การสร้างโมเดลสำหรับเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้น และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำแบบพ่นฝอยที่มีทิศทางการไหลของอากาศและหยดน้ำในทิศเดียวกัน

นาย ประธาน วงศ์ศริเวช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-525-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3 179 22690

MODELING OF SPRAY EVAPORATOR, HUMIDIFIER / DEHUMIDIFIER AND COOLING TOWER WITH CO-CURRENT FLOW OF AIR AND WATER DROPLETS

Mr. Pratarn Wongsarivej

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 1997

ISBN 974-637-525-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างโมเดลสำหรับเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นและเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ แบบพ่นฝอยที่มีทิศทางการไหลของอากาศและหยดน้ำในทิศเดียวกัน
โดย	นาย ประธาน วงศ์ศริเวช
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

..... กรรมการ
(ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)

ประธาน วงศ์ศริเวช : การสร้างโมเดลสำหรับเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้น และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำแบบพ่นฝอยที่มีทิศทางการไหลของอากาศและหยดน้ำในทิศเดียวกัน (MODELING OF SPRAY EVAPORATOR, HUMIDIFIER / DEHUMIDIFIER AND COOLING TOWER WITH CO-CURRENT FLOW OF AIR AND WATER DROPLETS) อ. ที่ปรึกษา : ศ. ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 190 หน้า. ISBN 974-637-525-3.

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องถ่ายเทมวลและความร้อนแบบพ่นฝอยที่มีทิศทางการไหลของอากาศและหยดน้ำในทิศเดียวกันที่สร้างขึ้น สามารถใช้ทำนายลักษณะสมบัติของอากาศและหยดน้ำ เช่น ขนาด อุณหภูมิ และความเร็วของหยดน้ำ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ณ ตำแหน่งความยาวต่างๆของเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ ทั้งกรณีที่หยดน้ำมีขนาดเดียวและกรณีที่หยดน้ำมีหลายขนาด และ/หรือทั้งกรณีที่การพ่นฝอยเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอตลอดแนวรัศมีของเครื่อง

จากการจำลองพฤติกรรมของเครื่องระเหยหยดน้ำในกรณีต่างๆ พบว่าขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายขนาดของหยดน้ำ ตลอดจนลักษณะการกระจายปริมาณน้ำตามแนวรัศมีของเครื่อง มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของอากาศและหยดน้ำ กล่าวคือ กรณีที่หยดน้ำมีขนาดเดียวทั้งที่การพ่นฝอยเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอตลอดแนวรัศมีของเครื่อง หยดน้ำที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีการลดลงของขนาด อุณหภูมิและความเร็วของหยดน้ำเร็วกว่า อีกทั้งส่งผลให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงพร้อมกับความชื้นที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่าหยดน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่า กรณีที่หยดน้ำมีหลายขนาดผสมกันทั้งที่การพ่นฝอยเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอตลอดแนวรัศมีของเครื่อง หยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแคบกว่าจะมีการลดลงของขนาดและอุณหภูมิของหยดน้ำเร็วกว่า อีกทั้งส่งผลให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงพร้อมกับความชื้นที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่าหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดกว้างกว่า กรณีที่พ่นฝอยหยดน้ำอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวรัศมีของเครื่อง หยดน้ำจะมีการลดลงของขนาดและอุณหภูมิของหยดน้ำเร็วกว่า อีกทั้งส่งผลให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงพร้อมกับความชื้นที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่ากรณีที่พ่นฝอยหยดน้ำอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดแนวรัศมีของเครื่อง นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้จำลองการทำงานของเครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ ในกรณีที่หยดน้ำมีขนาดเดียวและการพ่นฝอยเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวรัศมีของเครื่องอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต ประธาน วงศ์ศริเวช

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

#C717500 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: DROPLET / EVAPORATOR / HUMIDIFIER / DEHUMIDIFIER / COOLING TOWER

PRATARN WONGSARIVEJ : MODELING OF SPRAY EVAPORATOR, HUMIDIFIER/DEHUMIDIFIER AND COOLING TOWER WITH CO-CURRENT FLOW OF AIR AND WATER DROPLETS. THESIS ADVISOR : PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph.D. 190 pp. ISBN 974-637-525-3.

A mathematical model of the water spray mass and heat transfer equipment with co-current flow of air and water droplets have been developed to predict the properties of air and water droplets, such as drop size, temperature and velocity and air temperature and humidity at any position along the length of the evaporator, humidifier, dehumidifier and cooling tower. The model can handle the cases of monodisperse and polydisperse droplets as well as uniform and non-uniform sprays along the radius of the equipment.

Numerous simulation cases of the evaporator show that the average drop diameter, drop size distribution and the radial distribution of water spray affect the changes in properties of the air and water droplets. For monodisperse droplets with either uniform or non-uniform spray, the case of smaller drops shows a more rapid decrease in the diameter, temperature and velocity of the drops, thus causing a more rapid temperature decrease and humidity increase of the air than the case of larger drops. For polydisperse droplets with either uniform or non-uniform spray, the case of a narrower drop size distribution shows a more rapid decrease in the diameter and temperature of the drops, thus causing a more rapid temperature decrease and humidity increase of the air than the case of a broader drop size distribution. The case of uniform spray shows a more rapid decrease in the diameter and temperature of the drops, thus causing a more rapid air temperature decrease and humidity increase than the case of non-uniform spray. In addition, the present work has simulated the operation of the humidifier /dehumidifier and cooling tower for the cases of monodisperse droplets and uniform spray.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม –

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีตลอด และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาตรวจสอบความถูกต้อง ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพิ่มเติม

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฐ

สารบัญรูป ..... ฌ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ธ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 มูลเหตุจูงใจ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 1

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับความชื้น 4

2.2 ผลงานวิจัยการระเหยของหยดของเหลวบริสุทธิ์ 9

2.2.1 การระเหยของหยดเดี่ยว 10

2.2.1.1 การระเหยของหยดภายใต้สภาวะที่ไม่คำนึงถึงความเร็วสัมพัทธ์ 10

2.2.1.2 การระเหยของหยดภายใต้สภาวะที่มีความเร็วสัมพัทธ์ 11

2.2.1.2.1 อัตราการระเหย 13

2.2.1.2.2 การระเหยภายใต้สภาวะที่อากาศมีอุณหภูมิสูง 16

2.2.2 การระเหยของหยดแบบสเปรย์ 18

3. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้น และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ 24

3.1 Configuration ของระบบ 24

3.2 สมมุติฐาน (Assumption) 28

3.3 สมการดุลมวลสารและพลังงาน และสมการการเคลื่อนที่ 28

3.3.1 ดุลมวลสารในเฟสของอากาศ (Gas-phase water balance) 28
3.3.2 ดุลมวลสารรวม (Overall water balance) 29
3.3.3 ดุลพลังงานในเฟสของน้ำ (Water-phase energy balance) 29
3.3.4 ดุลพลังงานรวม (Overall energy balance) 30
3.3.5 ความเร็วของหยดของเหลว..... 31
3.4 การทำเป็นตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless) 32
3.5 สรุปสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 32
3.6 วิธีการคำนวณ..... 34
3.7 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... 36
3.7.1 กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนไม่มีความเร็วสัมพัทธ์..... 36
3.7.2 กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนมีความเร็วสัมพัทธ์..... 40
4. ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล..... 44
4.1 อิทธิพลของ Step size of integration 44
4.2 อิทธิพลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่อเครื่องเครื่องระเหยหยดน้ำ..... 49
4.2.1 หยดน้ำมีขนาดเดียว (Monodisperse) 49
4.2.1.1 หยดน้ำมีขนาด 50 ไมครอน..... 49
4.2.1.2 หยดน้ำมีขนาด 100 ไมครอน..... 49
4.2.1.3 หยดน้ำมีขนาด 200 ไมครอน..... 49
4.2.2 หยดน้ำมีหลายขนาด (Polydisperse) 57
4.2.2.1 หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-Normal,σ = 0.2..... 57
4.2.2.2 หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-Normal,σ = 0.4..... 57
4.2.2.3 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำ
กรณีที่สเปรย์กระจายแบบสม่ำเสมอ..... 66
4.3 อิทธิพลของการกระจายของสเปรย์ต่อเครื่องเครื่องระเหยหยดน้ำ..... 72
4.3.1 สเปรย์กระจายสม่ำเสมอ (Uniform Spray) 72
4.3.2 สเปรย์กระจายไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Spray) 72
4.3.2.1 สเปรย์มีการกระจายเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีของเครื่องและ
การกระจายขนาดของหยดน้ำเป็นแบบ monodisperse..... 72
4.3.2.2 สเปรย์มีการกระจายเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีของเครื่อง และ
การกระจายขนาดของหยดน้ำเป็นแบบ polydisperse,σ = 0.2..... 82

4.3.2.3 สเปรย์มีการกระจายเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีของเครื่องและ
การกระจายขนาดของหยดน้ำเป็นแบบ polydisperse,σ = 0.4..... 82
4.3.2.4 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำ
กรณีที่สเปรย์กระจายแบบไม่สม่ำเสมอ..... 87
4.3.2.5 ผลของการกระจายของสเปรย์แบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ..... 93
4.4 การจำลองเครื่องเพิ่มความชื้นอากาศ (Humidifier) 99
4.5 การจำลองเครื่องลดความชื้นอากาศ (Dehumidifier) 101
4.6 การจำลองเครื่องลดอุณหภูมิน้ำแบบสเปรย์ (Cooling tower) 102
5. สรุป..... 108
5.1 ข้อสรุปหลัก..... 108
5.2 แนวทางงานวิจัยที่น่าดำเนินการต่อ..... 110
รายการอ้างอิง..... 111
ภาคผนวก..... 113
ก. คุณสมบัติของอากาศแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ..... 114
ก.1 ความหนืดของอากาศแห้ง..... 114
ก.2 ความหนาแน่นของอากาศแห้ง..... 114
ก.3 ความนำความร้อนของอากาศแห้ง..... 114
ก.4 ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง..... 114
ข. คุณสมบัติของไอน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ..... 116
ข.1 ความหนืดของไอน้ำ..... 116
ข.2 ความหนาแน่นของไอน้ำ..... 116
ข.3 ความนำความร้อนของไอน้ำ..... 116
ข.4 ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ..... 116
ค. คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ..... 117
ค.1 ความหนืดของน้ำ..... 117
ค.2 ความหนาแน่นของน้ำ..... 117
ค.3 ความนำความร้อนของน้ำ..... 117
ค.4 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ..... 117
ค.5 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ..... 118
ง. คุณสมบัติของอากาศชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ..... 119

ง.1 ความหนืดของอากาศชื้น..... 119
ง.2 ความหนาแน่นของอากาศชื้น..... 119
ง.3 ความนำความร้อนของอากาศชื้น..... 119
ง.4 ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น..... 120
ง.5 ความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิของหยดน้ำต่าง ๆ ของอากาศชื้น..... 120
ง.6 ความร้อนจำเพาะชื้นที่ความชื้นต่าง ๆของอากาศชื้น..... 121
ง.7 ปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ ของอากาศชื้น..... 121
จ. อุณหภูมิกระเปาะเปียกและร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ..... 122
ฉ. ข้อมูลการกระจายขนาดของหยดน้ำ..... 123
ช. ดัชนีการระเหยและสัดส่วนของปริมาตรหยดน้ำที่ยังไม่ระเหย..... 124
ซ. ขนาด อุณหภูมิ และความชื้นเฉลี่ย..... 125
ฌ. วิธีรันท์-คัตตา ออเดอร์ที่ 4..... 127
ญ. อัลกอริทึมและผังการคำนวณ..... 129
ญ.1 อัลกอริทึมของโปรแกรมหลัก..... 129
ญ.2 ผังการคำนวณของโปรแกรม..... 130
ฐ. ตัวอย่างผลการจำลองเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาด
แบบ log-normal,σ=0.2 และ non-uniform spray..... 170
ฑ. ตัวอย่างการคำนวณ..... 185
ประวัติผู้เขียน..... 190

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	กลุ่มตัวแปรไร้มิติ.....	9
2.2	ข้อเสนอของสมการ Nu หรือ Sh	12
2.3	ค่าของอินทิกรัล $Nu\int[d(\mathrm{Re})]/(C_D\,\mathrm{Re}^{1.5})$	14
2.4	สัดส่วนการระเหยของหยดภายใต้สภาวะการลดความเร็วในการเคลื่อนที่ในอากาศแห้ง ณ อุณหภูมิ 193 °C.....	15
2.5	เปรียบเทียบผลงานวิจัยในอดีตกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่.....	20
3.1	ตัวอย่างจำนวนและการกระจายของหยดน้ำทั้งหมดที่เข้าสู่เครื่อง.....	27
3.2	ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนไม่มีความเร็วสัมพัทธ์โดยที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ=0,0.2 และ 0.4.....	37
3.3	ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนมีความเร็วสัมพัทธ์โดยที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ=0.4 และมีขนาดเฉลี่ย 50,100 และ 200 ไมครอน.....	41
4.1	เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องระเหยหยดน้ำ.....	45
4.2	อุณหภูมิของหยดน้ำที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องระเหยหยดน้ำ.....	45
4.3	ความเร็วของหยดน้ำที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องระเหยหยดน้ำ.....	46
4.4	อุณหภูมิของลมร้อนที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องระเหยหยดน้ำ.....	46
4.5	ความชื้นของลมร้อนที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องระเหยหยดน้ำ.....	47
4.6	ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray โดยมีขนาดเฉลี่ย 50,100 และ 200 ไมครอน.....	48
4.7	ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ=0.2,0.4 และ uniform spray โดยมีขนาดเฉลี่ย 200 ไมครอน.....	58
4.8	ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และแบบ log-normal,	

σ = 0.2,0.4 และ non-uniform spray โดยมีขนาดเฉลี่ย 200 ไมครอน..... 73

4.9 ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นของอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ กรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray โดยมีขนาดเฉลี่ย 200 ไมครอน..... 100

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สภาวะที่เกิดในเครื่องลดความชื้น.....	6
2.2	สภาวะที่เกิดในเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ.....	6
2.3	สภาวะการถ่ายเทความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงที่เกิดในทิศทางตรงกันข้าม..	7
2.4	แผนภูมิกระบวนการเพิ่มความชื้นแบบไหลสวนทาง.....	7
2.5	แผนภูมิของหยดที่ระเหย ณ อุณหภูมิสูง.....	17
3.1	ลักษณะของเครื่อง.....	25
3.2	พื้นที่หน้าตัดของเครื่อง.....	25
3.3	ลักษณะของวงแหวน (annulus)	25
3.4	ตัวอย่างการกระจายขนาดของหยดน้ำ.....	26
3.5	ผังการคำนวณอย่างง่ายของโปรแกรมหลัก.....	35
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการระเหยกับสัดส่วนของปริมาตรหยดน้ำที่ยังไม่ระเหยกรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal และไม่มีความเร็วสัมพัทธ์กับลมร้อน.....	39
3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการระเหยกับสัดส่วนของปริมาตรหยดน้ำที่ยังไม่ระเหยกรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ=0.4 และมีความเร็วสัมพัทธ์กับลมร้อน.....	43
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray.....	50
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับอุณหภูมิของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray.....	51
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับความเร็วของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray.....	52
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับอุณหภูมิของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray.....	53
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับความชื้นของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray.....	54
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อน	

ที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ uniform spray... 55
4.7 การกระจายขนาดของหยดน้ำแบบ log-normal และ uniform spray ที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องระเหยหยดน้ำ..... 60
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำขนาดต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.2 และ uniform spray..... 61
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับอุณหภูมิของหยดน้ำขนาดต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.2 และ uniform spray..... 62
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับความเร็วของหยดน้ำขนาดต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.2 และ uniform spray..... 63
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำขนาดต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.4 และ uniform spray..... 64
4.12 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ uniform spray..... 67
4.13 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ uniform spray. 68
4.14 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่ออุณหภูมิของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ uniform spray..... 69
4.15 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่อความชื้นของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ uniform spray..... 70
4.16 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่อกับร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ uniform spray. 71
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำในวงแหวนต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ non-uniform spray.. 75
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับอุณหภูมิเฉลี่ยของหยดน้ำในวงแหวนต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ non-uniform spray..... 76
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับความเร็วเฉลี่ยของหยดน้ำในวงแหวนต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ non-uniform spray..... 77
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับอุณหภูมิของลมร้อนในวงแหวนต่างๆ ที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ non-uniform spray. 78

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับความชื้นของลมร้อนในวงแหวนต่างๆ ที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ non-uniform spray. 79

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนในวงแหวนต่างๆ ที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ monodisperse และ non-uniform spray..... 80

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตรของหยดน้ำในวงแหวนต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.2 และ non-uniform spray..... 83

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวนของหยดน้ำในวงแหวนต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.2 และ non-uniform spray..... 84

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตรของหยดน้ำในวงแหวนต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.4 และ non-uniform spray..... 85

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวนของหยดน้ำในวงแหวนต่างๆ ที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal,σ = 0.4 และ non-uniform spray..... 86

4.27 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ non-uniform spray..... 88

4.28 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ non-uniform spray..... 89

4.29 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ non-uniform spray..... 90

4.30 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่อความชื้นเฉลี่ยของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ non-uniform spray..... 91

4.31 ผลของการกระจายขนาดของหยดน้ำต่อร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของลมร้อนที่สัมผัสกับหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal และ non-uniform spray..... 92

4.32 ผลของการกระจายของสเปรย์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำทีมตรก ระจายของสเปรย์แบบ uniform และ non-uniform..... 94

4.33 ผลของการกระจายของสเปรย์ต่ออุณหภูมิของหยดน้ำที่มีการกระจาย ของสเปรย์แบบ uniform และ non-uniform..... 95

4.34 ผลของการกระจายของสเปรย์ต่ออุณหภูมิของอากาศที่สัมผัสกับหยดน้ำ ที่มีการกระจายของสเปรย์แบบ uniform และ non-uniform..... 96

4.35 ผลของการกระจายของสเปรย์ต่อความชื้นของอากาศที่สัมผัสกับหยดน้ำ ที่มีการกระจายของสเปรย์แบบ uniform และ non-uniform..... 97

4.36 ผลของการกระจายของสเปรย์ต่อ%ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สัมผัส กับหยดน้ำที่มีการกระจายของสเปรย์แบบ uniform และ non-uniform..... 98

4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำ ในเครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ..... 103

4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับอุณหภูมิของหยดน้ำ ในเครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ..... 104

4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับอุณหภูมิของอากาศ ในเครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ..... 105

4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับความชื้นของอากาศ ในเครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ..... 106

4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเครื่องกับร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์ ของอากาศในเครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ..... 107

ญ.1 ผังการคำนวณของโปรแกรมหลัก..... 131

ญ.2 ผังการคำนวณของสับรูทีน FORM..... 137

ญ.3 ผังการคำนวณของสับรูทีน CHKTMP..... 140

ญ.4 ผังการคำนวณของสับรูทีน AVGD..... 141

ญ.5 ผังการคำนวณของสับรูทีน AVERGE..... 143

ญ.6 ผังการคำนวณของสับรูทีน FORM1..... 145

ญ.7 ผังการคำนวณของสับรูทีน DMTN..... 149

ญ.8 ผังการคำนวณของสับรูทีน WTBULB..... 150

ญ.9 ผังการคำนวณของสับรูทีน ITERAT..... 151

ญ.10 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน PP..... 152

ญ.11 ผังการคำนวณของสับรูทีน DERIVD..... 153

ญ.12 ผังการคำนวณของสับรูทีน DRYAIR..... 154

ญ.13 ผังการคำนวณของสับรูทีน VAPOR..... 155
ญ.14 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน HTCOEF..... 156
ญ.15 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน CH..... 156
ญ.16 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน HVP..... 157
ญ.17 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน HSA..... 158
ญ.18 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน VISP..... 159
ญ.19 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน DENP..... 160
ญ.20 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน THCDP..... 160
ญ.21 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน CPP..... 161
ญ.22 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน VISHA..... 162
ญ.23 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน VHA..... 163
ญ.24 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน DENHA..... 163
ญ.25 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน THCDHA. 164
ญ.26 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน CPHA..... 165
ญ.27 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน RE..... 165
ญ.28 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน CDVAL..... 166
ญ.29 ผังการคำนวณของฟังก์ชัน RUNGE..... 167
ญ.30 ผังการคำนวณของสับรูทีน CHECKV..... 168
ญ.31 ผังการคำนวณของสับรูทีน YINDEX..... 169

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_D : ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (-)

C_h : ค่าความจุความร้อนจำเพาะชื้น (kJ / kg K)

C_p : ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ / kg K)

C_v : ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ / kg K)

D : เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)

g : ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/sec^2)

G : อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (kg / m^2 sec)

H_a : ความชื้นของอากาศ (kg water/kg dry air)

h_c : ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (kJ / m^2 sec K)

H_p : ความชื้นของอากาศที่อุณหภูมิของหยดน้ำ (kg water/kg dry air)

k_d : ค่าความนำความร้อน (kJ / m sec K)

k_g : ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (kg / m^2 sec)

n : จำนวนหยดน้ำ (- / m^2 sec)

Δr : ความกว้างของวงแหวน (m)

r : รัศมีของเครื่อง (m)

R : แรงต้านทานการไหล (kg m /sec^2)

Re : ตัวเลขเรย์โนลด์ (-)

T : อุณหภูมิ (K)

V : ความเร็ว (m/sec)

V_r : ความเร็วสัมพัทธ์ (m/sec)

ΔZ : ความสูงของวงแหวน (m)

Z : ความสูงของเครื่อง (m)

λ : ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ / kg water)

ρ : ความหนาแน่น (kg/m^3)

μ : ความหนืด (kg / m sec)

α : กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $= \dfrac{C_{pp}\left(T_{a0} - T_{p0}\right)}{\lambda_p}$ (-)

β : กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $= \dfrac{\lambda_p}{C_h\left(T_{a0} - T_{p0}\right)}$ (-)

γ : กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $= \dfrac{h_c\left(T_{a0} - T_{p0}\right)}{\lambda_p G_{a0}}$ (-)

ตัวห้อย (subscript)

0 : สภาวะเริ่มต้น

a : ลมร้อน

ave : ค่าเฉลี่ย

f : ฟิล์ม

j : ลำดับที่ของวงแหวน นับจากจุดศูนย์กลางของเครื่อง

k : ลำดับที่ของช่วงขนาดหยดน้ำ

p : หยดน้ำ

r : จุดอ้างอิง

t : เครื่องระเหยหยดน้ำ หรือ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้นอากาศ หรือ เครื่องลดอุณหภูมิน้ำ

v : ไอน้ำ

x : แนวแกน x

y : แนวแกน y

ตัวยกกำลัง (superscript)

* : ตัวแปรไร้มิติ