

การสร้างโมเดล และการทำคอมพิวเตอร์ซิมูเลชันของเครื่องอบแห้ง
แบบไหลผ่านที่มีการหมุนเวียนลมทั้ง



นายชาติ เจียรมิ้งขวัญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2532

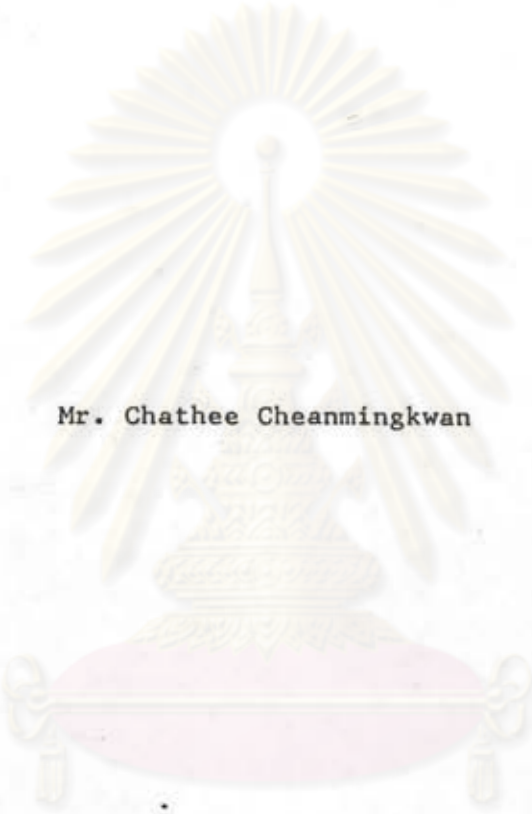
ISBN 974-576-010-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015543

110303182

Modeling and Computer Simulation of a Through-flow Dryer
with Exhaust Air Recycle



Mr. Chathee Cheanmingkwan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1989

ISBN 974-576-010-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้าง โมเดลและการทำคอมพิวเตอร์ซิมูเลชันของเครื่อง
อบแห้งแบบ ไหลผ่านที่มีการหมุนเวียนลมทั้ง

โดย

นายชาติรี เจียรมีงษ์ชัย

ภาควิชา


วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

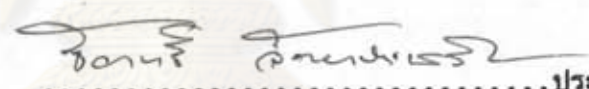
รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล

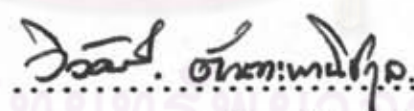


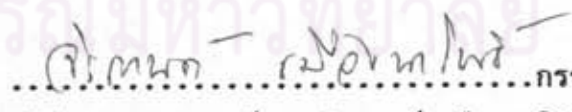
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

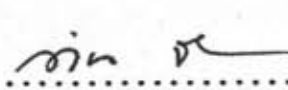

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วิษรามัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนา จิระรัตนานนท์)



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ชาติเรียมิงขวัญ : การสร้างโมเดล และการทำคอมพิวเตอร์ซิมูเลชันของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านที่มีการหมุนเวียนลมทิ้ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รศ. ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล, 235 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ที่ปฏิบัติงานแบบงวด (batch) โดยอาศัยสมมติฐานว่าชิ้นวัสดุ คือถึงกวนสมบูรณ์จำนวน N ถึงมาต่ออนุกรมกัน และลมร้อนไหลผ่านแบบลูกสูบ แบบจำลองนี้สามารถจำลองพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงเชิงจลน์ ของความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุและลมร้อน ตลอดจนปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ ในการอบแห้ง 3 กรณีคือ การอบแห้งปกติ, การอบแห้งที่ไม่มีลมหมุนเวียนลมทิ้ง (มีการผสมวัสดุในเบตเป็นครั้งคราว) และการอบแห้งที่มีการหมุนเวียนลมทิ้ง

เมื่อเปรียบเทียบผลการซิมูเลตกับผลการทดลองใน 3 กรณีคือ การอบแห้งชิ้นวัสดุบาง, การอบแห้งปกติของชิ้นมันสำปะหลังในเบตหนา 40 ซม. และการอบแห้งชิ้นมันสำปะหลังในเบตหนา 40 ซม. ที่มี การผสมวัสดุในเบตทุกๆ 150 นาที พบว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายเวลาในการอบแห้งคลาดเคลื่อนไปเพียง +1.8%, -0.75% และ -0.24% ตามลำดับ นับว่าใกล้เคียงมากพอสมควร

เมื่อนำแบบจำลองนี้มาศึกษาอิทธิพลของตัวแปรสำคัญในการอบแห้ง 4 ตัวแปรคือ อุณหภูมิลมร้อน, ความชื้นวัสดุเริ่มต้น, ความเร็วลมร้อน และช่วงห่างของเวลาที่ผสมวัสดุในเบต ที่เงื่อนไขต่างกัน โดยมี อัตราส่วนหมุนเวียนลมทิ้ง (r) เป็นพารามิเตอร์สำคัญ จากการศึกษาพบว่า ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และ/หรือ ลดความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ และ/หรือ ลดช่วงห่างของเวลาที่ผสมวัสดุในเบต จะได้ผลเหมือนกันคือลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และปริมาณพลังงานความร้อน แต่เมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อน พบว่าเวลาในการอบแห้งจะลดลง และปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้กลับมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลง

เมื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายรวมของการปฏิบัติงาน (ออบเจกทีฟฟังก์ชัน) ของระบบเครื่องอบแห้งแบบนี้ ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายพลังงาน (ของเครื่องอุ่นลมร้อน, เครื่องเป่าลม) และค่าใช้จ่ายด้านแรงงานเท่านั้น เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการปฏิบัติงาน ภายใต้เงื่อนไข ของราคาของพลังงาน/ราคาแรงงาน (a_1/a_2) เป็น 1/1, 1/9 และ 9/1 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาในกรณีค่านี้ถึงและไม่คำนึงถึงช่วงเวลาที่ใช้ผสมวัสดุในเบต โดยอาศัยข้อมูลผลการซิมูเลตข้างต้น พบว่าทั้งกรณีค่านี้ถึงและไม่คำนึงถึงช่วงเวลาที่ใช้ผสมวัสดุในเบต จะให้ข้อสรุปตรงกันทุกกรณีคือ

กรณี $a_1/a_2 = 1/1$ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิลมร้อนเข้า พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงาน คือ อุณหภูมิ 70 วัสดุเริ่มต้นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.20 มาตรฐานแห้ง (d.b.) กับอัตราส่วนหมุนเวียนลมทิ้ง 0.33, สำหรับความเร็วลมร้อนเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.8792 เมตร/วินาที กับไม่มีการหมุนเวียนลมทิ้ง และช่วงห่างของเวลาที่ผสมวัสดุในเบตที่เหมาะสมที่สุดคือ 27 นาทีที่ความเร็วลมร้อน 0.8792 เมตร/วินาที

กรณี $a_1/a_2 = 1/9$ เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของอุณหภูมิลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุเหมือนกรณี $a_1/a_2 = 1/1$ แต่อัตราส่วนหมุนเวียนลมทิ้งของทั้งสองกรณีข้างต้น เท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงไปเป็น 0.7 และ 0.2 ส่วนเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของความเร็วลมร้อน และช่วงห่างของเวลาที่ผสมวัสดุในเบต ยังคงเหมือนกรณี $a_1/a_2 = 1/1$

กรณี $a_1/a_2 = 9/1$ เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของอุณหภูมิลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุเหมือนกรณี $a_1/a_2 = 1/1$ แต่อัตราส่วนหมุนเวียนลมทิ้งของทั้งสองกรณีข้างต้น เท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงไปเป็น 1.1 และ 0.4 ส่วนเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของความเร็วลมร้อนคือ 0.4634 เมตร/วินาที และอัตราส่วนหมุนเวียนลมทิ้ง 0.33 สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของช่วงห่างของเวลาที่ผสมวัสดุในเบตนาน 30 นาทีที่ความเร็วลมร้อน 0.4634 เมตร/วินาที

ภาควิชา
สาขาวิชา
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

CHATHEE CHEANMINGKWAN : MODELING AND COMPUTER SIMULATION OF A THROUGH-FLOW DRYER WITH EXHAUST AIR RECYCLE. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph.D. 260 PP.

The thesis work developed the mathematical modeling of a batch through-flow dryer which based on assumptions that the bed of material was N complete stirred tanks in series and the plug-flow behavior of hot air. The modeling can predict the dynamic behavior of moisture content, temperature both in material and hot air as well as the energy consumption of heater in 3 cases :- normal drying, drying with intermittent mixing solid in bed and drying with recycle exhaust air.

Compared the drying time predicted by the model to the experimental results in 3 cases :- thin layer drying, normal deep bed drying (cassava chunks drying), and deep bed drying with mixing interval 150 min., found that the predicted time were slightly different from the experimental results no more than +1.8%, -0.75% and -0.24%, respectively.

Then studied the effect of 4 variables in drying process :- inlet temperature of hot air, initial moisture content of solid, velocity of hot air and mixing time interval in bed, respectively with recycle ratio (r) as parameter. Increased the inlet temperature of hot air and/or decreased initial moisture content in solid and/or decreased the mixing time interval of bed (increase the frequency of mixing bed), the drying time and energy consumption of heater would decrease. Increased velocity of hot air would also decreased the drying time but the energy consumption would slightly increased and decreased.

When analysed the optimum condition of operation from above data followed an objective function of total operating cost. Total operating cost composed of energy consumption cost (heating air and blower energy) and cost of labour. Analysed them in 3 cases of extreme ratio of energy cost to labour cost :- 1/1, 1/9, and 9/1, respectively and also considered the effect of mixing time delay. Whether considered an effect of mixing time delay, the similarly results obtained in every cases.

When $a_1/a_2 = 1/1$, the optimum condition in case of temperature of hot air with recycle ratio found at 70 C and 0.8, in case of initial moisture content of solid with recycle ratio were 0.20 d.b. and 0.3, the optimum condition in cases of velocity of hot air were 0.8792 m/s with no recycle ratio and the optimum mixing time interval was 27 min. found at velocity of hot air 0.8792 m/s.

When $a_1/a_2 = 1/9$, the optimum temperature and optimum initial moisture content were similar as in case of $a_1/a_2 = 1/1$, but their recycle ratio shifted to 0.7 and 0.2, as well as the other cases remained at the same conditions as in case of $a_1/a_2 = 1/1$.

When $a_1/a_2 = 9/1$, the optimum temperature, initial moisture content were similar as in case of $a_1/a_2 = 1/1$, their recycle ratio shifted to 1.1 and 0.4, the optimum velocity of hot air with its optimum recycle ratio obtained at 0.4634 m/s and 0.30 and the optimum mixing time interval was 30 min. found at the velocity of hot air 0.4634 m/s.

ภาควิชา
สาขาวิชา
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อผู้พิมพ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
Wiwut Tanthapanichakoon



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ คัดตะพานิชกุล ที่ให้คำปรึกษา และแนวทางการแก้ปัญหา และให้ข้อคิดเห็นต่างที่เป็นประโยชน์ยิ่ง ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาตรวจสอบความถูกต้อง ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพิ่มเติม

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดจนเพื่อนทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ข
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 มูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
2. สรุปผลงานวิจัยในอดีต	3
2.1 ผลงานวิจัยการอบแห้งแบบไหลผ่าน และแบบจำลองคณิตศาสตร์	3
2.2 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแบบไหลผ่าน ..	8
2.3 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีประเมินสมรรถนะ และวิธีระหยัคพลังงานใน เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	9
3. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	13
3.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง	13
3.2 ลักษณะ และรูปแบบทั่วไปของการอบแห้งแบบไหลผ่าน	17
3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบไหลผ่าน	22
3.3.1 กรณีการอบแห้งธรรมดาที่ไม่มี การหมุนเวียนลมทั้ง	24
3.3.2 กรณีการอบแห้งที่มีการหมุนเวียนลมร้อนทั้งบางส่วนกลับมาใช้ อีก	31
3.3.3 กรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุขึ้นในเบคเป็นครั้งคราว ...	33
3.4 อัลกอริทึม และฟังก์ชันการคำนวณ	34
4. เงื่อนไขของการซึ่มูเลต และผลการซึ่มูเลตเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	50
4.1 เงื่อนไขของการซึ่มูเลต	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	56
4.2.1 กรณีชั้นวัสดุบาง	56
4.2.2 กรณีชั้นวัสดุหนา	61
4.2.2.1 กรณีการอบแห้งธรรมดา (โดยไม่มี การผสมวัสดุเป็นครั้งคราว)	61
4.2.2.2 กรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุขึ้นเป็นครั้งคราว	69
4.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรสำคัญบางตัวที่มีต่อการอบแห้ง	74
4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน	76
4.3.2 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด	105
4.3.3 อิทธิพลของความเร็วมร้อน	113
4.3.4 อิทธิพลของช่วงห่างของเวลาในการผสมวัสดุในเบค	119
5. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงาน	128
5.1 นิยามของออบเจกทีฟฟังก์ชันที่ใช้	128
5.2 ระบบของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านที่ศึกษา	130
5.3 ความคั่นลคและพลังงานที่ใช้เดินเครื่องอบแห้ง	133
5.4 เงื่อนไขการอบแห้งกับค่าออบเจกทีฟฟังก์ชันของการอบแห้งข้าวโพดในเชิงอุตสาหกรรม	139
5.4.1 อุณหภูมิลมร้อนที่ทางเข้าของเครื่องอบแห้ง	139
5.4.1.1 กรณีที่ไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุ	147
5.4.1.2 กรณีที่มีการผสมวัสดุกินเวลา 10 นาทีต่อครั้ง ..	147
5.4.2 ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ	148
5.4.2.1 กรณีที่ไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุ	157
5.4.2.2 กรณีที่มีการผสมวัสดุกินเวลา 10 นาทีต่อครั้ง ..	157
5.4.3 ความเร็วของลมร้อนผ่านเบค	158
5.4.3.1 กรณีที่ไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุ	167
5.4.3.2 กรณีที่มีการผสมวัสดุกินเวลา 10 นาทีต่อครั้ง ..	167
5.4.4 ช่วงห่างของเวลาในการผสมวัสดุในเบค	168
5.4.4.1 กรณีที่ไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุ	177
5.4.4.2 กรณีที่มีการผสมวัสดุกินเวลา 10 นาทีต่อครั้ง ..	178

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6. สรุป	179
6.1 ข้อสรุปหลัก	179
6.2 แนวทางงานวิจัยที่น่าสนใจ	182
บรรณานุกรม	183
ภาคผนวก	190
ก. คุณสมบัติของอากาศชั้นที่อุณหภูมิต่างๆ	191
ก.1 ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ	192
ก.2 ความชื้นสัมบูรณ์อิ่มตัวของอากาศชั้น	193
ก.3 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ	194
ก.4 ปริมาตรจำเพาะของอากาศชั้น และความหนาแน่นของอากาศชั้น ...	195
ข. ตัวอย่างการหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตร	200
ค. ตัวอย่างการคำนวณในบทที่ 5	202
ค.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าราคาพลังงานความร้อน, ไฟฟ้า และแรงงาน	203
ค.2 ตัวอย่างการคำนวณความดันลอคของลมร้อนผ่านเครื่องอุ่นลมร้อน	204
ง. อัลกอริทึมของวิธีรันจ์-คัตตา ออเคอร์ที่ 4 (Fourth order Runge-Kutta)	206
จ. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สมบูร์ณ	208
ฉ. สับรูทิน PSHS, LHVP	217
ช. ข้อมูลการขีมีเลข	220
ช.1 ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	220
ช.1.1 กรณีการอบแห้ง เบคบาง	221
ช.1.2 กรณีการอบแห้ง เบคหนา (ชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม.) .	224
ช.1.2.1 กรณีการอบแห้งธรรมดา	224
ช.1.2.2 กรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุชั้นในเบคทุกๆ	227
150 นาที	227
ช.2 อิทธิพลของตัวแปรสำคัญ ในการอบแห้ง เมล็ดข้าวโพด	230
ช.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน	230
ช.2.2 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด	246
ช.2.3 อิทธิพลของความเร็วมลร้อน	250
ช.2.4 อิทธิพลของช่วงห่างของเวลาในการผสมวัสดุในเบค	255
ประวัติผู้เขียน	260



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ค่าของตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ซีมีอุเลตชั้นวัสดุบางในหัวข้อ 4.1.1.1 ..	51
4.2	ค่าของตัวแปร และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ซีมีอุเลตการอบแห้งชั้นวัสดุหนา (40 ซม.) ในหัวข้อ 4.1.1.2.1	52
4.3	ค่าของตัวแปร และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ซีมีอุเลตการอบแห้งชั้นวัสดุหนา (40 ซม.) กรณีที่มีการผสมวัสดุขึ้นทุกๆ 150 นาที ในหัวข้อ 4.1.1.2.2 ...	53
4.4	ค่าของตัวแปร และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ซีมีอุเลตการอบแห้งข้าวโพคแห้งฝักในเชิงอุตสาหกรรมในหัวข้อ 4.1.2	54
4.5	ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ซีมีอุเลตการอบแห้งข้าวโพคแห้งฝักในเชิงอุตสาหกรรมในหัวข้อ 4.1.2	55
4.6	เปรียบเทียบผลการซีมีอุเลตกับผลในตัวอย่าง 6.1	60
4.7	วิเคราะห์ค่าเอฟ (F-test)	66
4.8	ผลการซีมีอุเลตการอบแห้งข้าวโพค เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน	104
4.9	ผลการซีมีอุเลตการอบแห้งข้าวโพค เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น	112
4.10	ผลการซีมีอุเลตการอบแห้งข้าวโพค เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมร้อน	118
4.11	ผลการซีมีอุเลตการอบแห้งข้าวโพค เพื่อศึกษาอิทธิพลของช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุขึ้นในเบค	126
5.1	ค่าของตัวคูณ (weighting factor) a_1 , a_2 และราคาต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ C_1 , C_2 และ C_3	129
5.2	อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบเครื่องอบแห้งที่ศึกษา	132
5.3	ค่าความดันลคของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านที่เงื่อนไขต่างๆ	134
5.4	ค่าความดันลคของลมร้อนผ่านเครื่องอุ่นอากาศที่เงื่อนไขต่างๆ	134
5.5	ความดันเทียบเท่าของชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบท่อ	135
5.6	ความดันลคของแต่ละระบบเครื่องอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ	136
5.7	พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ได้เดินเครื่องเป่าลมของระบบ	138
5.8	ผลการคำนวณค่าอบเจกทีฟฟังก์ชัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทางเข้าของลมร้อน (40, 50, 60 และ 70 °C) ที่ค่า a_1/a_2 ต่างๆกัน	146
5.9	ผลการคำนวณค่าอบเจกทีฟฟังก์ชัน สำหรับความชื้นวัสดุเริ่มต้นในหัวข้อ 4.3.2 และกรณี a_1/a_2 ต่าง ๆกัน	155

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
5.10	ผลการคำนวณค่าออกแบบเจดที่ฟังก์ชัน สำหรับความเร็วลมร้อนในหัวข้อ 4.3.3 และกรณี a_1/a_2 ต่างๆกัน	165
5.11	ผลการคำนวณค่าออกแบบเจดที่ฟังก์ชัน สำหรับช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบคต่างๆ ในหัวข้อ 4.3.4 สำหรับกรณี a_1/a_2 ต่างๆกัน	175
ก.1	ตารางไซโครเมตริก (Psychrometric Table) เปรียบเทียบระหว่างค่าของความชื้นไอน้ำอิ่มตัว, ความชื้นสัมบูรณ์ และความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ กับ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่ได้จากสับรูทีน PSHS และ LHVP กับจาก HANBOOK ตามลำดับ ในช่วง 0-100 °C (ผิดพลาดไม่เกิน 0.3%)	196



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการอบแห้งวัสดุขึ้นภายใต้เงื่อนไขของลมร้อนที่มีอุณหภูมิ, ความชื้น, และความเร็วคงที่	14
3.2	เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งซึ่งได้มาจากรูป 3.1	14
3.3	การกระจายความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้งในช่วงต่างๆ	16
3.4	ลักษณะการอบแห้งแบบไหลผ่านที่ปฏิบัติงานเป็นวงด	17
3.5	เครื่องอบแห้งแบบกล่องไหลผ่าน (through-circulation band dryer)	18
3.6	เครื่องอบแห้งไหลผ่านแบบถาด (through-circulation tray dryer)	18
3.7	เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบไหลผ่านชนิดวางตั้ง	19
3.8	เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุน และ เป่าลมเข้าผิวปลาย	19
3.9	เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุน และ เป่าลมเข้าผิวด้านข้าง	20
3.10	การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในวัสดุขึ้นที่ตำแหน่งใดๆ ของเบค เมื่อเวลาเพิ่มเพิ่มขึ้นตามลำดับ	21
3.11	เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านแทนด้วยถังกวน N ถังต่ออนุกรมกัน	22
3.12	ปรากฏการณ์ถ่ายเทที่เกิดขึ้นในถัง 'I' ใดๆ	23
3.13	แสดงความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุขึ้นบางประเภท (อุณหภูมิ 25 °C)	30
3.14	ผังการคำนวณของโปรแกรมหลัก	36
3.15	ผังการคำนวณของสับรูด RUNGKT	40
3.16	ผังการคำนวณของสับรูด RCZHS	45
3.17	ผังการคำนวณของสับรูด PSHS	46
3.18	ผังการคำนวณของสับรูด LHVP	48
4.1	การเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยกับเวลาอบแห้งที่ซีมูลेटได้ (กรณีเบคบาง) ..	57
4.2	ผลเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ระหว่างผลการซีมูลेटกับตัวอย่างการอบแห้ง เบคบาง	58
4.3	การเปรียบเทียบของความชื้นเฉลี่ยกับเวลาระหว่างผลการซีมูลेट กับผลการทดลอง (กรณีการอบแห้งชั้นมันสำปะหลังหนา)	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย (เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง) ที่ซึ่มุเลตได้กับผลการทดลองอบแห้งมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีลมร้อนไหลปกติ)	63
4.5	การเปรียบเทียบการกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ระหว่างผลการซึ่มุเลตกับผลการทดลอง (กรณีการอบแห้งปกติ)	64
4.6	ลักษณะการเรียงตัวของแบบต่างๆ ในเบคของเม็ควัสดูซึ่มุ รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์กับรูปทรงกลม	68
4.7	การเปรียบเทียบความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ระหว่างผลการซึ่มุเลตกับผลการทดลอง (กรณีการอบแห้งมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ที่มีการผสมวัสดุในเบคทุกๆ 150 นาที)	70
4.8	การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ระหว่างผลการซึ่มุเลตกับผลการทดลองมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ที่มีการผสมวัสดุในเบคทุกๆ 150 นาที	71
4.9	การเปรียบเทียบการกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา ระหว่างผลการซึ่มุเลตกับผลการทดลองอบมันสำปะหลังหนา 40 ซม. และมีการผสมวัสดุในเบคทุกๆ 150 นาที	72
4.10	แสดงกลไกการระเหยน้ำจากวัสดุซึ่มุที่ก่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง	
4.11	ความชื้นกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ในเบค ผลการซึ่มุเลตการอบแห้งข้าวโพด กรณีปกติที่ $w_{in} = 0.25 \text{ d.b.}$, $v_{bed} = 0.4634 \text{ m/s}$, $T_A = 60^\circ\text{C}$ และ $r = 0$ (เส้นกราฟ ENT., MID., EXT. และ AVE. หมายถึง บริเวณทางเข้า, บริเวณตอนกลาง, บริเวณปลายทางออก และผลเฉลี่ยของทั้งเบค)	77
4.12	ความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา ผลการซึ่มุเลตการอบแห้งข้าวโพด กรณีการผสมวัสดุในเบคทุกๆ 30 นาที, $w_{in} = 0.25 \text{ d.b.}$, $v_{bed} = 0.4634 \text{ m/s}$, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 0$	78
4.13	ความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา ผลการซึ่มุเลตการอบแห้งข้าวโพด กรณีมีการหมุนเวียนลมทั้ง $r = 1.0$, การผสมวัสดุในเบคทุกๆ 30 นาที, $w_{in} = 0.25 \text{ d.b.}$, $v_{bed} = 0.4634 \text{ m/s}$, $T_A = 60^\circ\text{C}$	79
4.14	อัตราการอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ ในเบค กับเวลาผลการซึ่มุเลตการอบแห้งข้าวโพดกรณีปกติ $w_{in} = 0.25 \text{ d.b.}$, $v_{bed} = 0.4634 \text{ m/s}$, $T_A = 60^\circ\text{C}$	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	อัตราการอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆในเบคกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, การผสมวัสดุในเบคทุกๆ 30 นาที	81
4.16	อัตราการอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆในเบคกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 1.0$, การผสมวัสดุในเบคทุกๆ 30 นาที	82
4.17	การกระจายของอุณหภูมิของวัสดุกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 0$	83
4.18	การกระจายของอุณหภูมิของวัสดุกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 0$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที	84
4.19	การกระจายของอุณหภูมิมวลและอุณหภูมิของลมร้อนกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 1.0$ และผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที	85
4.20	ความชื้นลมร้อนที่ทางออกจากเครื่องกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด เปรียบเทียบ 3 กรณีคือ I) กรณีปกติ, II) กรณี $r = 0$ และผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที และ III) กรณี $r = 1.0$ และผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$	86
4.21	อุณหภูมิลมร้อนขาออกจากเครื่องกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด เปรียบเทียบ 3 กรณี ดังรูป 4.20	87
4.22	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นลมร้อนกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด กรณี $T_A = 60^\circ\text{C}$, $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s ...	88
4.23	ความชื้นลมร้อนที่ทางออกจากเครื่องกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที, $T_A = 40^\circ\text{C}$	90
4.24	อุณหภูมิลมร้อนขาออกกับเวลา ผลการขึ้นมูลผลการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที, $T_A = 40^\circ\text{C}$	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.25	ความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 40^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0$ และ 1.0	92
4.26	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 40^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0$ และ 1.0	93
4.27	ความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 50^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0	94
4.28	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 50^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0	95
4.29	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ทั้งที่ไม่มีและมีการผสมวัสดุทุกา 30 นาที	96
4.30	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ทั้งที่ไม่มีและมีการผสมวัสดุทุกา 30 นาที	98
4.31	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 70^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0	100
4.32	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 70^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0	101
4.33	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0, 2.0$ และ 3.0	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.34	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุ ทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0, 2.0$ และ 3.0	107
4.35	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.225$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 3.0	108
4.36	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.225$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุ ทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 3.0	109
4.37	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.30$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0	110
4.38	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.30$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุ ทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0	111
4.39	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ	114
4.40	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุ ทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ	115
4.41	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ	116
4.42	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซีมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุ ทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.43	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 8,15,30 และ นาที่ เมื่อ $r = 0$	120
4.44	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 8,15,30 และ นาที่ เมื่อ $r = 0$	121
4.45	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 8,15,30 และ นาที่ เมื่อ $r = 0$	122
4.46	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 8,15,30 และ นาที่ เมื่อ $r = 0$	123
4.47	ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 8,15,30 และ นาที่ เมื่อ $r = 0$	124
4.48	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 8,15,30 และ นาที่ เมื่อ $r = 0$	125
5.1	ระบบของเครื่องอบแห้งที่ศึกษา	131
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอบเจคที่ฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ซึมุเลตในหัวข้อ 4.3.1) เมื่อ $T_A = 40, 50, 60$ และ 70°C โดยที่ $a_1/a_2 = 1/1$ และถือว่าไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุในเบค	140
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอบเจคที่ฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ซึมุเลตในหัวข้อ 4.3.1) เมื่อ $T_A = 40, 50, 60$ และ 70°C โดยที่ $a_1/a_2 = 1/9$ และถือว่าไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุในเบค	141
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอบเจคที่ฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ซึมุเลตในหัวข้อ 4.3.1) เมื่อ $T_A = 40, 50, 60$ และ 70°C โดยที่ $a_1/a_2 = 9/1$ และถือว่าไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุในเบค	142

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.1) เมื่อ $T_A = 40, 50, 60$ และ 70°C โดยที่ $a_1/a_2 = 1/1$ และถือว่าการผสมวัสดุในเบคกินเวลานาน 10 นาที/ครั้ง	143
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.1) เมื่อ $T_A = 40, 50, 60$ และ 70°C โดยที่ $a_1/a_2 = 1/9$ และถือว่าการผสมวัสดุในเบคกินเวลานาน 10 นาที/ครั้ง	144
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.1) เมื่อ $T_A = 40, 50, 60$ และ 70°C โดยที่ $a_1/a_2 = 9/1$ และถือว่าการผสมวัสดุในเบคกินเวลานาน 10 นาที/ครั้ง	145
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.2) สำหรับ $w_{in} = 0.30, 0.25, 0.225$ และ 0.20 d.b. ในกรณี $a_1/a_2 = 1/1$ และไม่เสียเวลาผสมวัสดุ	149
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.2) สำหรับ $w_{in} = 0.30, 0.25, 0.225$ และ 0.20 d.b. ในกรณี $a_1/a_2 = 1/9$ และไม่เสียเวลาผสมวัสดุ	150
5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.2) สำหรับ $w_{in} = 0.30, 0.25, 0.225$ และ 0.20 d.b. ในกรณี $a_1/a_2 = 9/1$ และไม่เสียเวลาผสมวัสดุ	151
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.2) สำหรับ $w_{in} = 0.30, 0.25, 0.225$ และ 0.20 d.b. ในกรณี $a_1/a_2 = 1/1$ และเสียเวลาผสมวัสดุครั้ง ละ 10 นาที	152
5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่ขี้มูลเลขในหัวข้อ 4.3.2) สำหรับ $w_{in} = 0.30, 0.25, 0.225$ และ 0.20 d.b. ในกรณี $a_1/a_2 = 1/9$ และเสียเวลาผสมวัสดุครั้ง ละ 10 นาที	153

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่มีมูลเลขในหัวข้อ 4.3.2) สำหรับ $w_{in} = 0.30, 0.25, 0.225$ และ 0.20 d.b. ในกรณี $a_1/a_2 = 9/1$ และเสียเวลาผสมวัสดุครั้งละ 10 นาที	154
5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่มีมูลเลขในหัวข้อ 4.3.3) เมื่อ $v_{bed} = 0.4634, 0.6594$ และ 0.8792 m/s โดย $a_1/a_2 = 1/1$ และถือว่าไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุในเบค	159
5.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่มีมูลเลขในหัวข้อ 4.3.3) เมื่อ $v_{bed} = 0.4634, 0.6594$ และ 0.8792 m/s โดย $a_1/a_2 = 1/9$ และถือว่าไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุในเบค	160
5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่มีมูลเลขในหัวข้อ 4.3.3) เมื่อ $v_{bed} = 0.4634, 0.6594$ และ 0.8792 m/s โดย $a_1/a_2 = 9/1$ และถือว่าไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุในเบค	161
5.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากข้อมูลที่มีมูลเลขในหัวข้อ 4.3.3) เมื่อ $v_{bed} = 0.4634, 0.6594$ และ 0.8792 m/s โดย $a_1/a_2 = 1/1$ และถือว่าไม่เสียเวลาในการผสมวัสดุในเบค	162
5.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากผลการซีมูลเลขในหัวข้อ 4.3.3) ที่ความเร็วลมร้อนผ่านเบคต่างกัน คือ $0.4634, 0.6594$ และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 1/9$ และเสียเวลาการผสมวัสดุเบคครั้งละ 10 นาที	163
5.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออบเจกทีฟฟังก์ชัน กับอัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง (จากผลการซีมูลเลขในหัวข้อ 4.3.3) ที่ความเร็วลมร้อนผ่านเบคต่างกัน คือ $0.4634, 0.6594$ และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 9/1$ และไม่เสียเวลาการผสมวัสดุเบคครั้งละ 10 นาที	164

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกเจกทีฟฟังก์ชัน กับส่วนกลับของช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบค (จากผลการซีมูลेटในหัวข้อ 4.3.4) ที่ความเร็วลมร้อน 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 1/1$ และไม่เสียเวลาผสมวัสดุ	169
5.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกเจกทีฟฟังก์ชัน กับส่วนกลับของช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบค (จากผลการซีมูลेटในหัวข้อ 4.3.4) ที่ความเร็วลมร้อน 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 1/9$ และไม่เสียเวลาผสมวัสดุ	170
5.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกเจกทีฟฟังก์ชัน กับส่วนกลับของช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบค (จากผลการซีมูลेटในหัวข้อ 4.3.4) ที่ความเร็วลมร้อน 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 9/1$ และไม่เสียเวลาผสมวัสดุ	171
5.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกเจกทีฟฟังก์ชัน กับส่วนกลับของช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบค (จากผลการซีมูลेटในหัวข้อ 4.3.4) ที่ความเร็วลมร้อน 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 1/1$ และเสียเวลาผสมวัสดุครั้งละ 10 นาที	172
5.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกเจกทีฟฟังก์ชัน กับส่วนกลับของช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบค (จากผลการซีมูลेटในหัวข้อ 4.3.4) ที่ความเร็วลมร้อน 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 1/9$ และเสียเวลาผสมวัสดุครั้งละ 10 นาที	173
5.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกเจกทีฟฟังก์ชัน กับส่วนกลับของช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบค (จากผลการซีมูลेटในหัวข้อ 4.3.4) ที่ความเร็วลมร้อน 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s ในกรณี $a_1/a_2 = 9/1$ และเสียเวลาผสมวัสดุครั้งละ 10 นาที	174
ก.1	แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart) ของความชื้นกับอุณหภูมิ สำหรับระบบ อากาศกับน้ำ ที่ความดันบรรยากาศ	199

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

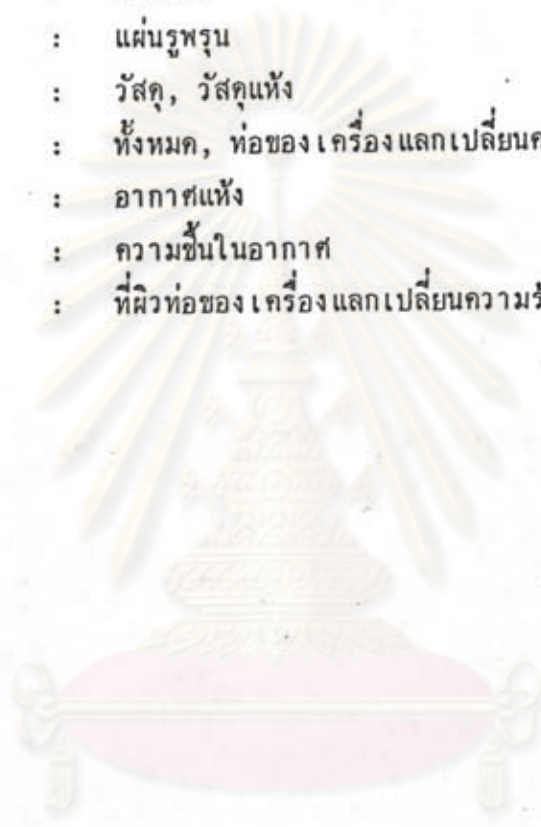
A	:	พื้นที่หน้าตัดของเบค (m^2)
A'	:	ค่า safety factor ของเครื่องเป่าลม (-)
a	:	พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตร (m^2/m^3)
a_1, a_2	:	ตัวกำหนดความสำคัญของราคาพลังงาน และราคาแรงงาน (-)
C_p	:	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($kcal/kg \text{ dry solid}/^\circ C$)
C_1, C_2, C_3	:	ค่าราคาของพลังงาน, ค่าไฟฟ้า (baht/kJ), และค่าแรงงาน (baht/sec)
c	:	ค่าคงที่ของสมการความชื้นสมดุล (-)
D, ϕ	:	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (m)
d_p	:	เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดวัสดุชิ้น (m)
E	:	เอนทัลปี (kJ)
E_1, E_2	:	พลังงานความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศจำเพาะ, พลังงานไฟฟ้าเดินเครื่องเป่าลมจำเพาะ ($kJ/kg \text{ product}$)
f	:	ค่าความต้านทานการถ่ายเท (Fanning friction factor)
$f[W_I^*]$:	อัตราการอบแห้งต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง/อัตราการอบแห้งที่ความเร็วคงที่
G	:	ค่าออกแบบที่ฟังก์ชันของค่าใช้จ่ายรวมของระบบเครื่องอบแห้ง, (baht/kg product), อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน ($kg \text{ dry air}/m^2/hr$)
g_c	:	ตัวแปลงหน่วยของมวลเป็นหน่วยของแรง (kg_{force}/kg_{mass})
H	:	ความชื้นสมบูรณ์ของลมร้อน ($kg \text{ water}/kg \text{ dry air}$)
h	:	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของลมร้อนไปยังวัสดุชิ้น ($kcal/m^2/hr$)
j	:	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการถ่ายเท (Friction factor)
k	:	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากวัสดุชิ้นไปยังลมร้อน ($kg \text{ water}/H/kg \text{ dry solid}/m^2/hr$)
k'	:	ค่าคงที่ของสมการความชื้นสมดุล (-)
L	:	ความสูงของเบค (m), ความยาวของท่อ (m)
N	:	จำนวนถังกวนสมบูรณ์ที่ใช้ซีเมนต์ (-)

n	:	ค่าคงที่ของสมการความชื้นสมดุล (-)
O_f	:	พื้นที่ช่องว่างของแผ่นรูปพรุน (-)
P	:	ความสามารถในการอบแห้งวัสดุ (Productivity) (kg product/hr)
$(-\Delta P)$:	ความดันลด (mmH ₂ O)
Q	:	ปริมาณพลังงานความร้อน (kJ)
Q_a, q_a	:	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลมร้อน (m ³ /min.)
R	:	อัตราการอบแห้ง (kg water/kg dry solid/hr)
r	:	อัตราการหมุนเวียนลมแห้ง (-)
T	:	อุณหภูมิ (°C)
t	:	เวลา (min.)
v	:	ความเร็วของลมร้อน (m/s)
v_H	:	ปริมาตรจำเพาะของลมร้อน (m ³ /kg dry air)
W	:	ความชื้นของวัสดุ (มาตรฐานแห้ง) (kg water/kg dry solid)
ϵ	:	อัตราส่วนช่องว่างของชั้นวัสดุ (-)
ρ	:	ความหนาแน่นของวัสดุแห้ง (kg dry solid/m ³)
λ	:	ความร้อนแฝงของการระเหยของความชื้น (kJ/kg water)
μ	:	ความหนืดของลมร้อน (kg/m ² /hr)
η	:	ประสิทธิภาพของเครื่องเป่าลม (-)
ϕ	:	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศชื้น (%)

ตัวห้อย (subscript)

A	:	ลมร้อน
ave	:	ค่าเฉลี่ยทั้ง เบค
BL, blower	:	เครื่องเป่าลม
b	:	เบค
bed	:	ผ่านเบค
c	:	วิกฤต
e	:	สมดุล, สมมูล
F, Fa	:	ลมใหม่

HX, heater	:	เครื่องอุ่นอากาศ
I	:	ถึงกวนไคฯ
in	:	ทางเข้า
L	:	ระบบท่อ
o	:	เริ่มต้น
out	:	ทางออก
P	:	แผ่นรูปทูน
S	:	วัสดุ, วัสดุแห้ง
T	:	ทั้งหมด, ท่อของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
V	:	อากาศแห้ง
W	:	ความชื้นในอากาศ
wall	:	ที่ผิวท่อของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย