ระดับความลึก หรือความหนาของวัสดุที่นำมาทำแห้ง ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับวัสดุที่ทำแห้ง รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน รังสีความร้อนที่แผ่ไปตกกระทบกับวัสดุนั้นทำให้เกิดผล ได้แก่ การดูดซับพลังงานความร้อน (absorptivity) การส่งผ่าน (transmissivity) และการสะท้อนกลับ (reflectivity) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ (จักรมาศ, 2551)

2.6.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

การระเหยน้ำด้วยระบบอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ น้ำในอาหารสามารถระเหยออกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ดังนั้นจึงสามารถอบแห้งอาหารได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถรักษาคูณค่าทางโภชนาการ กลิ่น รสชาติ และสีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ดี ลักษณะของเครื่องมือจะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ ตู้ระเหยน้ำ (vacuum chamber) ปัมสุญญากาศ (vacuum pump) เครื่องกำเนิดรังสีอินฟราเรด (infrared power supply) และถาดใส่ตัวอย่าง (tray) ซึ่ง

ปัมจะทำให้ตู้ระเหยน้ำ มีความดันต่ำลงประมาณ 10 มิลลิปรอท และพลังงานอินฟราเรดจะทำให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงขึ้นไม่เกิน $55-65^{\circ}\text{C}$ (Afzal, 1999)

ผลการศึกษาการอบแห้งมันเทศขนาด $10 \times 10 \times 10$ มิลลิเมตรด้วยวิธีแช่เยือกแข็งร่วมกับการใช้รังสีอินฟราเรด (Far-Infrared Freeze-drying) พบว่า วิธีนี้สามารถลดเวลาในการระเหยน้ำร้อยละ 58 เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) ปกติ และร้อยละ 48 เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Lin *et al.*, 2005) จะเห็นว่าวิธีการระเหยน้ำหรืออบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดควบคู่กับวิธีใช้ลมร้อนเพื่อช่วยพ่นน้ำออกจากอาหารต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 40°C ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ เพราะองค์ประกอบทางเคมีของอาหารถูกทำลายด้วยความร้อน แต่งานวิจัยนี้จะใช้วิธีให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดควบคู่กับการดูดไอน้ำออกจากอาหารด้วยระบบสุญญากาศ ดังนั้นจึงสามารถระบายไอน้ำออกจากระบบได้เร็วและนอกจากนั้นน้ำในอาหารจะกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำ (40°C) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สูญเสียคุณภาพทางโภชนาการรวมทั้งกลิ่น รส สี ของอาหาร แต่จุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลายไป จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บได้นานโดยไม่เสื่อมคุณภาพ นอกจากนั้นอาหารผงที่ได้จะมีลักษณะคล้ายอาหารผงที่แปรรูปด้วยวิธีทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze dry) และที่สำคัญรังสีนี้ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ (Fu, 1998) ข้อดีของระบบนี้คือไม่ทำให้ผิวของอาหารไหม้และอุณหภูมิภายนอกเครื่องไม่สูงขึ้น การระเหยน้ำออกด้วยระบบอินฟราเรดในสถานะสุญญากาศ (infrared vacuum drying) เป็นวิธีที่สามารถรักษาสภาพของผลิตภัณฑ์เดิมไว้เมื่อทำการคืนรูป ทั้งกลิ่น สี รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับของสดมากที่สุดเพราะใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ 40°C (Afzal, 1999) เป็นเครื่องแปรรูปอาหารที่มีราคาไม่สูงเกินกว่าที่ผู้ประกอบการขนาดกลางหรือขนาดย่อมจะลงทุนได้ เพราะเป็นเครื่องที่สร้างในประเทศและเป็นลิขสิทธิ์ของคนไทย

ฉัตรชัย และคณะ (2549) ศึกษาการอบแห้งแครอทโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สถานะสุญญากาศ ทำการควบคุมอุณหภูมิอบแห้งแครอทด้วยอุณหภูมิผิวแครอท 3 ระดับ ได้แก่ $60, 70$ หรือ 80°C ที่ความดันภายในห้องอบแห้ง 7 หรือ 10 กิโลปาสกาล (kPa) ทำการอบแห้งจนแครอทมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 7 (โดยน้ำหนัก) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอท และลดความดันภายในห้องอบแห้งนั้น ทำให้สามารถลดระยะเวลาที่ใช้อบแห้งได้ ส่วนผลิตภัณฑ์แครอทที่ผ่านการอบแห้งด้วยสถานะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนั้น มีคุณลักษณะด้านสีไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ถ้าใช้เวลาอบแห้งนาน แครอทจะมีการหดตัวเพิ่มขึ้น และมีความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนสูง นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งแครอทด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สถานะสุญญากาศใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยังยวดยภายใต้สถานะความดันต่ำ และพบข้อจำกัดของการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งชิ้นแครอทที่มีความหนาค่อนข้างมาก ทำให้

รังสีอินฟราเรดไม่สามารถทะลุทะลวงเนื้อแคโรทได้มากนัก และจากการใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งผลไม้ และสมุนไพร พบว่า รังสีอินฟราเรดไกลจะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นก่อนอบแห้งสูงได้มากที่สุด โดยมะละกอเส้นซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 2,300 (โดยน้ำหนักแห้ง) สามารถอบแห้งด้วยระยะเวลาที่ลดลงได้ถึง ร้อยละ 30 ในระหว่างการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนในห้องอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนผิวของหลอดอินฟราเรดได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการยังสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานได้ มากกว่าการใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว และทำให้ผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งมีความชื้นกระจายอย่างสม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีและกลิ่นอยู่ในเกณฑ์ดี อีกทั้งการใช้เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลมีระยะเวลาคืบหน้าเร็วกว่าเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนประมาณ 2 เดือน (ศรีมา และคณะ, 2547)

ในการใช้รังสีอินฟราเรดไกลอบแห้งเห็ดขาวที่ความหนา 1-3, 3-5 และ 5-7 มิลลิเมตร พบว่า ที่ความหนาของผลิตภัณฑ์ 1-3 มิลลิเมตร สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุด เนื่องจากรังสีอินฟราเรด สามารถทะลุทะลวงเข้าไปได้ถึงใจกลางเนื้อผลิตภัณฑ์ที่บางได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่หนา Fu และ Lien (1998) ได้ศึกษาการอบแห้งกุ้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน พบว่า ที่อุณหภูมิผิวแห้งอินฟราเรด 357°C อุณหภูมิอากาศร้อน 43°C และระยะห่างแห้งอินฟราเรดกับวัสดุ 12.5 เซนติเมตร จุดที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อย คุณภาพกุ้งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี สำหรับการอบแห้งข้าวบาร์เลย์ของ Afzal และคณะ (1999) ที่ระดับความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรด 0.167, 0.333 และ 0.5 วัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นรังสีอินฟราเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้ง แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานและส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวบาร์เลย์ลดลง จุดที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองคือที่ความเข้มข้นของรังสี 0.333 วัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร