การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

แบบจำลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

Modeling of coffee bean fluidized bed drying

วรเมธ ทัดทอง[1,*] เมธี ใบงาม[1] พงษ์เจต พรหมวงศ์[2]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ10530
โทร 66(2) 988-3666 ต่อ 241 โทรสาร 66(2) 988-3666 ต่อ 241 E-mail: woramate@mut.ac.th
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีพื้นฐานแบบจำลองมาจาก Newton และ Page เพื่อใช้สำหรับทำนายกระบวนการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้หอทดลองซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 mm และ ความสูง 1000 mm อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอทดลองอยู่ในช่วง 60-100 ^{0}C ปริมาณการอบแห้งเมล็ดกาแฟอยู่ในช่วง 600-1200 กรัม ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดกาแฟ 68 % มาตรฐานเปียก จากผลการทดลองพบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและแบบจำลองที่พัฒนามาจากสมการของ Page ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) อยู่ในช่วง 0.9819-0.9989 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่า ที่ได้จากสมการของ Newton

คำสำคัญ ; เมล็ดกาแฟ, เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

The objective of this research is to develop a mathematical model describing the behavior of Fluidized bed coffee bean drying process. The model is based on Newton and Page principle. The experimental drying chamber has a diameter of 140 mm and 1000 mm height. The inlet air temperature is varied from 60-100 $^{\circ}$C. The weight of coffee bean in this experiment is set to 600-1200 grams. The initial setting moisture content is 68% wet basis. The results obviously show that the drying constant increases with temperature and the Page-based modified mathematical model returns a correlation coefficient (r) ranging from 0.9819-0.9989 which is greater the value obtained by using Newton-based modified mathematical model.

1. บทนำ

สำหรับประเทศไทยมีการปลูกกาแฟกันมากในภาคใต้ และในบางจังหวัดของภาคเหนือ ผลผลิตที่ผลิตแล้วส่งออกไปขายยังต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 70 ของผลผลิตทั้งหมด บริโภคภายในประเทศเพียง ร้อยละ 30 เท่านั้น [1] จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องแข่งขันกับตลาดต่างประเทศที่เป็นคู่แข่งที่มีการผลิตกาแฟเพื่อให้กาแฟของประเทศไทยมีคุณภาพดีขึ้น ในการทำสวนกาแฟ เมื่อเกษตรกรทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดกาแฟสดแล้ว เกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่เก็บเกี่ยวได้ไปตากแดดจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง โดยต้องตากแดดประมาณ 15-20 วัน ในวันที่มีแสงแดดจ้าทั้งวัน โดยส่วนมากเกษตรกรจะนำเมล็ดกาแฟสดที่เก็บได้ไปตากไว้บนลานดิน หรือลานคอนกรีต แล้วรอจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปทำการสีเพื่อเอาเปลือกออกต่อไป ปัญหาที่พบมากคือ เมื่อนำเมล็ดกาแฟแห้งไปทำการสีจะพบว่ามีเมล็ดเสียเกิดขึ้นจำนวนมากทำให้เกษตรกรขายกาแฟได้ในราคาต่ำ เมล็ดที่เสียส่วนใหญ่จะมีผลมาจากขั้นตอนการลดความชื้น ซึ่งก็คือขั้นตอนการตากนั่นเอง เมล็ดเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการตากอาจเกิดจากในช่วงการตากมีฝนตกลงมา หากเกษตรกรเก็บไม่ทัน เมล็ดกาแฟส่วนที่เปียกจะเกิดการหมักซึ่งจะทำให้เกิดรา จึงทำให้เมล็ดกาแฟมีกลิ่นราติดมาด้วย หรือในบางกรณีเมล็ดกาแฟจะเกิดเป็นสีดำหลังทำการสี นอกจากนั้นเกษตรกรบางรายที่ทำการตากกาแฟบนลานดิน เมื่อเมล็ดกาแฟแห้งเปลือกของเมล็ดกาแฟจะมีความไวต่อการดูดกลิ่นทำให้มีกลิ่นดินติดมาด้วย และปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งในการตากกาแฟบนลานดินก็คือ มักมีสิ่งแปลกปลอมติดมากับกาแฟด้วย เช่น กรวด หิน ดิน เป็นต้น

จากปัญหาที่พบดังกล่าว ถ้าเราสามารถปรับปรุงกระบวนการที่ทำให้เมล็ดกาแฟแห้งโดยที่ไม่ต้องตากแดด ซึ่งต้องตากบนลานดิน หรือลานคอนกรีต ปัญหาดังกล่าวก็จะลดลงไปด้วย เราก็จะได้ผลผลิตกาแฟที่มีคุณภาพดีขึ้น

ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดมาอบแห้งธัญพืช เช่น ข้าวเปลือก [2] ข้าวโพด [3] และถั่วเหลือง [4] ซึ่งมีข้อดีคือ

มีอัตราการอบแห้งสูงและความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจะสม่ำเสมอ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาอบแห้งเมล็ดกาแฟสดเพื่อแก้ไขและรักษาคุณภาพเมล็ดกาแฟให้ดีขึ้น

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

การอบแห้งเมล็ดพืช โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของเหลวหรือน้ำภายในเนื้อวัสดุเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น จากแบบจำลองการแพร่ความชื้นของ Fick บนสมมติฐานที่ ไม่คิดการหดเหี่ยวของเมล็ดพืช สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและอุณหภูมิคงที่ สำหรับวัสดุทรงกลม [5]

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\exp\left[-\frac{n^2\pi^2 D}{r^2}t\right] \qquad (1)$$

จากสมการ (1) รูปแบบของสมการมีความยุ่งยากในการแก้ปัญหา ดังนั้นสมการ (1) สามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งอย่างง่าย โดยการตั้งสมมติฐานว่า อัตราการลดลงของความชื้นภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของปริมาณความชื้นเมล็ดพืช และปริมาณความชื้นสมดุล ซึ่งคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน รูปสมการดังนี้ [6]

$$MR = \exp(-k_1 t) \qquad (2)$$

สมการ (2) คือสมการ Simple logarithmic model หรือแบบจำลองของ Newton ซึ่งได้นำมาทำนายการอบแห้งข้าวโพด [7] มันฝรั่งและมะม่วงดิบ [8]

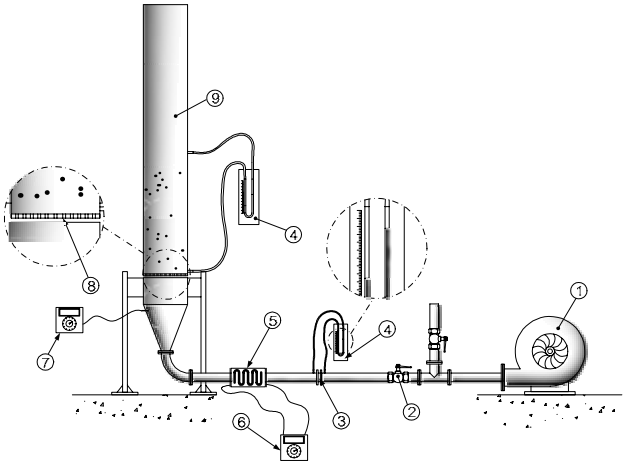
ในการปรับปรุงสมการ Simple logarithmic model สามารถเขียนใหม่ได้เป็น [9]

$$MR = \exp\left(-k_2 t^n\right) \qquad (3)$$

สมการ (3) คือสมการ Modified logarithmic model หรือแบบจำลองของ Page ซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำแบบจำลองของ Page มาทำนายอัตราการอบแห้งของถั่วเหลือง [4] มันฝรั่ง [10] และผลการทำนายของแบบจำลองของ Page สอดคล้องกับผลการทดลอง

3. การทดลองการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

เครื่องมือการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยหอทดลองรูปทรงกระบอก (หมายเลข 9) ทำจากอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร และความสูง 1000 มิลลิเมตร ในการทดลองเมล็ดกาแฟจะลอยที่ความสูงระหว่าง 60-120 มิลลิเมตร และขยายตัวถึง 200-400 มิลลิเมตร ในระหว่างเกิดฟลูอิดไดเซชัน ความจุของเมล็ดกาแฟสดอยู่ในช่วง 600-1200 กรัม แผ่นกระจายลม (หมายเลข 8) เป็นแบบเจาะตรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และมีจำนวน 620 รู ซึ่งคิดเป็นพื้นที่เปิด 50% กาแฟที่ใช้ทดลองเป็นพันธุ์โรบัสตาขนาดเฉลี่ยประมาณ 13.6 มิลลิเมตร และมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่ 66-70% มาตรฐานเปียก มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า (หมายเลข 1) ขับลมผ่านท่อ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วยออริฟิสมิเตอร์ (หมายเลข 3) ในการศึกษาพฤติกรรมของอัตราการไหลของอากาศในระหว่างการทดลอง จะถูกควบคุมโดยโกลบวาล์ว (หมายเลข 2) ซึ่งมีความเร็วอยู่ในช่วง 0-10 m/s และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศอยู่ในช่วง 0.21-0.43 kg/s-kg dry coffee อากาศในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดจะถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความ ร้อนขนาด 3 กิโลวัตต์ (หมายเลข 5) พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง (หมายเลข 6) และห้องทำความร้อนถูกหุ้มด้วยฉนวนจนถึงทางเข้าหอทดลอง ซึ่งจะมีอุณหภูมิของอากาศสูงสุดถึง 120°C ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนด อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอทดลองจะอยู่ในช่วง 60-100°C โดยจะทำการวัดอุณหภูมิภายในเบดด้วยเทอร์โมคัพเปิลชนิด K (หมายเลข 7) ในการทดลองเมล็ดกาแฟจะถูกวัดความชื้นที่ลดลงจากค่าน้ำหนักเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนไปซึ่งจะทำการวัดทุกๆ 15 นาทีโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทอลที่มีค่าความละเอียด 1 กรัม



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

4. ผลการทดลอง

ในงานวิจัยได้นำรูปแบบจำลองของ Newton และ Page มาอธิบายอัตราการอบแห้งของเมล็ดกาแฟ จากผลการทดลองทำการพล็อตค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่อยู่ในรูปของลอการิทึม กับเวลา และหาค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟ (k_1) และทำการพล็อตค่าระหว่าง $\ln(-\ln MR)$ กับ $\ln t$ และหาค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟ (k_2) และ n ดังนั้นค่าคงที่ของการอบแห้งทั้งสองสมการดังแสดงในตารางที่ 1

จากผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอทดลอง และค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเมล็ดกาแฟ [11]

โดยที่สมการ (2) และ (3) ที่สภาวะเงื่อนไขในการทดลองค่าหนึ่งจะได้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสมการถดถอย [12] และเมื่อแทนสมการค่าคงที่ k_1, k_2 และ n ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอทดลอง ในสมการของ Newton และ Page จะได้ดังรูปแบบสมการ

แบบจำลองของ Newton

$$MR = \exp\left[-\left(-0.2434 + 0.00812T\right)t\right] \qquad (4)$$

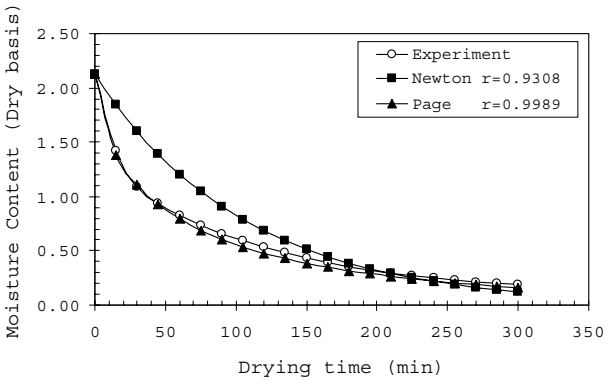
และแบบจำลองของ Page

$$MR = \exp\left[-\left(-0.610 + 0.016T\right)t^{(1.019-0.0047T)}\right] \qquad (5)$$

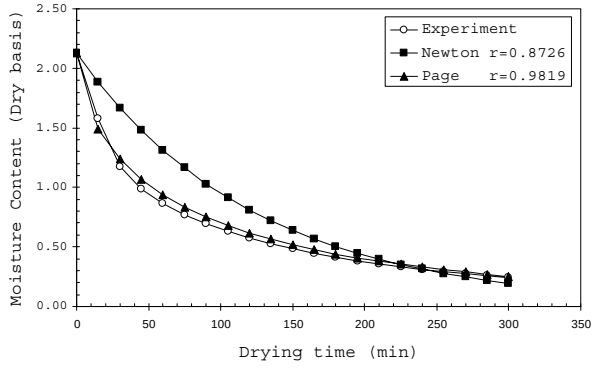
เมื่อนำสมการทำนายอัตราการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟของแบบจำลองของ Newton และ Page เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากผลทดลอง [11] ที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลองต่างๆ ดังรูปที่ 2-6

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของการอบแห้งเมล็ดกาแฟจากรูปแบบจำลองของ Newton และ Page

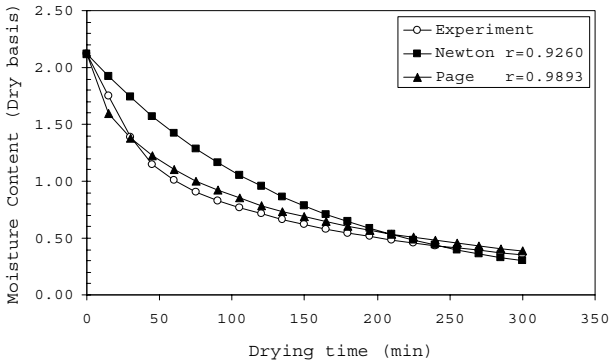
อุณหภูมิ, °C	Newton's model		Page's model		
	k_1	r^2	k_2	n	r^2
60	0.228	0.8695	0.322	0.750	0.9833
70	0.322	0.7748	0.495	0.692	0.9599
80	0.443	0.7862	0.720	0.641	0.9637
90	0.484	0.7432	0.860	0.555	0.9872
100	0.553	0.8429	0.938	0.544	0.9982



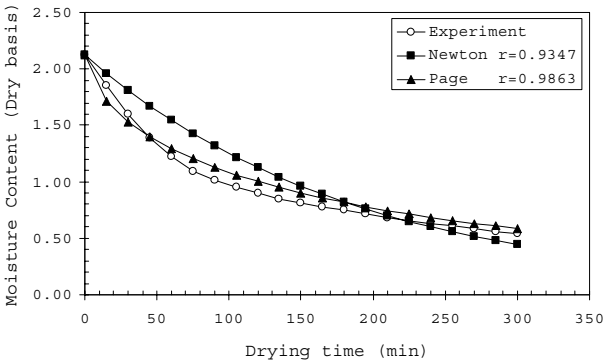
รูปที่ 2 อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 100 ^{0}C



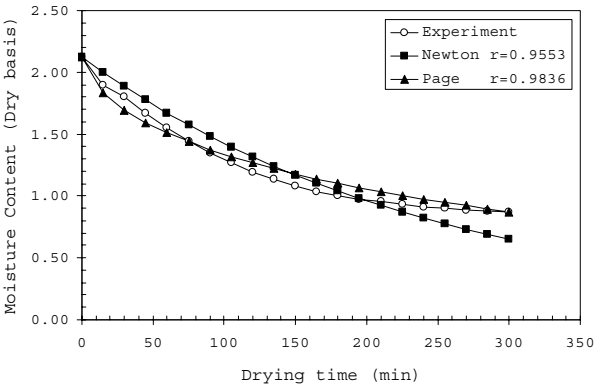
รูปที่ 3 อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 90 ^{0}C



รูปที่ 4 อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 80 ^{0}C



รูปที่ 5 อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 70 ^{0}C



รูปที่ 6 อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง 60 ^{0}C

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้น กับค่าที่ได้จากผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าอัตราการลดลง ของปริมาณความชื้นกับค่าที่ได้จากผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature , ($^{\circ}$C)	Newton's Model	Page's Model
100	0.9308	0.9989
90	0.8726	0.9819
80	0.9260	0.9893
70	0.9347	0.9863
60	0.9553	0.9836

จากรูปที่ 2-6 แสดงให้เห็นว่าการทำนายอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างแบบจำลองของ Newton กับแบบจำลองของ Page ที่อุณหภูมิสูง การทำนายผลการทดลองของ Page ให้ข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองของ Newton แต่ทีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีค่าอัตราการลดลงของความชื้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิทางเข้าหอทดลองสูงๆ ผลการทำนายของแบบจำลองของ Page และการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : r) จากตารางที่ 6.3 พบว่าค่าที่ได้โดยผลการทำนายค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นโดยแบบจำลองของ Page ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9819-0.9989 มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าผลการทำนายค่าอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นโดยแบบจำลองของ Newton ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8726-0.9553 เนื่องจากแบบจำลองของ Newton ขึ้นอยู่กับค่าคงที่เพียงค่าเดียวคือ k_1 ทำให้สมการที่ได้มีการลดลงของค่าที่ได้จากสมการน้อยกว่าสมการของ Page ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่สองตัวคือ k_2 และ n

6. สรุป

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากรูปแบบสมการของ Newton และ Page ซึ่งค่าคงที่ของการอบแห้ง ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าหอทดลองเพียงอย่างเดียว โดยหาจากเทคนิคสมการถดถอย เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากรูปแบบสมการของ Newton และ Page ที่พัฒนาขึ้นมาทำนายอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในเมล็ดกาแฟ พบว่าสมการที่พัฒนาขึ้นจากแบบจำลองของ Page ให้ค่าที่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) อยู่ในช่วง 0.9819-0.9989 ซึ่งให้ผลการทำนายถูกต้องมากกว่ารูปแบบสมการของ Newton โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.8726-0.9553

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์, “การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ งานจัดประกวดเมล็ดกาแฟ ปี 2541/42 และการสัมมนา” กรุงเทพฯ : บริษัท บพิธการพิมพ์ จำกัด ,2542

[2] S. Soponronnarit, “Fluidised bed paddy drying”, Science Asia, 1999, 25(1), 51-56

[3] S. Soponronnarit, A. Pongtronkulpanich and S. Prachayawarakorn, “Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer”, Drying Technology – An Internal Journal, 1997, 15(5), 1603-1615

[4] วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย, “แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลอิดไดเซชัน”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540

[5] J. Crank, “The mathematics of diffusion” 2nd ed. Oxford : Oxford University Press, 1975

[6] W. Senadeera, B.R. Bhandari, G. Toung, B. Wijesinghe, “Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying”, Journal of Food Engineering, 2003, 58, 277-283

[7] อรุณี ผุดผ่อง, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, วารุณี เตีย, “การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับวิเคราะห์และออกแบบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด”, วิศวกรรมสาร, ปีที่ 43, ฉบับที่ 4, หน้า 95-101

[8] R.R. Sharma, “Fluidized bed drying characteristics of green-mango and potato”, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of Engineering, Asian Institute of technology, 1999.

[9] P.C. Panchariya, D. Popovic, A.L. Sharma, “Thin-layer modeling of black tea drying process”, Journal of Food Engineering, 2002, 52, 349-357

[10] L. Diamante, P. A. Munro, “Mathematical modeling of thin layer solar drying of sweet potato slices”, Solar energy, 1993, 51(4), 271-276

[11] วรเมธ ทัดทอง, “การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

[12] D.C. Montgomery, DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS, Fourth edition, Canada : John Wiley & Sons, Inc, 1997

สัญลักษณ์

D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/s
k_1, k_2	คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง
M	คือ ปริมาณความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_{eq}	คือ ปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_{in}	คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
n	คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง
T	คือ อุณหภูมิอากาศ
t	คือ ระยะเวลา, s
r	คือ รัศมีทรงกลม, m
r^2	คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
r	คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์