



E46934



**MODELING THE KINETICS OF MOISTURE ADSORPTION
IN BANANA FOAM MATS**

MR. PREEDA PRAKOTMAK

**A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (ENERGY TECHNOLOGY)
SCHOOL OF ENERGY, ENVIRONMENT AND MATERIALS
KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI**

2010

600246558



E46934

Modeling the Kinetics of Moisture Adsorption in Banana Foam Mats

Mr. Preeda Prakotmak M.Eng. (Energy Management Technology)

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Doctor of Philosophy (Energy Technology)

School of Energy, Environment and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi



Dissertation Committee

P. Rattanadecho

Chairman of Dissertation Committee

(Prof. Phadungsak Rattanadecho, Ph.D.)

Somkiat Prachayawakorn

Member and Dissertation Advisor

(Assoc. Prof. Somkiat Prachayawakorn, Ph.D.)

Somchart S.

Member and Dissertation Co-Advisor

(Prof. Somchart Soponronnarit, Dr.Ing.)

S. Devahastin

Member

(Assoc. Prof. Sakamon Devahastin, Ph.D.)

Adisak Nathakaranakule

Member

(Assoc. Prof. Adisak Nathakaranakule, Ph.D.)

Copyright reserved

Dissertation Title	Modeling the Kinetics of Moisture Adsorption in Banana Foam Mats
Dissertation Credits	42
Candidate	Mr. Preeda Prakotmak
Dissertation Advisors	Assoc. Prof. Dr. Somkiat Prachayawarakorn Prof. Dr. Somchart Soponronnarit
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2553

E46934**Abstract**

Dried banana foam mat can be served as crispy snack, but it has high porosity, which leads to quickly adsorb the moisture from air during storage, and the subsequently loss of quality and texture property. The main objectives of this research were therefore to determine the equilibrium adsorption isotherm of banana foam mats, to determine the moisture diffusivity using continuum model and discrete approach (or pore network model), and also explain the banana foam structure that can resist moisture adsorption. In addition, the effect of moisture migration on the qualities of the banana foam mats in terms of texture properties and sensory were determined as well.

In this study, adsorption isotherms experiments were carried out with standard static method using saturated salt solutions over a wide range of relative humidities from 31 to 82%, and a temperature range of 20 to 45°C. Three dried banana foam densities of 0.21, 0.26 and 0.30 g/cm³ adsorbed water vapor under the controlled conditions. The experimental results have shown that the isotherms at the temperatures exhibited sigmoidal shape. Equilibrium moisture content increased with decrease in temperature at any relative humidity. Modified-GAB gave the best description of the experimental data. The Clausius–Clapeyron equation and GAB model facilitated satisfactory determination of the net isosteric heats of adsorption, which were found to decrease with increasing moisture

content. The net isosteric heat approached to zero at the moisture content higher than 0.45 kg/kg d.b.

In the second objective of this research, a Fick's law coupled with the optimization technique was used to estimate the effective moisture diffusivity by assuming within medium continuum. Empirical equations such as power-law, polynomial and exponential forms for two and three constant parameters for describing the dependence of the effective moisture diffusivity on moisture content were tested. The optimization result showed that the power-law function with two constant parameters was suitably described the variation of the effective moisture diffusivity with moisture content. The power-law equation indicated that initial foam density, relative humidity and temperature significantly affected the effective moisture diffusivity. Besides, the effective diffusion coefficient is strongly dependent on the moisture content level.

In the third part of this study, a 2-D stochastic network of cylindrical pores was used to represent the voids inside banana foam mats and the moisture transport within individual pore segments was described by Fick's law. The pore size distributions of dried banana foam for each the foam density was characterized by binary image of SEM. The network size of 20×231 for the foam density of 0.21 g/cm^3 , accounting for 9491 pores, the size of 23×264 for the density of 0.26 g/cm^3 , accounting for 12431 pores, and the size of 25×286 for the density of 0.30 g/cm^3 , accounting for 14611 pores, were used. The interactions of transport processes within the pore network were illustrated using a 3-D pictorial representation of network concentration gradients in pores with colour representing the moisture content. Simulation results showed that, the network model could describe the experimental results relatively well. The diffusivity of water in pores was in order of $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ which was 9 times higher than the apparent effective diffusivity. For a given temperature, the apparent pore diffusivities were independent of relative humidity, except for the case of higher relative humidity of 70% at which the diffusivity had a significantly decreasing trend. The apparent pore diffusivity depended strongly on the temperature and the banana foam densities. Furthermore, the apparent pore diffusivity determined from this work may be applied to other porous foods.

In order to design porous structure to resist moisture adsorption, banana foam mat is divided into two layers with two densities of banana foam. The designed networks are

applied to assemblies of various foam densities with different architectural configurations. Simulation results showed that the model could describe the qualitative experimental results and the designed foam structure with high banana foam density laid on the top of low foam density had lower moisture migration than the single density. Considering textural properties of banana foam mats, the designed structure with high foam density on upper layer provided higher jagged curves than the single foam samples. Additionally, the force deformation curve obtained from a penetration test of the banana foam mats indicated that an increase of moisture content of sample decreased number of peaks and initial slope.

From sensory test, overall acceptance score for dual density and single density products of 0.26 and 0.30 g/cm³ were not significantly different. However, the single density of 0.26 was recommended to produce for the banana foam mats because the texture of the density was rather crisp and not hard, which was suitable for the snack.

Finally, a 3-D stochastic pore network was developed to generate model that is similar to the real sample and describe the moisture transport in the network. The network is an interconnected array of cylindrical pores to give a connectivity of 6. The 3-D network model successfully solved numerically showed that the model as satisfactorily representing the behavior of moisture migration.

Keywords: Adsorption Isotherm/Banana Foam/ Banana Foam Sensory Evaluation
/Banana Foam Texture/Continuum Model/Discrete Model/ Pore
Network/Porous Media/Water Diffusivity

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับความชื้นของแผ่น โฟมกล้วย
หน่วยกิต	42
ผู้เขียน	นายปรีดา ปรากฏมาก
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. สมเกียรติ ปรัชญาวารากร ศ. ดร. สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2553

E46934

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์โฟมกล้วยแผ่นอบกรอบเหมาะสำหรับเป็นขนมขบเคี้ยว อย่างไรก็ตามแผ่นโฟมกล้วยมีความพรุนสูงทำให้ดูดซับความชื้นจากอากาศแวดล้อมอย่างรวดเร็วและสูญเสียสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสได้ง่าย วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือหาค่าความชื้นสมดุลของแผ่นโฟมกล้วย, คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยวิธีแบบจำลองภาวะต่อเนื่อง (Continuum Model) และแบบจำลองโครงข่ายรูพรุน (Pore Network Model) หลังจากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างรูพรุนของโฟมกล้วยโดยใช้โครงข่ายรูพรุนแบบสองมิติเพื่อช่วยยับยั้งการแพร่ของความชื้นจากอากาศเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วย ในด้านคุณสมบัติของเนื้อสัมผัสและการประเมินทางด้านประสาทสัมผัส (Sensory)

ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับความชื้น ได้ทำการทดลองภายใต้สภาวะคงที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 31 ถึง 82% อุณหภูมิ 20 ถึง 45 °C โดยนำแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่น 0.21, 0.26 และ 0.30 g/cm³ มาดูดซับความชื้นภายใต้สภาวะควบคุมดังกล่าว จากผลการทดลองพบว่าเส้นไอโซเทอมมีรูปร่างแบบ Sigmoidal และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์เดียวกันความชื้นสมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง นอกจากนี้พบว่าแบบจำลอง Modified-GAB สามารถอธิบายเส้นไอโซเทอมของแผ่นโฟมกล้วยได้ดีที่สุด สมการ Clausius-Claperon กับแบบจำลอง GAB สามารถอธิบายค่า Isosteric heats ได้ดีและพบว่าเมื่อดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นค่า Isosteric heats จะมีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อความชื้นมีค่าสูงกว่า 0.45 มาตรฐานแห้ง

E 46934

ในวัตถุประสงค์ข้อที่สองของงานวิจัยนี้ ได้นำกฎของฟิค (Fick's law) มาใช้ร่วมเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากแบบจำลองภาวะต่อเนื่อง โดยสมการ Empirical ในรูปแบบของสมการเลขยกกำลัง (Power-law) สมการพหุนาม (Polynomial) สมการเลขชี้กำลัง (Exponential) ที่มีทั้งสองและสามตัวแปรจะถูกทดสอบในการอธิบายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับความชื้น จากผลการฟิตแบบจำลองภาวะต่อเนื่องเข้ากับการทดลอง พบว่าสมการเลขยกกำลังสองตัวแปรมีความเหมาะสมสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระดับความชื้นของโฟมกล้วย โดยความหนาแน่นโฟม ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

ช่วงที่สามของงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองโครงข่ายรูพรุนแบบสองมิติ (2-D Stochastic Network) เพื่อเป็นตัวแทนโครงสร้างรูพรุนของแผ่นโฟมกล้วย และอธิบายการแพร่ของความชื้นภายในรูพรุนด้วยกฎของฟิค ซึ่งการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore Size Distributions) ภายในแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งอธิบายด้วยการแปลความหมายจากภาพไบนารี (Binary Image) ที่ได้มาจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) โฟมกล้วยความหนาแน่น 0.21, 0.26 และ 0.30 g/cm³ มีขนาดโครงข่ายรูพรุนที่เหมาะสมเท่ากับ 20×231, 23×264 และ 25×286 ซึ่งมีรูพรุนจำนวน 9491, 12431 และ 14611 ตามลำดับ ปฏิสัมพันธ์การแพร่ของความชื้นตามเวลาได้นำเสนอเป็นแผนภาพกราฟฟิคซึ่งระดับความเข้มข้นของความชื้นภายในรูพรุนจะอธิบายด้วยระดับสีต่างๆ ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองโครงข่ายรูพรุนสามารถอธิบายการทดลองได้ดี ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูพรุน (Apparent Pore Diffusivity) อยู่ในช่วง 10⁻⁹ m²/s ซึ่งมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลประมาณ 9 เท่า สำหรับอุณหภูมิใดๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูพรุนจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความชื้นสัมพัทธ์ ยกเว้นที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 70% ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูพรุนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความหนาแน่นของแผ่นโฟม นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูพรุนที่คำนวณจากงานวิจัยนี้อาจจะนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุรูพรุนชนิดอื่นได้เช่นกัน

ในการออกแบบโครงสร้างรูพรุนเพื่อยับยั้งการแพร่ของความชื้นเข้าสู่แผ่นโฟม แผ่นโฟมกล้วยถูกแบ่งออกเป็นสองชั้นโดยมีความหนาแน่นสองค่า โครงข่ายรูพรุนที่ออกแบบดังกล่าวมีการเชื่อมต่อของโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่างๆ ซึ่งมีคุณลักษณะของโครงสร้างรูพรุนแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายการทดลองได้ดี โดยการออกแบบโครงสร้างของโฟมด้วยการวางโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูงกว่าไว้ด้านบนโฟมกล้วยความหนาแน่นต่ำ จะมีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำกว่าโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นค่าเดียว เมื่อพิจารณาสมบัติทางด้านผิวสัมผัสจากผล

E 46934

การวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ของแรงกดกับระยะทาง (Force Deformation) พบว่าแผ่นโฟมกล้วยที่ออกแบบให้มีความหนาแน่นสองค่าดังกล่าวจะให้ความกรอบสูงกว่าแผ่นโฟมที่มีความหนาแน่นค่าเดียว นอกจากนี้แผ่นโฟมกล้วยจะมีจำนวนขดและความชันเริ่มต้นลดลงเมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

สำหรับการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าคะแนนความพอใจโดยรวมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างแผ่นโฟมที่มีความหนาแน่นสองค่า และแผ่นโฟมหนาแน่นค่าเดียว (0.26 และ 0.30 g/cm³ ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามความหนาแน่นแผ่นโฟมที่แนะนำสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์นี้คือ 0.26 g/cm³ เนื่องจากผิวสัมผัสค่อนข้างกรอบและไม่แข็งจนเกินไป ซึ่งเป็นสมบัติที่เหมาะสมสำหรับขนมขบเคี้ยว

ในตอนท้ายของงานวิจัย แบบจำลองรูพรุนสามมิติ (3-D Stochastic Network) ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้มีโครงสร้างรูพรุนคล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างเพื่อใช้อธิบายการแพร่ของความชื้น โดยโครงข่ายรูพรุนดังกล่าวออกแบบภายใต้การเชื่อมต่อกันของท่อทรงกลมซึ่งมีภาวะการเชื่อมต่อ (Connectivity) เท่ากับ 6 จากการทดลองพบว่า แบบจำลองสามมิติที่สร้างขึ้นสามารถแสดงพฤติกรรมของการแพร่ของความชื้นได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การประเมินทางด้านประสาทสัมผัสของโฟมกล้วย/โครงข่ายรูพรุน/ตัวกลางรูพรุน/แบบจำลองภาวะต่อเนื่อง/แบบจำลองแยกเป็นส่วนชัด/ผิวสัมผัสโฟมกล้วย/โฟมกล้วย/สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ/ไอโซเทอมการดูดซับความชื้น

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my deepest gratitude to my principal supervisor Assoc. Prof. Dr. Somkiat Prachayawakorn for his outstanding advices and support. I wish to express my deep thanks to my co-supervisor Prof. Dr. Somchart Soponronnarit not only for his very important guidance, constant encouragement to my scientific progress but also for the great help that I have received during the course of Ph. D. work.

I would like to express their appreciation to the Commission on Higher Education, Thailand for supporting by grant fund under the program Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the Ph. D. Program Thai Doctoral degree for this research. This work was also supported in part by King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT).

I also would like to thank all Professors, associated members, staff, and my colleagues in the graduate school for their help, advice, as well as their friendship. I wish to express my sincere thanks to the president and members of the board for their comments and for agreeing to evaluate my thesis.

Furthermore, I deeply thank to staff and all of my friends in the Drying Technology Research Laboratory for their help, support and encouragement.

Last but not least, I dedicate this work to my parents. I express my deep gratitude to my parents and my family members for their love, care and encouragement during the difficult time I was far away, which gave me determination to finish.

CONTENTS

	Page
ENGLISH ABSTRACT	ii
THAI ABSTRACT	v
ACKNOWLEDGEMENTS	viii
CONTENTS	ix
LIST OF TABLES	xv
LIST OF FIGURES	xvii
SYMBOLS	xxiv
 CHAPTER	
1. INTRODUCTION	1
1.1 Overview	1
1.2 Objective of the study	3
1.3 Scope of the study	4
1.4 Expected benefits	5
2. LITERATURE REVIEW	6
2.1 Sorption isotherm	6
2.1.1 Measurement of sorption isotherms	8
2.1.2 Mathematical description of moisture sorption isotherms	10
2.1.3 Effect of temperature on sorption isotherms	12
2.1.4 Isosteric heat of sorption and sorption entropy	13
2.2 Moisture diffusivity in food Materials	15
2.2.1 Diffusion of gases and liquid	16
2.2.2 Diffusion in solids	17

	Page
2.2.3 Effect of measurement method on moisture diffusivity	18
2.2.4 Effect of porosity on moisture diffusivity	19
2.2.5 Effect of temperature on moisture diffusivity	21
2.2.6 Moisture diffusivity of foods as a function of moisture content	22
2.2.7 Determination of mass diffusivity from adsorption kinetics	24
2.3 Optimization	29
2.4 Pore network models	35
2.4.1 Introduction to pore network	35
2.4.2 Connectivity definition	39
2.4.3 Application of network models	42
2.5 Effect of water of product textural properties during storage	45
3. EFFECTS OF ADSORPTION CONDITIONS AND DRY BANANA FOAM DENSITY ON EFFECTIVE DIFFUSIVITY AND TEXTURAL PROPERTY	49
3.1 Introduction	49
3.2 Materials and methods	51
3.2.1 Dried banana foam preparation	51
3.2.2 Measurement of adsorption isotherms	52
3.2.3 SEM photograph	53
3.2.4 Volume measurement	54
3.2.5 Texture analysis	54
3.2.6 Adsorption Isotherm	56
3.2.7 Isosteric heat of sorption and sorption entropy	57
3.2.8 Determination of effective moisture diffusivity	59

	Page
3.3 Results and discussion	64
3.3.1 Fitting of adsorption models to experiment data	64
3.3.2 Adsorption isotherm of banana foam mat	67
3.3.3 Heat of adsorption and adsorption entropy	72
3.3.4 Morphology of dry banana foam	77
3.3.5 Identification of effective moisture diffusivity model	79
3.3.6 Effect of relative humidity on effective moisture diffusivity	83
3.3.7 Effects of temperature and banana foam density on effective moisture diffusivity	91
3.3.8 Effect of moisture content on banana foam texture	94
3.3.9 Effects of storage time and temperature on texture of banana foam mats	99
4. MODELLING OF MOISTURE DIFFUSION IN PORES AND POROUS STRUCTURE DESIGN OF BANANA FOAM MAT USING A 2-D STOCHASTIC PORE NETWORK	104
4.1 Introduction	104
4.2 Materials and methods	107
4.2.1 Dried banana foam preparation	107
4.2.2 Adsorption experiment	108
4.2.3 Image analysis	109
4.2.4 Texture analysis	110
4.2.5 Sensory evaluation	110

	Page
4.2.6 Estimation of activation energy	112
4.3 Generation of the pore network	112
4.3.1 Diffusion in single pore	114
4.3.2 Mass balance in the network	117
4.3.3 Statistical analysis	119
4.4 Results and discussion	119
4.4.1 Effects of temperature and relative humidity	119
4.4.2 Effect of foam densities	121
4.4.3 Pore size distribution	123
4.4.4 Moisture diffusivity in pores	127
4.4.5 Effect of foam densities on diffusion coefficient	132
4.4.6 Comparison of pore diffusion coefficient and effective diffusion coefficient	135
4.4.7 Activation energy	136
4.4.8 Validation	138
4.4.9 Graphical visualization	138
4.5 Designing porous structure of banana foam	141
4.5.1 Two layer pore network design	141
4.5.2 Model validation	145
4.5.3 Graphical visualization in pores of the dual foam density	149
4.5.4 Texture of dried banana foams	152

	Page
4.6 Sensory	155
5. MOISTURE DIFFUSION IN BANANA FOAM MAT USING A 3-D STOCHASTIC PORE NETWORK	159
5.1 Introduction	159
5.2 Materials and methods	160
5.2.1 Dry banana foam preparation	160
5.2.2 Adsorption experiment	161
5.2.3 Image analysis	161
5.3 Generation of 3-D pore network	162
5.3.1 Diffusion in a single pore	164
5.3.2 Boundary condition for pores at bottom of network	165
5.3.3 Boundary condition for the periphery pore exposed to humid air	165
5.3.4 Finite difference approximation	166
5.3.5 Mass balance in the network	168
5.3.6 Grid stability requirement	169
5.4 Results and discussion	170
5.4.1 Pore size distributions of dry banana foam	170
5.4.2 Effect of computation times and network size on accuracy of prediction of moisture content	172
5.4.3 Adsorption kinetics and validation	176

	Page
5.4.4 Graphical visualization of 3-D pore network	179
5.4.5 Comparison of 3-D network with 2-D network model on predicted moisture adsorption	183
6. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	187
6.1 Conclusions	187
6.1.1 Adsorption isotherm and isosteric heat	187
6.1.2 Continuum model	188
6.1.3 Stochastic pore network model	188
6.1.4 Texture of the banana foam mats	190
6.2 Recommendations	190
REFERENCES	191
APPENDIX	220
CURRICULUM VITE	229

LIST OF TABLES

Table	Page
2.1 Equations describing the sorption equilibrium isotherms	11
2.2 Empirical models expressing moisture diffusivity as a function of moisture content for various food materials.	23
2.3 Moisture levels in typical bakery products	46
3.1 Values of the parameters of Eqs. (3.3) and (3.4) in the GAB model (Eq. 3.1) for the dry banana foam densities.	65
3.2 Values of the parameters of Eqs. (3.3) – (3.5) in the modified-GAB model (Eq. 3.2) for the dry banana foam densities.	65
3.3 Estimated parameters of empirical models for selected conditions	81
4.1 Sensory attribute scales of banana foam mats	111
4.2 Estimated pore diffusivity for three banana foam densities at different adsorption conditions with R^2 -values above 0.96	129
4.3 Experimental self-diffusion coefficients for water as a function of the temperature from the literatures	131
4.4 Constant parameters in Eq. (4.2) for D_p at three banana foam densities obtained from the experimental conditions at relative humidity below 70% and at the temperatures of 35 - 45°C	137
4.5 Constant parameters in Eq. (4.2) for D_{eff} at three banana foam densities obtained from the experimental conditions at relative humidity below 70% and at the temperatures of 35-45°C.	137
4.6 Sensory evaluation of dry banana foam mats	156

5.1	Estimated structural parameters of pore size distributions	171
5.2	Data of 3-D network simulation for seven network sizes	174

LIST OF FIGURES

Figure	Page
2.1 Typical moisture isotherms of foods	7
2.2 Hypothetical interpretation of food isotherms	8
2.3 Diagram of a gravimetric adsorption apparatus. B, balance; P, pressure; RH, constant relative humidity; T, temperature; V, vacuum	9
2.4 Effect of temperature on relative humidity and moisture content	12
2.5 Comparison of moisture diffusivities in granular starch (AMIOCA), obtained from drying and adsorption at 60°C	19
2.6 Effect of porosity on moisture diffusivity of starch material	20
2.7 Representation of food processing operation simulation	29
2.8 The triangle <i>BGW</i> and midpoints M and reflected point R for the Nelder-Mead method	32
2.9 The triangle <i>BGW</i> and point R and extended point E	33
2.10 The contraction point C_1 or C_2 for the Nelder-Mead method	34
2.11 Shrinking the triangle toward B	35
2.12 Scanning electron micrographs of (A) raw potato and (B) raw apple	37
2.13 Large voids spaces between grains showing possible pore bodies (pore junctions) and elongated pathways connecting the pores are described as pore throats	38
2.14 3-D image of a subsurface carbonate sample (Left). Extracted 3-D pore network model of the same carbonate sample (Right)	39

Figure (Cont' s)	Page
2.15 Representations of the regular pore networks with the connectivity $Z=6$ according to the calculation of Eq. (2.49) (Assuming the f_r of a pore equal to 1)	41
2.16 Throat and pore size distributions of a simulated porous structure having 25% porosity, a $0.01\ \mu\text{m}$ minimum, $0.10\ \mu\text{m}$ median and $1\ \mu\text{m}$ maximum pore-throat diameters	43
2.17 Three-dimensional representation of a Pore-Cor unit cell exhibiting a random pore size distributions from Figure 2.16	44
2.18 Force-deformation curves for crackers at various a_w	47
3.1 Schematic diagram of laboratory dryer: 1-blower, 2-heater chamber, 3-drying chamber, 4-valve, 5-valve, 6-cover and 7-tray	52
3.2 Illustration for node positions in a banana foam mat	60
3.3 Comparison between experimental and predicted adsorptions (Eq. 3.1) for banana foam densities of (a) $0.21\ \text{g/cm}^3$, (b) $0.26\ \text{g/cm}^3$ and (c) $0.30\ \text{g/cm}^3$	66
3.4 Comparison between experimental and predicted equilibrium moisture content (Eq. 3.2) for banana foam densities of (a) $0.21\ \text{g/cm}^3$, (b) $0.26\ \text{g/cm}^3$ and (c) $0.30\ \text{g/cm}^3$	68
3.5 Influence of foam densities on the adsorption isotherm at constant temperature (a) 35°C , (b) 40°C and (c) 45°C . Values in the graph with different superscripts mean that the values are significantly different ($P < 0.05$)	70

Figure (Cont' s)	Page
3.6 Isosteric heat of sorption as function of moisture content for different foam densities (a) data estimated from GAB model (b) data estimated from modified-GAB model	74
3.7 Sorption entropy as function of moisture content for different foam densities: (a) data estimated from GAB model (b) data estimated from modified-GAB model	75
3.8 SEM micrographs of dry banana foam mats at different initial foam densities (Baseline is 1 mm)	77
3.9 Pore size distribution of dry banana foam at various densities	78
3.10 Validation of the experimental and estimated moisture uptakes and the variation of effective diffusivity with moisture content of two selected example cases: 40°C, 66 %RH at left-hand side and 35°C, 83 %RH at right-hand side	80
3.11 Effect of values of relative humidity on moisture adsorption kinetics at 35°C for the foam density of 0.21 g/cm ³ . Dash lines are the predictions; symbols represent experimental data	83
3.12 Variation of effective diffusivity with moisture content at various relative humidities for the foam density of 0.21, 0.26 and 0.30 g/cm ³	84
3.13 Effect of temperatures on the effective moisture diffusivity	92
3.14 Effect of initial foam densities on effective diffusivity at the temperature of 35°C, relative humidities of 32% and 50%	93
3.15 The effect of adsorbed moisture on force-deformation curve for foam density of 0.26 g/cm ³	95

Figure (Cont' s)	Page
3.16 Variation in force-deformation curve during compression test at various moisture content levels for foam density of 0.21 g/cm^3	96
3.17 Effect of moisture content and initial foam densities on (a) number of peaks (b) initial slope and (c) maximum force of the banana foam mats: the same letter at the over bars means insignificant difference at $P < 0.05$.	98
3.18 Effect of storage time on initial slope of the banana foam mats at various temperatures: the same letter at the over bars of each figure means insignificant difference at $P < 0.05$	101
3.19 Effect of storage time on maximum force of the banana foam mats at various temperatures: the same letter at the over bars of each figure means insignificant difference at $P < 0.05$	102
3.20 Effect of storage time on number of peak of the banana foam mats at various temperatures: the same letter at the over bars of each figure means insignificant difference at $P < 0.05$	103
4.1 Illustration of a simple 2-D stochastic pore network and boundary conditions	113
4.2 Effect of temperatures on moisture adsorption kinetics at foam density of 0.21 g/cm^3	120
4.3 Effect of relative humidities on moisture adsorption kinetics at 40°C for the foam density of 0.21 g/cm^3	121
4.4 Effect of banana foam densities on moisture adsorption kinetics at 40°C , 31% and 47% RH	122

Figure (Cont' s)	Page
4.5 (a)-(c) SEM micrographs of dried banana foam mats at different initial foam densities and binary images (d)-(f). The baseline is 1 mm	124
4.6 Pore size distributions of dried banana foam at different densities	125
4.7 Pore diameter distributions at different cross-section areas of banana foam mat (foam density of 0.26 g/cm^3)	126
4.8 Effects of temperatures and relative humidities on the pore diffusivities for the banana foam density of 0.21 g/cm^3 ; the same letter means insignificant difference at $P < 0.05$	128
4.9 Effect of initial foam densities on the pore diffusivities at different relative humidities and temperatures of (a) 40°C and (b) 45°C ; the same letter means insignificant difference at $P < 0.05$	134
4.10 Comparison between pore diffusivities and effective diffusivities of banana foam mat at 40°C and relative humidities for foam density of 0.26 g/cm^3	135
4.11 Visualization of moisture contents in pores of banana foam at temperature of 35°C , initial foam density of 0.21 g/cm^3 and relative humidity of 50%	140
4.12 Illustration of 2-D stochastic pore network (a) single density, (b) and (c) designed dual-density network	142
4.13 SEM micrographs of single and dual-density of dried banana foam mats (The baseline is 1 mm)	144
4.14 Moisture adsorption kinetics at 35°C and 67% RH for the single density and dual-density of the banana foams. Dash lines are simulation curves	147

Figure (Cont' s)	Page
4.15 Visualization of moisture contents in pores of banana foam mats at 3 h of adsorption time. Pore diameter scale 0.35: 1	150
4.16 Variation in force-deformation curve during compression test (a) and the textural parameters (b)-(d) at initial moisture content of dried banana foams (0.038 kg/kg d.b.); values in the graph with different superscripts mean that the values are significantly different ($P < 0.05$)	153
5.1 Schematic diagram of a regular 3-D pore network and boundary condition at each side	163
5.2 Pore size distributions of two banana foam densities	171
5.3 Effect of network size on adsorption kinetics at simulated condition of 35°C, 67% RH, $\rho = 0.30 \text{ g/cm}^3$ and $D_p = 1.102 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	173
5.4 Effect of computation times on relative error value at 1 h of adsorption time; the simulated condition of 35°C, 67% RH, $\rho = 0.30 \text{ g/cm}^3$ and the same D_p used in simulation is $1.102 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	175
5.5 Effect of foam densities on adsorption kinetics at 40°C, 66% RH, $D_p = 3.112 \times 10^{-9}$ and $2.479 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ for banana foam densities of 0.26 and $.30 \text{ g/cm}^3$, respectively. Dash lines are the predictions; symbols represent experimental data	177
5.6 Effect of temperature on adsorption kinetics at foam density of 0.30 g/cm^3 and 66% RH, $D_p = 1.102 \times 10^{-9}$ and $2.479 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ for temperature of 35 and 40°C, respectively. Dash lines represent the predicted values; symbols represent experimental data	178

Figure (Cont' s)	Page
5.7 Visualization of moisture content at various adsorption time for the condition of 40°C, 66% RH and $\rho = 0.26 \text{ g/cm}^3$ (a half network size of $15 \times 15 \times 15$ with pore diameter scale 2.2:1). The various colours correspond to different moisture concentrations as shown in the colour scale	180
5.8 Visualization of moisture distribution in pore networks (size of $15 \times 15 \times 15$) during held average moisture content of 0.07 kg/kg d.b. (Banana foam loss all crispy texture at this moisture content level)	182
5.9 Comparison of 3-D network with 2-D network model in predicted adsorption kinetics ($T = 40^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 66\%$ and $\rho = 0.26 \text{ g/cm}^3$). Lines represent predicted data; symbols represent experimental data	184
5.10 Comparison of 3-D network with 2-D network model on moisture distributions at 10 min of adsorption time ($T = 40^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 66\%$ and $\rho = 0.26 \text{ g/cm}^3$)	186

SYMBOLS

a	=	constant parameter
a_w	=	water activity
b	=	constant parameter
c	=	constant parameter
c_1	=	constant parameter
c_2	=	constant parameter
C	=	constant parameter
C_0	=	constant parameter
d	=	pore diameter, m
D_{eff}	=	effective moisture diffusivity, m/s^2
D_0	=	constant parameter
D_p	=	apparent pore diffusivity, m/s^2
D_x	=	constant parameter
e_1	=	constant parameter
e_2	=	constant parameter
E	=	local relative error, %
E_a	=	activation energy, kJ/mol
ERH	=	equilibrium relative humidity
$f(d)$	=	gamma probability density function
G	=	free Gibbs energy
h_m	=	convective mass transfer coefficient, m/s
H_C	=	constant parameter

H_k	= constant parameter
H_{k_2}	= constant parameter
k	= constant parameter
k_0	= constant parameter
k_2	= constant parameter
k'_2	= constant parameter
K	= constant parameter
L	= thickness of material, m
L_{eq}	= equivalent length of the diffusion path
m_1	= constant parameter
m_2	= constant parameter
M	= moisture content, kg/kg d.b.
MW	= molecular weight
n_1	= constant parameter
n_2	= constant parameter
N	= number of data points
NP	= number of pores in the network
NL	= number of layer
N_x	= number of pore junctions in the x-axis
N_y	= number of pore junctions in the y-axis
N_z	= number of pore junctions in the z-axis
p	= partial pressure of water vapor, atm
p_0	= vapour pressure of pure water, atm
P_p	= partial pressure

P	=	number of experimental data
q_{st}	=	net isosteric heat of sorption, kJ/mol
Q_{ij}	=	moisture adsorption rate, kg/s
Q_{st}	=	isosteric heat of sorption, kJ/mol
r	=	pore radius, m
R	=	universal gas constant, kJ/mol·K
Re	=	renold number
RH	=	relative humidity, decimal
$RMSE$	=	root mean square error
Sc	=	schmidt number
Sh	=	sherwood number
ΔS	=	differential entropy
t	=	time, s
T	=	absolute temperature, K
Δt	=	time increment, s
u	=	coordinate for a pore junction in x-axis
v	=	coordinate for a pore junction in y-axis
V	=	molecular volume
x	=	distance along the diffusion path, m
Δx	=	distance between adjacent nodes, m
Z	=	number of pores in the network

Subscripts

e	=	equilibrium
eff	=	effective
exp	=	experimental
H	=	number of columns of the pores
i	=	the position of the pores in x-axis
in	=	initial
j	=	the position of the pores in y-axis
m	=	monolayer
n	=	nodal position along the pore axis
p	=	indexes of the present time
pre	=	prediction
s	=	surface
V	=	number of rows of the pores

Greek Symbols

λ	=	latent heat of pure water, kJ/mol
γ	=	ratio of $h_m \Delta \psi / D_p$
ρ	=	banana foam densities, kg/m ³
ψ	=	distance along the pore length, m
α	=	ratio of $D_p \Delta t / \Delta \psi^2$
Δ	=	spacing between each node, m
Γ	=	gamma function
Σ	=	over all
μ	=	viscosity
ϕ	=	association parameter of the solvent
τ	=	tortuosity
ε	=	porosity
Ω	=	positive roots of the first bessel function of order zero