จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูง

Drying kinetics of Longan Flesh at High Temperature

สารภี ชัญถาวร* ศิวะ อัจฉริยวิริยะ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ และ กอดขวัญ นามสงวน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200 โทร 0-5394-4146 โทรสาร 0-5394-4145 E-mail: sarapeec@yahoo.com

Sarapee Chunthaworn* Siva Achariyaviriya Aree Achariyaviriya and Kodkwan Namsanguan
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
Muang District, Chiang Mai 50200 Thailand Tel: 0-5394-4146 Fax: 0-5394-4145 E-mail: sarapeec@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎีของการอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูง และพัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นตามรูปแบบสมการของ Arrhenius โดยใช้ลำไยพันธ์ดอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-30 mm และมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 470-510 %db. ทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 100–130 °C และความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s. ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน จนเหลือความชื้นสุดท้าย 18 %db. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม โดยการฟิตข้อมูลจากผลการทดลองกับสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด พบว่าแบบจำลองที่ 2 ที่มีค่า Arrhenius factor (D_o) เป็นฟังก์ชันกับความชื้นของลำไยในลักษณะสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง ให้ค่า R^2 สูงสุดและค่า MRS ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณในแต่ละแบบจำลองกับผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ 2 เหมาะสมในการทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดีตลอดช่วงการทดลอง

Abstract

The objectives of this research were to study the theoretical drying kinetic equation of longan flesh drying at high temperature and to develop the diffusion models with Arrhenius-type equation. The longan of E-dor variety (*Dimocarpus Longan Lour.*) was used in this study. The sample sizes of 25-30 mm. in diameter and the initial moisture content of 470–510 %db were tested. The experiments were carried out in a hot air dryer at the drying air temperature in a range of 100-130°C and a constant air velocity of 0.7 m/s. This longan was dried until final moisture content of 18 %db. The effective diffusion coefficient was determined by fitting the experimental data to drying kinetic equation using least square method. It was found that Model 2, which the Arrhenius factor (D_o) was a second-degree polynomial function of moisture content, gave the highest value of R^2 and the lowest value of MRS. The moisture ratios calculated from each model were compared with experimental result. It could be concluded that the moisture ratios calculated by using Model 2 were accurate throughout the drying process.

1. บทนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีความสำคัญในเขตภาคเหนือของประเทศไทย โดยจะได้ผลผลิตประมาณเดือนกรกฎาคม – กันยายน ลำไยเป็นผลไม้ที่มีความชื้นสูง เน่าเสียได้ง่าย จึงมีความจำเป็นในการแปรรูปผลผลิต เช่น การทำลำไยกระป๋อง การทำลำไยอบแห้ง เพื่อลดปัญหาการเน่าเสียของลำไยสด และเป็นการส่งเสริมการขายลำไยให้ได้ราคาที่สูงขึ้น ในปี 2551 ประเทศไทยมีรายได้จากการส่งออกลำไยอบแห้งคิดเป็นมูลค่ารวม 1.83 พันล้านบาท[1] จึงจำเป็นต้องพัฒนาการผลิตลำไยอบแห้งให้ทันกับปริมาณความต้องการและมีคุณภาพ เพื่อให้การส่งออกลำไยอบแห้งของไทยขยายตัวได้อย่างต่อเนื่อง และในปัจจุบันได้ให้ความสนใจในเรื่องการประหยัดพลังงานและสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งในการผลิตลำไยอบแห้งทั้งแบบอบทั้งเปลือกและอบเฉพาะเนื้อลำไย โดยทั่วไปในการอบแห้งลำไยของเกษตรกรจะเป็นการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60-80 °C ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานและใช้พลังงานค่อนข้างมาก

มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีและประหยัดพลังงาน [2] ทำการอบแห้งลำไยทั้งลูกแบบใช้อุณหภูมิอบแห้งเป็นแบบลำดับขั้น โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 93°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 83°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและที่อุณหภูมิ 74°C 17 ชั่วโมง [3] การอบแห้งลำไยเฉพาะเนื้อด้วยลมร้อนอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 65°C ใช้เวลา 12.5 h [4] ได้ทำการอบแห้งลำไยแบบ

คว้านเมล็ดออกโดยใช้การอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน พบว่าการอบแห้งที่เหมาะสมคือที่ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 180°C ใช้เวลา 15 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 13 ชั่วโมง จากการตรวจเอกสารพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและการอบแห้งแบบใช้อุณหภูมิการอบแห้งแบบเป็นลำดับขั้นจะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง สำหรับการอบแห้งเนื้อลำไยนั้นยังขาดการศึกษาการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงด้วยลมร้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูงและทำการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎี เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูงเพื่อเป็นแนวทางการอบแห้งเนื้อลำไยที่เหมาะสมให้กับเกษตรกรอีกทางหนึ่ง

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การทดลอง

ในการทดลองใช้ลำไยพันธุ์ดอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-30 mm. ทำการคว้านเมล็ดและแกะเปลือกออก ความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไยประมาณ 470-510 %db. ทดลองอบแห้งเนื้อลำไยด้วยอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100, 110, 120 และ 130 °C ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s ทำการอบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้าย 18 %db. ในระหว่างการทดลองจะทำการบันทึกข้อมูล น้ำหนักตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งอิเลคทรอนิกส์ที่มีความละเอียด $\pm$ 0.001 กรัม, ขนาดของตัวอย่าง, อุณหภูมิตัวอย่าง อุณหภูมิลมที่เข้าห้องอบแห้ง, อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม โดยทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก ทุกๆ 30 นาที ใน 2 ชั่วโมงต่อมา ทุกๆ 1 ชั่วโมง ใน 2 ชั่วโมงต่อมา และทุกๆ 2 ชั่วโมงจนสิ้นสุดการอบแห้ง และนำตัวอย่างหลังการอบแห้งมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้งและคำนวณหาความชื้นต่อไป

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คำนวณหาการหดตัวของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้น และทำการวิเคราะห์สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎีเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (D_{eff}) โดยกำหนดสมมุติฐานว่ารูปร่างของเนื้อลำไยที่ใช้ในการศึกษากลไกการอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกลมกลวง (hollow sphere) ที่มีรัศมีภายใน $r_i = a$ และรัศมีภายนอก $r_o = b$ แสดงดังสมการ (1)

$$MR = \frac{6}{\pi^2\left(a^2 + ab + b^2\right)}\sum_{n=1}^{\infty}\left\{\left(\frac{b\cos n\pi - a}{n}\right)^2 \exp\left(\frac{-D_{eff}n^2\pi^2 t}{(b-a)^2}\right)\right\} \quad (1)$$

แต่เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 100 °C) สามารถลดความชื้นได้จนวัสดุมีความชื้นสมดุลที่ต่ำมาก จึงกำหนดให้ $M_{eq} = 0$

ดังนั้น $MR = \frac{M}{M_{in}}$

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมจะทำการฟิตข้อมูลการทดลองกับสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งสมการ (1) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมของเนื้อลำไยที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมมาสร้างสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมกับอุณหภูมิอบแห้งตามรูปแบบของสมการ Arrehnius โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือ Model 1 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมมีค่าคงที่ตลอดช่วงการอบแห้งที่แต่ละอุณหภูมิดังสมการ (2) และ Model 2 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมมีค่าคงที่ในช่วงเวลาสั้นๆ ของการอบแห้งและค่า Arrhenius factor (D_o) เป็นฟังก์ชันกับความชื้นของลำไยในลักษณะสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง ดังสมการ (3)

Model 1: $$D_{eff} = D_O \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (2)$$

Model 2: $$D_{eff} = \left(C_1M^2 + C_2M + C_3\right)\exp\left(\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (3)$$

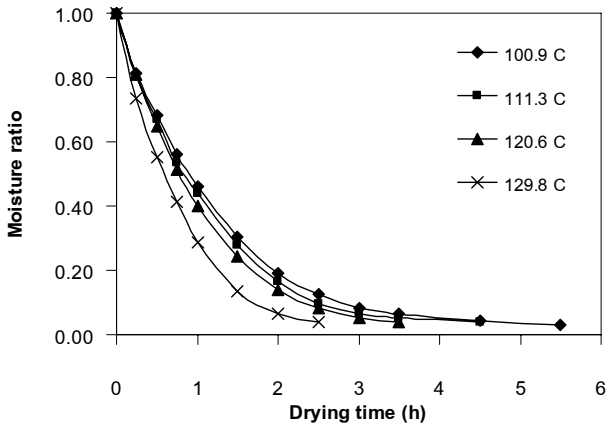
โดยที่ D_o คือ Arrhenius factor (m^2/h), E_a คือพลังงานกระตุ้น (kJ/kmol), R คือค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 kJ/kmol.K), และ T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎีโดยพิจารณาผลของการหดตัวของลำไยระหว่างการอบแห้ง โดยสัดส่วนการหดตัวของรัศมี (r/r_{in}) เป็นฟังก์ชันกับสัดส่วนความชื้น (M/M_{in}) ดังสมการ (4)

$$\frac{r}{r_{in}} = A + B\frac{M}{M_{in}} \quad (4)$$

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการทดลองอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิ 100 -130 °C พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นทำให้การระเหยน้ำในเนื้อลำไยดีมากขึ้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลง เมื่อนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 1 จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งของเนื้อลำไยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับเวลาการอบแห้ง

จากการทดลองการอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเนื้อลำไยมีการหดตัวของรัศมีภายในและภายนอกประมาณ 27% และ 32% ตามลำดับ สามารถแสดงสมการการหดตัวในแนวรัศมีของเนื้อลำไยตลอดการอบแห้งได้ดังสมการ (5)-(7)

$$\frac{r_o}{r_{o,in}} = 0.6599 + 0.3622\,\frac{M}{M_{in}} \qquad (5)$$

$$\frac{\Delta r}{\Delta r_{in}} = 0.5983 + 0.4476\,\frac{M}{M_{in}} \qquad (6)$$

$$r_i = r_o - \Delta r \qquad (7)$$

การสร้างสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม

นำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมที่มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการอบแห้งและความชื้นของเนื้อลำไยมาหาความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการ (2) และ (3) จะได้สมการแบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมดังนี้

Model 1: $$D_{eff} = 0.00051 \exp\left(\frac{-18.64}{RT_{abs}}\right) \qquad (8)$$

R^2 = 0.973 MRS = 0.0020

Model2:

$$D_{eff} = \left(-0.53M^2 + 1.80M + 5.11\right)x10^{-4} \exp\left(\frac{-19.26}{RT_{abs}}\right) \qquad (9)$$

R^2 = 0.996 MRS = 0.0002

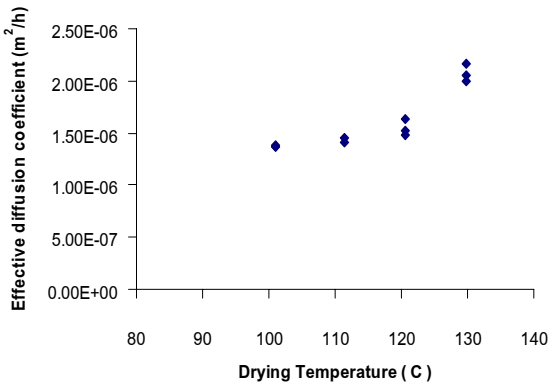
โดยที่

$$R^2 = \sum_{i=1}^{n}\left[\left(MR_{pr}\right)_i - \left(MR_{ex}\right)_{av}\right]^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}\left[\left(MR_{ex}\right)_i - \left(MR_{ex}\right)_{av}\right]^2$$

$$MRS = \sum_{i=1}^{n}\left[\left(MR_{pr}\right)_i - \left(MR_{ex}\right)_i\right]^2 \Big/ n$$

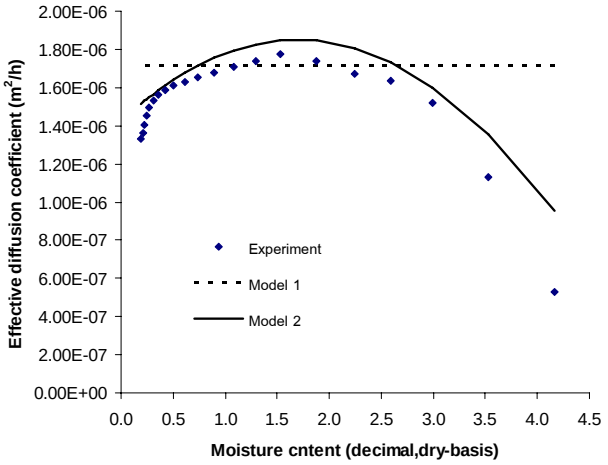
เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมกับอุณหภูมิการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าอุณหภูมิการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมสูงขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความดันไอภายในเนื้อลำไยมีค่ามากกว่าความดันไอภายนอก จึงทำให้น้ำเคลื่อนที่ผ่านออกมาทางรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมที่ได้จากผลการทดลองและการคำนวณจากสมการ (8) และ (9) มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมกับความชื้นดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมจาก Model 2 มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมาก ในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นของเนื้อลำไยมีค่าสูง อุณหภูมิของเนื้อลำไยค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมค่อยๆ สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วจะมีค่าลดลง เนื่องจากในช่วงหลังของการอบแห้งความชื้นของเนื้อลำไยมีค่าค่อยๆ ลดลงและการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเนื้อลำไยมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมมีค่าลดลง

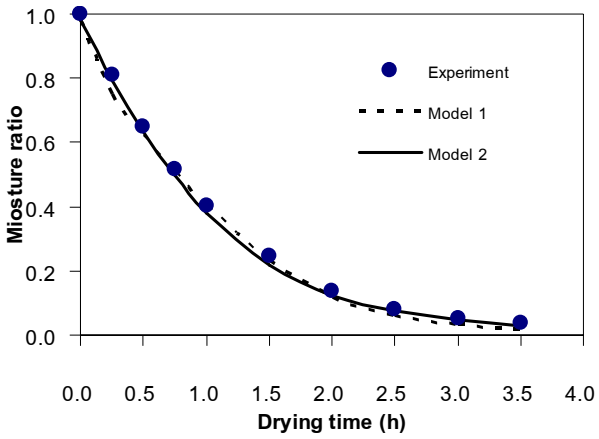


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมจากผลการทดลองกับอุณหภูมิการอบแห้ง

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมจาก Model 1 และ Model 2 มาคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการ (1) จำนวน 20 เทอม เมื่อ t = 0 ให้ค่า MR = 0.98 และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณเทียบกับข้อมูลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จาก Model 2 ซึ่งเป็นรูปแบบสมการที่มีค่า Arrhenius factor เป็นฟังก์ชันกับความชื้นของลำไยในลักษณะสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดช่วงการอบแห้งได้ดี กว่า Model 1 ซึ่งให้ผลสอดคล้องไปในทางเดียวกันทุกอุณหภูมิการทดลอง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมกับความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้ง 120.6 °C



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 120.6 °C

4. สรุป

ในการอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูง พบว่าอัตราการอบแห้งของเนื้อลำไยจะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมกับอุณหภูมิการอบแห้งและความชื้นของลำไยของ Model 2 สามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนทุนวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร “ปริมาณและมูลค่าการส่งออกลำไยแห้ง” http://www.oae.go.th., 2552 (29 มกราคม 2552)
2. ชลิตา พึ่งจาบ. “แนวทางการอบแห้งลำไยแบบใช้อุณหภูมิการอบแห้งเป็นลำดับขั้น”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
3. Achariyaviriya, A., Soponronnarit, S. and Tiansuwan, J. ”Drying kinetics of longan flesh” Proceedings of the International Agricultural Engineering Conference. Bangkok, pp. 212-218, 2000.
4. Somjai, T., Achariyaviriya, S., Achariyaviriya, A. and Namsanguan, K. “Strategy for longan drying in two-stage superheated steam and hot air” Journal of Food Engineering 95, pp. 313-321, 2009.