

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E47358



THIN LAYER CHILI DRYING USING CONTINUOUS FLUIDIZED
BED TECHNIQUE

MR. SUPAREK CHARMOŃKOLPRADIT

A THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
KHON KAEN UNIVERSITY

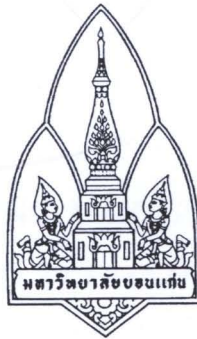
2011

600254905

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E47358



**THIN LAYER CHILI DRYING USING CONTINUOUS FLUIDIZED
BED TECHNIQUE**



MR.SUPARERK CHARMONGKOLPRADIT

**A THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
KHON KAEN UNIVERSITY**

2011

**THIN LAYER CHILI DRYING USING CONTINUOUS FLUIDIZED
BED TECHNIQUE**

MR.SUPARERK CHARMOONGKOLPRADIT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY**

2011



THESIS APPROVAL
KHON KAEN UNIVERSITY
FOR
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Thesis Title: Thin Layer Chili Drying Using Continuous Fluidized Bed Technique

Author: Mr. Suparek Charmongkolpradit

Thesis Examination Committee:

Lect. Dr. Narong Srihajong	Chairperson
Asst. Prof. Dr. Seree Wongpichet	Member
Assoc. Prof. Dr. Kittichai Triratanasirichai	Member

Thesis Advisor:

.....Advisor

(Assoc. Prof. Dr. Kittichai Triratanasirichai)

.....
(Assoc. Prof. Dr. Lampang Manmart)

Dean, Graduate School

.....
(Assoc. Prof. Dr. Somnuk Theerakulpisut)

Dean, Faculty of Engineering

Copyright of Khon Kaen University

ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์. 2554. การอบแห้งพริกแบบชั้นบางโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด
แบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ.ดร.กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย

บทคัดย่อ

E 47358

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมพืชเศรษฐกิจหลักประกอบไปด้วย ข้าว ยางพารา มัน
สำปะหลัง อ้อย ฯลฯ นอกจากพืชเศรษฐกิจเหล่านี้ ยังมีพืชผักที่ถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจเหมือนกันซึ่ง
ก็คือพริกซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของคนไทย และสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรเป็น
อย่างมาก พริกเป็นพืชที่มีคุณลักษณะเฉพาะคือสารให้ความเผ็ดซึ่งเรียกว่า สารแคปไซซิน ในภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือสามารถเพาะปลูกพริกได้ทั้งปี โดยเฉพาะในฤดูหนาวและฤดูฝน ซึ่งในช่วง
ฤดูกาลนี้มักจะมีปัญหาพริกล้นตลาด ราคาตกต่ำ เกิดการเน่าเสีย ความสะอาด เนื่องจากมีความชื้นที่
สูง และความไม่คงที่ของราคาของพริกสด ซึ่งแตกต่างจากพริกแห้งซึ่งมีราคาค่อนข้างคงที่ ดังนั้น
การทำแห้งพริกจึงเป็นวิธีที่นำมาแก้ปัญหานี้ โดยวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันก็คือการตากแห้งโดยใช้
แสงอาทิตย์ ตากบนลานกว้าง ๆ แต่วิธีการนี้จะมีปัญหาเรื่องการควบคุมคุณภาพ ความชื้น ระยะเวลา
ในการอบแห้งค่อนข้างนานปกติใช้เวลาประมาณ 12-15 วันขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ เพื่อแก้ไขปัญห
นี้ผู้วิจัยจึงได้หาวิธีการเพื่อลดความชื้นพริกในระยะเวลาอันสั้น จึงได้เสนอวิธีการอบแห้งโดยใช้
เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพในการลดความชื้น มีวิธีการทำงานที่
ง่าย ราคาไม่สูง ควบคุมการทำงานง่าย มีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องน้อย และยังมีมุ่งเน้นในการศึกษาการ
อบแห้งพริกที่มีความต่อเนื่อง โดยที่ไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องอบแห้ง

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพริกโดยใช้เทคนิค
การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งพริก และการพัฒนา
แบบจำลองการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษาคือพริกพันธุ์จินดา ควบคุม
อุณหภูมิการอบแห้ง 6 ระดับอุณหภูมิคือ 50 60 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส ความเร็วของ
ลมร้อน 3 ระดับคือ 4 5 และ 6 เมตรต่อวินาที เครื่องอบแห้งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ชุด
กำเนิดลมร้อน ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ และ ห้องอบแห้ง จากการศึกษาพบว่าเวลาในการอบแห้งลดลง
เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งและความเร็วของลมร้อนมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ความเร็วของลมร้อนมีผล

E47358

ต่อการเคลื่อนที่ของพริกที่อยู่ภายในห้องอบแห้ง และการเคลื่อนที่ออกจากห้องอบแห้งแบบต่อเนื่อง ในการศึกษานี้ได้จุดที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ อุณหภูมิการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อน 5 เมตรต่อวินาที เวลาที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 3 ชั่วโมง ความชื้นต่ำกว่า 13% มาตรฐานเปียก โดยลักษณะทางกายภาพของพริกมีสีแดงสด ผิวมันวาว ไม่มีกลิ่นไหม้ มีความเหนียวเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของปริมาณสารแคปไซซิน แต่ทว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารแคปไซซินระหว่างพริกสดกับพริกที่ผ่านการอบแห้ง ผลคือพริกที่ผ่านการอบแห้งมีปริมาณสารแคปไซซินที่มากกว่า และยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนเพิ่มขึ้นอัตราการใช้พลังงานในการอบแห้งนั้นมีค่าน้อยลงเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลง

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นแบบจำลองเอ็มไพริกัลแบบชั้นบางโดยพัฒนามาจากแบบจำลองของ Henderson กับ Aghabaslo และคณะ โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ใช้ค่าทางสถิติเพื่อหาค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วย คัดชนีแสดงค่าการตัดสินใจ(R^2) คัดชนีปรับแก้ค่าการตัดสินใจ(Adj. R^2) และค่ารวมของสัมประสิทธิ์ความผิดพลาด(SSE) ซึ่งจะได้ในรูปแบบการ

$$MR = ae^{\left(\frac{-kt}{1+bt}\right)}$$

โดยผลที่ได้จากสมการนี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของพริกที่ผ่านการอบแห้ง และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของการอบแห้ง ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองได้เป็นอย่างดี และในการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งนั้นคือตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของความชื้นและเวลาในการอบแห้งพริก

Suparerak Charmongkolpradit. 2011. **Thin Layer Chili Drying Using Continuous Fluidized Bed Technique**. Doctor of Philosophy Thesis in Mechanical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Assoc.Prof. Dr. Kittichai Triratanasirichai

ABSTRACT

E47358

Thailand is an agricultural country consisting of the following cash crops; rice, sugarcane, latex rubber and cassava etc. In addition to these crops, vegetables are also considered one of the cash crops. For instance, chili are integrated into the way of life of Thai people and also creating huge amount of income to the farmers. A unique characteristic of chili is the spiciness through the release of a substance called Capsaicin. Chili can be grown throughout the year in the northeast of Thailand especially in the rainy season and winter season. During these periods, there's normally an over supplied of chili to the market, thus the price of chili down and unstable price. A lot of the chili were rotten due to the high humidity. This circumstance is different from dried chili which have a more stable price. Drying the chili-peppers is therefore one of the a solution of unstable market price of chili. Practically the farmer spreading the chili on the ground in the open area under in order to dry chili which caused some difficulty on controlling the humidity, and spent about 12-15 days depending on the weather. Many research has been done on drying chili "fluidized bed" technique; is one of effective technique to reduce the humidity of chili with short period, low cost, easy to control, consist of very few equipments and also focusing on the non-stop operation of the machine.

The objective of this study was to design and construction the chili drying machine, using the continuous fluidized bed dryer, study the characteristic of the chili: Jinda variety; which is the most popular variety in Thailand and develop the model in drying the chili through the empirical thin layer model. The experiments were tested in 6 levels of temperature; (50, 60, 70, 80, 90 and 100°C) and 3 levels of drying air velocity (4, 5 and 6 m sec⁻¹). The drying machine consists of 3 main parts; the blower,

E47358

the heating unit set and the drying chamber. It was found in the experiment that the drying time decreased when the drying temperature and drying air velocity increase. Drying air velocity affected the drift and continuously motion of chili particle from dryer chamber. The appropriate drying temperature is 90 °C, the velocity at 5 m sec⁻¹, in the 3 hours of drying process with the moisture content of 13% on wet basis which below the moisture content standard resulting in maintaining the bright red color [of the chili], no burnt smell. This study also develops the mathematical empirical thin layer model based on the model developed by Henderson's model and Aghabaslo et al.,'s model which consist of the coefficient of determination(R²), adjusted coefficient of determination(Adj.R²) and summation of square error(SSE) using non-linear regression analysis, which results in the following:

$$MR = ae^{\left(\frac{-kt}{1+bt}\right)}$$

The model can clearly explain the changes of moisture ratio in the chili through the drying process and the trend in the changes of diverting the energy to the drying process with sufficient accuracy and it can also be concluded that the temperature in the drying process is the significant factor to the decrease of the moisture content and the time in the drying process.

Goodness Portion the Present Thesis is Dedicated

For my Parents and Entire Teaching Staff

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my deepest and sincere gratitude to my advisor, Associate Professor Dr.Kittichai Triratanasirichai for his kindness in providing an opportunity to be his advisee. I am also appreciated for his valuable supervision, suggestions, encouragement, supporting, guidance and criticism throughout the course of my study.

I would like to express my greatest appreciation and sincere gratitude to committee, Lecturer Dr.Narong Srihajong and Assistant Professor Dr.Seree Wongpichet for helpful suggestion. Sincere thanks and appreciation are also due to my qualify examination committee, Lecturer Dr.Narong Srihajong and Assistant Professor Dr. Denpong Soodphakdee for their helpful suggestion. I am also grateful to Lecturer Dr.Sura Tundee for his advice on the choice of name of publication journals used in this project. Appreciation is also expressed to Miss Ratsawadee Seechinda, Lecturer of English for International Communication Program, Khon Kaen Campus for her helpful English language proof. My special additional thanks are also to all Lecturers, Students and everybody in Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangkala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus for place of experimental, equipments set-up and data analysis and all helpful. I would like to thanks Dr.Wathanyu Nedsanga, Mr.Tossapol Jangnoi, Mr.Pisan Moonumca and Mr.Suchart Nachaisit for all supports.

This study supported by Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand and Rajamangkala University of Technology Isan[RMUTI], Khon Kaen Campus, Thailand.

Finally, I would like to express my sincere gratitude and appreciation to my parents, my father, Mr.Sukon, my mother, Mrs.Sulikhit, my brother, Mr.Worakarn and my sister, Miss Rachada Charmongkolpradit who gave me a chance to study and have strongly supported me.

Suparek Charmongkolpradit

TABLE OF CONTENT

	Page
ABSTRACT(IN THAI)	i
ABSTRACT(IN ENGLISH)	iii
DEDICATION	v
ACKNOWLEDGEMENTS	vi
LIST OF TABLES	xi
LIST OF FIGURES	xiii
LIST OF ABBEVIATIONS	xx
CHAPTER I INTRODUCTION	1
1. Rationale and background	1
2. Objective of the study	4
3. Scope and limitation of the study	4
4. Anticipated outcomes	5
CHAPTER II LITERATURE REVIEW AND THEORY	6
1. Introduction	6
2. Prior works in drying	6
2.1 Moisture content	9
2.2 Drying characteristics	10
2.3 Thermodynamic properties of drying air	10
2.4 Psychometric chart and drying process	12
3. Drying kinetics	18
4. Chili or red pepper drying	19
5. Thin-layer drying of grain and crops	21
6. Prior works in fluidized bed drying	21
7. Theory of fluidized bed technique	24
8. Heat and Mass transfer in fluidized bed drying process	25
CHAPTER III RESEARCH METHODOLOGY	27
1. The proceeding of the study	27
1.1 Procedures of methodology	27

TABLE OF CONTENT(Cont.)

	Page
1.2 The experiment process for study drying characteristics of dried chili	28
1.3 The experiment process for study effect of bed thickness	29
1.4 Experimental set-up	30
1.5 Materials	31
1.6 Equipments	32
2. Compare the changing of moisture content from experiments and empirical mathematical model	38
3. Mathematical model	38
3.1 Basic parameters of continuous fluidized bed drying	38
3.2 Energy conservation of drying chamber	41
4. Energy consumption of system	49
4.1 Calculation the temperature of air before entrance to blower	49
4.2 Temperature rise of air within blower	50
4.3 Energy consumption of heating unit	50
4.4 Electrical energy consumption of blower	51
5. The procedure of comparison energy consumption between experiment and empirical mathematical model	52
6. Data analysis and computer program simulation	53
CHAPTER IV RESULTS AND DISSCUSSION	55
1. Introduction	55
2. Results of chili drying on traditional method	55
3. Results of drying temperature and velocity of hot air that effect to the weight	57
4. Results of drying temperature and velocity of hot air that effect to the change of moisture content	59

TABLE OF CONTENT(Cont.)

	Page
5. Results of drying temperature and velocity of hot air that effect to the change of moisture ratio	62
6. Results of drying temperature and velocity of hot air that effect to the change of moisture ratio at bed thickness of 2, 3, 4 and 5 cm	65
7. Characteristics of chili after drying	67
7.1 Physical characteristics of dried chili at various temperature	68
7.2 Physical characteristics of dried chili at different hot air velocity	70
7.3 The results of experiment and central laboratory (Thailand)Ltd., Khon Kaen branch	71
CHAPTER V THIN-LAYER DRYING EMPIRICAL MATHEMATICAL MODELING DEVELOPMENT	73
1. Mathematical models and new model development used to analyze the relationship of moisture ratio with drying time	73
2. Changes the moisture ratio between the experimental with new model	85
3. Comparison of experimental results with results from computer program	87
3.1 Comparison of air temperature at the drying out of the chamber with drying temperature	87
3.2 Electrical energy consumption at blower	89
3.3 Total rate of energy consumption	92

TABLE OF CONTENT(Cont.)

	Page
CHAPTER VI CONCLUSION	93
1. Drying characteristic of chili	93
2. Development empirical mathematical model of thin-layer drying	94
3. Rate of energy consumption	94
4. Suggestion for the future work	95
REFERENCES	96
APPENDICES	102
Appendix A Figures of Dryer Machine	103
Appendix B Simulation Program	108
Appendix C Diffusion coefficient and Activation Energy	116
Appendix D Results of R^2 , Adj. R^2 , SSE and SE	122
Appendix E Results of moisture ratio with bed thickness	132
Appendix F Design procedure	138
Appendix G Figures of dried chili and results of energy consumption from experiments and simulation	148
Appendix H Research publication	153
VITAE	159

LIST OF TABLES

		Page
Table 4.1	Results of drying temperature with drying time(close to standard moisture content 13% wet basis)	65
Table 4.2	The results from the experiment and central laboratory (Thailand) Ltd., Khon Kaen branch	71
Table 5.1	Shows the empirical constant, R^2 , Adj. R^2 and SSE of the six model at drying air velocity of 5 m/s	74
Table 5.2	Shows the empirical constant R^2 , Adj. R^2 and SSE of the New model	77
Table C.1	The moisture diffusion coefficient at the temperature range 50 °C to 100 °C and velocity of hot air 4 to 6 m/s	119
Table C.2	Equations for moisture diffusion coefficients of Arrhenius	120
Table C.3	The activation energy at the temperature range 50 °C to 100 °C and velocity of hot air 4 to 6 m/s	120
Table D.1	Shows the empirical constant, R^2 , Adj. R^2 and SSE of the six model at drying air velocity of 4 m/s	123
Table D.2	Shows the empirical constant, R^2 , Adj. R^2 and SSE of the six model at drying air velocity of 6 m/s	125
Table D.3	The results of standard error of Aghabaslo model with Logarithmic model using non-linear regression analysis	127
Table D.4	The results of standard error of Aghabaslo model with Lewis model using non-linear regression analysis	128
Table D.5	The results of standard error of Aghabaslo model with Henderson model using non-linear regression analysis	128
Table D.6	The results of standard error of Aghabaslo model with Wang and Singh model using non-linear regression analysis	129
Table D.7	The results of standard error of Aghabaslo model with Two-Term model using non-linear regression analysis	130

LIST OF TABLES(Cont.)

	Page
Table D.8 The results of R-square, Adjust R-square and SSE of from correlation polynomial equation anslysis (Aghabaslo et al., model with Henderson's model)	131
Table G.1 Results of energy consumption from experiments and simulation	151

LIST OF FIGURES

		Page
Figure 2.1	Representation on the psychometric chart of the sensible heating and cooling process of moist air	13
Figure 2.2	Representation on the psychometric chart of the solid drying adiabatically	14
Figure 3.1	Schematic of the dryer	30
Figure 3.2	Shows air flow direction and point of measure temperature	31
Figure 3.3	Anemometer, Digicon type(DA-45)	32
Figure 3.4	Inverter, Hitachi SJ200 type, 3 HP, 380 Volt and 0 – 50 Hz	33
Figure 3.5	Thermocouples (type K)	33
Figure 3.6	Temperature control(Shinko, MCD-130-R/E, Japan)	34
Figure 3.7	Humidity instrument (Digicon, T-126TH-S, Japan)	34
Figure 3.8	Digital balance(Ohaus, Adventurer-ARC210, USA)	35
Figure 3.9	The temperature recorder (Hioki type, 8422-51)	35
Figure 3.10	Kilowatt hour meter, Mitsubishi type	36
Figure 3.11	Clip-Amp, Power wieter type GWM-009	36
Figure 3.12	Blower, Vent type, TB30 Series, 3 HP, 380 V	37
Figure 3.13	Prototype of continuous fluidized-bed dryer	37
Figure 3.14	Schematic of diagram of a fluidized bed dryer	39
Figure 3.15	Control volume of drying chamber(CV1)	44
Figure 3.16	Control volume of the i^{th} bed layer	45
Figure 3.17	Showed control volume of air recycle tube(CV2)	46
Figure 3.18	Control volume (CV3)	49
Figure 3.19	Control volume (CV4)	50
Figure 3.20	Control volume (CV5)	51
Figure 3.21	Simulation flow chart of continuous fluidized bed drying	54
Figure 4.1	The change of chili weight on the Sun drying	56
Figure 4.2	The change of moisture content on the Sun drying(%wet basis)	56

LIST OF FIGURES(Cont.)

		Page
Figure 4.3	The change of moisture content ratio on the Sun drying(%wet basis)	57
Figure 4.4	The change of weight with drying time on hot air velocity of 4 m/s	57
Figure 4.5	The change of weight with drying time on hot air velocity of 5 m/s	58
Figure 4.6	The change of weight with drying time on hot air velocity of 6 m/s	58
Figure 4.7	The change of moisture content with drying time on hot air velocity of 4 m/s	59
Figure 4.8	The change of moisture content with drying time on hot air velocity of 5 m/s	60
Figure 4.9	The change of moisture content with drying time on hot air velocity of 6 m/s	61
Figure 4.10	The change of Moisture Ratio(MR) with drying time(h) on drying air velocity of 4 m/s	62
Figure 4.11	The change of Moisture Ratio(MR) with drying time(h) on drying air velocity of 5 m/s	63
Figure 4.12	The change of Moisture Ratio(MR) with drying time(h) on drying air velocity of 6 m/s	64
Figure 4.13	The change of moisture content with drying time on hot air velocity of 4 m/s at bed thickness of 2, 3,4 and 5 cm	66
Figure 4.14	The change of moisture content with drying time on hot air velocity of 5 m/s at bed thickness of 2, 3,4 and 5 cm	66
Figure 4.15	The change of moisture content with drying time on hot air velocity of 6 m/s at bed thickness of 2, 3,4 and 5 cm	67
Figure 4.16	Characteristics of chili after drying at 50 °C	68

LIST OF FIGURES(Cont.)

		Page
Figure 4.17	Characteristics of chili after drying at 60 °C	68
Figure 4.18	Characteristics of chili after drying at 70 °C	68
Figure 4.19	Characteristics of chili after drying at 80 °C	68
Figure 4.20	Characteristics of chili after drying at 90 °C	69
Figure 4.21	Characteristics of chili after drying at 100 °C	69
Figure 4.22	Characteristics of chili after drying at 90 °C and hot air velocity of 4 m/s	69
Figure 4.23	Characteristics of chili after drying at 90 °C and hot air velocity of 5 m/s	70
Figure 4.24	Characteristics of chili after drying at 90 °C and hot air velocity of 6 m/s	70
Figure 5.1	Shows the relationship between the moisture ratio from the experiment and prediction—compared to the drying time of drying temperature of 50 °C and velocity of hot air of 5 m/s	80
Figure 5.2	Shows the relationship between the ratio of moisture from the experiment and prediction—compared to the time of drying at 60 °C and velocity of hot air 5 m/s	81
Figure 5.3	Shows the relationship between the ratio of moisture from the experiment and prediction—compared to the time of drying at 70 °C and velocity of hot air 5 m/s	82
Figure 5.4	Shows the relationship between the ratio of moisture from the experiment and prediction—compared to the time of drying at 80 °C and velocity of hot air 5 m/s	83
Figure 5.5	Shows the relationship between the ratio of moisture from the experiment and prediction—compared to the time of drying at 90 °C and velocity of hot air 5 m/s	84

LIST OF FIGURES(Cont.)

		Page
Figure 5.6	Shows the relationship between the ratio of moisture from the experiment and prediction—compared to the time of drying at 100 °C and velocity of hot air 5 m/s	85
Figure 5.7	Shows the relation between moisture versus drying time of experiments data with new model at velocity of hot air of 4 m/s	86
Figure 5.8	Shows the relation between moisture versus drying time of experiments data with new model at velocity of hot air of 5 m/s	86
Figure 5.9	Shows the relation between moisture versus drying time of experiments data with new model at velocity of hot air of 6 m/s	87
Figure 5.10	Comparison chart where the exit temperature from the drying chamber (T_{f1}) and drying temperature (T_{mix}) between the experimental results with results from simulations	88
Figure 5.11	Graph comparing the air circulation temperature from the experimental results with simulation results	88
Figure 5.12	Graph comparing the temperature of the air temperature where the exit from blower between the experimental results with simulation results	89
Figure 5.13	The graph shows the rate of electrical energy consumption at blower from experimental results and simulation model	90
Figure 5.14	Graph comparing the temperature of the air temperature where the exit from blower between the experimental results with simulation results	91
Figure 5.15	The graph shows the total energy consumption rate of drying from the experimental with simulation	92

LIST OF FIGURES(Cont.)

		Page
Figure A.1	Shows front side of dryer machine	104
Figure A.2	Shows left and right side of dryer machine	105
Figure A.3	Shows top side of dryer machine	106
Figure A.4	Shows isometric of dryer machine	107
Figure C.1	The effective moisture diffusivity on drying temperature of 50, 60, 70, 80, 90 and 100°C and drying air velocity of 4, 5 and 6 m/s	119
Figure C.2	The Arrhenius relationship between the effective diffusivities and temperature on drying air velocity of 4 m/s	120
Figure C.3	The Arrhenius relationship between the effective diffusivities and temperature on drying air velocity of 5 m/s	121
Figure C.4	The Arrhenius relationship between the effective diffusivities and temperature on drying air velocity of 6 m/s	121
Figure E.1	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 4 m/s at bed thickness of 2, 3,4 and 5 cm	133
Figure E.2	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 5 m/s at bed thickness of 2, 3,4 and 5 cm	133
Figure E.3	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 6 m/s at bed thickness of 2, 3,4 and 5 cm	133
Figure E.4	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 4 m/s at bed thickness of 2 cm	134
Figure E.5	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 5 m/s at bed thickness of 2 cm	134
Figure E.6	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 6 m/s at bed thickness of 2 cm	134
Figure E.7	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 4 m/s at bed thickness of 3 cm	135

LIST OF FIGURES(Cont.)

		Page
Figure E.8	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 5 m/s at bed thickness of 3 cm	135
Figure E.9	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 6 m/s at bed thickness of 3 cm	135
Figure E.10	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 4 m/s at bed thickness of 4 cm	136
Figure E.11	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 5 m/s at bed thickness of 4 cm	136
Figure E.12	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 6 m/s at bed thickness of 4 cm	136
Figure E.13	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 4 m/s at bed thickness of 5 cm	137
Figure E.14	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 5 m/s at bed thickness of 5 cm	137
Figure E.15	The change of moisture ratio with drying time on hot air velocity of 6 m/s at bed thickness of 5 cm	137
Figure F.1	Chili container	142
Figure F.2	Shows the chili weighing	143
Figure F.3	Shows the chili and water weighing	143
Figure G.1	Physical characteristics of chili after drying at 50 °C	149
Figure G.2	Physical characteristics of chili after drying at 60 °C	149
Figure G.3	Physical characteristics of chili after drying at 70 °C	149
Figure G.4	Physical characteristics of chili after drying at 80 °C	149
Figure G.5	Physical characteristics of chili after drying at 90 °C	149
Figure G.6	Physical characteristics of chili after drying at 70 °C	149
Figure G.7	Physical characteristics of chili after drying at 50 °C	150
Figure G.8	Physical characteristics of chili after drying at 50 °C	150

LIST OF FIGURES(Cont.)

		Page
Figure G.9	Physical characteristics of chili after drying at 70 °C	150
Figure G.10	Physical characteristics of chili after drying at 80 °C	150
Figure G.11	Physical characteristics of chili after drying at 90 °C	150
Figure G.12	Physical characteristics of chili after drying at 100 °C	150

LIST OF ABBREVIATIONS

Alphabetical

V	velocity of air	m/s
F	feed rate of chili,	kg/min
RC	fraction of recycled air	decimal
H_i	high of bed layer	m
m_{mix}	air mass flow rate	kg/min
T_{mix}	mixing air temperature before inlet to bed layer	°C
T_{WB}	wet bulb temperature of surrounding	°C
W_i	inlet humidity ratio of air	kg-water-dry air
M_{in}	initial moisture content of fresh chili	decimal on wet basis,
τ	mean residence time	min
t_i	time used for moving from the i^{th} layer to the $(i+1)$ layer	min
m_{mixi}	air mass flow rate at the i^{th} layer	kg/s
h_{p_i}	dry mass of chili at the i^{th} layer	kg
W_{fi}	outlet humidity ratio of air	kg-water-dry air
T_{fi}	air temperature from i^{th} layer layer	°C
M_{fi}	average moisture content at time = $t + \Delta t$	decimal on wet basis
i	bed layer	
n	number of layer for chili	
W_{fi}	humidity ratio of air after drying	kg-water/dry air

LIST OF ABBREVIATIONS(Cont.)

T_{fl}	air temperature after drying	$^{\circ}\text{C}$
W_{mix}	moisture content ratio before drying	$\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
T_x	mixing air temperature before entrance blower	$^{\circ}\text{C}$
T_b	air temperature exit from blower	$^{\circ}\text{C}$
Q_h	heat consumption rate	kW
W_s	electricity energy consumption from blower	kWh
ΔE	total energy consumption rate	kWh

Subscripts

a	air
abs	absolute
di	in dryer
db	dry bulk and dry basis
eq	equilibrium
in	initial
o	outside
sat	saturation condition
v	vapor
w	water
wb	wet bulk and wet basis