บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 แมคคาดาเมีย

2.1.1 ประวัติแมคคาดาเมีย

นักพฤกษศาสตร์ชาวเยอรมัน Friedrich Wilhelm Ludwig Leichhardt ค้นพบแมคคาดาเมียครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1843 บริเวณอ่าวมอร์ตัน ประเทศออสเตรเลีย ต่อมาในปี ค.ศ. 1857 Baron Sir Ferdinand Jacob Heinrich von Mueller ชาวเยอรมัน ร่วมกับ Walter Hill ชาวสก็อตแลนด์ ผู้อำนวยการสวนพฤกษศาสตร์ของเมืองบริสเบน ได้สำรวจพบแมคคาดาเมียบริเวณแม่น้ำไพน์ อ่าวมอร์ตัน รัฐควีนส์แลนด์ Sir Mueller จึงได้ขอจดทะเบียนแมคคาดาเมียที่พบนี้เป็นพืชสกุลใหม่ชื่อ "Macadamia" เพื่อเป็นเกียรติแก่เพื่อนสนิทซึ่งเป็นอาจารย์สอนวิชาเคมีมหาวิทยาลัยเมลเบิร์น คือ John Macadam ในปี ค.ศ.1881 William Herbert Purvis ชาวสก็อตแลนด์ ได้นำแมคคาดาเมียชนิดผลผิวเรียบ จากประเทศออสเตรเลีย ไปทดลองปลูกที่ฮาวายซึ่งเป็นแมคคาดาเมียชุดแรก และ ต่อมาในปี ค.ศ.1892 Edward Walter และ Robert Alfred Jordan ได้นำแมคคาดาเมียชุดที่สองจากประเทศออสเตรเลีย ไปทดลองปลูกที่ฮาวาย และมีการขยายพันธุ์ปลูกทั้ง 9 หมู่เกาะฮาวาย โดยที่เกาะ Kauai Oahu Maui และ Hawaii มีการปลูกมาก และเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ (กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550)

ในประเทศไทย องค์การยูซ่อม (USOM: United States Operations Mission) ประเทศสหรัฐอเมริกา เคยส่งเมล็ดพันธุ์แมคคาดาเมีย ให้กรมวิชาการและส่งเสริมการเกษตรจำนวนหนึ่ง และได้ทำการทดลองปลูกแมคคาดาเมียครั้งแรกในปี พ.ศ.2496 ที่แม่มาลัยฟาร์ม สถานีวิจัยทางการเกษตรฝาง และดอยมูเซอ จังหวัดตาก (Ito, 1987) แต่ไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร ต่อมาในปี พ.ศ.2511 ม.ร.ว.จักรทอง ทองใหญ่ และนายประสิทธิ์ พุ่มชูศรี เจ้าของไร่ชาระมิงค์อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ได้ติดต่อขอพันธุ์แมคคาดาเมีย จากมหาวิทยาลัยฮาวาย ให้กรมวิชาการและส่งเสริมการเกษตรของไทย ได้กิ่งพันธุ์แมคคาดาเมีย 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ 246 333 และ 508 โดยมีนายฟูกะนากะ ผู้เชี่ยวชาญแมคคาดาเมียเป็นผู้นำกิ่งพันธุ์ ส่งให้กับ นายดำเกิง ชาลีจันทร์ เพื่อไปศึกษาการขยายพันธุ์แบบเสียบกิ่งกับต้นตอแมคคาดาเมียที่ ไร่ชาระมิงค์ ผลการปลูกไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควร จนกระทั่งปี พ.ศ.2515 นายไพโรจน์ ผลประสิทธิ์ กองค้นคว้าและทดลอง กรมวิชาการและส่งเสริมการเกษตรได้ติดต่อขอพันธุ์แมคคาดาเมียที่เสียบกิ่งแล้ว จากมหาวิทยาลัยฮาวาย พันธุ์ 246 333 508 และ 660 แล้วทดลองปลูกที่สถานีทดลองพืช

สวนฝาง และเริ่มเก็บผลผลิตได้ในปี พ.ศ.2520 แต่ยังไม่ได้รับการสนใจมาก และในปี พ.ศ.2527 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงเล็งเห็นถึงศักยภาพของแมคคาดาเมียที่สามารถพัฒนาเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยในอนาคต จึงใช้งบประมาณของสำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ในการสั่งพันธุ์แมคคาดาเมียมาปลูกเพิ่ม ซึ่งแมคคาดาเมียนี้ได้นำไปปลูกที่ศูนย์อำนวยการเกษตรที่สูงแม่เหียะ จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ศูนย์วิจัยพืชสวน สถานีทดลองพืชสูง สถานีทดลองเกษตรที่สูง สถานีทดลองยาง รวมทั้งศูนย์ศึกษาการพัฒนา ตามพระราชดำริ ในภูมิภาคต่างๆ รวม 15 แห่ง ทั่วประเทศ (กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550) พันธุ์แมคคาดาเมียที่ผ่านการวิจัยและรับรองว่าเหมาะสมสำหรับปลูกในประเทศไทย โดยสถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร ได้แก่ พันธุ์เชียงใหม่ 400 (HAES 660) พันธุ์เชียงใหม่ 700 (HAES 741) และพันธุ์เชียงใหม่ 1000 (HAES 508) (ฐานความรู้ด้านพืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550)

2.1.2 ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์

แมคคาดาเมียจัดเป็นพืชเคี้ยวมัน (nut) มีชื่อสามัญว่า Macadamia เป็นพืชในวงศ์ Proteaceae มีชื่อสามัญทางวิทยาศาสตร์ว่า *Macadamia tetraphylla* มี 18 สายพันธุ์ทั่วโลก (Brown, 1984) แต่พบว่ามีเพียง 3 สายพันธุ์ เท่านั้นที่รับประทานได้ คือ *Macadamia integrifolia* *Macadamia tetraphylla* และ *Macadamia prealta* (Kermond and Baumgardt, 1996) ในทางการค้า *Macadamia integrifolia* และ *Macadamia tetraphylla* เป็นสายพันธุ์ที่มีการบริโภคมากที่สุด *Macadamia integrifolia* มีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐควีนสแลนด์ ประเทศออสเตรเลีย และ *Macadamia tetraphylla* มีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ ของรัฐควีนสแลนด์ และตะวันออกเฉียงเหนือของรัฐนิวเซาท์เวลส์ *M. integrifolia* มีลักษณะผลกะลาผิวเรียบเป็นพันธุ์หลักในการผลิตแมคคาดาเมียเพื่อเป็นการค้า เนื่องจากให้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง ให้ปริมาณน้ำมันสูงถึง 80% และมีน้ำตาลต่ำเพียง 4% ซึ่งถ้าหากมีน้ำตาลสูง 6-8% เมื่อนำไปคั่วจะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทำให้แมคคาดาเมียมีสีเข้มขึ้นซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในการผลิต (Hamilton, Yee and Ito,1980) *M. tetraphylla* ซึ่งมีผลผิวขรุขระ ปลูกง่ายกว่าและสามารถปรับตัวได้ดีในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำหรือช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิกว้างแต่คุณภาพของเนื้อถั่วต่ำกว่า *M.integrifolia* (บัณฑิต จันทร์งาม และคณะ, 2535-2536)

แมคคาดาเมียเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ ทรงพุ่มแผ่กว้างสูงประมาณ 18 เมตรกว้างประมาณ 15 เมตร (Trochoulias *et al*., 1984) ลักษณะคล้ายปีระมิดดังแสดงในรูปที่ 2.1 ลำต้น

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สูงตั้งตรง ไม่ผลัดใบ เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 30 เซนติเมตร เปลือกของลำต้นมีลักษณะหยาบ สีน้ำตาลเข้ม ใบมีลักษณะเหมือนหอกหัวกลับ ใบขณะยังอ่อนมีสีชมพูแต่เมื่อแก่มีสีเขียวเข้ม ขอบใบมีหนามเล็กน้อย ขนาดใบยาว 10-30 เซนติเมตร กว้าง 2-4 เซนติเมตร ออกดอกเป็นช่อยาวๆ ติดผลเป็นช่อ สีดอกจะมีตั้งแต่สีขาวจนถึงสีชมพู ผลลักษณะเป็นทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.2 มีเปลือกหุ้มผล (Husk) แข็งและหนาสีเขียวถึงเขียวเข้ม ห่อหุ้มเมล็ด ภายในประกอบด้วยกะลาแข็ง (Shell) สีน้ำตาลห่อหุ้มเนื้อใน (Kernel) สีขาวนวลดังแสดงในรูปที่ 2.3 (บัณฑิต จันทร์งาม และคณะ, 2535-2536; ทวิเม, 2546) แมคคาดาเมียต้องการอากาศค่อนข้างเย็น อุณหภูมิที่เจริญเติบโตได้ดี คือ 10-30 องศาเซลเซียส (Trochoulias *et al.*, 1984) ปริมาณความชื้นฝนไม่ต่ำกว่า 1000 มิลลิเมตรต่อปี และกระจายดีตลอดปี (Storey, 1969) สภาพดินที่ปลูกต้องมีการระบายน้ำดี ความเป็นกรดเป็นด่าง 5.5-6.0 (Ito, 1987)

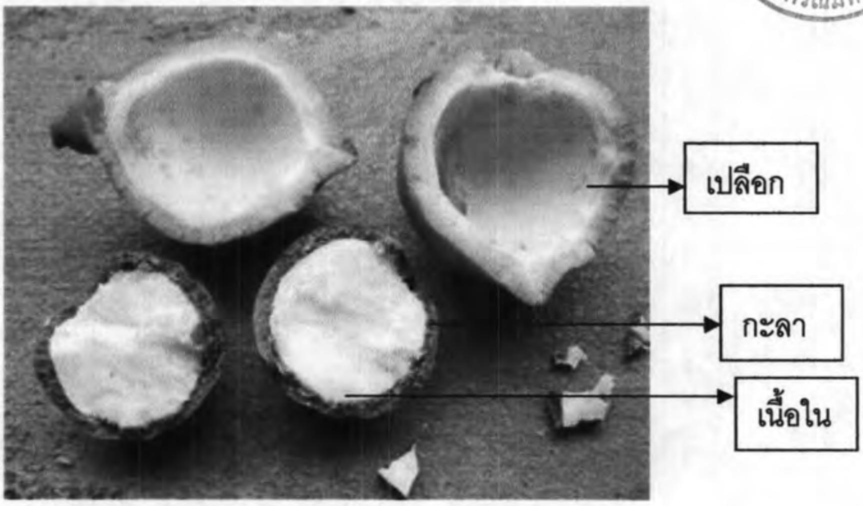
รูปที่ 2.1 ลักษณะต้นแมคคาดาเมีย

ที่มา: Clare Valley of South Australia (2007)

รูปที่ 2.2 ลักษณะผลแมคคาดาเมีย

ที่มา: Rostrevor macadamia farm (2006)

สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



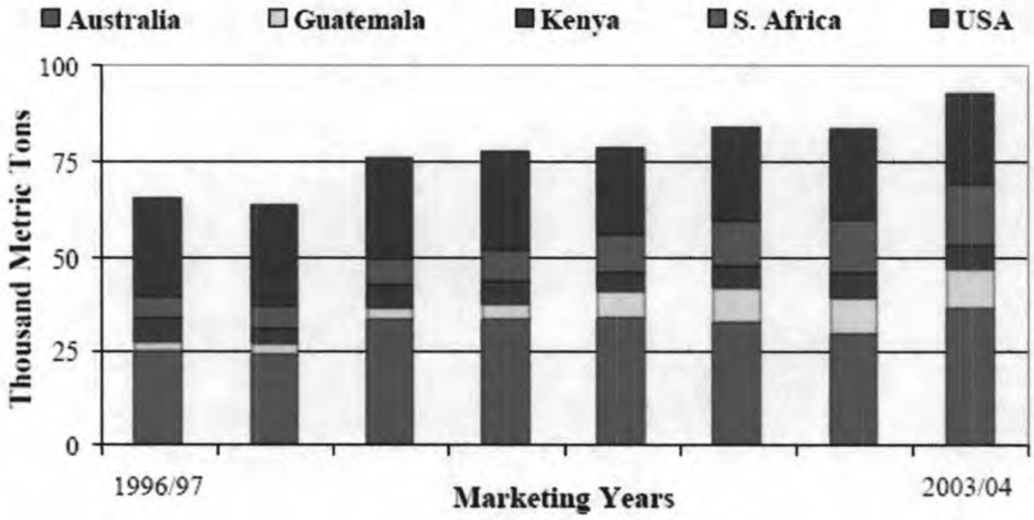
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบผลแมคคาดาเมีย

ที่มา: World Prout Assembly (2006)

โดยสภาพพื้นที่ในประเทศไทยที่เหมาะสมในการปลูกแมคคาดาเมีย คือ ระหว่างเส้นรุ้งที่ 16-19 องศาเหนือ และระดับความสูง 700-1,300 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 14.6°C และอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 28.4 $^{\circ}$C ในสภาพนี้แมคคาดาเมียจะออกดอกได้ โดยช่วงออกดอกมี 2 ช่วง คือ มกราคม – กุมภาพันธ์ และ กรกฎาคม – สิงหาคม (ดำเกิง ชาลีจันทร์, 2534)

2.1.3 ความต้องการของตลาด

ความต้องการในการบริโภคแมคคาดาเมียทั่วโลก มีมากถึง 71,000 ตันต่อปี โดยมีปริมาณการผลิตอยู่ที่ 60,000 ตันต่อปี ซึ่งมีออสเตรเลียเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ โดยมีกำลังการผลิต 40,000 ตันต่อปี (Arunmas, 2004) จากข้อมูลของ World Horticultural Trade & U.S. Exports Opportunities ประเทศที่มีการผลิตแมคคาดาเมียส่งตลาดโลก ได้แก่ กัวเตมาลา เคนย่า แอฟริกาใต้ อเมริกา และออสเตรเลีย ซึ่งออสเตรเลียส่งออกมากที่สุด การผลิตแมคคดาเมียมีแนวโน้มสูงขึ้นตั้งแต่ปี 1996-2004 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ปริมาณการบริโภคแมคคาดาเมียในประเทศไทยประมาณ 100 ตันต่อปี ปัจจุบันประเทศไทยส่งออกแมคคาดาเมีย ให้กับประเทศจีน และฮ่องกง แต่ยังมีการนำเข้าแมคคาดาเมียจากประเทศออสเตรเลีย (Arunmas, 2004) แมคคาดาเมียเป็นพืชที่มีแนวโน้มทางการตลาดดี เนื่องจากสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด นอกจากผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว ยังสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น สบู่ และโลชั่นบำรุงผิว นอกจากนี้กะลาของแมคคาดาเมียยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานความร้อนสูงได้อีกด้วย



รูปที่ 2.4 ปริมาณการผลิตแมคคาดาเมียในปี 2003/04

ที่มา : USDA (2003/2004) Agricultural Attache Report; USDA National Agricultural Statistical Service. Marketing Years: Australia, Kenya, South Africa: Mar-Feb; Guatemala, Jan-Dec; United States, July-June. Production in marketing year (MY)

2.1.4 คุณค่าทางโภชนาการ

แม้ว่าแมคคาดาเมียจะมีปริมาณไขมันอยู่สูงถึง 76% แต่ไขมันที่พบส่วนใหญ่คือ กรดโอเลอิก ซึ่งเป็นไขมันประเภทไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว โดยไขมันประเภทนี้ช่วยลดระดับปริมาณคอเลสเตอรอล และไตรกลีเซอไรด์ ในกระแสเลือดทำให้ไม่เกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด (Grag *et al.*, 2003) ศึกษาชายที่มีปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือดสูง จำนวน 17 คน โดยให้รับประทานแมคคาดาเมียปริมาณ 40-90 กรัม/วัน พบว่า ในกระแสเลือดของผู้ถูกศึกษามีระดับคอเลสเตอรอลทั้งหมด และ คอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอล (LDL-Cholesterol) ลดลง 3.0 และ 5.3% ตามลำดับ และระดับคอเลสเตอรอลชนิดเอชดีแอล (HDL-Cholesterol) เพิ่มขึ้น 7.9% จึงอาจช่วยป้องกันไม่ให้เกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Salmolin และ Grosvenor (2000) ศึกษากลุ่มประชากรในแถบทะเลเมดิเตอเรเนียน ซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมบริโภคอาหารที่มีไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวสูง โดยการบริโภคน้ำมันมะกอกเป็นประจำ พบว่ามีอัตราการตายด้วยโรคหัวใจเพียงครึ่งหนึ่งของประชากรในอเมริกา การบริโภคไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวในปริมาณเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 40 ของพลังงานทั้งหมด จะช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอล และไม่มีผลต่อปริมาณคอเลสเตอรอลชนิดเอชดีแอล นอกจากนี้ยังทำให้คอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอล ถูกออกซิไดส์น้อยลงอีกด้วย

นอกจากแมคคาดาเมียมีไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวที่ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในกระแสเลือดแล้ว ยังเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง แมคคาดาเมีย 100 กรัม จะให้พลังงาน 718 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 75.77 กรัม ประกอบด้วยไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว 58.88 กรัม ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน 1.50 กรัม และไขมันอิ่มตัว 12.06 กรัม โปรตีน 7.91 กรัม คาร์โบไฮเดรต 13.82 กรัม และไม่มีคอเลสเตอรอล ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อในแมคคาดาเมียดิบสายพันธุ์ *Macadamia integrifolia, Macadamia tetraphylla*

Nutrient	Value per 100 g
Proximates	
Water	1.36 ± 0.07 g
Energy	718.00 ± 0.00 kcal
Energy	3004.00 ± 0.00 KJ

Nutrient	Value per 100 g
Proximates	
Protein	7.91 ± 0.35 g
Total lipid (fat)	75.77 ± 1.15 g
Ash	1.14 ± 0.03 g
Carbohydrate, by difference	13.82 ± 0.00 g
Fiber, total dietary	8.60 ± 0.91 g
Sugars, total	4.57 ± 0.18 g
Sucrose	4.43 ± 0.18 g
Glucose (dextrose)	0.07 ± 0.00 g
Fructose	0.07± 0.00 g
Lactose	0.00 ± 0.00 g
Maltose	0.00 ± 0.00 g
Starch	1.05 ± 0.02 g
Minerals	
Calcium, Ca	85.00 ± 11.27 mg
Iron, Fe	3.69 ± 0.72 mg
Magnesium, Mg	130.00 ± 50.74 mg
Phosphorus, P	188.00 ± 11.57 mg
Potassium, K	368.00 ± 10.07 mg
Sodium, Na	5.00 ± 1.07 mg
Zinc, Zn	1.30 ± 0.09 mg
Copper, Cu	0.76 ± 0.23 mg
Manganese, Mn	4.13 ± 4.216 mg
Selenium, Se	3.60 ± 0.00 mcg
Vitamins	
Vitamin C, total ascorbic acid	1.20 ± 0.26 mg
Thiamin	1.20 ± 0.26 mg
Riboflavin	0.16 ± 0.32 mg

Nutrient	Value per 100 g
Vitamin	
Niacin	2.47 ± 0.34 mg
Pantothenic acid	0.76 ± 0.08 mg
Vitamin B-6	0.28 ± 0.03 mg
Folate, total	11.00 ± 1.43 mcg
Folic acid	0.00 ± 0.00 mcg
Folate , food	11.00 ± 1.43 mcg
Folate, DFE	11.00 ± 0.00 mcg_DFE
Vitamin B-12	0.00 ± 0.00 mcg
Vitamin A, IU	0.00 ± 0.00 IU
Vitamin A, RAE	0.00 ± 0.00 mcg_RAE
Retinol	0.00 ±0.00 mcg
Vitamin E (alpha-tocopherol)	0.54 ± 0.09 mg
Tocopherol, beta	0.00 ± 0.00 mg
Tocopherol, gamma	0.00 ± 0.00 mg
Lipids	
Fatty acids, total saturated	12.06 ± 0.00 g
4:0	0.00 ± 0.00 g
6:0	0.00 ± 0.00 g
8:0	0.00 ± 0.00 g
10:0	0.00 ± 0.00 g
12:0	0.08 ± 0.01 g
13:0	0.00 ± 0.00 g
14:0	0.66 ± 0.10 g
15:0	0.00 ± 0.00 g
16:0	6.04 ± 0.04 g
17:0	0.12 ± 0.06 g
18:0	2.33 ± 0.24 g

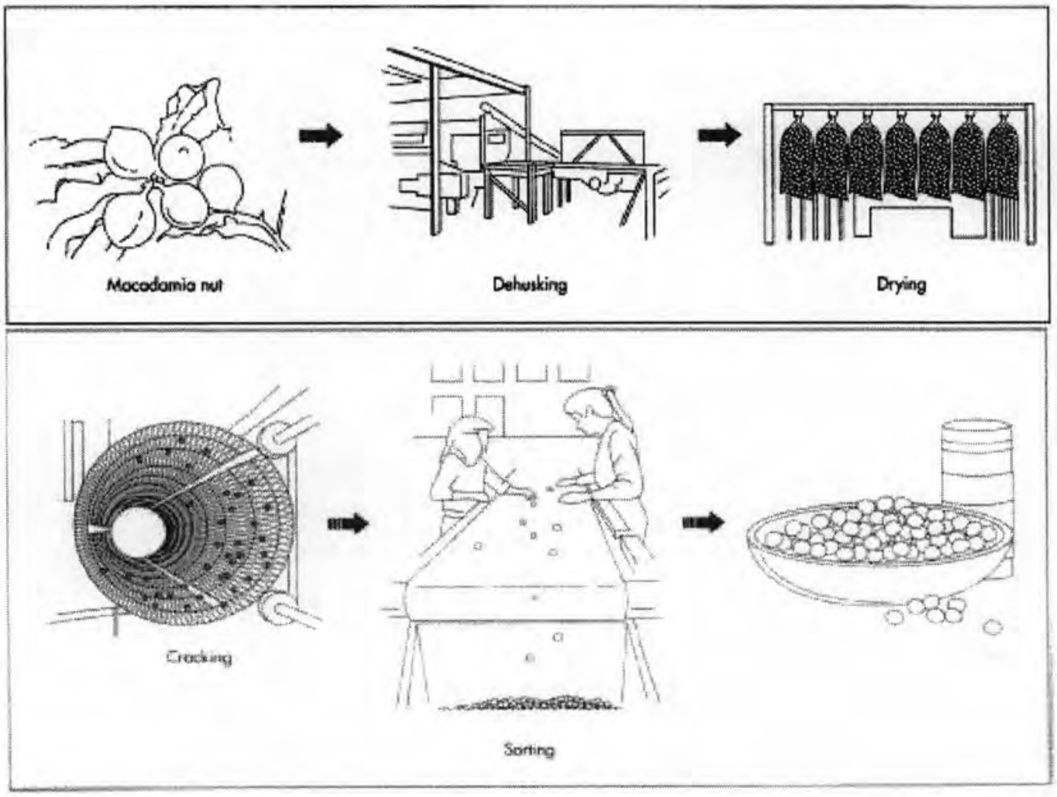
Nutrient	Value per 100 g
Lipids	
20:0	1.94 ±0.09 g
22:0	0.62 ± 0.00
24:0	0.28 ± 0.01 g
Fatty acids, total monounsaturated	58.88 ± 0.00 g
14:1	0.00 ± 0.00 g
16:1 undifferentiated	12.98 ±0.68 g
18.1 undifferentiated	43.76 ±1.25 g
Fatty acids, total monounsaturated	
20:1	1.89 ± 0.05 g
22:1 undifferentiated	0.23 ± 0.02 g
24:1 C	0.02 ± 0.01 g
Fatty acids, total polyunsaturated	1.50 ± 0.00 g
18:2 undifferentiated	1.30 ± 0.09 g
18:3 undifferentiated	0.21 ± 0.02 g
18:4	0.00 ± 0.00 g
20:2 n-6 c,c	0.00 ± 0.00 g
20:3 undifferentiated	0.00 ± 0.00 g
20:4 undifferentiated	0.00 ± 0.00 g
20:5 n-3	0.00 ± 0.00 g
22:5 n-3	0.00 ± 0.00 g
22:6 n-3	0.00 ± 0.00 g
Cholesterol	0.00 ± 0.00 mg
Phytosterols	116 ± 0.00 mg
Stigmasterol	0.00 ± 0.00 mg
Campestreol	8.00 ± 0.00 mg
Beta-sitosterol	108.00 ± 0.00 mg

Nutrient	Value per 100 g
Amino acids	
Tryptophan	0.07 ± 0.00 g
Threonine	0.37 ± 0.00 g
Isoleucine	0.31 ± 0.00 g
Leucine	0.60 ± 0.00 g
Lysine	0.02 ± 0.00 g
Methionine	0.02 ± 0.00 g
Cystine	0.01 ± 0.00 g
Phenylalanine	0.67 ± 0.00 g
Tyrosine	0.51 ± 0.00 g
Valine	0.36 ± 0.00 g
Arginine	1.40 ± 0.00 g
Histidine	0.20 ± 0.00 g
Alanine	0.39 ± 0.00 g
Aspartic acid	1.10 ± 0.00 g
Glutamic acid	2.27 ± 0.00 g
Glycine	0.45 ± 0.00 g
Proline	0.47 ± 0.00 g
Serine	0.42 ± 0.00 g
Other	
Alcohol, ethyl	0.00 ± 0.00 g
Caffeine	0.00 ± 0.00 mg
Theobromine	0.00 ± 0.00mg

ที่มา : USDA, 2007

2.2 กระบวนการผลิตแมคคาดาเมีย

การผลิตแมคคาดาเมียประกอบด้วยหลายขั้นตอน เมื่อแมคคาดาเมียหล่นจากต้น จะเก็บด้วยมือหรือเครื่องจักร แล้วนำเปลือกนอกสีเขียวออก (Dehusking) ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) เพื่อให้ความชื้นอยู่ที่ระดับ 1.5-2% d.b. ทำการกะเทาะกะลาแมคคาดาเมียด้วยเครื่องจักร (Cracking) แล้วนำไปคัดแยกขนาดเมล็ดด้วยมือหรือเครื่องจักร (Sorting) ได้เนื้อในแมคคาดาเมีย ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการคั่วต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตแมคคาดาเมีย

ที่มา: Advameg Inc. (2007)

2.2.1 การเก็บเกี่ยว

เมื่อผลแมคคาดาเมียสุกเต็มที่จะหล่นจากต้นลงสู่พื้นจึงเริ่มกระบวนการเก็บอาจใช้เครื่องจักรหรือคนเก็บด้วยมือ (กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550)

2.2.2 การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว

การเก็บเกี่ยวเมล็ดที่มีความชื้นสูงมีความจำเป็นมากในการลดความชื้นเพื่อลดการเสื่อมเสีย เมื่อเก็บผลแมคคาดาเมียแล้วขั้นตอนถัดไปคือการนำเอาเปลือกนอกสีเขียวออก (Dehusking) โดยขั้นตอนนี้ควรทำภายใน 24 ชั่วโมง เพราะเปลือกสามารถเก็บความชื้นได้ถึง 45% และ เมล็ดสามารถเก็บความชื้นได้ 25% (Chu, King and Sherman, 1953; Kowitz, Mason and Yong, 1998) หากเว้นช่วงเวลาในการเก็บแมคคาดาเมีย ที่หล่นอยู่บนพื้นนาน โดยไม่รีบเอาเปลือกออกและนำไปอบแห้งทันทีจะทำให้เมล็ดงอก เกิดเชื้อราหรือกลิ่นหืนได้ (Moltzau and Ripperton, 1939)

2.2.3 กระบวนการอบแห้ง

หลังจากนำเปลือกนอกสีเขียวออกแล้ว นำเมล็ดที่อยู่ในกะลา (Nut in Shell) ซึ่งอาจมีความชื้นสูงถึง 25% wet basis (w.b.) มาลดความชื้น ให้เหลือประมาณ 1.5-2% w.b. ซึ่งเป็นความชื้นที่ปลอดภัยในการเก็บรักษา (Weinert, 1993) การอบแห้งแมคคาดาเมียสามารถกระทำได้หลายวิธี (รายละเอียดในหัวข้อ 2.3 การอบแห้ง) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากไม่ทำการอบแห้ง กลิ่นและรสชาติแมคคาดาเมียเสียไป เมล็ดเกิดการเสื่อมเสียโดยกะลาจะแข็งขึ้นทำให้เนื้อในหดตัว (Weinert, 1993) นอกจากนี้การอบแห้งทำให้เนื้อในไม่ติดกับกะลา ทำให้ง่ายต่อการกะเทาะเปลือก การอบแห้งแมคคาดาเมียหากใช้อุณหภูมิสูงเกินไป อาจทำให้เกิดการอบแห้งที่มากเกินไป เกิดกลิ่นหืน และเกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ด (Kowitz, 2004)

การอบแห้งแมคคาดาเมียความชื้นสูงมากกว่า 6-8% w.b. ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 60 องศาเซลเซียส จะเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซิ่งตรงกลางเมล็ด (Cavaletto, 1981b) อาจเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเอนไซมาติกอินเวอร์ชัน (Enzymatic Inversion) เอนไซม์อินเวอร์เทสทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 40-45 องศาเซลเซียส (นันทนา ปัทมพงษ์, 2514) โดยน้ำตาลนอน-รีดิวซิ่ง (Non-reducing sugar) เปลี่ยนรูปเป็นน้ำตาลรีดิวซิ่ง (Reducing sugar) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ส่งผลให้แมคคาดาเมียเกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ด และผิวของเมล็ด

2.2.4 การกะเทาะกะลา (Cracking) และการคัดแยกเมล็ด (Sorting)

แมคคาดาเมียที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการกะเทาะกะลา ในอุตสาหกรรมมีเครื่องมือเฉพาะสำหรับการกะเทาะกะลาดังแสดงในรูปที่ 2.6 หลังจากกะเทาะ

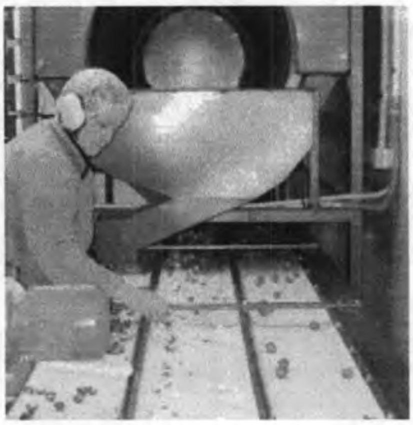
เนื้อในถูกนำมาคัดแยกขนาด นิยมทำโดยใช้เครื่องเขย่าอาจใช้ลมเป่าเพิ่มได้ ซึ่งลักษณะเมล็ดที่ได้มี เต็มเมล็ด ครึ่งเมล็ด เมล็ดแตกหักหรือเศษเป็นชิ้นเล็กๆ (Leverington, 1971) สำหรับเมล็ดที่ขึ้นราหรือเกิดการเสียหายจากแมลงจะทำการคัดแยกด้วยมือดังแสดงในรูปที่ 2.7 (Anon, 1982) ก่อนเข้าสู่กระบวนการถัดไป

เนื้อในแมคคาดาเมียแบ่งได้ 7 ลักษณะ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะแมคคาดาเมียที่ใช้ในทางการค้า

Style	Style Name	ลักษณะ	ความกว้างเมล็ด
0	Super Premium Wholes	ขนาดไม่น้อยกว่า 98% ของเมล็ดเต็ม	ตั้งแต่ 21 มิลลิเมตร ขึ้นไป
1	Premium Wholes	ขนาด 95% ของเมล็ดเต็ม	19-21 มิลลิเมตร
2	Premium Wholes and Halves	ผสมกัน 50/50 ของเมล็ดเต็มและชิ้นใหญ่	15-19 มิลลิเมตร
3	Premium Mix	อย่างน้อย 15% ของน้ำหนักประกอบด้วยเมล็ดเต็ม และเกือบทั้งหมดของน้ำหนักเป็นครึ่งเมล็ดและชิ้นใหญ่	ความกว้างเฉลี่ย 15 มิลลิเมตร ขึ้นไป
4	Halves	อย่างน้อย 80% ของน้ำหนักประกอบด้วยครึ่งเมล็ดและชิ้นใหญ่	12-14 มิลลิเมตร
5	Premium Large Chips	ชิ้นใหญ่	9-12 มิลลิเมตร
6	Premium Chips	ชิ้นเล็ก	6-9 มิลลิเมตร
7	Premium Small Chips	ชิ้นเล็ก	5-6 มิลลิเมตร
8	Premium Fine Grains	ชิ้นเล็ก	3-5 มิลลิเมตร

ที่มา: International Macadamias Ltd. (2007)



รูปที่ 2.6 เครื่องกะเทาะกะลาแมคคาดาเมีย

ที่มา: Ennovation Ltd. New Zealand (2006)

รูปที่ 2.7 การคัดแยกขนาดเมล็ดด้วยมือ

ที่มา: Nambucca macnuts pty Ltd. (2007)

2.2.5 การอบหรือการคั่ว

แมคคาดาเมียก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการคั่วควรมีความชื้นประมาณ 1.5% w.b. หรือน้อยกว่าเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี (Moltzau and Ripperton, 1939) เมล็ดที่มีความชื้นสูงระหว่างการคั่วจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสนุ่ม ไม่กรอบ และเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว (Cavaletto, 1980) หากต้องการได้ผลิตภัณฑ์หลังการคั่วความชื้นประมาณ 1% w.b. จะนิยมนำมาทอดกับน้ำมันมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส 12-15 นาที หรืออบที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส 40-50 นาที (Gold Crown Macadamia Association, 2004)

2.2.6 การบรรจุ

ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีปริมาณความชื้นต่ำมาก จะสามารถดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบได้ง่าย และเมื่อผลิตภัณฑ์มีความชื้นเกินระดับหนึ่งแล้วผลิตภัณฑ์จะไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (มานะ จึงตระกูล, 2531) แมคคาดาเมียอบแห้งมีความชื้น 1.5-2.0% หากแมคคาดาเมียดูดซับความชื้นจากอากาศ ความชื้น และค่า a_w จะเพิ่มขึ้นทำให้สูญเสียความกรอบ และค่า a_w ที่เพิ่มขึ้นหากอยู่ในช่วง 0.55-0.85 จะทำให้แมคคาดาเมียเกิดกลิ่นหืนได้ง่ายเนื่องจากเป็นช่วงอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงสุด Cavaletto และ Yamamoto (1968) เสนอแนะให้ใช้กระป๋องโลหะและขวดแก้วปิดผนึกแบบสุญญากาศเป็นบรรจุภัณฑ์ในการเก็บรักษาแมคคาดาเมีย บรรจุภัณฑ์สำหรับแมคคาดาเมียแบบขายส่ง ควรอัดด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วจึงปิดผนึกแบบสุญญากาศใน Laminated Foil Package เพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นหืนและช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น (Cavaletto,1981b; Trochoullias *et al.*, 1986 และ Australian Macadamia Society, 2004) เนื่องจากแมคคาดาเมียมีปริมาณไขมันไม่อิ่มตัวสูงจึงต้องการความชื้นและออกซิเจนในปริมาณน้อย (น้อยกว่า 2% ของอากาศทั้งหมด) (Australian Macadamia Society, 1994) แมคคาดาเมียที่บรรจุใน Laminated Foil Package จะไม่เกิดกลิ่นเหม็นหืนใน 5 เดือนแรกของการเก็บ แต่รสชาติจะเปลี่ยนไปเมื่อผ่านการเก็บเป็นเวลา 9 เดือน (Weinert, 1993) บรรจุภัณฑ์แมคคาดาเมียแบบขายปลีกมีหลายชนิด ได้แก่ Laminated Foil Pounches กระป๋องโลหะ แก้ว ชาม และ PET (Australian Macadamia Society, 2004)

2.3 คุณภาพและปัญหาที่มักพบในแมคคาดาเมียหลังการเก็บเกี่ยว

2.3.1 ความชื้น

Moltzau และ Ripperton (1939) กล่าวว่า ผลิตภัณฑ์แมคคาดาเมียหลังการอบแห้งที่ดีควรมีความชื้นน้อยกว่า 1.5% w.b. Dela และคณะ (1966) พบว่า ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อความคงตัวของแมคคาดาเมีย โดยที่ความชื้น 1.1% w.b. แมคคาดาเมียจะมีความคงตัวสูงสุด Hill และคณะ (1951) และ Rizvi และ Benado (1984) พบว่า Integral Entropy สามารถบอกถึงคุณภาพและปริมาณของความเป็นระเบียบของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ โดย Minimum Integral Entropy Zone คือ บริเวณที่โมเลกุลน้ำสามารถจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้ดีที่สุด และเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้แมคคาดาเมียเกิดการเสื่อมเสียน้อยที่สุด (Beristain and Azuara, 1990; Beristian, Azuara and Vernon-Carter, 2002) ดังนั้น แมคคาดาเมียที่มีค่า Minimum Integral Entropy อยู่ในช่วง Minimum Integral Zone คือมีค่า a_w 0.36-0.44 หรือมีปริมาณความชื้น 1.2-

1.6 % d.b. จะมีความคงตัวสูงสุด (Dominguez *et al.*, 2007) Cavaletto และ Yamamoto (1968) พบว่า ควรอบแมคคาดาเมียจนมีความชื้น 1.2% w.b. เมล็ดที่มีความชื้นสูงระหว่างการคั่ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีเนื้อสัมผัสนุ่มและเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว (Cavaletto, 1980) ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Non enzymatic Browning) เป็นปฏิกิริยาหนึ่งจากหลายปฏิกิริยาที่ทำให้แมคคาดาเมียเกิดการเสื่อมเสียในด้านสี ซึ่งอัตราเร็วปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นอยู่กับความชื้น โดย ค่า a_w ในช่วง 0-0.3 จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำและจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า a_w ในช่วง 0-3-0.8 และจะลดลงอีกครั้งเมื่อค่า a_w ในช่วง 0.8-1.0 (DeMan, 1990) กล่าวคือที่ความชื้นต่ำจะสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาต่างๆได้ การเก็บรักษาแมคคาดาเมียที่มีความชื้นต่ำ ที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถยืดอายุผลิตภัณฑ์ได้ (Weinert, 1993)

2.3.2 ค่าความถ่วงจำเพาะ Specific Gravity (SG)

คือ อัตราส่วนความหนาแน่นของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของ ของไหลมาตรฐาน สำหรับของเหลวใช้น้ำเป็นของไหลมาตรฐาน ทำการทดสอบโดยการแช่น้ำ กล่าวคือ แมคคาดาเมียที่ลอยน้ำจะมีค่า SG$\leq$1 แสดงว่ามีไขมันมากกว่า72% ซึ่งจัดเป็นแมคคาดาเมียชั้นหนึ่ง (Cavaletto, 1981a) แมคคาดาเมียที่จมน้ำจะมีค่า SG>1 จะมีไขมันน้อยกว่า 72% ค่า SG แปรผกผันกับปริมาณไขมันในแมคคาดาเมีย ค่า SG มีความสัมพันธ์กับคุณภาพแมคคาดาเมียหลังการคั่วโดย Mason และ Wills (1983) รายงานการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อถั่วแมคคาดาเมียหลังการคั่วลดลง เมื่อแมคคาดาเมียมีค่า SG>1

2.3.3 ปริมาณน้ำตาลซูโครส

สีน้ำตาลที่เข้มขึ้นอาจเกิดจากความแตกต่างทางสายพันธุ์เนื่องจากความแตกต่างโดยธรรมชาติ (Rosenthal, Merin and Kadman, 1986) หรือ เกิดจากอุณหภูมิในการอบแห้ง กล่าวคือ การอบแห้งแมคคาดาเมียที่มีความชื้นสูงมากกว่า 6-8% w.b. ด้วยอุณหภูมิสูง 62 และ 71 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่งสูง 0.115% และ 0.117% ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้สูงกว่าอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 38 และ 52 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่งสูง 0.029% และ 0.037% (Prichavudhi and Yamamoto, 1965) Lievonen, Laaksonen และ Roos (2002) รายงานว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดขึ้นอยู่กับค่า a_w โดยค่า a_w 0.6-0.8 จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดสูงสุด และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะลดต่ำลง เมื่อค่า a_w มากกว่าหรือน้อยกว่าช่วงดังกล่าว ปริมาณน้ำตาลซูโครสจะมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดสีน้ำตาลเพราะ

น้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยอินเวอร์เทส ได้น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Wall and Gentry, 2006)

Albertson และคณะ (2005) ศึกษาผลของการสังเคราะห์น้ำตาล Hexose โดยการทำงานของ Cell Wall Invertase ต่อลักษณะเนื้อในแมคคาดาเมียหลังการคั่ว พบว่า Optimum pH ของอินเวอร์เทสในเนื้อในแมคคาดาเมีย อยู่ในช่วง 3.75-5.0 โดยสีแมคคาดาเมียที่เข้มขึ้นหลังการคั่วเกี่ยวข้องกับการเสียหายของเนื้อเยื่อเซลล์ และปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการทำงานของ cell wall invertase ดังสมการที่ 1

$$\text{Sucrose} + H_2O \xrightarrow{\text{Invertase}} \text{D-Glucose} + \text{D-Fructose} \quad (1)$$

จากปฏิกิริยาดังกล่าว ทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซิ่ง (กลูโคสและฟรุกโทส) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction)

นันทนา ปัทมพงษ์ (2514) รายงานว่า optimum temperature ของอินเวอร์เทสในต้นข้าวเจ้าพันธุ์ ก.ข.1 (*Oryza sativa* var. R.D.I.) อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าข้าวโอ๊ต (*Avana sativa*) ซึ่งมีค่า optimum temperature ที่ 30 องศาเซลเซียส Slack (1965) ศึกษาผลของการทำงานของอินเวอร์เทสต่อการเจริญยืดตัวของปล้องอ้อย พบว่า อินเวอร์เทสจะเสียคุณสมบัติในการสลายซูโครส ให้ได้กลูโคสและฟรุกโทส ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

Wall และ Gentry (2006) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลรีดิวซิ่งต่อการเกิดสีน้ำตาลของแมคคาดาเมีย ระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยอบแห้งแมคคาดาเมียที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน พบว่า ระหว่างการอบแห้งปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง มีค่าลดลง และเนื้อในแมคคาดาเมียบริเวณตรงกลางมีสีเข้มขึ้น การเพิ่มกระบวนการอบแห้งมากขึ้นทำให้น้ำตาลซูโครสเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้ปริมาณน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลฟรุกโทสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งน้ำตาลทั้งสองชนิดนี้ เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ทำให้ค่าสี L* ภายในเนื้อในแมคคาดาเมียหลังการคั่วเพิ่มขึ้น และพบว่า หลังการคั่วแมคคาดาเมียที่มีสีน้ำตาลภายนอกและภายใน จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่งสูง (0.24-0.27g/100g db) สูงกว่าแมคคาดาเมียที่มีสีขาวครีม (0.03g/100g db) เมล็ดที่เจริญไม่เต็มวัย จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่งสูงและมีสีน้ำตาลมากกว่าเมล็ดที่เจริญเต็มวัย

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในอาหาร เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่สลับซับซ้อนเพราะไม่ได้เป็นปฏิกิริยาปฐมภูมิ (Primary Reaction) แต่เป็นปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary Reaction) ที่หลายๆปฏิกิริยาเกิดขึ้นร่วมกันและให้สารสีน้ำตาล

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic browning)

เมื่อเซลล์เนื้อเยื่อพืชถูกทำลายทางกล เช่น การปอกเปลือก การหั่น การแช่เยือกแข็ง เอนไซม์ภายในเซลล์พืชมีโอกาสสัมผัสและย่อยสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) เกิดสารประกอบเมลานิน (Melanin) ซึ่งเป็นสารสีน้ำตาล เอนไซม์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ได้แก่ ฟีนอลเลส (Phenolase) โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase) เป็นต้น

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Non enzymatic browning)

เมื่ออาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนเป็นองค์ประกอบได้รับความร้อนจะมีการสูญเสียน้ำ (Dehydration) มีการสลายตัว (Degradation) และมีการรวมตัวกัน (Condensation) ของหมู่อะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิ่ง พัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลแดง และทำให้อาหารมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2549)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ แบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. ปฏิกิริยาคาราเมไลเซชั่น (Caramelization)

เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรตเมื่อได้รับความร้อนสูงจะสลายโมเลกุลคาร์โบไฮเดรต และเกิดพอลีเมอไรเซชัน (Polymerization) ของสารประกอบคาร์บอนได้สารเฟอร์ฟิวราล (Furfural) มีสีน้ำตาล

2. ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลจากโมเลกุลของน้ำตาลรีดิวซิ่งกับหมู่เอมีนที่อยู่ในโมเลกุลของโปรตีน เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอนุพันธุ์ฟูแรนวงแหวน เช่น HMF (5-Hydroxymethyl-2-furaldehyde) มีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาล และน้ำตาลแดง อัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้น ภาวะที่น้ำตาลมีความเข้มข้นสูง และอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากเกิด Autocatalytic อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็น 2-3 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ถ้าในอาหารมีน้ำตาลฟรุกโทสจะทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 5-10 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส และเพิ่มเร็วขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลมากขึ้น ความเข้มของสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2549) ปฏิกิริยาเมลลาร์ดไม่จำเป็นต้องเกิดที่อุณหภูมิสูงเสมอไป อาหารที่มีน้ำตาลรีดิวซิ่งและกรดอะมิโนหากเก็บที่อุณหภูมิตู้เย็น (อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) สามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ได้ในระหว่างการเก็บ (Whitfield, 1992) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คือ อุณหภูมิ pH ความชื้น ออกซิเจน โลหะ ฟอสเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ น้ำ หรือ a_w ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยาเมลลาร์ด เมื่อมีน้ำเพียงเล็กน้อยปฏิกิริยาเมลลาร์ดสามารถเกิดขึ้นได้ทันที ที่อุณหภูมิต่ำการเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนรูปของน้ำตาลเป็นรูป Reactive Aldehyde แต่ที่อุณหภูมิสูงการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุลน้ำตาลจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด เพราะทำให้มีน้ำเกิดขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะช้าลงอีกครั้งเมื่อมีปริมาณน้ำมากจนสับสเตรตเจือจางลง ออกซิเจนไม่มีผลต่อปฏิกิริยาเมลลาร์ด แต่ออกซิเจนจะช่วยออกซิไดส์สารอื่นให้เป็นรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยาเมลลาร์ดจึงเกิดขึ้นได้แม้ไม่มีออกซิเจน (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2549)

2.3.4 วัยของเมล็ด

เมล็ดที่ยังเจริญไม่เต็มที่ (Immature Kernel) จะมีปริมาณน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลรีดิวซิ่งสูงกว่าเมล็ดที่เจริญเต็มที่ (Mature Kernel) ซึ่งจะเกิดสีน้ำตาลทั้งภายนอกและภายในเมล็ด หลังการคั่วมากกว่าเมล็ดที่เจริญเต็มที่ (Wall and Gentry, 2006)

2.3.5 กลิ่นหืน (Rancidity)

การหืนเป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมัน และน้ำมันทำให้มีกลิ่นผิดปกติและทำให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเปลี่ยนไป (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2549) สารประกอบให้กลิ่นที่สำคัญเกิดจากลิพิดออกซิเดชันของแอลดีไฮด์ คีโตน และฟูแรน ซึ่งให้กลิ่นหืนของผลิตภัณฑ์ไขมัน น้ำมัน หรืออาหารที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ (Ho and Hartman, 1994) การหืนเกิดขึ้นได้ 2 แบบ

2.3.5.1. Hydrolytic Rancidity

เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ หรือ ลิพิดด้วยเอนไซม์ไลเพส (Lipase) ความร้อน กรด ด่างและความชื้น ทำให้ไขมัน และน้ำมันเกิดการสลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระ (กรดโอเลอิก กรดลิโนเลนิก และกรดลิโนเลอิก) ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนออโตออกซิเดชัน (Autoxidation) ต่อไป (Robards, Kerr and Patsalides, 1988) ผลิตภัณฑ์ธัญพืชอบแห้ง Hydrolytic Rancidity จะเกิดจากเอนไซม์ไลเพสมากกว่าการไฮโดรไลซิสด้วยกรด หรือด่าง (Galliard, 1983)

2.3.5.2. Oxidative Rancidity

เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน (Autoxidation) ที่พันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวกับออกซิเจน ปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันจะเกิดขึ้นเองแบบต่อเนื่อง

ตลอดเวลาเมื่อไขมันและน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้มีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2549) โดยทั่วไปแล้วไขมันในธัญพืชส่วนใหญ่เป็นไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated และ Polyunsaturated) ซึ่งเป็นกรดลิโนเลอิก 30-60% ของกรดไขมันทั้งหมด ดังนั้นไขมันในธัญพืชส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน (Galliard, 1983) แสดงความสัมพันธ์การเกิดกลิ่นหืนในธัญพืชดังแสดงในรูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันมีกลไกการเกิด 3 ขั้นตอน (Gordon, 2004)

1. Initiation

เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (Free Radical: R·) โดยไฮโดรคาร์บอนตรงตำแหน่งพันธะคู่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอม (H·) ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ดังสมการที่ 1

$$RH \xrightarrow{Heat,Light,Metal} R\cdot + H\cdot \qquad (1)$$

2. Propagation

เป็นขั้นตอนต่อเนื่องของอนุมูลอิสระเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนได้เป็นอนุมูลเปอร์ออกซี (ROO·) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) และอนุมูลไฮโดรคาร์บอน (R·) ดังสมการที่ 2 และ 3

$$R\cdot + O_2 \rightarrow ROO\cdot \qquad (2)$$

$$ROO\cdot + RH \rightarrow ROOH + R\cdot \qquad (3)$$

3. Termination

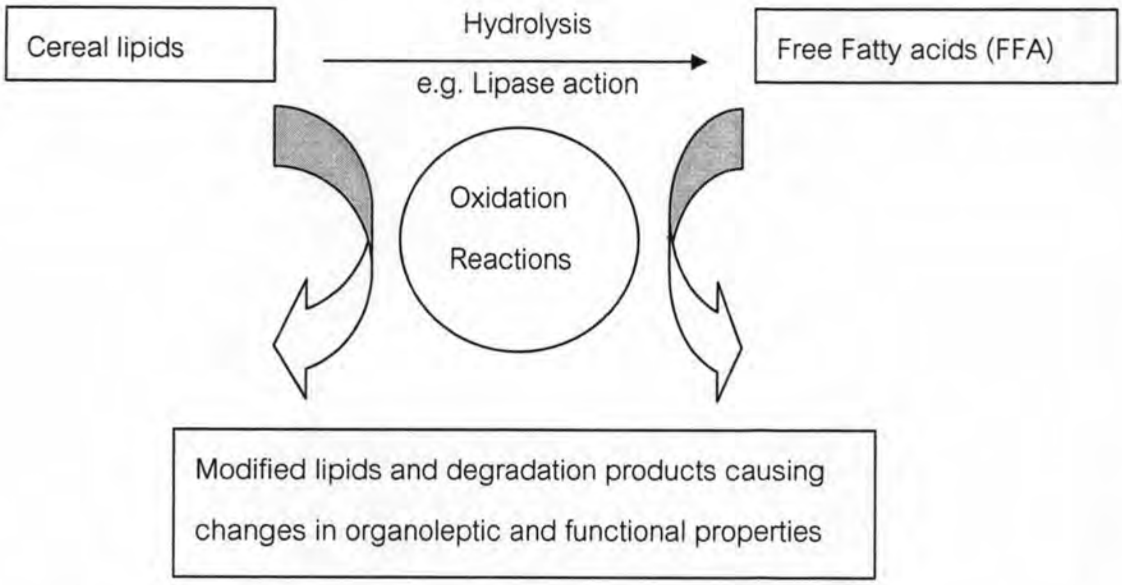
เป็นขั้นตอนที่อนุมูลที่เกิดจากขั้นตอน Propagation และเมื่ออนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากันเองจะเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่เป็นไม่อนุมูลอิสระ (R-R และ ROOR) ปฏิกิริยาจะหยุดลง ดังสมการที่ 4, 5 และ 6

$$R\cdot + R\cdot \rightarrow R\text{-}R \qquad (4)$$

$$R\cdot + ROO\cdot \rightarrow ROOR \qquad (5)$$

$$ROO\cdot + ROO\cdot \rightarrow ROOR + O_2 \qquad (6)$$

ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นของการเกิดออโตออกซิเดชัน และสารนี้ไม่คงตัวจึงสลายตัวอยู่ในรูปสารไม่ระเหย (Non-volatile) แอลกอฮอล์ และคีโตน และสารระเหย (Volatile) แอลดีไฮด์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกลิ่นของผลิตภัณฑ์ เมื่อกรดลิโนเลอิกเกิดปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน จะได้สารระเหยแอลดีไฮด์ เฮกซานาล (Hexanal) เฮปทานาล (Heptanal) ออกทานาล (Octanal) *Trans*-2-nonenal *Cis*-2-decenal *Trans, trans*-2,4-nonadienal และ *Trans, cis*-2,4-decadienal โดยทั่วไปนิยมติดตามการสูญเสียกลิ่นด้วยเฮกซานาล (Gordon, 2004)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hydrolytic และ Oxidative Rancidity ของไขมันในธัญพืช
ที่มา: Galliard (1983)

วิธีตรวจสอบการเกิดลิพิดออกซิเดชัน (Irwin and Hedges, 2004)

ปฏิกิริยาลิพิดออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ค่อนข้างซับซ้อน การตรวจสอบเพื่อวัดการเกิดออกซิเดชัน ทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value,P.V.)

ค่าเปอร์ออกไซด์ คือ มิลลิอิควิวาเลนต์ออกซิเจนต่อกิโลกรัมของไขมันหรือ น้ำมัน (mill equivalent O_2/kg oil) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นของการเกิดออโตออกซิเดชัน โดยวัดปริมาณไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้จากการทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide) ได้เป็นไอโอดีน (Iodine) แล้วไตเตรตหาปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้น เนื่องจากไฮโดรเปอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวได้ง่ายดังนั้นค่าเปอร์ออกไซด์จึงอาจไม่ใช่ตัวแทนการเกิด ลิพิดออกซิเดชันทั้งหมดโดยค่าเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและจะลดต่ำลงในระหว่างการเก็บน้ำมันผสม (Murthi *et al.*, 1987)

2. กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acids, FFA)

ปริมาณ %FFA หรือ Acid Value (A.V.) คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม เป็นกลางพอดี ซึ่งนิยมเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของกรดโอเลอิก วิธีนี้เป็นการตรวจวัดกรดไขมันอิสระโดยตรวจวัด Hydrolytic Rancidity ได้มากกว่า Oxidative Rancidity เป็นค่าที่บอกถึง

ปริมาณไขมันอิสระที่ได้จากการย่อยไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมันด้วยเอนไซม์ไลเพส (Lipase)

Fourie และ Basson (1989) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์ในถั่วแมคคาดาเมียสามารถใช้แทนการทดสอบประสาททางสัมผัสโดยผู้ทดสอบที่ผ่านการทดสอบ ดังนั้น ระดับกลิ่นหืนของผลิตภัณฑ์จึงสามารถแสดงได้ด้วยค่าเปอร์ออกไซด์

Kaijser และคณะ (2000) ศึกษาองค์ประกอบไขมัน และ กลิ่นหืนในแมคคาดาเมียที่ปลูกที่นิวซีแลนด์ 4 สายพันธุ์ พบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์อยู่ระหว่าง 0.56-3.61 meqO_2/kg oil สายพันธุ์ GT 207 มีค่าเปอร์ออกไซด์สูงสุด และกรดไขมันลิโนเลอิกสูงสุด แสดงว่าสายพันธุ์ และพื้นที่ในการปลูกแมคคาดาเมียมีผลต่อกลิ่นหืนของแมคคาดาเมีย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มะคาเดเมียอบ ฉบับที่ 1145 (พ.ศ.2549) กำหนดให้ค่าเปอร์ออกไซด์แมคคาดาเมียหลังการคั่วหรือทอด มีค่าไม่เกิน 30 meqO_2/kg oil ดังนั้น แมคคาดาเมียที่มีค่าเปอร์ออกไซด์มากกว่าค่าดังกล่าวจะไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

2.4 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงในการระเหย การเคลื่อนย้ายของความชื้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการเคลื่อนย้ายของความชื้นจากส่วนในสุดของเมล็ดสู่บริเวณผิวนอกของเมล็ด ซึ่งขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเมล็ดและลักษณะทางเคมีและกายภาพของเมล็ด ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการเคลื่อนย้ายความชื้นจากผิวเมล็ดไปสู่อากาศภายนอก ซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่มีความชื้นสูงขณะทำการเก็บเกี่ยว ทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน การอบแห้งจึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

สามารถแบ่งการอบแห้งเป็น 2 ช่วง

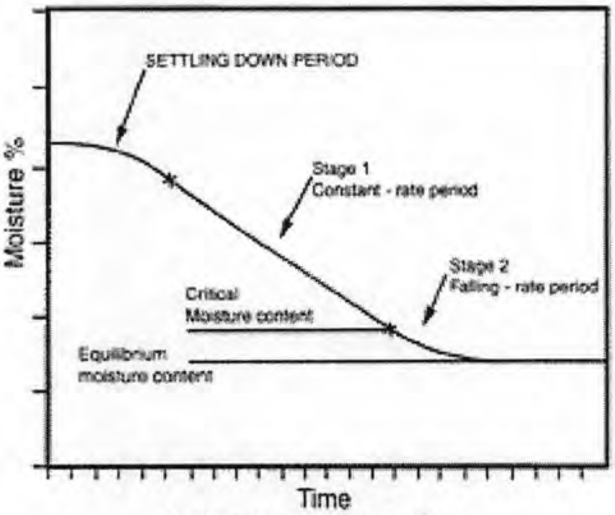
1.ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate Drying Period)

เป็นระยะที่ผิวหน้าอาหารสามารถรักษาระดับความชื้นของอาหารพอที่จะทำให้ค่าความดันย่อยภายในมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ทำให้อัตราการอบแห้งคงที่ดังในรูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 70-75% w.b. โดยมี ความเร็วลม อุณหภูมิลมและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ เป็นค่าพารามิเตอร์ในการอบแห้ง ดังนั้น โดยทั่วไปการอบแห้งเมล็ดธัญพืชจะไม่พบการอบแห้งในช่วงคาบอัตราการอบแห้ง

คงที่ แต่พบคาบการอบแห้งนี้ในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิดด้วยกัน เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น (Brooker, Bakker-Arkema and Hall, 1974)

2.ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-rate Drying Period)

เมื่อคาบอัตราการอบแห้งคงที่สิ้นสุดลงจะเกิดคาบอัตราการอบแห้งลดลงตามมา การเคลื่อนตัวของน้ำในชิ้นอาหารที่ระยะต่างๆกันไปยังผิวหน้าของอาหารเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของก๊าซ และการเคลื่อนที่จากผิวหน้าไปยังกระแสลมเกิดขึ้นโดยผ่านชั้นบางๆของก๊าซในอากาศในการเคลื่อนที่ของน้ำ ความต้านทานภายในที่เพิ่มขึ้น และระยะทางการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งลดลง (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2532.) การอบแห้งเมล็ดธัญพืชส่วนใหญ่เป็นคาบอัตราการอบแห้งแบบลดลง นั่นคือ เมล็ดธัญพืชมีอัตราการอบแห้งลดลงตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ดังในรูปที่ 2.9 (Brooker *et.al.*, 1974)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้ง

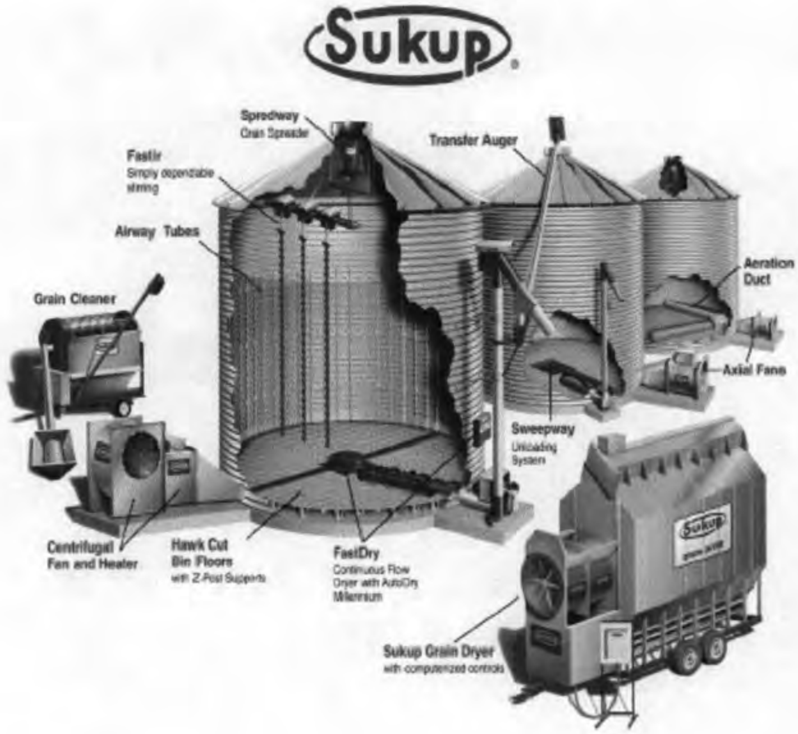
ที่มา: GENEQ INC (2008)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถจำแนกการอบแห้งแมคคาดาเมีย 5 ประเภท ได้แก่ แบบถังเก็บ แบบลมร้อน แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ แบบถังเก็บร่วมกับลมร้อน และแบบปั๊มความร้อน

2.4.1 การอบแห้งแบบถังเก็บ

เป็นการอบแห้งในลักษณะเมล็ดพืชอยู่กับที่ ความสูงของชั้นเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งแบบถังเก็บอาจสูงกว่าในเครื่องอบแห้งชนิดอื่น โดยอาจสูงถึง 6 เมตร อุณหภูมิและอัตราการ

ไหลของอากาศที่ใช้อบแห้งมักจะต่ำ ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างช้าๆ เป็นผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งค่อนข้างนาน ซึ่งอาจทำให้มีการเจริญของเชื้อราและการสูญเสียมวลของเมล็ดพืชมากเกินไป อาจใช้อากาศแห้งในการอบแห้งแบบนี้ได้ แต่ประสิทธิภาพในการอบแห้งจะขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ของอุณหภูมิห้องในขณะอบแห้งด้วย (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)



รูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ
ที่มา: TRIPER INC (2008)

Kowitz (2004) ศึกษาการอบแห้งแมคคาดาเมียแบบถังเก็บ ที่อุณหภูมิห้อง (10-20 องศาเซลเซียส) โดยเปิดพัดลมภายในถังเก็บ 24 ชั่วโมงตลอดวัน พบว่า แมคคาดาเมียความชื้นเริ่มต้น 19.9% w.b. ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 3 สัปดาห์ จะได้ความชื้นสุดท้าย 8.2% w.b. ในการอบแห้งวิธีนี้อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีผลต่อการอบแห้งมากและเป็นการยากมากในการลดความชื้นแมคคาดาเมียให้น้อยกว่า 12% (w.b.) โดยใช้อุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเพียงอย่างเดียว หากต้องการแมคคาดาเมียความชื้นประมาณ 9% w.b. ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศควรอยู่ประมาณ 50% ตลอดระยะเวลาการอบแห้งเป็นเวลาประมาณ 10 วัน

2.4.2 การอบแห้งด้วยลมร้อน

เป็นการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนซึ่งเครื่องอบแห้งอาจมีลักษณะเป็นแบบตู้ หรือ อุโมงค์ หรือใช้สายพานอบแห้ง จนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงถึงระดับที่ต้องการ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) อากาศโดยปกติจะมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60-75% เมื่อทำให้อากาศร้อนขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์จะลดลง เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอ และลมร้อนจะพัดพาไอน้ำออกจากอาหาร การอบแห้งแบบลมร้อนทำให้ความชื้นในอาหารลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจากนั้นจะลดลงช้าๆจนกระทั่งถึงจุดความชื้นสมดุล (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2544)

Prichavudhi และ Yamamoto (1965) ศึกษาผลของการอบแห้งแมคคาดาเมียทั้งกะลา (Nut-in shell) ด้วยลมร้อน ต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง ไขมันและคุณภาพหลังการคั่ว ทำการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยแปรอุณหภูมิในการอบแห้ง 4 อุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง 52 องศาเซลเซียส 60 องศาเซลเซียส และ 71 องศาเซลเซียส อบแห้งแต่ละอุณหภูมิเป็นเวลา 4 วัน และแมคคาดาเมียจากการอบแห้งทุกอุณหภูมิอบต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส เป็นเวลามากกว่า 3 วัน ขึ้นไปเพื่อปรับความชื้นแมคคาดาเมียให้เข้าสู่สมดุลที่ 1.5% w.b. ก่อนเข้าสู่กระบวนการคั่ว พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิห้องและ 52 องศาเซลเซียส สามารถอบแห้งได้ทุกค่าความชื้น โดยไม่เกิดสีน้ำตาลกลางเมล็ด การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 60 องศาเซลเซียส และ 71 องศาเซลเซียส โดยไม่ให้เกิดสีน้ำตาลกลางเมล็ดสามารถทำได้เมื่อแมคคาดาเมียมีความชื้นเริ่มต้นเป็น 6% w.b. และ 8% w.b.

Hamilton และคณะ (1980) และ Cavaletto (1980 และ 1981a) แนะนำให้ใช้อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิห้องถึง 38 องศาเซลเซียส) ในการอบแห้งแมคคาดาเมียหลังเก็บเกี่ยวที่ความชื้นสูง (15-25 % w.b.) หากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง (51 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านขั้นตอนการ Pre-drying ที่อุณหภูมิต่ำ) แมคคาดาเมียจะเกิดสีน้ำตาลกลางเมล็ด

2.4.3 การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

การอบแห้งมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยลมร้อน ขั้นตอนที่สองอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งแบบไมโครเวฟเป็นการอบแห้งโดยใช้ช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในตัวผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำแห้ง โดยคลื่นดังกล่าวจะถูกดูดกลืนโดยน้ำ

ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ทำให้อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลน้ำเกิดการสั่นสะเทือน ดังนั้นการระเหยของน้ำจึงเป็นไปอย่างรวดเร็วมาก (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

Silva และคณะ (2005) ศึกษาการอบแห้งแมคคาดาเมียด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 58-68 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ (Brastemp model BMV38-A) กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ ใช้เวลาในการอบแห้ง 4.5-5.5 ชั่วโมง พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถอบที่อุณหภูมิสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบเดิม โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยนี้ไม่ส่งผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ และปริมาณกรดไขมันอิสระของแมคคาดาเมีย

2.4.4 การอบแห้งแบบถังเก็บร่วมกับลมร้อน

การอบแห้งมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกอบแห้งแบบถังเก็บ ขั้นตอนที่สองอบแห้งด้วยลมร้อน Australian Macadamia Industry ได้กำหนดการอบแห้งแมคคาดาเมียไว้ดังนี้ เริ่มต้นอบด้วยลมอุณหภูมิห้อง 4-5 วัน อบต่อด้วยลมที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นแมคคาดาเมียเป็น 7.5% w.b. 2-3 วัน จากนั้นนำมาอบด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 4-5 วัน และตามด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 1-2 วัน จนกระทั่ง ความชื้นเนื้อในแมคคาคาดาเมียเป็น 1.5% w.b.

Mason และ McConachie (1994) ศึกษาปริมาณน้ำมันในแมคคาดาเมีย (*Macadamia integrigolia*) ที่ผ่านการอบแห้งแบบถังเก็บร่วมกับลมร้อนตามแบบ Australian Macadmia Industry ใช้เวลาในการอบแห้ง 7-9 วัน พบว่า แมคคาดาเมียที่มีความชื้นอยู่ระหว่าง 1-1.5% d.b. จะมีปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วง 66.3-81.2% ทั้งนี้ขึ้นกับ สายพันธุ์ การเจริญเติบโต สภาวะแวดล้อม เป็นต้น

2.4.5 การอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเหมาะสำหรับวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อนที่ต้องใช้อุณหภูมิต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีในด้านสี กลิ่นและเนื้อสัมผัส เพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง ลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน และสภาพของอากาศภายนอกไม่มีผลต่อการอบแห้ง การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งที่ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการอบแห้งวิธีอื่นๆเพราะการใช้กระแสไฟฟ้าจะลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซหรือน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ, 2540) ดังนั้น ปั๊มความร้อนจึงเป็นเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยี การอบแห้งโดย

ใช้วิธีอื่นๆ ได้แก่ การใช้ลมร้อน การอบแห้งแบบถังเก็บ การอบแห้งแบบตู้ การอบแห้งแบบอุโมงค์ การอบแห้งแบบสายพาน การอบแห้งแบบแช่แข็ง การอบแห้งแบบไมโครเวฟ และการลดความชื้นโดยออสโมซีส (กุลยา จันทร์อรุณ, 2541) เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในด้านพลังงาน และเนื่องจากอุณหภูมิ ของอากาศที่ใช้อบแห้งค่อนข้างต่ำ และเป็นการอบแห้งระบบปิด ดังนั้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้านสีและกลิ่นจึงไม่เปลี่ยนแปลง และอยู่ในเกณฑ์ดี เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะไม่ปล่อยก๊าซ CO_2 สู่ชั้นบรรยากาศ

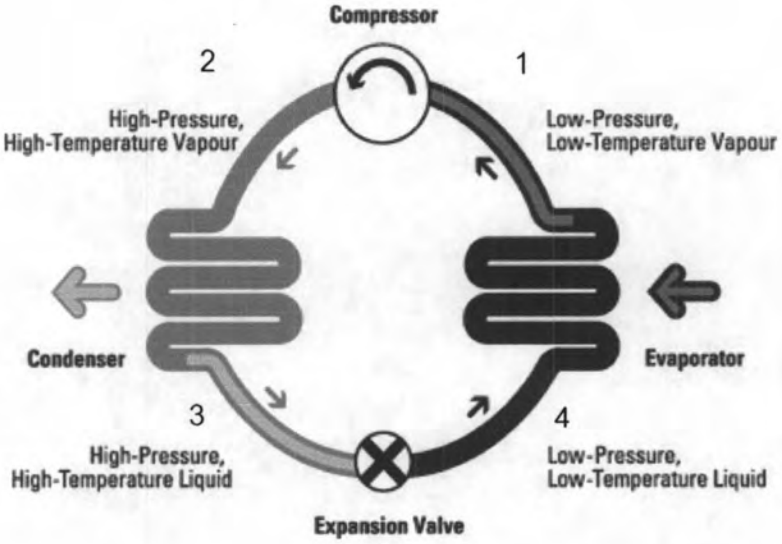
การอบแห้งวิธีนี้แบ่งได้ 2 ระบบ

1. ระบบที่มีการดึงความชื้นออกก่อนการอบแห้ง (Dehumidifying Heat Pump Drying) โดยทำงานในระบบปิดอย่างสมบรูณ์ (Closed System) หรือระบบเปิดเป็นบางส่วน (Partially Open System)

2. ระบบที่มีการเก็บคืนความร้อนเพียงอย่างเดียว (Heat Recovery Heat Pump Drying) โดยทำงานในระบบเปิด (Open System) และไม่มีการลดความชื้นของอากาศ

ปั๊มความร้อนมีหลักการทำงานเบื้องต้นคล้ายกับระบบทำความเย็นทั่วไป แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ ระบบทำความเย็นเป็นระบบที่ต้องการลดอุณหภูมิภายในห้องลง แล้วดึงความร้อนไปถ่ายเทด้านนอกห้องโดยผ่านเครื่องควบแน่น ขณะที่ระบบปั๊มความร้อนนำความร้อนที่ถ่ายทิ้งนั้นมาใช้ประโยชน์ เช่น นำมาใช้ในระบบอบแห้ง หรือระบบทำน้ำอุ่นเป็นต้น

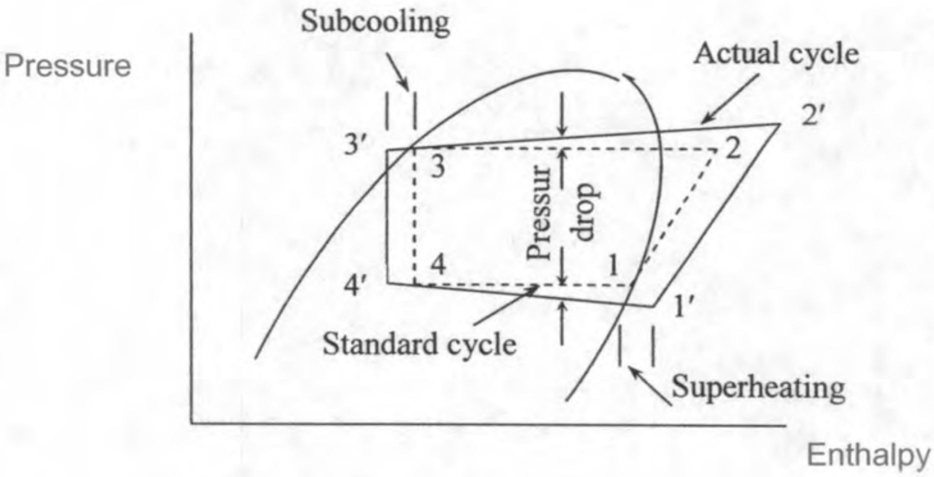
ระบบปั๊มความร้อนโดยทั่วไปจะเป็นแบบอัดไอ ประกอบด้วย เครื่องอัดไอ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องทำระเหย (Evaporator) และวาล์วขยายตัว (Expansion Valve) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ที่มา: South Derbyshire District Council (2007)

การทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอเป็นแบบวัฏจักร ดังแสดงในแผนภูมิความดันและเอนทัลปี (รูปที่ 2.12) วัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนซึ่งแสดงด้วยเส้นประเป็นวัฏจักรทางอุดมคติ ประกอบด้วย 4 กระบวนการคือ



รูปที่ 2.12 แผนภูมิความดัน (Pressure) และ เอนทัลปี (Enthalpy)

ของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ที่มา: ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2541)

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดไอ (Compression Process) สารทำความเย็น R-22 ที่ไหลออกจากเครื่องทำระเหยในสถานะไออิ่มตัวที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ (ภาวะที่ 1) ถูกเพิ่มความดันและอุณหภูมิโดยการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิคในคอมเพรสเซอร์ไปสู่ภาวะที่ 2 ทำให้สารทำความเย็นมีสถานะเป็นไอร้อนยวดยิ่ง

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการควบแน่น (Condensation Process) สารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอร้อนยวดยิ่ง (ภาวะที่ 2) ไหลผ่าน Condenser เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสารทำความเย็นให้กับอากาศแวดล้อม เมื่อสารทำความเย็นผ่าน Condenser จะอยู่ในภาวะของเหลวอิ่มตัว (ภาวะที่ 3)

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการลดความดันในวาล์วขยายตัว (Throttling Process) สารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว (ภาวะที่ 3) เคลื่อนที่ผ่านวาล์วขยายตัว ทำให้ความดันและอุณหภูมิต่ำลง (ภาวะที่ 4) สารทำความเย็นในภาวะที่ 4 นี้จะมีสถานะเป็นของผสมระหว่างของเหลวและไอ กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการที่เอนทัลปีมีค่าคงที่

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการระเหยสารทำความเย็น (Evaporating Process) สารทำความเย็นจากภาวะที่ 4 ซึ่งมีสถานะเป็นของผสมระหว่างของเหลวและไอ ได้รับความร้อนจากตัวกลางเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเครื่องทำระเหย ทำให้เปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นไปเป็นไออิ่มตัวที่ภาวะที่ 1

วัฏจักรที่เกิดขึ้นจริงของปั๊มความร้อนในรูปที่ 2.12 (1´-2´-3´-4´) แตกต่างจากวัฏจักรทางอุดมคติ (1-2-3-4) เนื่องจาก

1. อุณหภูมิของสารทำงานในเครื่องควบแน่นถูกทำให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของเหลวอิ่มตัวก่อนที่จะผ่านเข้าไปในวาล์วขยายความดัน ผลดีคือทำให้ได้ค่าการทำความเย็นเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการทำความเย็นเพิ่มขึ้น แต่มีข้อเสียคือกำลังงานของเครื่องอัดมีค่าลดลง

2. ไอของสารทำงานเป็นไอร้อนยวดยิ่งก่อนเข้าเครื่องอัดทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นคายให้กับเครื่องควบแน่นมากขึ้นแต่มีข้อเสียคือจะต้องใช้เครื่องอัดขนาดใหญ่เนื่องจากอุณหภูมิของสารทำความเย็นมีค่าสูงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจากงานที่ต้องเพิ่มให้แก่เครื่องอัด

3. การอัดไอสารทำความเย็นเป็นแบบไอเซนโทรปิค ไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากความดันจริงในขณะไหลผ่านเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นในวัฏจักรอุดมคติจะแตกต่างจากทางปฏิบัติ โดยความดันก่อนการอัดตัวจะลดลง เนื่องจากเกิดความสูญเสียในขณะไหลผ่านท่อในระบบ

Gabas และคณะ (2004) ศึกษาการอบแห้งแอปเปิ้ลทรงกระบอก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร ยาว 1.2 เซนติเมตร) พันธุ์กาลา (7.21 % d.b.) ด้วยปั๊มความร้อนอุณหภูมิอบแห้ง 30 องศาเซลเซียส 40 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตร/วินาที R22 ทำหน้าที่เป็นสารให้ความเย็น พบว่า การอบแห้งแอปเปิ้ลเพื่อให้ได้ความชื้น 0.24% d.b. ด้วยปั๊มความร้อนใช้เวลา 6.7 ชั่วโมง อบด้วยลมร้อนใช้เวลา 7.8 ชั่วโมง นั่นคือ การอบด้วยปั๊มความร้อนช่วยลดเวลาในการอบแห้ง 14.1% และ ลดการสูญเสียวิตามินซีเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน นอกจากนี้การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนยังประหยัดพลังงานถึง 40% เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยไฟฟ้าทั่วไป

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ (2540) ศึกษาการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มด้วยปั๊มความร้อน ลดความชื้นเริ่มต้น จาก 74% d.b. เหลือความชื้นสุดท้าย 23% d.b. โดยแบ่งการอบเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก ขนาดมะละกอที่ใช้ในการอบแห้ง 6.35 x 1.5 x 2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ขั้นตอน 2 ขนาดมะละกอที่ใช้ในการอบแห้ง 0.98 x 0.98 x 0.98 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยกำหนดอุณหภูมิในห้องอบ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 0.45 กิโลกรัม/วินาที พบว่า ปั๊มความร้อนลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ ลดการสูญเสียกลิ่น และสามารถรักษาสีของผักผลไม้

Kowitz (2004) ศึกษาการอบแห้งแมคคาดาเมียด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิห้อง 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.6 เมตร/วินาที ความลึกของชั้นอบแห้ง 1 เมตร สามารถอบแมคคาดาเมียได้ประมาณ 60 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 9-13 วัน พบว่า การอบแห้งแมคคาดาเมียความชื้นสูงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมล็ดจะเกิดสีน้ำตาลหลังการคั่ว และหากอุณหภูมิอบแห้งมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ความชื้นของแมคคาดาเมียชั้นล่างสุดและบนสุดของชั้นอบแห้งจะต่างกัน 2% ซึ่งทำให้เกิดการอบแห้งมากเกินไป

จากการสำรวจเอกสารที่ผ่านมาข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งแมคคาดาเมียโดยใช้วิธีต่างๆสามารถสรุปได้ดังนี้ (ตารางที่2.3)

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งแมคคาดาเมียโดยวิธีต่างๆ

การอบแห้ง	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบถังเก็บ	1.ใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดสีน้ำตาลกลางเมล็ดค่อนข้างน้อย 2.เมล็ดพืชหลังอบไม่แห้งมากเกินไป 3.ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย	1.ระยะเวลาในการลดความชื้นค่อนข้างนาน ซึ่งอาจทำให้ มีการเจริญของเชื้อรา และการสูญเสียมวลของเมล็ดพืชมากเกินไป 2.การอบแห้งแบบถังเก็บไม่สามารถกระทำเมื่อเมล็ดพืชมีความชื้นสูงมาก และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยาวนานทำให้ต้องเสียเวลาในการจัดการมาก
แบบลมร้อน	1.ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงเมื่อเทียบกับแบบถังเก็บ	1.การใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงกับแมคคาดาเมียที่มีความชื้นสูงจะเกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ดหลังคั่ว
แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	1.ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น 2.คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง	1.ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง
แบบถังเก็บร่วมกับลมร้อน	1.ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงเมื่อเทียบกับถังเก็บ 2.เกิดสีน้ำตาลกลางเมล็ดค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับแบบลมร้อน	1.ระยะเวลาในการอบแห้งยังคงค่อนข้างนาน
แบบปั๊มความร้อน	1.ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีกว่าในด้านสี กลิ่น และเนื้อสัมผัส 2.เพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง ลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน 3.เหมาะสำหรับวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูง 4.สภาพของอากาศภายนอกไม่มีผลต่อการอบแห้ง	1.ราคาต้นทุนสร้างระบบสูง 2.การทำงานของระบบต้องใช้ไฟฟ้าซึ่งระบบสายส่งสายไฟฟ้าอาจจำกัดขนาดของปั๊มความร้อนในบางพื้นที่

2.5 บรรจุภัณฑ์และภาวะในการเก็บรักษาแมคคาดาเมียแห้ง

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญในการเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะช่วยรักษาคุณภาพอาหารซึ่งสิ่งแวดล้อมอาจทำให้คุณภาพเปลี่ยนแปลงได้ ในระหว่างการขนส่ง และการเก็บในคลังสินค้า โดยช่วยป้องกันสิ่งสกปรก ไอน้ำ ความชื้น แสง การกระแทกและการกดทับ เป็นต้น (วิทยาศาสตร์สำหรับเยาวชน, 2544)

ลักษณะบรรจุภัณฑ์ของแมคคาดาเมียในท้องตลาดสามารถแบ่งเป็น 2 แบบหลัก คือ บรรจุภัณฑ์แมคคาดาเมีย แบบขายส่ง (Bulk Macadamia Kernel) และบรรจุภัณฑ์แมคคาดาเมียแบบขายปลีก (Retailed Packaging) (Australian Macadamia Society, 2004)

Goldmac (2007) บรรจุเนื้อในแมคคาดาเมียแบบขายส่ง 10 กิโลกรัม ในถุง Laminated Foil ไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนแล้วปิดผนึกสุญญากาศเก็บในกล่องกระดาษ ที่อากาศแห้งอุณหภูมิต่ำ 8-12 องศาเซลเซียส อายุการเก็บ 2 ปี

International macadamia Ltd (2007) บรรจุเนื้อในแมคคาดาเมียแบบขายส่ง ลักษณะ 0, 1, 2, 3, 4, 5 น้ำหนัก 11.34 กิโลกรัม และลักษณะ 6, 7, 8 น้ำหนัก 5 และ 10 กิโลกรัม ในถุง Laminated foil บรรจุในกล่องกระดาษ และขนาดขายปลีก แมคคาดาเมียลักษณะ 4 น้ำหนัก 340 กรัม

Australian Macadamia Society (2007) บรรจุแมคคาดาเมียแบบขายส่งในขวดโหลปิดผนึก และบรรจุภัณฑ์ Laminated ที่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและความชื้นและให้ปริมาณออกซิเจนคงเหลือในบรรจุภัณฑ์ ไม่เกิน 2% ของอากาศทั้งหมด โดยกำหนดค่าการซึมผ่านออกซิเจนและความชื้น ตามอายุการเก็บรักษา ดังแสดงในตารางที่ 2.4

T23899307

ตารางที่ 2.4 ค่าการซึมผ่านออกซิเจนและความชื้นในบรรจุภัณฑ์แมคคาดาเมียแห้งแบบขายส่งตามอายุการเก็บรักษา

อายุการเก็บรักษามากสุด(เดือน)	ค่าการซึมผ่านออกซิเจนสูงสุดที่ยอมรับได้	ค่าการซึมผ่านความชื้นสูงสุดที่ยอมรับได้
3 เดือน	1.0 g/m^2/24hr ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75% ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm	1.0 cc/m^2/24hr ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75% ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm
6 เดือน	0.3 g/m^2/24hr ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75% ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm	0.3 cc/m^2/24hr ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75% ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm
มากกว่า 12 เดือน	0.1 g/m^2/24hr ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75% ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm	0.1 cc/m^2/24hr ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75% ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm

ที่มา: Australian Macadamia Society (2007)

อุทัย นพคุณวงศ์ และคณะ (2540) ศึกษาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ถั่วแมคคาดาเมีย โดยทำการเก็บรักษาแมคคาดาเมียโดยใช้พันธุ์เชียงใหม่ 400 และ 700 ทั้ง 6 ภาวะ ดังนี้ บรรจุถุงพลาสติกเก็บที่อุณหภูมิห้อง 5 องศาเซลเซียส และ 10 องศาเซลเซียส บรรจุพลาสติกภายใต้ภาวะสุญญากาศเก็บที่อุณหภูมิห้อง 5 องศาเซลเซียส และ 10 องศาเซลเซียส พบว่า ถุงพลาสติกเก็บที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และถุงพลาสติกผนึกภายใต้ภาวะสุญญากาศเก็บที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และ 10 องศาเซลเซียส เก็บได้นาน 12 เดือน ถุงพลาสติกเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เก็บได้นาน 10 เดือน และ ถุงพลาสติก และถุงพลาสติกผนึกภายใต้ภาวะสุญญากาศเก็บที่อุณหภูมิห้อง เสื่อมสภาพเร็วภายใน 4-6 เดือน