

# การหาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

## Determination of Physical Properties of Cashew Nuts

อดิศักดิ์ นาถกรณกุล<sup>1</sup> และ สมเกียรติ ปรัชญาวรรกร<sup>2</sup>

Adisak Nathakaranakule and Somkiat Prachayawarakorn

---

### ABSTRACT

Physical properties of kernel and whole shell of cashew nuts; specific heat, density, equilibrium moisture content and thin layer drying equation, were determined. The specific heat and density of both types of cashew nut depend linearly on their moisture content. For the experiments of equilibrium moisture content, the static method was used in the range of 50°C , 62°C and 74°C and relative humidity in the range of 10.96 - 88.46 percent. For the kernel, equilibrium moisture content models based on the equations of Henderson and Modified Henderson were accurate to predict the equilibrium moisture content. While the equilibrium moisture content models based on Henderson and Chung and Pfast equations were suitable for the whole shell.

The experiments of the thin-layer drying were performed at the temperature of 60°C, 80°C and 100°C, the air velocity of 2.5 and 3 m/s, and the initial moisture content between 17 - 25 %db. The results showed that the effect of initial moisture content and air velocity were negligible, but the effect of temperature was significant. By considering the shape of cashew nut to be cylindrical, the semi-empirical relation was developed by crossing the equation for infinite cylinder and infinite slab. Then it was found that the thin layer drying equation and the effective diffusivity equation were in the exponential form.

**Key words:** cashew nuts, physical properties, equilibrium moisture content

---

1 สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangmod, Ratburana, Bangkok 10140, Thailand.

2 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangmod, Ratburana, Bangkok 10140. Thailand.

## บทคัดย่อ

การหาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือก ได้แก่วามร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น ความชื้นสมดุล และสมการอบแห้งชั้นบาง พบว่า ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งสองลักษณะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงกับความชื้นของเมล็ด ความชื้นสมดุลที่ทดลองหาโดยวิธีสถิตในช่วงอุณหภูมิ 50,62 และ 74°C และความชื้นสัมพัทธ์ช่วง 10.96 - 88.46 %พบว่า สมการความชื้นสมดุลของ Henderson และ Modified Henderson สามารถทำนายความชื้นสมดุลเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมล็ดในได้ดี ขณะที่สมการความชื้นสมดุลของ Henderson (1952) และ Chung and Pfof (1967) สามารถทำนายความชื้นสมดุลเมล็ดมะม่วงหิมพานต์รวมเปลือกได้ดี

การทดลองการอบแห้งชั้นบางที่อุณหภูมิ 60,80 และ 100°C ความเร็วลมที่ 2.5 และ 3 m/s และความชื้นเริ่มต้นในช่วง 17 - 25 % มาตรฐานแห้งพบว่า อุณหภูมิมีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง ขณะที่ความเร็วลมและความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดไม่มีผลกระทบ สมการอบแห้งชั้นบางพัฒนาโดยพิจารณาเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นรูปทรงกระบอกซึ่งได้จากการคูณแบบครอส ระหว่างสมการกึ่งทฤษฎีของรูปทรงกระบอกยาวมากกับแผ่นเรียบกว้างมากมีความสัมพันธ์ในรูปเอกซ์โพเนนเชียล โดยที่สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของสมการอบแห้งชั้นบางมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ในรูปเอกซ์-โพเนนเชียลเช่นกัน

## คำนำ

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชยืนต้นในเขตร้อน จัด

อยู่ในวงศ์ตระกูล Anacardiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium occidentale* Linn แบ่งออกได้เป็น 60 สกุล (Genus) 500 พันธุ์ (Species) (วิจิตร, 2528) ส่วนประกอบที่สำคัญของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์คือ เมล็ด โดยเฉพาะเนื้อในของเมล็ด (kernel) สามารถใช้รับประทานหรือแปรรูปเป็นอาหารได้หลายอย่าง โดยมีคุณค่าทางอาหารคือ โปรตีนร้อยละ 21 ไขมันร้อยละ 47 แป้งร้อยละ 22 และที่เหลือเป็นวิตามินต่างๆ (วิไล, 2522) ในประเทศไทยมะม่วงหิมพานต์ปลูกกันมากทางภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือจัดเป็นพืชเศรษฐกิจหลักชนิดหนึ่งในภูมิภาคนี้ อุตสาหกรรมการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อนำเนื้อในมาใช้อาหารต้องอาศัยการอบแห้งโดยมีขั้นตอนหลักคือการอบแห้งเมล็ดรวมเปลือกให้ความชื้นลดลงเพื่อการเก็บรักษาก่อนนำเข้าสู่ขั้นตอนการผลิต และการอบแห้งเมล็ดในที่กระเพาะเปลือกออกแล้วให้แห้งก่อนนำไปลอกเชื้อหุ้มเมล็ดในออก ในการพัฒนาการอบแห้งในขั้นตอนเหล่านี้จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกต่อไป

Waananen et al. (1993) แสดงให้เห็นว่ากลไกของการอบแห้งขึ้นกับความต้านทานที่ควบคุมกระบวนการ และกลไกของการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะบ่งบอกถึงกระบวนการที่ควบคุมการอบแห้ง ในกรณีที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของตัวกลางที่อยู่รอบๆ ผลิตภัณฑ์กระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเป็นตัวควบคุมการอบแห้ง และถ้าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของตัวกลางที่อยู่รอบๆ กระบวนการถ่ายเทมวลจะควบคุมกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้ความต้านทานการถ่ายเทมวลภายในหรือภายนอกจะ

เป็นตัวควบคุมกระบวนการอบแห้ง และความต้านทานทั้งสองจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ( $k$ , m/s) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลภายนอก ( $k_c$ , m/s) การแพร่ประสิทธิผลของความชื้นภายใน (Diff,  $m^2/s$ ) และ characteristic sample dimension (m) เป็นตัวแปรหลัก ผลผลิตแห้งที่มีความพรุนมากการแพร่ในสถานะของไอจะมีความสำคัญ ในขณะที่ผลผลิตแห้งที่มีความพรุนน้อยกว่า 5% การแพร่ในสถานะของของเหลวจะมีความสำคัญ และในกรณีที่มีน้ำในผลผลิตแห้งทั้งหมดมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดอิ่มตัว ความสำคัญจะอยู่ที่การแพร่แบบแคปิลารี

Wongwises and Thongprasert (1990) ทดลองหาสมการอบแห้งชั้นบางสำหรับข้าวเปลือกเมล็ดยาวที่อุณหภูมิอบแห้งช่วง 33-75°C ความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 20-40 %มาตรฐานเปียก และความเร็วอากาศอบแห้ง 0.025 - 0.5 m/s พบว่าสมการที่ทำนายผลได้ดีคือสมการเอกซ์โพเนนเชียลของ Page ในรูปฟังก์ชันของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งและความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก โดยค่าสัมประสิทธิ์ในสมการเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้งและความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก Bala and Woods (1992) ทดลองหาสมการอบแห้งชั้นบางของข้าวบาร์เลย์ที่งอกแรก(มอลต์)ในช่วงอุณหภูมิ 30.3 - 90.2°C และความชื้นสัมพัทธ์ 2.4 - 79.2 % พบว่า สมการของ Page ทำนายการอบแห้งได้ดี โดยมีค่าคงที่ในการอบแห้งอยู่ในรูปสมการของ Arrhenius ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความชื้นสมดุลเชิงกล

Madamba *et al.* (1994) ทำนาย Sorption behavior ของกระเทียมแผ่นบางในช่วงอุณหภูมิ 20 - 70°C และความชื้นสัมพัทธ์ช่วง 11 - 85 % โดยวิธีสถิติ พบว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อความชื้นสมดุลของกระเทียม และสมการความชื้นสมดุลที่ทำนายผลการทดลองได้ใกล้เคียงที่สุดคือ

สมการของ GAB และสมการ modified Henderson ตามลำดับ

Rapusas and Driscoll (1995) ศึกษาการอบแห้งชั้นบางของหอมหัวใหญ่แผ่นบางๆ ในช่วงอุณหภูมิ 42.5 - 90°C อัตราส่วนความชื้นอากาศช่วง 0.0093 - 0.0442 kg-water/kg-dried air และความเร็วของอากาศอบแห้ง 0.6 - 1.4 m/s พบว่า สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบ Arrhenius สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี โดยมีค่าคงที่ของการอบแห้งขึ้นอยู่กัอุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความหนาของแผ่นหอมหัวใหญ่และหากพิจารณาผลของการแพร่ความชื้นและการหดตัวพบว่าความหนาของตัวอย่างและอุณหภูมิของอากาศอบแห้งมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง

สุภวรรณ และยุทธนา (2537) ทดลองหาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเมล็ดในมะม่วงหิมพานต์ได้แก่ความหนาแน่นปรากฏและค่าความร้อนจำเพาะ พบว่าคุณสมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของเมล็ดในรูปสมการเส้นตรง และในการหาความชื้นสมดุลพบว่า สมการความชื้นสมดุลของ Henderson สามารถทำนายความชื้นสมดุลของเมล็ดในมะม่วงหิมพานต์ได้ดีในช่วงอุณหภูมิการทดลอง 45-60°C ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดในมะม่วงหิมพานต์พบว่าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และจากการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางในช่วงอุณหภูมิ 45-61°C ความเร็วลม 2.19 m/s และค่าความชื้นเริ่มต้นในช่วง 19 - 38 %มาตรฐานแห้งพบว่า สมการแบบเอมไพริคัลทำนาย การอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีค่าคงที่ในสมการเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง

Mazza and Leamaguer (1980) ศึกษาการอบแห้งหัวหอมโดยใช้ vibro fluidizer อบแห้งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C และอัตราการไหล 5.5, 8.1, และ 10.3 ลูกบาศก์เมตรต่ออนาที พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้น

ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น และอัตราการไหลของอากาศไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

ธงชัย (2537) ศึกษาการอบแห้งชั้นบางและความชื้นสมดุลของพริกชี้หนูในช่วงอุณหภูมิ 44 - 65°C ความชื้นสัมพัทธ์ 21 - 65 % และความเร็วของอากาศอบแห้งช่วง 0.9 - 1.9 m/s พบว่า อัตราการอบแห้งของพริกชี้หนูเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้น สมการความชื้นสมดุลของ Henderson และ Chung and Pfof ทำนายผลได้ใกล้เคียงกับการทดลอง

จากการวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยมีความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์เป็นตัวแปรรอง สมการการอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์มักจะอยู่ในรูปของสมการเอ็กโพเนนเชียล ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์แปรตามความชื้นของผลิตภัณฑ์นั้นๆ จุดประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อหาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ความชื้นสมดุล และสมการการอบแห้งของเมล็ดใน และเมล็ดรวมเปลือกของมะม่วงหิมพานต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อไป

## อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองแบ่งออกได้เป็น 5 การทดลองหลักคือ การทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ (bulk-density) เปรอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างเมล็ด ค่าความร้อนจำเพาะ ความชื้นสมดุล และการอบแห้ง ชั้นบาง

การหาความหนาแน่นปรากฏ นำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกใส่ลงในบีกเกอร์แล้วปาดให้เรียบให้ได้ปริมาตร 500 ลบ.ซม.

แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ความชื้นของเมล็ดในที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 16.57 - 29.04 %มาตรฐานแห้ง และเมล็ดรวมเปลือกในช่วง 19.58 - 30.51 %มาตรฐานแห้ง

การหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างเมล็ด นำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดใน และเมล็ดรวมเปลือกในช่วงความชื้นเดียวกับที่ใช้ในการหาความหนาแน่นปรากฏ มาใส่ในบีกเกอร์แล้วปาดหน้าให้เรียบให้ได้ปริมาตร 500 ลบ.ซม. หลังจากนั้นตวงน้ำมันพืชด้วยหลอดตวงและจดปริมาตรเริ่มต้นไว้ก่อนใส่ลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้จนได้ระดับน้ำมันอยู่ที่ 500 ลบ.ซม. คำนวณหาปริมาตรของน้ำมันพืชที่ใช้ไปซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาตรของช่องว่างของอากาศในเมล็ด

ความร้อนจำเพาะของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ใช้คาลอรีมิเตอร์ดังรูป (Figure 1) ความร้อนจำเพาะของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลพลังงานคือ

ความร้อนที่เมล็ดพืชได้รับ + ความร้อนที่คาลอรีมิเตอร์ได้รับ = ความร้อนที่สูญเสียจากน้ำร้อน โดยมีสมมติฐานว่าอุณหภูมิสมดุลของคาลอรีมิเตอร์เท่ากับอุณหภูมิสมดุลของน้ำ เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$M_p C_p (T_1 - T_p) + M_c C_{p,c} (T_2 - T_c) = m_w C_{p,w} (T_h - T_2) \quad (1)$$

$$C_p = \frac{m_w C_{p,w} (T_h - T_2) - m_c C_{p,c} (T_2 - T_c)}{m_p (T_1 - T_p)} \quad (2)$$

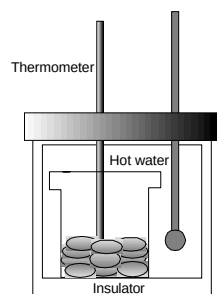


Figure 1 Calorimeter for specific heat testing.

โดยที่

- $m_w$  คือ มวลของน้ำร้อน (kg)  
 $m_c$  คือ มวลของคาลอริมิเตอร์ (kg)  
 $m_g$  คือ มวลของมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ทดสอบ (kg)  
 $C_{p,w}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C)  
 $C_{p,c}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของคาลอริมิเตอร์ (kJ/kg °C) ที่รวม Heat loss แล้ว  
 $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (kJ/kg °C)  
 $T_p$  คือ อุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้นของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (°C)  
 $T_h$  คือ อุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้นของน้ำร้อน (°C)  
 $T_c$  คือ อุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้นของคาลอริมิเตอร์ (°C)  
 $T_1$  คือ อุณหภูมิสมดุลของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (°C)  
 $T_2$  คือ อุณหภูมิสมดุลของน้ำ (°C)

ความชื้นของเมล็ดใน และเมล็ดรวมเปลือกที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 10 - 21.3 % มาตรฐานแห้ง และ 13 - 26 % มาตรฐานแห้งตามลำดับ

การหาความชื้นสมดุลของทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกใช้วิธีสถิติ โดยใส่เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เตรียมความชื้นตามต้องการไว้ในหีอสารละลายในขวดปิดแล้วนำไปใส่ในตูบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 50,62 และ 74°C ซึ่งจะสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายเกลือในช่วง 10.96 - 85 % นำตัวอย่างเมล็ดมะม่วงจากขวดมาชั่งทุกวันในช่วงสัปดาห์แรก หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักทุกสัปดาห์จนน้ำหนักเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในขวดไม่เปลี่ยนแปลง แล้วจึงนำไปหาความชื้นสุดท้ายซึ่งเป็นความชื้นสมดุลของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดในของมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้คือ 10 % และ 20 % มาตรฐานแห้ง และของเมล็ดรวมเปลือกคือ 13 % และ 20 % มาตรฐานแห้ง

การทดลองอบแห้งชั้นบาง ใช้อุปกรณ์อบแห้งที่สร้างขึ้นโดย สมชาติ และวิไลพร (2530) ในการทดลองนำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ใส่ถาด เกลี่ยให้เป็นชั้นเดียว ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น แล้วนำไปวางบนเครื่องอบแห้งที่เปิดให้ทำงานจนได้อุณหภูมิและความเร็วลมที่เข้าสู่สภาวะที่ต้องการทดสอบแล้ว นำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในถาดมาชั่งทุกๆ 5 นาทีในครึ่งชั่วโมงแรก หลังจากนั้นขยายเวลาการชั่งแต่ละครั้งออกไปอีก 15 นาทีเมื่อสังเกตว่าน้ำหนักที่ลดลงในช่วงที่กำลังชั่งเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ชั่งน้ำหนักมะม่วงหิมพานต์จนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงแล้วนำไปอบหาความชื้นสุดท้าย อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 60,80 และ 100°C ความเร็วลมที่ 2.5 และ 3.0 m/s ความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองของเมล็ดในอยู่ในช่วง 17 - 23 % มาตรฐานแห้ง และสำหรับเมล็ดรวมเปลือกอยู่ในช่วง 17 - 25 % มาตรฐานแห้ง

## ผลและวิจารณ์

**ความหนาแน่นปรากฏและเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศระหว่างเมล็ด**

ผลจากการทดลองดัง Figure 2 พบว่า ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือก กับความชื้นของเมล็ดมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น หาความสัมพันธ์โดยใช้ Linear regression ได้สมการในรูปแบบในกรณีเมล็ดใน

$$pb = 524.41 + 1.4034 M \quad R^2 = 0.9787 \quad (3)$$

ในกรณีเมล็ดรวมเปลือก

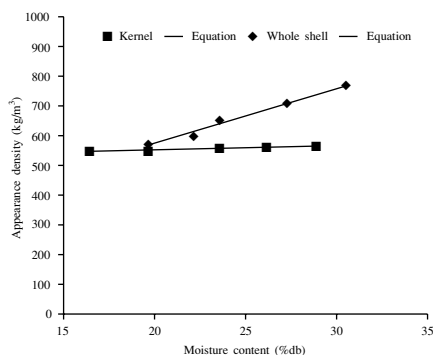
$$pb = 209.35 + 18.278 M \quad R^2 = 0.9700 \quad (4)$$

โดยที่

$$pb = \text{ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m}^3\text{)}$$

$$M = \text{ความชื้นเมล็ด, \% มาตรฐานแห้ง}$$

ในทำนองเดียวกันกับความหนาแน่นปรากฏ



**Figure 2** Appearance density of cashew nut: kernel and whole shell.

เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศระหว่างเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกมีความสัมพันธ์เชิงเส้น กับค่าความชื้นเมล็ด (Figure 3) โดยใช้ linear regression หาความสัมพันธ์ในรูปแบบการเป็น

สำหรับเมล็ดใน

$$\varepsilon = 50.28 - 0.2975 M \quad R^2 = 0.9930 \quad (5)$$

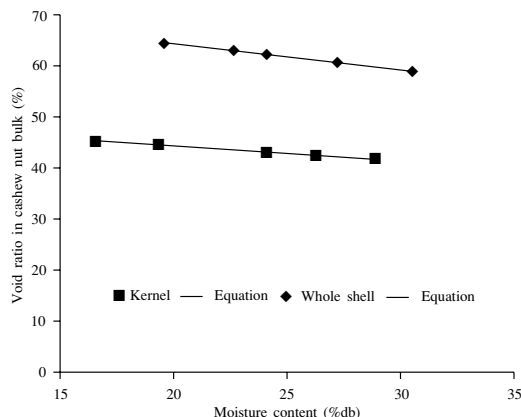
สำหรับเมล็ดรวมเปลือก

$$\varepsilon = 74.653 - 0.5156 M \quad R^2 = 0.9939 \quad (6)$$

โดยที่

$\varepsilon$  = %ช่องว่างอากาศระหว่างเมล็ด

$M$  = ความชื้นเมล็ด, % มาตรฐานแห้ง



**Figure 3** Percent of void ratio in cashew nut bulk: kernel and whole shell.

จากการคำนวณหาค่าความหนาแน่นจริงจาก ความหนาแน่นปรากฏและเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ ระหว่างเมล็ดพบว่า มีความสัมพันธ์ในรูปเชิงเส้นเช่น เดียวกัน (Figure 4) และใช้ linear regression หา ความสัมพันธ์ในรูปแบบการได้เป็น

สำหรับเมล็ดใน

$$\rho_t = 1047 - 2.7165 M \quad R^2 = 0.9340 \quad (7)$$

สำหรับเมล็ดรวมเปลือก

$$\rho_t = 1130.9 + 24.283 M \quad R^2 = 0.8870 \quad (8)$$

โดยที่

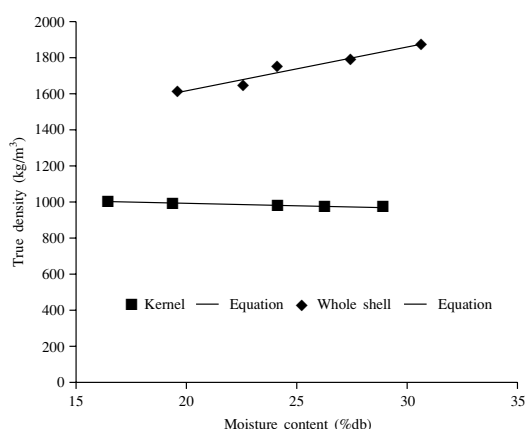
$\rho_t$  = ความหนาแน่นจริง (kg/m³)

$M$  = ความชื้นเมล็ด, % มาตรฐานแห้ง

จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำที่มากขึ้นในมะม่วงหิมพานต์เมล็ดในทำให้เมล็ดเกิดการพองตัวส่งผลให้ค่าความหนาแน่นจริงมีค่าลดลง ส่วนในกรณีของเมล็ดรวมเปลือกปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในเมล็ดมีผลต่อการเพิ่มมวลให้กับเมล็ดมากกว่าปริมาตร ค่าความหนาแน่นจึงมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นสูงขึ้น

#### ความร้อนจำเพาะ (specific heat)

ผลจากการทดลองหาความร้อนจำเพาะของ เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือก



**Figure 4** True density of cashew nut: kernel and whole shell.

ดังแสดงใน Figure 5 พบว่า ความร้อนจำเพาะมีความสัมพันธ์กับความชื้นของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ในลักษณะเชิงเส้น สามารถหาความสัมพันธ์ในรูปสมการได้เป็น

ในกรณีเมล็ดใน

$$C_p = 1.9039 + 0.0671 M \quad R^2 = 0.9463 \quad (9)$$

ในกรณีเมล็ดรวมเปลือก

$$C_p = 1.0564 + 0.0438 M \quad R^2 = 0.9644 \quad (10)$$

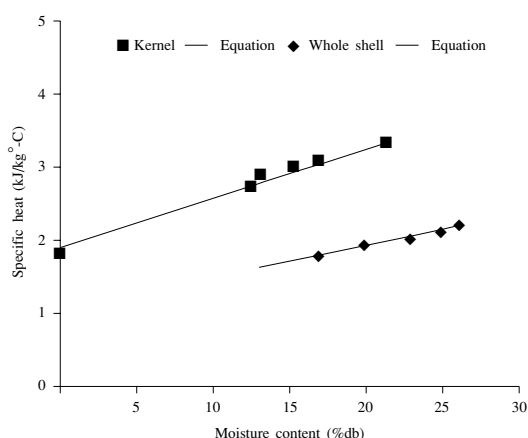
โดยที่

$C_p$  = ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg°C)

$M$  = ความชื้นเมล็ด, % มาตรฐานแห้ง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดในกับเมล็ดรวมเปลือกพบว่า ค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดในมีค่าสูงกว่าของเมล็ดรวมเปลือกที่ความชื้นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่เปลือกของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีสารประกอบจำพวกน้ำมันและสารระเหยซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำ จึงส่งผลให้ค่าความร้อนจำเพาะของทั้งเมล็ดรวมเปลือกมีค่าต่ำกว่าความชื้นสมดุล

รูปแบบสมการสมดุลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีทั้งหมด 5 สมการคือ



**Figure 5** Specific heat of cashew nut: kernel and whole shell.

1. สมการ BET (Brunauer *et al.*, 1938) แสดงความสัมพันธ์ของ  $M_{eq}$  เป็น

$$M_{eq} = \frac{RH}{(1-RH)\left(\frac{1}{A \times D} + \frac{D-1}{A \times D} \times RH\right)}$$

โดยที่  $D = C \times \exp\left[\frac{-B}{RT_{abs}}\right]$

2. สมการ Halsey (1948) แสดงความสัมพันธ์ของ  $M_{eq}$  เป็น

$$M_{eq} = \left[ \frac{-\ln(RH) \times R \times T_{abs}}{A} \right]^{1/B}$$

3. สมการ Chung and Pfof (1967) สามารถหา  $M_{eq}$  ได้จาก

$$M_{eq} = \frac{1}{B} \times \ln \left[ \frac{-\ln(RH) \times R \times T_{abs}}{A} \right]$$

4. สมการ Henderson (1952) สามารถคำนวณ  $M_{eq}$  ได้จาก

$$M_{eq} = \left[ \frac{-\ln(1-RH)}{A \times (18 \times T + 491.5)} \right]^{1/B}$$

5. สมการ Modified Henderson (Pfof *et al.*, 1976) สามารถคำนวณหา  $M_{eq}$  ได้จาก

$$M_{eq} = \left[ \frac{-\ln(1-RH)}{C \times (T+A)} \right]^{1/B}$$

การหาค่าคงที่ในสมการความชื้นสมดุลแบบต่างๆ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Statistica (non-linear regression) (Table 1)

### ความชื้นสมดุลของมะม่วงหิมพานต์เมล็ดใน

จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดที่ความชื้นเริ่มต้น 10 % มาตรฐานแห้ง และ 20 % มาตรฐานแห้งพบว่า เมล็ดทั้งสองความชื้นเริ่มต้นเข้าสู่สมดุลแบบคายความชื้น ยกเว้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงๆ ที่อุณหภูมิ 50°C เมล็ดที่ความชื้นเริ่มต้น

**Table 1** Constants of moisture equilibrium equations.

| Equation form      | Type | Constants |          |          | R <sup>2</sup> |
|--------------------|------|-----------|----------|----------|----------------|
|                    |      | A         | B        | C        |                |
| BET                | 1    | 0.020123  | -1551.72 | 0.063668 | 0.9890         |
|                    | 2    | 0.029580  | -4483.49 | 11991.68 | 0.8114         |
| Halsey             | 1    | 53.61800  | -1.07142 |          | 0.9730         |
|                    | 2    | 16.46500  | -1.8984  |          | 0.914          |
| Chung and Pfof     | 1    | 6205.287  | 24.3218  |          | 0.9597         |
|                    | 2    | 15433.00  | 23.4107  |          | 0.965          |
| Henderson          | 1    | 0.000338  | 1.10901  |          | 0.986          |
|                    | 2    | 0.000014  | 2.01651  |          | 0.9553         |
| Modified Henderson | 1    | 0.603737  | 1.397539 | 0.001554 | 0.9905         |
|                    | 2    | -43.8118  | 1.87702  | 0.000646 | 0.9618         |

Remark: 1 = kernel, 2 = whole shell

10 % มาตรฐานแห้งจะเข้าสู่สมดุลในลักษณะดูดความชื้น ค่าความชื้นสมดุลของทั้งสองความชื้นเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยแตกต่างกันไม่เกิน 1 % มาตรฐานแห้ง จึงใช้ค่าเฉลี่ยความชื้นสมดุลจากทั้งสองความชื้นเริ่มต้นมาหาเส้นความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น (desorption isotherm) จากการทดลองที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นสมดุลจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความดันไอของอากาศรอบๆ เมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันไอบนเมล็ดเพิ่มขึ้นด้วยเพื่อให้สมดุลกับความดันไอรอบๆ ความดันไอที่เพิ่มสูงขึ้นภายในเมล็ดนี้จะส่งผลให้เมล็ดคายความชื้นมากขึ้น สำหรับกรณีที่อุณหภูมิคงที่ความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ 10 - 40 % และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิคงที่เปลี่ยนไป ความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นในแต่ละอุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อความ

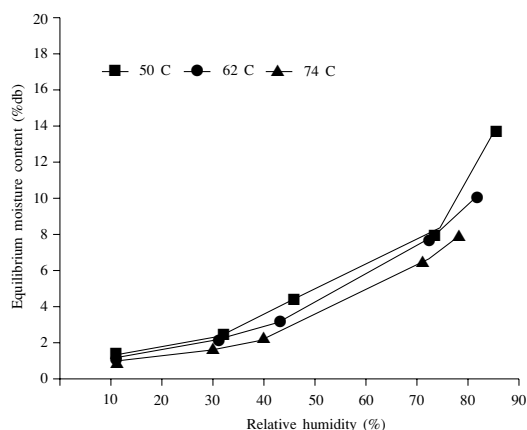
ชื้นสัมพัทธ์ที่มีค่าเกิน 40 % ขึ้นไป ความแตกต่างจะมีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เกิน 80 % (Figure 6, 7)

จากการเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลจากสมการต่างๆ กับค่าจากผลการทดลองพบว่า สมการที่ทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดในมะม่วงหิมพานต์ได้ดีตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์คือสมการกึ่งทฤษฎีของ Henderson (1952) และสมการเอมไพริคัล Modified Henderson (1976) สมการของ BET ไม่สามารถแสดงความแตกต่างของเส้นความชื้นสมดุลที่แต่ละอุณหภูมิได้ และที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 35 % และสูงกว่า 70 % สมการของ Halsey สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ดี (Figure 8)

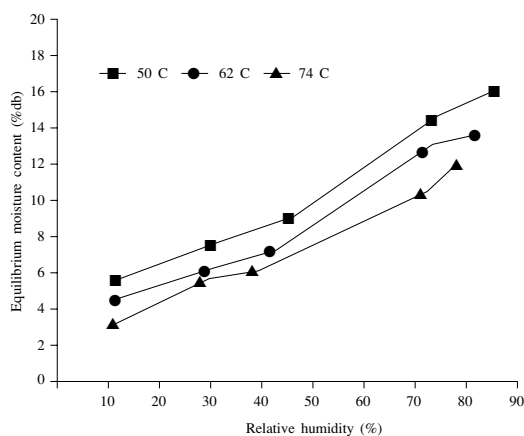
#### ความชื้นสมดุลของมะม่วงหิมพานต์เมล็ดรวมเปลือก

จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดรวมเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 13 % มาตรฐาน





**Figure 6** Equilibrium moisture content of cashew nut kernel at 50 °C, 62°C and 74°C.



**Figure 7** Equilibrium moisture content of cashew nut whole shell.

แห้ง และ 20 % มาตรฐานแห้งพบว่า เมล็ดทั้งสองความชื้นเริ่มต้นเข้าสู่สมดุลแบบคายความชื้น ยกเว้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงๆที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C เมล็ดที่ความชื้นเริ่มต้น 13 % มาตรฐานแห้งจะเข้าสู่สมดุลในลักษณะดูดความชื้น ค่าความชื้นสมดุลของทั้งสองความชื้นเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยแตกต่างกันไม่เกิน 1 % มาตรฐานแห้ง จึงใช้ค่าเฉลี่ยความชื้นสมดุลจากทั้งสองความชื้นเริ่มต้นมาหาเส้นความชื้น

สมดุลแบบคายความชื้น ค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเกือบเป็นเส้นตรงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เกิน 10 %

จากการเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลจากสมการต่างๆ กับค่าจากผลการทดลองพบว่า สมการที่ทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์รวมเปลือกได้ดีตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์คือสมการกึ่งทฤษฎีของ Henderson (1952) และสมการของ Chung and Pfof (1967) (Figure 9)

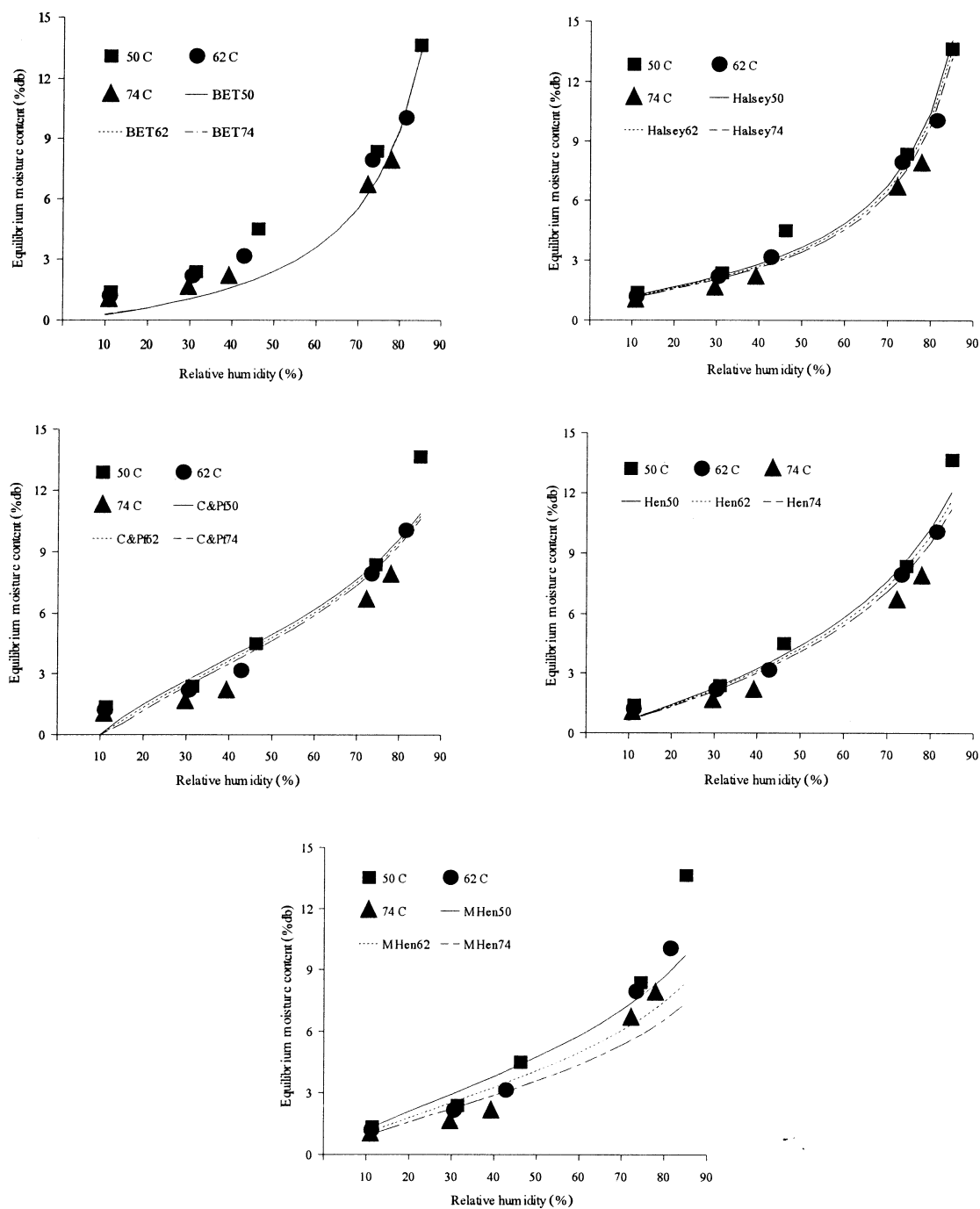
เนื่องจากสมการของ Henderson (1952) สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของทั้งเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกได้ดีจึงสรุปได้ว่าการดูดซับน้ำในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวชนิด multilayer molecule adsorption ซึ่งโมเลกุลของน้ำยึดติดกับผิวเมล็ดทางกายภาพเป็นหลัก

### อัตราการอบแห้ง

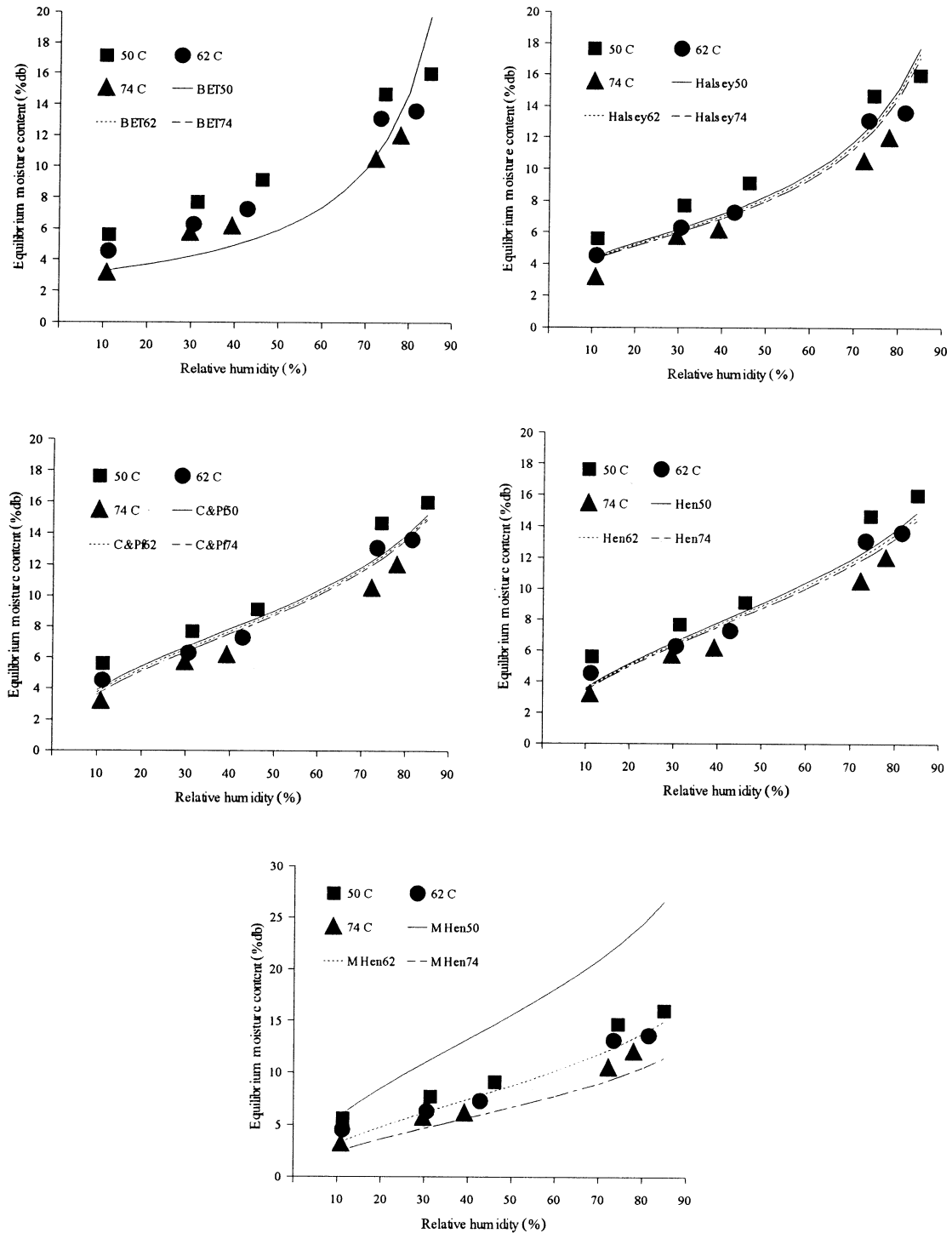
จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งโดยการอบแห้งชั้นบางพบว่า กระบวนการอบแห้งที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ โดยอุณหภูมิของเมล็ดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าคงที่ในเวลาที่น่า้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาการอบแห้งทั้งหมด (Figure 10)

ความชื้นเริ่มต้นไม่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งที่ค่าอุณหภูมิและความเร็วลมคงที่ เนื่องจากที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งค่าความแตกต่างระหว่างความดันไอรอบๆ กับภายในเมล็ดซึ่งเป็น driving force มีค่าคงที่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน (Figure 11)

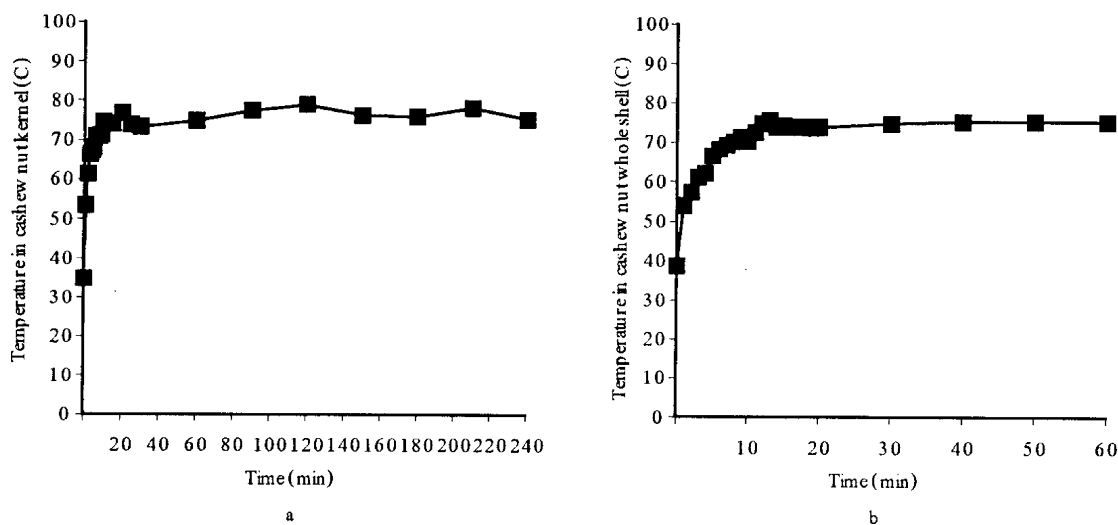
การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเพื่อศึกษาผลกระทบของ convective mass transfer ต่อการอบแห้งพบว่าไม่มีผลกระทบ เนื่องจากอัตราการอบแห้งยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าค่าความต้านทานภายนอกที่ลดลงเนื่องจากความหนาของฟิล์มอากาศนึ่งรอบเมล็ดลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วลมมีผลกระทบน้อยกว่าความต้านทานภายใน (Figure 12)



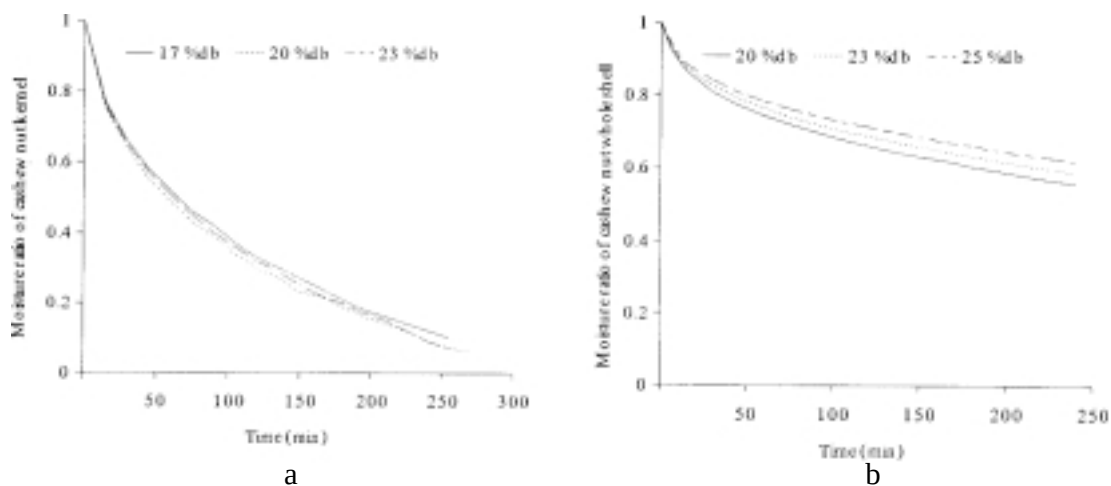
**Figure 8** Comparison between experiments and equilibrium moisture content equations of cashew nut kernel.



**Figure 9** Comparison between experiments and equilibrium moisture content equations of cashew nut whole shell.



**Figure 10** Temperature changes in cashew nut kernel and whole shell during drying. (80°C, 20 %db) a. air flow rate 3 m/s and b. air flow rate 2.5 m/s.



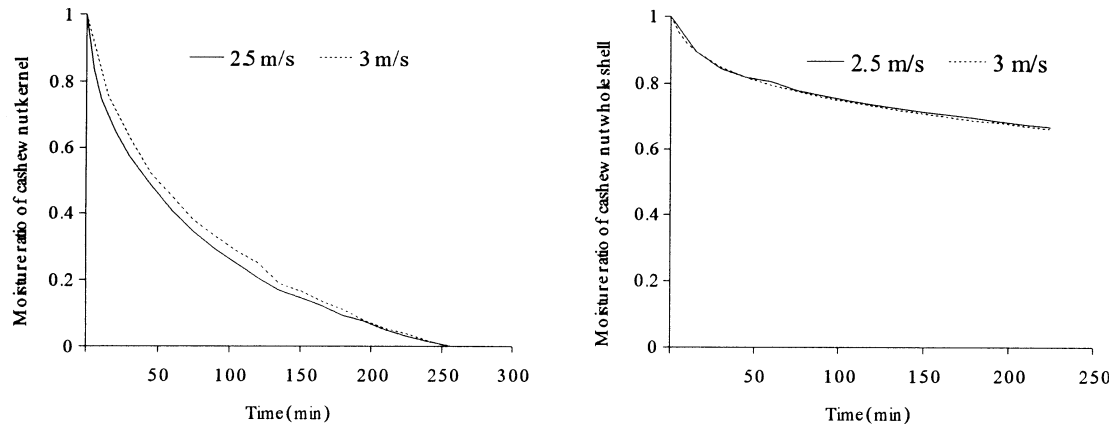
**Figure 11** Effect of Initial moisture content on drying rate (air velocity 2.5 m/s), a. drying temperature 60°C and b. drying temperature 100°C.

อุณหภูมิอบแห้งมีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่ากระบวนการอบแห้งเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นี้เป็น internal diffusion control ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำในเมล็ดกับอากาศรอบๆ มีค่าสูงขึ้นทำให้อัตราการแพร่ความชื้น

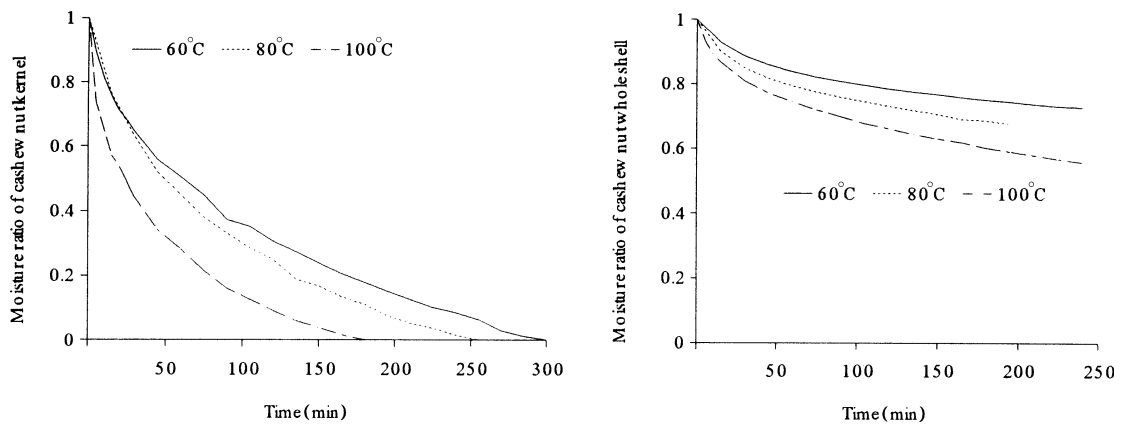
ของเมล็ดสูงขึ้นนอกมีค่าสูงขึ้น อัตราส่วนความชื้นจึงลดลงอย่างรวดเร็ว (Figure 13)

#### สมการอบแห้งชั้นบาง

สมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวม



**Figure 12** Effect of air flow rate on drying rate.  
(drying temperature 80°C, initial moisture content 20 %db)



**Figure 13** Effect of drying temperature on drying rate.  
(air flow rate 3 m/s, initial moisture content 20 %db)

เปลือกสร้างโดยพิจารณารูปร่างของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นรูปทรงกระบอก หาได้โดยนำสมการกึ่งเอมไพริคัลของแผ่นเรียบกว้างและยาวมาคูณ(cross product)กับสมการของทรงกระบอกยาวมาก ได้สมการดังนี้สำหรับเมล็ดใน

$$\begin{aligned}
 MR = & 0.5606\exp[-2.13115 \times 10^5(Dt)] + 0.10640\exp[-8.50845 \times 10^5(Dt)] \\
 & + 0.04320\exp[-1.99814 \times 10^6(Dt)] + 0.06229\exp[-7.23010 \times 10^5(Dt)] \\
 & + 0.01182\exp[-1.36013 \times 10^6(Dt)] + 4.8101 \times 10^{-3}\exp[-2.50802 \times 10^6(Dt)] \\
 & + 0.02242\exp[-1.7122 \times 10^6(Dt)] + 4.2558 \times 10^{-3}\exp[-2.38051 \times 10^6(Dt)] \\
 & + 1.73155 \times 10^{-3}\exp[-3.52780 \times 10^6(Dt)]
 \end{aligned} \tag{11}$$

โดยที่ ค่า  $R^2 = 0.9667$  และ

$$D = 0.132955 \exp[-3672.22/(T+273)] \quad (12)$$

สำหรับเมล็ดรวมเปลือก

$$\begin{aligned} MR = & 0.55164 \exp[-8.8673 \times 10^4 (Dt)] + 0.10469 \exp[-3.54008 \times 10^5 (Dt)] \\ & + 0.04260 \exp[-8.3136 \times 10^5 (Dt)] + 0.06129 \exp[-3.00815 \times 10^5 (Dt)] \\ & + 0.01163 \exp[-5.6615 \times 10^5 (Dt)] + 4.7336 \times 10^{-3} \exp[-1.0435 \times 10^6 (Dt)] \\ & + 0.02206 \exp[-7.2512 \times 10^5 (Dt)] + 4.1874 \times 10^{-3} \exp[-9.9045 \times 10^5 (Dt)] \\ & + 1.7040 \times 10^{-3} \exp[-1.4678 \times 10^6 (Dt)] \end{aligned} \quad (13)$$

โดยที่ ค่า  $R^2 = 0.9408$  และ

$$D = 7 \times 10^{-7} \exp[-1500/(T+273)] \quad (14)$$

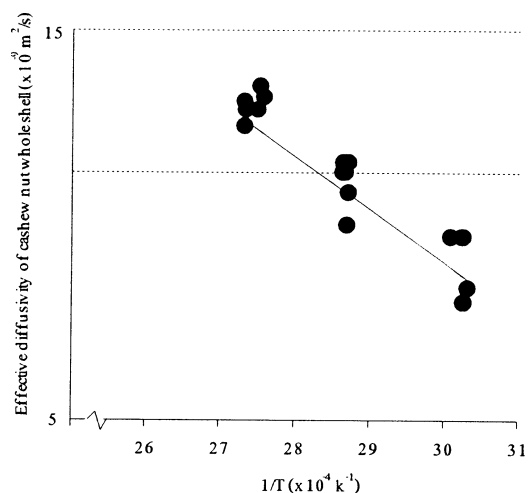
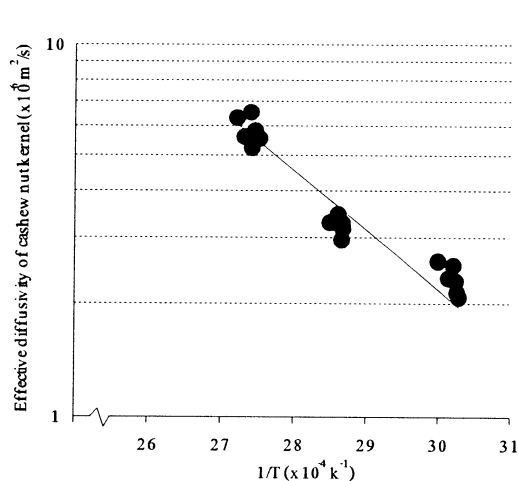
เมื่อ

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล, Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$T$  = อุณหภูมิของเมล็ด ( $^{\circ}\text{C}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในแต่ละการทดลองคำนวณได้จากการแทนค่าผลจากการทดลองลงในสมการอบแห้งชั้นบาง แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่คำนวณได้กับอุณหภูมิเมล็ดเฉลี่ยในแต่ละการทดลองไปหาสมการของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเมล็ดด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้โปรแกรม Statistica

สมการสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล โดยมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอภายในเมล็ดและภายนอกเมล็ดที่มากขึ้นตามอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่าง ล็อกการซึมของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับส่วนกลับของ



**Figure 14** Relation between logarithm of the effective diffusivity and inverse of drying temperature.

อุณหภูมิสัมบูรณ์มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Figure 14)

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนระหว่างเมล็ดในกับเมล็ดรวมเปลือกพบว่าเมล็ดในมีค่าสูงกว่าเนื่องจากไม่มีเปลือกซึ่งมีน้ำมันและผิวมีความเป็นไขมันเป็นตัวต้านทานการแพร่

## สรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความร้อนจำเพาะของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกมีค่าสูงขึ้นตามค่าความชื้นของเมล็ดที่สูงขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
2. ความหนาแน่นปรากฏช่องว่างระหว่างเมล็ดและความหนาแน่นจริงของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความชื้นของเมล็ด
3. สมการความชื้นสมดุลของ Henderson และ Modified Henderson สามารถทำนายความชื้นสมดุลของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมล็ดในได้ดี ส่วนเมล็ดรวมเปลือกสมการของ Henderson และ Chung and Pfost ทำนายได้ดี
4. สมการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดในและเมล็ดรวมเปลือกสามารถแสดงได้ในรูปสมการเอ็กโพเนนเชียลของวัตถุทรงกระบอกและมีสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นที่เป็นฟังก์ชันกับส่วนกลับของอุณหภูมิในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล

## เอกสารอ้างอิง

ธงชัย ตรีนพคุณ. 2537. สมการอบแห้งและแบบจำลองความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์เกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

วิจิตร วรรณจิต. 2528. มะม่วงหิมพานต์. ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. วิทยาเขตหาดใหญ่, สงขลา. 107น.

วิไล ตันติคุณ. 2522. การผลิตและการค้ามะม่วงหิมพานต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ และ วิไลพร นพรัตน์ไกรลาส. 2530. อุปกรณ์การศึกษาอัตรากรอบแห้งเมล็ดพืชและผลการทดสอบข้าวเปลือก รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่องเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม 28-30 ตุลาคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุภวรรณ ฐิระวนิชย์กุล และ ยุทธนา ฐิระวนิชย์กุล. 2537. พารามิเตอร์ของการอบแห้งชั้นบางของเนื้อในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. วารสารสงขลานครินทร์. 16 : 381-392.

Bala B. K. and L. Woods. 1992. Thin layer drying models of malt. J. Food Eng. 16 : 239-249.

Brunauer S., P.H. Emmette, and E. Teller. 1938. Adsorption in multi-molecular layers. J. Am. Chem. Soc. 60 : 309-319.

Chung D. S. and H. B. Pfost. 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. ASAE 10 : 549-557.

Halsey G. 1948. Physical adsorption on non-uniform surfaces. J. Chem. Phys. 16 : 931.

Henderson S. M. 1952. A basic concept of equilibrium. Agri. Eng. 33 : 29-31.

Madamba P. S., R. H. Driscoll, and K. A. Buckle. 1994. Predicting the absorption behaviour of galic slices. Drying Technology. 12 : 669-683.

Mazza G. and M. Leamaguer. 1980. Dehydration of onions: Some theoretical and practical considerations. J Food Tech. 15 : 181-194.

- Pfost H. B., S. G. Maurer, D. S. Chung, and G. A. Milliken. 1976. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. ASAE paper no. 76-3520. St. Joseph. Michigan.
- Rapusas R. S. and R. H. Driscoll. 1995. The thin layer drying characteristics of white onion slices. *Drying Technology* 13 : 1905-1931.
- Waananen K. M., J. B. Littchfield and M. R. Okos. 1993. Classification of drying models for porous solids. *Drying Technology* 11 : 1-25.
- Wongwises S. and M. Thongprasert. 1990. Thin-layer drying characteristics of Thai rough rice. *Asian Food J.* 5 : 91-95.
- 
- วันรับเรื่อง : 10 ก.ค. 40
- วันรับตีพิมพ์ : 25 ธ.ค. 40