

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการอบแห้งกาแฟกะลา Finite Element Simulation for Parchment Coffee Drying

ปรีดา ปรากฏมุก*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

*ติดต่อ: fengpdpr@ku.ac.th, 0-3435-5310 ext. 7507, fax 0-3435-5310

บทคัดย่อ

การถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้งเป็นปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อน เนื่องจากไม่เฉพาะเกิดการแพร่ของความชื้นระหว่างการอบแห้งเท่านั้นแต่ยังมีการเปลี่ยนแปลงการกายภาพของวัสดุอีกด้วย ในการอธิบายปรากฏการณ์การอบแห้งวัสดุชีวภาพให้เกิดความแม่นยำได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในกาแฟกะลา (เปลือกกะลาและสารกาแฟ) ในระหว่างการอบแห้ง การอบแห้งแบบชั้นบางของเมล็ดกาแฟและกาแฟกะลาทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ความชื้นสัมพัทธ์ 14-28% และความเร็วมวล 1.4 m/s ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำภายในส่วนประกอบของกาแฟกะลา คำนวณจากวิธีหาค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (RMSE) ของความแตกต่างระหว่างความชื้นจากผลการทดลองและค่าที่ทำนายจากแบบจำลอง ผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารกาแฟมีค่าสูงกว่ากะลาประมาณ 1000 เท่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในส่วนประกอบต่างๆ ของกาแฟกะลามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) ซึ่งอธิบายในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส นอกจากนี้แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้คำนวณเกรเดียนต์ความชื้นภายในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้ง แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในส่วนประกอบของกาแฟกะลาและทำให้เข้าใจถึงการเคลื่อนที่ของความชื้นที่เกิดขึ้นในส่วนประกอบของกาแฟกะลาสายพันธุ์โรบัสต้า

คำหลัก: กาแฟ/ กาแฟกะลา/ ไฟไนต์เอลิเมนต์/ สัมประสิทธิ์การแพร่/ อบแห้ง

Abstract

Heat and mass transfer in the parchment coffee during convective drying represents a complicated phenomenon since it is important to consider not only the transport phenomena occurring 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 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 components of coffee (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 ชนิดคือ สายพันธุ์โรบัสต้า (Robusta) และสายพันธุ์อาราบิก้า (Arabica) สำหรับประเทศไทยนิยมปลูกสายพันธุ์โรบัสต้าร้อยละ 95 [1] โดยกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้าจะเจริญเติบโตได้ดีในแถบที่มีฝนตกสม่ำเสมอ แหล่งปลูกที่สำคัญอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทยในจังหวัดชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี กระบี่ และนครศรีธรรมราช เป็นต้น [2] กาแฟที่ผ่านกระบวนการเก็บเกี่ยวก่อนการจำหน่ายหรือแปรรูปเป็นกาแฟจะต้องตากให้แห้งหรือลดความชื้นด้วยการให้ความร้อน เช่น การคั่วหรืออบแห้ง ถาลดความชื้นของเมล็ดกาแฟให้มีค่าต่ำมากเกินความจำเป็นก็จะสิ้นเปลืองพลังงานหรือมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นกระบวนการที่ใช้ลดความชื้นจึงเป็นปัญหาสำคัญในการแปรรูปกาแฟหลังการเก็บเกี่ยว

วิธีที่ใช้ลดความชื้นกาแฟสุกให้เป็นเมล็ดกาแฟเขียว (Green Coffee Bean) เกษตรกรชาวสวนกาแฟมักใช้คือวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งต้องใช้พื้นที่และระยะเวลาดำเนินการ อีกทั้งอุปสรรคทางด้านสภาพภูมิอากาศ ทำให้เกิดการเสียหายต่อผลผลิต ในปัจจุบันมีการนำเทคนิคการลดความชื้นด้วยกระบวนการอบแห้งกาแฟกะลา (Parchment Coffee) อย่างแพร่หลายเนื่องจากระยะเวลาการอบแห้งสั้น มีการกระจายอุณหภูมิในการอบอย่างสม่ำเสมอ

การอบแห้งชั้นบาง (Thin Layer) เป็นกระบวนการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากช่วยให้เข้าใจกระบวนการถ่ายเทมวล (ความชื้น) และถ่ายเทความร้อน (อุณหภูมิ) ถ้าทำการอบแห้งแบบชั้นบางโดยเรียงซ้อนกันก็จะเป็นการอบแห้งแบบชั้นหนาซึ่งคล้ายกับระบบการอบแห้งทั่วไป อย่างไรก็ตามการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของเมล็ดกาแฟ ทั้งยังได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความเร็วตัวกลางการอบแห้ง หรือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเอง เช่น สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ ด้วยเหตุนี้หากต้องการสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต้องทำการทดลองซ้ำหลายครั้งเพื่อหาข้อมูลตัวแปรที่สนใจ แต่ในบางกรณีค่าใช้จ่ายหรือเวลาในการทดลองและความยุ่งยากในการทดลองจะเป็นข้อจำกัดทำให้ไม่สามารถทดลองซ้ำหลายครั้งตามต้องการได้

การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง หรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากช่วยประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง และสามารถให้ข้อมูลบางประเภทที่วัดได้ยากในห้องปฏิบัติการ เช่น ข้อมูลการกระจายความชื้นหรือการกระจายอุณหภูมิในวัสดุในหลายทิศทาง (เช่น ใน 2 หรือ 3 มิติ) ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทำนายการถ่ายเทความร้อน (การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) คู่ควบ (Coupled) ไปกับการทำนายการแพร่ของมวล

สาร (การเปลี่ยนแปลงความชื้น) ในกาแฟเพียงเมล็ดเดียว เพราะว่าเป็นสภาวะที่พบโดยทั่วไปในการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin Layer)

นักวิจัยหลายท่านได้นำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยศึกษาการอบแห้งเมล็ดกาแฟ [3-6] Ninont และคณะ [3] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการแพร่ของความชื้นในส่วนประกอบของกาแฟกะลาสายพันธุ์อาราบิก้า จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกะลามีค่าต่ำกว่าสารกาแฟประมาณ 106 เท่า เนื่องจากความแตกต่างกันของส่วนประกอบในกาแฟกะลาทำให้การแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดผ่านชั้นเหล่านี้มีความซับซ้อน Varadharaju และคณะ [7] ทำการทดลองอบแห้งผลกาแฟสุกพันธุ์อาราบิก้าแบบชั้นบางที่อุณหภูมิ 40-70°C โดยที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อน 46-83% และอัตราการไหลของอากาศ 1.5 m³/s แล้วพิเคราะห์การทำนายเทียบกับผลการทดลอง พบว่าสามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิในรูปแบบของสมการอาร์รี่เนียส

การจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยแบบจำลองที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการอบแห้งที่ต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แบบจำลองที่เหมาะสมยังอาจช่วยให้เกิดการเรียนรู้และเข้าใจถึงกลไกการอบแห้งที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในกาแฟกะลา (กะลาและสารกาแฟ) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบชั้นบาง และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นด้วยการปรับเส้นโค้ง (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 เมื่อกะเตาะกะลาออกจะเหลือส่วนที่เป็นเมล็ดเรียกว่าสารกาแฟ (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) ทำซ้ำการทดลอง 3 ครั้งและรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

2.2 สมบัติกายภาพของเมล็ดกาแฟ

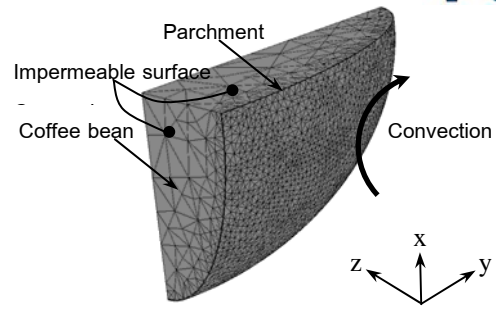
สมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟดิบสายพันธุ์โรบัสต้าโดยศึกษาจากการสุ่มตัวอย่าง 100 เมล็ดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้า [8]

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

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในระหว่างการอบแห้ง เมล็ดกาแฟจะเกิดการหดตัวทำให้ระดับความชื้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดของเมล็ดเล็กน้อยและเพื่อความไม่ซับซ้อนในการสร้างแบบจำลอง งานวิจัยนี้ได้สมมติให้เมล็ดกาแฟไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างการอบแห้ง และสมมติให้เมล็ดกาแฟมีรูปทรงสมมาตรเพื่อจำลองปริมาตรเป็น 1/8 ของเมล็ดเต็มดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้เกิดความรวดเร็วในการคำนวณและง่ายในการสังเกตระดับความชื้นภายในเมล็ดกาแฟ



รูปที่ 1 จำลอง Mesh ใน 1/8 ของเมล็ดกาแฟ ที่จำนวน 9029 เอลิเมนต์ และ 2027 จุดต่อ

ในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมตัวแปร และสมบัติต่างๆ เพื่อใช้ในแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ค่าสมบัติทางความร้อนของอากาศ-น้ำและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกที่ใช้ในแบบจำลอง [9, 10]

Equations	Property	Expression
(1)	c_a	$c_a = 1.00926E3 - 4.0403E - 2(T) + 6.1759E - 4(T^2) - 4.097E - 7(T^3)$
(2)	k_a	$k_a = 2.425E - 2 + 7.889E - 5(T) - 1.790E - 8T^2 - 8.570E - 12(T^3)$
(3)	ρ_a	$\rho_a = 101.325 / (0.287T_{ab})$
(4)	μ_a	$\mu_a = 1.691E - 5 + 4.984E - 8(T) - 3.187E - 11(T^2) + 1.319E - 14(T^3)$
(5)	D_{wa}	$D_{wa} = -2.775E - 6 + 4.479E - 8(T - 273.15) + 1.656E - 10(T - 273.15)^2$
(6)	R_e	$R_e = \rho_a \cdot U \cdot D_p / \mu_a$
(7)	S_c	$S_c = \mu_a / (\rho_a \times D_{wa})$
(8)	S_h	$S_h = 2 + (0.6R_e^{0.5} S_c^{0.33})$
(9)	h_m	$h_m = (S_h \times D_{wa} / D_p)$
(10)	N_u	$N_u = (0.46R_e^{0.5}) + (0.00128R_e)$
(11)	h_t	$h_t = (N_u \cdot k_a) / D_p$
(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), ρ_a = density of air (kg/m³), μ_a = dynamic viscosity of air (kg/m·s), D_{wa} = diffusion of water vapor in air (m²/s), D_p = equivalent diameter of parchment coffee, R_e = Reynold number, S_c = Schmidt number, S_h = Sherwood number, N_u = Nussel number and T = air temperature (°C)

ตารางที่ 3 ค่าสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของสารกาแฟและกะลาหุ้ม [11-13]

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

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

3.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

สมมติฐานในการวิเคราะห์กระบวนการทำแห้งเมล็ดกาแฟมีดังนี้

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

3.2 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวล

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

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

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

โดยที่ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s), M ความชื้น (มาตรฐานแห้ง), t เวลา (s), ∇ Divergence Operator, ρ ความหนาแน่น (kg/m^3), C_p ค่าความร้อนจำเพาะ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T อุณหภูมิ ($^\circ C$) และ k ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot ^\circ C$)

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) สำหรับวิเคราะห์ฟังก์ชันของความชื้นที่เคลื่อนออกจากผิวกาแฟไปยังอากาศแวดล้อมด้วยการพาความร้อนเขียนได้ดังนี้

$$-D \nabla M(x, y, z, t) = h_m (M_s(x, y, z, t) - M_e) \quad \text{สำหรับ } t > 0 \quad (21)$$

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

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความร้อนแฝงของน้ำส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณผิวเมล็ด ดังนั้นจากการสมดุลพลังงานพบว่า การพาความร้อนไปยังผิวเมล็ดจะเท่ากับการนำความร้อนเข้าสู่เมล็ดรวมกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุ สามารถเขียนสมการสมดุลสมการ ณ เงื่อนไขขอบเขตได้ดังนี้

$$k \nabla T(x, y, z, t) = h_t (T_a - T_s(x, y, z, t)) - \rho V \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \frac{h_{fg}}{A} \quad \text{สำหรับ } t > 0 \quad (22)$$

เมื่อ h_t คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_s อุณหภูมิของผิวเมล็ด ($^\circ C$), T_a อุณหภูมิอากาศร้อน ($^\circ C$), h_{fg} ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (J/kg), V ปริมาตรของเมล็ด (m^3), A พื้นที่ผิวของเมล็ด (m^2) และ \bar{M} ความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดที่เวลาใดๆ (kg/kg d.b.) เทอม $[\partial \bar{M} / \partial t]$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น หรือ $(\bar{M}_{t+\Delta t} - \bar{M}_t) / \Delta t$

เมื่อพิจารณาพื้นผิวด้านนอกของเมล็ดกาแฟดังรูปที่ 1 การแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลจะเกิดที่ผิวของกะลาหุ้มเมล็ดเท่านั้น ส่วนอีก 3 ด้านที่เหลือซึ่งเกิดจากการตัดเมล็ดกาแฟแบบสมมาตรจะไม่มีถ่ายเทมวลและความร้อน (Impermeable Surface) ซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ (23) และ (24)

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

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

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 กำหนดให้ ความชื้นและฟลักซ์ความร้อนที่เคลื่อนที่เข้าออก ระหว่างขอบเขตทั้งสองอยู่ในรูปแบบสมการความต่อเนื่อง (Continuity)

สมการ (19) - (26) จะหาคำตอบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics Version 3.5 จำนวนเอลิเมนต์ในสารกาแฟและกะลามีค่าเท่ากับ 4161 และ 4868 ตามลำดับ โดยจำนวนเอลิเมนต์เหล่านี้พิจารณาจากวิธี Mesh Independent Test ซึ่งเลือกจำนวน mesh ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดกาแฟที่เวลาการอบแห้งใดๆ เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1% กำหนดให้พื้นผิวของ Mesh เป็น Triangular และปริมาตร Mesh เป็นแบบ Tetrahedral เนื่องจากรูปทรงของเมล็ดกาแฟมีความซับซ้อนไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 1

เนื่องจากเมล็ดกาแฟมีขนาดเล็ก การทดลองวัดการกระจายความชื้นภายในจึงเป็นเรื่องยาก งานวิจัยส่วนใหญ่จะพิจารณาค่าความชื้นเฉลี่ยและอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งเมล็ด ในงานแบบจำลองนี้คำนวณความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ยจากการอินทิเกรตเทียบกับปริมาตรเมล็ด โดยรวมโดเมนของสารกาแฟและกะลาเข้าด้วยกัน ดังนี้

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

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

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

3.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

เริ่มต้นจากการใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นพีดีเข้ากับ การทดลองเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ สารกาแฟ (D_{bean}) ก่อน หลังจากทราบค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ในสารกาแฟแล้ว จึงนำไปแทนค่าใน แบบจำลองกาแฟกะลาเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การ แพร่ของกะลา ($D_{parchment}$) ต่อไป ซึ่งกระบวนการนี้ อาศัยการลองแทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล โดยการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ให้ผลการจำลอง ความชื้นเฉลี่ยใกล้เคียงกับผลการทดลองอบแห้งสาร กาแฟและเมล็ดกาแฟกะลา ตามลำดับ โดยหาค่า ความผิดพลาดยกกำลังสอง (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} ความชื้นเฉลี่ยการทำนาย (kg/kg d.b.) ที่เวลาใดๆ และ n คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการ คำนวณ

3.4 ความชื้นสมดุลของกาแฟกะลา

ความชื้นสมดุลของกาแฟกะลาสร้างจากการพีดี ผลการทดลองความชื้นสมดุลเข้ากับแบบจำลอง 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

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

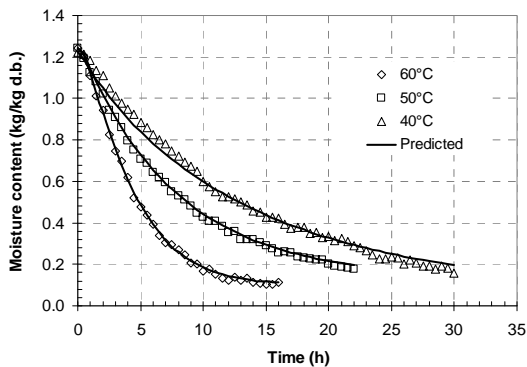
$$b = 1.05441E - 5 \exp\left(\frac{-4213.89}{T_{ab}}\right)$$

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

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

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้งกาแฟกะลาที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิอากาศร้อนจะใช้ระยะเวลาลดความชื้นให้มีระดับที่เหมาะสมสำหรับเก็บรักษาที่แตกต่างกัน จากรูปพบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าแปรผันตามระดับอุณหภูมิในการอบแห้งและแบบจำลองที่สร้างขึ้น (เส้นทึบ) สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี ($R^2 > 0.98$)

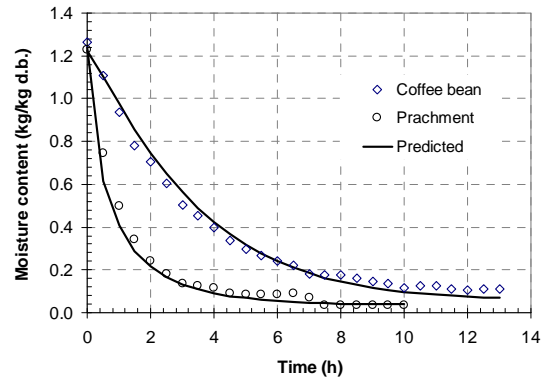


รูปที่ 2 จลนศาสตร์การอบแห้งกาแฟกะลาที่อุณหภูมิต่างกัน (เส้นประแทนด้วยการทำนายจากแบบจำลอง)

จากรูปที่ 2 ในช่วงต้นของการอบแห้ง (ประมาณ 1 ชั่วโมงแรก) เมล็ดกาแฟมีความชื้นสูงทำให้การระเหยความชื้นเฉพาะที่บริเวณผิวเมล็ด เมื่อความชื้นที่ผิวเมล็ดลดลง ความชื้นภายในเมล็ดจะค่อยๆ แพร่จากด้านในออกมายังผิวนอก ซึ่งการแพร่ของความชื้นจากภายในออกมายังผิวเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิว ทำให้การลดลงของความชื้นจะช้าลงกว่าช่วงแรก

รูปที่ 3 เปรียบเทียบการทำนายความชื้นในส่วนประกอบของกาแฟกะลาระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการทดลอง ซึ่งพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายความชื้นเฉลี่ยของกาแฟได้เป็นที่น่าพอใจตลอดกระบวนการอบแห้ง ($R^2 > 0.98$) อย่างไรก็ตาม อาจปรับปรุงผลการจำลองให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้อีก หากพิจารณาผลของการเปลี่ยนรูปของวัสดุระหว่างการอบแห้ง [14] จากรูปที่ 3 พบว่าระดับความชื้นเฉลี่ยภายในกะลาจะมีค่าต่ำกว่า

สารกาแฟ เนื่องจากผิวของกะลามิพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศร้อนมากกว่าสารกาแฟ นอกจากนั้นแม้ว่ากะลาเป็นชั้นที่มีความบางและความต้านทานการแพร่ของความชื้นสูง ความชื้นจากสารกาแฟจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นกะลาออกสู่การพาความชื้นภายนอกได้ยาก ทำให้ชั้นกะลาสามารถชะลอการแพร่ของน้ำจากภายในสารกาแฟได้มาก

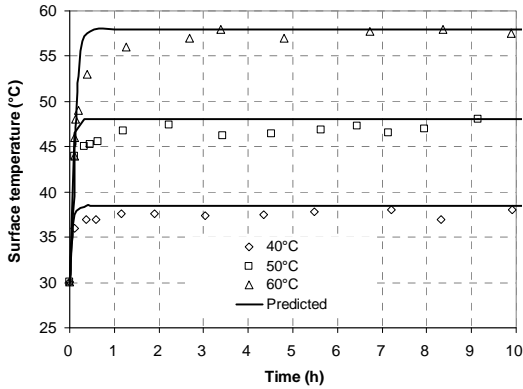


รูปที่ 3 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้งระหว่างสารกาแฟและกะลาที่อุณหภูมิอากาศ 60°C

รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดที่เปลี่ยนไปเวลาการอบแห้ง จากรูปพบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นอุณหภูมิจจะมีค่าเกือบคงที่ โดยอุณหภูมิเมล็ดกาแฟจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งประมาณ 5-7°C เนื่องจากความร้อนสูญเสียในรูปแบบต่างๆ

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้งทำให้เกิดความเค้นจากความร้อนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิด้านในเมล็ดกาแฟ ถ้าเมล็ดมีความชื้นต่ำ ความยืดหยุ่นจะน้อยซึ่งเป็นสาเหตุให้เมล็ดแตกร้าวได้ รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง พบว่าการทำนายเส้นแนวโน้มของอุณหภูมิมีค่า $R^2 = 0.92$ ในช่วง 30 นาทีแรกของการอบแห้งแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดได้แม่นยำมากนัก และผลการทำนายอุณหภูมิจจะมีค่าสูงกว่าผลการทดลองทุกกรณี อาจเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นเฉลี่ย ยังไม่

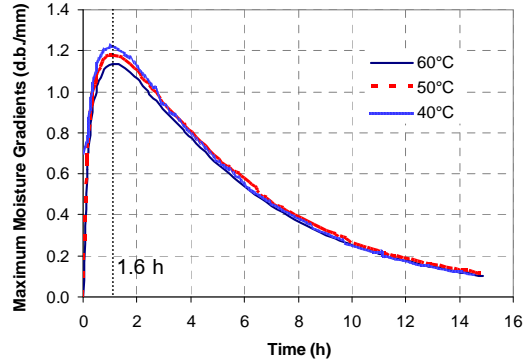
เหมาะสม นอกจากนี้ อุณหภูมิที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดลองเนื่องจากการสูญเสียความร้อน อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองทำนายไม่แม่นยำ



รูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดกาแฟ (เส้นทึบคือเส้นที่ทำนายด้วยแบบจำลอง)

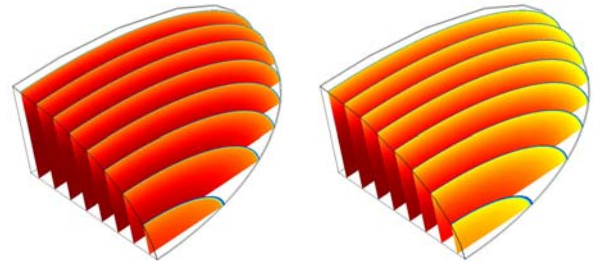
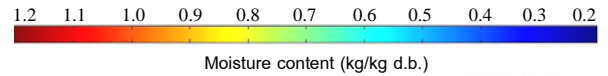
รูปที่ 5 แสดงเกรเดียนต์ความชื้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในเมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าเกรเดียนต์ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าสูงสุดที่ช่วงเวลา 1.6 ชั่วโมง จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากช่วงเริ่มต้นการอบแห้งเป็นช่วงอัตราอบแห้งคงที่ ความชื้นในเมล็ดมีมากและความชื้นที่แตกต่างกันระหว่างผิวกับภายในเมล็ดก็มีค่าต่างกันมากทำให้เกรเดียนต์ความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราอบแห้งลดลงความชื้นการเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปได้ช้าส่งผลให้เกรเดียนต์ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความไม่สม่ำเสมอของความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในเมล็ดมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเกรเดียนต์ความชื้นจะลดลงเพราะความชื้นได้แพร่ออกจากเมล็ดตามระยะเวลาการอบแห้ง

จากรูปที่ 5 พบว่าเกรเดียนต์ความชื้นสูงสุดในเมล็ดกาแฟซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C นั้นสูงกว่าค่าเกรเดียนต์ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในกาแฟมีค่าต่ำเมื่ออุณหภูมิกาแฟต่ำลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นในกาแฟเป็นไปได้ช้าลง ส่งผลให้ค่าเกรเดียนต์ความชื้นเพิ่มสูงขึ้น

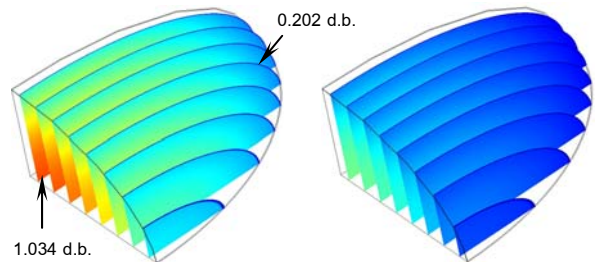


รูปที่ 5 เกรเดียนต์ความชื้นสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 6 แสดงทัศนการณ์การกระจายความชื้นภายในกาแฟกะลาตามระยะเวลาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ก่อนทำการอบแห้งเมล็ดกาแฟมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.2 kg/kg d.b. และอุณหภูมิ 29°C เท่ากันทั้งเมล็ด เมื่อทำการอบแห้งแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังแสดงในรูปที่ 6



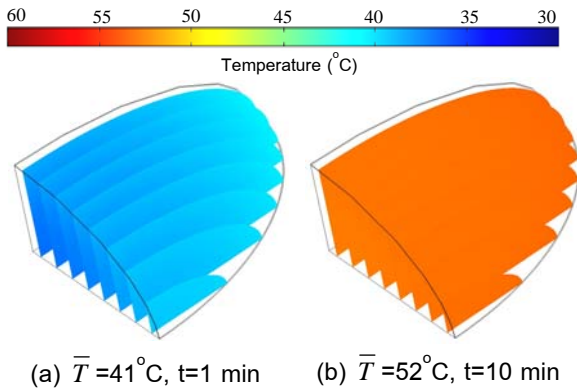
(a) $\bar{M} = 1.162$ d.b., $t = 30$ min (b) $\bar{M} = 1.101$ d.b., $t = 1$ h



(c) $\bar{M} = 0.843$ d.b., $t = 5$ h (d) $\bar{M} = 0.601$ d.b., $t = 10$ h

รูปที่ 6 การกระจายความชื้นภายในกาแฟกะลาตามระยะเวลาการอบแห้ง ที่อุณหภูมิกาแฟร้อน 60°C สเกลแถบสีน้ำเงินแสดงความชื้นต่ำ ส่วนสีแดงแสดงความชื้นสูง ดังแสดงในรูปที่ 6 สีที่ปรากฏใน

เมล็ดกาแฟระหว่างการอบแห้งมีความไม่สม่ำเสมอตลอดเวลาการอบแห้ง รูปที่ 6a บริเวณที่มีความชื้นสูงจะอยู่ภายในเมล็ดและความชื้นจะค่อยๆลดลงจนต่ำสุดที่บริเวณผิว จากผลการจำลองเมื่อเวลาการอบแห้งผ่านไป 5 ชั่วโมง (รูปที่ 6c) ที่บริเวณกึ่งกลางเมล็ดมีความชื้นสูงสุดเท่ากับ 1.034 d.b. และที่ผิวเมล็ดเกิดความชื้นต่ำสุดเท่ากับ 0.202 d.b. เกรเดียนต์ความชื้นมีค่าสูงบริเวณผิวต่อระหว่างเนื้อกาแฟกับกะลา (สังเกตจากแถบสีน้ำเงินเข้มที่บริเวณผิวต่อของวัสดุ) เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีสมบัติทางกายภาพและความต้านทานในการถ่ายเทมวลแตกต่างกันทำให้การแพร่ความชื้นผ่านขอบเขตนี้มีความไม่ต่อเนื่อง หลังจากอบแห้งไป 10 ชั่วโมง (รูปที่ 6d) ส่วนภายในเมล็ดกาแฟมีความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอซึ่งเข้าใกล้ความชื้นสมดุลกับอากาศแวดล้อม เกรเดียนต์ความชื้นที่ผิวต่อของชั้นกาแฟและชั้นกะลามีค่าคงที่ เมล็ดกาแฟส่วนใหญ่แสดงสีน้ำเงินเข้มซึ่งหมายถึงเกิดความแห้งครอบคลุมตลอดชั้นภายในจนถึงผิวนอกสุด



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิอากาศร้อน 60°C

ดังแสดงในรูปที่ 7 หลังจากอบแห้งผ่านไป 10 นาที (รูปที่ 7b) การกระจายอุณหภูมิในเมล็ดกาแฟค่อนข้างสม่ำเสมอ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิบริเวณผิวและกึ่งกลางเมล็ดมีความแตกต่างกันมากในช่วงไม่เกิน 10 นาทีของการอบแห้งเท่านั้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิอากาศร้อนมีผลกระทบต่อการแพร่ของเมล็ดกาแฟน้อย

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ในส่วนประกอบของกาแฟกะลาแสดงในตารางที่ 4 ผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารกาแฟมีค่าสูงกว่ากะลาประมาณ 700-1000 เท่า รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อกับอุณหภูมิอากาศร้อนเพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) ซึ่งเขียนในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสได้ดังนี้

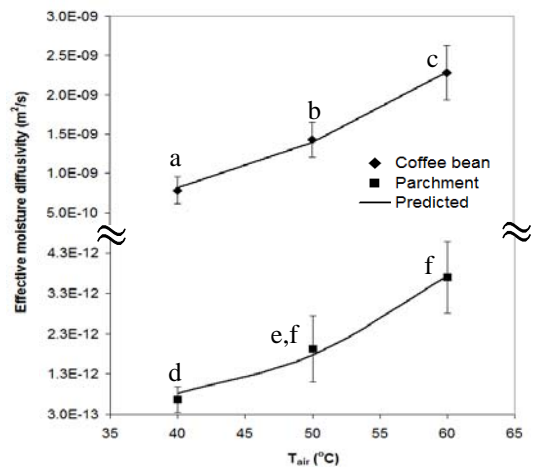
$$D_{bean} = 0.024 \exp(-5382.9/T_{ab}), R^2=0.98 \quad (31)$$

$$D_{parchment} = 0.088 \exp(-7957.9/T_{ab}), R^2=0.97 \quad (32)$$

เมื่อแทนค่าอุณหภูมิ 40-60°C ในสมการข้างบนจะได้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-12} m²/s โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซและของเหลวมีค่าประมาณ 10^{-5} และ 10^{-9} m²/s ตามลำดับ Aguilera และ Stanley [15] จากข้อมูลนี้สามารถกล่าวได้ว่าการถ่ายเทความชื้นภายในเมล็ดกาแฟเป็นการแพร่ในรูปของเหลว

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในส่วนประกอบของกาแฟกะลา

T_{air} (°C)	D_{eff} (m ² /s)	
	Coffee Bean	Parchment
40	$(7.834 \pm 1.72) \times 10^{-10}$	$(6.651 \pm 3.14) \times 10^{-13}$
50	$(1.431 \pm 0.22) \times 10^{-9}$	$(1.921 \pm 0.82) \times 10^{-12}$
60	$(2.280 \pm 0.34) \times 10^{-9}$	$(3.700 \pm 0.88) \times 10^{-12}$
Mean	1.498×10^{-9}	2.095×10^{-12}



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิอากาศร้อน

Nilnout และคณะ [3] รายงานค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าที่อุณหภูมิอากาศร้อน 40-60°C โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.173×10^{-10} และ 6.737×10^{-12} m²/s สำหรับสารกาแฟและกะลา ตามลำดับ จะพบว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารกาแฟที่คำนวณได้ต่ำกว่ากาแฟโรบัสต้าในงานวิจัยนี้ แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากงานวิจัยนี้อาจเป็นผลมาจากเป็นเมล็ดกาแฟต่างสายพันธุ์กัน

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งกาแฟโรบัสต้า โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายความชื้นและอุณหภูมิภายในเมล็ดกาแฟได้ดี จากผลการจำลองพบว่า เกรเดียนต์ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเมล็ดกาแฟมีความไม่สม่ำเสมอของความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยเกรเดียนต์ความชื้นที่มีค่าสูงบริเวณผิวต่อระหว่างสารกาแฟกับกะลาเนื่องจากวัสดุทั้งสองมีความต้านทานในการถ่ายเทมวลที่แตกต่างกัน

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารกาแฟมีค่าสูงกว่ากะลาในช่วง 700-1000 เท่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้นทีละ 10°C ($P < 0.05$) โดยค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในสารกาแฟและกะลาที่อุณหภูมิอากาศร้อน 40-60°C มีค่าเท่ากับ 1.498×10^{-10} และ 2.095×10^{-12} m²/s ตามลำดับ แบบจำลองที่สร้างขึ้นทำให้ช่วยเข้าใจถึงการถ่ายโอนความร้อนและการแพร่ของความชื้นที่เกิดขึ้นในกาแฟกะลา ซึ่งสามารถเป็นข้อมูลเพื่อช่วยการควบคุมกระบวนการอบแห้งกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้าหรือเมล็ดพืชอื่นๆ โดยการจำลองด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพืชชนิดนั้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยอบแห้งขั้นสูงสำหรับอาหารและวัสดุชีวภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และคณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมการค้าภายใน, กระทรวงพาณิชย์ (2542). การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ, เอกสารงานจัดการประกวดเมล็ดกาแฟ
- [2] วรเมธ ทัดทอง, สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด และ พงษ์เจต พรหมวงศ์ (2546). การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17*, จังหวัดปราจีนบุรี
- [3] Nilnont, W., Thepa, S., Janjai, S., Kasayapanand, N., Thamrongmas, C. and Bala, B.K. (2011). Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying, *Food and Bioproducts Processing*, vol. 90, pp. 341-350.
- [4] Fabbri, A., Cevoli, C., Alessandrini, L. and Romani, S. (2011). Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process, *Journal of Food Engineering*, vol. 105, pp. 264-269.
- [5] Hernández-Díaz, W.N., Ruiz-López, I.I., Salgado-Cervantes, M.A., Rodríguez-Jimenes, G.C., García-Alvarado, M.A. (2008). Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry, *Journal of Food Engineering*, vol. 86, pp. 1-9.
- [6] Ferguson, W.J. Lewis, R.W. and Tömösy, L. (1993). A finite element analysis of freeze-drying of a coffee sample, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 108, pp. 341-352.
- [7] Varadharaju, N., Karunanidhi, C. and Kailappan, R. (2001). Coffee Cherry Drying: A two layer model, *Drying Technology*, vol. 19, No. 3, pp.709-715.

- [8] พีระพงศ์ กัทลี และ เซาว์ อินทร์ประสิทธิ์ (2555). คุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสต้าก่อนคั่วและหลังคั่ว, *การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, จังหวัดนครปฐม*
- [9] Mujumdar, A.S. (1995). *Handbook of Industrial Drying*, second ed., Marcel Dekker, Inc., New York.
- [10] Pakowski, Z., Bartezak, Z., Strumilo, C., Stenstrom, S. (1991). Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in CAD of drying processes, *Drying Technology*, vol. 9, pp. 753-773.
- [11] Chandrasekar, V. and Viswanathan, R. (1999). Physical and thermal properties of coffee, *J. Agric. Engng Res*, vol. 73, pp. 227-234.
- [12] Scharzberg, H.G. (2002). *Modelling bean heating during batch roasting of coffee beans*. In J. welti-Chanes, G. Barbosa-Canovas & J.M. Aguilera (Eds.), *Engineering and food for the 21st century*. London, New York, Boca Raton: CRC Press LLC.
- [13] Fabbri, A., Cevoli, C., Alessandrini, L. and Romani, S. (2011). Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process, *Journal of Food Engineering*, vol. 105, pp. 264-269.
- [14] สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท้อป
- [15] Aguilera, J.M. and Stanley, D.W. (1999). *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*, Aspen Publishers, Gaithersburg, Maryland.