โครงการการปรับปรุงคุณภาพแมคคาดาเมียโดยวิธีการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน

Improving Quality of Macadamia Nut by Using Multistage Drying Techniques

โดย

ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท

ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 0 2218 5534 โทรสาร 0 2254 4314

กรกฎาคม 2552

สัญญาเลขที่ MRG5080173

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการปรับปรุงคุณภาพแมคคาดาเมียโดยวิธีการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน

Improving Quality of Macadamia Nut by Using Multistage Drying Techniques

ผู้วิจัย

ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล
ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท
ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทรศัพท์ 0 2218 5534 โทรสาร 0 2254 4314

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

หน้า

สารบัญ..... 1

บทคัดย่อภาษาไทย..... 2

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... 3

Executive Summary 4

เนื้อหางานวิจัย

1. บทนำ..... 6
2. วัตถุประสงค์..... 7
3. การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง..... 8
4. ขั้นตอนการวิจัย 12
5. ผลการวิจัย..... 21
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 48

เอกสารอ้างอิง..... 49

Output จากโครงการวิจัย..... 52

ภาคผนวก 53

บทคัดย่อ

แมคคาเดเมียเป็นถั่วที่มีปริมาณไขมันไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดกลิ่นหืนหลังการเก็บเกี่ยวได้ง่าย ประกอบกับปริมาณความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวที่สูงส่งผลต่อการเสื่อมเสียของแมคคาเดเมียจากจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาเคมี ขั้นตอนการลดความชื้นจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการรักษาคุณภาพของแมคคาเดเมีย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ศึกษาศึกษาวิธีการอบแห้งแมคคาเดเมียที่เหมาะสมเพื่อช่วยรักษาคุณภาพของแมคคาเดเมียภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีน้ำตาล และกลิ่นหืนระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแมคคาเดเมียระหว่างการอบแห้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาจุดเหมาะสมในการออกแบบการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ โดยคำนึงถึงแง่ของจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง ซึ่งการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าแมคคาเดเมียที่ปลูกในประเทศไทยมีปริมาณไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่า 70% และ การนำเอาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมาใช้ในการลดความชื้นแมคคาเดเมียพบว่าสามารถรักษาคุณภาพและประหยัดเวลาในการอบแห้ง เมื่อศึกษาเกณฑ์ในการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้ง ความชื้นที่เหมาะสมของแมคคาเดเมียในการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้ง คือ 10-11% (d.b.) การอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้ปั๊มความร้อนที่ 35-70 °C โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 35 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด และสมการของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นและเวลาในการอบแห้งแมคคาเดเมียมากที่สุดโดยให้ค่า R^2 สูงสุดและค่า MSE ต่ำสุด จากการทดลองในขั้นตอนนี้ พบว่าอุณหภูมิ 40-60 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหาจุดที่เหมาะสมในอบแห้งแมคคาเดเมียต่อไป คุณภาพของแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้งที่ 40-60 °C มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านค่าเปอร์ออกไซด์ที่บ่งบอกถึงระดับของกลิ่นหืนที่ 40°C ต่ำกว่าการอบแห้งที่ 50°C และ 60°C ส่วนค่าความสว่างของเมล็ด (L value) และการเกิดสีเหลือง (b value) ทั้งภายนอกและภายในเมล็ดแมคคาเดเมียของทั้งสามสภาวะไม่แตกต่างกัน จึงเลือกอุณหภูมิที่ 40°C ในการอบแห้งขั้นตอนแรกเพื่อลดความชื้นลงเหลือ 10-11% (d.b.) และศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2 ที่ 50°C และ 60°C วิเคราะห์คุณภาพของแมคคาเดเมียในด้านสี กลิ่น และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง พบว่าขั้นตอนแรกอบแห้งที่ 40 °C ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง และขั้นตอนที่สองอบแห้งที่ 60 °C ใช้อากาศเป็นตัวกลางเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในแง่ของประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงาน และสามารถรักษาคุณภาพของแมคคาเดเมียได้ดี มีค่าเปอร์ออกไซด์ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดและการเกิดสีน้ำตาลน้อย จากนั้นวิเคราะห์คุณภาพของแมคคาเดเมียอบแห้งที่กะเทาะเปลือกแล้วที่บรรจุในถุง Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) และ Alumimiun laminated foil (OPP/AL/PE/LLDPE) (ALF) พบว่าหากเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (27-30 °C) ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำกว่า 40% นั้น บรรจุภัณฑ์ ALF และ LLDPE สามารถเก็บรักษาถั่วแมคคาเดเมียได้ แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงกว่า 40% บรรจุภัณฑ์ชนิด ALF สามารถรักษาคุณภาพของถั่วแมคคาเดเมียได้ดีกว่า

คำสำคัญ; แมคคาเดเมีย ปั๊มความร้อน การอบแห้งแบบหลายขั้นตอน คุณภาพ ไนโตรเจน

Abstract

Macadamia kernels are rich in unsaturated fatty acids. High content of unsaturated fatty acid leads to oxidative reactions and results in rancidity which decreases quality of macadamia nuts. In addition, high moisture content macadamia nut is prone to deteriorate when expose to air. Drying is the most critical step in macadamia processing to prevent deterioration of the nut quality. The proposed research is aimed to investigate suitable drying process of macadamia nut to maintain the nut quality during postharvest. The changes of kernel brown colour and rancidity at different drying strategies were investigated in this study. Drying kinetics, suitable predicted models as well as quality changes during drying at selected temperature (35-70°C) were also observed. Furthermore, performance and energy saving aspects of drying strategies also were chosen to mark the suitable drying process of macadamia nut. Macadamia nut that was harvested in Northern Thailand had high amount of unsaturated fatty acid more than 70%. Preliminary study on possibility of using heat pump drying to reduce the moisture content of nut showed successful quality maintenance and drying time saving. Suitable moisture content for change the stage of drying for two-stage drying was 10-11% (d.b.). Drying kinetics results indicated that 35°C yield the longest drying time while drying at 70°C, drying time was shortest. From drying kinetic and quality observed during drying at single temperature, 40-60°C was selected to optimize two-stage heat pump drying with nitrogen and/or air as the drying medium. Yet, the changes of quality observed at 40°C drying temperature was milder than 50 and 60 $^{\circ}$C during the first stage drying to reduce moisture content down to 10-11% (d.b.) in term of rancidity. However, colour changes was not significant difference during drying at 40-60°C. Therefore, 40°C was selected to employ at the first stage drying and 50-60°C was further used in second stage drying. The analysis of quality of macadamia nut (rancidity and colour) as well as drying performance and energy consumption indicated that using 40°C in the first stage drying combined with nitrogen as drying medium followed by elevating temperature to 60°C combined with air as the second stage drying could maintain quality and exhibited the best performance and lowest energy consumption. Quality of dried macadamia nut in selected packaging materials namely Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) and Alumimiun laminated foil (OPP/AL/PE/LLDPE) (ALF) depends on storage humidity. At relative humidity below 40%, the quality of dried nuts in both packaging materials has changed only little. In contrast, above 40 %RH, the quality of the dried nuts in LLDPE bag has changed significantly when compared to dried macadamia nuts in OPP/AL/PE/LLDPE bag.

Keywords; macadamia nut, heat pump drying, multistage drying, quality, nitrogen

Executive Summary

แมคคาเดเมียที่เก็บเกี่ยวจาก ต.โป่งแยง อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ มีปริมาณไขมันมากกว่า 70 % และโปรตีนสูงถึง 7 % ในปริมาณไขมันทั้งหมดพบว่ามีไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว กรดโอเลอิค (>60%) และ กรดปาล์มิโตเลอิค (>15%) ซึ่งเป็นไขมันที่มีประโยชน์ในปริมาณที่สูง สัดส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่สูงส่งผลให้แมคคาเดเมียเกิดกลิ่นหืนได้ง่ายในระหว่างกระบวนการอบแห้งและเก็บรักษา หากสภาวะในการอบแห้งและการเก็บรักษาไม่เหมาะสม

การศึกษาเบื้องต้นพบว่าการใช้ปั๊มความร้อนที่ 40 °C ร่วมด้วยตู้อบลมร้อนที่ 50 °C สามารถชะลอการเกิดกลิ่นหืนและสีน้ำตาลในเนื้อแมคคาเดเมียได้ดีกว่าวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งใช้เวลานานในการอบแห้งถึง 17 วัน ในขณะที่การใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อนสามารถลดความชื้นลงให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ภายใน 3 วัน ระดับความชื้นที่เหมาะสมในการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งโดยการเพิ่มอุณหภูมิคือ 10-11% (d.b.) (Borompichaichartkul[1] et al., 2009 ภาคผนวก ก)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้ปั๊มความร้อนที่ 35-70 °C โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง พบว่าที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 35 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยกฎของ Fick ซึ่งอัตราการแพร่ของน้ำขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ซึ่งมีค่ามากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อนำอัตราส่วนความชื้นและเวลาของการอบแห้งมาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ แล้วนำค่าคงที่มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์แบบแม่นตรงระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ด้วยสมการ Quadratic จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient Determination; R^2) และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (mean of Squares Error; MSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของสมการในการทำนาย ซึ่งผลการทดลองพบว่า สมการของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นและเวลาในการอบแห้งแมคคาเดเมียมากที่สุดโดยให้ค่า R^2 สูงสุดและค่า MSE ต่ำสุด สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทำนายมาประกอบการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยปั๊มความร้อน (ธานินทร์ รัชโพธิ์ และคณะ, 2552 ภาคผนวก ก) จากการทดลองในขั้นตอนนี้ พบว่าอุณหภูมิ 40-60 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหาจุดที่เหมาะสมในอบแห้งแมคคาเดเมียต่อไป

การวิเคราะห์คุณภาพของแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้งที่ 40-60 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 40°C การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านค่าเปอร์ออกไซด์ที่บ่งบอกถึงระดับของกลิ่นหืนต่ำกว่าการอบแห้งที่ 50 และ 60°C ส่วนค่าความสว่างของเมล็ด (L value) และการเกิดสีเหลือง (b value) ทั้งภายนอกและภายในเมล็ดแมคคาเดเมียของทั้งสามสภาวะไม่แตกต่างกัน จึงเลือกอุณหภูมิที่ 40°C ในการอบแห้งขั้นตอนแรกเพื่อลดความชื้นลงเหลือ 10-11% (d.b.) และศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2 ที่ 50°C และ 60°C สภาวะที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 8 สภาวะ (ตารางที่ 2) วิเคราะห์คุณภาพของแมคคาเดเมียในด้านสี กลิ่น และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง พบว่าสภาวะ 40N-60A เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในแง่ของประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงาน และสามารถรักษาคุณภาพของแมคคาเดเมียได้ดี มีค่าเปอร์ออกไซด์ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดและการเกิดสีน้ำตาลน้อย ซึ่งการใช้อากาศเป็นตัวกลางในขั้นตอนที่ 2 จะช่วยประหยัดก๊าซไนโตรเจน และสภาวะการอบแห้ง 40N-60A ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นสามารถลดค่าความชื้นได้ต่ำกว่า 2% (d.b.) ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษา ค่าความชื้นและสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษา รวมถึงความเป็นไปได้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ (อุณหภูมิและความชื้น

สัมพัทธ์ของตัวกลางในการอบแห้ง) ที่จะสามารถลดความชื้นของแมคคาเดเมียในต่ำกว่า 2% (d.b.) ศึกษาจาก moisture sorption isotherm ของ แมคคาเดเมีย

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆของแมคคาเดเมียอบแห้งกะเทาะเปลือกแล้วที่บรรจุในถุง Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) และ Alumimiun laminated foil (OPP/AL/PE/LLDPE) (ALF) พบว่า สภาวะการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (27-30 °C) ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำกว่า 40% นั้น สามารถใช้บรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิด คือ ALF และ LLDPE เพื่อเก็บรักษาถั่วแมคคาเดเมียได้ ซึ่งการใช้บรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE มีข้อดีคือ ทำให้มองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้ หากความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงกว่า 40% บรรจุภัณฑ์ชนิด ALF จะสามารถรักษาคุณภาพของถั่วแมคคาเดเมียได้ดีกว่า จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมเสียได้ช้า มีอายุการเก็บนานกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ชนิด ALF มีคุณสมบัติในการป้องกันแสง และการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนได้ดี (Borompichaichartkul[2] et al., 2009 ภาคผนวก ก)

ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้และเป็นแนวทางให้กับอุตสาหกรรมผลิตแมคคาเดเมียอบแห้งหรือถั่วอบแห้งชนิดอื่นๆ ที่มีปริมาณไขมันไม่อิ่มตัวสูงได้ต่อไป ซึ่งผลงานวิจัยนี้ครอบคลุมถึงกระบวนการอบแห้ง บรรจุภัณฑ์และสภาวะในการเก็บรักษาแมคคาเดเมียอบแห้ง

เนื้อหางานวิจัย

1. บทนำ

แมคคาเดเมียเป็นถั่วที่ผู้บริโภคทั่วโลกให้ความสนใจและมีความต้องการทางตลาดสูง เนื่องจากมีรสชาติและเนื้อสัมผัสที่ดี มีคุณค่าทางอาหารสูง โดยมีกรดโอเลอิก ซึ่งเป็นไขมันประเภทไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated fatty acid C18:1) สามารถช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด (Grag et al., 2003 และ Salmolin and Grosvenor, 2000) นอกจากนี้ยังมีปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรท รวมถึงเป็นแหล่งของวิตามินบี แมคคาเดเมียมีปริมาณการผลิตอยู่มาก ในแถบชายฝั่งตะวันออกของประเทศออสเตรเลียและรัฐฮาวายในสหรัฐอเมริกา ในประเทศไทยมีการปลูกแมคคาเดเมียในทางตอนเหนือของประเทศ เช่น ในจังหวัดเชียงรายและเชียงใหม่ ปัจจุบันการเพาะปลูกประสบผลสำเร็จเป็นอย่างดี แต่กระบวนการในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตยังไม่มีประสิทธิภาพ มักพบปัญหาในด้านการแปรรูปและเก็บรักษาทำให้คุณภาพของแมคคาเดเมียลดลง

ความชื้นของแมคคาเดเมียหลังการเก็บเกี่ยวมีปริมาณ 25-30 %db เมื่อวัดค่า water activity นั้นสูงถึง 0.8 ซึ่งสามารถเกิดการเสื่อมเสียของคุณภาพเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี เอนไซม์ และจุลินทรีย์ได้ง่าย จึงจำเป็นต้องมีการจัดการการลดความชื้นของแมคคาเดเมียโดยเร็ว โดยทั่วไปความชื้นของแมคคาเดเมียที่เหมาะสมในการเก็บคือ 1-2 %db และมีค่า water activity ประมาณ 0.2 จึงจะสามารถเก็บไว้ได้นานและปลอดภัย Mason และ Wills (2000) ได้ศึกษาขั้นตอนในการแปรรูปแมคคาเดเมียพบว่าว่าวิธีการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดต่อคุณภาพของแมคคาเดเมียซึ่งควรกระทำการอบแห้งทันทีหลังจากเก็บเกี่ยวซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดกลิ่นหืนและเชื้อราได้

ปัญหาที่พบในระหว่างการอบแห้งคือ คุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอของแมคคาเดเมีย การเกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ด และการเกิดกลิ่นหืน ซึ่งการเกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ดและการเกิดกลิ่นหืนนั้นมี อุณหภูมิ ปริมาณน้ำและออกซิเจนเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น แม้ว่าการอบแห้งแมคคาเดเมียที่ปฏิบัติในอุตสาหกรรมใช้อุณหภูมิต่ำ แต่ก็ใช้เวลาในการอบแห้งนานมากกว่า 7 วัน ใช้พื้นที่และแรงงานมาก (Silva et al., 2005) ซึ่งการอบแห้งที่นานเกินไปส่งผลให้แมคคาเดเมียมีกลิ่นหืนมากขึ้น เนื่องจากสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศเป็นเวลานาน ในขณะที่อัตราการลดความชื้นต่ำจึงส่งผลให้คุณภาพลดลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาวิธีการอบแห้งแมคคาเดเมียที่เหมาะสมเพื่อช่วยรักษาคุณภาพของแมคคาเดเมียภายหลังการเก็บเกี่ยว สามารถเก็บไว้ได้นาน และลดอัตราการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาต่างๆ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีน้ำตาลและกลิ่นหืนระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแมคคาเดเมีย รวมถึงศึกษาค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน นำข้อมูลที่ได้มาหาจุดเหมาะสมในการออกแบบการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ โดยคำนึงถึงแง่ของจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมการแปรรูปแมคคาเดเมียในประเทศไทย

2. วัตถุประสงค์

2.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแมคคาเดเมียโดยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศที่อุณหภูมิต่างๆ

2.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นหืน น้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง และสีน้ำตาลในแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้ง

2.3 ศึกษาค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ

2.4 ศึกษาจุดที่เหมาะสมในการออกแบบการอบแห้งแบบหลายแบบหลายขั้นตอนโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ

2.5 ศึกษาชนิดของบรรจุภัณฑ์ และ ภาวะการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียอบแห้ง

3. การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ถั่วแมคคาเดเมีย มี 18 สายพันธุ์ทั่วโลก (Brown, 1984) แต่พบว่ามีเพียง 3 สายพันธุ์เท่านั้นที่รับประทานได้ คือ *Macadamia integrifolia* *Macadamia tet*raphylla และ *Macadamia prealta (*Kermond and Baumgardt, 1996) ในทางการค้า *Macadamia integrifolia* และ *Macadamia tet*raphylla เป็นสายพันธุ์ที่มีการบริโภคมากที่สุด *Macadamia integrifolia* มีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐควีนแลนด์ ประเทศออสเตรเลีย และ *Macadamia tet*raphylla มีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐควีนแลนด์ และตะวันออกเฉียงเหนือของรัฐนิวเซาทเวลส์ ประเทศออสเตรเลีย

ในประเทศไทย ได้ทำการทดลองปลูกถั่วแมคคาเดเมียครั้งแรกในปีพ.ศ.2496 ที่แม่มาลัยฟาร์ม สถานีวิจัยทางการเกษตรฝาง และดอยมูเซอ จังหวัดตาก (Ito, 1987) ปัจจุบันผลผลิตของ *Macadamia integrifolia* จากแถบตอนเหนือของประเทศมีปริมาณ 500 ตันต่อปี (Arunmas, 2004) ความต้องการในการบริโภคถั่วแมคคาเดเมียทั่วโลกมีมากถึง 71,000 ตันต่อปี โดยมีปริมาณการผลิตอยู่ที่ 60,000 ตันต่อปี ซึ่งมีประเทศออสเตรเลียเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ โดยมีกำลังการผลิต 40,000 ตันต่อปี (Arunmas, 2004)

ถั่วแมคคาเดเมีย *Macadamia integrifolia* เป็นพันธุ์ที่ปลูกมากในทางตอนเหนือของประเทศไทย มีลักษณะผล เป็นทรงกลม ผิวเรียบ ใบสีเขียวชีด อาจมีหนามเล็กน้อย หรือไม่มีเลย มีดอกสีขาว มีลักษณะเนื้อสัมผัสแบบกรุบกรอบ

<u>การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว (Postharvest Handing)</u>

ในประเทศไทยสามารถเก็บเกี่ยวถั่วแมคคาเดเมียได้ตลอดทั้งปี โดยเมื่อผลแมคคาเดเมียหล่นจากต้นลงสู่พื้นจึงเริ่มมีการเก็บด้วยมือ แล้วจึงเอาเปลือกนอกออกทันทีเพราะเปลือกสามารถเก็บความชื้นได้ 45% และเมล็ดสามารถเก็บความชื้นได้ 25% (Chu et al., 1953 and Mason, 1982) หากเว้นระยะเวลาในการเก็บแมคคาเดเมียที่หล่นอยู่บนพื้นนานโดยไม่รีบเอาเปลือกออกและนำไปอบแห้งทันทีจะทำให้เมล็ดงอก เกิดเชื้อรา หรือกลิ่นหืน หลังจากนั้นจึงนำเมล็ดที่อยู่ในกะลา (Nut in Shell) ซึ่งอาจมีความชื้นสูงถึง 25% (w.b.) มาลดความชื้นให้เหลือประมาณ 2-1.5% (w.b.) ซึ่งเป็นความชื้นที่ปลอดภัยในการเก็บ การลดความชื้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่กระทำ คือการเก็บในถังเก็บที่มีการไหลเวียนของอากาศที่อุณหภูมิห้อง ขั้นตอนนี้ใช้เวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมงเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของเปลือกสด ป้องกันการงอกของเมล็ดและป้องกันการเจริญของเชื้อรา หลังจากขั้นตอนนี้ได้เมล็ดที่อยู่ในกะลาที่มีความชื้น 10% (w.b.) (Mason, 1982 and Simpson, 1992) แล้วจึงนำไปคัดด้วยสายตาเอาเมล็ดที่มีคุณภาพไม่ดีออก เช่น เมล็ดที่เกิดความเสียหายจากรา หนู แมลง หรือเมล็ดที่ยังโตไม่เต็มที่ จากนั้นจึงนำไปเก็บในถังเก็บที่มีอุณหภูมิห้องไหลเวียนอยู่ภายใน เพื่อให้เกิดการสูญเสียน้ำออกจากเมล็ดที่อยู่ในกะลาเพื่อลดการเจริญของเชื้อรา แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการอบแห้งโดยจะเก็บในถังเก็บไม่เกิน 1 เดือน ซึ่งวิธีการนี้จะใช้เวลานานในการอบแห้ง

Cavaletto (1981) กล่าวถึงเกณฑ์ในการพิจาณาคุณภาพถั่วแมคคาเดเมียมีลักษณะดังนี้

- ปริมาณน้ำมัน : Specific Gravity Test โดยนำถั่วแมคคาเดเมียไปแช่น้ำ
  ถั่วแมคคาเดเมียที่ลอยน้ำ แสดงว่ามีปริมาณไขมันประมาณ 72% ให้จัดว่าเป็นเกรดชั้นหนึ่ง
- ลักษณะของเมล็ด : ถั่วแมคคาเดเมียที่มีเปลือกบางจะมีเนื้อมากกว่าที่เปลือกหนาแต่จะพบปัญหาในขั้นตอนการกะเทาะเปลือก
- ขนาดเมล็ด : นิยมขนาดกลางขึ้นไป

- รูปร่างเมล็ด : นิยมรูปร่างกลม
- สีเมล็ด : เมื่อผ่านการอบด้วยความร้อนแล้วควรเกิดสีครีมน้ำตาลอ่อนสม่ำเสมอทั่วเมล็ด
- วัยของเมล็ด : เมล็ดที่แก่จัดเต็มที่จะหดตัวและไม่เกาะกับกะลา

<u>ปัญหาที่มักจะพบภายหลังการเก็บเกี่ยวและในกระบวนการแปรรูป</u>

การเกิดสีน้ำตาล (Prichavudhi and Yamamoto (1965)

พบว่าเมล็ดจะเริ่มเกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ด จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งในแมคคาเดเมีย ซึ่งแมคคาเดเมียที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งต่ำจะมีคุณภาพหลังการอบแห้งสูง

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

Raghupathy (2003) กล่าวว่า หากค่า water activity ที่ผิวของถั่วแมคคาเดเมียน้อยกว่า 0.6 จะไม่พบการเจริญของจุลินทรีย์

การเกิดกลิ่นหืน

Australian Macadamia Society (1994) พบว่า หากมีออกซิเจนมากกว่า 2% ของอากาศทั้งหมดในภาชนะที่เก็บแมคคาเดเมียจะทำให้เกิดกลิ่นหืนในแมคคาเดเมียเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานโดยออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาลิพิดออกซิเดชั่น (Lipid oxidation)

การเกิดกลิ่นหืนสามารถเกิดขึ้นในอาหารทุกประเภทที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ ในเนื้อเยื่อพืชและสัตว์มีไขมันประเภท Polyunsaturated Fatty Acid (PUFA) เป็นองค์ประกอบในเนื้อเยื่อ เช่น phospholipids จะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป การเกิดกลิ่นหืนอาจเกิดจากเอนไซม์ lipoxygenases ซึ่งเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชั่นในอาหารที่มีกรดไขมันอิสระ แต่กิจกรรมของเอนไซม์ lipoxygenases ถูกยับยั้งได้ที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม น้ำ อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของไขมัน (Steele, 2004)

<u>การอบแห้งแมคคาเดเมีย</u>

Prichavudhi และ Yamamoto (1965) ศึกษาการอบแห้งแมคคาเดเมียทั้งกะลา Nut-in-shell ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิห้อง, 38°C, 52°C, 60°C และ 71°C จากการทดลองพบว่าการอบแห้งแมคคาเดเมียแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 38°C, 52°C, 60°C และ 71°C เป็นเวลา 4 วัน พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิห้อง และ 38°C สามารถอบแห้งแมคคาเดเมียได้ทุกค่าความชื้น ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (60°C และ 71°C) จะเกิดปฏิกิริยา Enzymatic inversion ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ด แต่สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ หากแมคคาเดเมียมีความชื้นเริ่มต้นที่ 8% (w.b.) และ 6% (w.b.) ตามลำดับ

Kowitz (2004) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการอบแห้งแมคคาเดเมียเมล็ดที่อยู่ในกะลา ในฟาร์มแบบถังเก็บ โดยกำหนดภาวะ การทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง 30 – 50°C, ความเร็วลม 0.6 m/s, เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 9 -13 วัน จากการทดลองพบว่า หากอุณหภูมิอบมากกว่า 40°C ความชื้นแมคคาเดเมียที่ด้านล่างสุดและบนสุดในถังเก็บจะต่างกัน 2% ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้น ส่งผลต่อความไม่สม่ำเสมอของความชื้นในผลิตภัณฑ์แห้ง

Silva และคณะ (2005) ศึกษาการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ โดยกำหนดขั้นตอนการอบแห้ง ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 58°C, 60°C และ 62°C ความเร็วลม 1.0 m/s อัตราการไหลมวลอากาศ 2.8 m^3/min ขั้นตอนที่ 2 อบแห้งด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 64°C, 66°C และ 68°C กำลังไมโครเวฟ 300 watt ทำให้แมคคาเดเมียที่มีความชื้นเริ่มต้น 10%(w.b.) มีความชื้นลดลงเหลือ 3.7%(w.b.) จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิการอบแห้งมีผลต่อ Drying kinetics โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นลง อุณหภูมิที่กำหนด (Set point temperature) ของไมโครเวฟมีผลต่อการอบแห้งมากกว่าอุณหภูมิลมร้อน และการอบแห้งขั้นที่ 2 (อบด้วยไมโครเวฟ) มีผลในการเร่งอัตราการอบแห้งให้เร็วขึ้นมากกว่าการอบแห้งขั้นที่ 1 (อบด้วยลมร้อน)

วิธีการอบแห้งที่ถูกต้องจะช่วยลดปัญหาด้าน สี กลิ่นหืน เนื้อสัมผัส และช่วยให้ระบบการผลิตดีขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงของสีและการเกิดกลิ่นหืนเป็นดัชนีวัดคุณภาพที่สำคัญของแมคคาเดเมียเนื่องจากแมคคาเดเมียนั้นประกอบด้วยไขมันมากกว่า 80% หากมีการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีและการเกิดกลิ่นหืนระหว่างกระบวนการอบแห้งก็สามารถที่จะออกแบบกรรมวิธี สภาวะที่ใช้ในการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม ยิ่งไปกว่านั้นหากระหว่างการอบแห้งสามารถใช้ตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนที่เป็นก๊าซชนิดอื่นที่ไม่มีส่วนประกอบของออกซิเจนจะสามารถช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่นำไปสู่กลิ่นหืนในระหว่างการอบแห้ง

<u>การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน</u>

การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer, HPD) ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากสามารถนำเอาพลังงานมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศหลังการอบแห้ง การทำงานของปั๊มความร้อนในระบบปิดอย่างสมบูรณ์พบว่ามีการสูญเสียปริมาณความร้อนจำเพาะต่ำที่สุด (วราภรณ์ สมชาติ และ ธนิต, 2542)

Raghupathy (2003) พบว่าการอบแห้งแมคคาเดเมียทั้งกะลาโดยวิธีปั๊มความร้อน แมคคาเดเมียจะมีคุณภาพสี และกลิ่นใกล้เคียงกับวัตถุดิบก่อนอบ การอบแห้งโดยวิธีนี้ยังช่วยรักษาปริมาณสารระเหย และมีประสิทธิภาพการทำงานสูงเกือบ 100%

การใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศคือการแทนที่อากาศที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนด้วยก๊าซชนิดอื่นๆเช่น N_2 หรือ CO_2 จากการวิจัยของ Hawlader และคณะในปี 2006 พบว่าในการอบแห้งขิงด้วยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศพบว่าสามารถป้องกันการสูญเสียสารให้กลิ่นรสเฉพาะของขิง (6-gingerol) ได้สูงสุดเมื่อใช้ N_2 เปรียบเทียบกับ CO_2 และอากาศปกติ ตามลำดับ การใช้ N_2 สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชั่นในระหว่างการอบแห้งได้

การเลือกใช้วิธีการอบแห้งที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติจริงได้นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น วัตถุประสงค์ในการผลิต วัตถุดิบ (องค์ประกอบและต้นทุน) จลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์และค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน จึงควรมีการศึกษาให้ครบถ้วนทุกปัจจัยเพื่อใช้พิจารณาในการเลือกวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์อาหารหนึ่งๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความเป็นไปได้ในการนำปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ มาใช้ในการอบแห้งแมคคาเดเมียซึ่งเป็นผลิตผลที่เป็นที่ต้องการของตลาดสูง มีราคาแพง จึงจำเป็นต้องศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีน้ำตาลและกลิ่นหืนระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแมคคาเดเมียระหว่างการ

อบแห้ง รวมถึงศึกษาค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน นำข้อมูลที่ได้มาหาจุดเหมาะสมในการออกแบบการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ โดยคำนึงถึงแง่ของจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง พร้อมทั้งชนิดของบรรจุภัณฑ์ และวิธีการเก็บรักษา เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมการแปรรูปแมคคาเดเมียในประเทศไทย

4. ขั้นตอนการวิจัย

4.1 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ

นำแมคคาเดเมียสด จาก ต.โป่งแยง อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ มาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพดังนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

- ขนาดของเมล็ด
- สี (Hunter system L, a, b, เครื่องวัดสี Minolta CR300, Japan)

4.1.2 สมบัติทางเคมี

- องค์ประกอบทางเคมี (ความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรท เถ้า ใยอาหาร), (AOAC, 1995)
- ค่า Water activity (เครื่องวัดน้ำอิสระ)
- ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง (DNSA method-AOAC, 1995)
- การเกิดกลิ่นหืน - Peroxide value (AOCS, 1998)

วิเคราะห์ค่าต่างๆ 3 ซ้ำ

4.2 ศึกษาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการเปลี่ยนขั้นตอน และผลเบื้องต้นของการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน เปรียบเทียบกับวิธีตามแบบอุตสาหกรรม

4.2.1 ศึกษาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการเปลี่ยนขั้นตอน

ดูรายละเอียดจาก Borompichaichartkul et al. (2009)

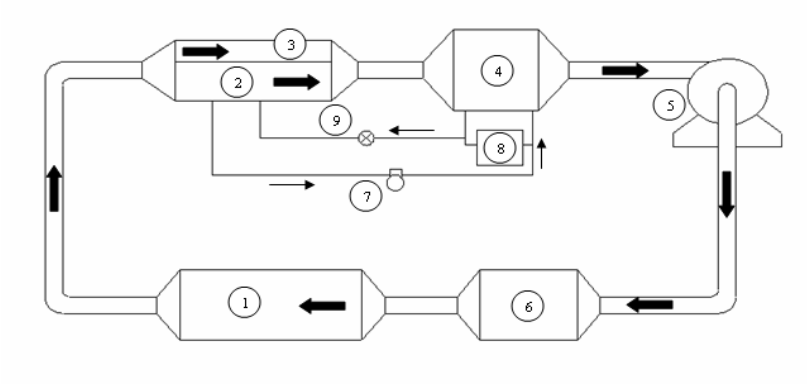
4.2.2 ศึกษาผลเบื้องต้นของการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน เปรียบเทียบกับวิธีตามแบบอุตสาหกรรม

อบแห้งแมคคาเมียปริมาณ 2 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน อบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ขั้นตอนสุดท้ายอบด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน (Australian Macadamia Society, 2004) นำแมคคาเดเมียที่อบแห้งแล้วไปวิเคราะห์คุณภาพ (สี ค่าเปอร์ออกไซด์ ความชื้น a_w และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง) ทดลอง 3 ซ้ำ เปรียบเทียบความแตกต่างกับแมคคาเดเมียที่อบด้วยปั๊มความร้อนที่ 40 $^{\circ}$C ร่วมกับลมร้อนที่ 50°C

4.3 ศึกษาจลนพหศาสตร์ของอบแห้งแมคคาเดเมียโดยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศโดยใช้ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70 $^{\circ}$C

ก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง แมคคาเดเมียจะถูกปรับความชื้นให้มีค่าประมาณ 20 % มาตรฐานเปียก (w.b.) และนำมาอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนภายใต้การทดลองระบบปิด อบแห้งที่อุณหภูมิ 35, 40, 50, 60 และ 70°C โดยความเร็วลมในห้องอบแห้ง 0.5 เมตรต่อวินาที สัดส่วน by pass 30% ชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งที่ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ชั่งน้ำหนักของแมคคาเดเมีย บันทึกน้ำหนักในระหว่างการอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นหาความชื้นสุดท้ายโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชม. เมื่อทราบค่าความชื้นสุดท้ายสามารถหาค่าความชื้นในแต่ละเวลา และหาอัตราส่วนความชื้นได้ ทดลองอบแห้ง 2 ซ้ำ

ระหว่างการอบแห้งสุ่มตัวอย่างระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆที่ช่วงเวลาต่างกันมา 5 ชุดมาตรวจสอบคุณภาพ (สี ค่าเปอร์ออกไซด์ ความชื้น a_w และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง) การอบแห้งใช้เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ 1.ห้องอบแห้ง 2.เครื่องทำระเหย 3.ท่ออากาศไหลข้ามเครื่องอบแห้ง 30% 4.เครื่องควบแน่นตัวใน 5.พัดลม 6.ขดลวดความร้อน 7.เครื่องอัดไอ 8.เครื่องควบแน่นตัวนอก 9.วาล์วลดความดัน

4.4 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแมคคาเดเมียระหว่างการอบแห้งโดยปั๊มความร้อนที่ อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70 $^{\circ}$C

นำอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ได้จากการทดลองที่ 4.3 มาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งเอมไพริคเคิล โดยใช้รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบางของ Henderson, Logarithmic, Two-term, Page และ Semi ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังต่อไปนี้

Henderson	$MR = A_0 \exp(-k_0 t)$	(1)
Logarithmic	$MR = A_0 \exp(-k_0 t) + c$	(2)
Twoterm	$MR = A_0 \exp(-k_0 t) + A_1 \exp(k_1 t)$	(3)
Page	$MR = (-k_0 t^n)$	(4)
Semi	$MR = \exp(-k_0 t)$	(5)

นำค่าคงที่มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์แบบแม่นยำระหว่างอุณหภูมิอบแห้งกับค่าคงที่ด้วยสมการ Quadratic ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังต่อไปนี้

$$\chi = aT^2 + bT + c$$

(6)

ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination; R^2) และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean of Squares Error; MSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของสมการในการทำนาย ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังต่อ ไปนี้

$$MSE = \frac{1}{N}(MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pred,i} - MR_{exp,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}MR_{pred,i}}{N} - MR_{pred,i}\right)^2} \quad (8)$$

เมื่อ

MR	Moisture ratio (dimensionless)	R^2	coefficient of determination
MR_{exp}	experimental moisture ratio (dimensionless)	t	drying time, minute
MR_{pred}	predicted moisture ratio (dimensionless)	N	number of observations
MSE	mean of square error	X	parameter of empirical equation
a, b, c	coefficient of polynomial	k_0, k_1	drying rate constants (1/s)
A_0, A_1, c, n	empirical constants	T	temperature (°C)

4.5 ทดลองหา Moisture sorption isotherms ของแมคคาเดเมีย โดยวิธี static gravimetric โดยใช้สารละลายเกลือที่มีค่า water activity ระดับ 0.1-0.9 ที่อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70°C

4.5.1 วิธีเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว

เตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว 9 ชนิด ได้แก่ NaCl, KCl , $MgCl_2$, CH_3COOK, NaBr , KNO_3 , $NaNO_2$, LiCl , K_2CO_3 ที่มีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 11-92% ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50°C

สารละลายเกลือ	% RH				
	35°C	**40°C**	**50°C**	**60°C**	**70°C**
LiCl	11.28 a	11.21 a	11.10 a	10.95 a	10.75 a
CH_3COOK	21.61 a	21.00 b	19.00 c	16.00 d	-
$MgCl_2$	32.44 a	31.60 a	30.54 a	29.26 a	27.77 a
K_2CO_3	43.17 a	43.00 b	41.00 c	39.21 a	-
NaBr	56.03 a	53.17 a	50.93 a	49.66 a	49.70 a

สารละลายเกลือ	% RH				
	35°C	**40°C**	**50°C**	**60°C**	**70°C**
$NaNO_2$	64.00 b	61.00 b	60.00 c	-	-
NaCl	75.09 a	74.68 a	74.43 a	74.50 a	75.06 a
KCl	83.62 a	82.32 a	81.20 a	80.25 a	79.49 a
KNO_3	92.31 a	89.03 a	84.78 a	-	-

เมื่อ a: Greenspan (1977), b: Yan, Sousa-Gallagher, and Oliveira (2008), c: Honga, et al. (2002), d: Menkov (2000)

โดยละลายเกลือแต่ละชนิดในบีกเกอร์ 100 ml ด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 75°C บน hot plate จนเกลืออิ่มตัว สังเกตว่ามีเกล็ดเกลืออยู่ในสารละลาย แล้วเทสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ได้ลงในโถจากนั้นตั้งโถสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิที่ใช้ทดลองเป็นเวลา 7 วัน (ทดลองที่อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70 °C) เพื่อให้สารละลายเกลือเข้าสู่สมดุล โดยคนสารละลายเกลือทุกวัน

4.5.2 การหาเส้น moisture sorption isotherm

1. ชั่งน้ำหนักจานรองแก้ว บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
2. กะเทาะเปลือกถั่วแมคคาเดเมียด้วยปากกาจับชิ้นงาน บดด้วยครกให้ละเอียด
3. ใส่ถั่วแมคคาเดเมียที่บดแล้วในจานรองแก้ว 2 กรัม โดยชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
4. เกลี่ยถั่วแมคคาเดเมียให้กระจายทั่วๆ จานแก้ว
5. ใส่จานแมคคาเดเมียลงในโถสารละลายเกลืออิ่มตัวที่เตรียมไว้แล้ว เก็บที่อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70°C
6. ใส่โทลูอีน 1.2 ml เพื่อป้องกันเชื้อราโดยใช้สำลีชุบโทลูอีนใส่ลงในแก้วขนาดเล็กปิดปากแก้วด้วยกระดาษอลูมิเนียมเจาะรู เพื่อให้โทลูอีนระเหยได้ แล้วใส่ลงในโถเกลืออิ่มตัว
7. ชั่งน้ำหนักจานถั่วแมคคาเดเมียทุก 3 วัน จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ (±0.001 กรัม)
8. สังเกตการเปลี่ยนสีและกลิ่น บันทึกผล

4.5.3 การหาความชื้นสมดุล

บันทึกน้ำหนักสุดท้ายของถั่วแมคคาเดเมียทุกจานจากนั้นหาความชื้น และคำนวณหาความชื้นสมดุล % (d.b.)

4.5.4 การสร้างเส้น Moisture Sorption Isotherm

พลอตค่า %EMC ของถั่วแมคคาเดเมียในสารละลายเกลือแต่ละชนิดกับ %RH หรือ a_w ของสารละลายเกลืออิ่มตัวนั้น

4.5.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณค่าทางสถิติ (Microsoft Office Excel 2003) ประมวลผลสร้างแบบจำลอง BET และ GAB เพื่อทำนายเส้นความชื้นซอร์พชันไอโซเทอมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

4.6 หาจุดที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศโดยคำนึงในแง่ของจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (สี กลิ่นหืน และ a_w) และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานของการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ

อบแมคคาเดเมียทั้งกะลาที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20 % (w.b.) ที่สภาวะต่างๆ ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยใช้ปั๊มความร้อน

สภาวะ	ขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	ตัวกลาง	ขั้นตอนที่ 2 อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	ตัวกลาง
1	40	อากาศ	50	อากาศ
2	40	อากาศ	60	อากาศ
3	40	อากาศ	50	ไนโตรเจน
4	40	อากาศ	60	ไนโตรเจน
5	40	ไนโตรเจน	50	อากาศ
6	40	ไนโตรเจน	60	อากาศ
7	40	ไนโตรเจน	50	ไนโตรเจน
8	40	ไนโตรเจน	60	ไนโตรเจน

ให้สัญลักษณ์ A = อากาศ, N = ไนโตรเจน

-ขั้นตอนอบแห้งที่ 1 อบแห้งแมคคาเดเมียจนความชื้นลดลงเหลือ 10-11 % (d.b.) ที่อุณหภูมิ 40 $^{\circ}$C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

-ขั้นตอนอบแห้งที่ 2 อบแห้งแมคคาเดเมียจนความชื้นลดลงเหลือ 1-4 % (d.b.)

เลือกภาวะการอบแห้งโดยปั๊มความร้อน (อุณหภูมิ และ ตัวกลาง (อากาศ, ไนโตรเจน) ที่เหมาะสม ทดลองอบแห้งแมคคาเดเมีย จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 1-4 % (d.b.) วิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพดังนี้

- ความชื้นทั้งกะลา (AOAC, 1995)
- Water activity
- น้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง (DNSA method-AOCA, 1995)
- Peroxide value (AOCS, 1998)
- สี (L a b) และค่าความต่างของสี (ΔE) จาก สมการดังนี้

$$\Delta E = [(L_0 - L_1)^2 + (a_0 - a_1)^2 + (b_0 - b_1)^2]^{1/2} \quad (9)$$

วิเคราะห์ค่าต่างๆ อย่างละ 3 ซ้ำ และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละภาวะการอบแห้งโดยใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

จากนั้นศึกษาสมรรถนะการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนโดยใช้ไนโตรเจนและอากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ที่สภาวะต่าง ๆ

ตัวอย่างการคำนวณสมรรถนะการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนโดยใช้ไนโตรเจนและอากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง

ขั้นตอนแรก อบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง (40A)

1. การคำนวณอัตราการควบแน่นน้ำจากเครื่องทำระเหย (Moisture extraction rate : MER)

MER = (ปริมาณน้ำที่ควบแน่นจากเครื่องทำระเหย) / (เวลาในการอบแห้ง)

MER = 1.012 / 16

= 0.063 kg water cond. / h

2. การคำนวณหาค่าความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหย ($Q_{e,a}$) จากสมการ

$Q_{e,a}$ = $m_e C_p(T_{ei,a} - T_{eo,a}) + MER\ h_{fg}$

m_e = $(1-BP)\ m_a$

= (1-0.3) x 0.14

= 0.098 kg/s

h_{fg} = $2502 - 2.386(T_{ei,a} + T_{eo,a})/2$

= 2502 - 2.386(39.6 + 28.5)/2

= 2420.76 kJ/kg

$Q_{e,a}$ = $0.098\ \frac{kg}{s} \times 1.00752\ \frac{kJ}{kg\,^oC}\ (39.6-28.5)\,^oC + (0.063/3600)\ \frac{kg}{s}\ (2420.76)\ \frac{kJ}{kg}$

= 1.14 kW

3. การคำนวณหาค่าความร้อนสุทธิที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นตัวใน ($Q_{ci,a}$)

$Q_{ci,a}$ = $m_a C_p(T_{co,a} - T_{ci,a})$

$Q_{ci,a} = 0.14\ \frac{kg}{s} \times 1.00752\ \frac{kJ}{kg\,^oC}\ (38.8-32.2)\,^oC$

= 0.93 kW

4. การคำนวณหาค่าความร้อนสุทธิที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นตัวนอก ($Q_{x,a}$)

$Q_{x,a}$ = $Q_{e,a} + W_c - Q_{ci,a}$

$Q_{x,a}$ = 1.14 kw +1.39 kW – 0.93 kW

= 1.6 kW

5. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน ($COP_{hp,\ used}$) คำนวณจากความร้อนที่ระบายออกจากสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นตัวในด้านของวงจรอากาศ และพลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ (W_c)

$COP_{hp,\ used}$ = $Q_{ci,\ a}$/ W_c

$$COP_{hp,\ used} = \frac{0.93}{1.39}\frac{kW}{kW}$$

= 0.67

6. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน ($COP_{hp,\ sys}$) จากความร้อนที่ระบายออกจากสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นตัวในและตัวนอกของวงจรอากาศ และพลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ (W_c)

$COP_{hp\ ,sys}$ = ($Q_{ci,\ a}$+ $Q_{x,a}$) / W_c

$$COP_{hp,\ sys} = \frac{0.93kW + 1.6kW}{1.39kW}$$

= 1.82

7. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน (COP_{sys}) จากความร้อนที่ระบายออกจากสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นตัวในและตัวนอกของวงจรอากาศ และพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (W_{totol})

COP_{sys} = ($Q_{ci,\ a}$+ $Q_{x,a}$) / W_{totol}

$$COP_{sys} = \frac{0.93kW + 1.6kW}{7.4kW}$$

= 0.34

8. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน ($COP_{hp,\ used}$) คำนวณจากความร้อนที่ระบายออกจากสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นตัวในด้านของวงจรอากาศ และพลังงานที่ป้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการทำความร้อนสำหรับการอบแห้ง (W_H+ W_C)

$COP_{hp,\ used}$ = $Q_{ci,\ a}$/ (W_H+ W_C)

$$COP_{hp,\ used} = \frac{0.93}{(1.39 + 4.84)}\frac{kW}{kW}$$

= 0.15

9. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน ($COP_{hp,\ sys}$) จากความร้อนที่ระบายออกจากสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นตัวในและตัวนอกของวงจรอากาศและพลังงานที่ป้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการทำความร้อนสำหรับการอบแห้ง (W_H+ W_C)

$$COP_{hp,sys} = (Q_{ci,a} + Q_{x,a}) / (W_H + W_C)$$

$$COP_{hp,sys} = \frac{0.93kW + 1.6kW}{(1.39 + 4.84)kW}$$

$$= 0.41$$

10. การคำนวณอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ ($SMER_{water,\ evap.}$) โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุ และปริมาณพลังงาน (kw-h) ที่ป้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการทำความร้อนสำหรับการอบแห้ง

$$SMER_{water,evap} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุ} \times h_{fg}}{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทำความร้อน(kW - h)}}$$

$$= \frac{0.127kg \times 2420.757kJ/kg}{99.69kW \times 3600J}$$

$$= 0.00086$$

11. การคำนวณอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ ($SMER_{water,\ cond.}$) โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ควบแน่นจากเครื่องทำระเหย และปริมาณพลังงาน (kw-h) ที่ป้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการทำความร้อนสำหรับการอบแห้ง

$$SMER_{water,cond} = \frac{\text{ปริมาณน้ำควบแน่น} \times h_{fg}}{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทำความร้อน(kW - h)}}$$

$$= \frac{1.012kg \times 2420.757kJ/kg}{99.69kW \times 3600J}$$

$$= 0.109$$

เมื่อ

$T_{ei,a}$ คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย (°C)

$T_{eo,a}$ คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำระเหย (°C)

$T_{ci,a}$ คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่นตัวใน (°C)

$T_{co,a}$ คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่นตัวใน (°C)

m_e คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย (อัตราส่วนอากาศที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหย 30 เปอร์เซ็นต์)

m_a คือ อัตราการไหลรวมของอากาศ (kg/s)

h_{fg} คือ เอนทัลปีของการระเหยน้ำ (kJ/kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของตัวกลางอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ (kJ / kg °C)

4.7 ศึกษาชนิดของบรรจุภัณฑ์ และวิธีการเก็บรักษาแมคคาเดเมียอบแห้ง

เลือกใช้บรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่ Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) ขนาด 8 x 13 cm และ Aluminium Laminated Foil (OPP/AL/PE/LLDPE) (ALF) ขนาด 8 x 13 cm ดังแสดงในรูป 2

LLDPE นิยมใช้เป็นชั้นป้องกันความชื้นโดยการเคลือบกับ PE แต่ป้องกันออกซิเจนได้ไม่ดีนัก มีราคาถูกกว่า Aluminium Laminated Foil ซึ่งมีสมบัติป้องกันไอน้ำ ก๊าซ และแสง ได้ดี

รูปที่ 2 บรรจุภัณฑ์ชนิด Aluminium Laminated Foil (ซ้าย) และ บรรจุภัณฑ์ชนิด Linear Low Density Polyethylene (ขวา)

นำแมคคาเดเมียมาหาความชื้นเริ่มต้นหลังการอบแห้ง ตามวิธี AOAC (1995) และวิเคราะห์คุณภาพก่อนการบรรจุโดยวัดค่าต่อไปนี้

- วิเคราะห์ ค่าเปอร์ออกไซด์ เริ่มต้น (AOCS, 1998)
- วิเคราะห์ น้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง เริ่มต้น โดยวิธี DNSA method (AOAC, 1995)
- วัดสีแมคคาเดเมียเริ่มต้นโดยสุ่มแมคคาเดเมีย 10 เมล็ด ใช้เครื่องวัดสี Minolta CR 300
- วัดค่า water activity (a_w) โดยสุ่มแมคคาเดเมีย 10 เมล็ด

บรรจุแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิดวางในสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ชั่งน้ำหนักจนสมดุลแล้วนำไปวิเคราะห์ผลหาความชื้นสุดท้าย และวิเคราะห์คุณภาพหลังจากสมดุลโดยวัดค่าเช่นเดียวกับค่าก่อนการบรรจุ ในทุกบรรจุภัณฑ์

5. ผลการวิจัย

5.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบเริ่มต้น

ในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแมคคาเดเมีย มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบคุณภาพแมคคาเดเมียภาย หลังการอบแห้งที่ภาวะต่างๆ ได้ สมบัติทางกายภาพและเคมีของแมคคาเดเมียเริ่มต้นแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบเริ่มต้น

สมบัติทางกายภาพ	**ค่าเฉลี่ย[1] ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน**	
ขนาดทรงกลม	เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.63±0.06 cm	
ค่าสีของเนื้อในแมคคาเดเมีย	ภายนอก	ภายใน
	L* = 63.88±5.65 a* = 1.96±0.79 b* = 24.94±2.58	L* = 65.71±8.07 a* = -0.25±0.86 b* = 17.42±1.88
สมบัติทางเคมี		
Specific gravity	SG≤1	
ความชื้น Nut-in-shell (NIS)	14.05±0.76 %db	
ค่า a_w	0.85±0.01	
ปริมาณไขมัน	78.22±0.75% dry basis	
Peroxide value	0.22±0.01 meq O_2/kg oil	
Ash	1.41±0.16% dry basis	
Protein	7.24±0.23% dry basis	
Reducing sugar	0.10±0.01 g/100g wet basis	

[1]ค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแมคคาเดเมียมีปริมาณไขมันที่สูงมากกว่า 70% และ มีปริมาณโปรตีนที่สูงเช่นเดียวกัน กรดไขมันในแมคคาเดเมีย (ตารางที่ 4) เมื่อวิเคราะห์พบว่า มี กรดโอเลอิคเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 60 % ตามด้วย กรดปาล์มิโตเลอิค 15% ซึ่งกรดไขมันทั้ง 2 นี้เป็นกรดไขมันที่มีคุณภาพสูง เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว โดยไขมันประเภทนี้ช่วยลดระดับปริมาณคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ ในกระแสเลือดทำให้ไม่เกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด (Grag et al., 2003) การศึกษาวิจัยในชายที่มีปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือดสูง จำนวน 17 คน โดยให้รับประทานแมคคาเดเมียปริมาณ 40-90 กรัม/วัน พบว่า ในกระแสเลือดของผู้ถูกศึกษามีระดับคอเลสเตอรอลทั้งหมด และคอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอล (LDL-Cholesterol) ลดลง 3.0 และ 5.3% ตามลำดับ และระดับคอเลสเตอรอลชนิดเอชดีแอล (HDL-Cholesterol) เพิ่มขึ้น 7.9% จึงอาจช่วยป้องกันไม่ให้เกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Salmolin และ Grosvenor (2000) ศึกษากลุ่มประชากรในแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน ซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมบริโภคอาหารที่มีไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวสูง โดยการ

บริโภคน้ำมันมะกอกเป็นประจำ พบว่ามีอัตราการตายด้วยโรคหัวใจเพียงครึ่งหนึ่งของประชากรในอเมริกา การบริโภคไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวในปริมาณเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 40 ของพลังงานทั้งหมด จะช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอล และไม่มีผลต่อปริมาณคอเลสเตอรอลชนิดเอชดีแอล นอกจากนี้ยังทำให้คอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอล ถูกออกซิไดส์น้อยลงอีกด้วย

ตารางที่ 4 ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่พบในวัตถุดิบเริ่มต้น

Fatty acid	**g/100g oil**
C12:0	0.05
C14:0	0.43
C16:0	7.47
C16:1 (โอเมก้า 7)	15.15
C18:0	3.90
C18:1(โอเมก้า 9)	62.29
C18:1(โอเมก้า 7)	-
C18:2(โอเมก้า 6)	0.33
C18:3(โอเมก้า 3)	0.11
C20:0	3.20
C20:1(โอเมก้า 9)	2.63
C22:0	0.88
C22:1	0.24
C24:0	1.50

C12:0 =Lauric acid, C14:0 =Myristic acid, C16:0 =Palmitic acid, C16:1 =Palmitoleic acid, C18:0 =Stearic acid, C18:1 =Oleic acid, C18:2 =Linoleic acid, C18:3 =Linolenic acid, C20:0= Arachidic acid, C20:1= Eicosenic acid, C22:0= Behenic acid, C22:1= Erucic acid and C24:0= Linoceric acid

5.2 ศึกษาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการเปลี่ยนขั้นตอน และผลเบื้องต้นของการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน เปรียบเทียบกับวิธีตามแบบอุตสาหกรรม

5.2.1 ศึกษาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการเปลี่ยนขั้นตอน

ดูรายละเอียดผลการทดลองจาก Borompichaichartkul et al. (2009)

5.2.2 ศึกษาผลเบื้องต้นของการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน เปรียบเทียบกับวิธีตามแบบอุตสาหกรรม

ตารางที่ 5 คุณภาพแมคคาเดเมียหลังอบแห้งด้วยวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมกับวิธีปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน

คุณภาพ			วิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรม	ปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน
ปริมาณความชื้น (% d.b.)			1.03±0.06	1.47±0.08
ค่า a_w			0.29±0.00	0.34±0.01
ค่าสี	L	ภายนอก	68.31±8.18	70.14±3.98
		ภายใน	68.51±10.32	73.62±3.63
	a	ภายนอก	4.20±3.66	1.74±1.68
		ภายใน	3.98±4.76	-1.56±0.31
	b	ภายนอก	27.94±2.4	26.86±2.10
		ภายใน	25.99±3.93	22.12±0.71
ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)		ภายนอก	7.06±3.66	4.33±0.37
		ภายใน	11.95±7.96	4.11±0.7
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง (g/100g)			0.15±0.00	0.21±0.00
ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq O_2/kg oil)			11.24±1.46	5.67±0.58

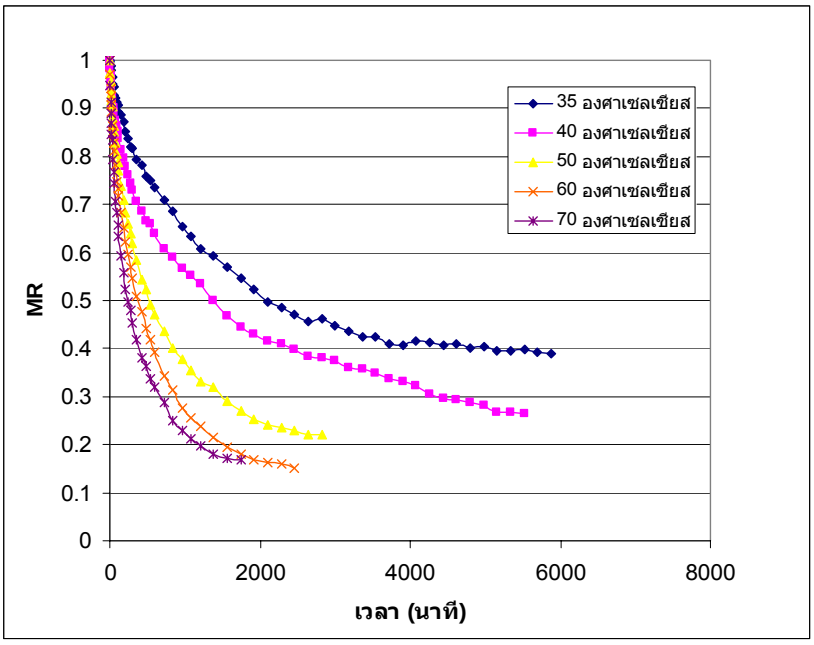
จากการทดลองพบว่าคุณภาพแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งด้วยวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรม แมคคาเดเมีย มีสีเข้มและเกิดสีน้ำตาลกลางเมล็ด มีค่าสี L น้อยกว่าวิธีปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน และค่าสี a และ ค่าสี b สูงกว่าวิธีปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งของแมคคาเดเมียที่ได้จากวิธีที่การอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งเหลือน้อยกว่าวิธีปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งถูกใช้ไปในปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล จากการวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ของแมคคาเดเมียที่ได้จากวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีค่าสูงกว่าวิธีที่ได้จาก

การทดลองถึง 2 เท่า แสดงถึง การอบแห้งด้วยวิธีปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C สามารถผลิตแมคคาเดเมียอบแห้งที่มีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรม จากการทดลองเบื้องต้นนี้แสดงให้เห็นว่าการนำปั๊มความร้อนมาใช้สามารถลดเวลาในการอบแห้งและรักษาคุณภาพแมคคาเดเมียไว้ได้

5.3 จลนพลศาสตร์การอบแห้งแมคคาเดเมียโดยวิธีปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ (35 40 50 60 และ 70 °C) และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการอบแห้ง

5.3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งแมคคาเดเมีย

ในส่วนนี้ทดลองหาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแมคคาเดเมียโดยวิธีปั๊มความร้อนโดยใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ที่อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70 °Cได้ความสัมพันธ์ระหว่าง moisture ratio และ เวลา ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง moisture ratio และเวลาในการอบแห้งแมคคาเดเมียทั้งกะลาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และ MR สามารถนำมาสร้างสมการทำนายการอบแห้งแบบเอมไพริเคิล สมการอบแห้งเอมไพริเคิล คือ สมการอบแห้งที่ได้มาจากการทดลอง สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี การประยุกต์ใช้สมการอบแห้งเอมไพริเคิลเพื่อทำนายและติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของแมคคาเดเมีย สมการที่เหมาะสมจะสามารถทำนายค่าความชื้นในแต่ละเวลาระหว่างการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม ทำให้ทราบเวลาสิ้นสุดการอบแห้งได้ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเสื่อมเสียของคุณภาพเนื่องจากการอบแห้งที่ใช้เวลานานเกินไป และลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลง

การทดลองอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน ในช่วงเวลาเริ่มต้นความชื้นจะค่อยๆลดลง และเมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้นความชื้นจะลดลงช้ามาก เพราะแมคคาเดเมียมีกะลาแข็งและหนามากทำให้ความชื้นจากภายในเคลื่อนที่ออกมาผิวภายนอกได้ยาก จากการทดลอง

พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 35°C จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยกฎของ Fick ซึ่งอัตราการแพร่ของน้ำขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ซึ่งมีค่ามากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เมื่อนำอัตราส่วนความชื้นและเวลาของการอบแห้งมาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ แล้วนำค่าคงที่มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์แบบแม่นตรงระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ด้วยสมการ Quadratic จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient Determination; R^2) และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (mean of Squares Error; MSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของสมการในการทำนายดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 ซึ่งผลการทดลองพบว่า สมการของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นและเวลาในการอบแห้งแมคคาเดเมียมากที่สุดโดยให้ค่า R^2 สูงสุดและค่า MSE ต่ำสุด สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทำนายมาประกอบการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยปั๊มความร้อน

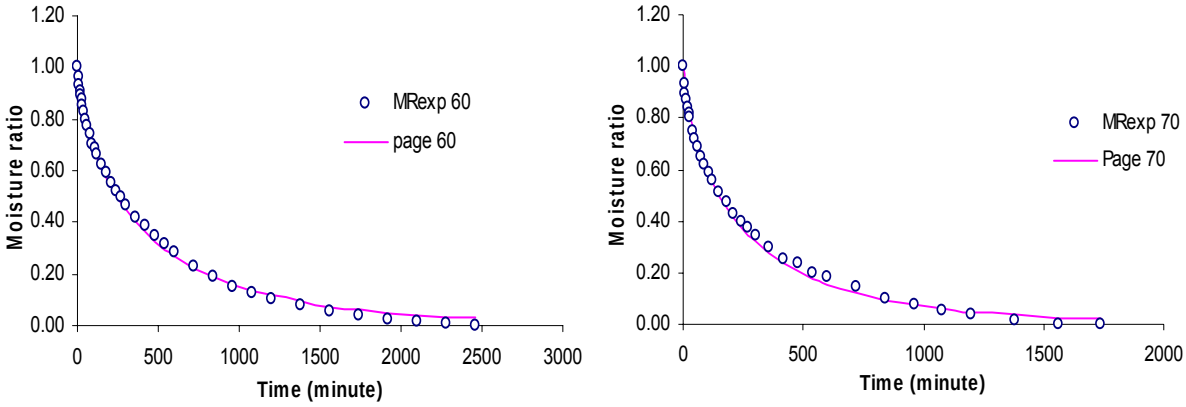
ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆที่ได้จากการสมการ

Equation		Parameter in Quadratic Relationship			
		a	b	c	R^2
Henderson	A_0	-2.37E-06	-0.000540848	0.941865026	0.22691
	K_0	8.24E-07	-0.0000167	0.000294963	0.96663
Logarithmic	A_0	0.00001706	-0.002829617	0.979954625	0.17528
	K_0	1.07E-06	-0.000032417	0.000631318	0.97437
	c	-0.000022788	0.002714088	-0.041227482	0.09287
Two term	A_0	0.000753404	-0.072223164	1.991238796	0.22222
	K_0	-0.000026265	0.002735736	-0.056523601	0.16892
	A_1	-0.000733501	0.069853571	-0.939030572	0.21493
	k_1	4.04E-05	-0.003766334	0.087461675	0.77406
Page	K_0	7.86E-06	- 0.000411317	0.010395671	0.85823
	n	5.35E-05	-0.007203655	0.949789374	0.16017
Semi	K_0	1.27E-06	-4.49E-05	0.000868263	0.9752

ตารางที่ 6 ค่า R^2 และ MSE จากสมการที่เลือก

Equation	R^2	MSE
Henderson	0.984932214	0.001765226
Logarithmic	0.986582359	0.001506727
Two term	-0.197680199	0.05578856
Page	0.989917267	0.001335501
Semi	0.968651987	0.004421026

นำอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของสมการอบแห้งเอมไพริเคิลมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความ ชื้นจากการทดลองดังแสดงใน รูปที่ 4



(a) (b)

รูปที่ 4 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองและสมการ Page ที่การอบแห้ง (a) 60°C (b) 70°C

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลง อัตราการลดความชื้นที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ การอบแห้งแมคคาเดเมียที่ 35 °C จนให้มีความชื้นต่ำกว่า 4% (d.b.) ใช้เวลานานเกินไป หากใช้ตัวกลางอื่นที่ไม่ใช้อากาศ เช่น ไนโตรเจนก็จะสิ้นเปลืองก๊าซไนโตรเจนมาก สำหรับอุณหภูมิ 70 °C สามารถลดความชื้นของแมคคาเดเมียให้ต่ำกว่า 2% (d.b.)ได้อย่างรวดเร็ว แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มและมีกลิ่นหืนมาก ในขณะที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะดี สีขาวนวลและมีกลิ่นอ่อนๆ จึงเลือกอุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C มาศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของแมคคาเดเมียในระหว่างและหลังการอบแห้งโดยวิธีปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศต่อไป

5.3.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแมคคาเดเมียในระหว่างและหลังการอบแห้งโดยวิธีปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ (40 50 และ 60 °C)

ในระหว่างการอบแห้งแมคคาเดเมียที่ อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C สุ่มตัวอย่างแมคคาเดเมียก่อนการอบแห้ง ระหว่างการอบแห้ง และ หลังการอบแห้ง มาวิเคราะห์คุณภาพได้แก่ สีภายในและภายนอกเมล็ด ค่าเปอร์ออกไซด์ น้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง a_w และความชื้น ซึ่งค่าต่างๆ แสดงในตารางที่ 7

การอบแมคคาเดเมียในขั้นตอนแรก ควรเริ่มต้นที่อุณหภูมิไม่เกิน 40°C และ เพิ่มอุณหภูมิได้เมื่อความชื้นเริ่มต้นลดลงต่ำกว่า 10-11 % (d.b.) (Prichavudhi and Yamamoto, 1965; Borompichaichartkul et al., 2009) ดังนั้นจึงเปรียบเทียบคุณภาพของแมคคาเดเมียที่ความชื้น 10-11% (d.b.) ของแต่ละสภาวะ (40 °C-16 ชั่วโมง, 50°C-8 ชั่วโมง, 60°C-4.3 ชั่วโมง) เมื่อวิเคราะห์คุณภาพของแมคคาเดเมียที่อบแห้งโดยปั๊มความร้อนโดยใช้ตัวกลางที่เป็นอากาศ พบว่าที่อุณหภูมิ 40°C การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านค่าเปอร์ออกไซด์ต่ำกว่าการ

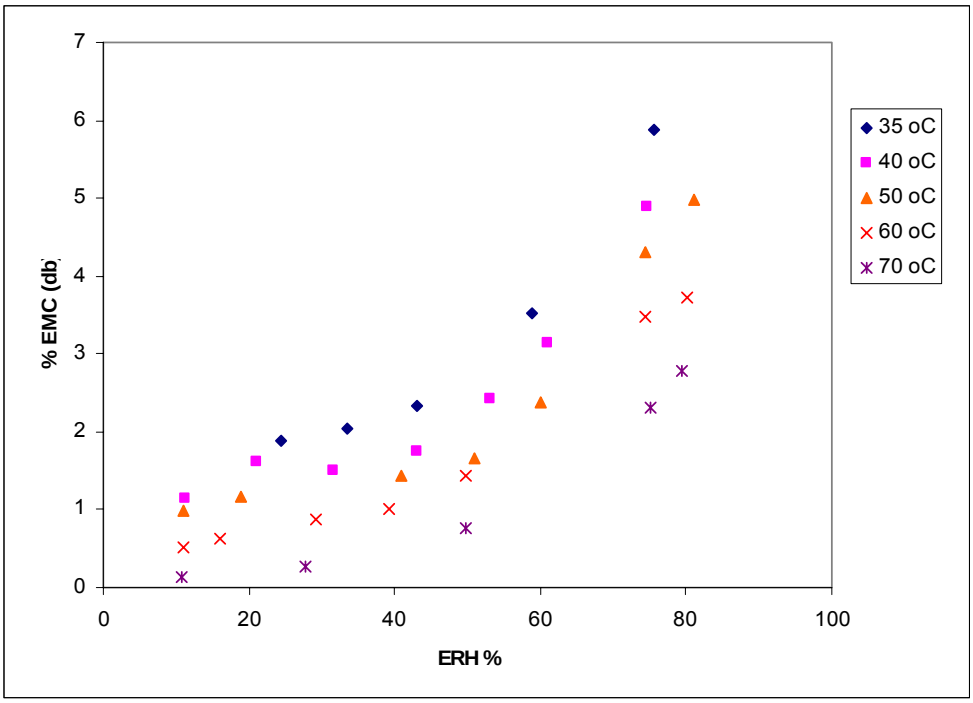
อบแห้งที่ 50 และ 60°C ส่วนค่าความสว่างของเมล็ด (L value) และการเกิดสีเหลือง (b value) ทั้งภายนอกและภายในเมล็ดแมคคาเดเมียในทั้งสามสภาวะไม่แตกต่างกัน จึงเลือกอุณหภูมิที่ 40°C ในการอบแห้งขั้นตอนแรกลดความชื้นลงเหลือ 10-11% (d.b.) และเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2 เป็น 50 °C และ 60 °C จากนั้นศึกษาความประสิทธิภาพและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ซึ่งการหาจุดที่เหมาะสมในการอบแห้งผลการทดลองแสดงในหัวข้อ 5.5

ตารางที่ 7 คุณภาพของแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40-60 °C

60°C		MC		PV	External colour				Internal colour				
ตัวอย่างที่	Drying Time (h)	% (d.b.)	a_w	$meqO_2/kg$ oil	L	a	b	ΔE	L	a	b	ΔE	reducing sugar (mg/100g)
1	0	20.34	0.92	0.22	64.39	2.84	24.23		69.99	-0.80	18.07		0.532
2	**4.3**	**9.54**	**0.64**	**0.92**	**65.00**	**2.18**	**24.96**	**0.67**	**69.54**	**-1.16**	**19.27**	**0.89**	**0.367**
3	7	5.09	0.6	1	65.21	2.91	24.46	0.37	70.45	-0.71	19.45	1.07	0.291
4	14	2.66	0.485	2.1	67.24	2.29	25.50	5.01	72.25	-1.01	19.43	3.51	0.365
5	41	2.24	0.48	2.2	64.06	6.28	27.24	10.51	69.21	2.36	23.12	18.06	0.435
50°C													
1	0	20.51	0.95	0.22	63.22	2.75	22.59		71.91	-0.97	16.56		0.634
2	4.3	11.78	0.71	0.67	65.10	1.66	25.93	7.96	69.38	-1.56	19.36	7.31	0.587
3	**8**	**10.55**	**0.64**	**0.83**	**64.96**	**1.86**	**25.23**	**5.39**	**68.48**	**-1.26**	**18.70**	**8.23**	**0.488**
4	16	8.45	0.55	1.1	65.46	2.50	25.88	7.94	72.38	-1.39	19.76	5.33	0.415
5	50	2.78	0.52	1.3	67.16	3.67	26.70	16.66	72.33	0.40	21.87	15.11	0.398
40°C													
1	0	20.12	0.92	0.22	63.22	2.75	22.59		71.91	-0.97	16.56		0.712
2	8	15.31	0.71	0.49	63.09	2.48	23.61	0.57	68.93	-0.90	18.35	6.06	0.708
3	**16**	**10.98**	**0.61**	**0.59**	**65.35**	**1.86**	**24.90**	**5.34**	**69.17**	**-1.01**	**19.43**	**7.87**	**0.446**
4	38	5.51	0.54	0.69	69.08	2.22	24.87	19.91	73.30	-0.63	19.77	6.17	0.537
5	98	2.13	0.48	0.96	68.11	2.96	25.45	16.07	72.88	-0.17	19.92	6.42	0.487

5.4 Moisture sorption isotherms ของแมคคาเดเมียที่อุณหภูมิต่าง ๆ (35 40 50 60 และ 70 °C)

การสร้างเส้น Moisture sorption isotherm ทำได้โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นสมดุล (% EMC) กับความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (% ERH) ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ในการทดลองนี้คืออุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70 °C เมื่อนำค่า EMC ที่ได้จากการทดลองพล็อตกับค่า ERH แสดงได้ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 Moisture sorption isotherm ของถั่วแมคคาเดเมียที่อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70 °C ที่ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 4 พบว่าที่ % ERH เดียวกัน ค่า EMC มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ค่าพลังงานในโมเลกุลของน้ำมีค่ามากขึ้นและถ้ามีพลังงานมากพอที่จะสลายพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเองหรือระหว่างโมเลกุลของน้ำที่ยึดติดกับเนื้อเยื่อ ทำให้น้ำสามารถระเหยออกไปได้ และหากพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่า EMC มีค่าสูงขึ้นเมื่อ %ERH เพิ่มขึ้น

การสร้างแบบจำลอง Moisture Sorption Isotherm ของถั่วแมคคาเดเมียโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

ในส่วนนี้ได้ลองสร้างสมการการทำนาย EMC ของถั่วแมคคาเดเมีย โดยใช้แบบจำลองของ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับจากงานวิจัยหลายงาน และใช้กันโดยทั่วไปในการอธิบายสมบัติของอาหาร โดยแบบจำลองนี้มีค่าพารามิเตอร์สามค่าเป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากตัวแปรที่ได้จากการทดลองคือ ความชื้นสมดุล (EMC) และ water activity (a_w) ซึ่ง GAB model นี้สามารถ

ทำนายได้แม่นยำในช่วงของ a_w ที่กว้าง (0.1-0.9) โดยได้แสดงสูตรของแบบจำลอง และ ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 8 ตามลำดับ

GAB model

$$M = \frac{M_0 C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \tag{10}$$

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ใน GAB model ของถั่วแมคคาเดเมีย

อุณหภูมิ (°C)	M	K	C
35	1.609	0.994	23.044
40	1.317	1.009	9.384
50	0.947	1.084	23.689
60	1.040	0.916	3.685
70	0.959	0.936	0.799

ในการหาค่าคงที่นี้ใช้โปรแกรม Solver ใน Microsoft Office Excel โดยพิจารณาจากค่า RSS ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ โดยค่า RSS คือค่าความแตกต่างกำลังสองระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งแสดงได้ถึงความแม่นยำของแบบจำลอง อีกทั้งคำนวณได้จากค่า MRD ทั้ง RSS และ MRD มีสูตรดังนี้

$$RSS = \sum_{i=1}^{m} \left(\left(M_{eq,i} - \hat{M}_{eq,i} \right)^2 \right) \tag{11}$$

$$MRD = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{\left| M_{eq,i} - \hat{M}_{eq,i} \right|}{M_{eq,i}} \right) \tag{12}$$

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างค่า RSS และ ค่า MRD ของผลการทำนายค่าความชื้นสมดุลของสมการ GAB ของข้อมูลการทดลองชุดของ 35 40 และ 50 °C ในตารางที่ 9 - 12 ดังนี้

ตารางที่ 9 ความชื้นสมดุล (w.b. และ d.b.) และ RSS ที่ 35 °C โดยใช้ GAB model

Salt solution	ERH	%EMC (w.b.)	%EMC (d.b.)	%EMC (d.b. Model)	RSS
CH_3COOK	21.61	1.88	1.92	1.78	0.0184
$MgCl_2$	32.44	2.05	2.10	2.19	0.0085
K_2CO_3	43.17	2.34	2.40	2.68	0.0788
NaBr	56.03	3.52	3.64	3.53	0.0126
$NaNO_2$	63	4.19	4.38	4.22	0.0243
NaCl	75.09	5.87	6.23	6.29	0.0030
Total					0.1456

ตารางที่ 10 ความชื้นสมดุล (wb และ db) และ RSS ที่ 40 °C โดยใช้ GAB model

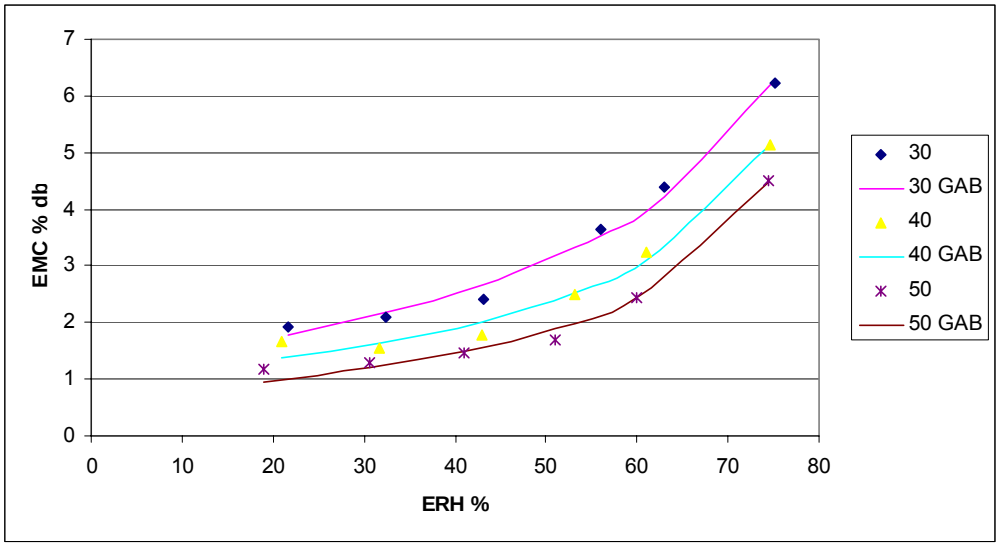
salt solution	ERH	%EMC (w.b.)	%EMC (d.b.)	%EMC (d.b. Model)	RSS
CH_3COOK	21	1.63	1.66	1.37	0.0832
$MgCl_2$	31.6	1.51	1.54	1.64	0.0098
K_2CO_3	43	1.75	1.78	2.02	0.0581
NaBr	53.17	2.42	2.48	2.52	0.0012
$NaNO_2$	61	3.13	3.23	3.10	0.0181
NaCl	74.68	4.88	5.13	5.14	0.0002
Total					0.1707

ตารางที่ 11 ความชื้นสมดุล (wb และ db) และ RSS ที่ 50 °C โดยใช้ GAB model

salt solution	ERH	%EMC (w.b.)	%EMC (d.b.)	%EMC (d.b. Model)	RSS
CH_3COOK	19	1.17	1.19	0.95	0.0582
$MgCl_2$	30.54	1.27	1.29	1.20	0.0070
K_2CO_3	40.91	1.44	1.46	1.49	0.0008
NaBr	50.93	1.67	1.70	1.89	0.0352
$NaNO_2$	60	2.37	2.43	2.44	0.0001
NaCl	74.43	4.30	4.50	4.48	0.0004
Total					0.1017

ตารางที่ 12 ค่า MRD จากการใช้แบบจำลอง GAB ทำนาย

อุณหภูมิ (°C)	MRD
35	0.0512
40	0.0652
50	0.0678



รูปที่ 5 Moisture sorption isotherm ของถั่วแมคคาเดเมียที่อุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C ทำนายโดย GAB model

จากตารางที่ 9-12 เห็นได้ว่าทั้งค่า RSS และค่า MRD มีค่าน้อย ซึ่งการทดลองที่มีความถูกต้องแม่นยำจะมีค่า RSS และ MRD เข้าใกล้ศูนย์หรือมีค่าน้อยที่สุด จากผลการทดลองนี้จึงถือได้ว่าการใช้ GAB model สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ

เมื่อหาค่าความชื้นในระดับ monolayer (M_o) ซึ่งเป็นความชื้นในระดับที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียสภาพน้อยที่สุด โดยใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BET (Brunaure, Emmet and Teller) ที่มีทฤษฎียอมรับกันโดยทั่วไปสำหรับการทำนายค่า M_o ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของ BET model มีสองค่าคือ M_o และ C โดยหาค่า M_o เพื่อที่จะเลือกสภาวะในการเก็บถั่วแมคคาเดเมียให้คงสภาพเดิมได้มากที่สุด โดยได้แสดงค่า M_o ดังตารางที่ 13

BET model

$$\frac{a_w}{M(1-a_w)} = \frac{1}{M_0 C} + \frac{a_w(C-1)}{M_0 C} \qquad (13)$$

ตารางที่ 13 ค่าความชื้นระดับ monolayer (M_o) ของแมคคาเดเมียที่ได้จาก GAB model และ BET model

อุณหภูมิ (°C)	GAB model			BET model	
	M_o	K	C	M_o	C
35	1.609	0.994	23.044	1.590	28.113
40	1.317	1.009	9.384	1.285	18.536
50	0.947	1.084	23.689	0.828	28.351
60	1.040	0.916	3.685	0.813	9.048
70	0.959	0.936	0.799	0.705	1.236

จากตารางที่ 13 เมื่อพิจารณาที่ค่า M_o จะเห็นได้ว่าค่า M_o ที่ได้จาก BET model มีค่าน้อยกว่าค่า M_o ที่ได้จาก GAB model ซึ่งให้ผลสอดคล้องตามหลักทฤษฎีของ Rao และคณะ (2005) ที่กล่าวไว้ว่า ค่า M_o ที่ได้จาก BET model มีค่าน้อยกว่าค่า M_o ที่ได้จาก GAB model ซึ่งการที่ค่า M_o ที่ได้จาก BET model มีค่าน้อยกว่านี้ ทำให้สามารถเลือกสภาวะการเก็บผลิตภัณฑ์ที่มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียสภาพได้น้อยกว่าได้

จากการทดลองพบว่าค่า M_o ที่ได้จาก BET model ที่อุณหภูมิ 35 40 50 60 และ 70°C มีค่า 1.590 1.285 0.828 0.813 และ 0.705 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นในระดับ monolayer มีค่าต่ำลงซึ่งอาจเนื่องมาจากที่กล่าวไว้แล้วว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าพลังงานในโมเลกุลของน้ำมีค่ามากขึ้น และถ้ามีพลังงานมากพอที่จะสลายพันธะจะทำให้น้ำระเหยง่ายขึ้น ค่าความชื้นจึงต่ำลง ดังนั้นหลังจากเก็บเกี่ยวถั่วแมคคาเดเมียต้องผ่านการอบแห้งถั่วแมคคาเดเมียให้เหลือความชื้นประมาณ 1-2 % เป็นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่จะเก็บรักษาถั่วแมคคาเดเมีย ซึ่งจากรูปที่ 4 จะได้ความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ควรใช้เก็บรักษาถั่วแมคคาเดเมียคือ 20-50 % โดยสภาวะนี้จะเป็นสภาวะที่ดีที่สุดที่จะเก็บรักษาถั่วแมคคาเดเมียอบแห้งให้เสื่อมเสียสภาพน้อยที่สุดและเก็บได้นานที่สุด moisture sorption isotherm ยังสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบสภาวะของตัวกลางในการอบแห้งที่ อุณหภูมิ 35-70 °C ที่ความชื้นสัมพันธ์ 10-90% ว่าสามารถจะลดความชื้นแมคคาเดเมียให้ต่ำกว่า 1-2%

(d.b.) ได้หรือไม่ โดยศึกษาจากความชื้นสมดุลในแต่ละสภาวะ ซึ่งจาก moisture sorption isotherm อบแห้งแมคคาเดเมียด้วยปั๊มความร้อน ที่ 40-60 °C ความชื้นสัมพันธ์ของตัวกลางควรต่ำกว่า 40% จึงจะสามารถลดความชื้นของแมคคาเดเมียลงได้ต่ำกว่า 2% (d.b.)

5.5 หาจุดที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศโดยคำนึงในแง่ของจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (สี กลิ่นหืน และ a_w) และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานของการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนโดยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ

จากผลการทดลองในข้อ 5.3 อุณหภูมิที่เหมาะสมที่เลือกมาใช้ในการอบแห้งโดยปั๊มความร้อนแบบหลายขั้นตอน โดยใช้ ไนโตรเจน และ อากาศเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน คือ ระหว่าง 40-60 °C ซึ่งในการทดลองที่ 5.3.2 พบว่า ใช้ อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีและกลิ่น มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ตรงกับการศึกษาของ Prichavudhi และ Yamamoto (1965) พบว่าการอบแห้งแมคคาเดเมียควรเริ่มต้นที่อุณหภูมิไม่เกิน 40°C และ เพิ่มอุณหภูมิได้เมื่อความชื้นเริ่มต้นลดลงต่ำกว่า 8-10 % (w.b.) ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ออกแบบขั้นตอนการอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 2 (หน้า 16)

หลังจากอบแห้งในแต่ละสภาวะแล้ว นำแมคคาเดเมียมากะเทาะเปลือกและวิเคราะห์คุณภาพตามขั้นตอนในข้อ 4.6 ทดลองอบแห้ง 2 ซ้ำ และวิเคราะห์คุณภาพ 3 ซ้ำ นำค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพมาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละภาวะการอบแห้งโดยใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ผลการวิเคราะห์คุณภาพแสดงในตารางที่ 14 - 17

ตารางที่ 14 เวลาในการอบแห้ง ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นกะลา (shell) และเนื้อใน (kernel) ของแมคคาเดเมียหลังการอบแห้ง

no.	Treatment	Total drying time (h)	Moisture content (% d.b.)		
			Kernel	Shell	MC (% d.b)
1	40A-50A	84	$5.40^{a} \pm 0.46$	$2.15^{bc} \pm 0.31$	$4.03^{a} \pm 0.45$
2	40A-60A	56	$4.73^{a} \pm 0.73$	$2.25^{b} \pm 0.40$	$3.54^{ab} \pm 0.47$
3	40A-50N	84	$2.56^{b} \pm 0.34$	$1.70^{cd} \pm 0.32$	$2.15^{d} \pm 0.28$
4	40A-60N	56	$2.98^{b} \pm 0.50$	$2.08^{bcd} \pm 0.15$	$2.52^{dc} \pm 0.23$
5	40N-50A	84	$3.00^{b} \pm 0.35$	$2.91^{a} \pm 0.46$	$2.95^{bc} \pm 0.60$
6	40N-60A	56	$3.05^{b} \pm 0.61$	$1.01^{e} \pm 0.13$	$1.98^{d} \pm 0.31$
7	40N-50N	84	$2.28^{b} \pm 0.32$	$2.48^{ab} \pm 0.53$	$2.41^{dc} \pm 0.16$
8	40N-60N	56	$4.74^{a} \pm 0.66$	$1.63^{d} \pm 0.38$	$3.28^{b} \pm 0.58$
F-test			**	**	**
CV (%)			14.76	15.33	14.37
LSD			0.78	0.45	0.59

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($p \leq 0.01$)

* มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.01$- 0.05)

NS ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่ตามด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ตารางที่ 15 ค่า a_w ของเนื้อในแมคคาเดเมียหลังการอบแห้ง

no.	Treatment	a_w
1	40A-50A	$0.355^{bc} \pm 0.01$
2	40A-60A	$0.363^{ab} \pm 0.01$
3	40A-50N	$0.338^{d} \pm 0.01$
4	40A-60N	$0.340^{dc} \pm 0.01$
5	40N-50A	$0.343^{dc} \pm 0.03$
6	40N-60A	$0.338^{d} \pm 0.02$
7	40N-50N	$0.363^{ab} \pm 0.01$
8	40N-60N	$0.373^{a} \pm 0.00$
F-test		**
CV (%)		7.86
LSD		0.02

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($p \leq 0.01$)

* มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.01$- 0.05)

NS ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่ตามด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ตารางที่ 16 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง และค่าเปอร์ออกไซด์ของเนื้อในแมคคาเดเมียหลังการอบแห้ง

no.	Treatment	Reducing sugar (mg/100g dry solid)	Peroxide value (meq O_2/kg oil)
1	40A-50A	$0.159^{bc} \pm 0.004$	$0.80^{c} \pm 0.082$
2	40A-60A	$0.165^{b} \pm 0.006$	$1.53^{ab} \pm 0.222$
3	40A-50N	$0.153^{bc} \pm 0.021$	$1.56^{a} \pm 0.444$
4	40A-60N	$0.159^{bc} \pm 0.007$	$1.75^{a} \pm 0.206$
5	40N-50A	$0.168^{b} \pm 0.027$	$1.62^{a} \pm 0.543$
6	40N-60A	$0.190^{a} \pm 0.030$	$1.69^{a} \pm 0.172$
7	40N-50N	$0.145^{c} \pm 0.006$	$0.38^{d} \pm 0.050$
8	40N-60N	$0.158^{bc} \pm 0.002$	$1.15^{bc} \pm 0.208$
F-test		**	**
CV (%)		8.07	20.91
LTD		0.02	0.40

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($p \leq 0.01$)

* มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.01$- 0.05)

NS ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่ตามด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ตารางที่ 17 ค่าสี (L, a, b) ภายในและภายนอกของแมคคาเดเมียอบแห้ง

no.	Treatment	ค่าสี L* a* b*					
		External			Internal		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	40A-50A	$63.30^{b} \pm 6.80$	$-0.22^{bc} \pm 1.94$	$22.54^{b} \pm 0.42$	71.65 ± 3.62	-1.07 ± 2.59	$23.04^{bc} \pm 1.90$
2	40A-60A	$65.16^{ab} \pm 5.70$	$-0.44^{bc} \pm 2.11$	$23.13^{b} \pm 2.89$	72.34 ± 2.05	-0.80 ± 1.03	$23.70^{abc} \pm 0.76$
3	40A-50N	$66.68^{ab} \pm 1.46$	$0.87^{b} \pm 0.83$	$27.06^{a} \pm 0.70$	78.11 ± 1.92	-0.53 ± 0.05	$26.43^{ab} \pm 0.74$
4	40A-60N	$66.64^{ab} \pm 1.80$	$-1.38^{dc} \pm 0.82$	$23.28^{b} \pm 0.82$	76.67 ± 0.75	-4.04 ± 0.61	$20.90^{c} \pm 1.14$
5	40N-50A	$70.45^{a} \pm 2.43$	$-3.47^{d} \pm 0.75$	$18.92^{c} \pm 0.88$	72.48 ± 2.71	-1.12 ± 1.37	$21.43^{c} \pm 3.59$
6	40N-60A	$65.86^{ab} \pm 3.15$	$-2.01^{dc} \pm 1.83$	$21.37^{bc} \pm 2.38$	71.36 ± 7.62	-2.04 ± 2.73	$20.20^{c} \pm 3.48$
7	40N-50N	$68.04^{ab} \pm 1.12$	$-1.61^{dc} \pm 1.23$	$21.51^{b} \pm 0.80$	75.03 ± 1.48	-2.26 ± 1.19	$22.16^{c} \pm 4.06$
8	40N-60N	$56.93^{c} \pm 5.09$	$3.90^{a} \pm 1.87$	$23.56^{b} \pm 2.65$	69.79 ± 3.96	0.59 ± 2.83	$26.89^{a} \pm 2.28$
F-test		**	**	**	NS	NS	*
CV (%)		5.87	279.73	7.62	4.98	132.87	11.34
LSD		5.62	2.22	2.53	5.34	2.74	3.83

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($p \leq 0.01$)

* มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.01$- 0.05)

NS ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่ตามด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของแมคคาเดเมียที่อบแห้งที่สภาวะต่างๆโดยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ 2 ขั้นตอน ใช้ตัวกลางคือ ไนโตรเจน และ/หรือ อากาศ พบว่า ค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 1.98-4.03 % (d.b.) ซึ่งค่าความชื้นสุดท้ายขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งด้วย a_w มีค่าอยู่ระหว่าง 0.338-0.373 แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นอิสระในแมคคาเดเมีย ในการศึกษาวิจัยค่า a_w ที่ส่งผลต่อความเสถียรของแมคคาเดเมียอบแห้งในเม็กซิโก Dominguez และคณะ (2007) รายงานว่า a_w 0.4-0.3 เป็นช่วงที่เหมาะสมในการเก็บรักษาแมคคาเดเมีย ในขณะที่ Manson และ Wills (2000) เสนอแนะให้เก็บไว้ที่ a_w ประมาณ 0.2

สภาวะการอบแห้ง 40-50°C ใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า 40-60°C และการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนเพียงอย่างเดียว สามารถรักษากลิ่นรสของแมคคาเดเมียได้ดีกว่าใช้อากาศเป็นตัวกลางทั้งสองขั้นตอน เช่น สภาวะ 40N-50N (PV = 0.38 meqO_2/kg oil) กับ 40A-50A (PV= 1.15 meqO_2/kg oil) และ 40N-60N (PV = 1.15 meqO_2/kg oil) กับ 40A-60A (PV= 1.53 meqO_2/kg oil) (ตารางที่ 16) ส่วนการสลับตัวกลางไนโตรเจนและอากาศในขั้นตอนแรกหรือขั้นตอนที่สอง ค่าเปอร์ออกไซด์ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน

ค่าสี (L, a, b) มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า L และ a ของภายในเมล็ดไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 17) ซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิในการอบแห้งในช่วงที่เลือก 40-60°C สามารถรักษาคุณภาพของสีแมคคาเดเมียได้ใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิและตัวกลางส่งผลต่อกลิ่นรสของแมคคาเดเมียมากกว่า

อย่างไรก็ตามการหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งโดยปั๊มความร้อนนอกจากจะดูคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะต่างๆแล้ว ควรศึกษาวิเคราะห์สมรรถนะ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดของแต่ละสภาวะอีกด้วย เนื่องจากหากต้องอบแห้งแมคคาเดเมียในปริมาณที่มาก ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจะส่งผลต่อราคาต้นทุนในการอบแห้ง ซึ่งผลการประเมินสมรรถนะ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 18-20

ตารางที่ 18 การประเมินสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน

สภาวะ		MER	$COP_{hp,used}$	$COP_{hp,sys}$	COP_{sys}
40A-50A	40A	0.0633	0.67	1.82	0.34
	50A	0.0015	0.33	1.88	0.31
40A-60A	40A	0.0630	0.46	1.46	0.26
	60A	0.0000	0.830	2.19	0.25
40N-50A	40N	0.0205	0.24	1.58	0.32
	50A	0.0004	0.23	1.68	0.29
40N-60A	40N	0.0263	0.23	1.5	0.31
	60A	0.0000	0.23	1.8	0.23
40N-50N	40N	0.0732	0.561	1.82	0.32
	50N	0.0160	0.73	2.05	0.24
40N-60N	40N	0.0870	0.57	1.95	0.33
	60N	0.0000	0.18	1.79	0.15
40A-50N	40A	0.1500	0.58	2.00	0.31
	50N	0.0210	0.76	2.1	0.25
40A-60N	40A	0.0670	0.48	1.88	0.31
	60N	0.000	0.88	2.22	0.2

หมายเหตุ : A = ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง
: N = ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง
: 40 = ขั้นตอนแรกอบแห้งที่อุณหูมิ 40 °C
: 50 = ขั้นตอนที่สองอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C
: 60 = ขั้นตอนที่สองอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C

การศึกษาสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของระบบปั๊มความร้อนโดยทำการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนโดยใช้ไนโตรเจนและอากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ โดยเป็นการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนและประเมินสมรรถนะในแต่ละขั้นตอน พบว่า ค่า $COP_{hp,used}$ และ $COP_{hp,sys}$ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิอบแห้งสูงจะทำให้ $COP_{hp\ ,\ used}$ และ $COP_{hp,\ sys}$ มีค่าสูง อาจเป็นเพราะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็น ดังสมการการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $Q = U \times A \times \Delta T_{lm}$ ซึ่งอุณหภูมิล็อกมีน มีค่า $\Delta T_{lm} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln \times (\Delta T_1 / \Delta T_2)$ จากสมการจะเห็นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิล็อกมีนและจากผลการทดลองที่อุณหภูมิการอบแห้งต่ำ จะได้ค่าอุณหภูมิ ล็อกมีนค่อนข้างต่ำกว่าที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าแตกต่างกัน อีกเหตุผลหนึ่งอาจขึ้นอยู่กับประ สิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยดังความสัมพันธ์นี้ ประสิทธิผล (ε) = การถ่ายเทความร้อนที่ได้จริง / การถ่ายเทความร้อนที่เป็นไปได้สูงสุด และอีกตัวแปรที่สำคัญอีกหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนมากคือ สภาพอากาศภายนอกโดยจะส่งผลต่อปริมาณน้ำควบแน่นออกจากเครื่องทำระเหย โดยระบบอบแห้งซึ่งเป็นระบบปิดมีการรั่วซึมทำให้อากาศที่มีความชื้นจากภายนอกเข้ามายังระบบอบแห้ง ทำให้ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยมีมากกว่าปริมาณของน้ำที่ระเหยออกจากแมคคาเดเมีย ส่งผลให้ค่าความร้อนสุทธิที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่น ($Q_{c,a}$) มีค่าสูง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อน สำหรับค่า COP_{sys} ซึ่งพิจารณาจากพลังงานที่ใช้ในระบบอบแห้งทั้งหมดพบว่า มีค่าต่ำเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เพราะว่า เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขดลวดความร้อนจะใช้พลังงานไฟฟ้ามากเพื่อเพิ่มความร้อนให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนด จึงทำให้มีค่า COP_{sys} ต่ำ

อาทิตย์ โคตรสาร (2543) ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระบบเปิด สำหรับอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว ความ ชื้นเริ่มต้น 13.5 – 15.4 % w.b ลดลงเหลือ 11.2 – 12.7 % w.b ได้ใช้งานมาแล้วประมาณ 2 เดือนและเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระบบปิดโดยมีสัดส่วนอากาศไม่ผ่านเครื่องทำระเหย 77 – 83 % สำหรับอบแห้งเมล็ดพันธุ์ ใช้งานมาแล้วประมาณ 2 ปี ใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วง 5 – 14 ชั่วโมง ผลการประเมินสมรรถนะพบว่า ค่า MER เฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.86 – 7.79 kg water condensed/h ค่า $COP_{hp,\ sys}$ เฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.46 – 6.99 ซึ่งค่า MER และ $COP_{hp,\ sys}$ มีค่าสูงกว่างานวิจัยครั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่ามีน้ำควบแน่นออกมาจากเครื่องทำระเหยมากในขณะที่ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นทำให้ค่า MER มีค่าสูงและส่งผลให้ค่า $COP_{hp,\ sys}$ สูงตามไปด้วย

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2541) ได้ศึกษาการอบมะละกอแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อนและสร้างเครื่องอบแห้งแล้วประเมินสมรรถนะเพื่อใช้เป็นเครื่องต้นแบบในระดับอุตสาหกรรมห้องอบบรรจุรถเข็นได้ 4 คันรวมน้ำหนักผลิตภัณฑ์ 600 - 700 กิโลกรัม ทดสอบโดยระบบปิด อุณหภูมิห้องอบ 55 $^{\circ}$C อัตราการไหลเชิงมวลจำเพาะของอากาศ 25 - 32 กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง-กิโลกรัมมะละกอแห้ง อัตราส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 81 % การอบแบ่งเป็นสามส่วนโดยความชื้นเริ่มต้น 83 - 86 % dry basis อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 12 - 14 % dry basis ใช้เวลาอบ 32 ชั่วโมง พบว่า $COP_{hp,sys}$ มีค่าระหว่าง 4.1 - 4.7 และ $COP_{hp,used}$ มีค่าระหว่าง 3.0 - 3.8 ซึ่งมีค่า $COP_{hp,sys}$ และ $COP_{hp,used}$ มีค่าสูงกว่างานวิจัยครั้งนี้ เป็นเพราะว่า ค่า MER ในงานวิจัยของ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2541) มีค่าสูงทำให้ความร้อนสุทธิที่ระบายออกจาก

เครื่องควบแน่นมีค่าสูงตามไปด้วยและความร้อนสุทธิที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นตัวในมีค่าสูง ส่งผลให้ $COP_{hp,sys}$ และ $COP_{hp,used}$ มีค่าสูง

จากการคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SMER) และสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน (COP) โดยค่า SMER จะพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแมคคาเดเมียกับพลังงานใช้ในขดลวดความร้อนและเครื่องอัดไอ (W_H+W_C) ซึ่งเป็นพลังงานสำหรับใช้ทำความร้อนในระบบอบแห้ง ส่วนค่า COP จะพิจารณาปริมาณพลังงานที่ใช้ในขดลวดความร้อนและเครื่องอัดไอทั้งหมดเมื่อทำการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ ซึ่งผลการคำนวณจะแสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะและสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน

สภาวะการทดลอง		$SMER_{water,\ cond.}$	$SMER_{water,\ evap.}$	$COP_{hp,\ used+dry}$	$COP_{hp,\ sys+dry}$
40A-50A	40A	0.109	0.00086	0.15	0.41
	50A	0.009	0.00009	0.062	0.36
40A-60A	40A	0.103	0.00079	0.097	0.31
	60A	0.000	0.00010	0.106	0.28
40N-50A	40N	0.039	0.00087	0.060	0.39
	50A	0.003	0.00009	0.047	0.34
40N-60A	40N	0.050	0.00096	0.058	0.37
	60A	0.000	0.00011	0.033	0.26
40N-50N	40N	0.117	0.00077	0.126	0.38
	50N	0.066	0.00006	0.092	0.26
40N-60N	40N	0.132	0.00077	0.113	0.38
	60N	0.000	0.00008	0.0168	0.165
40A-50N	40A	0.204	0.00058	0.102	0.35
	50N	0.090	0.00006	0.099	0.275
40A-60N	40A	0.098	0.00070	0.090	0.355
	60N	0.000	0.00008	0.084	0.21

หมายเหตุ : A = ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง
: N = ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง
: 40 = ขั้นตอนแรกอบแห้งที่อุณหูมิ 40 °C
: 50 = ขั้นตอนที่สองอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C
: 60 = ขั้นตอนที่สองอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C

การศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SMER) และสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน (COP) โดยพิจารณาจากพลังงานที่ใช้ในขดลวดความร้อนและเครื่องอัดไอ โดยทำการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนโดยใช้ไนโตรเจนและอากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ โดยเป็นการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนและประเมิณสมรรถนะในแต่ละขั้นตอน พบว่า ค่า $SMER_{water,\ cond.}$ สูงกว่าค่า $SMER_{water,\ evap}$ เป็นเพราะว่า ค่า $SMER_{water,\ cond}$ ซึ่งพิจารณาจากน้ำที่ควบแน่นจากเครื่องทำระเหยมีปริมาณมากกว่าปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแมคคาเดเมีย แสดงว่าระบบอบแห้งมีการรั่วซึมทำให้อากาศภายนอกซึ่งมีความชื้นสูงเข้ามาในระบบอบแห้งได้ จึงทำให้น้ำที่ควบแน่นจากเครื่องทำระเหยมีปริมาณมาก ซึ่งทำให้ค่า $SMER_{water,\ evap.}$ มีความน่าเชื่อถือมากกว่า

จากการพิจารณาค่า $SMER_{water,\ evap}$ พบว่าการอบแห้งในขั้นตอนแรก (ที่อุณหภูมิ 40 °C) จะมีค่า $SMER_{water,\ evap.}$ สูงกว่าในขั้นที่สอง โดยการอบแห้งในขั้นตอนแรก (ที่อุณหภูมิ 40 °C) ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแมคคาเดเมียจะมีมากมากกว่าการอบแห้งในขั้นตอนที่สอง (ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 °C) เป็นเพราะว่าการอบแห้งในขั้นตอนแรกแมคคาเดเมียยังมีความชื้นสูง ซึ่งความชื้นจะสามารถเคลื่อนที่มายังผิวภายนอกและถ่ายเทไปยังตัวกลางอบแห้งได้เร็ว สมศักดิ์ ดำรงเลิศ (2528 : 198-203) อธิบายทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวของแข็งและของไหลซึ่งสรุปได้ว่า ปริมาณการถ่ายเทย่อมขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของสาร ที่ใดมีมวลมากกว่าก็จะกระจายไปหรือเดินทางไปยังที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า จากการพิจารณาค่า COP พบว่า ค่า $COP_{hp,used+dry}$ มีค่าต่ำกว่า $COP_{hp,sys+dry}$ เพราะว่า ค่า $COP_{hp,used+dry}$ จะพิจารณาที่ความร้อนที่ระบายออกมาจากเครื่องควบแน่นตัวในสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเท่านั้น ส่วน $COP_{hp,sys+dry}$ จะพิจารณาความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นตัวในและเครื่องควบแน่นตัวนอก (ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นตัวนอกเป็นความร้อนที่ระบายทิ้ง) จึงทำให้มีค่า COP สูง

ตารางที่ 20 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละสภาวะ

no.	Treatment	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละสภาวะ (kw-h)
1	40A-50A	718.03
2	40A-60A	855.69
3	40A-50N	946.1
4	40A-60N	949.88
5	40N-50A	695.23
6	40N-60A	571.29
7	40N-50N	683.53
8	40N-60N	616.89

ในแง่ของประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงานพบว่า สภาวะ 40N-60A เป็นสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ค่า SMER $_{water,\ evap}$ สูงและพลังงานที่ใช้ทั้งหมดต่ำที่สุด แม้ว่าเมื่อพิจารณาในด้านคุณภาพของแมคคาเดเมีย พบว่า แมคคาเดเมียอบแห้งที่ได้จากสภาวะ 40N-60A มีค่าเปอร์ออกไซด์ประมาณ 1.69 meqO_2/kg oil สูงกว่าการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางทั้งสองขั้นตอน 40N-60N (PV = 1.53 meqO_2/kg oil) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ ต่ำกว่า 30 meqO_2/kg oil (มผช, 2549) ซึ่งการใช้อากาศเป็นตัวกลางในขั้นตอนที่ 2 จะช่วยประหยัดก๊าซไนโตรเจน และสภาวะการอบแห้ง 40N-60A ใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 56 ชั่วโมง สามารถลดค่าความชื้นได้ต่ำกว่า 2% (d.b.) ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษา

5.6 ศึกษาชนิดของบรรจุภัณฑ์ และวิธีการเก็บรักษา แมคคาเดเมียอบแห้ง

แมคคาเดเมียที่ใช้ในขั้นตอนนี้ เป็นแมคคาเมียที่ผ่านการอบแห้งที่ 50 °C ด้วยตู้อบลมร้อนจนความชื้นลดลงเหลือ 1-2% (d.b.) นำมาวิเคราะห์คุณภาพถั่วแมคคาเดเมียเริ่มต้น ดังนี้

ตารางที่ 21 ค่าเริ่มต้นทางคุณภาพของถั่วแมคคาเดเมีย

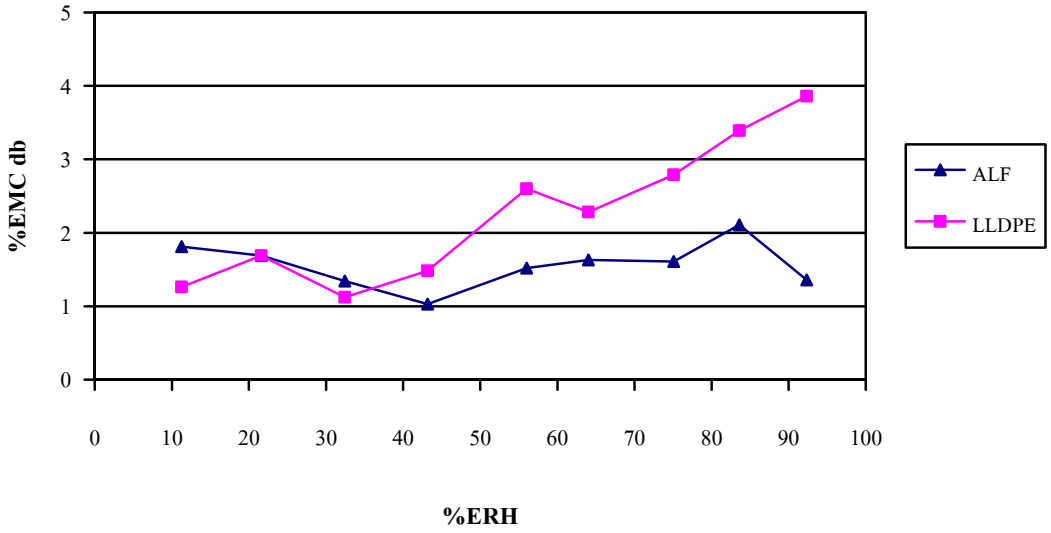
	ค่าเฉลี่ย	SD
ความชื้น	1.70% (d.b.)	0.03
Water activity (a_w)	0.373	0.01
Peroxide value	3.40 meq.O_2/kg oil	0.01
ปริมาณ Reducing sugar	0.013 mg/ml	0.00

สำหรับค่าสีนั้นมีค่าเริ่มต้น L = 74.78 $\pm$ 5.21, a = 0.82 $\pm$ 1.41, b = 17.83 $\pm$ 2.52

เมื่อเก็บถั่วแมคคาเดเมียอบแห้งในบรรจุภัณฑ์ชนิด Aluminium Laminated Foil (ALF) และ Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) โดยบรรจุในภาวะไม่สุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 เดือน แล้ววิเคราะห์คุณภาพต่างๆดังแสดงในหัวข้อ 5.6.1-5.6.5

5.6.1 ความชื้นสมดุล

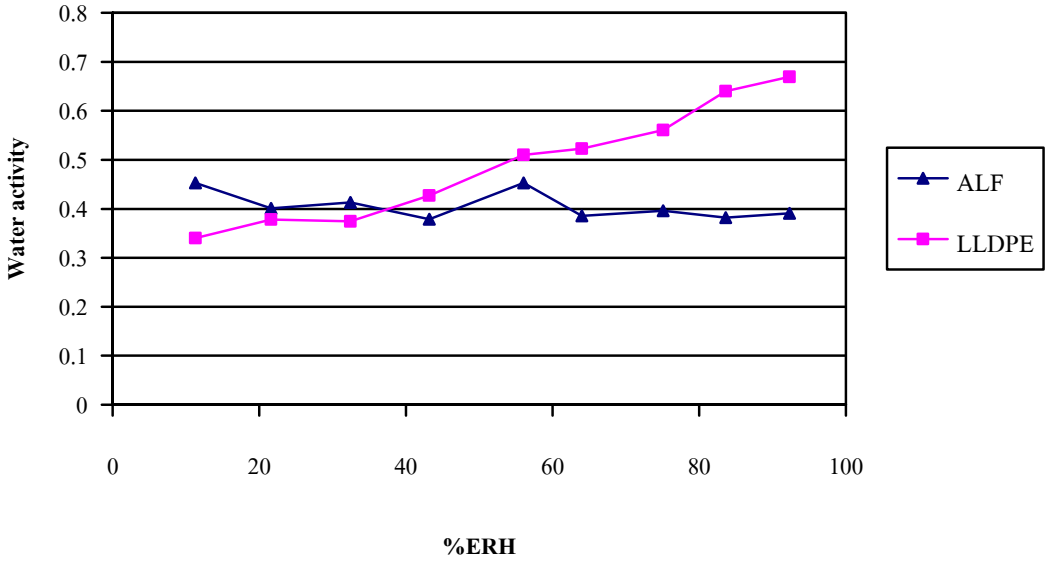
บรรจุภัณฑ์ชนิด ALF สามารถรักษาความชื้นของถั่วแมคคาเดเมียอบแห้งได้ดีกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำกว่า 40% บรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิดรักษาความชื้นของถั่วแมคคาเดเมียได้ดีพอกัน โดยเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงกว่า 40% ถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE จะมีความชื้นสมดุลสูงขึ้น และมีค่ามากกว่าถั่วแมคคาเดเมียที่บรรจุใน ALF



รูปที่ 6 ค่าความชื้นสมดุลของถั่วแมคคาเดเมียเมื่อเก็บในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

5.6.2 ค่า Water activity (a_w)

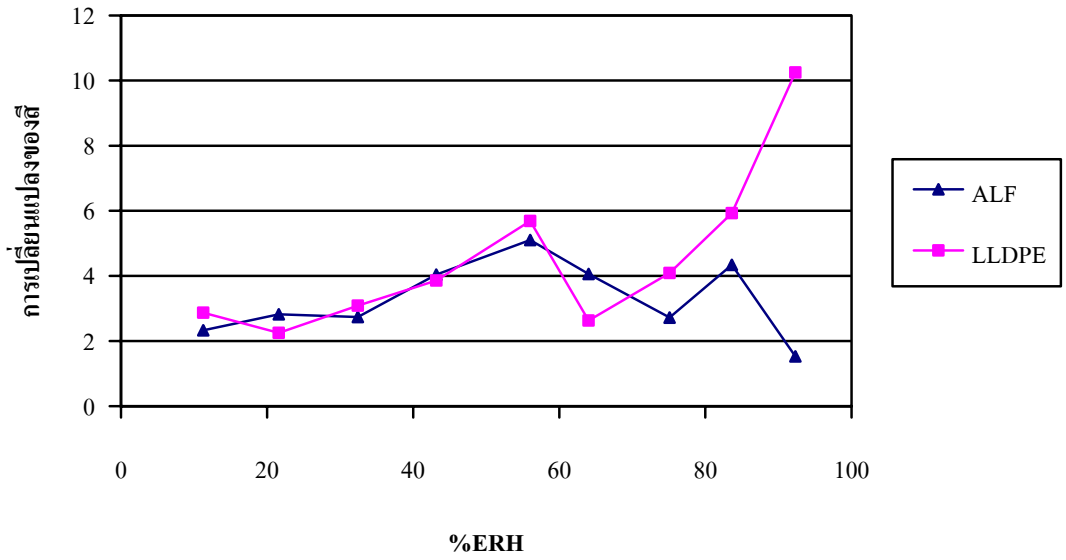
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำกว่า 40% บรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิดสามารถรักษาค่า a_w ของถั่วแมคคาเดเมียให้อยู่ในช่วง 0.34 - 0.45 แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงกว่า 40% บรรจุภัณฑ์ชนิด ALF ยังคงรักษาค่า a_w ให้อยู่ในระดับเดิมได้ แต่ในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE จะมีค่า a_w สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ถั่วแมคคาเดเมียเกิดการเสื่อมเสียได้มากขึ้น



รูปที่ 7 ค่า water activity ของถั่วแมคคาเดเมียเมื่อเก็บในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

5.6.3 การเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE)

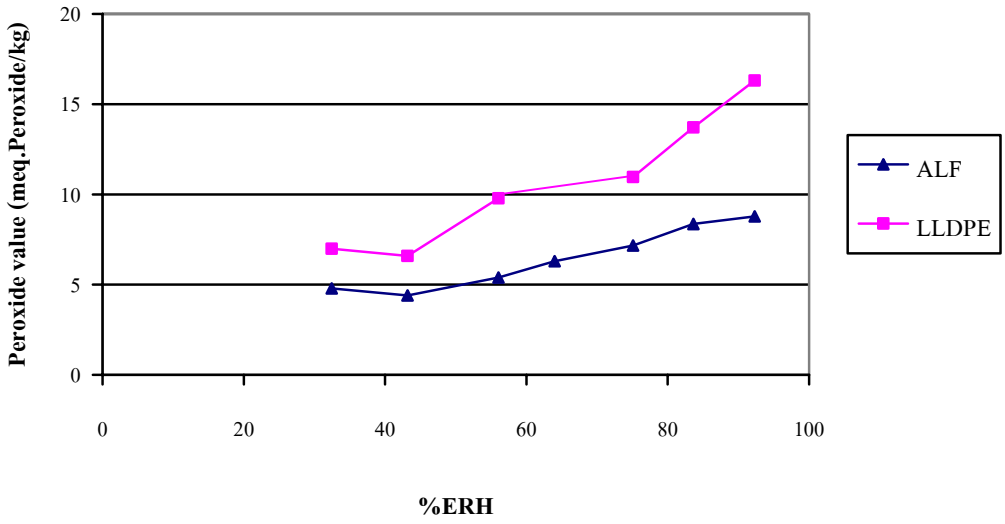
การเปลี่ยนแปลงของสีที่ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ มีความสอดคล้องกับค่า a_w เมื่อค่า a_w อยู่ในช่วง 0.4 – 0.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงของสีจะเพิ่มสูงขึ้น (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) จากการทดลองพบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำกว่า 40% บรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิดจะมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.45 จึงมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อย แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงกว่า 40% ถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE จะมี a_w สูงขึ้นจนถึง 0.67 จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีมาก อาจเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้สูง ในขณะที่เมื่อใช้บรรจุภัณฑ์ชนิด ALF ถั่วแมคคาเดเมียมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่า เนื่องจากมีค่า a_w ต่ำ



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วแมคคาเดเมียเมื่อเก็บในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

5.6.4 ค่าเปอร์ออกไซด์

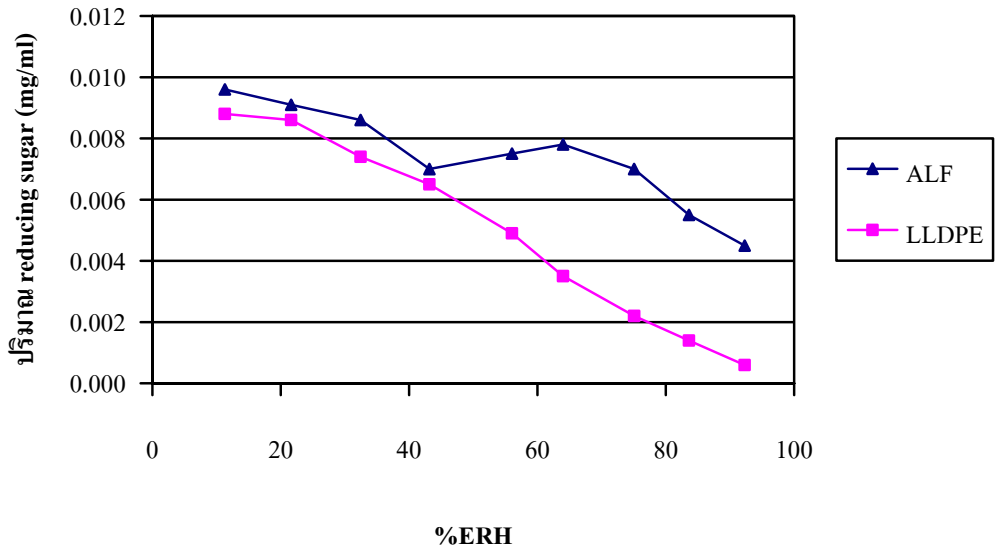
ถั่วแมคคาเดเมียที่เก็บไว้ 1 เดือน มีค่าเปอร์ออกไซด์ เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา lipid oxidation โดยถั่วแมคคาเดเมียที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE มีแนวโน้มของค่าเปอร์ออกไซด์ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงขึ้น เนื่องมาจากค่า a_w ที่สูงขึ้น ซึ่งถั่วแมคคาเดเมียที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด ALF จะมีค่าเปอร์ออกไซด์ ต่ำกว่า แสดงว่าเกิดปฏิกิริยา lipid oxidation น้อยกว่า ซึ่งขณะทดลองสังเกตได้ว่าถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ชนิด ALF จะมีกลิ่นหืนค่อนข้างน้อย แต่ในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE ถั่วแมคคาเดเมียจะมีกลิ่นหืนรุนแรงมาก โดยเฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล 80% ขึ้นไป โดยทั่วไปแล้วหากค่าเปอร์ออกไซด์ สูงเกินกว่า 30 meq.O_2/kg oil จะถือว่าผลิตภัณฑ์นั้นยอมรับไม่ได้ (มผช, 2549)



รูปที่ 9 ค่าเปอร์ออกไซด์ ของถั่วแมคคาเดเมียเมื่อเก็บในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

5.6.5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง

ถั่วแมคคาเดเมียที่เก็บไว้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง ลดลงจากค่าเริ่มต้น และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งจะลดลง เนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ที่มีค่า a_w ในช่วง 0.4 – 0.7 จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยา non-enzymatic browning เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสีจึงมากขึ้น และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งจะลดลง เพราะถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยา non-enzymatic browning ซึ่งถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ชนิด ALF มีค่า a_w ค่อนข้างต่ำ จึงมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง เหลืออยู่สูงกว่าในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง ของถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ชนิด ALF มีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสี เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงกว่า 40% ค่า a_w ของถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE จะเพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยา non-enzymatic browning ได้มาก จึงมีการเปลี่ยนแปลงของสีมาก ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งของถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวจึงลดลงเรื่อยๆ ขณะที่ค่า a_w ของถั่วแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์ชนิด ALF เพิ่มขึ้นน้อยกว่า จึงมีการเปลี่ยนแปลงของสีไม่มาก ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่งจึงเหลืออยู่มาก



รูปที่ 10 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง ของถั่วแมคคาเดเมียเมื่อเก็บในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ แล้วพบว่าสภาวะการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (27-30 $^{\circ}$C) ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำกว่า 40% นั้น สามารถใช้บรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิด คือ ALF และ LLDPE เพื่อเก็บรักษาถั่วแมคคาเดเมียได้ ซึ่งการใช้บรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE มีข้อดีคือ ทำให้มองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้ หากความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงกว่า 40% บรรจุภัณฑ์ชนิด ALF จะสามารถรักษาคุณภาพของถั่วแมคคาเดเมียได้ดีกว่า จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมเสียได้ช้า มีอายุการเก็บนานกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ชนิด ALF มีคุณสมบัติในการป้องกันแสง และการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนได้ดี

6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแมคคาเดเมียทั้งกะลาด้วยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศ คือ การอบแห้งแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกอบแห้งที่ 40 °C โดยใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการอบแห้งลดความชื้นลงเหลือ 10-11% (d.b.) ใช้เวลาในการอบแห้ง 16 ชั่วโมง จากนั้นปรับอุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 60 °C เปลี่ยนใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 1-2 % (d.b.) ได้แมคคาเดเมียที่มีค่าเปอร์ออกไซด์ต่ำ และมีสีเหลืองนวลทั้งภายในและภายนอกเมล็ด และประหยัดพลังงานไฟฟ้า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด 56 ชั่วโมง

สภาวะการเก็บรักษาแมคคาเดเมียอบแห้งที่กะเทาะเปลือกแล้วที่เหมาะสม จากการศึกษา Moisture sorption isotherm และ บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม คือ เก็บในถุง aluminium laminated foil (OPP/AL/PE/LLDPE) โดยความความชื้นของแมคคาเดเมียที่เหมาะสมในการเก็บรักษาคือ 1-2 % (d.b) และเก็บในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 40% ชะลอการเกิดกลิ่นหืนได้ดีที่สุด สามารถเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้อง ปิดถุงภายใต้บรรยากาศปกติอย่างน้อย 1 เดือน

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยพบว่าหากใช้ตัวกลางในการอบแห้งทั้งสองขั้นตอน สามารถชะลอการเกิดเปอร์ออกไซด์ได้ดีมาก แต่พบว่าสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งและค่าใช้จ่ายของก๊าซไนโตรเจน เนื่องจากต้องเปลี่ยนถังก๊าซในระหว่างอบ ถ้ามีการออกแบบปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศในระบบปิดแบบสมบูรณ์ที่สามารถนำไนโตรเจนกลับมาใช้ได้ใหม่ อาจช่วยลดค่าใช้จ่ายและพลังงานลงได้

เอกสารอ้างอิง

ฐานิตย์ เมธิยานนท์. 2541. *การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม.* วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธานินทร์ รัชโพธิ์, ละมุล วิเศษ, ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. 2552. สมการชั้นบางของถั่วแมคคาเดเมียภายใต้การอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 40(1): 465-468

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2545. *เคมีอาหารเบื้องต้น.*กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ฉบับที่ 1145. 2549. *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มะคาเดเมียอบ ค่าเปอร์ออกไซด์.*

วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ ธนิต สวัสดิ์เสรี 2542 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อน *วิทยาสารเกษตรศาสตร์: สาขาวิทยาศาสตร์* 33, 1 (มกราคม-มีนาคม) 146-158

สมศักดิ์ ดำรงเลิศ. 2528. *ฟลูอิดไดเซชัน.* โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. 255 หน้า.

อาทิตย์ โคตรสาร. 2543. *การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 176 หน้า.

AOAC. 1995. *Official method of analysis of AOAC International*. Association of Office Analytical Chemists. 16th ed. Washington D.C.

AOCS. 1998. *Official method and recommended practices of American oil chemists society*. 5th ed. American Oil Chemistry Society Press, Champaign.

Arunmas, P. 2004. *Thailand promotes Macadamia Nuts as Lucrative Crash Crop*. Knight Ridder Tribune Business News: 1 [Online]. Available from: http://proxy. car.chula.ac.th/cgi-proxy/redir.cgi [2008, December 7]

Australian Macadamia Society. 1994. *Storage and packaging of macadamia kernel* [Online]. Available from: http://www.macadamias.org/index.php [2009, May 20]

Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N., and Devahastin, S. (2009) Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process. *Journal of Food Engineering*, 93: 348 – 353.

Borompichaichartkul, C., Maneechot, P., Homkajon, P. and Tongplod, P. (2009) Storage Stability of Dried Macadamia Nuts in Different Packaging Materials. *ISHS Acta Horticulturae*, Vol 837. (Available online)

Brown, P. 1984. The macadamia nut with a future. *Australia Horticulture*. 82(11): 16-25.

Cavaletto, C.G. 1981. Quality evaluation of macadamia nuts. In *Quality of Foods and Beverages: Chemistry and Technology* (Vol 2), pp. 71-82. New York: Academic Press.

Chu, A.C., King, G.S. and Sherman, G.D. 1953. Macadamia storage studies. *Hawaii Agricultural Experiment Station progress Notes*. No. 90.

Dominguez, I. L., Ebner, A., Vernon-Carter, E. J., and Beristain, C. I. 2007. Thermodynamic analysis of the effect of water activity on the stability of macadamia nut. *Journal of Food Engineering,* 81: 566–571.

Grag, M. L., Rudra, P., Blake, R., and Wills, R. 2003. Macadamia nut consumption lowers plasma cholesterol levels in hypercholesterolemic men. *Journal of Nutrition* 133: 1060-1063 [Online]. Available from:htpp//www.nuthealth.org/nutrition.php3 [2009, May 25]

Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*. 81: 89-96

Hawlader, M.N.A, Perera, C.O. and Min Tian. 2006. Comparison of retention of 6-Gingerol in drying of ginger under modified atmosphere heat pump drying and other methods. *Drying Technology* 24: 51-56.

Honga, T.D., Ellisa, R.H.,Gunnb, J. and Mooreb, D. 2002. Relative humidity, temperature, and the equilibrium moisture content of conidia of *Beauveria bassiana* (Balsomo) *Vuillemin*: a qualitative approach. *Journal of Stored Products Research* 38:33-41.

Ito, P.J. 1987. *Macadamia nut survey and recommendations for Thailand USAID in cooperation with Thailand*. Highland Agriculture Research Office.

Kermond, P. and Baumgardt, B. 1996. *The macadamia: from seed to the Supermarket*. (Self published)

Kowitz, T.J. 2004. *Drying Macadamia Nut-in-shell On-Farm*. PhD Thesis. School of Land and Food Sciences, The University of Queensland. Queensland: Australia.

Mason, R.L. 1982. Harvesting and post harvest handing of macadamia nuts. *Australia Macadamia Society Fact Sheet*. No.9.

Mason, R.L. and Wills, R.B.H. 2000. Macadamia nut quality research: the processing challenge. *Food Australia* 52(9) 416-419.

Menkov, N.D. 2000. Moisture sorption isotherms of lentil seeds at several temperatures. *Journal of Food Engineering* 44: 205-211.

Prichavudhi, K. and Yamamoto, H.Y. 1965. Effect of drying temperature on chemical composition and quality of Macadamia nuts. *Food Technology*. 19 : 129 – 132.

Raghupathy, R. 2003. *Heat pump drying of food products* [online]. National science and technology entrepreneurship development board. Science Tech Entrepreneur E-Zine. Available from: http://www.techno-preneur.net/new-times/ScienceTechMag/April03/heatpump.html [2009, May 25]

Rao, M. A., Rizvi, S. S. H., and Datta, A. K. 2005. *Engineering Properties of Foods*. 3rd ed. Boca Raton: Marcel Dekker, Inc. 738 pp.

Salmolin, L.A. and Grosvenor, M.B. 2000. *Nutrition science & application* 3rd ed. Virginia: Saunders College Publishing. p. 128-163.

Silva, F.A., Marsaioli, A.J., Maximo, G.J., Silva, M.A.A.P. and Goncalves, L.A.G. 2005. Microwave assisted drying of macadamia nuts. *Journal of Food Engineering*. 77: 550-558.

Simpson, J. 1992. Back to basics: maximizing kernel recovery and quality. *Australia Macadamia Society News Bulletin.* 19(2): 19-20.

Steele, R. 2004. *Understanding and measuring the shelf-life of food*. Woodhead Publishing limited. 407pp

Wall, M.M. and Gentry, T.S. 2006. Carbohydrate composition and color development during drying and roasting of macadamia nuts. *Journal of LWT*.

Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J. and Oliveira, F.A.R. 2008. Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. *Journal of Food Engineering* 86: 342-348.

Output จากโครงการวิจัย

ตารางที่ 23 Outputs จากโครงการวิจัยนี้

ผลลัพธ์	**ปริมาณ**
องค์ความรู้	
การเปลี่ยนแปลงสีและกลิ่นหืนของแมคคาเดเมียในระหว่างอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40-60 °C	1
ภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบสองขั้นตอน	1
ภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาแมคคาเดเมียในบรรจุภัณฑ์	1
เทคโนโลยีใหม่	
เทคนิคการใช้ปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศร่วมกับอากาศร้อนในการอบแห้งแมคคาเดเมีย	1
ผลงานตีพิมพ์ (ภาคผนวก ก)	
วารสารนานาชาติ	2
วารสารในประเทศ	1
เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ (ภาคผนวก ก)	
นานาชาติ	1
ในประเทศ	2
ผลิตบัณฑิต (ภาคผนวก ข)	
ปริญญาตรี	3
ปริญญาโท	1

ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ

วารสารนานาชาติ

1. **Borompichaichartkul, C.**, Luengsode, K., Chinprahast, N., and Devahastin, S. (2009) Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process. *Journal of Food Engineering*, 93: 348 – 353. Impact factor = 2.081
2. **Borompichaichartkul, C.**, Maneechot, P., Homkajon, P. and Tongplod, P. (2009) Storage Stability of Dried Macadamia Nuts in Different Packaging Materials. *ISHS Acta Horticulturae*, Vol 837. (Available online)

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Peer review – Proceedings

1. **Borompichaichartkul, C.**, Maneechot, P., Homkajon, P. and Tongplod, P. (2009) Storage Stability of Dried Macadamia Nuts in Different Packaging Materials. *APS2008, Asia-pacific Symposium on Assuring Quality and Safety of Agri-Foods,* August 4-6, Radisson Hotel, Bangkok Thailand.

วารสารในประเทศ

1. ธานินทร์ รัชโพธิ์, ละมุล วิเศษ, ณัฐพล ภูมิสะอาด และ **ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล** (2552) สมการชั้นบางของถั่วแมคคาเดเมียภายใต้การอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 40(1): 465-468

การประชุมวิชาการในประเทศ

1. ณัฐพล ภูมิสะอาด, ละมุล วิเศษ, ธานินทร์ รัชโพธิ์ และ **ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล** (2551) การอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. *การประชุมวิชาการ 10 ปี วิชาการแม่ฟ้าหลวง*. หน้า 663-667.
2. ธานินทร์ รัชโพธิ์, ละมุล วิเศษ, ณัฐพล ภูมิสะอาด และ **ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล** (2551) สมการชั้นบางของถั่วแมคคาเดเมียภายใต้การอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. *การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยพืชเขตร้อนและกึ่งร้อนครั้งที่ 2.* โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร

รายชื่อและวิทยานิพนธ์บัณฑิตที่ผลิต

ระดับปริญญาตรี

1. เป็นธิดา มณีโชติ พรพรรณ หอมขจร และ พรพิมล ทองปลอด (2550) *ความชื้นซอร์ฟชันไอโซเทอมของถั่วแมคคาเดเมียที่ปลูกในประเทศไทย*. โครงการเสริมประสบการณ์ระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 60 หน้า.

ระดับปริญญาโท

1. กนลรัตน์ เหลืองสด (2551) *ผลการอบแห้งด้วยวิธีปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อนและบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพของแมคคาเดเมีย Macadamia integrifolia*.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 138 หน้า.