



## KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

### การจำลองการอบแห้งกาแฟกะลาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

#### Finite element based model of parchment coffee drying

ปรีดา ปรากฏมาก\*

Preeda Prakotmak\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Khamphengsean, Kasetsart University,

Nakornpathom 73140, Thailand.

Received April 2014

Accepted July 2014

#### บทคัดย่อ

การถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้งเป็นปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อนเนื่องจากไม่เฉพาะเกิดการแพร่ของความชื้นระหว่างการอบแห้งเท่านั้นแต่ยังมีการเปลี่ยนแปลงการกายภาพของวัสดุอีกด้วย ในการอธิบายปรากฏการณ์การอบแห้งวัสดุชีวภาพให้เกิดความแม่นยำได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในกาแฟกะลา (เปลือกกะลาและสารกาแฟ) ในระหว่างการอบแห้ง การอบแห้งแบบชั้นบางของเมล็ดกาแฟและกาแฟกะลาทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ความชื้นสัมพัทธ์ 14-28% และความเร็วมวล 1.4 m/s ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำภายในส่วนประกอบของกาแฟกะลาคำนวณจากวิธีหาค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (RMSE) ของความแตกต่างระหว่างความชื้นจากผลการทดลองและค่าที่ทำนายจากแบบจำลองผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารกาแฟมีค่าสูงกว่ากะลาประมาณ 1000 เท่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในส่วนประกอบต่างๆ ของกาแฟกะลามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ซึ่งอธิบายในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส นอกจากนี้แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้คำนวณเกรเดียนต์ความชื้นภายในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้ง แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในส่วนประกอบของกาแฟกะลาและทำให้เข้าใจถึงการเคลื่อนที่ของความชื้นที่เกิดขึ้นในส่วนประกอบของกาแฟกะลาสายพันธุ์โรบัสต้า

**คำสำคัญ :** กาแฟ กาแฟกะลา ไฟไนต์เอลิเมนต์ สัมประสิทธิ์การแพร่ อบแห้ง

#### Abstract

Heat and mass transfer in the parchment coffee during convective drying represents a complicated phenomena since it is important to consider not only the transport phenomena during drying but also the various changes of the drying materials. In order to describe drying of biomaterials adequately, a suitable mathematical model is needed. The aim of the present study was to develop a 3-D finite element model to simulate the

\* Corresponding author. Tel.: +66 8171 19781

Email address: fengpdpr@ku.ac.th\* (Prakotmak, P.)

doi: 10.14456/kkuenj.2015.9

transport of heat and mass within parchment coffee during the thin layer drying. Thin layer drying experiments of coffee bean and parchment coffee were conducted in the temperature range of 40-60°C, the relative humidity ranged from 14 to 28% and drying air velocity of 1.4 m/s. The moisture diffusivities in different coffee's components (parchment and coffee bean) were determined by minimizing the *RMSE* between the predicted and the experimental data of moisture contents. The simulated results showed that the moisture diffusivities of coffee bean were three orders of magnitude higher than those of the parchment. Moisture diffusivities of coffee components were found to significantly increase ( $P < 0.05$ ) with the increase in drying air temperature and were expressed by Arrhenius-type equations. Moreover, the model was also used to predict the moisture gradient in coffee bean during drying. The model simulates the moisture contents in different components of parchment coffee well and it provides a better understanding of the transport processes in the different components of the parchment coffee.

**Keywords :** Drying, Coffee, Finite element, Parchment coffee, Water diffusivity

## 1. บทนำ

ทั่วโลกมีกาแฟอยู่มากกว่า 50 สายพันธุ์แต่กาแฟที่นิยมดื่มกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิด คือ สายพันธุ์โรบัสต้า (Robusta) และสายพันธุ์อาราบิก้า (Arabica) สำหรับประเทศไทยนิยมปลูกสายพันธุ์โรบัสต้าร้อยละ 95 โดยกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้าจะเจริญเติบโตได้ดีในแถบที่มีฝนตกสม่ำเสมอ แหล่งปลูกที่สำคัญอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทยในจังหวัด ชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี กระบี่ และนครศรีธรรมราช เป็นต้น [1] กาแฟที่ผ่านกระบวนการเก็บเกี่ยวก่อนการจำหน่ายหรือแปรรูปเป็นกาแฟ จะต้องตากให้แห้งหรือลดความชื้นด้วยการให้ความร้อน เช่น การคั่วหรืออบแห้ง เมื่อลดความชื้นของเมล็ดกาแฟให้มีค่าต่ำมากเกินความจำเป็นจะสิ้นเปลืองพลังงานหรือมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นกระบวนการที่ใช้ลดความชื้นจึงเป็นปัญหาสำคัญในการแปรรูปกาแฟ หลังการเก็บเกี่ยววิธีที่ใช้ลดความชื้นกาแฟสุกให้เป็นเมล็ดกาแฟเขียว (Green Coffee Bean) เกษตรกรชาวสวนกาแฟ มักใช้คือวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งต้องใช้พื้นที่และระยะเวลาดำเนินการ อีกทั้งอุปสรรคทางด้านสภาพภูมิอากาศ ทำให้เกิดการเสียหายต่อผลผลิต ในปัจจุบันมีการนำเทคนิคการลดความชื้นด้วยกระบวนการอบแห้งกาแฟกะลา (Parchment Coffee) อย่างแพร่หลาย เนื่องจากระยะเวลาการอบแห้งสั้น มีการกระจายอุณหภูมิในการอบอย่างสม่ำเสมอ การอบแห้งชั้นบาง (Thin Layer) เป็นกระบวนการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งที่มีความสำคัญ

มาก [2-4] เนื่องจากช่วยให้เข้าใจกระบวนการถ่ายเทมวล (ความชื้น) และถ่ายเทความร้อน (อุณหภูมิ) ถ้าทำการอบแห้งแบบชั้นบางโดยเรียงซ้อนกันก็จะเป็นการอบแห้งแบบชั้นหนาซึ่งคล้ายกับระบบการอบแห้งทั่วไป อย่างไรก็ตามการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของเมล็ดกาแฟ ทั้งยังได้รับผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความเร็วตัวกลาง การอบแห้ง หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเอง เช่น สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ ด้วยเหตุนี้หากต้องการสมภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต้องทำการทดลองซ้ำหลายครั้งเพื่อหาข้อมูลตัวแปรที่สนใจ แต่ในบางกรณีค่าใช้จ่ายหรือเวลาในการทดลองและความยุ่งยากในการทดลองจะเป็นข้อจำกัดทำให้ไม่สามารถทดลองซ้ำหลายครั้งตามต้องการได้ การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องหรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากช่วยประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง และสามารถให้ข้อมูลบางประเภทที่วัดได้ยากในห้องปฏิบัติการ เช่น ข้อมูลการกระจายความชื้นหรือการกระจายอุณหภูมิในวัสดุในหลายทิศทาง (เช่น ใน 2 หรือ 3 มิติ) ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทำนายการถ่ายเทความร้อน (การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) คู่ควบ (Coupled) ไปกับการทำนายการแพร่ของมวลสาร (การเปลี่ยนแปลงความชื้น) ในกาแฟเพียงเมล็ดเดียว เพราะว่าเป็นสภาวะที่พบโดยทั่วไปในการอบแห้งแบบ

ชั้นบาง (Thin Layer) นักวิจัยหลายท่านได้นำแบบจำลองไฟโนเอลิเมนต์ช่วยศึกษาการอบแห้งเมล็ดกาแฟ [5-8] Ninont และคณะ [5] ใช้ระเบียบวิธีไฟโนเอลิเมนต์จำลองการแพร่ของความชื้นในส่วนประกอบของกาแฟกะลาสายพันธุ์อาราบิก้า จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกะลามีค่าต่ำกว่าสารกาแฟประมาณ 106 เท่า เนื่องจากความแตกต่างกันของส่วนประกอบในกาแฟกะลาทำให้การแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดผ่านชั้นเหล่านี้มีความซับซ้อน Varadharaju และคณะ [9] ทำการทดลองอบแห้งผลกาแฟสุกพันธุ์อาราบิก้าแบบชั้นบางที่อุณหภูมิ 40-70°C โดยที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อน 46-83% และอัตราการไหลของอากาศ 1.5 m<sup>3</sup>/s แล้ววัดผลการทำนายเทียบกับผลการทดลอง พบว่า สามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิในรูปแบบของสมการอาร์วีเนียส การจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยแบบจำลองที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการอบแห้งที่ต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แบบจำลองที่เหมาะสมยังอาจช่วยให้เกิดการเรียนรู้และเข้าใจถึงกลไกการอบแห้งที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟโนเอลิเมนต์แบบสามมิติในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในกาแฟกะลา (กะลาและสารกาแฟ) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบชั้นบางและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นด้วยการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ให้แบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง

## 2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 ทดลองศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้ง

เมล็ดกาแฟสุกโรบัสต้า (*C. canephora*) ที่ใช้ในการทดลอง นำมาจากจังหวัดชุมพรและถูกแยกเปลือก (Skin) เนื้อบาง (Pulp) เมือก (Mucilage) และเยื่อหุ้มเมล็ด (Silver Skin) ให้เหลือเพียงกะลา (Parchment) และเมล็ด (Bean) เท่านั้นซึ่งเรียกว่า กาแฟกะลา เมื่อกะเพาะกะลาออกจะเหลือส่วนที่เป็นเมล็ดเรียกว่าสารกาแฟ (Coffee Bean) จากนั้นเก็บรักษาในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงก่อนการทดลอง ในการทดลองจะเป็นสองส่วนคือ 1) อบแห้งสารกาแฟ และ 2) อบแห้งกาแฟกะลา

โดยทำการอบแห้งแบบชั้นบางด้วยอากาศร้อน เครื่องอบแห้งประกอบไปด้วย ฮีตเตอร์ 12 kW ควบคุมอุณหภูมิโดย PID Controller ความแม่นยำ  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  พัดลมแบบใบพัดโค้งหลังขนาดมอเตอร์ 1.5 kW โดยอากาศที่ผ่านการอบแห้งถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่โดยผสมกับอากาศใหม่ที่ดูดเข้ามาในระบบ ความชื้นเริ่มต้นมีความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดมีค่าเท่ากับ 124% (d.b.) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40, 50 และ 60°C ความเร็วอากาศอบแห้งในเครื่องอบแห้งเท่ากับ 1.4 m/s ระหว่างการอบแห้งจะวัดอุณหภูมิเมล็ดด้วยเทอร์โมคัปเปิล T-type โดยการวางในชั้นของเมล็ด 5 จุด แล้วบันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Yokogawa, DX 122, Tokyo, Japan) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

### 2.2 สมบัติกายภาพของเมล็ดกาแฟ

สมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟดิบสายพันธุ์โรบัสต้าโดยศึกษาจากการสุ่มตัวอย่าง 100 เมล็ด แสดงดังตารางที่ 1

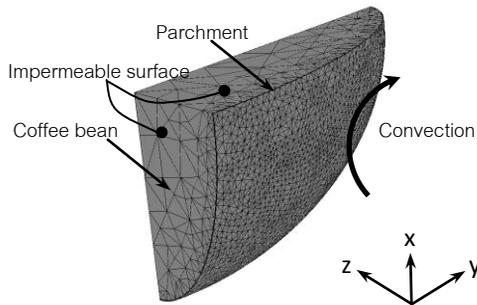
ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้า [10]

Physical Properties	Unit	Average
Weight	g	13.502 $\pm$ 0.19
Width	cm	0.727 $\pm$ 0.31
Length	cm	0.947 $\pm$ 0.38
Thickness	cm	0.433 $\pm$ 0.20
Volume	cm <sup>3</sup>	0.111 $\pm$ 0.12
True Density	g/ml	0.928 $\pm$ 0.34
Surface Area	cm <sup>2</sup>	1.413 $\pm$ 0.19
Sphericity	%	70.90 $\pm$ 0.13

## 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เมล็ดกาแฟจะเกิดการหดตัวทำให้ระดับความชื้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดของเมล็ดเล็กน้อยและเพื่อความไม่ซับซ้อนในการสร้างแบบจำลอง งานวิจัยนี้ได้สมมติให้เมล็ดกาแฟไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างกระบวนการอบแห้ง และสมมติให้เมล็ดกาแฟมีรูปทรงสมมาตรเพื่อจำลองปริมาตรเป็น 1/8 ของเมล็ดเต็มดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้เกิด

ความรวดเร็วในการคำนวณและง่ายในการสังเกตระดับความชื้นภายในเมล็ดกาแฟ



รูปที่ 1 จำลอง Mesh ใน 1/8 ของเมล็ดกาแฟ

จำนวน 9029 เอลิเมนต์ และ 2027 จุดต่อในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมตัวแปร และสมบัติต่างๆ เพื่อใช้ในแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ค่าสมบัติทางความร้อนของอากาศ-น้ำและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกที่ใช้ในแบบจำลอง[11,12]

Equations	Property	Expression
(1)	$c_a$	$c_a = 1.00926 E3 - 4.0403 E - 2(T) + 6.1759 E - 4(T^2) - 4.097 E - 7(T^3)$
(2)	$k_a$	$k_a = 2.425 E - 2 + 7.889 E - 5(T) - 1.790 E - 8T^2 - 8.570 E - 12(T^3)$
(3)	$\rho_a$	$\rho_a = 101.325 / (0.287 T_{ab})$
(4)	$\mu_a$	$\mu_a = 1.691 E - 5 + 4.984 E - 8(T) - 3.187 E - 11(T^2) + 1.319 E - 14(T^3)$
(5)	$D_{wa}$	$D_{wa} = -2.775 E - 6 + 4.479 E - 8(T - 273.15) + 1.656 E - 10(T - 273.15)$
(6)	$Re$	$Re = \rho_a \cdot U \cdot D_p / \mu_a$
(7)	$Sc$	$Sc = \mu_a / (\rho_a \times D_{wa})$
(8)	$Sh$	$Sh = 2 + (0.6 Re^{0.5} Sc^{0.33})$
(9)	$h_m$	$h_m = (Sh \times D_{wa} / D_p)$
(10)	$Nu$	$Nu = (0.46 Re^{0.5}) + (0.00128 Re)$
(11)	$h_t$	$h_t = (Nu \cdot k_a) / D_p$
(12)	$h_{fg}$	$h_{fg} = (1 + (2.496 \exp(-21.733)M)) \times (2502 - 2.386T) \times 1000$

เมื่อ  $c_a$  = specific heat of air (J/kg×K),  $k_a$  = thermal conductivity of air (W/m×K),  $\rho_a$  = density of air (kg/m<sup>3</sup>),  $\mu_a$  = dynamic viscosity of air (kg/m×s),  $D_{wa}$  = diffusion of water vapor in air (m<sup>2</sup>/s),  $D_p$  equivalent diameter of parchment coffee,  $Re$  = Reynold number,  $Sc$  = Schmidt number,  $Sh$  = Sherwood number,  $Nu$  = Nussel number and  $T$  = air temperature (°C)

### 3.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

สมมติฐานในการวิเคราะห์กระบวนการทำแห้งเมล็ดกาแฟมีดังนี้

1. เมล็ดกาแฟประกอบด้วยเนื้อสารกาแฟ (Endosperm หรือ Bean) และกะลาหุ้ม (Parchment) แต่ละชั้นมีลักษณะเป็นไอโซโทรปิก (Isotropic) กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากันในทุกทิศทาง และมีเนื้อสม่ำเสมอ (Homogeneous)
2. เมล็ดกาแฟมีรูปร่างสมมาตรและพิจารณาเพียง 1/8 ของเมล็ด
3. ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหดตัว การพองตัว การเกิดชั้นแข็งบนผิวของเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้ง
4. การถ่ายเทมวลภายในเมล็ดกาแฟเกิดจากการแพร่ของของเหลวเท่านั้น

ตารางที่ 3 ค่าสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของสารกาแฟและกะลาหุ้ม [13-15]

Components	Property	Expression	Equations	Units
	$c_b$	$c_b = (1.099 + 0.0070T_b + 5.0\bar{M})/(1 + \bar{M})$	(13)	kJ/kg °C
Coffee bean	$k_b$	$k_b = 0.00116\bar{M} + 0.062$	(14)	W/m×K
	$\rho_b$	$\rho_b = 78.845\bar{M} + 1723$	(15)	kg/m <sup>3</sup>
	$c_p$	$c_p = 6.799(\bar{M}/(1/\bar{M})) + 0.0321$	(16)	kJ/kg×K
Parchment	$k_p$	$k_p = 0.446(\bar{M}/(1/\bar{M})) + 0.0238$	(17)	W/m×K
	$\rho_p$	$\rho_p = 1.4832(\bar{M}/(1/\bar{M})) + 893.58$	(18)	kg/m <sup>3</sup>

เมื่อ  $\bar{M}$  คือความชื้นเฉลี่ยของส่วนประกอบกาแฟและกะลา (kg/kg d.b.) และ  $T_b$  คืออุณหภูมิเมล็ดกาแฟ (°C)

3.2 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวล

กฎการแพร่ของฟิค (Fick's Law of Diffusion) และ กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's Law of Conduction) ถูกนำมาใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำ และการถ่ายเทความร้อนในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้ง สามารถเขียนสมการดังกล่าวได้ดังนี้

$$\frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial t} = D\nabla^2 M(x, y, z, t) \tag{19}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k\nabla^2 T(x, y, z, t) \tag{20}$$

โดยที่  $D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m<sup>2</sup>/s),  $M$  ความชื้น (มาตรฐานแห้ง),  $t$  เวลา (s),  $\nabla$  Divergence Operator,  $\rho$  ความหนาแน่น (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  ค่าความร้อนจำเพาะ (W/m<sup>2</sup> °C),  $T$  อุณหภูมิ (°C) และ  $k$  ค่าการนำความร้อน (W/m °C) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) สำหรับวิเคราะห์ฟลักซ์ของความชื้นที่เคลื่อนออกจากผิวกาแฟไปยังอากาศแวดล้อมด้วยการพาความร้อนเขียนได้ดังนี้

$$-D\nabla M(x, y, z, t) = h_m(M_s(x, y, z, t) - M_e) \tag{21}$$

สำหรับ  $t > 0$

เมื่อ  $h_m$  คือสัมประสิทธิ์การพามวล (m/s),  $M_s$  ความชื้นที่ผิววัสดุ (kg/kg d.b.) และ  $M_e$  ความชื้นสมดุล (kg/kg d.b.) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นแฝงของน้ำ

ส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณผิวเมล็ดตั้งนั้นจากการสมดุลพลังงานพบว่า การพาความร้อนไปยังผิวเมล็ดจะเท่ากับ การนำความร้อนเข้าสู่เมล็ดรวมกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นแฝงของการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุ สามารถเขียนสมดุลสมการ ณ เงื่อนไขขอบเขตได้ดังนี้

$$k\nabla T(x, y, z, t) = h_t(T_a - T_s(x, y, z, t)) - \rho V \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \frac{h_{fg}}{A} \tag{22}$$

สำหรับ  $t > 0$

เมื่อ  $h_t$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m<sup>2</sup> °C),  $T_s$  อุณหภูมิของผิวเมล็ด (°C),  $T_a$  อุณหภูมิอากาศร้อน (°C),  $h_{fg}$  ความชื้นแฝงของการระเหยน้ำ (J/kg),  $V$  ปริมาตรของเมล็ด (m<sup>3</sup>),  $A$  พื้นที่ผิวของเมล็ด (m<sup>2</sup>) และ  $\bar{M}$  ความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดที่เวลาใดๆ (kg/kg d.b.) เทอม  $[\partial M/\partial t]$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น หรือ  $(\bar{M}_{t+\Delta t} - \bar{M}_t)/\Delta t$  เมื่อพิจารณาพื้นผิวด้านนอกของเมล็ดกาแฟดังรูปที่ 1 การแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลจะเกิดที่ผิวของกะลาหุ้มเมล็ดเท่านั้น ส่วนอีก 3 ด้านที่เหลือซึ่งเกิดจากการตัดเมล็ดกาแฟแบบสมมาตรจะไม่มี การถ่ายเทมวลและความร้อน (Impermeable Surface) ซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ (23) และ (24)

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \tag{23}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \tag{24}$$

ในสภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) จะกำหนดให้ความชื้นและความร้อนภายในเมล็ดมีค่าคงที่ดังนี้

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad (25)$$

$$M(x, y, z, 0) = M_i \quad (26)$$

เมื่อ  $T_i$  คืออุณหภูมิเริ่มต้น ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ  $M_i$  ความชื้นเริ่มต้น (kg/kg d.b.) บริเวณเงื่อนไขขอบเขตระหว่างเนื้อสัมผัสของกาแฟกับกะลาหุ้มเมล็ด กำหนดให้ความชื้นและฟลักซ์ความร้อนที่เคลื่อนที่เข้าออกระหว่างขอบเขตทั้งสองอยู่ในรูปแบบสมการความต่อเนื่อง (Continuity) สมการ (19) - (26) จะหาคำตอบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics Version 3.5 จำนวนเอลิเมนต์ในสารกาแฟและกะลามีค่าเท่ากับ 4161 และ 4868 ตามลำดับ โดยจำนวนเอลิเมนต์เหล่านี้พิจารณาจากวิธี Mesh Independent Test ซึ่งเลือกจำนวน mesh ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดกาแฟที่เวลาการอบแห้งใดๆ เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1% กำหนดให้พื้นผิวของ Mesh เป็น Triangular และปริมาตร Mesh เป็นแบบ Tetrahedral เนื่องจากรูปร่างของเมล็ดกาแฟมีความซับซ้อนไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 1

เนื่องจากเมล็ดกาแฟมีขนาดเล็ก การทดลองวัดการกระจายความชื้นภายในจึงเป็นเรื่องยาก งานวิจัยส่วนใหญ่จะพิจารณาค่าความชื้นเฉลี่ยและอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งเมล็ด ในงานแบบจำลองนี้คำนวณความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ยจากการอินทิเกรตเทียบกับปริมาตรเมล็ดโดยรวมโดเมนของสารกาแฟและกะลาเข้าด้วยกัน ดังนี้

$$\bar{M}(t) = \frac{\int_V M(x, y, z, t) dV}{\int_V dV} \quad (27)$$

$$\bar{T}(t) = \frac{\int_V T(x, y, z, t) dV}{\int_V dV} \quad (28)$$

เมื่อ  $\bar{M}$  คือความชื้นเฉลี่ย (kg/kg d.b.),  $\bar{T}$  คืออุณหภูมิเฉลี่ย ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ  $dV$  คือเอลิเมนต์ของปริมาตร

### 3.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

เริ่มต้นจากการใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นปัดเข้ากับ การทดลองเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารกาแฟ ( $D_{bean}$ ) ก่อน หลังจากทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารกาแฟแล้ว จึงนำไปแทนค่าในแบบจำลองกาแฟกะลาเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกะลา ( $D_{parchment}$ ) ต่อไป ซึ่งกระบวนการนี้อาศัยการลองแทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล โดยการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ให้ผลการจำลองความชื้นเฉลี่ยใกล้เคียงกับผลการทดลองอบแห้งสารกาแฟและเมล็ดกาแฟกะลาตามลำดับ โดยหาค่าความผิดพลาดโดยกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{ei} - M_{pi})^2}{n}} \quad (29)$$

เมื่อ  $M_{ei}$  คือความชื้นเฉลี่ยจากการทดลอง (kg/kg d.b.)  $M_{pi}$  ความชื้นเฉลี่ยจากการทำนาย (kg/kg d.b.) ที่เวลาใดๆ และ  $n$  คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

### 3.4 ความชื้นสมดุลของกาแฟกะลา

ความชื้นสมดุลของกาแฟกะลาสร้างจากการปัดผลการทดลองความชื้นสมดุลเข้ากับแบบจำลอง GAB ในรูปแบบฟังก์ชันของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ดังนี้

$$M_e = \frac{abc \cdot RH}{(1 - C \cdot RH)(1 - C \cdot RH + bc \cdot RH)} \quad (30)$$

เมื่อ

$$a = 28.9324 \exp\left(\frac{3849.79}{T_{ab}}\right)$$

$$b = 1.05441 E - 5 \exp\left(\frac{-4213.89}{T_{ab}}\right)$$

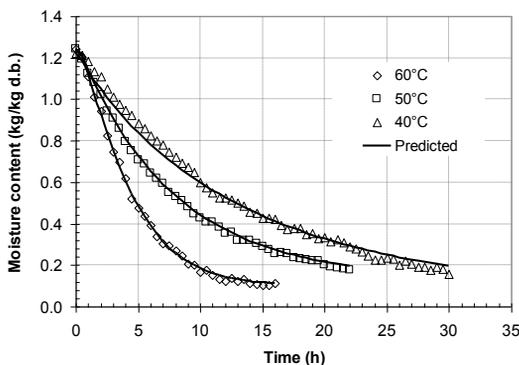
$$c = 0.774213 \exp\left(\frac{-36.0538}{T_{ab}}\right)$$

เมื่อ  $M_e$  คือความชื้นสมดุล (kg/kg d.b.),  $RH$  ความชื้นสัมพัทธ์ (decimal),  $T_{ab}$  อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ซึ่งมักแทนค่าโดยอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้ง

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองศาสตร์การอบแห้งกาแฟที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิอากาศร้อนจะใช้ระยะเวลาลดความชื้นให้มีระดับที่เหมาะสมสำหรับเก็บรักษาที่แตกต่างกัน จากรูปพบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าแปรผันตามระดับอุณหภูมิในการอบแห้งและแบบจำลองที่สร้างขึ้น (เส้นทึบ) สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี ( $R^2 > 0.98$ ) จากรูปที่ 2 ในช่วงต้นของการอบแห้ง (ประมาณ 1 ชั่วโมงแรก) เมล็ดกาแฟมีความชื้นสูงทำให้การระเหยความชื้นเฉพาะที่บริเวณผิวเมล็ด เมื่อความชื้นที่ผิวเมล็ดลดลง ความชื้นภายในเมล็ดจะค่อยๆ แพร่จากด้านในออกมายังผิวนอก ซึ่งการแพร่ของความชื้นจากภายในออกมายังผิวเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิว ทำให้การลดลงของความชื้นจะช้ากว่าช่วงแรก

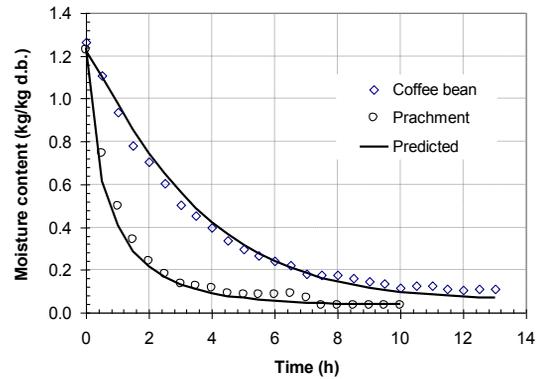
รูปที่ 3 เปรียบเทียบการทำนายความชื้นในส่วนประกอบของกาแฟระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการทดลอง ซึ่งพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายความชื้นเฉลี่ยของกาแฟได้เป็นที่น่าพอใจตลอดกระบวนการอบแห้ง ( $R^2 > 0.98$ ) อย่างไรก็ตาม อาจปรับปรุงผลการจำลองให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้อีก หากพิจารณาผลของการเปลี่ยนรูปของวัสดุระหว่างการอบแห้ง [16]



รูปที่ 2 จลนศาสตร์การอบแห้งกาแฟกะลา

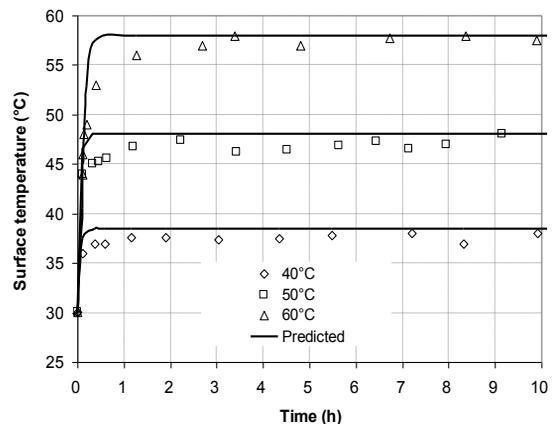
จากรูปที่ 3 พบว่าระดับความชื้นเฉลี่ยภายในกะลาจะมีค่าต่ำกว่าสารกาแฟ เนื่องจากผิวของกะลามิพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศร้อนมากกว่าสารกาแฟ นอกจากนั้น แม้ว่ากะลาเป็นชั้นที่มีความบางและความต้านทาน

การแพร่ของความชื้นสูงความชื้นจากสารกาแฟจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นกะลาออกสู่การพาความชื้นภายนอกได้ยาก ทำให้ชั้นกะลาสามารถชะลอการแพร่ของน้ำจากภายในสารกาแฟได้มาก



รูปที่ 3 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้ง ระหว่างสารกาแฟและกะลาที่อุณหภูมิ 60°C

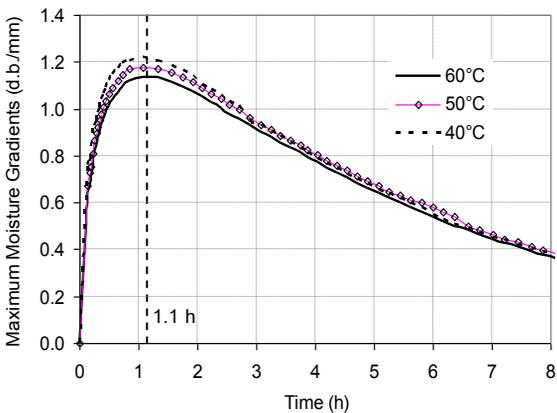
รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดที่เปลี่ยนไปเวลาการอบแห้ง จากรูปพบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นอุณหภูมิจะมีค่าเกือบคงที่ โดยอุณหภูมิเมล็ดกาแฟจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งประมาณ 5-7°C เนื่องจากความร้อนสูญเสียในรูปแบบต่างๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้งทำให้เกิดความเค้นจากความร้อนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิด้านในเมล็ดกาแฟ ถ้าเมล็ดมีความชื้นต่ำความยืดหยุ่นจะน้อยซึ่งเป็นสาเหตุให้เมล็ดแตกร้าวได้



รูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดกาแฟ

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง พบว่าการทำนายเส้นแนวโน้มของอุณหภูมิมีค่า  $R^2=0.92$  ในช่วง 30 นาทีแรกของการอบแห้งแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดได้แม่นยำมากนัก และผลการทำนายอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่าผลทดลองทุกกรณี อาจเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นเฉลี่ย ยังไม่เหมาะสม นอกจากนี้อุณหภูมิจากการวัดได้มีความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดลองเนื่องจากการสูญเสียความร้อน อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองทำนายไม่แม่นยำ

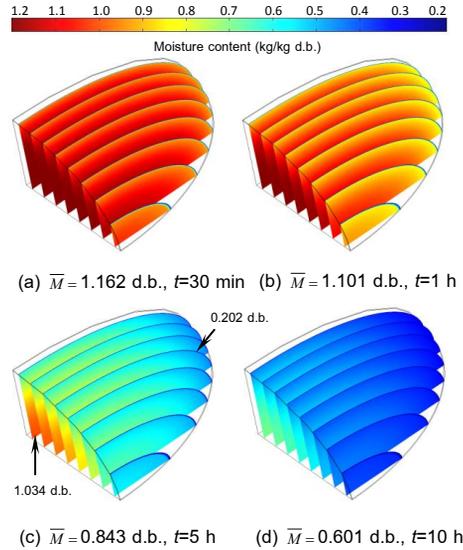
รูปที่ 5 แสดงเกรเดียนต์ความชื้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าเกรเดียนต์ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าสูงสุดที่ช่วงเวลา 1.1 ชั่วโมง จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากช่วงเริ่มต้นการอบแห้งเป็นช่วงอัตราอบแห้งคงที่ ความชื้นในเมล็ดมีมากและความชื้นที่แตกต่างกันระหว่างผิวกับภายในเมล็ดก็มีค่าต่างกันมากทำให้เกรเดียนต์ความชื้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 เกรเดียนต์ความชื้นสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราอบแห้งลดลงการเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปได้ช้าส่งผลให้เกรเดียนต์ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความไม่สม่ำเสมอของความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในเมล็ดมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเกรเดียนต์ความชื้นจะลดลงเพราะความชื้นได้แพร่ออกจากเมล็ดตามระยะเวลาการอบแห้ง รูปที่ 6 แสดงทัศนัการกระจายความชื้นภายในกาแฟตาม

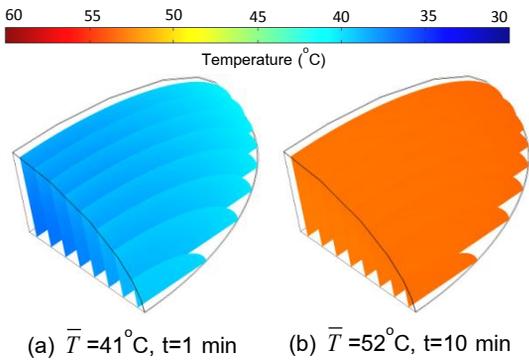
ระยะเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ก่อนทำการอบแห้งเมล็ดกาแฟมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.2 kg/kg d.b. และอุณหภูมิ 29°C เท่ากันทั้งเมล็ด เมื่อทำการอบแห้งแล้ว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การกระจายความชื้นภายในกาแฟตามระยะเวลาการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60°C

สเกลแถบสีน้ำเงินแสดงความชื้นต่ำส่วนสีแดงแสดงความชื้นสูง ดังแสดงในรูปที่ 6 สีที่ปรากฏในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้งมีความไม่สม่ำเสมอตลอดเวลาการอบแห้ง รูปที่ 6a บริเวณที่มีความชื้นสูงจะอยู่ภายในเมล็ดและความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนต่ำสุดที่บริเวณผิว จากผลการจำลองเมื่อเวลาการอบแห้งผ่านไป 5 ชั่วโมง (รูปที่ 6c) ที่บริเวณกึ่งกลางเมล็ดมีความชื้นสูงสุดเท่ากับ 1.034 d.b. และที่ผิวเมล็ดเกิดความชื้นต่ำสุดเท่ากับ 0.202 d.b. เกรเดียนต์ความชื้นมีค่าสูงบริเวณผิวต่อระหว่างเนื้อกาแฟกับกะลา (สังเกตจากแถบสีน้ำเงินเข้มที่บริเวณผิวต่อของวัสดุ) เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีสมบัติทางกายภาพและความต้านทานในการถ่ายเทมวลแตกต่างกันทำให้การแพร่ความชื้นผ่านขอบเขตนี้มีความไม่ต่อเนื่อง หลังจากอบแห้งไป 10 ชั่วโมง (รูปที่ 6d) ส่วนภายในเมล็ดกาแฟมีความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอซึ่งเข้าใกล้ความชื้นสมดุลกับอากาศแวดล้อม เกรเดียนต์ความชื้นที่ผิวต่อของชั้นกาแฟและชั้นกะลา มีค่าคงที่ เมล็ดกาแฟส่วนใหญ่แสดงสีน้ำเงินเข้มซึ่งหมายถึงเกิดความแห้งครอบคลุมตลอดชั้นภายในจนถึงผิวนอกสุด

ดังแสดงในรูปที่ 7 หลังจากอบแห้งผ่านไป 10 นาที (รูปที่ 7b) การกระจายอุณหภูมิในเมล็ดกาแฟคั่วข้างสม่ำเสมอ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิบริเวณผิวและกึ่งกลางเมล็ดมีความแตกต่างกันมากในช่วงไม่เกิน 10 นาทีของการอบแห้งเท่านั้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิอากาศร้อนในช่วง 40-60°C มีผลกระทบต่อ การแตกตัวของเมล็ดกาแฟน้อย



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิอากาศร้อน 60°C

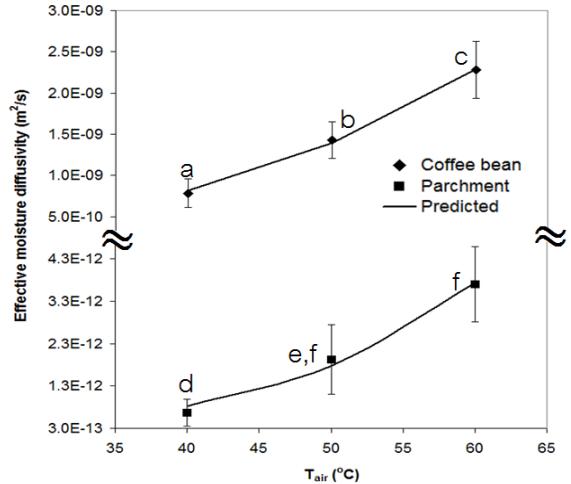
รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารกาแฟมีค่าสูงกว่ากะลาประมาณ 700-1000 เท่า และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนเพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ซึ่งเขียนในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสได้ดังนี้

$$D_{bean} = 0.024 \exp(-5382.9/T_{ab}),$$

$$R^2 = 0.98 \tag{31}$$

$$D_{parchment} = 0.088 \exp(-7957.9/T_{ab}),$$

$$R^2 = 0.97 \tag{32}$$



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิอากาศร้อน

เมื่อแทนค่าอุณหภูมิ 40-60°C ในสมการ (31) และ (32) จะได้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในช่วง 10<sup>-9</sup> ถึง 10<sup>-12</sup> m²/s โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซและของเหลวมีค่าประมาณ 10<sup>-5</sup> และ 10<sup>-9</sup> m²/s ตามลำดับ Aguilera และ Stanley [16] จากข้อมูลนี้สามารถกล่าวได้ว่าการถ่ายเทความชื้นภายในเมล็ดกาแฟเป็นการแพร่ในรูปของเหลว Nilnout และคณะ [5] รายงานค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าที่อุณหภูมิอากาศร้อน 40-60°C โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.173 × 10<sup>-10</sup> และ 6.737 × 10<sup>-12</sup> m²/s สำหรับสารกาแฟและกะลา ตามลำดับ จะพบว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารกาแฟที่คำนวณได้ต่ำกว่ากาแฟโรบัสต้าในงานวิจัยนี้ แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากงานวิจัยนี้อาจเป็นผลมาจากเป็นเมล็ดกาแฟต่างสายพันธุ์กัน

## 5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งกาแฟโรบัสต้า โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายความชื้น และอุณหภูมิภายในเมล็ดกาแฟได้ดี จากผลการจำลอง พบว่า เกรเดียนต์ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเมล็ดกาแฟมีความไม่สม่ำเสมอของความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยเกรเดียนต์ความชื้นที่มีค่าสูงบริเวณผิวต่อระหว่างสารกาแฟกับกะลา เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีความต้านทานในการถ่ายเทมวลที่แตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารกาแฟมีค่าสูงกว่ากะลาในช่วง 700-1000 เท่า และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้นที่ละ  $10^{\circ}\text{C}$  ( $P < 0.05$ ) โดยค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในสารกาแฟและกะลาที่อุณหภูมิอากาศร้อน  $40-60^{\circ}\text{C}$  มีค่าเท่ากับ  $1.498 \times 10^{-10}$  และ  $2.095 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ แบบจำลองที่สร้างขึ้นทำให้ช่วยเข้าใจถึงการถ่ายโอนความร้อนและการแพร่ของความชื้นที่เกิดขึ้นในกาแฟกะลา ซึ่งสามารถเป็นข้อมูลเพื่อช่วยการควบคุมกระบวนการอบแห้งกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้าหรือเมล็ดพืชอื่นๆ โดยการจำลองด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพืชชนิดนั้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thongtod W, Eamsaard S, Phomwhong P. Modeling of coffee bean fluidized bed drying. 18th ME-NETT; Oct 18-20; K h o n k a e n , Thailand; 2004. (In Thai).
- [2] Teeboonma U, Toomthong P. Drying kinetic of *Tilapia nilotica* drying using hot air. KKKU Engineering Journal 2010;37(4):307-17. (In Thai).
- [3] Jeentada W, Kongboon P, Boonyanuwat S, Sirirak C. Thin-layer drying models for para rubber sheet. KKKU Engineering Journal. 2014;41(1):99-108. (In Thai).
- [4] Jeentada W, Chankrachang T, Chooklin S, Sirirak C. Comparison of mathematical models equilibrium moisture content for sheet rubber. KKKU Engineering Journal. 2012;39(1):11-21. (In Thai).
- [5] Nilnont W, Thepa S, Janjai S, Kasayapanand N, Thamrongmas C, Bala BK. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. Food and Bioproducts Processing. 2011;90 :341-50.
- [6] Fabbri A, Cevoli C, Alessandrini L, Romani S. Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process. Journal of Food Engineering 2011;105:264-9.
- [7] Hernández-Díaz WN, Ruiz-López II, Salgado- Cervantes MA, Rodríguez- Jimenes GC, García-Alvarado MA. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. Journal of Food Engineering 2008;86:1-9.
- [8] Ferguson WJ, Lewis RW, Tömösy L. A finite element analysis of freeze-drying of a coffee sample. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1993;108: 341-52.
- [9] Varadharaju N, Karunanidhi C, Kailappan R. Coffee Cherry Drying: A two layer model. Drying Technology 2001;19(3):709-15.
- [10] Kattalee P, Inprasit C. Physical property of Robusta green coffee beans before and after roasting. 9th National Conference Kasetsart University Khamphengsean Campus; Dec 9-10; Nakornpathom, Thailand. 2012. (In Thai).

- [11] Mujumdar AS. Handbook of Industrial Drying, second ed. Marcel Dekker, Inc.: New York; 1995.
- [12] Pakowski Z, Bartezak Z, Strumilo C, Stenstrom S. Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in CAD of drying processes. *Drying Technology* 1991;9:753-73.
- [13] Chandrasekar V, Viswanathan R. Physical and thermal properties of coffee. *J. Agric. Eng. Res.* 1999;73:227-34.
- [14] Schartzberg HG. Modelling bean heating during batch roasting of coffee beans. In J. Welti-Chanes G. Barbosa-Canovas & JM Aguilera (Eds.), *Engineering and food for the 21<sup>st</sup> century*. London. CRC Press LLC: New York, Boca Raton; 2002.
- [15] Fabbri A, Cevoli C, Alessandrini L, Romani S. Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process. *Journal of Food Engineering* 2011;105:264-9.
- [16] Aguilera JM, Stanley DW. *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*. Aspen Publishers, Gaithersburg: Maryland; 1999.