การพัฒนาโปรแกรมการออกแบบเบื้องต้นและการจำลองการทำงาน ของเครื่องอบแห้งอุตสาหกรรม

นางสาวสุภาพร กำปั่นทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-425-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17138334

DEVELOPMENT OF A PRELIMINARY DESIGN AND SIMULATION PROGRAM FOR INDUSTRIAL DRYERS

Miss Supaporn Kumpunthong

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirements

for the degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic year 1996

ISBN 974-636- 425-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมการออกแบบเบื้องต้นและการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งอุตสาหกรรม
โดย	นางสาวสุภาพร กำปั่นทอง
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เจิดศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุภาพร กำปั่นทอง : การพัฒนาโปรแกรมการออกแบบเบื้องต้นและการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งอุตสาหกรรม (DEVELOPMENT OF A PRELIMINARY DESIGN AND SIMULATION PROGRAM FOR INDUSTRIAL DRYERS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล, 218 หน้า. ISBN 974-636-425-1

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบและจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งอุตสาหกรรม 5 ชนิด โปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยภาษา ซี พลัส พลัส (C++ language) ใช้หลักการโปรแกรมเชิงวัตถุ โปรแกรมนี้สามารถทำงานได้บนวินโดวส์ที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โปรแกรมประกอบด้วยส่วนของการออกแบบเครื่องจำนวน 8 เครื่อง และส่วนของการจำลองการทำงานจำนวน 6 เครื่อง นอกจากนี้ฐานข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุจำพวกเมล็ดพืช เคมี และอาหารจำนวน 40 รายการ ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานของโปรแกรม

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของโปรแกรมส่วนการออกแบบกับการใช้สมการดุลมวลสารรวมและสมการดุลพลังงานรวมแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมคำนวณได้อย่างถูกต้อง ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เป็นดังนี้ เครื่องอบแห้งแบบไหลขนานน้อยกว่า 0.0012 เปอร์เซนต์ แบบไหลสวนทางน้อยกว่า 0.007 เปอร์เซนต์ ส่วนของโปรแกรมการจำลองการทำงานเทียบกับสมการดุลมวลสารรวมและสมการดุลพลังงานรวม ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เป็นดังนี้ เครื่องแบบไหลขนานน้อยกว่า 0.05 เปอร์เซนต์ เครื่องแบบไหลสวนทางน้อยกว่า 0.08 เปอร์เซนต์

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี **ลายมือชื่อนิสิต** .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา** .....

ปีการศึกษา 2539 **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C616999 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: DESIGN/ SIMULATION/ INDUSTRIAL DRYERS/ OBJECT-ORIENTED PROGRAM
SUPAPORN KUMPUNTHONG : DEVELOPMENT OF A PRELIMINARY DESIGN AND SIMULATION PROGRAM FOR INDUSTRIAL DRYERS. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. TAWATCHAI CHARINPANITKUL, Dr.Eng. 218 pp.
ISBN 974-636-425-1.

The objective of this research is to develop a program for design and simulation of 5 types of industrial dryers. The program is developed in the C++ language using object-oriented programming technique. The developed program can be run on the Windows platform with a personal computer. The program can be employed to design 8 dryers and to simulate 6 dryers. A database of physical properties of 40 items of grains, chemicals and foods stuff was also developed to support the program.

The results of design part of the program was compared with the calculation results using Overall Mass Balance and Overall Heat Balance. It was found that the program can provide acceptable accuracy, namely, the relative error of cocurrent dryer is less than ±0.0012 %, the relative error of counter-current dryer less than ±0.007 %. Also, the simulation part of the program provides the relative error of cocurrent dryer less than ±0.05 %, counter-current dryer less than ±0.08 %.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต S. Kumpunthong.

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยด้วยดีมาตลอด ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ , อาจารย์ ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา และอาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช ที่ได้เสียสละเวลามาร่วมเป็นประธานกรรมการและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นั้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ. ที่นี้

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าเพื่อทำการวิจัยนี้ และขอบคุณพี่ น้องและเพื่อนๆ ทุกคนที่มีส่วนร่วมให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ให้การศึกษาและสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา รวมทั้งการสนับสนุนช่วยเหลือด้านต่างๆ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเรียบร้อย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง.

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ.

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ.

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฐ.

สารบัญสัญลักษณ์ ..... น.

บทที่

1. บทนำ.....1
2. การสำรวจผลงานวิจัยในอดีต.....3
3. ทฤษฎีการอบแห้ง.....6
4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....24
5. แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....38
6. อัลกอริทึมการคำนวณในโปรแกรม.....55
7. ลักษณะของโปรแกรม.....70
8. ผลการทดสอบโปรแกรมการออกแบบ.....81
9. ผลการทดสอบโปรแกรมการจำลองการทำงาน.....109
10. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....146

รายการอ้างอิง.....148

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในโปรแกรม 152

ภาคผนวก ข. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร 159

ภาคผนวก ค. อุณหภูมิขาออกของลมร้อน 164

ภาคผนวก ง. ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน 165

ภาคผนวก จ. ระเบียบวิธีรุงเง-คุตตา อันดับสี่ 167

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาพผนวก ฉ. ตัวอย่างการคำนวณโปรแกรมการอกแบบ.....170
ภาคผนวก ช. ตัวอย่างผลการคำนวณจากโปรแกรม 183
ภาคผนวก ซ. ตัวอย่างการคำนวณโปรแกรมการจำลองการทำงาน.....203
ประวัติผู้เขียน.....218

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

8.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ha ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ที่อุณหภูมิลมร้อน 250 องศาเซลเซียส ความชื้น 0.01 ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคขนาดต่างๆ ความเร็วลมร้อน 20 เมตร/วินาที อัตราส่วนช่องว่างของวัสดุ 0.7 84

8.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ha ของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิลมร้อน 250 องศาเซลเซียส ความชื้น 0.02 ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคขนาดต่างๆ ความเร็วลมร้อน 0.5เมตร/วินาที อัตราส่วนช่องว่างของวัสดุ 0.9 85

8.3 ตารางแสดงข้อมูลจากการปฏิบัติงานจริงและจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 86

8.4 ตารางแสดงข้อมูลจากการปฏิบัติงานจริงและจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 87

9.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน 110

9.2 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 115

9.3 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 120

9.4 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง 130

9.5 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน 139

9.6 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด 141

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ช.1 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน 184

ช.2 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง 187

ช.3 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดทรงกระบอกท่อเดียว....190

ช.4 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีห้องในแนวระดับหลายห้อง 193

ช.5 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม....196

ช.6 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (แบบจานหมุน) 198

ช.7 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....200

ช.1 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุน(ไหลขนาน)....207

ช.2 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุน(ไหลสวนทาง)....209

ช.3 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม....211

ช.4 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย....213

ช.5 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....215

ช.6 ผลการคำนวณจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....216

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของวัสดุภายในเครื่องอบแห้ง	9
3.2	รูปแสดงเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	9
3.3	รูปแสดงเครื่องอบแห้งแบบหมุน แสดงองค์ประกอบของเครื่อง	12
3.4	รูปแสดงกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	15
3.5	รูปแสดงลักษณะเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	17
3.6	รูปแสดงลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	20
3.7	รูปแสดงลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดทรงกระบอกท่อเดียว	22
3.8	รูปแสดงลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีห้องในแนวระดับหลายห้อง	22
4.1	รูปแสดงการเปลี่ยนสภาพของลมร้อนและวัสดุภายในเครื่องอบแห้ง	25
4.2	รูปแสดงการเปลี่ยนสภาพของลมร้อนและวัสดุภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด	30
4.3	รูปแสดงอัตราการอบแห้งที่นูนขึ้นด้านบนของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	37
4.4	รูปแสดงการกระจายปริมาณความชื้นในชั้นวัสดุตามเวลาของการอบแห้ง	37
5.1	รูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนและวัสดุภายในเครื่องอบแห้งแบบไหลขนานที่ความยาว Δx	39
5.2	รูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนและวัสดุภายในเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางที่ความยาว Δx	43
5.3	รูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนและวัสดุภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ความยาว Δx	46
5.4	รูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านชั้นวัสดุความสูง L ในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน	49
5.5	ลักษณะโครงสร้างของฐานข้อมูล	52
7.1	รูปแสดงหน้าต่างของโปรแกรมเพื่อเลือกโปรแกรมการออกแบบ	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.2	รูปแสดงหน้าต่างเลือกชนิดของวัสดุและชนิดของเครื่องโปรแกรมการออกแบบ	74
7.3	รูปแสดงหน้าต่างที่แสดงค่าของวัสดุและป้อนค่าที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ	75
7.4	รูปแสดงหน้าต่างที่ใช้ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับลมร้อนและวัสดุของเครื่องอบแห้ง	76
7.5	รูปแสดงหน้าต่างของผลลัพธ์	77
7.6	รูปแสดงหน้าต่างของคำสั่ง Using Help และวิธีการใช้งานโปรแกรม	78
7.7	รูปแสดงหน้าต่างเลือกชนิดของวัสดุและชนิดของเครื่องโปรแกรมการจำลองการทำงาน	79
7.8	รูปแสดงผลการคำนวณโดยกราฟจากโปรแกรมการจำลองการทำงาน	80
8.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับปริมาตรที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	91
8.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับอัตราการไหลของลมร้อนที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	91
8.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับอุณหภูมิของวัสดุขาออกที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน	92
8.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับปริมาตรเครื่องที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	92
8.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับอัตราการไหลของลมร้อนที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	93
8.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับอุณหภูมิของวัสดุขาออกที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	93
8.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นขาเข้าของลมร้อนกับปริมาตรเครื่องที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	94
8.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาออกของวัสดุกับอัตราการไหลของลมร้อนที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
8.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาออกของวัสดุกับปริมาตรเครื่อง ที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	95
8.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับอัตราการไหลของลมร้อน ที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	95
8.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับปริมาตรเครื่องที่คำนวณได้ จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	96
8.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่ คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	96
8.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของวัสดุกับอัตราการไหลของลมร้อน ที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	97
8.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของวัสดุกับปริมาตรเครื่องที่คำนวณได้ จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	97
8.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของลมร้อนกับปริมาตรที่คำนวณได้ จากเครื่องอบแห้งแบบหมุน	98
8.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับปริมาตรเครื่อง ที่ค	
8.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของวัสดุกับปริมาตรเครื่อง ที่คำนวณได้จากเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	99
8.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับปริมาตรเครื่องที่คำนวณได้ จากเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	99
8.19	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับพื้นที่เครื่อง ที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด	101
8.20	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับเวลาที่วัสดุ อยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

8.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับพื้นที่เครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....102

8.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....102

8.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับพื้นที่เครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....103

8.24 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัสดุกับพื้นที่เครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....103

8.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของชั้นวัสดุเวลาอยู่นิ่งกับเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....104

8.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับพื้นที่เครื่องและเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....106

8.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับพื้นที่เครื่องและเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....106

8.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นขาเข้าของลมร้อนกับพื้นที่เครื่องและเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....107

8.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาออกของวัสดุกับพื้นที่เครื่องและเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....107

8.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับพื้นที่เครื่องและเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....108

9.1 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน....111

9.2 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน....112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
9.3	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน	113
9.4	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน	114
9.5	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	116
9.6	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	117
9.7	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาะลม	118
9.8	รูแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	119
9.9	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	121
9.10	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	122

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.11 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 123

9.12 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย..... 124

9.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน..... 126

9.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของวัสดุกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน..... 126

9.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน..... 127

9.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นขาเข้าของลมร้อนกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน..... 127

9.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออก จากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลขนาน..... 128

9.18 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง..... 131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.19 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....132

9.20 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในลมร้อนกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....133

9.21 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....134

9.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นขาเข้าของวัสดุกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....136

9.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของวัสดุกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....136

9.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....137

9.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นขาเข้าของลมร้อนกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออกจากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....137

9.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นลมร้อนขาออก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นวัสดุขาออก จากโปรแกรมการจำลองการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง....138

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.27 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ผิวบนของชั้นวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน....140

9.28 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออกกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....142

9.29 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....143

9.30 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุกับความยาวของเครื่องอบแห้งที่ได้ผลจากโปรแกรมการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....144

สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

a	พื้นที่ผิวของวัสดุอบแห้งต่อปริมาตรของเครื่องอบแห้ง (ตร.ม./ลบ.ม.)
C	ความจุความร้อนจำเพาะ (กิโลแคลอรี/กก. องศาเซลเซียส)
c	อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ (กก.น้ำ/กก. วัสดุแห้ง)
d_p	เส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุอบแห้ง (เมตร)
G	อัตราการไหลของลมร้อนแห้ง (กก./ชม.ตรม.)
G_O	อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนแห้ง (กก./ชม.)
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (กิโลแคลอรี/ชม.ตร.ม. องศาเซลเซียส)
H	ความชื้นลมร้อน (กก.ไอน้ำ/กก. อากาศแห้ง)
i	เอนธัลพีของลมร้อน (กิโลแคลอรี/กก.)
k	ความนำความร้อนของก๊าซ (กิโลแคลอรี/ชม. เมตร องศาเซลเซียส)
L	ความสูงของชั้นวัสดุ (เมตร)
R_d	อัตราการอบแห้ง (กก./ชม.ตร.ม.)
S	พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง (ตารางเมตร)
t	อุณหภูมิของลมร้อน (องศาเซลเซียส)
tm	อุณหภูมิของวัสดุ (องศาเซลเซียส)
tmc	อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน (องศาเซลเซียส)
u	ความเร็วของลมร้อน (เมตร/วินาที)
V	ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง (ลูกบาศก์เมตร)
w	อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ (กก.น้ำ/กก.วัสดุแห้ง)
W_O	อัตราการป้อนวัสดุไร้ความชื้น (กก./ชม.)

สัญลักษณ์ภาษากรีก

λ	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (กิโลแคลอรี/กก.)
μ	ความหนืดของลมร้อน (กก./เมตร วินาที)
ρ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)

สัญลักษณ์ตัวห้อย

f	ลมร้อนหรือที่อุณหภูมิลมร้อน
H	อากาศชื้น
m	วัสดุหรือที่อุณหภูมิวัสดุ
S	วัสดุหรือที่อุณหภูมิวัสดุ
v	ไอน้ำ
w	น้ำหรือที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน
o	ภาวะอ้างอิง
1	ภาวะที่ทางเข้า
2	ภาวะที่ทางออก

สัญลักษณ์คำย่อ

กก.	กิโลกรัม
ชม.	ชั่วโมง
ม.	เมตร
ตร.ม.	ตารางเมตร
ลบ.ม.	ลูกบาศก์เมตร