

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกเมล็ดยาว

นายสมชาย วงศ์วิเศษ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2532

ISBN 974-576-696-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016018

i 10302001

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR PREDICTING
THE THIN LAYER DRYING RATE OF LONG GRAIN ROUGH RICE

Mr.Somchai Wongwises

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering
Department of Mechanical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University

1989

Dissertation Title : DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS
FOR PREDICTING THE THIN LAYER DRYING
RATE OF LONG GRAIN ROUGH RICE

By : SOMCHAI WONGWISES

Department : MECHANICAL ENGINEERING

Dissertation Advisor : ASSO. PROF.MANIT THONGPRASERT,PH.D.

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in
Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctoral Degree.

Thavorn Vajrabhaya
..... Dean of Graduate School
(PROFESSOR THAVORN VAJRABHAYA,PH.D)

Dissertation Committee

Variddhi Ungbhakorn
..... Chairman
(PROFESSOR VARIDDHI UNGBHAKORN,PH.D)

M. Thongprasert
..... Dissertation Advisor
(ASSO.PROF.MANIT THONGPRASERT,PH.D)

P. Wibulswas
..... Member
(PROFESSOR PREEDA WIBULSWAS,PH.D)

Wittaya Yongcharoen
..... Member
(ASSO.PROF.WITTAYA YONGCHAROEN,PH.D)

Somsri Chongrungsreong
..... Member
(ASSO.SOMSRI CHONGRUNGREONG,PH.D)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

สมชาย วงศ์วิเศษ : การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกเมล็ดยาว (DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR PREDICTING THE THIN LAYER DRYING RATE OF LONG GRAIN ROUGH RICE)

อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ, 212 หน้า.

ข้าว เป็นพืชผลทางการ เกษตรที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทย ข้าวมีความสำคัญต่อ เศรษฐกิจเพราะใช้ในการบริโภคและเป็นสินค้าส่งออกหลัก ข้าวก็เหมือนกับพืชผลทางการ เกษตรชนิดอื่นที่ต้องลดความชื้นลงหลังการ เก็บเกี่ยว เพราะการที่ข้าวมีความชื้นสูงเกินไปจะทำให้ข้าวมี อุณหภูมิสูงและเป็นพันธุ์ การวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งข้าวจึงเป็นสิ่งดึงดูดใจที่ควรจะทำ เพื่อทำการ อบแห้งและเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบแห้งชั้นบาง หลังจากนั้นจึงทำการ เก็บข้อมูล อัตราการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกเมล็ดยาว (กข7) ภายใต้สภาวะอากาศคงที่ตัวแปรการทดลอง ประกอบด้วย ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) อุณหภูมิของ อากาศที่ใช้ออบ (35 ถึง 60 องศาเซลเซียส) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ออบ (30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้ถูกนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลอง 3 แบบ แบบจำลองแรกเป็นแบบจำลองซึ่งดัดแปลงมาจากทฤษฎีการแพร่ แบบจำลองที่สองคือแบบจำลองที่ดัดแปลงมาจากแบบจำลองของเพจ (PAGE) และแบบจำลองที่สามซึ่งอยู่ในรูปควอดราติก (QUADRATIC) สัมประสิทธิ์ และกำลังในแบบจำลองถูกหาออกมาในรูปของตัวแปรการทดลอง แบบจำลองทั้งหมดถูกเปรียบเทียบกันทั้ง ความละเอียดและความยากง่ายในการคำนวณ เพื่อเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งชั้นหนา

แบบจำลองที่ดีที่สุดที่พบในการศึกษาคือ แบบจำลองซึ่งดัดแปลงมาจากแบบจำลองของเพจ (PAGE) ซึ่งด้วยกำลังเป็นฟังก์ชันของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก ขณะที่สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก แบบจำลองนี้จะถูกนำไปใช้ในการจำลองการอบแห้งชั้นหนาต่อไป

ถึงอบแห้งแบบ เมล็ดที่ข่อยอยู่กับที่ได้ถูกออกแบบและสร้าง หลังจากนั้นจึงทำการทดลอง 5 ชุด ในแต่ละชุดจะมีสภาวะอากาศและความชื้น เริ่มต้นของข้าวเปลือกแตกต่างกันไป โดยในขณะทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิของอากาศและความชื้นของข้าวเปลือกในชั้นต่าง ๆ เป็นระยะ ๆ

ผลจากการทดลองได้ถูกเปรียบเทียบกับการจำลองการอบชั้นหนาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกเขียนขึ้นมา โดยอาศัยหลักการของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ผลลัพธ์แสดงว่าอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าสูงกว่าจากการทดลองเล็กน้อย ความแตกต่างมากที่สุดเกิดในชั้นบนสุดของถังอบ อย่างไรก็ตามทั้งโพไฟล์ของความชื้นของข้าวเปลือกและอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบต่างมีความสอดคล้องกันดี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต *สมชาย วงศ์วิเศษ*

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

SOMCHAI WONGWISES : DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR PREDICTING THE THIN LAYER DRYING RATE OF LONG GRAIN ROUGH RICE. THESIS ADVISOR: ASSO.PROF.MANIT THONGPRASERT,PH.D. 212 PP.

Rice is one of the most important agricultural crops in the world, particularly in Thailand, where rice is economically important for both domestic consumption and for export. As the various crops harvested, rice requires drying. Fissures and high temperature gradient will be developed if rice have a high moisture content. Research on rice drying is imperative in order to meet drying needs of increased rice production and to dry rice efficiently.

A thin-layer air drying apparatus was designed and constructed. Experimental data describing the thin layer drying rate for long grain rough rice (RD7) were obtained in this apparatus under controlled conditions. The test variables considered include the initial moisture content of rough rice (20 to 40 percent dry basis), drying air temperature (35 to 60 C) and drying air relative humidity (30 to 70 percent).

The observed drying data have been fitted to three mathematical models. The first model was based on an approximate form of diffusion solution and the others were empirical models. The first empirical model was a modified form of Page's model while the second was a quadratic model. The coefficients and exponents for these models are described in terms of the test variables. The developed models were compared for both accuracy and computational ease with each other. Finally the most suitable drying model was chosen for further deep-bed simulation.

The best available model found in this study is the modified form of the Page's model with the exponent as functions of drying air relative humidity and initial moisture content of rough rice while the coefficient as functions of drying air temperature and relative humidity and initial moisture content of rough rice. This selected model was next used to simulate the drying rate of a deep-bed dryer.

A fixed-bed dryer was designed and constructed and five experiments with fixed beds of rough rice were carried out using various inlet air conditions and initial moisture content of rough rice. The air temperature and moisture content of rough rice at various heights within the beds were measured periodically.

A computer program based on energy and mass balances was developed to simulate the deep-bed drying. Experimental data from the dryers were compared with the results from this program. The results showed that the simulated drying rates and drying air temperature between the layers were slightly higher than those experimentally observed. The major difference between the simulated and experimental values was found in the top of the deep bed. However, they showed good agreement of the shapes of the moisture and temperature profiles. The computer listings are included.

ภาควิชา Mechanical Engineering

สาขาวิชา Mechanical Engineering

ปีการศึกษา 1989

ลายมือชื่อนิสิต *Somchai Wongwises*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *M. Thongprasert*

DEDICATION

This dissertation is dedicated to my parents, grandmother and grandfather without their love, encouragement and help, throughout my life, this dissertation would not have been completed.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to express his sincere appreciation to his advisor, Dr.Manit Thongprasert, who provided not only technical and moral support, but also friendship and example that will positively influence his life.

The author would like to thank Dr.Variddhi Ungbhakorn, Dr.Wittaya Yongcharoen and Dr.Somsri Chongrungreong for serving on his guidance committee. Their advice and encourage were very helpful.

Special gratitude is due to external committee member, Dr.Preeda Wibulswas for his unfailing guidance and advice on this study. His friendship, council and understanding will always be remembered.

Special thanks is given to Dr.Atthapol Noomhorm, Division of Agricultural and Food Engineering, Asian Institute of Technology. His advice was very helpful.

The author is indebted to the faculty and staff of the Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, for their tremendous assistance during his study.

The author also wishes to acknowledge Mr.John C.C.Gibson of the Department of Languages, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi for his help in proofreading the manuscript of this dissertation.

Finally, very special gratitude is due to the author's parents, grandmother and grandfather. Their love, encouragement and moral support helped him through some of the difficult moments. This dissertation is dedicated to them.

TABLE OF CONTENTS

	Page
Abstract	IV
Dedication	VI
Acknowledgements	VII
List of tables	XI
List of figures	XII
List of symbol	XVI
 Chapter	
I. Introduction.....	1
II. Review of literature	5
2-1 The drying rate of thin-layer of grain.....	5
2-2 Equilibrium moisture content	23
2-3 Physical and Thermal properties of rough rice.....	29
2-3.1 Specific heat of rough rice	29
2-3.2 Bulk density of rough rice.....	29
2-3.3 Latent heat of vaporization in rough rice ...	30
2-4 Deep bed drying simulation.....	30
III. Thin-layer Drying Apparatus and experimental procedure.....	33
3-1 Air conditioning system	33
3-1.1 Measurement of temperature	36
3-1.2 Measurement of relative humidity.....	36
3-1.3 Measurement of air flow rate and velocity...	37
3-2 Thin-layer drying Unit.....	37
3-2.1 Measurement of grain moisture content.....	39
3-3 Experimental procedure.....	39
3-3.1 Sample preparation	39
3-3.2 Experimental operation procedure	42

TABLE OF CONTENTS (continued)

	Page
IV. Deep bed drying apparatus and experimental procedure.....	46
4-1 Equipment and measurements.....	46
4-2 Experimental procedure	46
V. Analysis of thin-layer drying data	51
5-1 Development of mathematical models.....	51
5-2 Selection of a most suitable model.....	73
VI. Simulation of deep bed drying model and application.....	78
VII. Results and discussion	89
7-1 Thin-layer rough rice drying.....	89
7-1.1 Thin-layer rough rice drying model.....	89
7-1.2 Effect of drying conditions on thin-layer... drying rate	90
7-2 Deep bed rough rice drying	103
VIII. Summary and conclusion.....	118
IX. Suggestions for further study.....	120
References	121
Appendix A Thin-layer drying rate data at constant air conditions	130
Appendix B Experimental uncertainty estimation	148
Appendix C The NLIN procedure	151
Appendix D Sample SAS program for NLIN procedure and its output for Model 1	154
Appendix E List of results of NLIN procedure for Model 1.....	159
Appendix F List of results of NLIN procedure for Model 2.....	163
Appendix G List of results of NLIN procedure for Model 3.....	167
Appendix H Sample SAS program for STEPWISE MULTIPLE REGRESSION procedure and its output	171
Appendix I List of deep bed drying simulation program.....	178
Appendix J Sample computer output of fixed-bed grain dryer.....	188
Vitae	193

LIST OF TABLES

Table	Page
4.1 Various test conditions used in deep bed drying experiments	48
5.1 Results of RSQUARE procedure for A in Model 1	55
5.2 Results of RSQUARE procedure for K in Model 1	55
5.3 Results of STEPWISE MULTIPLE REGRESSION procedure for A.. and K in Table 5.1 and Table 5.2	56
5.4 Results of RSQUARE procedure for equation 5.9	59
5.5 Results of STEPWISE MULTIPLE REGRESSION procedure for models in Table 5.4	60
5.6 Results of RSQUARE procedure for K in Model 2	63
5.7 Results of RSQUARE procedure for N in Model 2	63
5.8 Results of STEPWISE MULTIPLE REGRESSION procedure for K and N in Table 5.6 and Table 5.7	64
5.9 Results of RSQUARE procedure for equation 5.16	67
5.10 Results of STEPWISE MULTIPLE REGRESSION procedure for models in Table 5.9	68
5.11 Results of RSQUARE procedure for A in Model 3	71
5.12 Results of RSQUARE procedure for B in Model 3	71
5.13 Results of STEPWISE MULTIPLE REGRESSION procedure for A and B in Table 5.11 and Table 5.12	72
5.14 Summary of the coefficients of determination from	75
various models to describe thin-layer drying rate	

LIST OF FIGURES

Figure	Page
2.1 Biological product drying during the constant and the falling-rate periods	6
3.1 Photograph of overall view of the laboratory..... experimental apparatus	34
3.2 Schematic of laboratory grain drying apparatus	35
3.3 Photograph of centrifugal blower.....	38
3.4 Photograph of orifice plate and manometer	38
3.5 Photograph of boiler and steam valve.....	40
3.6 Photograph of air heater and steam inlet	40
3.7 Photograph of panel containing steam, air temperature..... and air flow rate controllers	41
3.8 Photograph of drying section and sample pan.....	41
3.9 Photograph of data logger	43
3.10 Photograph of precision balance	43
3.11 Photograph of digital thermometer and its probe	45
4.1 Photograph of deep bed dryer	49
4.2 Schematic of deep bed drying bin	50
5.1 Residual plot of Model 1, Model 2 and Model 3	76
at $T = 55^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 29.5\%$, $M_1 = 21.40\%$ D.B.	
5.2 Residual plot of Model 1, Model 2 and Model 3	77
at $T = 45^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 64.5\%$, $M_1 = 28.45\%$ D.B.	
6.1 Schematic diagram of basic simulation approach	79
6.2 Schematic diagram of deep bed simulation approach	81
6.3 Flow chart of deep bed simulation program	88

LIST OF FIGURES (continued)

Figure	Page
7.1 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 33^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 60\%$, $M_i = 37.36\%$ D.B.	91
7.2 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 44^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 35\%$, $M_i = 36.38\%$ D.B.	92
7.3 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 50^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 29\%$, $M_i = 35.87\%$ D.B.	93
7.4 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 54^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 34.5\%$, $M_i = 35.04\%$ D.B.	94
7.5 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 35^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 73.5\%$, $M_i = 37.4\%$ D.B.	95
7.6 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 55^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 29.5\%$, $M_i = 34.77\%$ D.B.	96
7.7 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 39^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 59.5\%$, $M_i = 32.52\%$ D.B.	97
7.8 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 59^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 28.5\%$, $M_i = 31.43\%$ D.B.	98

LIST OF FIGURES (continued)

Figure	Page
7.9 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 46^{\circ} \text{C}$, RH = 71.5 %, $M_i = 23.97$ % D.B.	99
7.10 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 51^{\circ} \text{C}$, RH = 57.5 %, $M_i = 24.10$ % D.B.	100
7.11 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 55^{\circ} \text{C}$, RH = 29.5 %, $M_i = 21.4$ % D.B.	101
7.12 Comparison between the observed and predicted moisture contents against time at $T = 61^{\circ} \text{C}$, RH = 38 %, $M_i = 21.78$ % D.B.	102
7.13 Effect of drying air temperature on thin-layer rough rice drying	104
7.14 Effect of drying air temperature on thin-layer rough rice drying	105
7.15 Effect of relative humidity of air on thin-layer..... rough rice drying	106
7.16 Effect of relative humidity of air on thin-layer rough rice drying	107
7.17 Effect of initial moisture content of rough rice on thin-layer rough rice drying	108
7.18 Effect of initial moisture content of rough rice on thin-layer rough rice drying	109

LIST OF FIGURES (continued)

Figure	Page
7.19 Plot of average moisture content against time, at various depths, in a deep bed of rough rice being dried with heated air (experiment 1)	111
7.20 Plot of average moisture content against time, at various depths, in a deep bed of rough rice being dried with heated air (experiment 2)	112
7.21 Plot of drying air temperature against time, at..... various depths, in a deep bed of rough rice being dried with heated air (experiment 1)	113
7.22 Plot of drying air temperature against time, at various depths, in a deep bed of rough rice being dried with heated air (experiment 2)	114
7.23 Plot of bulk depth against average moisture content, at various drying time, in a deep bed of rough rice being dried with heated air (experiment 1)	116
7.24 Plot of bulk depth against average moisture content, at various drying time, in a deep bed of rough rice being dried with heated air (experiment 2)	117

LIST OF SYMBOLS

A	Surface area of one particle of grain, m^2
a	Particle surface area per unit bed volume, m^2/m^3
BD	Bulk density of rough rice, kg/m^3
C	Constant, Specific heat of rough rice multiplied by the grain to air ratio
C_a	Specific heat of dry air, $kJ/(kg)(^\circ C)$
C_p	Specific heat of grain kernels, $kJ/(kg)(^\circ C)$
C_v	Specific heat of water vapor, $kJ/(kg)(^\circ C)$
C_w	Specific heat of liquid water, $kJ/(kg)(^\circ C)$
CSS	Corrected sum of square of average moisture content
D, D'	Diffusion coefficient, m^2/hr
D_m	Concentration dependent diffusivity, m^2/hr
d_s	Density of solid material, kg/m^3
G	Flow rate, $kg/(hr)(m^2)$
H	Relative humidity of drying air, percent
h	Specific enthalpy, kJ/kg
h'	Convection heat transfer coefficient, $kJ/(m^2)(^\circ C)(sec)$
h_{fg}	Latent heat of evaporation of water in grain, kJ/kg
K	Drying constant, hr^{-1}
L	Latent heat of vaporization of water in rough rice, kJ/kg
M	Local moisture content of grain, dry basis, decimal

LIST OF SYMBOLS (continued)

\bar{M}	Average moisture content of grain, dry basis, decimal, percent
MR	Moisture ratio, $(M - M_e)/(M_i - M_e)$
\overline{MR}	Average moisture ratio, $(\bar{M} - M_e)/(M_i - M_e)$
n	Number of observation
P	Pressure, atm
R	Radius of a sphere, m, grain-to-air ratio
RH	Relative humidity of drying air, percent and decimal
r	Particle coordinate, m
SSE	Sum of square of residual
T	Temperature, C, K
t	Time, hr, min
V	Velocity, m/sec, Volume, m ³
W	Absolute humidity or humidity ratio of air, kg of water/kg of dry air, Weight of sample in tray, g
w	Weight of sample for determination of moisture content by standard oven method, g

LIST OF SYMBOLS (continued)

Subscription

a	air, absolute
e	equilibrium
f	final
f'	state condition after condensation
g	grain
i, o	initial
m	mean value
P	product, predicted value
v	vapour
w	water