



การอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำ

Drying of Longan without Stone Using Low-pressure Superheated Steam

ปิยวิทย์ มั่งมุล^{1*}, กอดขวัญ นามสงวน¹, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ¹ และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ¹

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 239 ถนนห้วยแก้ว, อำเภอเมือง, จังหวัดเชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: piyawit_m@cmu.ac.th , 087-788-2286

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ การอบแห้งของลำไยคว้านเมล็ดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ และศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีผลต่อเวลาการอบแห้งรวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง เงื่อนไขของสภาวะการอบแห้งที่ทำการพิจารณาคืออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วง 70-90 °C และที่ความดันสัมบูรณ์ 7, 10 และ 15 kPa ทำการอบแห้งไปจนถึงความชื้นสุดท้าย 18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พิจารณาคุณภาพของลำไยคว้านเมล็ดหลังการอบแห้งในด้านการหดตัว จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิและความดันมีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและความดันลดลงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในส่วนของคุณภาพการหดตัวจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและความดันลดลง ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดในรูปแบบกึ่งทฤษฎีและเอมไพริคัลพบว่า สมการทั้งสองสามารถทำนายการลดลงของความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลอง เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 90 °C และความดัน 7 kPa โดยพิจารณาเวลาการอบแห้งและคุณภาพ

คำหลัก: การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนความดันต่ำ, คุณภาพ, ลำไย, สมการจลนพลศาสตร์

Abstract

The present study aimed at investigating a novel strategy and developing a model for longan without stone drying using a low-pressure superheated steam (LPSS). The effects of drying conditions, i.e., drying temperature and pressure on the drying kinetics and the quality of the dried product was investigated. The experiments were conducted using superheated steam temperatures at 70, 80 and 90 °C and absolute pressures at 7, 10 and 15 kPa. The moisture content of longan at the end was about 18% wet basis. The quality of the dried longan was then evaluated in terms of shrinkage. The results showed that drying rate were found to be affected by temperature and pressure, when the drying rate was increasing by temperature increased and pressure decreased. The shrinkage decreased with the increasing temperature and decreasing pressure. In this research, The drying kinetic model in terms of semi – theoretical model and empirical model was developed and results agreed well with the experimental results. Considering drying time and product quality, drying at temperature of 90 °C and pressure of 7 kPa was the best condition for drying longan without stone in this case.



Keywords: Longan, Low-pressure superheated steam drying(LPSSD), Mathematical model, Product Quality.

1. คำนำ

ลำไยเป็นผลไม้ที่นิยมปลูกในบริเวณภาคเหนือ เนื่องจากในแต่ละปีจะมีผลผลิตลำไยจำนวนมากออกมาขายตามท้องตลาด จึงนิยมนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าและยืดระยะเวลาการเก็บรักษา ลำไยอบแห้งมี 3 แบบคือ ลำไยอบแห้งทั้งเปลือก(ทั้งลูก) ลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อ และลำไยอบแห้งแบบคว้านเมล็ด แบบแรกเป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรมแต่ต้องใช้เวลาในการอบนานถึง 40-50 ชั่วโมง จึงใช้พลังงานในการอบแห้งสูง [1] ส่วนการอบแห้งลำไยเฉพาะเนื้อใช้เวลาประมาณ 12-18 ชั่วโมง [2] แต่ไม่ค่อยเป็นที่ยอมรับในด้านของความสะดวก ดังนั้นการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดจึงเป็นอีกหนทางแบบใหม่แก่ผู้บริโภค

การอบแห้งด้วยลมร้อนใช้ระยะเวลาในการอบแห้งค่อนข้างนานและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นซึ่งทำให้สีคล้ำ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งจึงเป็นวิธีหลีกเลี่ยงการเกิดสีน้ำตาลได้เนื่องจากไม่มีอากาศอยู่ภายในระบบและเป็นกระบวนการอบแห้งที่ให้อัตรการอบแห้งสูง ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง แต่การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งที่อุณหภูมิสูงตลอดช่วงการอบแห้งอาจทำให้คุณภาพเสียหายได้ จากการตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่า การอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งร่วมกับลมร้อน ให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้นกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งเพียงอย่างเดียว [3] จากรายงานการวิจัยพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งความดันต่ำ เป็นอีกหนึ่งทางเลือก เนื่องจากสามารถอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำโดยให้อัตรการอบแห้งเร็ว ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีคุณภาพที่ดีขึ้น [4, 5, 6]

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งความดันต่ำ เพื่อศึกษาอิทธิพลของ

ความดันและอุณหภูมิต่อการอบแห้ง แล้วทำการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทั้งทางกึ่งทฤษฎีและเอมไพริคัล โดยค่าคงที่ของสมการจะอยู่ในฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิ

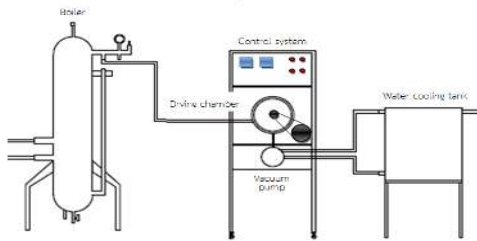
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์ทดลองและวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งความดันต่ำแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm ยาว 40 cm หม้อต้มไอน้ำ ปัมสุญญากาศ เครื่องมือวัดประกอบด้วยเครื่องมือวัดความดัน เครื่องมือวัดอุณหภูมิ เครื่องชั่งน้ำหนัก โดยหลักการทำงานคือไอน้ำที่ผลิตจากหม้อต้มไอน้ำ จะเคลื่อนที่ไปยังห้องอบแห้งที่ประกอบด้วยตัวให้ความร้อนและพัดลมเพื่อรักษาอุณหภูมิและกระจายไอน้ำในห้องอบแห้ง โดยมีปัมสุญญากาศทำหน้าที่ลดความดันภายในห้องอบแห้ง โดยมีถังน้ำหล่อเย็น ทำหน้าที่ช่วยลดอุณหภูมิของปัมสุญญากาศ ชุดควบคุมการทำงานของห้องอบแห้งทำหน้าที่ควบคุมให้อุณหภูมิและความดันในห้องอบแห้งเป็นไปตามกำหนดไว้

การทดลองอบแห้งนำลำไยพันธุ์ขอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-30 mm ไปล้างแล้วทำการคว้านเมล็ดออกโดยมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 350-400 มาตรฐานแห้ง นำลำไยจำนวน 25 ลูก วางบนถาดตัวอย่าง อุณหภูมิห้องอบแห้งถึงอุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นนำลำไยข้างต้นเข้าเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งความดันต่ำอบแห้งที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C และควบคุมความดันที่ 7,10 และ 15 kPa ในระหว่างการอบแห้งจะทำการบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง โดยจะทำการบันทึกทุกๆ 10 นาทีในชั่วโมงแรก จากนั้นบันทึกทุกๆ 30 นาทีจนเหลือความชื้นร้อยละสุดท้าย 18 มาตรฐานเปียก นำตัวอย่าง

ลำไยมาอบแห้งด้วยตู้อบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาผลแห้งและความชื้นต่อไป



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำ

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.2.1 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงของลำไยคว้านเมล็ดกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของสมการกึ่งทฤษฎีจากสมการที่ 1

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \exp(-k_0 t) \quad (1)$$

ในส่วนของสมการเอมไพริคัลของ Page แสดงดังสมการที่ 2 [7]

$$MR = \exp(-k_1 t^n) \quad (2)$$

แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดความชื้นสมดุลที่ต่ำมากจึงกำหนดให้ $M_{eq} = 0$ ดังนั้นสมการอัตราส่วนความชื้นที่ใช้คือ $MR = \frac{M}{M_m}$

จากสมการจะสามารถหาค่า k_0 และ k_1 ที่สภาวะการอบแห้งแต่ละเงื่อนไข เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งกับอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการอบแห้งด้วยวิธีสมการถดถอย โดยค่าคงที่ k_0 และ k_1 จะอยู่ในฟังก์ชันอุณหภูมิและความดัน และค่าคงที่ n ก็จะมีอยู่ในฟังก์ชันอุณหภูมิและความดันเช่นกัน

2.2.2 คุณภาพด้านการหดตัว

ระหว่างการอบแห้งความชื้นจะมีการเคลื่อนย้ายตัวซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในและทำให้เกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ โดยการหดตัวอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจาก 2 เหตุผล อย่างแรก เนื่องจากเมื่อโครงสร้างที่เคยมีน้ำอยู่ แล้วน้ำหายไปหรือมีอากาศเข้ามา เนื้อเยื่อไม่สามารถที่จะยึดโครงข่ายของโครงสร้างทั้งหมดไว้ได้ อย่างที่สองคือ เกิดการพังทลายของโครงสร้างภายใน กรณีนี้ผิวของผลิตภัณฑ์จะแข็งตัว ซึ่งในกรณีนี้แม้โครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์จะพังทลาย ปริมาตรส่วนใหญ่อาจเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น การหดตัวของลำไยคว้านเมล็ดสามารถหาได้จากสมการ

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{d_m - d_f}{d_m} \times 100 \quad (3)$$

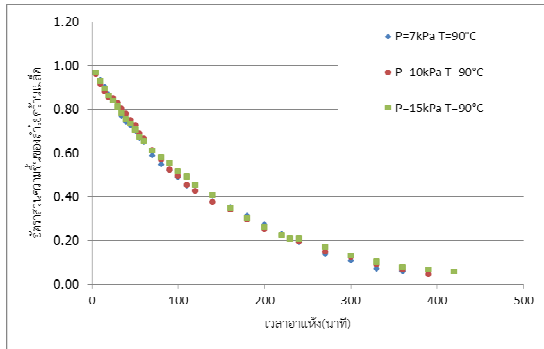
การวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งลำไย โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการคำนวณโดยใช้ค่า R^2 (The coefficient of determination) เป็นเกณฑ์เลือกใช้สมการที่เหมาะสมดังสมการ

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2} \quad (4)$$

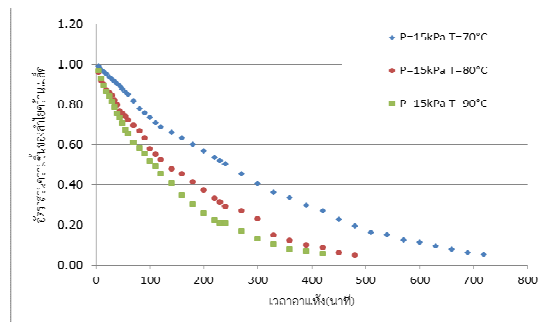
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด

ในการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำต่ออัตราการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นต่อเวลาแสดงดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3



รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ความดันต่างกัน ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 3 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ความดันเดียวกันแต่อุณหภูมิต่างกัน ณ เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 2 เมื่อความดันต่างกันพบว่าที่ความดันต่ำจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า เนื่องจากการอบแห้งที่ความดันต่ำจะทำให้จุดเดือดของวัสดุต่ำลงด้วย จึงเป็นเหตุผลให้น้ำที่อยู่ภายในวัสดุ เกิดการระเหยออกมาเร็วกว่า ในส่วนของรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะมีอัตราการอบแห้งที่มากกว่าและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำ จากทั้งสองภาพจะเห็นได้ว่ากราฟมีอัตราส่วนความชื้นลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความดัน เนื่องจากเมื่อทำการทดลองที่แต่ละความดัน ระยะเวลาในการอบแห้งค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบแห้งมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด

3.2 ผลการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการอบแห้ง ค่าคงที่ของสมการแบบกึ่งทฤษฎีและค่าคงที่ของการอบแห้งแบบเอมไพริคัลโดยพิจารณาที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C ความดัน 7, 10 และ 15 kPa

จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าอัตราการอบแห้งสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและความดันลดลง ซึ่งเป็นผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง โดยพบว่าการอบแห้งที่ความดัน 7 kPa อุณหภูมิ 90 °C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และสามารถสร้างสมการค่าคงที่ k_0 ของการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีที่อยู่ในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันดังนี้

$$k_0 = 1.641 \times 10^{-4} T - 8.835 \times 10^{-5} P - 6.622 \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.879$$

และสร้างสมการค่าคงที่ k_1, n ของการอบแห้งแบบเอมไพริคัลซึ่งจะอยู่ในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันเช่นกันคือ

$$k_1 = -0.09985 + 0.002875 T - 0.003386 P - 1.753 \times 10^{-5} T^2 + 1.359 \times 10^{-5} TP + 0.0001093 P^2 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.7961$$

$$n = 1.704 - 0.0298T + 0.1199P + 1.852 \times 10^{-4} T^2 - 2.089 \times 10^{-4} TP - 0.004929P^2 \quad (7)$$

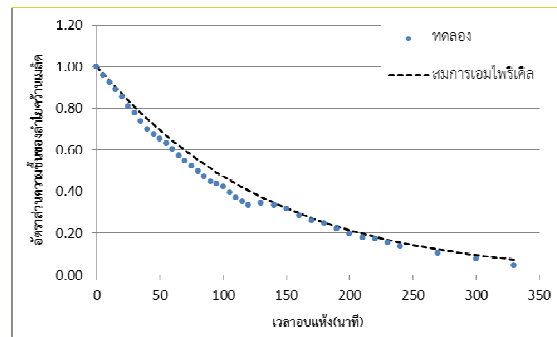
$$R^2 = 0.7240$$



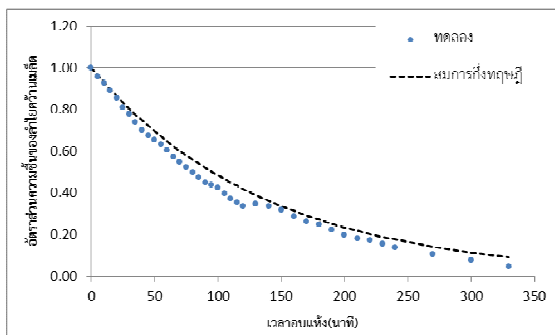
ตาราง 1 แสดงเวลาการอบแห้งและค่าคงที่ของสมการจลนพลศาสตร์

ความดัน (kPa)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	กึ่งทฤษฎี		เอมไพริคเคิล		
			k_0	R^2	k_1	n	R^2
7	70	495	0.004150	0.997320	0.004094	1.005215	0.997700
	80	405	0.006783	0.997820	0.007244	0.997585	0.999055
	90	345	0.006647	0.998620	0.006898	0.992916	0.998685
10	70	540	0.004332	0.997190	0.002617	1.081748	0.999600
	80	435	0.005420	0.996235	0.004068	1.084819	0.999350
	90	360	0.007636	0.998825	0.007584	1.003729	0.998900
15	70	705	0.003040	0.997890	0.002817	1.015588	0.998800
	80	465	0.005730	0.990345	0.009952	0.892492	0.996970
	90	405	0.006726	0.998885	0.008003	0.961687	0.999325

การเปรียบเทียบการลดลงของอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 พบว่าสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทั้งแบบกึ่งทฤษฎีและเอมไพริคเคิลสามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกัน โดยค่า R^2 ของสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีมีค่า 0.9737 และค่า R^2 ของสมการการอบแห้งแบบเอมไพริคเคิลมีค่า 0.9743



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการลดลงของอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองเอมไพริคเคิล



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบการลดลงของอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองกึ่งทฤษฎี

3.3 ผลคุณภาพด้านการหดตัว

ตารางที่ 2 แสดงค่าการหดตัวของลำไยคว้านเมล็ด

ความดัน (kPa)	อุณหภูมิ (°C)	Shrinkage (%)
7	70	40.6
	80	39.02
	90	37.93
10	70	41.35
	80	40.82
	90	39.51
15	70	42.53
	80	41.85
	90	40.13

จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิมอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวลดลง เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้น้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์เกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว แล้วเกิดรูพรุนภายในโครงสร้างมากกว่า ในส่วนของความดันพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออบแห้งที่ความดันสูง ทำให้เวลาการอบแห้งนานขึ้น ส่งผลให้การหดตัวน้อยลง จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C และความดัน 7 kPa ผลลัพธ์ค่าหดตัวน้อยที่สุด

4.สรุปผล

การทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อน ยวดยิ่งความดันต่ำพบว่าอุณหภูมิและความดันมีผลต่ออัตราส่วนความชื้นของลำไยคว้านเมล็ด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงและความดันที่เพิ่มขึ้นจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในส่วนของการหดตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและความดันลดลง จะทำให้การหดตัวจะลดลง สมการจลนพลศาสตร์ของ

การอบแห้งของทั้งทางกึ่งทฤษฎีและเอมไพริคเคิลสามารถทำนายการลดลงของความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลอง เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 90 °C และความดัน 7 kPa เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดและคุณภาพการหดตัวน้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่สนับสนุนทุนการวิจัย และภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัย เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ประกอบการทดลอง

สัญลักษณ์

- k_0, k_1, n ค่าคงที่
- d_m เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุเริ่มต้นอบแห้ง (mm)
- d_f เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุหลังอบแห้ง (mm)
- M ความชื้นของลำไยคว้านเมล็ด (%db)
- M_i ความชื้นเริ่มต้นของลำไยคว้านเมล็ด (%db)
- M_{eq} ความชื้นสมดุลของลำไยคว้านเมล็ด (%db)
- MR ค่าอัตราส่วนความชื้นของวัสดุ
- P ค่าความดัน (kPa)
- t เวลาอบแห้ง (min)
- T อุณหภูมิมอบแห้ง (°C)
- y_i ค่าตัวแปรตามทีวี่เคราะห์แบบกำลังสองน้อยสุด
- \hat{y}_i ค่าของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง
- \bar{y} ค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ได้จากการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภราดร หนูทอง, อารีย์ อัจฉริยะวิริยะ และ ศิวะ อัจฉริยะวิริยะ (2548). การจำลองสภาวะเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งลำไยทั้งลูก, การประชุมทางวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 4), วันที่ 4 – 5



กรกฎาคม 2548 ณ โรงแรมโกลเด้นไพร์รีสอร์ท อำเภอมะนัง จังหวัด เชียงราย

[2] Achariyaviriya, A., Soponronnarit, S. and Tiansuwan, J. (2001). *Study of Longan Flesh Drying. Drying technology Journal*, vol. 19 No.9, pp. 2315-2359.

[3] Somjai, T., Achariyaviriya, S., Achariyaviriya, A. and Namsanguan, K. (2009). Strategy for longan drying in two-stage superheated steam and hot air, *Journal of Food Engineering*, 95, pp.313-321.

[4] Leeratanarak, N., Devahasin, S. and Chiewchan, N. (2005). Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques. *Journal of Food Engineering*, 77, pp. 635-643.

[5] สมมาตร กิตติวรวัฒน์. (2540). การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[6] Devahasin, S. and Suvarnakuta, P. (2004). Superheated-Steam-Drying of Food Products. In *Dehydration of Products of Biological Origin*, Mujumdar, A.S. (Ed.). Science Publishers, Enfield, pp.493-511.

[7] ธนัญญ์ศ สมใจ. (2552). การอบแห้งลำไยโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับลมร้อน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.