

การจำลองเครื่องอบแห้งแบบพาหะกมระดับอุตสาหกรรมในช่วงที่อัตราอบแห้งคงที่และช้าลง

นาย เศรษฐา ดันดีโรจนามร



สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-582-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**SIMULATION OF INDUSTRIAL PNEUMATIC CONVEYING DRYER WITH
CONSTANT AND FALLING RATES OF DRYING**

Mr. Sedtha Tantirodchanamate

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

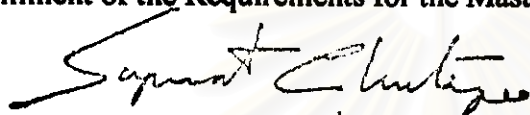
Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-639-582-3

Thesis Title **Simulation of Industrial Pneumatic Conveying Dryer with Constant and Falling Rates of Drying**
By **Mr. Sedtha Tantirodchanamate**
Department **Chemical Engineering**
Thesis Advisor **Professor Wiwut Tanthapanichakoon, Ph.D.**

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree



..... Dean of Graduate School
(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

Thesis Committee



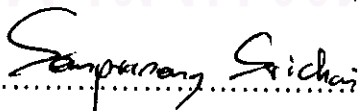
..... Chairman
(Associate Professor Kroekchai Sukanjanajtee, Ph.D.)



..... Thesis Advisor
(Professor Wiwut Tanthapanichakoon, Ph.D.)



..... Member
(Assistant Professor Tawatchai Charinpanitkul, Dr. Eng.)



..... Member
(Somprasong Srichai, Ph.D.)



..... Member
(Hathaichanok Duriyabunleng, Ph.D.)

ชื่อหนังสือฉบับนี้ตั้งชื่อโดยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

นายเศรษฐา ตันติโรจนามธ : การจำลองเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมระดับอุตสาหกรรมในช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่และร่วงลง (SIMULATION OF INDUSTRIAL PNEUMATIC CONVEYING DRYER WITH CONSTANT AND FALLING RATES OF DRYING) อ. ที่ปรึกษา: ศ.ดร. วิวัฒน์ คณิตะพานิชกุล, 120 หน้า. ISBN 974-639-582-3.

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยประยุกต์และรวมแบบจำลอง 2 ประเภทที่เสนอโดย Shigeru Matsumoto และ David Pei เข้าด้วยกัน แบบจำลองที่พัฒนาและเขียนโปรแกรมขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบพาหะลมซึ่งประกอบด้วยช่วงความยาว 2 ช่วง คือช่วงการระเหยน้ำจากผิวของวัสดุและช่วงที่อัตราการอบแห้งถูกควบคุม โดยการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ หรืออาจมีเพียงช่วงใดช่วงเดียว

การทดสอบแบบจำลองเพื่อพิสูจน์ความเหมาะสมในการใช้งานที่ครอบคลุมได้อย่างกว้างขวาง ได้ทำโดยอาศัยข้อมูลการทดลองกับแป้งมันสำปะหลังในระดับอุตสาหกรรม และข้อมูลการทดลองในระดับอุตสาหกรรมที่ตีพิมพ์เผยแพร่ของ ilmenite, Glauber's salt, แคลเซียมคาร์บอเนต, แอมโมเนียมซัลเฟต และพีวีซี ผลการทดสอบแสดงว่าแบบจำลองสามารถทำนายความชื้นขาออกของวัสดุและอากาศได้อย่างแม่นยำ ส่วนอุณหภูมิขาออกของวัสดุและของอากาศก็มีความแตกต่างจากผลการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากในแบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงการสูญเสียของความร้อนบางส่วนออกจากเครื่องอบแห้งในอุตสาหกรรม อนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลองเดิมที่เสนอโดย วิวัฒน์ คณิตะพานิชกุล และชัยรัตน์ ศรีไวทานิช โดยถือว่าอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุจะลดลงเป็นเส้นตรงกับความชื้นอิสระที่เหลือในวัสดุ ปรากฏว่าผลการทำนายของแบบจำลองใหม่มีความแม่นยำกว่าและไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลการทดลองเพื่อหาความชื้นวิกฤตของวัสดุไว้ล่วงหน้า

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อปรับปรุงเงื่อนไขการปฏิบัติการ ณ อัตราการผลิตปัจจุบัน รวมถึงเงื่อนไขการปฏิบัติการเมื่อเพิ่มอัตราการผลิต 20 % ผลการปรับปรุงเงื่อนไขสามารถลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานได้สูงถึง 35 % เมื่อเทียบกับอัตราการผลิตในปัจจุบัน



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.....
ปีการศึกษา2541.....

ลายมือชื่อนิติกรเศรษฐา ตันติโรจนามธ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิวัฒน์ คณิตะพานิชกุล.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม

C817223 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: PNEUMATIC CONVEYING DRYING / CONSTANT DRYING RATE / SURFACE EVAPORATION / FALLING DRYING RATE / DIFFUSION CONTROLLED / MODELING

SEDTHA TANTIRODCHANAMATE : SIMULATION OF INDUSTRIAL PNEUMATIC CONVEYING DRYER WITH CONSTANT AND FALLING RATES OF DRYING. THESIS ADVISOR : PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph.D. 120 pp. ISBN 974-639-582-3.

In the present thesis, a comprehensive mathematical model of the pneumatic conveying dryer, which is derived by combining two separate models proposed by Shigeru Matsumoto and David Pei, has successfully been developed. The model is able to describe the entire range of drying behavior which consists of two main periods, namely, surface water evaporation and internal moisture diffusion controlled periods.

Testing of the model to validate its general applicability is done by comparison of the simulation results with the full-scaled industrial pneumatic conveying drying of cassava flour and the published industrial drying results of ilmenite, Glauber's salt, calcium carbonate, ammonium sulfate, and PVC resin. The comparison shows that the outlet solid moisture content and air humidity is accurately predicted by the model. However, the predicted solid and air temperatures show some discrepancies from the reported values due to the assumption of negligible heat loss from the dryer in the model. The simulation results are also compared to the predictions of the previous model proposed by W. Tanthapanichakoon and C. Srivotanai which assumes that, below the critical moisture content, the falling drying rate is proportional to the remaining free moisture content. The comparison shows that the present model gives better prediction and does not require an advanced knowledge of the value of the critical moisture content.

Furthermore, the model is applied to improve the operating condition of the same flour dryer at the existing drying capacity and to search for a most suitable operating condition for increasing the drying capacity by 20 %. The improved operating condition can reduce the operating cost by 35 % when compared with the original operating condition.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา..... 2541.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *เสถียร ทันตโรดชานมาต*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *วิวัฒน์ ตันตะพานิชโก*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ACKNOWLEDGEMENT



The author would like to express his sincere gratitude to his advisor, Professor Wiwut Tanthapanichakoon, for his inspiring guidance and valuable suggestions throughout the course of this work.

The author also wishes to extend his gratitude to Associate Professor Kroekchai Sukanjanajtee, Assistant Professor Tawatchai Charinpanitkul, Dr. Somprasong Srichai and Dr. Hathaichanok Duriyabunleng for their useful comments and participation as the thesis committee.

The author has received research assistantship from the Senior Research Scholar Project of Thailand Research Fund (Dr. Wiwut Tanthapanichakoon) in Particle Technology Field.

Moreover, the author would like to offer his sincere and grateful thanks to his family for their encouragement and warmest support.

Finally, the author would like to take this opportunity to convey his thanks to his friends and all others who have helped him over the years of his study.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTENTS

	page
ABSTRACT IN THAI.....	iv
ABSTRACT IN ENGLISH.....	v
ACKNOWLEDGEMENT.....	vi
LIST OF TABLES.....	x
LIST OF FIGURES.....	xi
NOMENCLATURES.....	xv
CHAPTER	
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Significance of problem.....	1
1.2 Objectives.....	3
1.3 Scope of research.....	3
2. LITERATURE REVIEWS.....	5
2.1 Experimental study on pneumatic conveying dryer.....	5
2.2 External conditions controlled rate model of pneumatic conveying dryer.....	8
2.3 Internal resistance controlled model of pneumatic conveying dryer.....	12
3. THEORY.....	17
3.1 Drying definitions.....	17
3.2 General drying behavior.....	18
3.2.1 Constant drying rate period.....	20
3.2.2 Falling drying rate period.....	22
3.2.3 Liquid diffusion.....	23
3.2.4 Equilibrium moisture content.....	25
3.2.5 Critical moisture content.....	29

	page
3.3 Pneumatic conveying dryer.....	30
3.3.1 Advantages and disadvantages of pneumatic conveying dryer.....	33
3.3.2 Factors affecting the drying rate.....	34
3.3.3 Heat and mass transfer in pneumatic conveying dryer.....	35
4. MODELLING AND SIMULATION TECHNIQUE OF PNEUMATIC DRYER.....	38
4.1 Model assumption.....	39
4.2 Mathematical model.....	40
4.2.1 Moisture balance of solid phase.....	40
4.2.2 Water vapor balance of gas phase.....	41
4.2.3 Energy balance of solid phase.....	42
4.2.4 Energy balance of gas phase.....	42
4.2.5 Solid particle movement.....	43
4.3 Complementary equation.....	44
4.3.1 Rate of drying.....	44
4.3.1.1 Drying rate in surface evaporation period.....	44
4.3.1.2 Drying rate in the internal moisture diffusion controlled period.....	45
4.4 General model.....	50
4.5 Simulation technique.....	51
4.5.1 Input data.....	51
4.5.2 Numerical integration.....	52
4.6 A algorithm of the pneumatic conveying dryer model.....	53
5. VALIDATION OF PRESENT MODEL.....	56
5.1 Experimental results.....	57
5.2 Identification of unknown model parameters.....	57
5.3 Estimation of model parameters.....	61
5.4 Comparison between simulation and experimental results.....	76
5.5 Example of changes occurring within dryer.....	80

	page
6. TESTING OF PRESENT MODEL ON OTHER DRYING MATERIALS	82
6.1 Reported result of other drying materials	82
6.2 Estimation of unknown model parameters	84
6.3 Comparison between simulation and actual results	88
7. APPLICATIONS OF PRESENT MODEL	91
7.1 Optimization of operating condition for the existing drying capacity	92
7.2 Optimization of the increased drying capacity	97
8. CONCLUSIONS	100
8.1 Conclusions	100
8.2 Recommended for future work	103
REFERENCES	104
APPENDIX	118
A. OVERALL MASS AND ENERGY BALANCE	109
B. CORRELATIONS OF AIR PROPERTIES	110
C. EXAMPLE OF CALCULATION THE OVERALL MASS AND ENERGY BALANCE	116
D. EXAMPLE OF THE POSITIVE ROOTS	118
VITA	120

LIST OF TABLES

	page
Table 5.1 Operating conditions and drying results for 10 cases of flour drying.....	58
Table 5.2 Reference value of parameters used to observe the model behavior.....	61
Table 5.3 Operating condition, dryer configuration, flour properties and parameters used in flour simulation and comparison with experimental results.....	77
Table 6.1 Reported operating conditions of industrial pneumatic conveying dryers.....	83
Table 6.2 Estimated parameters and the corresponding simulation results.....	89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF FIGURES

	page
Figure 3.1 Typical drying curve for constant drying conditions, moisture content as a function of time.....	19
Figure 3.2 Typical drying curve for constant drying conditions, drying rate as a function of time.....	20
Figure 3.3 Moisture content distribution in solid for liquid diffusion.....	24
Figure 3.4 Equilibrium moisture content curve of raw cotton.....	26
Figure 3.5 Equilibrium moisture content of some solids at 25 °C.....	28
Figure 3.6 Equilibrium moisture content of sulfite pulp showing hysteresis.....	29
Figure 3.7 Diagram of typical pneumatic conveying dryer.....	31
Figure 4.1 Diagram of pneumatic conveying dryer.....	41
Figure 4.2 Diagram of film mass transfer.....	45
Figure 4.3 Diagram of moisture diffusion within solid.....	46
Figure 4.4 Correlation factor for heat and mass transfer coefficient as a function of particle diameter.....	49
Figure 4.5 Simplified flow chart of the present model.....	55
Figure 5.1 Equilibrium moisture content of starch.....	60
Figure 5.2 Effect of equilibrium moisture content on dryer length of surface evaporation period in flour drying simulations.....	62
Figure 5.3 Effect of equilibrium moisture content on outlet moisture content and humidity in flour drying simulation.....	62
Figure 5.4 Effect of equilibrium moisture content on outlet solid and air temperatures in flour drying simulations.....	63
Figure 5.5 Effect of internal moisture diffusivity on dryer length of surface evaporation period in flour drying simulations.....	63
Figure 5.6 Effect of internal moisture diffusivity on outlet moisture content and humidity in flour drying simulations.....	64

	page
Figure 5.7 Effect of internal moisture diffusivity in outlet solid and air temperatures in flour drying simulations.....	64
Figure 5.8 Effect of slope of equilibrium moisture content curve on dryer length of surface evaporation period in flour drying simulations.....	65
Figure 5.9 Effect of slope of equilibrium moisture content curve on outlet moisture content and humidity in flour drying simulations.....	65
Figure 5.10 Effect of slope of equilibrium moisture content curve on outlet solid and air temperatures in flour drying simulations.....	66
Figure 5.11 Comparison of outlet moisture content and humidity between experimental and simulated result when $W_{eq,0} = 0.12$ kg/kg dry flour.....	68
Figure 5.12 Comparison of outlet flour and air temperatures between experimental and simulated results when $W_{eq,0} = 0.12$ kg/kg dry flour.....	68
Figure 5.13 Comparison of outlet moisture content and humidity between experimental and simulated result when $W_{eq,0} = 0.125$ kg/kg dry flour.....	69
Figure 5.14 Comparison of outlet flour and air temperatures between experimental and simulated results when $W_{eq,0} = 0.125$ kg/kg dry flour.....	69
Figure 5.15 Comparison of outlet moisture content and humidity between experimental and simulated result when $W_{eq,0} = 0.13$ kg/kg dry flour.....	70
Figure 5.16 Comparison of outlet flour and air temperatures between experimental and simulated results when $W_{eq,0} = 0.13$ kg/kg dry flour.....	70
Figure 5.17 Comparison of outlet moisture content and humidity between experimental and simulated result when $W_{eq,0} = 0.135$ kg/kg dry flour.....	71

	page
Figure 5.18 Comparison of outlet flour and air temperatures between experimental and simulated results when $W_{eq,0} = 0.135$ kg/kg dry flour.....	71
Figure 5.19 Comparison of outlet moisture content and humidity between experimental and simulated result when $W_{eq,0} = 0.14$ kg/kg dry flour.....	72
Figure 5.20 Comparison of outlet flour and air temperatures between experimental and simulated results when $W_{eq,0} = 0.14$ kg/kg dry flour.....	72
Figure 5.21 Comparison of outlet moisture content and humidity between experimental and simulated result when $W_{eq,0} = 0.145$ kg/kg dry flour.....	73
Figure 5.22 Comparison of outlet flour and air temperatures between experimental and simulated results when $W_{eq,0} = 0.145$ kg/kg dry flour.....	73
Figure 5.23 Effect of equilibrium moisture content on S_x of outlet moisture content.....	74
Figure 5.24 Effect of equilibrium moisture content on S_x of outlet humidity.....	74
Figure 5.25 Effect of equilibrium moisture content on S_x of outlet flour temperature.....	75
Figure 5.26 Effect of equilibrium moisture content on S_s of outlet air temperature.....	75
Figure 5.27 Comparison of outlet moisture content and humidity between experimental and simulated results from present and previous model.....	78
Figure 5.28 Comparison of outlet flour and air temperatures between experimental and simulated results from present and previous model.....	79

	page
Figure 5.29 Simulated distributions of moisture content, humidity and solid and air temperatures along the dryer length.....	82
Figure 6.1 Effect of internal moisture diffusivity on product moisture content and temperature and outlet air temperature in the case of ilmenite.....	85
Figure 6.2 Effect of internal moisture diffusivity on product moisture content and temperature and outlet air temperature in the case of Glauber's salt.....	86
Figure 6.3 Effect of internal moisture diffusivity on product moisture content and temperature and outlet air temperature in the case of ammonium sulfate.....	86
Figure 6.4 Effect of intrinsic equilibrium moisture content on product moisture content and temperature and outlet air temperature in the case of carbon.....	87
Figure 6.5 Effect of intrinsic equilibrium moisture content on product moisture content and temperature and outlet air temperature in the case of PVC.....	87
Figure 7.1 Relations of the outlet moisture content and temperature of flour versus the inlet air velocity ($T_{a,0} = 463$ K and $G_s = 5759$ kg/hr).....	93
Figure 7.2 Relations of the outlet moisture content and air temperature of flour versus the inlet air velocity ($T_{a,0} = 478$ K and $G_s = 5759$ kg/hr).....	93
Figure 7.3 Relations of the outlet moisture content and air temperature of flour versus the inlet air velocity ($T_{a,0} = 493$ K and $G_s = 5759$ kg/hr).....	94
Figure 7.4 Relation of operating cost versus inlet air velocity.....	94
Figure 7.5 Relations of the outlet moisture content and temperature of flour versus the inlet air velocity ($T_{a,0} = 463$ K and $G_s = 6910$ kg/hr).....	98
Figure 7.6 Relations of the outlet moisture content and air temperature of flour versus the inlet air velocity ($T_{a,0} = 478$ K and $G_s = 6910$ kg/hr).....	98
Figure 7.7 Relations of the outlet moisture content and air temperature of flour versus the inlet air velocity ($T_{a,0} = 493$ K and $G_s = 6910$ kg/hr).....	99

NOMENCLATURE

A	cross sectional area of drying duct [m^2]
a	grain radius [m]
a_v	solid surface area per unit dryer volume [m^{-1}]
B	mass transfer Biot number, ka/D_m [-]
C	specific heat [kcal/kg K]
C_D	drag coefficient [-]
c	moisture concentration of solid [kg/m^3]
D_{AB}	gas diffusion coefficient [m^2/s]
D_m	moisture diffusion coefficient within solid [m^2/s]
d_p	diameter of grain [m]
G	mass flow rate [kg/s]
g	gravity [m/s^2]
H	humidity [kg vapor/kg dry air]
h_p	heat transfer coefficient [$\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ s K}$]
i	enthalpy of unit mass [kcal/kg]
J	mass flux [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$]
k	mass transfer coefficient based on the moisture concentration driving force [m/s]
k_a	thermal conductivity of air [$\text{kcal}/\text{m s K}$]
k_H	mass transfer coefficient [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$]
M	parameter, $1/(3m\alpha)$ [-]

m	mass flow ratio, G_p/G_a [-]
Nu	Nusselt number, $h_p D/k_a$ [-]
P	pressure [Pa]
Pr	Prandtl number, $C_p \mu_a/k_a$ [-]
R_d	drying rate [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$]
R_{dd}	drying rate in the internal moisture diffusion controlled period [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$]
R_{ds}	drying rate in the surface evaporation period [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$]
Re	Reynolds number, $d_p \rho_a (u_a - u_s)/\mu_a$ [-]
r	radial coordinate [m]
Sc	Schmidt number, $\mu_a/\rho_a D_{AB}$ [-]
Sh	Sherwood number, kd_p/D_{AB} [-]
T	temperature [K]
u	velocity [m/s]
V_H	humid volume of air [m^3/kg dry air]
V_p	volume of single solid grain [m^3]
W	moisture content [kg water/kg dry solid]
Z	drying length [m]

Greek letter

α	equilibrium constant, equation (4.1) [-]
β	constant, equation (4.1) [-]
λ	latent heat of vaporization [kcal/kg]

μ viscosity [kg/m s]

ρ density [kg/m³]

Subscript

a air, or at air temperature

atm atmospheric

exp experimental

s solid, or at solid temperature

sat saturated

sim simulated

v vapor

w water

0 initial state



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย