

การจำลองการกำจัดความชื้นและการบอบไตออกไซด์พร้อมกันด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน



นางสาวพัชรี ชิมเจริญ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

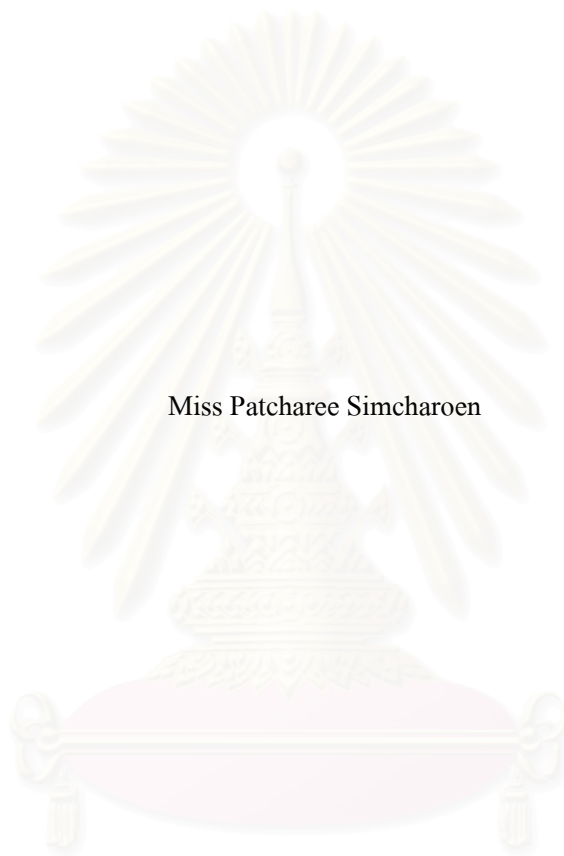
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5502-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF SIMULTANEOUS REMOVAL OF HUMIDITY AND CARBON DIOXIDE
USING ROTARY HONEYCOMB ADSORBER



Miss Patcharee Simcharoen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5502-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วย เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน
โดย	นางสาวพัชรี ชิมเจริญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.เหมื่อนเดือน พิศาลพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วรัญญู แต่ไพสิฐพงษ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุสิต)

พัชรี ชุ่มเจริญ : การจำลองการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วย
เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน (SIMULATION OF SIMULTANEOUS REMOVAL OF
HUMIDITY AND CARBON DIOXIDE USING ROTARY HONEYCOMB ADSORBER)
อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, 124
หน้า. ISBN: 974-17-5520-3.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์การกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน
ด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนโดยใช้สารดูดซับโมเลกุลเลซีฟ ชนิดสิบสามเอกซ์ เพื่อใช้ในการ
ศึกษาทำนายพฤติกรรมเชิงพลวัต สมรรถนะการทำงานของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน โดยพิจารณา
ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน และทำการประยุกต์แบบจำลองเพื่อ
ติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติของอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูด
ซับแบบรังผึ้งหมุน

จากการวิจัยในแบบจำลองได้ใช้ไอโซเทอมของสมดุลการดูดซับร่วมของความชื้นและ
คาร์บอนไดออกไซด์บนโมเลกุลเลซีฟ ชนิดสิบสามเอกซ์ จาก Shen และ Worek (1994) ที่ได้หาค่าส
ัมพันธ์จากสมการ Dubinin-Polanyi สำหรับความชื้น และสมการจากกฎของเฮนรี (Henry's Law)
สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนั้นพบว่า แบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมเชิงพลวัตและ
ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมกันของการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์
พร้อมกัน และมีสถานะเงื่อนไขที่สามารถให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์
พร้อมกันมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 45% ของประสิทธิภาพการดูดซับ ที่ความยาวโรเตอร์เท่ากับ 0.1
เมตร ความเร็วรอบหมุนโรเตอร์เท่ากับ 25 รอบ/ชั่วโมง และอุณหภูมิลมที่ใช้รีเจนเรชั่นเท่ากับ 423
องศาเคลวิน ในส่วนผลที่ได้รับจากแบบจำลองเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติของ
อากาศภายในห้องปรับอากาศพบว่า สามารถลดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์
อยู่ในระดับปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 122 ppm และความชื้นสัมพัทธ์ 16 %
ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 302 องศาเคลวิน

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา.....2546.....

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4371461721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : ROTARY HONEYCOMB ADSORBER / CARBON DIOXIDE / HUMIDITY /
DYNAMIC MODEL / MOLECULAR SIEVE-13X

PATCHAREE SIMCHAROEN : SIMULATION OF SIMULTANEOUS REMOVAL
OF HUMIDITY AND CARBON DIOXIDE USING ROTARY HONEYCOMB
ADSORBER. THESIS ADVISOR : PROF. WIWUT TANTHAPANICHKOON, Ph.D.
THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. BUNDHIT EUA-ARPORN, Ph.D., 124 pp.
ISBN: 974-17-5520-3.

In this thesis, a mathematical model for rotary honeycomb adsorber has been developed to remove humidity and carbon dioxide by using molecular sieve 13X adsorbent. The objective of this study is to predict the dynamic behavior and the performance of rotary honeycomb adsorber in the efficiency of simultaneous adsorbing humidity and carbon dioxide. Finally in this study, the model is further applied to keep track of the change of air properties related with time in the air-conditioned room which is installed with rotary honeycomb adsorber.

For simulating the sorption process, equilibrium adsorption equations (cosorption isotherms) of humidity and carbon dioxide are developed from the correlation with Dubinin-Polanyi equation for humidity and Henry's law equation for carbon dioxide by Shen and Worek (1994).

According to the research results, it is found that this model can predict the dynamic behavior and the phenomena of simultaneous heat and mass transfer of humidity and carbon dioxide adsorption. Operating condition used can provide similar adsorption efficiency for both humidity and carbon dioxide at approximately 45% ,with the rotor length of 0.1 m., the rotation speed of rotary at 25 rph and air regeneration temperature at 423 K. For the result of keeping track of the change of air properties related with time in the air-conditioned room, the model can reduce the level of carbon dioxide concentration to 122 ppm and relative humidity to 16 % at the room temperature of 302 K.

Department Chemical Engineering Student's signature

Field of study Chemical Engineering Advisor's signature

Academic year 2003 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร.วิญญู แต่ไพสิฐพงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมคูสิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ความสนใจและข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอรจิรา รุ่งอรุณแสงชัย ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และทางสถาบันวิจัยพลังงาน ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านเวลาในการวิจัย รวมทั้งเพื่อนที่ให้การกำลังใจมาตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและญาติผู้ใหญ่ที่ให้การกำลังใจและสนับสนุน ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉุ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2.1 ด้านการศึกษาจากการทดลอง.....	11
2.2.2 ด้านการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	12
บทที่ 3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน.....	15
3.1 หลักการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน.....	15
3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศ ภายในห้อง.....	30
3.3 อัลกอริทึมและแผนผังการคำนวณ.....	43
บทที่ 4 ผลการจำลองเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนและการวิเคราะห์ผล.....	47
4.1 การทดสอบความถูกต้องของไอโซเทอมของสมดุลการดูดซับบนโมเลกุลเลซีฟ 13X..	47
4.1.1 ความชื้น.....	48
4.1.2 คาร์บอนไดออกไซด์.....	52
4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน.....	56

4.3 ผลการจำลองการดูดซับของความชื้นและการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วย เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน.....	58
4.3.1 ผลการเข้าสู่สภาวะคงตัว(steady state)ของการดูดซับ.....	58
4.3.2 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความชื้นและการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน.....	63
4.3.3 ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์.....	78
4.4 ผลการจำลองการเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	94
ก. สูตรการคำนวณ.....	95
ข. ระเบียบวิธีของรุ่งเง-คูตดาอันดับ 4.....	101
ค. ข้อมูลรายละเอียดของสมการดูดซับร่วมของความชื้นและการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์.....	104
ง. ตารางข้อมูลผลจากกรณีการจำลองต่างๆ.....	118
จ. ข้อมูลของอากาศในบรรยากาศ.....	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญญัตราง

ณ

ตารางที่	หน้า
4.1 การเปรียบเทียบผลปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจากสหสัมพันธ์กับผลการทดลอง.....	49
4.2 การเปรียบเทียบค่าคงที่เฮนรี จากสหสัมพันธ์กับผลการทดลอง.....	53
4.3 ค่าพารามิเตอร์และลักษณะสมบัติของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนที่ใช้ในการจำลอง...	56
4.4 กรณีการจำลองต่างๆ.....	58
4.5 ผลของความเร็วรอบหมุนโรเตอร์กับประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและCO ₂	78
4.6 ผลของอุณหภูมิหมุนร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่นกับประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและCO ₂ ..	79
4.7 ผลของอุณหภูมิหมุนร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่นกับประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและCO ₂ ..	79
4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของห้องปรับอากาศและเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน.....	80
4.9 แสดงผลการจำลองคิดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้อง.	83
ค.1 ข้อมูลจากการคำนวณของสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิต่างๆ	104
ง.1 ผลจากกรณีการจำลองที่ 1.....	118
ง.2 ผลจากกรณีการจำลองที่ 2.....	119
ง.3 ผลจากกรณีการจำลองที่ 3.....	120
จ.1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพันธ์ของอากาศในบรรยากาศ.....	121

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ญ

รูปที่	หน้า
2.1	7
2.2	9
2.3	10
3.1	16
3.2	16
3.3	18
3.4	18
3.5	27
3.6	36
3.7	37
3.8	44
3.9	45
3.10	46
4.1	50
4.2	50
4.3	51
4.4	51
4.5	54

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ฉ

รูปที่	หน้า
4.6	เปรียบเทียบปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับจากผลการคำนวณกับการทดลอง ที่อุณหภูมิ 298 K จากสมดุลการดูดซับร่วมของความชื้นและ CO ₂ 54
4.7	เปรียบเทียบปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับจากผลการคำนวณกับการทดลอง ที่อุณหภูมิ 308 K จากสมดุลการดูดซับร่วมของความชื้นและ CO ₂ 55
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO ₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับร่วมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 42.9 %..... 55
4.9	ความชื้นและ CO ₂ เฉลี่ยของลมที่ออกจากโรเตอร์กับเวลา กรณี ความเร็วรอบ 3 rph, อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K, ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 60
4.10	ปริมาณความชื้นและ CO ₂ เฉลี่ยที่ถูกดูดซับกับเวลา กรณี ความเร็วรอบ 3 rph , อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 61
4.11	อุณหภูมิเฉลี่ยของลมที่ออกจากโรเตอร์กับเวลา กรณี ความเร็วรอบ 3 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 62
4.12	การกระจายอุณหภูมิลมกับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 3 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 65
4.13	การกระจายอุณหภูมิลมกับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 66
4.14	การกระจายอุณหภูมิลมกับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 25 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 67
4.15	การกระจายอุณหภูมิโรเตอร์(ผนังรังผึ้ง) กับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 3 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 68
4.16	การกระจายอุณหภูมิโรเตอร์(ผนังรังผึ้ง) กับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 69
4.17	การกระจายอุณหภูมิโรเตอร์(ผนังรังผึ้ง) กับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 25 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 70
4.18	การกระจายของอุณหภูมิลมที่ทางออกกับมุมมองสาขาของโรเตอร์ กรณีความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m..... 72
4.19	การกระจายของความชื้น, CO ₂ ของลมที่ทางออกของโรเตอร์กับมุมมองสาขาของโรเตอร์ กรณีความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m 73

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ฉ

รูปที่	หน้า
4.20 การกระจายของปริมาณความชื้น, CO ₂ ที่ถูกดูดซับและอุณหภูมิโรเตอร์ที่ทางออกด้ากับมุมมองสาขาของโรเตอร์ กรณีความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m.....	74
4.21 การกระจายของความชื้นที่ทางออกของโรเตอร์กับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ณ ความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m	75
4.22 การกระจายของ CO ₂ ที่ทางออกของโรเตอร์กับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ณ ความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m	75
4.23 การกระจายของอุณหภูมิของลมที่ทางออกกับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m	76
4.24 การกระจายของความชื้น, CO ₂ ของลมที่ทางออกกับมุมมองสาขาของโรเตอร์ ที่อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m	77
4.25 การกระจายของปริมาณความชื้น,CO ₂ ที่ถูกดูดซับที่ทางออกกับมุมมองสาขาของโรเตอร์ กรณี ความเร็วรอบ 3 rph ,อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K,ความยาวโรเตอร์ 0.2 m.....	77
4.26 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องกับเวลา ที่อุณหภูมิลมที่ใช้รีเจเนเรชั่น 353 K.....	85
4.27 อุณหภูมิและความเข้มข้นคาร์บอน ไดออกไซด์ภายในห้องกับเวลา ที่อุณหภูมิลมที่ใช้รีเจเนเรชั่น 353 K.....	86
ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความเข้มข้น CO ₂ 0 ppm	108
ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความเข้มข้น CO ₂ 350 ppm	109
ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความเข้มข้น CO ₂ 500 ppm	110
ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและCO ₂ ณ ความเข้มข้นCO ₂ 1000 ppm	111
ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและCO ₂ ณ ความเข้มข้นCO ₂ 1500 ppm	112
ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO ₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0 %.....	113

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

๕

รูปที่		หน้า
ค.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO ₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 18 %.....	114
ค.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO ₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 42.9 %.....	115
ค.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO ₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 63 %.....	116
ค.10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO ₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO ₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO ₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 90 %.....	117
จ.1	อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในบรรยากาศกับเวลา.....	122
จ.2	ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในบรรยากาศกับเวลา.....	123



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด	$[m^2]$
A_R	=	พื้นที่หน้าตัดห้อง	$[m^2]$
a	=	พื้นที่จำเพาะเชิงปริมาตร	$[m^2/m^3]$
CO_2	=	คาร์บอนไดออกไซด์	$[-]$
C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะ	$kJ/(kg_{da} \cdot K)$
d_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก	$[m]$
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์	$[m]$
E	=	เอนทัลปี	$[kJ/kg]$
G	=	ความเร็วเฉลี่ยเชิงมวลของอากาศแห้ง	$kg_{da}/(m^2 \cdot s)$
H	=	ความชื้นสัมบูรณ์ หรือ สัดส่วนมวลของไอน้ำต่ออากาศแห้ง	$[kg/kg_{da}]$
HS_{human}	=	อัตราผลิตความร้อนจากการหายใจออกของคน	$[kJ/s]$
HS_{aircon}	=	อัตราผลิตความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ	$[kJ/s]$
HS_{OTTV}	=	อัตราผลิตความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคาร	$[kJ/s]$
ΔH_{ads}	=	ค่าความร้อนของการดูดซับ	$[kJ/kg_{adsorbate}]$
h_c	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(ผ่านฟิล์ม)	$[kJ/m^2 \cdot K \cdot s]$
k_c	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล(ผ่านฟิล์ม)	$[kg_{\Delta H}/m^2 \cdot s]$
k_{cond}	=	ค่าการนำความร้อนของอากาศ	$[w/m \cdot K]$
K_R	=	จำนวนห้องสมบูรณ์ที่ใช้	$[-]$
L_R	=	ความยาวของห้อง	$[m]$
L	=	ความยาวโรเตอร์ หรือ ความยาวท่อ	$[m]$
M, M_{slot}	=	จำนวนท่อ	$[-]$
MW	=	มวลโมเลกุล	$[kg/kgmol]$
N	=	จำนวนเซลล์สมบูรณ์ที่อยู่ใน 1 ท่อ	$[-]$
n	=	ความเร็วรอบหมุนโรเตอร์(รอบ/ชั่วโมง)	$[rph]$
Nu	=	เลขเนสเชล์ท ($Nu = h \cdot d_h / k_{cond}$)	$[-]$
Pr	=	เลขแพรนคัล ($Pr = C_p \cdot \mu / k_{cond}$)	$[-]$
$S_{C, human}$	=	อัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจของคน	$[kg_c/s]$

$S_{v, human}$	= อัตราการผลิตความชื้นจากการหายใจของคน	[kg/s]
$S_{v, aircon}$	= อัตราการควบแน่นความชื้นเป็นน้ำโดยเครื่องปรับอากาศ	[kg/s]
R	= ค่าคงที่ของก๊าซ (= 8.314)	[kJ/kmol.K]
RH	= ความชื้นสัมพัทธ์	[%]
R_{ads}	= อัตราการดูดซับ	[kg _{adsorbate} /kg _{adsorbent} .s]
R_{des}	= อัตราการคายการดูดซับ	[kg _{adsorbate} /kg _{adsorbent} .s]
Re	= เลขเรย์โนลด์ ($Re = \rho V d_h / \mu$)	[-]
T	= อุณหภูมิ	[K]
t	= เวลา	[sec]
t_f	= ช่วงเวลาการจำลองทั้งหมด	[sec]
Δt	= ช่วงเวลาการอินทิเกรต	[sec]
V	= ความเร็ว	[m/s]
V_{HY}	= ปริมาตรจำเพาะของอากาศ	[m ³ /kg _{da}]
W	= ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อสารดูดซับ	[kg _{adsorbate} /kg _{adsorbent}]
Y	= ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ หรือสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออากาศแห้ง	[kg _C /kg _{da}]
Z	= ความยาวไร้มิติหน่วย	[-]
λ_0	= ความร้อนแฝงการระเหยของน้ำที่ 273 K	[kJ/kg _w]
ρ	= ความหนาแน่น	[kg/m ³]
μ	= ความหนืด	[kg/m.s]
θ	= มุมองศาของโรเตอร์	[degree]
ε	= อัตราส่วนช่องว่างของรังผึ้ง	[-]

อักษรกำกับล่าง

a	= อากาศ หรือ ก๊าซชื้น
ads	= การดูดซับ
C	= คาร์บอนไดออกไซด์
C(Lq)	= คาร์บอนไดออกไซด์ (ของเหลว)
c	= เซลล์

des	=	การคายการดูดซับ หรือ รีเจนเรชั่น
da	=	อากาศแห้ง คือ อากาศที่ปราศจากความชื้นและ CO ₂
in	=	สภาวะที่ทางเข้า
i	=	เซลล์ใดๆ
j	=	ท่อใดๆ
k	=	ห้องใดๆ
R	=	ห้อง
s	=	เฟสของแข็ง
sat	=	สถานะอิ่มตัว
sb	=	สารดูดซับ
sh	=	แผ่นไฟเบอร์
ss	=	ผนังท่อที่ประกอบด้วย สารดูดซับและแผ่นไฟเบอร์
w	=	น้ำ
v	=	ไอน้ำ
0	=	เริ่มต้น

อักษรกำกับบน

°	=	อุณหภูมิอ้างอิง(= 273 K)
---	---	---------------------------

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลภาวะอากาศนับเป็นปัญหาของมลภาวะสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในโลกมานานแล้ว ในศตวรรษที่ผ่านมามีความได้มุ่งเน้นการศึกษาวิจัยไปที่การควบคุมมลภาวะอากาศที่เกิดขึ้นภายนอกอาคาร (Outdoor air) และในระยะเวลา 15 ปีที่ผ่านมาได้มีการให้ความสนใจและให้ความสำคัญในการศึกษาวิจัยต่อมลภาวะอากาศที่เกิดขึ้นภายในอาคารหรือคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor air quality ;IAQ) มากขึ้น(Rajnish,2002) เนื่องจากในเมืองหลวงที่สำคัญของประเทศต่างๆมีการก่อสร้างอาคารสูงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และอาคารเหล่านี้มักได้รับการออกแบบเพื่อป้องกันแดด ลม ฝน ฝุ่น และมลภาวะอากาศจากภายนอก มนุษย์จะใช้เวลาส่วนใหญ่ 80-85% อยู่ภายในอาคาร (Hansen, 1991และ Turiel, 1985) เพื่อใช้เป็นที่อยู่อาศัยและเป็นสำนักงานสำหรับทำงานร่วมกัน จึงมีการนำระบบปรับอากาศมาใช้กับอาคารเพื่อให้ความสบายแก่ผู้ที่อยู่อาศัย แต่จากที่มนุษย์เราให้ความสำคัญเรื่องการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศของอาคาร จึงเป็นผลให้มีการสร้างอาคารให้ปิดมิดชิดมากขึ้นเพื่อลดการรั่วไหลของความร้อนหรือความเย็นไปกับอากาศที่ระบายออกจากอาคาร และจากการกำหนดค่ามาตรฐานจำกัดให้ปริมาณอากาศจากภายนอกที่จะเข้าสู่อาคารเท่ากับปริมาณ 5 ลบ.ฟุต/นาทีก่อน จาก ASHRAE Standard 62-1981(ASHRAE; American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineering) (Kosar,1998) ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงของการเจ็บป่วยต่อสุขภาพของมนุษย์อันเนื่องจากคุณภาพของอากาศภายในอาคารที่ใช้หายใจ ถ้าก่อให้เกิดความเจ็บป่วยลักษณะอาการต่างๆ ดังนี้ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ระบายท้องและคอ ระบายเคืองตา เมื่อยล้า ระบายเคืองผิวหนัง อาการเหล่านี้ถ้าเกิดขึ้นกับพนักงานที่ทำงานในสถานทำงานเดียวกันตั้งแต่ร้อยละ 20 ขึ้นไป และทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยนานเป็นเวลาดั้งแต่ 2 สัปดาห์ อาการเหล่านี้หายไปหลังจากเลิกทำงานสามารถวินิจฉัยได้ว่า เป็นโรคที่เกิดจากการทำงานภายในอาคาร (Sick Building Syndrome : SBS) (Hansen,1991) ซึ่งอาการเจ็บป่วยที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานลดลงและอาจเป็นสาเหตุของการขาดงานบ่อยๆได้ ต่อมาได้มีการปรับปรุงค่ามาตรฐานให้มีปริมาณอากาศจากภายนอกที่จะเข้าสู่อาคารเป็น 20 ลบ.ฟุต/นาทีก่อน จาก ASHRAE Standard 62-1989(Kosar,1998) เพื่อเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคที่เกิดจากการทำงานภายในอาคาร (Seppanen, et.al, 2002) แต่ก็จะเป็นการเพิ่มภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ

ระบบปรับอากาศนับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาคาร มีหน้าที่หลักในการควบคุม อุณหภูมิและความชื้นของอากาศในอาคาร ภาระหลักของระบบทำความเย็นที่เกิดที่คอยล์เย็นของ ระบบปรับอากาศคือภาระที่เกิดจากการลดความชื้นในอากาศที่ไหลผ่าน ในบางครั้งอาจมากกว่า 50%ของภาระทั้งหมด(ทองเกียรติและคณะ,2545) ดังนั้นการลดความชื้นในอากาศก่อนเข้าสู่คอยล์ เย็นจะช่วยลดภาระในการทำความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยลดปัญหา ของคุณภาพอากาศภายในอาคารอันเนื่องมาจากความชื้นค้างที่มีรายงานถึงการก่อกำเนิดแบคทีเรีย และเชื้อราในระบบปรับอากาศว่า เมื่อมีการลดความชื้นจะสามารถลดอัตราการเกิดเชื้อแบคทีเรีย และราได้ 20-70% (ทองเกียรติและคณะ,2545) วิธีการลดความชื้นในอากาศวิธีหนึ่งที่สามารถทำ ได้คือ วิธีดูดคายความชื้น(Sorption dehumidifying) ผลของการดูดความชื้นออกจากอากาศโดยตรง จะทำให้ปริมาณน้ำในอากาศลดลงและความชื้นสัมพัทธ์ลดลงด้วย

เมื่อไม่นานมานี้การพัฒนาปรับปรุงในเทคโนโลยีสารดูดความชื้นได้รับความสนใจอย่าง มากในการนำมาใช้กับระบบปรับอากาศสมัยใหม่ (Harriman และ Kosar, 1990) สารดูดความชื้นที่ มีการใช้งานแบ่งเป็นสารดูดความชื้นแบบของเหลว ได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ และสารดูดความชื้นของ แข็ง ได้แก่ ซิลิกาเจล และโมเลกุลวลาซีฟ สำหรับเครื่องดูดซับความชื้นแบบรังผึ้งหมุน(Rotary honeycomb adsorber) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่น่าสนใจที่มีการนำมาใช้กับระบบปรับอากาศเนื่องจาก โครงสร้างรังผึ้งมีลักษณะที่เหมาะสม จะมีความสามารถในการดูดซับ น้ำหนักเบา ความดันตก ครอบต่ำ และสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา นอกจากนี้แล้วสารดูดความชื้นยังสามารถดูด ซับสารมลพิษอากาศภายในอาคารได้ด้วยซึ่งเป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคาร

คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่เกิดจากขบวนการเผาผลาญในร่างกายมนุษย์แล้วถูกปล่อย ออกมานับว่ามีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่ามลพิษอื่นที่เกิดขึ้นภายในอาคาร นอกจากนี้ยังถูกจัดให้ เป็นดัชนีบ่งบอกสภาพการระบายอากาศภายในห้อง (Vaculik,1991)ซึ่งถ้าห้องใดมีการระบายอากาศ ไม่ดีเพียงพอ มีผู้อยู่อาศัยจำนวนมาก มีอัตราการไหลเวียนของอากาศในอัตราต่ำ ทำให้มีการ สะสมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากขึ้น อาจส่งผลให้ผู้ที่อยู่อาศัยภายในห้องรู้สึกวิงเวียน ศีรษะและหายใจลำบาก (Turiel, 1985) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการ ดูดซับในการกำจัดความชื้นและสารมลพิษอากาศภายในอาคาร ซึ่งเป็นเรื่องที่จะทำการศึกษาในที่นี้ ด้วยการจำลองการใช้เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนกับการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ พร้อมกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน
2. เพื่อทำนายพฤติกรรมเชิงพลวัตและสมรรถนะการทำงานของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนภายใต้สภาวะต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ดัดแปลงเพิ่มเติมแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถทำนายสมรรถนะการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน
2. ทำการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยการเปรียบเทียบผลของค่าที่ทำนายกับข้อมูลการทดลองที่มีการเผยแพร่ของการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วยเครื่องดูดซับความชื้นแบบรังผึ้งหมุน
3. ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน
 - ความเร็วรอบหมุน ในช่วง 3.0-28 รอบ/ชั่วโมง
 - ความยาวของโรเตอร์ ในช่วง 0.1-0.25 เมตร
 - อุณหภูมิลมที่ใช้รีเจนเรชั่น ในช่วง 60-150 องศาเซลเซียส
4. สภาวะเริ่มต้นของการจำลอง ได้แก่
 - ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้าด้านการดูดซับ 1100 ppm
 - ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ทางเข้าด้านรีเจนเรชั่น 350 ppm
 - อุณหภูมิลมทางเข้าด้านการดูดซับ 26.7°C และ ความชื้นสมบูรณ์ $0.0114 \text{ kg}_v/\text{kg}_{d_g}$
5. ทำการประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ เพื่อใช้ศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติของอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตสามารถนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมในสถานะของสถานะไม่คงตัว (Transient state) และสถานะคงตัว (Steady-state) ของการดูดซับและการคายการดูดซับ ด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน และหาสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. รวบรวมและศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดความชื้นและคาร์บอน ไดออกไซด์ ด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน
2. หาสมการคณิตศาสตร์ของการดูดซับของความชื้นและคาร์บอน ไดออกไซด์พร้อมกัน โดยใช้เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน
3. ดัดแปลงพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ขึ้นด้วยภาษาโปรแกรม FORTRAN
4. ทำการทดสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยการเปรียบเทียบผลของค่าที่ทำนายกับข้อมูลการทดลองที่มีการเผยแพร่ของการดูดความชื้นและคาร์บอน ไดออกไซด์พร้อมกัน
5. ทำการทำนายปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน
6. วิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้น
7. สรุปผลการทดลองและจัดทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ความรู้พื้นฐานการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ของการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของของเหลวหรือก๊าซ โดยเกิดจากการที่สารสองชนิดมาสัมผัสกันทำให้โมเลกุลหรืออะตอมของสารกระทำกันที่ผิวสัมผัส มีความเข้มข้นเฉพาะบริเวณระหว่างผิวสัมผัสนั้น โดยทั่วไปการดูดซับมักเกิดขึ้นเมื่อสารใดสารหนึ่งเป็นของแข็ง ถ้าพิจารณาจากระบบที่ประกอบด้วยก๊าซและของแข็ง เรียกก๊าซว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่สามารถดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซไว้ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) จากนั้นเมื่อโมเลกุลก๊าซที่ถูกดูดซับไว้หลุดจากผิวของสารดูดซับเข้าสู่เฟสก๊าซหรือของเหลว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การคายกลับของการดูดซับ (Desorption) สำหรับกระบวนการนำตัวถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ เพื่อสามารถนำเอาสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ เรียกว่า กระบวนการรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration processing) อาจกระทำได้โดยการใช้ความร้อน (Thermal swing regeneration) หรือการลดความดัน (Pressure swing regeneration) นอกจากนี้การดูดซับบนผิวของแข็งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายใต้สภาวะนิ่ง (Static condition) คือ สารดูดซับและตัวถูกดูดซับอยู่นิ่ง และสภาวะเคลื่อนที่ (Dynamic condition) คือ สารดูดซับและตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน

การดูดซับสามารถจำแนกได้โดยอาศัยธรรมชาติของการเกิดแรงการดูดซับซึ่งมีความแตกต่างกันอยู่ที่พันธะระหว่างโมเลกุลก๊าซกับสารดูดซับ เป็น การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และ การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) (Mantell, 1951) โดย การดูดซับทางกายภาพ นั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดพันธะกับผิวสารดูดซับด้วยแรงอ่อนๆ เป็นแรงชนิดเดียวกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล วันเดอร์วาลส์ (Vander Waals Force) โดยความแรงของแรงดึงดูดขึ้นอยู่กับความถี่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับและสารดูดซับ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของสารดูดซับไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้ในการที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจับบนผิวของแข็งสามารถดูดซับโมเลกุลได้หลายชั้นซ้อนกัน สำหรับ การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและสารดูดซับมีการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ที่เกิดเรียกว่า พันธะเคมี เกิดเป็นสารประกอบใหม่ เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะคงอยู่ในรูปนั้นไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปได้ การดูดซับโดยวิธีนี้จะความแรงเนื่องจาก

แรงดึงดูดทางพันธะเคมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของการดูดซับทางกายภาพ ชั้นของการดูดซับทางเคมีหนาเพียงชั้นเดียวเพราะโมเลกุลของของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับต้องสัมผัสกัน โดยตรง เพื่อใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน

ความแตกต่างกันระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่

1. ความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) เป็นความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา เมื่อก๊าซถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ จะมีค่าความร้อนที่เกิดขึ้นพอกับความร้อนแฝงของการระเหย ส่วนการดูดซับทางเคมีจะมีค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ $10^4 - 10^5$ แคลอรีต่อโมล

2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับ การดูดซับทางกายภาพสามารถจัดออกผิวของสารดูดซับด้วยวิธีการลดความดันที่อุณหภูมิเดียวกับการดูดซับโดยโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลง แต่การดูดซับทางเคมีสามารถทำได้ยาก

3. จำนวนชั้นที่ถูกดูดซับ การดูดซับทางกายภาพ สามารถเกิดขึ้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวซ้อนกันหลายชั้น ส่วนการดูดซับทางเคมีมักเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียว บางกรณีการดูดซับทางกายภาพอาจเกิดขึ้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมี

4. อุณหภูมิการดูดซับ ในระบบก๊าซ-ของแข็ง การดูดซับทางกายภาพเกิดภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ขณะที่การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อก๊าซสามารถเกิดพันธะเคมีกับผิวสารดูดซับ

5. พลังงานเร่ง (Activation energy) การดูดซับทางเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ทันทีด้วยการอาศัยพลังงานเร่ง ส่วนการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้อย่างเร็วโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานเร่ง

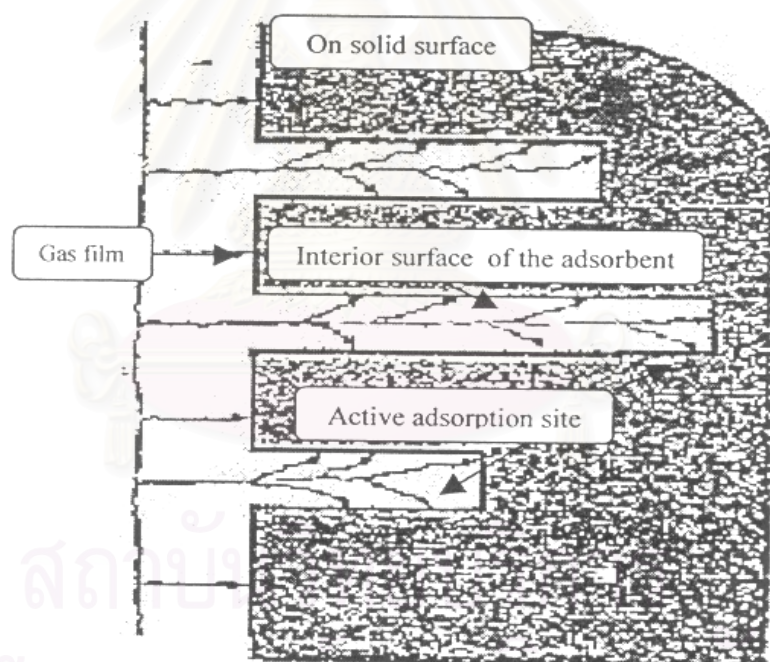
2.1.2 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การดูดซับมีขั้นตอนในการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เป็นการเคลื่อนย้ายโมเลกุลก๊าซมาถึงผิวภายนอกอนุภาคของสารดูดซับ แล้วจึงเคลื่อนที่เข้าไปยังผิวภายในรูพรุนของอนุภาคสารดูดซับ เป็นขั้นตอนสอง และขั้นตอนสาม เป็นการเกาะติดกับพื้นผิว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่แท้จริงของการดูดซับ มีการเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ขั้นตอนแรก ดังในรูปที่ 2.1

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซมายังผิวภายนอกของสารดูดซับในระบบสถานะนิ่ง (Static condition) ความดันก๊าซจะเท่ากันทั้งระบบ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซมายังผิวภายนอกเป็นวิธีการแพร่ธรรมดา (External diffusion) แต่ถ้าในระบบสถานะเคลื่อนที่ (Dynamic condition)

จะเกิดความดันตกภายในระบบ เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซ ที่ต้องพิจารณาทั้งการแพร่ธรรมดา (External diffusion) และการไหลโดยวิธีการพา (Convection flow)

กระบวนการแพร่ เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซมายังผิวภายในรูพรุนอาจมีวิธีการแพร่เข้าไปในรูพรุนหรือมายังผิว (Surface migration) หรือโดยแรงแคปิลลารี (Capillary flow) ถ้ารูพรุนมีขนาดกว้าง โมเลกุลก๊าซเคลื่อนที่เข้าไปโดยวิธีการพาและการแพร่ธรรมดา แต่ถ้าเป็นรูพรุนที่แคบ โมเลกุลก๊าซจะชนผนังของรูพรุนมากกว่าการชนกันเองระหว่างโมเลกุล โมเลกุลที่ชนบนผิวแล้วสะท้อนกลับสู่ภายนอกอนุภาคน้อยมาก แต่จะแพร่เข้าไปบนผิวภายในของอนุภาคช่วงเวลาหนึ่ง แล้วจึงกลับมาสู่ภายนอกโดยวิธีการแพร่ออกทางผิว

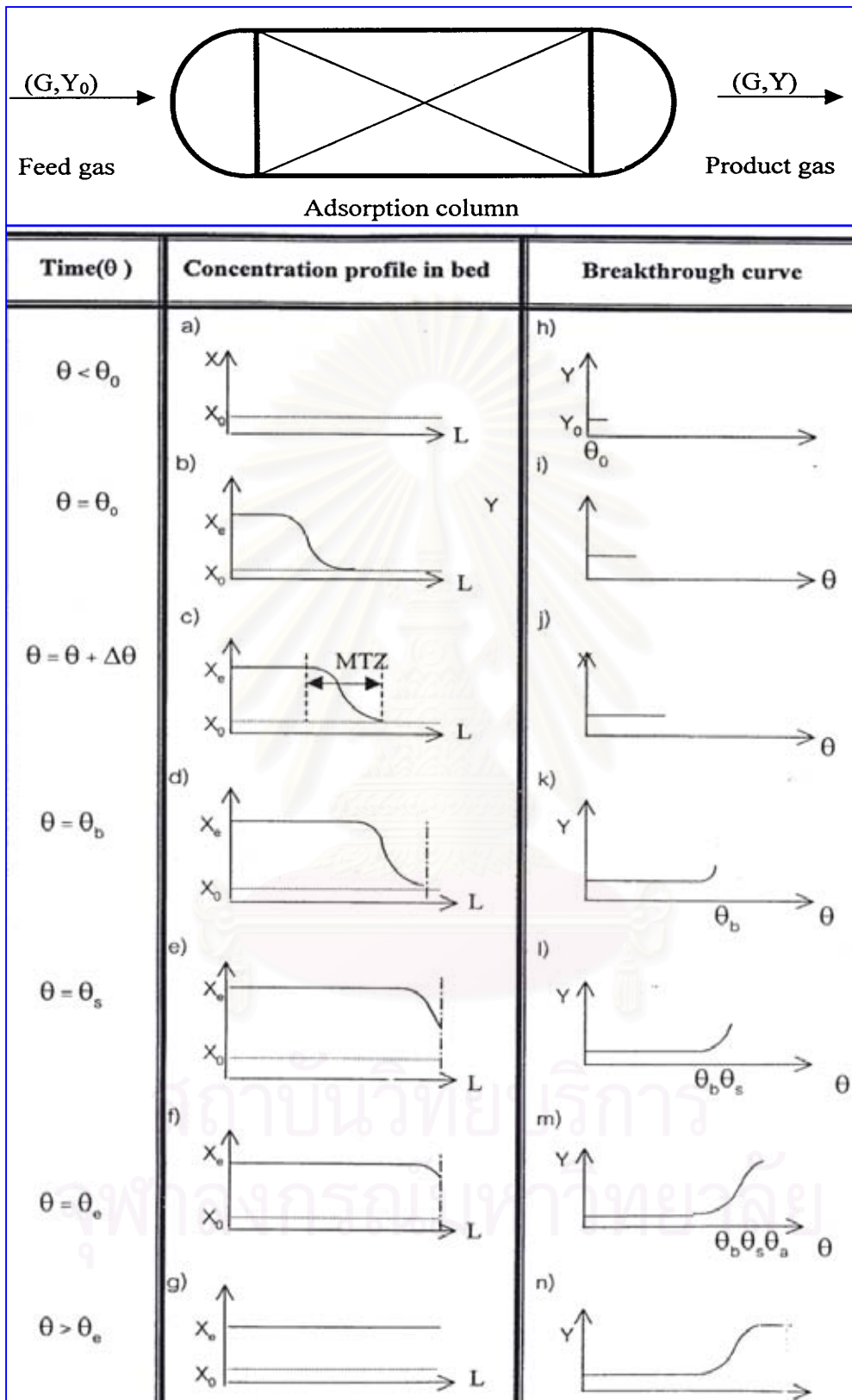


รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการถ่ายเทมวลของกระบวนการดูดซับ (อรจิรา,2001)

2.1.3 พลวัตของการดูดซับ (Adsorption Dynamic)

ในการนำสารดูดซับไปใช้ควบคุมมลพิษอากาศ โดยทั่วไปใช้ระบบดูดซับเชิงพลวัตกล่าวคือ มีสารดูดซับบรรจุอยู่ในภาชนะหรือคอลัมน์และอยู่ในลักษณะอยู่นิ่งแล้วดูดอากาศหรือไอระเหยให้ไหลผ่านตลอดความลึกของคอลัมน์ที่บรรจุสารดูดซับนั้น จากรูปที่ 2.2 พิจารณา คอลัมน์สารดูดซับ ซึ่งให้ของเหลวที่ประกอบด้วยตัวถูกละลายที่มีความเข้มข้นสม่ำเสมอไหลเข้าทางด้านบนและไหลออกทางด้านล่างคอลัมน์ด้วยอัตราความเร็วคงที่ ก่อนการใช้งานสารดูดซับทั้งคอลัมน์จะมีความไวต่อการดูดซับสูง เมื่อของไหลไหลผ่านคอลัมน์ตัวถูกละลายได้จะถูกจับและเกาะติดบนสารดูดซับนั้น ตอนต้นเมื่อของไหลไหลผ่านคอลัมน์ช่วงเวลาหนึ่งหลังจากเวลาเริ่มต้นตรงบริเวณทางเข้าของหอดูดซับ สารดูดซับจะเกิดการอิ่มตัวขึ้นจนเกิดเป็นเขตที่มีการอิ่มตัวในการดูดซับ เรียกว่า เขตสมดุล (Equilibrium zone) ซึ่งจะเป็นชั้นที่ไม่มีการดูดซับอีกแล้ว ในขณะที่เขตต่อจากเขตที่มีการอิ่มตัวจะยังเกิดการดูดซับอยู่ได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าจะอิ่มตัว เรียกเขตการดูดซับนี้ว่า เขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer adsorption zone) หรือ MTZ ขณะที่การไหลดำเนินต่อไปดังรูปที่ 2.2(c) ความยาวของเขตสมดุลจะเพิ่มขึ้น และบริเวณ MTZ ซึ่งมีรูปร่างเส้นโค้งคล้ายตัวเอสจะเคลื่อนที่ลงมายังปลายคอลัมน์สารดูดซับพอดีเรียกว่า Breakthrough ดังรูปที่ 2.2(d) ส่วนของ Breakthrough concentration อาจหมายถึงความเข้มข้นสูงสุดหรือต่ำสุดที่ยอมให้สารดูดซับไหลออกจากคอลัมน์ และช่วงเวลาที่เกิด Breakthrough เรียกว่า Breakthrough time (θ_b) เป็นตำแหน่งที่บ่งชี้ถึงความต้องการในการรีเจนเรชั่น (Regeneration) ของสารดูดซับเพื่อทำการไล่สารถูกละลายเอาไว้ออกจากสารดูดซับและสามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ต่อจากนั้นเมื่อของไหลไหลต่อไปจนสารดูดซับทั้งคอลัมน์อิ่มตัวด้วยตัวถูกละลาย และอยู่ในสภาวะสมดุลกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของไหลที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ ดังรูปที่ 2.2(f) ส่วนเวลาที่คอลัมน์อยู่ในสมดุลเรียกว่า Equilibrium time (θ_e) และเมื่อคอลัมน์อยู่ในสมดุลแล้วจะไม่สามารถดูดซับสารได้อีกต่อไป

สภานิติบัญญัติ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



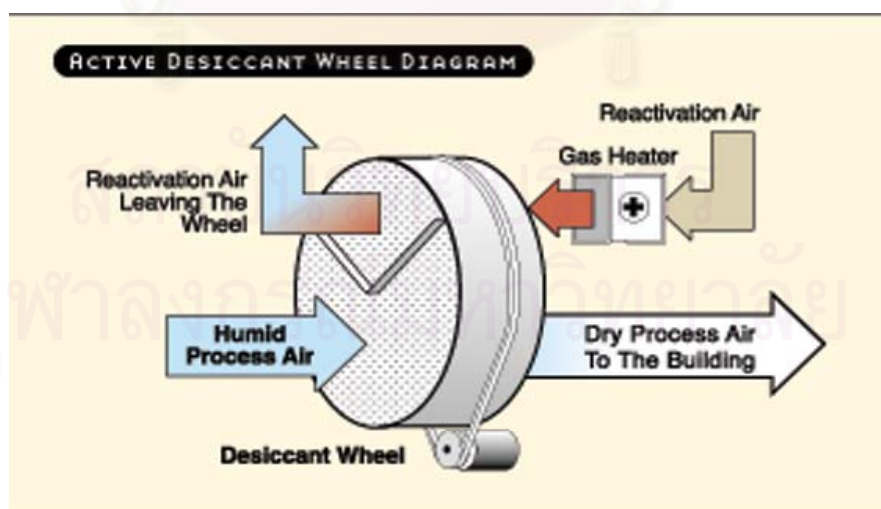
รูปที่ 2.2 ปราบการเคลื่อนที่ของสารดูดซับในคอลัมน์ขณะที่ของไหลซึ่งประกอบด้วยตัวถูกดูดซับได้ไหลผ่าน

2.1.4 เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ดังในรูปที่ 2.3 มีส่วนสำคัญในการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ที่กังล้อหมุนหรือโรเตอร์ (Rotor wheel) ซึ่งถูกขับเคลื่อนให้หมุนรอบตัวเองด้วยมอเตอร์ขนาดเล็ก ด้วยอัตราความเร็วรอบต่ำไม่เกิน 10 รอบ/ชั่วโมง และภายในโรเตอร์มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb) เคลือบด้วยสารเคมีที่มีคุณสมบัติดูดความชื้นและสารมลพิษ โดยจะมีการควบคุมจากสองแหล่งไหลสวนทางกันให้มาสัมผัสผ่านกังล้อหมุนซึ่งมีแผ่นกั้นที่กังล้อหมุนเพื่อกันลมสองส่วนนี้ไม่ให้ปะปนกันและกังล้อหมุนนี้จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนตามกระแสลม ได้แก่ ด้านการดูดซับและด้านรีเจนเรชั่น

- ด้านการดูดซับ (Adsorption) มีหน้าที่ ดูดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศชื้น (Process Air) เมื่ออากาศชื้นเคลื่อนที่ไหลผ่านแบบราบเรียบ (Laminar flow) ของกังล้อหมุน ความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับไว้ภายในกังล้อหมุน จากนั้นจะส่งอากาศแห้งกลับออกมา

- ด้านรีเจนเรชั่น (Regeneration) มีหน้าที่ ขับไล่ความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับไว้ในกังล้อหมุน ออกไปทิ้งภายนอกบริเวณที่ต้องการควบคุมความชื้น ด้วยอากาศอุ่นที่ได้จากการนำอากาศภายนอก (Ambient air) มาทำให้ร้อนขึ้นด้วยเครื่องทำความร้อน(Heater) โดยเมื่ออากาศอุ่นเคลื่อนผ่านกังล้อหมุนจะพาความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปด้วยทำให้สารดูดซับที่ประกอบอยู่ภายในกังล้อหมุนแห้งและสามารถดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก



รูปที่ 2.3 เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

2.2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ด้านการศึกษาจากการทดลอง

Hines and Ghosh (1992) ศึกษาหาความสามารถสารดูดซับแบบของแข็ง ที่นิยมใช้ในระบบปรับอากาศอันได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel ;grade 40) แอคทีเวทคาร์บอน (Activated carbon) และโมเลคิวลาซีฟ (Molecular sieve) ในการกำจัดมลพิษทางเคมีของอากาศภายในอาคาร เช่น 1,1,1 trichloroethane, toluene, carbon dioxide, radon และ formaldehyde พร้อมทั้งไอน้ำที่รวมกัน จากคุณลักษณะของซิลิกาเจลและโมเลคิวลาซีฟ นั้นมีความชอบดูดซับไอน้ำได้มากกว่าสารประกอบอินทรีย์ แต่แอคทีเวทคาร์บอนชอบดูดซับสารประกอบอินทรีย์ได้ดีกว่าถึงแม้จะมี ไอน้ำอยู่ร่วม จากการศึกษพบว่า 1) โมเลคิวลาซีฟ 13X เป็นสารดูดซับที่ดีสำหรับคาร์บอน ไดออกไซด์ ขณะที่แอคทีเวทคาร์บอนเหมาะสมสำหรับการกำจัด 1,1,1 trichloroethane และ toluene 2) ในการรีเจนเรชั่นของซิลิกาเจลนั้นใช้อุณหภูมิต่ำกว่าโมเลคิวลาซีฟและใช้เวลาน้อยกว่า 3) โมเลคิวลาซีฟ 13X มีความสามารถดูดซับ formaldehyde ได้ดีกว่าโมเลคิวลาซีฟและแอคทีเวทคาร์บอน แต่ในการรีเจนเรชั่นจะใช้เวลาานกว่าและใช้อุณหภูมิสูงกว่า 4) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของทั้งซิลิกาเจลและโมเลคิวลาซีฟ จะลดลงในขณะที่มีสารมลพิษอยู่ร่วม

M. Popescu และ T.K. Ghosh (1999) ศึกษาการกำจัดความชื้นและมลพิษของอากาศภายในอาคารพร้อมกัน ด้วยกมลพิษที่ใช้สารดูดซับชนิด 1M (1M type desiccant) ซึ่งเป็นสารผสมกันของจาก ซิลิกาเจล โมเลคิวลาซีฟ 13X และไฮโดรโฟบิก โมเลคิวลาซีฟ (Hydrophobic molecular sieve) โดยสารนี้จะถูกเคลือบบนแผ่นพอลิเอทิลีนและจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดมลพิษทางอากาศที่มีความชื้นอยู่ร่วมด้วย มลพิษที่ศึกษาได้แก่ carbon dioxide, toluene, formaldehyde and 1,1,1-trichloroethane การทดลองทำในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fix bed) เป็นการเลียนแบบแทนเครื่องดูดซับแบบกมลพิษ พบว่าลักษณะกราฟไอโซเทอมของน้ำบนสารดูดซับชนิด 1M ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่างซิลิกาเจลและโมเลคิวลาซีฟ 13X ความสามารถในการดูดซับน้ำบนสารดูดซับชนิด 1M จะลดลง เมื่อมีสารมลพิษอื่นอยู่ร่วมและจาก Breakthrough ของสารมลพิษทั้งหมด ในระหว่างวัฏจักรการดูดซับจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากกว่า 50% ภายในเวลาที่ใช้ในวัฏจักรการดูดซับ ประมาณ 1 นาที

Macriss et al. (1977) ได้นำเสนอโรเตอร์ริงฝั่งที่ประกอบด้วยชั้นของวัสดุไฟเบอร์ที่มีสารดูดซับโมเลกุลวาลซีฟอยู่ประมาณ 10-90% โดยน้ำหนักเพื่อใช้ทำอากาศให้สะอาด สำหรับโรเตอร์แบ่งประกอบด้วยกัน 4 ช่อง ความชื้นและก๊าซมลพิษที่ต้องการกำจัดออก เช่น NO_x , SO_x และ CO_x จะถูกดูดซับด้วยโมเลกุลวาลซีฟช่องที่ 1 เพื่อผลิตอากาศแห้งที่ไร้มลพิษ ขณะที่อากาศร้อนไหลสวนทางผ่านในส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 สำหรับเป็นการรีเจนเรชั่น ส่วนอากาศที่สะอาดแล้วจะผ่านเข้าส่วนที่ 4 ในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้โรเตอร์เย็นลง ช่วงอุณหภูมิรีเจนเรชั่นของระบบนี้อยู่ระหว่าง 121-176 °C

Kodama et al. (1993, 1994, 1998) ศึกษาหาสภาวะของการทำงานที่เหมาะสมของ เครื่องลดความชื้นแบบริงฝั่งหมุนชนิดซิลิกาเจล ด้วย Thermal swing adsorption โดยพิจารณาอิทธิพลของความเร็วยรอบหมุนที่มีต่อสมรรถนะเครื่องลดความชื้นที่สภาวะต่างๆ พบว่าความเร็วยรอบหมุนที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านด้านรีเจนเรชั่น ความหนาแน่นของโรเตอร์และความกว้างของโรเตอร์ สำหรับสภาวะของการทำงานที่เหมาะสมสามารถให้ประสิทธิภาพของการลดความชื้นสูงถึง 80-90% (Kodama et al., 1993) นอกจากนั้นมีการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิใน 2 มิติของแนวแกนและมุมมองศาที่หมุน ด้วยการวัดสภาวะการทำงานที่ต่างๆ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลและความร้อนที่เกิดขึ้น (Kodama et al., 1994)

(Kodama et al., 1998) ได้นำเครื่องลดความชื้นแบบริงฝั่งหมุนมาใช้กับระบบปรับอากาศ โดยมีอุปกรณ์อื่นที่ประกอบรวมอยู่ในระบบด้วย คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ฮีทเตอร์และอีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) พบว่า ประสิทธิภาพการลดความชื้นสูงสุดสามารถเกิดที่อุณหภูมิรีเจนเรชั่นประมาณ 353 K เมื่อมีความเร็วยรอบหมุนของโรเตอร์เหมาะสม และสามารถลดปริมาณเอนทัลปีได้ 16.5 kJ/kg จากห้องด้วยเป็นค่า COP (Coefficient of performance) เท่ากับ 61%

2.2.2 ด้านการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์

Shen และ Worek (1994) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสมการไอโซเทอมของการดูดซับไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน บนสารดูดซับ ซิลิกา เจล (Silica gel ; grade 40) , แอคทีเวเทคคาร์บอน (BPL Activated Carbon) และ โมเลกุลวาลซีฟ 13X (Molecular sieve ; MS 13X) และแบบจำลองการดูดซับใน single-blow process สำหรับสมการไอโซเทอมของการดูดซับที่ได้จำลองขึ้นอาศัยผลการทดลองของข้อมูลสมดุขการดูดซับจาก Hines และ Ghosh (1992) และจาก

ขีดจำกัดของข้อมูลการทดลองนั้น สมการสมดุลของคาร์บอนไดออกไซด์สมมติเป็นเส้นตรง และของไอน้ำ ด้วยสมการDubinin-Polanyi เมื่อเทียบผลที่ได้กับข้อมูลการทดลองมีความแตกต่างอยู่ประมาณ 5% แล้วสมการสมดุลที่ศึกษานี้จะมีความถูกต้องแม่นยำที่อุณหภูมิ 298 K เท่านั้น นอกจากนี้พบผลที่ได้เป็นไปตามข้อมูลทดลองดังนี้ 1) ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงเมื่อทำการดูดซับไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันในอากาศ และ 2) ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขาออกสูงกว่าขาเข้าใน Breakthrough curve เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ Roll-over effect ที่เกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับในช่วงเวลาแรกจะถูกไอน้ำเข้าไปแทนที่ ผลของปรากฏการณ์นี้เนื่องมาจากคาร์บอนไดออกไซด์มีแพร่ที่เกิดเร็วกว่าและมีความชอบต่อสารดูดซับต่ำกว่าไอน้ำ ซึ่งผลจะเกิดขึ้นบนโมเลกุลเวลาซีฟ 13X ชัดเจนกว่าซิลิกาเจลและแอคทีเวเทคคาร์บอน

Shen และWorek (1994) ได้ทำการศึกษาขยายแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นให้สามารถใช้กับเครื่องดูดความชื้นแบบรังผึ้งหมุนไหลสวนทางกัน ด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขวิธี weighted-residual หาคำตอบของสมการสำหรับกระบวนการดูดซับไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน บนสารดูดซับ ซิลิกาเจล ,แอคทีเวเทคคาร์บอนและ โมเลกุลเวลาซีฟ 13X พบว่า ระบบดูดซับหนึ่งงอกล้อหมุน ไม่สามารถกำจัดไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันอย่างมีประสิทธิภาพและสำหรับบนโมเลกุลเวลาซีฟ นั้นจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันที่เวลาการดูดซับสั้นๆ ในการทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดต้องใช้ความเร็วรอบหมุนสูงกว่าทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดไอน้ำสูงสุด แต่สำหรับระบบดูดซับหนึ่งงอกล้อหมุนคู่ด้วยโมเลกุลเวลาซีฟ มีศักยภาพสูงสุดในการกำจัดทั้งไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน

การใช้งานสารดูดความชื้นแบบงอกล้อหมุน มี 2 อย่างหลักๆ ได้แก่ การลดความชื้นในอากาศ (Air dehumidification)และ การนำเอนทัลปีกลับใช้ใหม่(Enthalpy recovery) ซึ่งมีสถานะใช้การทำงานที่ต่างกัน ดังนั้น ลักษณะของการถ่ายเทมวลและความร้อนค่อนข้างแตกต่างกัน Zhang และ Niu (2002) ได้ทำแบบจำลองเพื่อศึกษาปัจจัยของความเร็วยรอบหมุน Number of Transfer Units และพื้นที่จำเพาะที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะงอกล้อหมุน ที่ใช้ในการลดความชื้นและการนำเอนทัลปีกลับใช้ใหม่ พบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมของงอกล้อหมุนในการลดความชื้นมีค่าต่ำกว่าในการนำเอนทัลปีกลับใช้ใหม่มาก แล้วจากทั้ง 2 กรณีนี้พบว่า ความหนาของผนังช่องรังผึ้งมีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของสารดูดความชื้นแบบของแข็ง และงอกล้อหมุนมีสมรรถนะการทำงานสูงที่ค่า NTU เท่ากับ 2.5

วิวัฒน์,อนวัช(2002,2003) ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องลดความชื้น ด้วยการดูกลั่นแบบรังผึ้งหมุนที่เคลือบด้วยลิเทียมคลอไรด์ ขึ้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการลดความชื้นในห้องที่เป็นกระบวนการปิดที่มีพื้นเปียกในโรงงานเครื่องคั้ม ซึ่งแบบจำลองนี้ประกอบด้วยสมการอนุพันธ์ธรรมดา แล้วใช้วิธี4-th order Runge Kutta อินทิเกรตสมการพร้อมกันเพื่อหาคำตอบ พบว่า แบบจำลองนี้มีความถูกต้องเมื่อใช้ทำนายพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงเชิงจลน์ของความชื้นและอุณหภูมิของตัวดูดซับและลมร้อนภายในโรเตอร์ ตลอดจนปริมาณน้ำบนพื้นผิวในห้อง อุณหภูมิของน้ำบนพื้นผิวห้อง ความชื้นและอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการอุ่นอากาศทางซีกคายความชื้น และได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะการลดความชื้น อันได้แก่ ความเร็วและความชื้นของอากาศในห้อง ความเร็วและอุณหภูมิของลมที่ใช้รีเจนเนเรชั่น ความเร็วรอบหมุน สภาวะอากาศภายนอก และปริมาณน้ำเริ่มต้นบนพื้นผิวภายในห้อง แล้วหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดความชื้นภายในห้อง

อรจิรา(2001) ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องลดความชื้นด้วยการดูดซับแบบรังผึ้งหมุนที่เคลือบด้วยซิลิกา เจลและซีโอไลท์13X บนแผ่นเซรามิก โดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของKodama และคณะ พบว่า สามารถทำนายได้อย่างถูกต้องแม่นยำทั้งสมรรถนะการลดความชื้น และปรากฏการณ์ระดับท้องถิ่นของการถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมกันในรังผึ้งเครื่องลดความชื้น จากการเปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในเครื่องลดความชื้นแบบหมุนนั้นให้ผลสอดคล้องอย่างคึกกับผลการทดลองข้างต้น และได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะการลดความชื้น ได้แก่ ความเร็วรอบหมุนโรเตอร์และอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้รีเจนเนเรชั่น ความเร็วของอากาศในห้อง และความยาวของโรเตอร์

ทนงเกียรติ และคณะ(2545) ทำการศึกษาการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศและปั๊มความร้อนโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง 2 ชนิด คือ โมเลกุลวลาซีฟ และซิลิกาเจล สำหรับในระบบปรับอากาศได้สร้างชุดทดสอบโดยใช้โมเลกุลวลาซีฟที่จัดเรียงตัวเป็นกลุ่มท่อเพื่อศึกษาหาค่าตัวแปรอิสระต่างๆ เช่น จำนวนแท่งของสารดูดความชื้น ความเร็วลม และปริมาณความชื้น และจากการศึกษาพบว่า ระบบปรับอากาศที่ใช้งานร่วมกับสารดูดความชื้น ควรใช้งานที่อากาศมีอุณหภูมิระหว่าง 22-26 องศาเซลเซียส ความเร็วลมผ่านสารดูดความชื้นประมาณ 1 เมตร/วินาที และใช้เวลาสลับเปลี่ยนสารดูดความชื้น 30 นาที เมื่อพิจารณาจากภายใต้สภาวะอากาศของจังหวัดเชียงใหม่สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ปีละ 789 บาท ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5.45 ปี

บทที่ 3

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

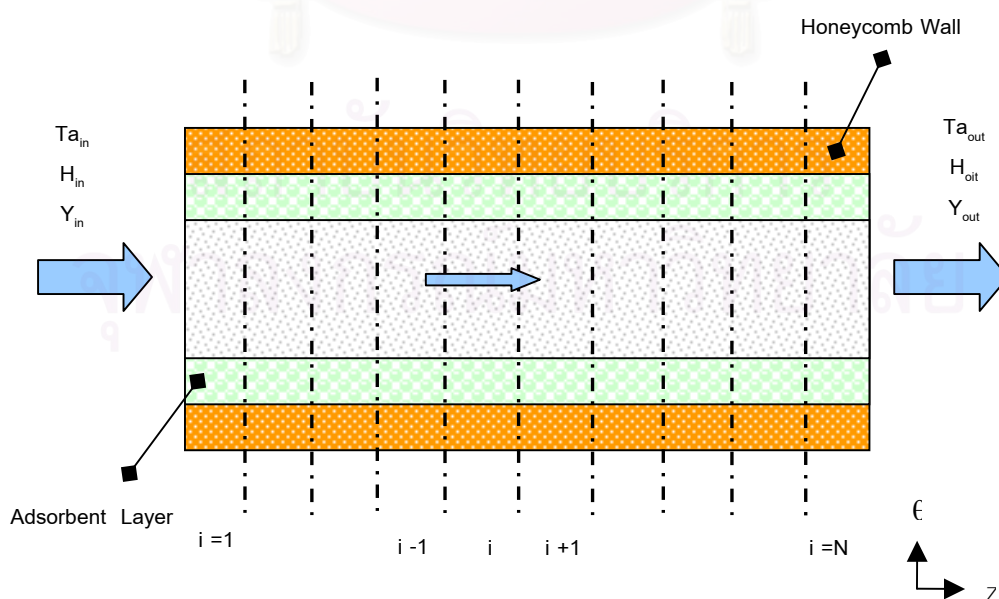
โครงสร้างของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน มีลักษณะเป็นโรเตอร์รังผึ้ง ที่ประกอบด้วยท่อตรงแคบจำนวนหลายพันท่อจัดเรียงอย่างมีรูปแบบ กระจายอยู่ตลอดแนวภาคตัดขวางของโรเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 3.1 ลักษณะคล้ายรูปทรงเรขาคณิตที่เป็นชั้นวงแหวนหลายๆ ชั้นซ้อนกัน โดยที่แต่ละชั้นวงแหวนประกอบด้วยหลายๆท่อทั้งในด้านการดูดซับและด้านการรีเจเนเรชั่น ในขณะที่เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนทำงานจะมีการหมุนไปเรื่อยๆ ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของโรเตอร์สามารถจำลองได้จากในช่วงสถานะไม่คงตัว ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่ง เราใช้หลักการในการพิจารณาแบบจำลองโดยเริ่มจากด้วยอัตรากาไหลต่อพื้นที่หน้าตัดคงที่ในทุกวงแหวน จึงสามารถยกตัวแทนวงแหวนที่สนใจมาจำนวน 1 วงแหวน มาเป็นวงแหวนที่เป็นตัวแทน ซึ่งมีความหนา Δr ของวงแหวนเท่ากับความสูงของท่อ และแสดงตำแหน่งแทนด้วย โคออร์ดิเนตทรงกระบอก (r, θ, z) ในทิศทาง แนวลำดับ r แนวมุม และแนวแกนตามลำดับ เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงใดๆไม่แปรผันตามแนวลำดับ r จึงคงเหลือเพียงในการแทนตำแหน่งโคออร์ดิเนต (θ, z) จากนั้นในทิศทาง θ ที่ว่าความหนาหน้าภาคตัดขวางของวงแหวนที่เป็นตัวแทน กำหนดให้แทนด้วยจำนวน M ท่อที่เป็นองค์ประกอบ เช่น ถ้า $M = 400$ จะถือว่า 300 ท่อแรกเป็นของด้านการดูดซับ และท่อที่เหลือ 100 ท่อเป็นด้านการรีเจเนเรชั่น ฉะนั้นจึงมีตัวแปรที่เหลือ คือ Z (ตามแนวแกน) เท่านั้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางแนวแกน (Z) ตลอดภายในแต่ละ M ท่อในขณะที่โรเตอร์หมุนไปอย่างช้าๆ และจากการกำหนดสมมติฐานว่า การไหลผ่านของลมเข้าโรเตอร์เป็นการไหลแบบลูกสูบ (Piston or plug flow) นั้นสามารถกำหนดให้แทนทิศทาง Z ด้วยการแบ่งความยาวของโรเตอร์เป็นจำนวน N เซลล์ที่มาต่ออนุกรมกัน ดังแสดงตามรูปที่ 3.2 โดยแต่ละเซลล์มีขนาดเท่ากัน แต่อย่างไรยังคงมีตัวแปรต้นของแบบจำลองที่สำคัญคือ เวลา นั่นเองเพื่อใช้ศึกษาถึงพฤติกรรมของตัวแปรตามที่สำคัญเทียบกับเวลา

จากที่กล่าวมาเป็นผลให้สามารถพัฒนาแบบจำลองแบบง่ายมาใช้ในการหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์ได้ง่ายขึ้น โดยทำให้แบบจำลองที่ศึกษาอยู่ในรูประบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation) ก่อน ซึ่งเป็นอนุพันธ์สมการของตัวแปรตามที่สำคัญเทียบกับเวลา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการดูดซับความชื้นและ

คาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน โดยมีตัวแปรตามที่สำคัญ คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ความชื้นสัมบูรณ์ มวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผนังรังผึ้ง ความชื้นที่ผนังรังผึ้ง อุณหภูมิโรเตอร์ อุณหภูมิอากาศของด้านการดูดซับและด้านการรีเจเนเรชัน เทียบกับเวลาจากนั้นใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข(Numerical method) เทคนิควิธีรุงเง-กุตตาอันดับสี่(Forth Order Runge Kutta method) ในแก้สมการอนุพันธ์ ซึ่งสามารถแก้สมการหาค่าตัวแปรตามที่สำคัญได้ทั้งหมดพร้อมกันในจำนวน M ท่อของวงแหวนที่เป็นตัวแทน จากเซลล์ที่ $i = 1, 2, \dots, N$



รูปที่ 3.1 ลักษณะภาคตัดขวางของท่อภายในโรเตอร์



รูปที่ 3.2 แสดงการแบ่งความยาวของโรเตอร์เป็นจำนวน N เซลล์ที่มาต่ออนุกรมกัน

สมมติฐานแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ พร้อมกันด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนที่พัฒนาขึ้น มีดังนี้

1.ลมที่ไหลผ่านภาคตัดขวางของด้านการดูดซับและด้านการรีเจนเรชั่น มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

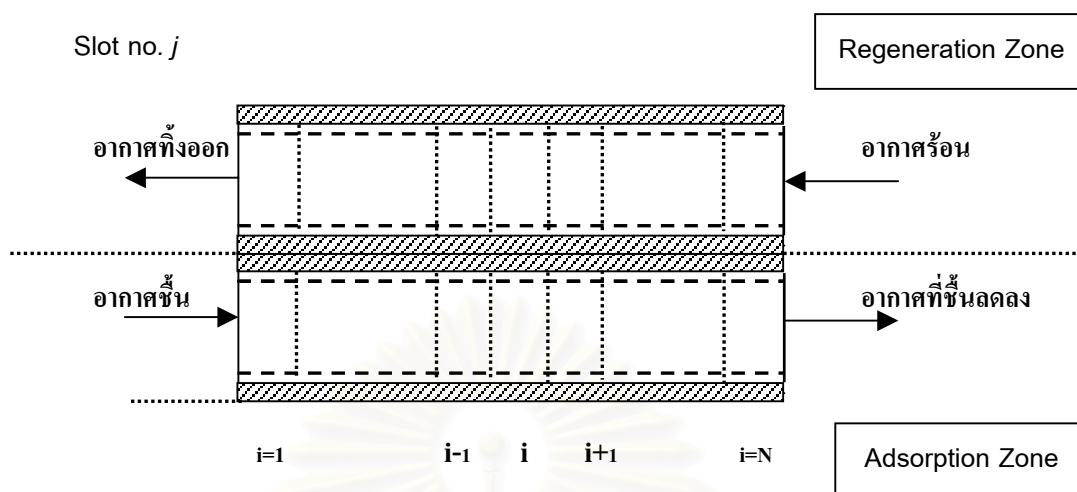
2. สมมติให้กระแสลมที่ไหลผ่านแต่ละท่อแทนด้วยการไหลเป็นแบบลูกสูบ ซึ่งในการไหลแบบนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางรัศมี แต่ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในทิศทางแกน จากหลักการของการไหลแบบลูกสูบ นั่นคือว่าเทียบเท่ากับการนำถังกวนสมบูรณ์(Complete stirred tank) ขนาดเท่ากันเป็นจำนวน N ถังมาต่ออนุกรมกัน (CSTR model) ในทางปฏิบัติ อธิบายได้ว่าการสมมติการไหลเป็นแบบลูกสูบผ่านท่อ สามารถประมาณเทียบเท่าให้มีลมไหลผ่านท่อแต่ละท่อที่ประกอบด้วย N เซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน ดังแสดงตามรูปที่ 3.2

3.การนำความร้อนในเฟสก๊าซและการแพร่ของมวลในแนวแกน (ทิศทางกรไหลของลม) ถือว่า มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลจากการถ่ายเทมวลและความร้อนโดยการไหล

4. ไม่มีการสูญเสียของความร้อนจากผนังท่อไปสู่สิ่งแวดล้อมและการนำความร้อนผ่านระหว่างผนังท่อภายในโรเตอร์ ถือว่า มีค่าน้อยมาก

5. อัตราการถ่ายเทความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของแข็ง ถือว่า เป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการถ่ายเทผ่านชั้นฟิล์มเท่านั้น (Gas-phase film resistance) เนื่องจากขั้นตอนอื่นมีอัตราการเกิดขึ้นเร็วมาก

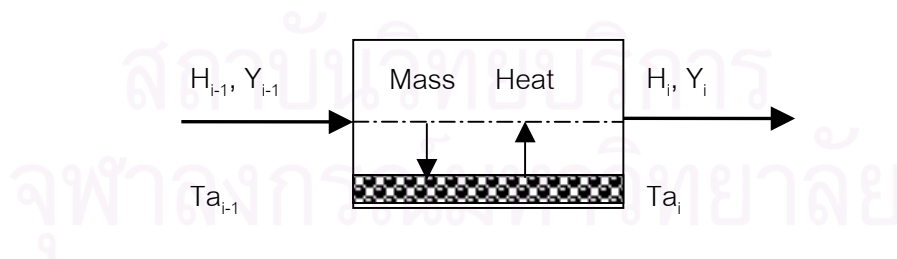
6. ปริมาณความร้อนของการดูดซับของไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณด้วยสมการ(Shen,1994) ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.3 วงแหวนตัวแทนของโรเตอร์ในด้านการดูดซับและด้านรีเจนเรชั่นของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนที่แทนด้วย N ถัง

ดังที่กล่าว สามารถนำมาเขียนอนุพันธ์ของสมดุลของมวลสารและพลังงานในเฟสของแข็งและเฟสก๊าซด้านการดูดซับและด้านการรีเจนเรชั่นในถัง i ใด ๆ ได้ต่อไปนี้

3.1.1 สมการสมดุลมวลสารและพลังงานของการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันในด้านการดูดซับ



รูปที่ 3.4 การถ่ายเทมวลและความร้อนในเซลล์ที่ i ของท่อที่ j ด้านการดูดซับ

3.1.1.1 สมดุลมวลของความชื้นในเฟสของแข็ง ที่ เซลล์ i

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาเข้า} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาออก} \\ \text{ของความชื้นในเฟส} \\ \text{ของแข็ง} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการดูดซับ} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) W_{w,i} \right) = 0 - 0 + R_{ads, w, i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

$$\frac{d}{dt} (W_{w, i}) = R_{ads, w, i}$$

อัตราการดูดซับของความชื้น สามารถคำนวณจากการมีขั้นตอนที่อัตราการถ่ายเทผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนควบคุม ดังนี้

$$R_{ads, w, i} = \frac{k_{c, w, i} a (H_i - H_{s, i})}{\rho_{sb}}$$

จะได้

$$\frac{d}{dt} (W_{w, i}) = \frac{k_{c, w, i} a (H_i - H_{s, i})}{\rho_{sb}} \quad \text{-----(1)}$$

3.1.1.2 สมดุลมวลของ CO₂ ในเฟสของแข็ง ที่ เซลล์ i

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหล} \\ \text{ขาเข้าของ CO}_2 \\ \text{ในเฟสของแข็ง} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหล} \\ \text{ขาออกของ CO}_2 \\ \text{ในเฟสของแข็ง} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการดูด} \\ \text{ซับของ CO}_2 \\ \text{ในเฟสของแข็ง} \end{array} \right)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) W_{C,i} \right) = 0 - 0 + R_{ads, C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

$$\frac{d}{dt} (W_{C,i}) = R_{ads, C,i}$$

อัตราการดูดซับของ CO₂ สามารถคำนวณจากการมีขั้นตอนที่อัตราการถ่ายเทผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนควบคุม ดังนี้

$$R_{ads, C,i} = \frac{k_{c,C,i} a (Y_i - Y_{s,i})}{\rho_{sb}}$$

จะได้

$$\frac{d}{dt} (W_{C,i}) = \frac{k_{c,C,i} a (Y_i - Y_{s,i})}{\rho_{sb}} \text{-----}(2)$$

3.1.1.3 สมดุลมวลของความชื้นในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ i

$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาเข้า} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาออก} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการดูดซับ} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right)$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,i}} \left(\frac{\varepsilon A_c L}{N} \right) H_i \right) = \varepsilon A_c G_{i-1} H_{i-1} - \varepsilon A_c G_i H_i - R_{ads,w,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

จากสมการอนุรักษ์ของมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเซลล์

$$\varepsilon A_c G_{i-1} = \varepsilon A_c G_i = \varepsilon A_c G_{in}$$

สำหรับทุกเซลล์ i

$$G_{i-1} = G_i = G_{in}$$

แทนค่า G_{in} ใน สมการหลักและหารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{\varepsilon A_c L}{N}\right)$ จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{H_i}{V_{HY,i}} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (H_{i-1} - H_i) - R_{ads,w,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

$$\left(\frac{1}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dH_i}{dt} \right) - \left(\frac{H_i}{V_{HY,i}^2} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (H_{i-1} - H_i) - R_{ads,w,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

$$\left(\frac{dH_i}{dt} \right) = \frac{V_{HY,i}}{L} NG_{in} (H_{i-1} - H_i) - \left(\frac{k_{c,w,i} a A_{ss} V_{HY,i}}{\varepsilon A_c} \right) (H_i - H_{s,i}) + \left(\frac{H_i}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right)$$

----- (3)

3.1.1.4 สมดุลมวลของ CO₂ ในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ i

$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขา} \\ \text{เข้าของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขา} \\ \text{ออกของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการดูดซับ} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right)$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,i}} \left(\frac{\varepsilon A_c L}{N} \right) Y_i \right) = \varepsilon A_c G_{i-1} Y_{i-1} - \varepsilon A_c G_i Y_i - R_{ads,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

จากสมการอนุรักษ์ของมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเซลล์

$$\varepsilon A_c G_{i-1} = \varepsilon A_c G_i = \varepsilon A_c G_{in}$$

สำหรับทุกเซลล์ i

$$G_{i-1} = G_i = G_{in}$$

แทนค่า G_{in} ในสมการหลักและหารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{\varepsilon A_c L}{N}\right)$ จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{Y_i}{V_{HY,i}} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (Y_{i-1} - Y_i) - R_{ads,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

$$\left(\frac{1}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dY_i}{dt} \right) - \left(\frac{Y_i}{V_{HY,i}^2} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (Y_{i-1} - Y_i) - R_{ads,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

$$\left(\frac{dY_i}{dt} \right) = \frac{V_{HY,i} NG_{in}}{L} (Y_{i-1} - Y_i) - \left(\frac{k_{c,C,i} a A_{ss} V_{HY,i}}{\varepsilon A_c} \right) (Y_i - Y_{s,i}) + \left(\frac{Y_i}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right)$$

------(4)

3.1.1.5 สมดุลพลังงานของในเฟสของแข็ง ที่ เซลล์ i



$$\frac{d}{dt} \left(\left(\frac{\rho_{ss} A_{ss} L}{N} \right) E_{ss,i} \right) = 0 - 0 - h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) \\ + R_{ads,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,w,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) + R_{ads,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,C,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

หารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$ จะได้

$$\frac{d}{dt} (\rho_{ss} E_{ss,i}) = -h_{c,i} a (T_{s,i} - T_{a,i}) + R_{ads,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,w,i} + R_{ads,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,C,i}$$

กำหนดให้สภาวะอ้างอิงที่อุณหภูมิ 0°C

สำหรับเฟสของแข็ง : เอนทัลปีของผนังที่เคลือบด้วยสารดูดซับประกอบด้วย

$$E_{ss,i} = \left(\frac{\rho_{sh}}{\rho_{ss}} C_{p,sh} + \frac{\rho_{sb}}{\rho_{ss}} C_{p,sh} + \frac{\rho_{sb}}{\rho_{ss}} C_{p,w} W_{w,i} + \frac{\rho_{sb}}{\rho_{ss}} C_{p,C(Lq)} W_{C,i} \right) (T_{s,i} - T_s^0)$$

เมื่อแทนค่า $E_{ss,i}$ ในสมการ จะกลายเป็น

$$\frac{d}{dt} \left(\left(\rho_{sh} C_{p,sh} + \rho_{sb} (C_{p,sh} + C_{p,w} W_{w,i} + C_{p,C(Lq)} W_{C,i}) \right) (T_{s,i} - T_s^0) \right) \\ = -h_{c,i} a (T_{s,i} - T_{a,i}) + R_{ads,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,w,i} + R_{ads,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,C,i}$$

$$\left(\rho_{sh} C_{p,sh} + \rho_{sb} (C_{p,sh} + C_{p,w} W_{w,i} + C_{p,C(Lq)} W_{C,i}) \right) \frac{dT_{s,i}}{dt} \\ = -h_{c,i} a (T_{s,i} - T_{a,i}) + R_{ads,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,w,i} + R_{ads,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,C,i} \\ - (T_{s,i} - T_s^0) \left(\rho_{sb} C_{p,w} \frac{d}{dt} W_{w,i} + \rho_{sb} C_{p,C(Lq)} \frac{d}{dt} W_{C,i} \right)$$

แทนค่า $R_{ads,w,i}$, $R_{ads,C,i}$ และ $\frac{d}{dt}(W_{w,i})$, $\frac{d}{dt}(W_{C,i})$ ลงในสมการ

$$\begin{aligned}
& (\rho_{sh} C_{p,sh} + \rho_{sb} (C_{p,wb} + C_{p,wr} W_{w,i} + C_{p,C(Lq)} W_{C,i})) \frac{dT_{s,i}}{dt} \\
& = k_{c,w,i} a (\Delta H_{ads,w,i} - C_{p,w} (T_{s,i} - T_s^o)) (H_i - H_{s,i}) \\
& \quad + k_{c,C,i} a (\Delta H_{ads,C,i} - C_{p,C(Lq)} (T_{s,i} - T_s^o)) (Y_i - Y_{s,i}) - h_{c,i} a (T_{s,i} - T_{a,i})
\end{aligned}$$

-----(5)

3.1.1.6 สมดุลพลังงานในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ i



$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,i}} \left(\frac{\varepsilon A_c L}{N} \right) E_{a,i} \right) & = \varepsilon A_c G_{i-1} E_{a,i-1} - \varepsilon A_c G_i E_i + h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) \\
& \quad - R_{ads,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,w,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) - R_{ads,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,C,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)
\end{aligned}$$

จากสมการอนุรักษ์ของมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเซลล์

$$G_{i-1} = G_i = G_{in}$$

แทนค่า G_{in} ในสมการหลักและหารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{\varepsilon A_c L}{N}\right)$ จะได้

$$\frac{1}{V_{HY,i}} \frac{dE_{a,i}}{dt} - \left(\frac{E_{a,i}}{V_{HY,i}} \frac{dV_{HY,i}}{dt} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (E_{a,i-1} - E_i) + h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) - R_{ads,w,i} \Delta H_{ads,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) - R_{ads,C,i} \Delta H_{ads,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

สำหรับเฟสก๊าซ: เอนทัลปีของอากาศชื้นของเซลล์ i เท่ากับ

$$E_{a,i} = (C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i) (T_{a,i} - T_a^o) + \lambda_0 H_i$$

เมื่อทำการดิฟเฟอเรนเชียลของเอนทัลปีของอากาศชื้นกับเวลา จะได้

$$\frac{dE_{a,i}}{dt} = (C_{p,d} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i) \frac{dT_{a,i}}{dt} + (C_{p,v} (T_{a,i} - T_a^o) + \lambda_0) \frac{dH_i}{dt} + (C_{p,C} (T_{a,i} - T_a^o)) \frac{dY_i}{dt}$$

แทนค่า $E_{a,i}$ และ $\frac{dE_{a,i}}{dt}$ ลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} + \left(\frac{C_{p,v} (T_{a,i} - T_a^o) + \lambda_0}{V_{HY,i}} \right) \frac{dH_i}{dt} + \left(\frac{C_{p,C} (T_{a,i} - T_a^o)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dY_i}{dt} \\ & - \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i) (T_{a,i} - T_a^o) + \lambda_0 H_i}{V_{HY,i}^2} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} \\ & = \frac{NG_{in}}{L} \left(C_{p,da} (T_{a,i-1} - T_{a,i}) + (C_{p,v} H_{i-1} + C_{p,C} Y_{i-1}) (T_{a,i-1} - T_a^o) \right) \\ & + h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) - R_{ads,w,i} \Delta H_{ads,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) - R_{ads,C,i} \Delta H_{ads,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) \end{aligned}$$

แทนค่า $\left(\frac{dH_i}{dt}\right)$ และ $\left(\frac{dY_i}{dt}\right)$ ในสมการ

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} + \frac{NG_{in}}{L} \left(\begin{aligned} & (C_{p,v} H_{i-1} + C_{p,C} Y_{i-1})(T_{a,i} - T_a^o) \\ & - (C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i)(T_{a,i} - T_a^o) \\ & + \lambda_0 (H_{i-1} - H_i) \end{aligned} \right) \\
& - (C_{p,v} (T_{a,i} - T_a^o) + \lambda_0) R_{ads,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) - C_{p,C} (T_{a,i} - T_a^o) R_{ads,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) \\
& - \frac{(C_{p,da} (T_{a,i} - T_a^o)) dV_{HY,i}}{V_{HY,i}^2 dt} \\
& = \frac{NG_{in}}{L} \left(\begin{aligned} & C_{p,da} (T_{a,i-1} - T_{a,i}) + (C_{p,v} H_{i-1} + C_{p,C} Y_{i-1})(T_{a,i-1} - T_a^o) \\ & + (C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i)(T_{a,i} - T_a^o) \end{aligned} \right) \\
& + h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) - R_{ads,w,i} \Delta H_{ads,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) - R_{ads,C,i} \Delta H_{ads,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)
\end{aligned}$$

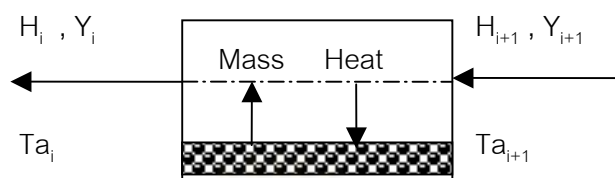
กลายเป็น

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} - \frac{(C_{p,da} (T_{a,i} - T_a^o)) dV_{HY,i}}{V_{HY,i}^2 dt} \\
& = \frac{NG_{in}}{L} (C_{p,da} + C_{p,v} H_{i-1} + C_{p,C} Y_{i-1})(T_{a,i-1} - T_{a,i}) + h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) \\
& - R_{ads,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{ads,w,i} - C_{p,v} (T_{a,i} - T_a^o) - \lambda_0) \\
& - R_{ads,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{ads,C,i} - C_{p,C} (T_{a,i} - T_a^o))
\end{aligned}$$

แทนค่า $R_{ads,w,i}$, $R_{ads,C,i}$ จะได้

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} - \frac{(C_{p,da} (T_{a,i} - T_a^o)) dV_{HY,i}}{V_{HY,i}^2 dt} \\
& = \left(\frac{NG_{in}}{L} \right) (C_{p,da} + C_{p,v} H_{i-1} + C_{p,C} Y_{i-1})(T_{a,i-1} - T_{a,i}) + \left(\frac{h_{c,i} a A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) \\
& - \left(\frac{k_{c,w,i} a A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{ads,w,i} - C_{p,v} (T_{a,i} - T_a^o) - \lambda_0) (H_i - H_{s,i}) \\
& - \left(\frac{k_{c,C,i} a A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{ads,C,i} - C_{p,C} (T_{a,i} - T_a^o)) (Y_i - Y_{s,i})
\end{aligned}$$

3.1.2 สมการสมดุลมวลสารและพลังงานของการดูดซับความชื้นและการระเหยน้ำได้ออกไซด์พร้อมกันในด้านกายการดูดซับ(หรือด้านรีเจนเรชั่น)



รูปที่ 3.5 การถ่ายเทมวลและความร้อนในเซลล์ที่ i ของท่อที่ j ด้านการกายการดูดซับ

3.1.2.1 สมดุลมวลของความชื้นในเฟสของแข็ง ที่ เซลล์ i

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลเข้า} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลออก} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการคาย} \\ \text{การดูดซับของ} \\ \text{ความชื้นในเฟส} \\ \text{ของแข็ง} \end{array} \right)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) W_{w,i} \right) = 0 - 0 - R_{des,w,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

$$\frac{d}{dt} (W_{w,i}) = -R_{des,w,i}$$

อัตราการคายการดูดซับของความชื้น คำนวณจาก

$$R_{des,w,i} = \frac{k_{c,w,i} a (H_{s,i} - H_i)}{\rho_{sb}}$$

จะได้

$$\frac{d}{dt} (W_{w,i}) = \frac{k_{c,w,i} a (H_i - H_{s,i})}{\rho_{sb}} \quad \text{-----(7)}$$

3.1.2.2 สมดุลมวลของ CO₂ ในเฟสของแข็ง ที่ เซลล์ i

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาเข้า} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาออก} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการคายการ} \\ \text{ดูดซับของ CO}_2 \\ \text{ในเฟสของแข็ง} \end{array} \right)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) W_{C,i} \right) = 0 - 0 - R_{des,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

$$\frac{d}{dt} (W_{C,i}) = -R_{des,C,i}$$

อัตราการคายการดูดซับของ CO₂ คำนวณจาก

$$R_{des,C,i} = \frac{k_{c,C,i} a (Y_{s,i} - Y_i)}{\rho_{sb}}$$

จะได้

$$\frac{d}{dt} (W_{C,i}) = \frac{k_{c,C,i} a (Y_i - Y_{s,i})}{\rho_{sb}} \quad \text{----- (8)}$$

3.1.2.3 สมดุลมวลของความชื้นในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ i

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาเข้า} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาออก} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการคายการ} \\ \text{ดูดซับของความชื้น} \\ \text{ในเฟสของแข็ง} \end{array} \right)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,i}} \left(\frac{\varepsilon A_c L}{N} \right) H_i \right) = \varepsilon A_c G_{i+1} H_{i+1} - \varepsilon A_c G_i H_i + R_{des,w,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

จากสมการอนุรักษ์ของมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเซลล์

$$G_{i+1} = G_i = G_{in}$$

หารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{\varepsilon A_c L}{N}\right)$ จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{H_i}{V_{HY,i}} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (H_{i+1} - H_i) + R_{des,w,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

กลายเป็น

$$\left(\frac{1}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dH_i}{dt} \right) - \left(\frac{H_i}{V_{HY,i}^2} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (H_{i+1} - H_i) + R_{des,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

แทนค่า $R_{des,w,i}$ ในสมการ

$$\left(\frac{dH_i}{dt} \right) = \frac{V_{HY,i} NG_{in}}{L} (H_{i+1} - H_i) - \left(\frac{k_{c,w,i} a A_{ss} V_{HY,i}}{\varepsilon A_c} \right) (H_i - H_{s,i}) + \left(\frac{H_i}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right)$$

----- (9)

3.1.2.4 สมดุลมวลของ CO₂ ในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ i

$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right)$	=	$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาเข้า} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right)$	-	$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลขาออก} \\ \text{ของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right)$	+	$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการคายการ} \\ \text{ดูดซับของ CO}_2 \text{ ใน} \\ \text{เฟสของแข็ง} \end{array} \right)$
---	---	--	---	---	---	--

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,i}} \left(\frac{\varepsilon A_c L}{N} \right) Y_i \right) = \varepsilon A_c G_{i+1} Y_{i+1} - \varepsilon A_c G_i Y_i + R_{des,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

หารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{\varepsilon A_c L}{N}\right)$ จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{Y_i}{V_{HY,i}} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (Y_{i+1} - Y_i) + R_{des,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

$$\left(\frac{1}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dY_i}{dt} \right) - \left(\frac{Y_i}{V_{HY,i}^2} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (Y_{i+1} - Y_i) + R_{des,C,i} \rho_{sb} \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right)$$

แทนค่า $R_{des,C,i}$ ในสมการ

$$\left(\frac{dY_i}{dt} \right) = \frac{V_{HY,i} NG_{in}}{L} (Y_{i+1} - Y_i) - \left(\frac{k_{c,C,i} a A_{ss} V_{HY,i}}{\varepsilon A_c} \right) (Y_i - Y_{s,i}) + \left(\frac{Y_i}{V_{HY,i}} \right) \left(\frac{dV_{HY,i}}{dt} \right)$$

----- (10)

3.1.2.5 สมดุลพลังงานในเฟสของแข็ง ที่ เซลล์ i



$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\left(\frac{\rho_{ss} A_{ss} L}{N} \right) E_{ss,i} \right) &= 0 - 0 + h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) (T_{a,i} - T_{s,i}) \\ &\quad - R_{ads,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,w,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) - R_{des,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,C,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) \end{aligned}$$

หารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$ จะได้

$$\frac{d}{dt} (\rho_{ss} E_{ss,i}) = h_{c,i} a (T_{a,i} - T_{s,i}) - R_{des,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,w,i} - R_{des,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,C,i}$$

แทนค่าของ $E_{ss,i}$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left((\rho_{sh} C_{p,sh} + \rho_{sb} (C_{p,sub} + C_{p,water} W_{w,i} + C_{p,C(Lq)} W_{C,i})) (T_{s,i} - T_s^o) \right) \\ = + h_{c,i} a (T_{a,i} - T_{s,i}) - R_{ads,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,w,i} - R_{ads,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{ads,C,i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\rho_{sh} C_{p,sh} + \rho_{sb} (C_{p,sub} + C_{p,w} W_{w,i} + C_{p,C(Lq)} W_{C,i})) \frac{dT_{s,i}}{dt} \\ = + h_{c,i} a (T_{s,i} - T_{a,i}) - R_{des,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,w,i} - R_{des,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,C,i} \\ - (T_{s,i} - T_s^o) \left(\rho_{sb} C_{p,w} \frac{d}{dt} W_{w,i} + \rho_{sb} C_{p,C(Lq)} \frac{d}{dt} W_{C,i} \right) \end{aligned}$$

แทนค่า $R_{des,w,i}$, $R_{des,C,i}$ และ $\frac{d}{dt}(W_{w,i})$, $\frac{d}{dt}(W_{C,i})$

$$\begin{aligned} (\rho_{sh} C_{p,sh} + \rho_{sb} (C_{p,sub} + C_{p,w} W_{w,i} + C_{p,C(Lq)} W_{C,i})) \frac{dT_{s,i}}{dt} \\ = k_{c,w,i} a (\Delta H_{des,w,i} - C_{p,w} (T_{s,i} - T_s^o)) (H_i - H_{s,i}) \\ + k_{c,C,i} a (\Delta H_{des,C,i} - C_{p,C(Lq)} (T_{s,i} - T_s^o)) (Y_i - Y_{s,i}) - h_{c,i} a (T_{s,i} - T_{a,i}) \end{aligned}$$

-----(11)

3.1.2.6 สมดุลพลังงานในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ i



$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,i}} \left(\frac{\epsilon A_c L}{N} \right) E_{a,i} \right) = \epsilon A_c G_{i+1} E_{a,i+1} - \epsilon A_c G_i E_i - h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) (T_{a,i} - T_{s,i})$$

$$+ R_{des,w,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,w,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right) + R_{des,C,i} \rho_{sb} \Delta H_{des,C,i} \left(\frac{A_{ss} L}{N} \right)$$

จากสมการอนุรักษ์ของมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเซลล์

$$G_{i+1} = G_i = G_{in}$$

และหารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{\epsilon A_c L}{N} \right)$ จะได้

$$\frac{1}{V_{HY,i}} \frac{dE_{a,i}}{dt} - \left(\frac{E_{a,i}}{V_{HY,i}} \frac{dV_{HY,i}}{dt} \right) = \frac{NG_{in}}{L} (E_{a,i+1} - E_i) - h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) (T_{a,i} - T_{s,i})$$

$$+ R_{des,w,i} \Delta H_{des,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) + R_{des,C,i} \Delta H_{des,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right)$$

แทนค่าของ $E_{a,i}$, $E_{a,i+1}$ และ $\frac{dE_{a,i}}{dt}$ ในสมการ

$$\begin{aligned} & \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v}H_i + C_{p,C}Y_i)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} + \left(\frac{C_{p,v}(T_{a,i} - T_a^0) + \lambda_0}{V_{HY,i}} \right) \frac{dH_i}{dt} + \left(\frac{C_{p,C}(T_{a,i} - T_a^0)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dY_i}{dt} \\ & - \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v}H_i + C_{p,C}Y_i)(T_{a,i} - T_a^0) + \lambda_0 H_i}{V_{HY,i}^2} \right) \frac{dV_{HY,i}}{dt} \\ & = \frac{NG_{in}}{L} \left(\frac{C_{p,da}(T_{a,i+1} - T_{a,i}) + (C_{p,v}H_{i+1} + C_{p,C}Y_{i+1})(T_{a,i+1} - T_a^0)}{- (C_{p,v}H_i + C_{p,C}Y_i)(T_{a,i} - T_a^0) + \lambda_0(H_{i+1} - H_i)} \right) \\ & - h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) (T_{a,i} - T_{s,i}) + R_{des,w,i} \Delta H_{des,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) + R_{des,C,i} \Delta H_{des,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) \end{aligned}$$

แทนค่า $\left(\frac{dH_i}{dt} \right)$ และ $\left(\frac{dY_i}{dt} \right)$ ในสมการ

$$\begin{aligned} & \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v}H_i + C_{p,C}Y_i)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} + \frac{NG_{in}}{L} \left(\frac{(C_{p,v}H_{i+1} + C_{p,C}Y_{i+1})(T_{a,i} - T_a^0)}{- (C_{p,v}H_i + C_{p,C}Y_i)(T_{a,i} - T_a^0)} \right) \\ & \left. \begin{aligned} & + \lambda_0(H_{i+1} - H_i) \\ & - (C_{p,v}(T_{a,i} - T_a^0) + \lambda_0) R_{des,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) - C_{p,C}(T_{a,i} - T_a^0) R_{des,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) \\ & - \frac{(C_{p,dg}(T_{a,i} - T_a^0)) dV_{HY,i}}{V_{HY,i}^2 dt} \end{aligned} \right) \\ & = \frac{NG_{in}}{L} \left(\frac{C_{p,da}(T_{a,i+1} - T_{a,i}) + (C_{p,v}H_{i+1} + C_{p,C}Y_{i+1})(T_{a,i+1} - T_a^0)}{+ (C_{p,v}H_i + C_{p,C}Y_i)(T_{a,i} - T_a^0)} \right) \\ & - h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) (T_{a,i} - T_{s,i}) + R_{des,w,i} \Delta H_{des,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) \\ & + R_{des,C,i} \Delta H_{des,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\epsilon A_c} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} - \frac{(C_{p,da} (T_{a,i} - T_a^o))}{V_{HY,i}^2} \frac{dV_{HY,i}}{dt} \\
& = \frac{NG_{in}}{L} (C_{p,da} + C_{p,v} H_{i+1} + C_{p,C} Y_{i+1}) (T_{a,i+1} - T_{a,i}) - h_{c,i} a \left(\frac{A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (T_{a,i} - T_{s,i}) \\
& \quad + R_{des,w,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{des,w,i} - C_{p,v} (T_{a,i} - T_a^o) - \lambda_0) \\
& \quad + R_{des,C,i} \left(\frac{\rho_{sb} A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{des,C,i} - C_{p,C} (T_{a,i} - T_a^o))
\end{aligned}$$

แทนค่า $R_{des,w,i}$, $R_{des,C,i}$ จะได้

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v} H_i + C_{p,C} Y_i)}{V_{HY,i}} \right) \frac{dT_{a,i}}{dt} - \frac{(C_{p,da} (T_{a,i} - T_a^o))}{V_{HY,i}^2} \frac{dV_{HY,i}}{dt} \\
& = \left(\frac{NG_{in}}{L} \right) (C_{p,da} + C_{p,v} H_{i+1} + C_{p,C} Y_{i+1}) (T_{a,i+1} - T_{a,i}) + \left(\frac{h_{c,i} a A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (T_{s,i} - T_{a,i}) \\
& \quad - \left(\frac{k_{c,w,i} a A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{des,w,i} - C_{p,v} (T_{a,i} - T_a^o) - \lambda_0) (H_i - H_{s,i}) \\
& \quad - \left(\frac{k_{c,C,i} a A_{ss}}{\varepsilon A_c} \right) (\Delta H_{des,C,i} - C_{p,C} (T_{a,i} - T_a^o)) (Y_i - Y_{s,i})
\end{aligned} \tag{12}$$

3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้อง

เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติของอากาศภายในห้อง อันได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน โดยห้องที่ศึกษาเป็นห้องใช้ภายในอาคารสำนักงาน มีคนอยู่อาศัย และอุปกรณ์ที่ใช้งานประกอบด้วย เครื่องปรับอากาศและเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ซึ่งถือว่า เป็นห้องระบบปิด รูปทรงสี่เหลี่ยม ที่มีสมมติฐานว่าการไหลผ่านของลมเข้าห้องเป็นการไหลแบบลูกสูบสามารถแทนห้องด้วยถังกวนสมบูร์น K_R ถึงต่ออนุกรมกันที่มี

อากาศหมุนเวียนภายในห้องมาจากอากาศที่ผ่านออกมาจากเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน จากนั้นอากาศผ่านเข้าสู่เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนและไหลกลับเข้าสู่ห้อง ดังแสดงตามรูปที่ 3.6

สมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ มีดังต่อไปนี้

1. การไหลของลมเป็นแบบลูกสูบ และห้องแทนด้วยถังกวนสมบูรณ์ K ถึงต่ออนุกรมกัน
2. เนื่องจากการไหลของลมเป็นแบบลูกสูบ จึงไม่มีเกรเดียนต์ของความชื้น ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศการไหล
3. มีการถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังอาคารเข้าสู่ห้อง
4. มีการผลิตความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจออกของคนอาศัยอยู่ในห้อง
5. มีภาระการทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศและภาระความร้อนจากคนอาศัยอยู่ในห้อง

โดยมีค่าอัตราการผลิตความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนต่างๆ ดังนี้

- อัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจออกของคน เท่ากับ 0.005 ลิตร/วินาที/คน หรือ 0.3 ลิตร/นาทิต/คน สำหรับกิจกรรมในสำนักงาน (Vanculik,1990)

- อัตราการผลิตความชื้นจากการหายใจออกของคน คำนวณจาก ความร้อนจากการควบแน่นของไอน้ำ/ความร้อนแฝงการระเหยของน้ำ (Kreider,2002)

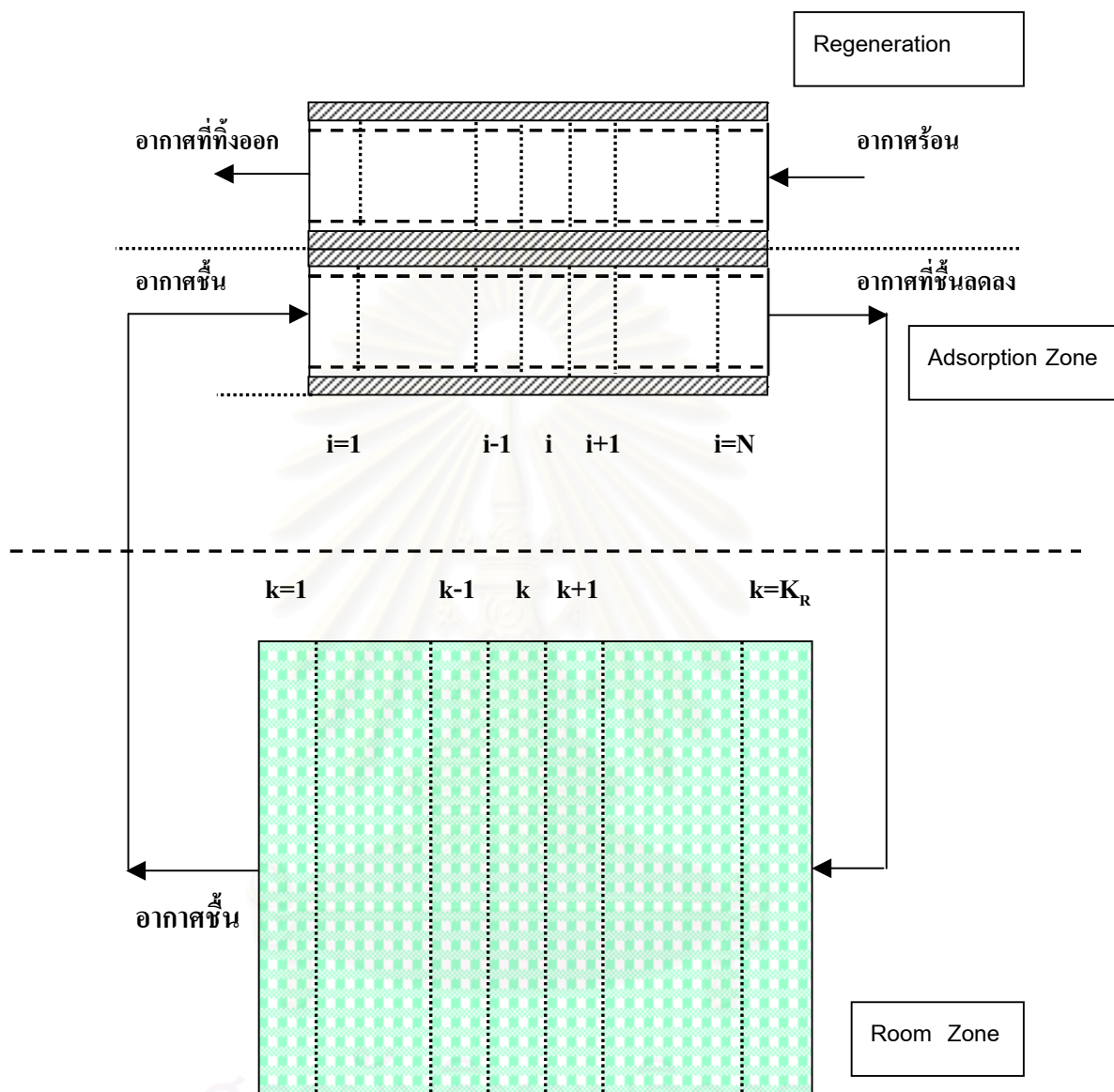
- อัตราการผลิตความร้อนจากคน เท่ากับ 125 วัตต์/คน สำหรับกิจกรรมในสำนักงาน (Kreider,2002) โดยเป็นความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เท่ากับ 75 วัตต์/คน และความร้อนจากการควบแน่นของไอน้ำ เท่ากับ 25 วัตต์/คน

- อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังอาคาร เท่ากับ 55 วัตต์/ ตารางเมตร

เป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535

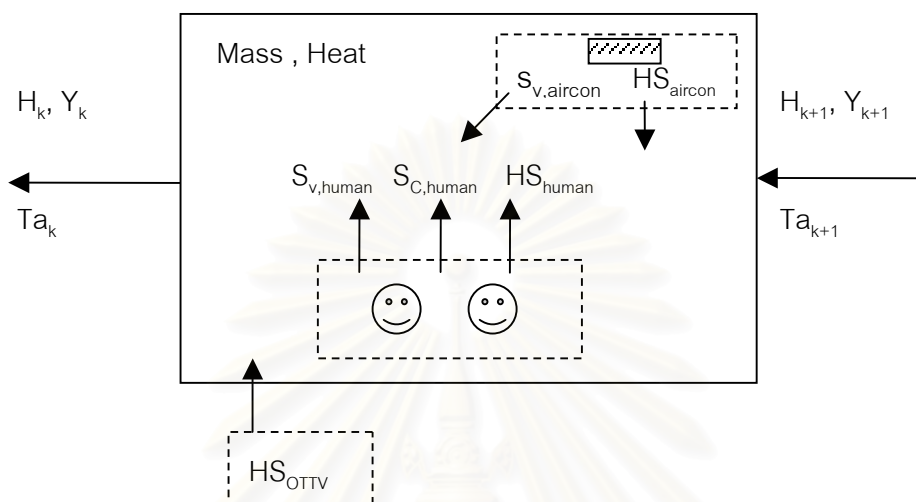
- ภาระการทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ เท่ากับ 1,000 บีทียู/ชั่วโมง/ ตารางเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนแทนด้วย N ถัง และห้องแทนด้วย K_R ถังต่ออนุกรมกัน

จากสมมติฐานแบบจำลองสร้างเป็นสมการสมดุลมวลและพลังงานของห้อง ดังต่อไปนี้และสามารถแทนระบบของเซลล์ที่ k ของห้องด้วยรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การถ่ายเทมวลและความร้อนในเซลล์ที่ k ของห้อง

3.2.1 สมดุลมวลของความชื้นในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ k

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลเข้า} \\ \text{ของความชื้นใน} \\ \text{เฟสก๊าซ} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลออก} \\ \text{ของความชื้นในเฟส} \\ \text{ก๊าซ} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการผลิต} \\ \text{ความชื้นจากการ} \\ \text{หายใจออกของคน} \\ \text{ความชื้นในเฟสก๊าซ} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการควบแน่นความชื้น} \\ \text{เป็นน้ำโดยเครื่องปรับอากาศ} \end{array} \right)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,k}} \left(\frac{A_R L_R}{K_R} \right) H_k \right) = A_R G_{k+1} H_{k+1} - A_R G_k H_k + S_{v, human} - S_{v, aircon}$$

จากสมการอนุรักษ์ของมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านเข้าห้อง

$$A_R G_{k+1} = A_R G_k = A_R G_{in,R}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศแห้งสำหรับทุกเซลล์

$$G_{k+1} = G_k = G_{in,R}$$

หารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{A_R L_R}{K_R} \right)$ จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{H_k}{V_{HY,k}} \right) = \frac{K_R G_{in,R}}{L_R} (H_{k+1} - H_k) + (S_{v, human} - S_{v, aircon}) \left(\frac{K_R}{A_R L_R} \right)$$

จาก

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{H_k}{V_{HY,k}} \right) = \left(\frac{1}{V_{HY,k}} \right) \left(\frac{dH_k}{dt} \right) - \left(\frac{H_k}{V_{HY,k}^2} \right) \left(\frac{dV_{HY,k}}{dt} \right)$$

จะได้

$$\left(\frac{dH_k}{dt} \right) = \frac{V_{HY,k} K_R G_{in,R}}{L_R} (H_{k+1} - H_k) + (S_{v, human} - S_{v, aircon}) \left(\frac{V_{HY,k} K_R}{A_R L_R} \right) + \left(\frac{H_k}{V_{HY,k}} \right) \left(\frac{dV_{HY,k}}{dt} \right)$$

----- (13)

3.2.2 สมดุลมวลของ CO₂ ในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ k



$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,k}} \left(\frac{A_R L_R}{K_R} \right) Y_k \right) = A_R G_{k+1} Y_{k+1} - A_R G_k Y_k + S_{C, human}$$

อัตราการไหลของอากาศหนึ่งสำหรับทุกเซลล์

$$G_{k+1} = G_k = G_{in,R}$$

หารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{A_R L_R}{K_R} \right)$ จะได้

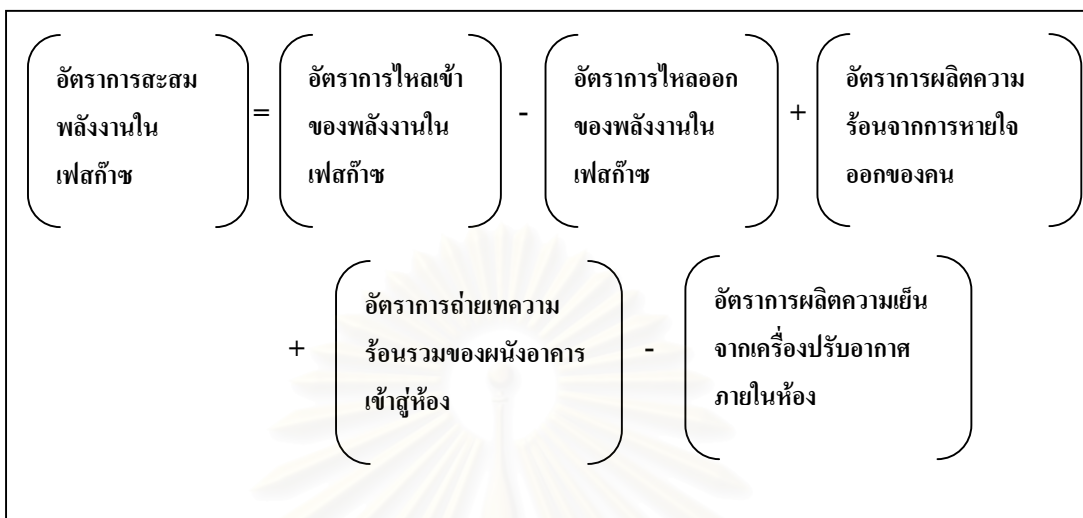
$$\left(\frac{1}{V_{HY,k}} \right) \left(\frac{dY_k}{dt} \right) - \left(\frac{Y_k}{V_{HY,k}^2} \right) \left(\frac{dV_{HY,k}}{dt} \right) = \left(\frac{K_R G_{in,R}}{L_R} \right) (Y_{k+1} - Y_k) + S_{C, human} \left(\frac{K_R L_R}{A_R} \right)$$

กลายเป็น

$$\left(\frac{dY_k}{dt} \right) = \left(\frac{V_{HY,k} K_R G_{in,R}}{L_R} \right) (Y_{k+1} - Y_k) + S_{C, human} \left(\frac{V_{HY,k} K_R}{A_R L_R} \right) + \left(\frac{Y_k}{V_{HY,k}} \right) \left(\frac{dV_{HY,k}}{dt} \right)$$

------(14)

3.2.3 สมดุลพลังงาน ในเฟสก๊าซ ที่ เซลล์ k



$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{HY,k}} \left(\frac{A_R L_R}{K_R} \right) E_{a,k} \right) = A_R G_{k+1} E_{a,k+1} - A_R G_{k+1} E_k + HS_{human} + HS_{OTTV} - HS_{aircon}$$

อัตราการไหลของอากาศแห้งสำหรับทุกเซลล์

$$G_{i+1} = G_i = G_{in,R}$$

แทนค่า G_{in} ในสมการหลักและหารทั้งสมการด้วย $\left(\frac{A_R L_R}{K_R} \right)$ จะได้

$$\frac{1}{V_{HY,k}} \frac{dE_{a,k}}{dt} - \left(\frac{E_{a,k}}{V_{HY,k}^2} \frac{dV_{HY,k}}{dt} \right) = \frac{K_R G_{in,R}}{L_R} (E_{a,k+1} - E_k) + \left(\frac{K_R}{A_R L_R} \right) (HS_{human} + HS_{OTTV} - HS_{aircon})$$

เมื่อ เอนทัลปีของอากาศชื้นของเซลล์ k เท่ากับ

$$E_{a,k} = (C_{p,da} + C_{p,v} H_k + C_{p,c} Y_k) (T_{a,k} - T_a^0) + \lambda_0 H_k$$

เมื่อทำการดิฟเฟอเรนเชียลของเอนทัลปีของอากาศขึ้นกับเวลา จะได้

$$\frac{dE_{a,k}}{dt} = (C_{p,da} + C_{p,v}H_k + C_{p,C}Y_k) \frac{dT_{a,k}}{dt} + (C_{p,v}(T_{a,k} - T_a^0) + \lambda_0) \frac{dH_k}{dt} + (C_{p,C}(T_{a,k} - T_a^0)) \frac{dY_k}{dt}$$

แทนค่าของ $E_{k,i}$, $E_{k,i+1}$ และ $\frac{dE_{k,i}}{dt}$ ในสมการ

$$\frac{1}{V_{HY,k}} \frac{dE_{a,k}}{dt} - \left(\frac{E_{a,k}}{V_{HY,k}^2} \frac{dV_{HY,k}}{dt} \right) = \frac{K_R G_{in,R}}{A_R L_R} (E_{a,k+1} - E_k) + \left(\frac{K_R}{A_R L_R} \right) (HS_{human} + HS_{OTTV} - HS_{aircon})$$

ต่อไปเป็น

$$\begin{aligned} & \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v}H_k + C_{p,C}Y_k)}{V_{HY,k}} \right) \frac{dT_{a,k}}{dt} + \left(\frac{C_{p,v}(T_{a,k} - T_a^0) + \lambda_0}{V_{HY,k}} \right) \frac{dH_k}{dt} + \left(\frac{C_{p,C}(T_{a,k} - T_a^0)}{V_{HY,k}} \right) \frac{dY_k}{dt} \\ & - \left(\frac{(C_{p,da} + C_{p,v}H_k + C_{p,C}Y_k)(T_{a,k} - T_a^0) + \lambda_0 H_k}{V_{HY,k}^2} \right) \frac{dV_{HY,k}}{dt} \\ & = \frac{K_R G_{in,R}}{L_R} \left(C_{p,da}(T_{a,k+1} - T_{a,k}) + (C_{p,v}H_{k+1} + C_{p,C}Y_{k+1})(T_{a,k+1} - T_a^0) \right. \\ & \quad \left. - (C_{p,v}H_k + C_{p,C}Y_k)(T_{a,k} - T_a^0) + \lambda_0(H_{k+1} - H_k) \right) \\ & \quad + \left(\frac{K_R}{A_R L_R} \right) (HS_{human} + HS_{OTTV} - HS_{aircon}) \end{aligned}$$

แทนค่า $\left(\frac{dH_k}{dt} \right)$ และ $\left(\frac{dY_k}{dt} \right)$ ในสมการจะได้

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{C_{p,da} + C_{p,v} H_k + C_{p,C} Y_k}{V_{HY,k}} \right) \frac{dT_{a,k}}{dt} - \left(\frac{C_{p,da} (T_{a,k} - T_a^o)}{V_{HY,k}^2} \right) \frac{dV_{HY,k}}{dt} + \\
& \left((C_{p,v} (T_{a,k} - T_a^o) + \lambda_0) (S_{v,human} - S_{v,aircon}) + C_{p,C} (T_{a,k} - T_a^o) S_{C,human} \right) \left(\frac{K_R}{A_R L_R} \right) \\
& = \frac{K_R G_{in,R}}{L_R} (C_{p,da} + C_{p,v} H_{k+1} + C_{p,C} Y_{k+1}) (T_{a,k+1} - T_{a,k}) \\
& + \left(\frac{K_R}{A_R L_R} \right) (HS_{human} + HS_{OTTV} - HS_{aircon})
\end{aligned}$$

จากนั้นกลายเป็น

$$\begin{aligned}
& (C_{p,da} + C_{p,v} H_k + C_{p,C} Y_k) \frac{dT_{a,k}}{dt} \\
& = \frac{K_R G_{in,R} V_{HY,k}}{L_R} (C_{p,da} + C_{p,v} H_{k+1} + C_{p,C} Y_{k+1}) (T_{a,k+1} - T_{a,k}) \\
& + \left(\frac{K_R V_{HY,k}}{A_R L_R} \right) (HS_{human} + HS_{OTTV} - HS_{aircon}) \\
& - \left(\frac{K_R V_{HY,k}}{A_R L_R} \right) \left((C_{p,v} (S_{v,human} - S_{v,aircon}) + C_{p,C} S_{C,human}) (T_{a,k} - T_a^o) \right. \\
& \left. + \lambda_0 (S_{v,human} - S_{v,aircon}) \right) \\
& + \left(\frac{C_{p,da} (T_{a,k} - T_a^o)}{V_{HY,k}} \right) \frac{dV_{HY,k}}{dt}
\end{aligned}$$

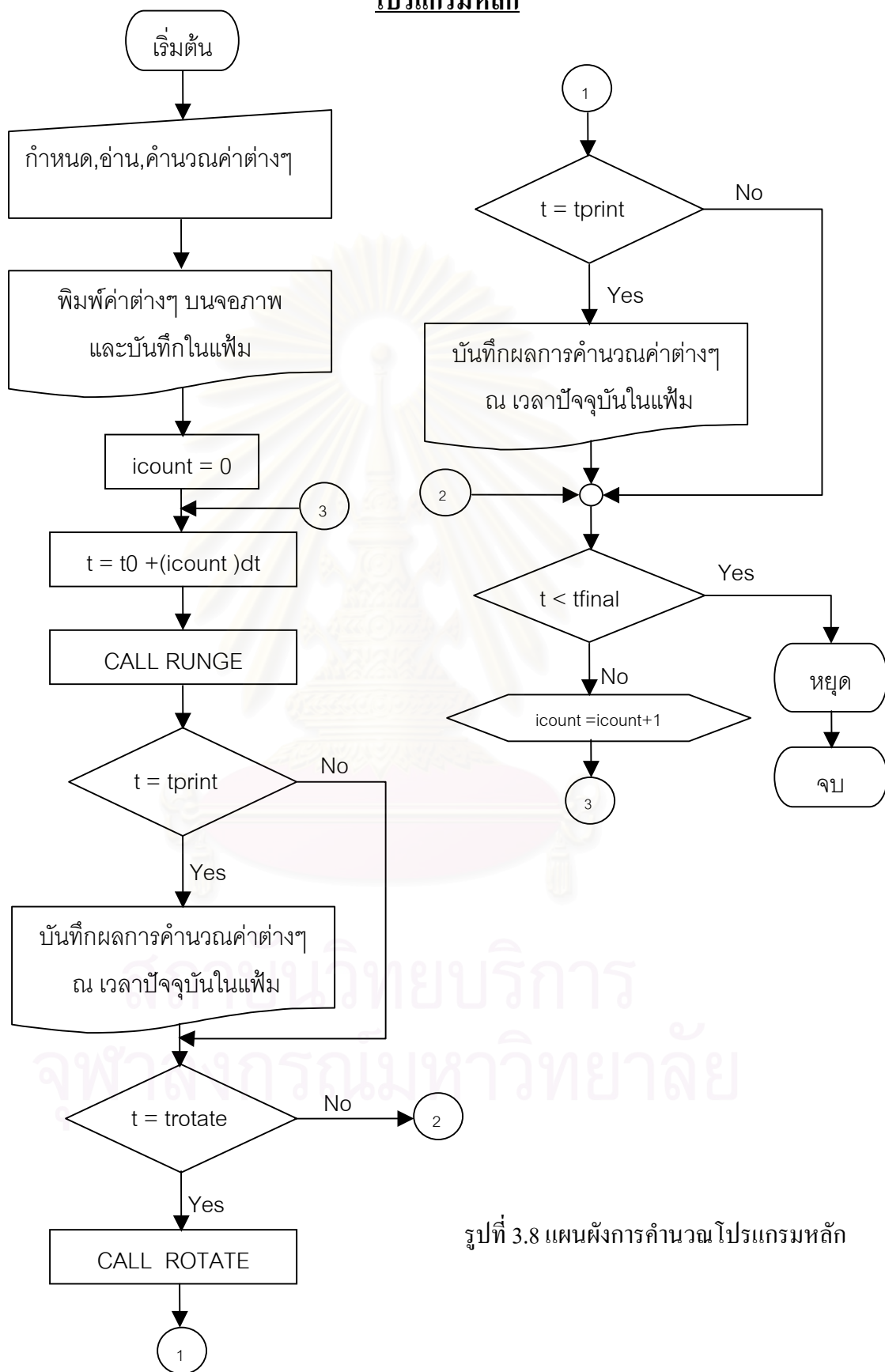
------(15)

3.3 อัลกอริทึมและแผนผังการคำนวณ

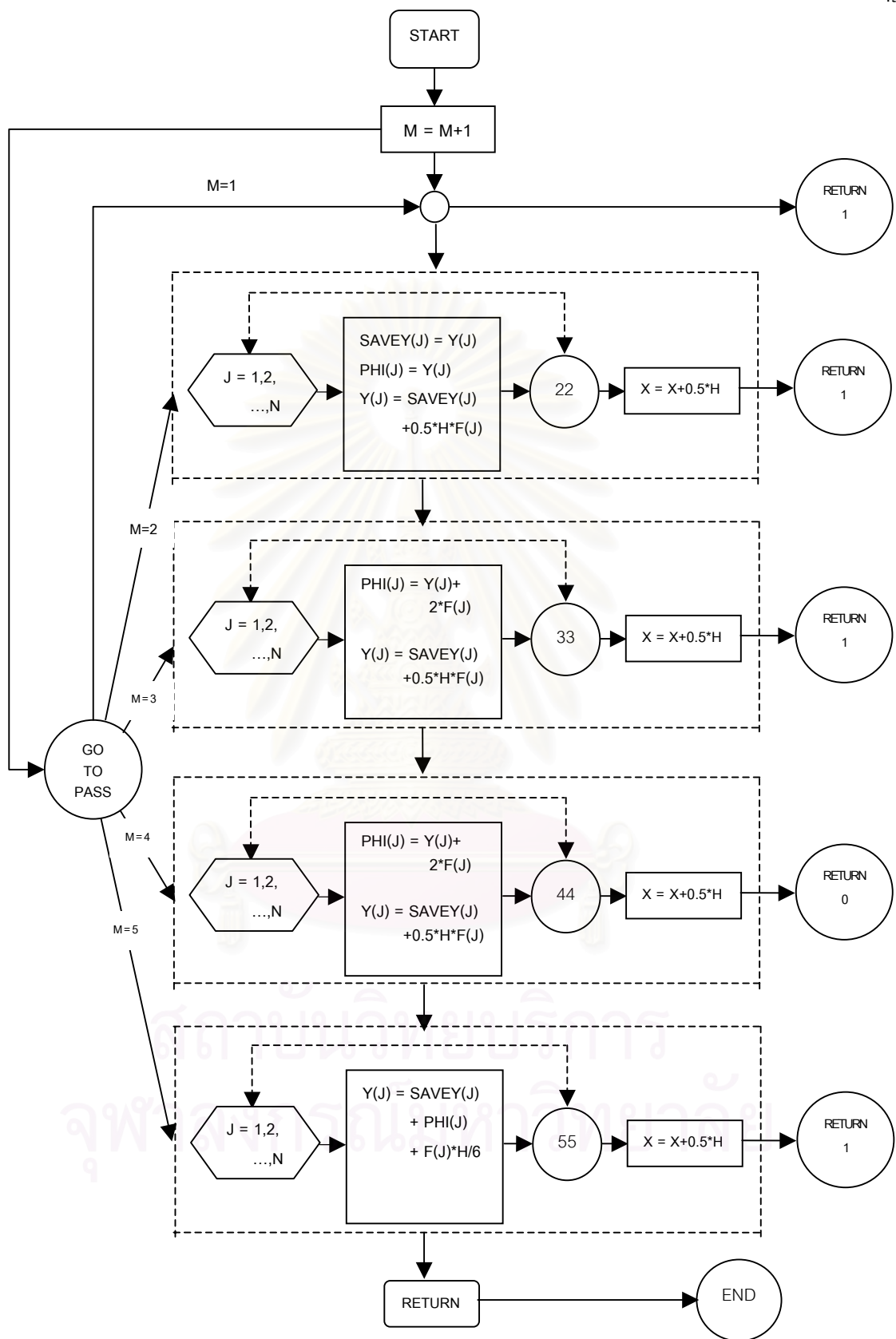
1. ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่โปรแกรมต้องการ เช่น ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า และที่สถานะเริ่มต้น ในด้านการดูดซับและการรีเจนเรชั่น
2. พิมพ์ค่าพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าไป ของสถานะทางเข้าและสถานะเริ่มต้น บนหน้าจอภาพ
3. กำหนดเวลาเริ่มต้น และทำการคำนวณหา ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นในอากาศ มวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผนังรังผึ้ง ความชื้นที่ผนังรังผึ้ง อุณหภูมิโรเตอร์ อุณหภูมิอากาศ ของด้านการดูดซับและการรีเจนเรชั่นของเครื่องดูดซับ และในส่วนของความชื้น ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิของอากาศในแบบจำลองเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้อง ด้วยระเบียบวิธีรุงง- คูดตาอันดับสี่ ซึ่งจะสามารถทำการอินทิเกรตได้พร้อมกันทั้งหมด $(6(N \cdot M) + 3K_R)$ ชุดของสมการอนุพันธ์เชิงสามัญ โดยมีชุดสมการของเครื่องดูดซับในด้านดูดซับมาจากสมการ (1)-(6) จำนวน $6(N \cdot M_{ads})$ ชุด ด้านการรีเจนเรชั่น มาจากสมการ (7)-(12) จำนวน $6(N \cdot M_{des})$ ชุด และสำหรับภายในห้องมาจากสมการ (13)-(15) จำนวน $3(K_R)$ ชุด
4. ให้ตรวจสอบว่า ถ้าถึงเวลาที่กำหนดให้แสดงผล และไปขั้นตอนต่อไป แต่ถ้าไม่ ให้ไปข้อ 6
5. ทำการบันทึกผลการคำนวณลงในแฟ้ม
6. ให้ตรวจสอบว่า ถ้าถึงเวลาที่โรเตอร์หมุน ให้ไปขั้นตอนต่อไป แต่ถ้าไม่ ให้ไปที่ข้อ 8
7. ท่อที่ j จะหมุนไปอยู่แทนที่ในท่อที่ $j+1$ จนครบรอบ ($j= 1, 2, \dots, Mslot-1$) จนถึงสุดท้าย ท่อที่ $Mslot$ จะไปแทนที่ ท่อที่ 1
8. ให้ตรวจสอบว่า ถ้าถึงเวลาแสดงผล ให้ทำขั้นตอนต่อไป แต่ถ้าไม่ ให้ไปที่ข้อ 10
9. ทำการบันทึกข้อมูลผลการคำนวณหลังการหมุนลงในแฟ้มและแสดงผล ความชื้น ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิบนจอภาพ
10. ถ้าถึงตามเวลาสุดท้ายที่กำหนด ให้จบโปรแกรม แต่ถ้าไม่ให้กลับไปยังข้อ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

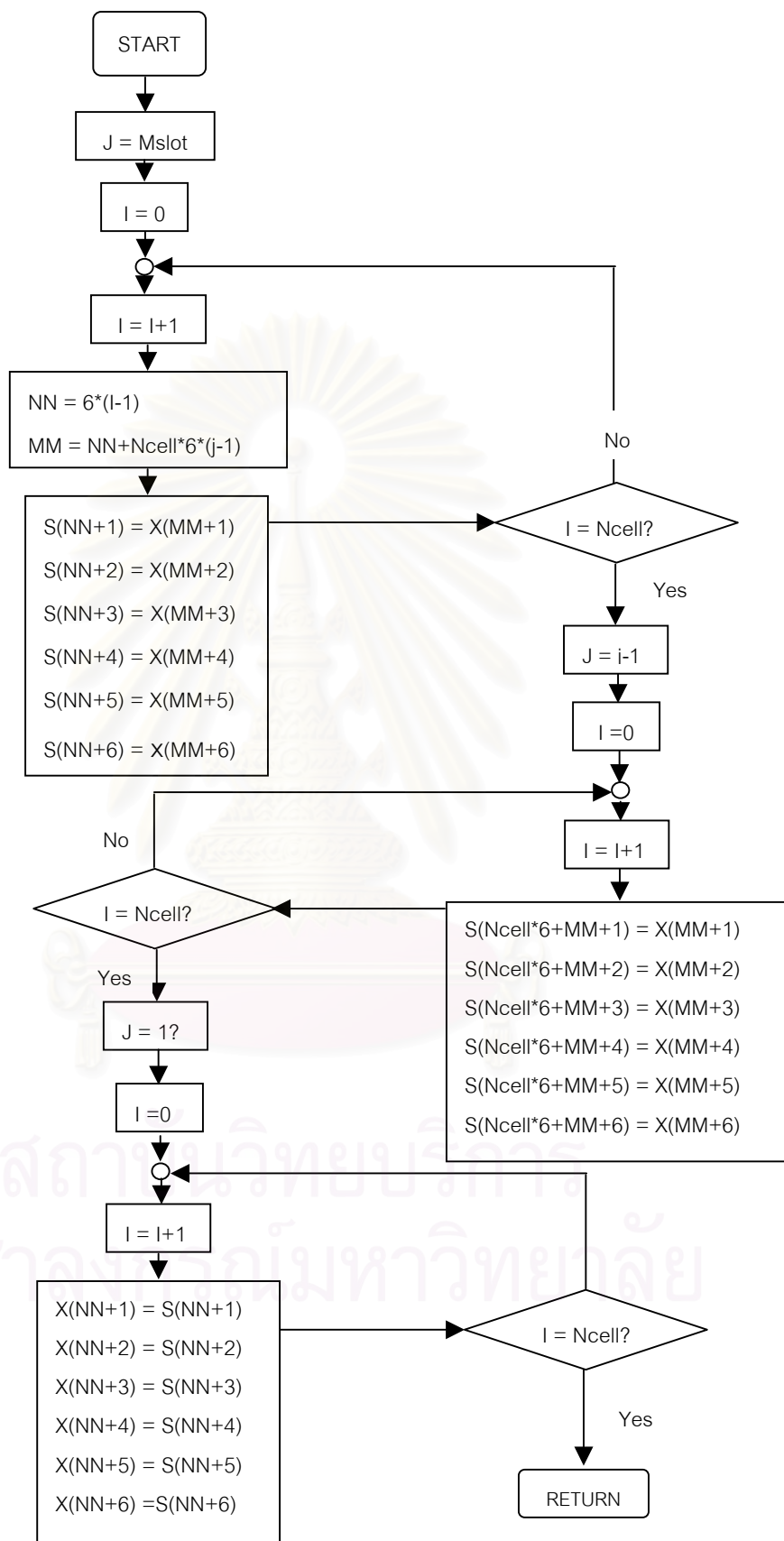
โปรแกรมหลัก



รูปที่ 3.8 แผนผังการคำนวณโปรแกรมหลัก



รูปที่ 3.9 แผนผังการคำนวณโปรแกรมย่อย RUNGE



รูปที่ 3.10 แผนผังการคำนวณ โปรแกรมย่อย ROTATE

บทที่ 4

ผลการจำลองเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนและการวิเคราะห์ผล

4.1 การทดสอบความถูกต้องของไอโซเทอมของสมดุลการดูดซับบนโมเลกุลเฉีฟ 13X

ไอโซเทอมสมดุลของการดูดซับร่วมของสารผสม 2 องค์ประกอบ(Binary mixture) ของ ความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์บนสารดูดซับโมเลกุลเฉีฟ 13X ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มาจาก สมการสหสัมพันธ์ที่สร้างโดย Shen และWorek (1994) ซึ่งใช้เขาได้ทำสหสัมพันธ์เปรียบเทียบกับ ผลการทดลองของ Hine et al.(1992) พบว่ามีความถูกต้องแม่นยำที่อุณหภูมิ 298 K โดยผู้วิจัยได้ อาศัยสหสัมพันธ์ของไอโซเทอมสมดุลการดูดซับ มาใช้เพื่อทำนายความสามารถในการดูดซับ ความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกัน ซึ่งก่อนที่จะนำสหสัมพันธ์นี้ไปใช้งานต่อไปต้องมีการไป ทดสอบค่าความถูกต้องเปรียบเทียบกับเอกสารที่อ้างอิงและผลการทดลอง

ความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดซับร่วมของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ดังนี้

$$W_C = f(T_m, RH, Y_{m,c})$$

$$W_w = f(T_m, RH, Y_{m,c})$$

โดยที่ T_m - อุณหภูมิ ณ สมดุลย์ [K]

RH - ความชื้นสัมพัทธ์ [-]

$Y_{m,c}$ - สัดส่วนมวลของ CO_2 ณ ที่สมดุลบนสารดูดซับต่ออากาศแห้ง [$kg_{CO_2}/kg_{dry\ air}$]

W_C - ปริมาณ CO_2 ที่ถูกดูดซับ [$kg_{CO_2}/kg_{adsorbent}$]

W_w - ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ [$kg_w/kg_{adsorbent}$]

จากสหสัมพันธ์ของสมการสมดุลการดูดซับรวมความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ ได้แก่

4.1.1 ความชื้น

สำหรับ ความชื้นหรือไอน้ำ ทั้งที่เป็นสารผสมองค์ประกอบเดียวและ 2 องค์ประกอบ สามารถใช้สมการDubinin-Polanyi โดยมีกรนิยามให้ ศักยภาพการดูดซับ (Adsorption potential, A) เป็น

$$A = -RT_m \ln(RH)$$

ในการหาสมการสหสัมพันธ์กับผลการทดลองได้พบว่า สมการของ Dubinin-Polanyi ให้ค่าที่ความถูกต้อง โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ที่ความชื้นต่ำๆ สามารถแสดงสมการสมดุลความชื้นได้ดังนี้

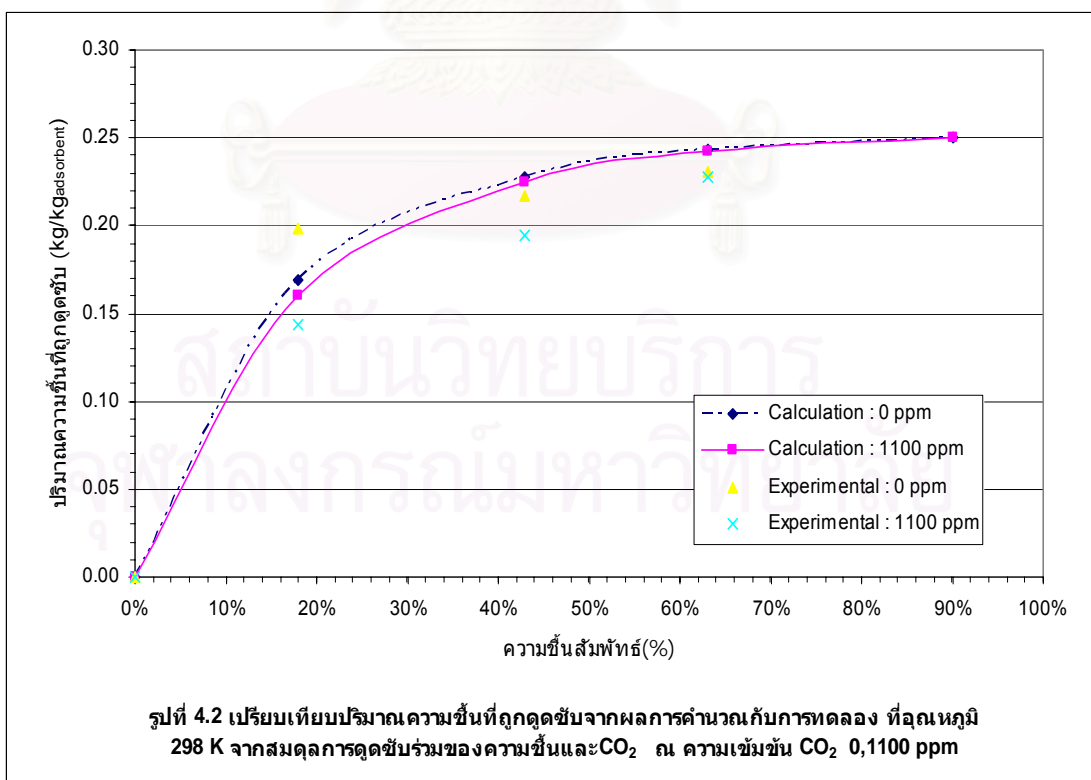
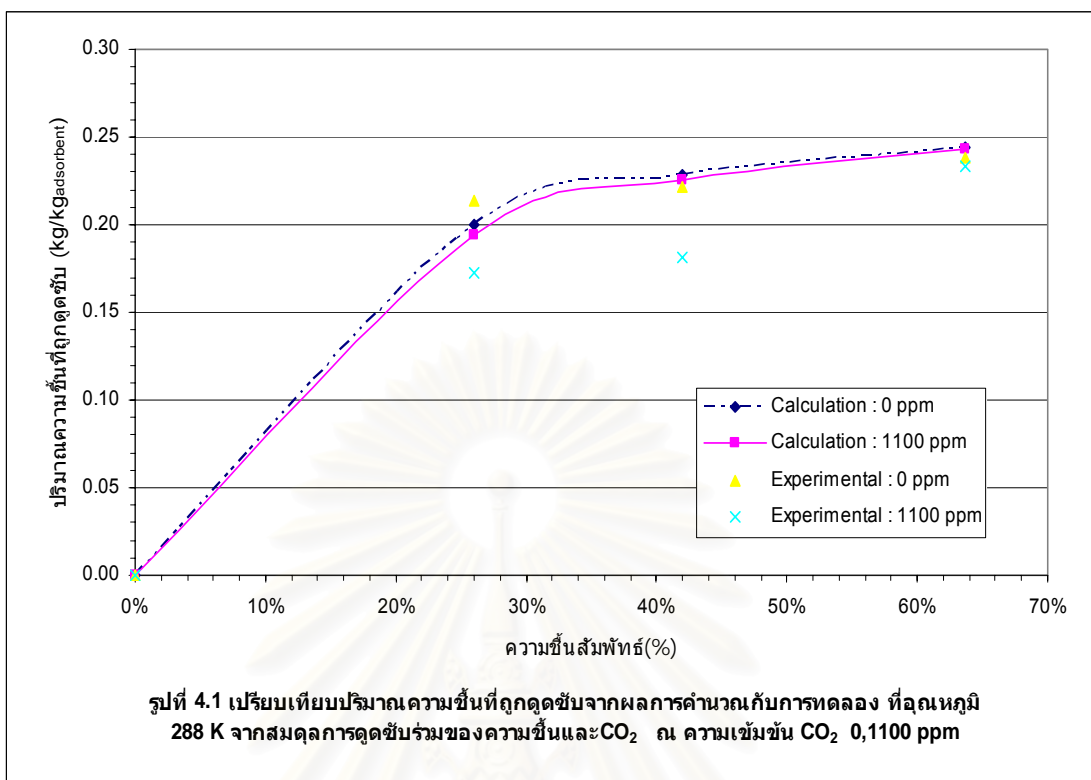
$$W_w = K(RH) \quad ; \quad RH < 0.21$$

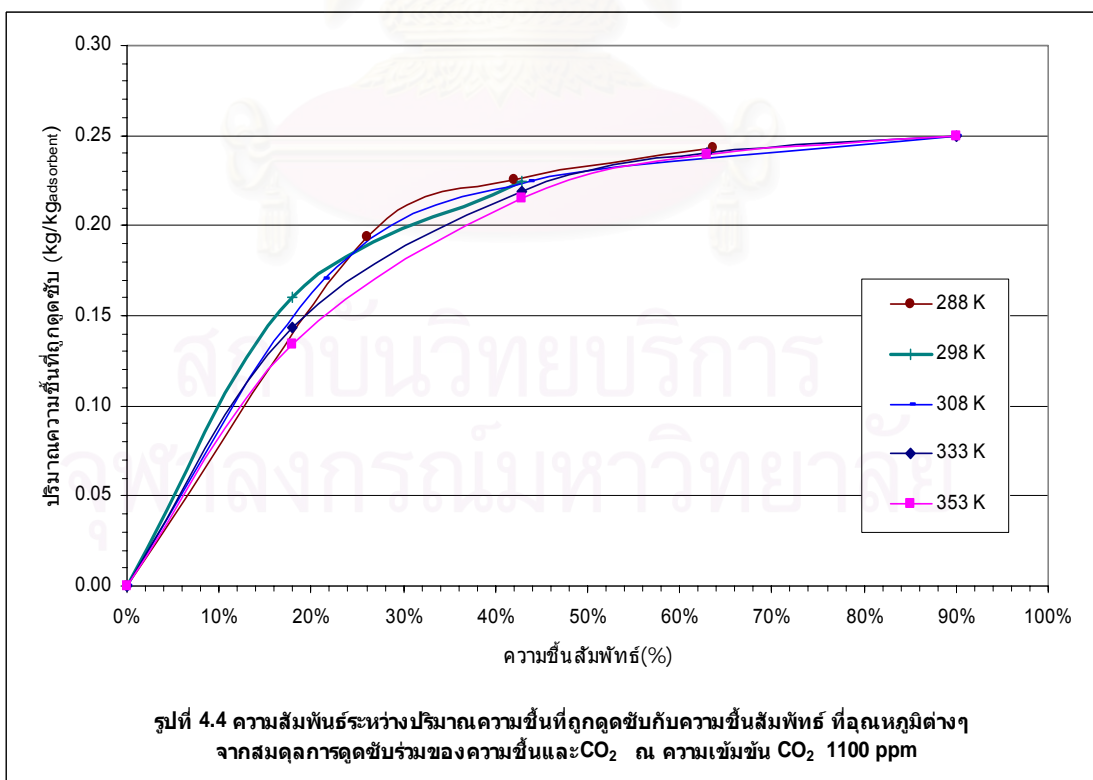
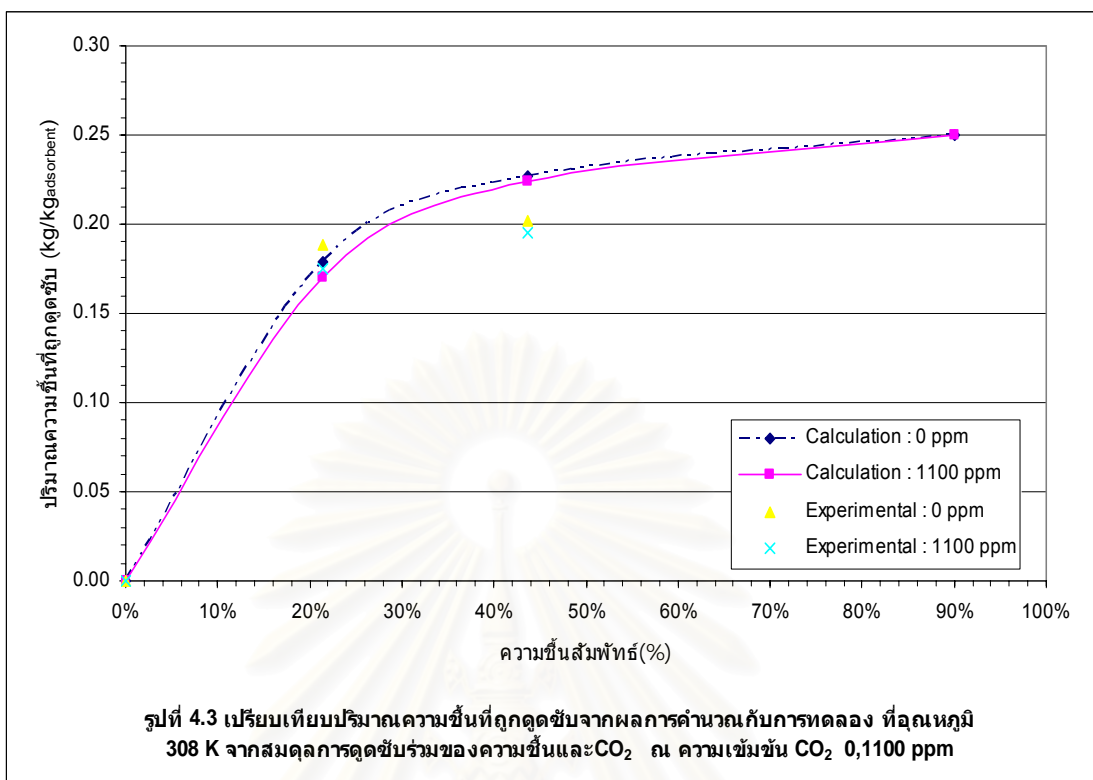
$$W_w = 0.2506 \exp \left[- \left(- \frac{RT(\ln(RH))}{6782.9239 - 250000Y_{m,C}} \right)^2 \right] \quad ; \quad 0.21 < RH < 0.65$$

จากผลการทดสอบได้ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจากสหสัมพันธ์กับผลการทดลอง สามารถแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับผลจากการทดลองที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 0 และ 1100 ppm ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งสามารถพิจารณาความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากตารางที่กล่าวมา นอกจากนั้นตามรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับบนโมเลกุลวลาซีฟ 13X ที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 1100 ppm ได้ว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณความชื้นจะถูกดูดซับลดลง และยังรายละเอียดผลการคำนวณของปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับบนโมเลกุลวลาซีฟ 13X ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์อื่นนอกเหนือจากที่อ้างอิงมา แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจากสทหัมพันธ์กับผลการทดลอง

อุณหภูมิ (K)	ความเข้มข้น CO ₂ (kg _C /kg _{da})	ความชื้น สัมพัทธ์ (-)	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ จากผลการทดลอง(kg _w /kg _{adsorbent})	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ จากสทหัมพันธ์ (kg _w /kg _{adsorbent})	% ค่าความ แตกต่าง
288	0	0.26	0.214	0.1999	6.61
		0.42	0.222	0.2281	2.76
		0.637	0.238	0.2444	2.692
	1100	0.26	0.173	0.1938	12.02
		0.42	0.181	0.2252	24.43
		0.637	0.233	0.2436	4.54
298	0	0.18	0.198	0.1661	16.11
		0.429	0.217	0.2277	4.94
		0.63	0.231	0.2435	5.42
	1100	0.18	0.144	0.157	9.05
		0.429	0.194	0.2247	15.84
		0.63	0.228	0.2426	6.38
308	0	0.214	0.188	0.1786	5.02
		0.437	0.202	0.2272	12.49
	1100	0.214	0.175	0.1704	2.61
		0.437	0.195	0.2242	14.95





4.1.2 คาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ขณะมีไอน้ำร่วม ในช่วงความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ระหว่าง 0-1100 ppm สามารถให้สมการสมดุลของคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นความสัมพันธ์เส้นตรงตามกฎของเฮนรี(Henry's law) โดยมีสมการสมดุล ดังนี้

$$W_c = K(T_m, RH)Y_{m,c}$$

โดยที่ $K(T_m, RH)$ = ค่าคงที่เฮนรี (Henry's constant)

$$K(T_m, RH) = \left[\frac{1 + B_2(RH) + B_4(RH)^2 + B_6(RH)^3}{B_1 + B_3(RH) + B_5(RH)^2} \right] \exp \left[\frac{\Delta h_s}{R} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_m^0} \right) \right] ; 0.0 < RH < 0.63$$

$$K(T_m, RH) = \left[\frac{1}{B_7 + B_8(RH - 0.63)} \right] \exp \left[\frac{\Delta h_s}{R} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_m^0} \right) \right] ; 0.63 < RH < 1.0$$

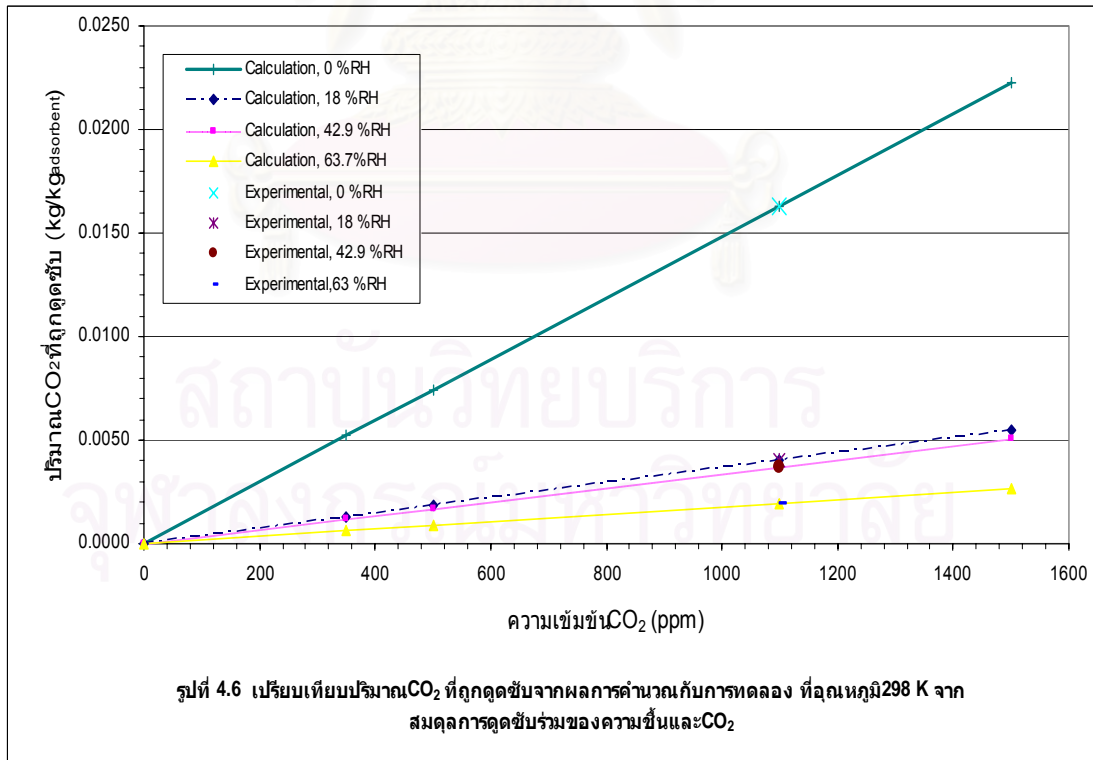
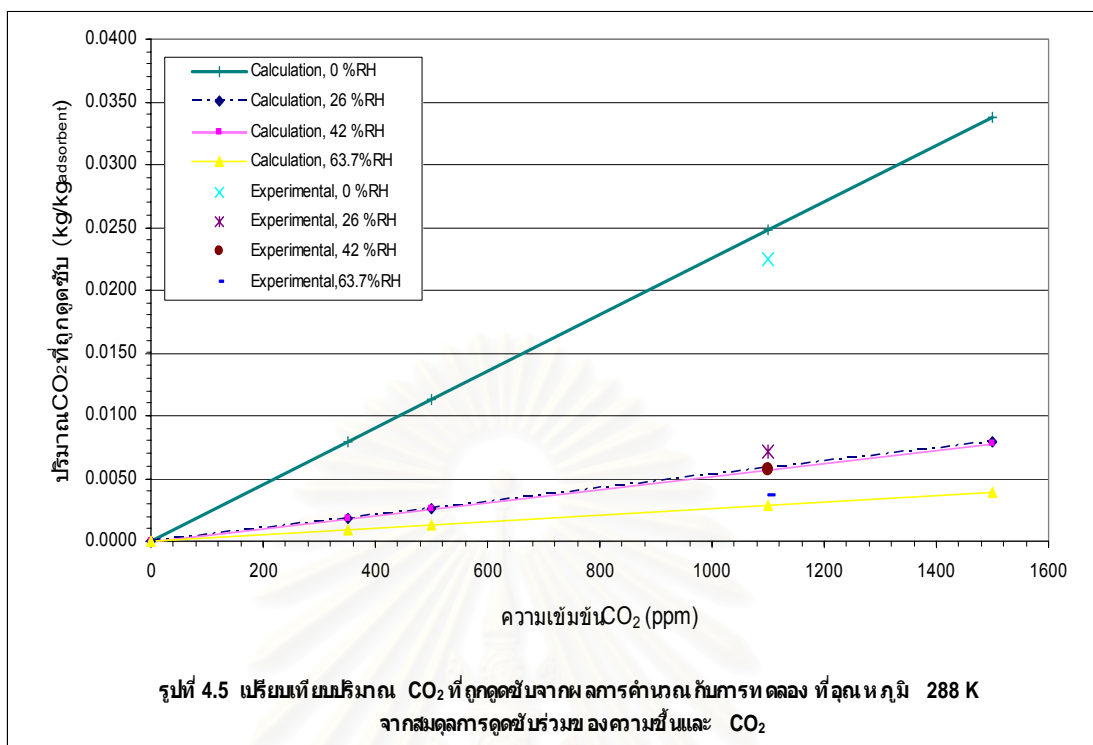
โดยที่	$B_1 = 0.10455$	$B_2 = -9.3526$
	$B_3 = -0.36047$	$B_4 = 38.2398$
	$B_5 = 38.2398$	$B_6 = 3.2828$
	$B_7 = -35.71$	$B_8 = 0.87043$
	$\Delta h_s = 29803.318 \text{ J/mole}$	$T_m^0 = 298 \text{ K}$

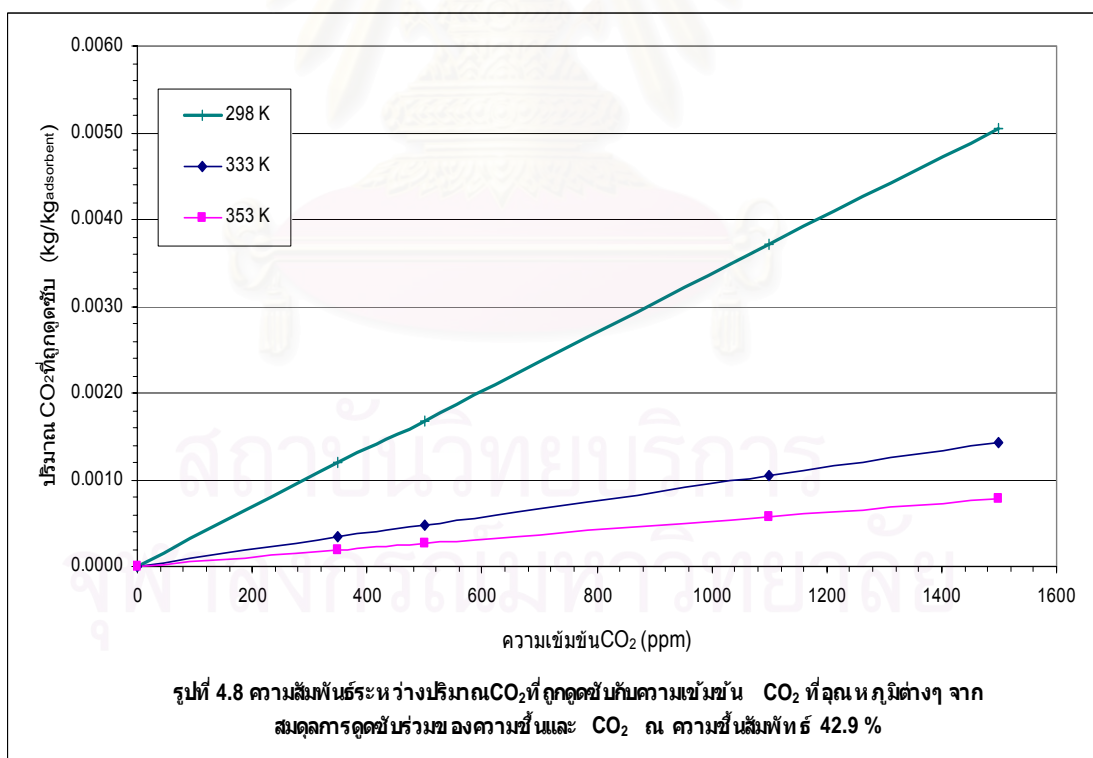
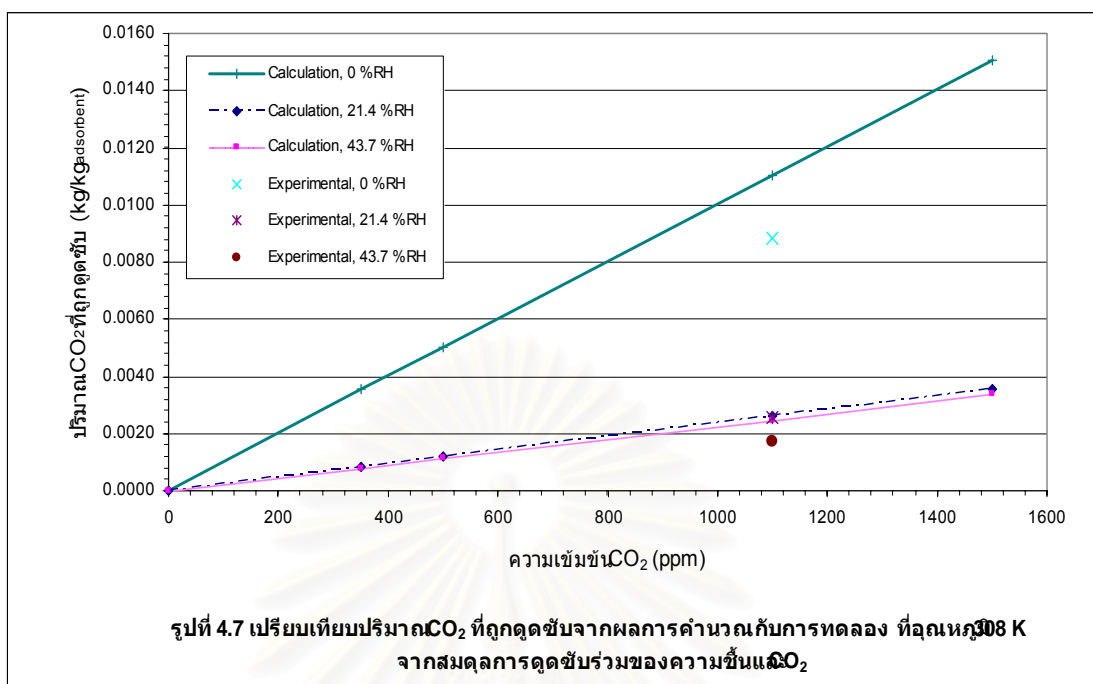
จากผลการทดสอบได้ผลการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับจากสหสัมพันธ์กับผลการทดลอง สามารถแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ไม่มีค่าความแตกต่างระหว่างจากการคำนวณกับผลการทดลอง ที่อุณหภูมิ 298 K แสดงว่าเป็นไปตามที่ Shen และ Worek (1994) สรุปไว้ว่า สหสัมพันธ์นี้มีความถูกต้องที่อุณหภูมินี้เท่านั้น ในการนำสหสัมพันธ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงตามกฎเฮนรีได้ทำการขยายช่วงจาก 0 ppm ไปถึง 1500 ppm ผลการทดสอบได้นำมาแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ ที่ได้จากการคำนวณกับผลจากการทดลอง ณ อุณหภูมิ 288, 298 และ 308 K ตามลำดับ จะเห็นว่าที่

ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับลดลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้น ส่วนจากรูปที่ 4.8 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมมูลการดูดซับรวมของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 42.9 % พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับลดลง นอกจากนี้ยังจะมีรายละเอียดของผลการคำนวณของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความชื้นสัมพัทธ์อื่นๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าคงที่เฮนรี จากสหสัมพันธ์กับผลการทดลอง

อุณหภูมิ (K)	ความชื้นสัมพัทธ์ (-)	ค่าคงที่เฮนรี จากการทดลอง	ค่าคงที่เฮนรี จากสหสัมพันธ์	%ค่าความ แตกต่าง
288	0.00	13.15	14.524	10.43
	0.26	4.045	3.430	15.22
	0.42	3.384	3.343	12.08
	0.637	2.020	1.687	17.25
298	0.00	9.565	9.565	0.0
	0.18	2.378	2.378	0.0
	0.429	2.177	2.177	0.0
	0.63	1.149	1.149	0.0
308	0.00	5.185	6.472	24.84
	0.214	1.506	1.522	1.037
	0.437	1.292	1.457	12.75





4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

ในการจำลองการดูดซับของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ใช้ข้อมูลขนาดเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ซึ่งผลิตโดยบริษัท Seibu Giken จำกัด และมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการจำลองโปรแกรม มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์และลักษณะสมบัติของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนที่ใช้ในการจำลอง

ขนาดของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน		
เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์	0.32	m
ความยาวโรเตอร์, ความยาวท่อ	0.2	m
พื้นที่หน้าตัดของเซลล์	3.49×10^{-6}	m^2
พื้นที่หน้าตัดของเฟสของแข็งในท่อ	6.11×10^{-8}	m^2
ลักษณะสมบัติของโรเตอร์		
ความจุความร้อนจำเพาะของสารดูดซับ	1.05	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของไฟเบอร์	1.2	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	4.217	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของ CO_2 (ของเหลว)	2.5531	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความหนาแน่นของโรเตอร์	250	kg/m^3
ความหนาแน่นของเซรามิกไฟเบอร์	185	kg/m^3
สัดส่วนมวลของสารดูดซับ	0.7	(-)
พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตรของรังผึ้ง	3000	m^2/m^3
อัตราส่วนช่องว่างของรังผึ้ง	0.825	(-)
ลักษณะสมบัติของก๊าซชื้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซแห้ง	1.003	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	1.858	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของ CO_2 (ก๊าซ)	0.894	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำที่ 273 K	2501.3	kJ/kg_w

พารามิเตอร์ในการจำลอง			
จำนวนเซลล์ที่แบ่งตามความยาวท่อ	N	10	เซลล์
จำนวนท่อทั้งหมด	M_{slot}	120	ท่อ
จำนวนท่อ ด้านการดูดซับ	M_{ads}	90	ท่อ
จำนวนท่อ ด้านการรีเจนเรชั่น	M_{des}	30	ท่อ
ช่วงเวลาการจำลองทั้งหมด	t_f	10800	วินาที
ช่วงเวลาการอินทิเกรต	Δt	0.005	วินาที
เงื่อนไขแรกเริ่มของระบบ	$t=0$		
ความชื้นเฉลี่ยของสารดูดซับ	W_{w0}	0.001	kg_w/kg_{sb}
ความเข้มข้นของCO ₂ ในสารดูดซับ	W_{C0}	0.0001	kg_C/kg_{sb}
อุณหภูมิวัสดุ	T_{s0}	298	K
ความชื้นเฉลี่ยของอากาศในโรเตอร์	H_0	0.0001	kg_v/kg_{da}
ความเข้มข้นของCO ₂ ในโรเตอร์	Y_0	0.0001	kg_C/kg_{da}
อุณหภูมิอากาศในโรเตอร์	T_{a0}	298	K
สถานะที่ทางเข้าเครื่องดูดซับของระบบ	$t=t\text{ใดๆ}$		
ความชื้นเฉลี่ยที่เข้าด้านการดูดซับ	$H_{in,ads}$	0.0114	kg_v/kg_{da}
ความเข้มข้นของCO ₂ ที่เข้าด้านการดูดซับ	$Y_{in,ads}$	0.0001	kg_C/kg_{da}
อุณหภูมิมวลที่เข้าด้านการดูดซับ	$T_{a,in,ads}$	299.7	K
ความชื้นเฉลี่ยที่เข้าด้านรีเจนเรชั่น	$H_{in,des}$	0.0142	kg_v/kg_{da}
ความเข้มข้นของCO ₂ ที่เข้าด้านรีเจนเรชั่น	$Y_{in,des}$	0.0001	kg_C/kg_{da}
อุณหภูมิมวลร้อนที่เข้าด้านรีเจนเรชั่น	$T_{a,in,des}$	333.0	K
ความเร็วลมที่เข้าโรเตอร์ด้านการดูดซับ	$V_{in,ads}$	1.0	m/s
ความเร็วลมที่เข้าโรเตอร์ด้านรีเจนเรชั่น	$V_{in,des}$	1.0	m/s
ความเร็วรอบของโรเตอร์	n	3	rph

ในการจำลองกรณีต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาทำนายพฤติกรรมเชิงพลวัต ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมกัน และอิทธิพลที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนในการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน โดยที่แทนสมรรถนะการทำงานของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนด้วยประสิทธิภาพการดูดซับ ตามแสดงในภาคผนวก ก จึงมีการจำลองกรณีต่างๆ ขึ้นมาทั้งหมด 5 กรณี ดังในตารางที่ 4.4 โดยพิจารณาสถานะเงื่อนไขที่เปลี่ยนไปของ ความยาวโรเตอร์ ความเร็วรอบหมุนโรเตอร์ และอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น แต่ยังคงใช้ค่าพารามิเตอร์อื่นตามข้อมูลตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 กรณีการจำลองต่างๆ

กรณี	ความยาวโรเตอร์(m)	ความเร็วรอบหมุนโรเตอร์(rph)	อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น(K)
1	0.2	3	333
2	0.2	15	333
3	0.2	25	333
4	0.2	25	423
5	0.1	25	423

4.3 ผลการจำลองการดูดซับของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

4.3.1 ผลการเข้าสู่สภาวะคงตัว(steady state)ของการดูดซับ

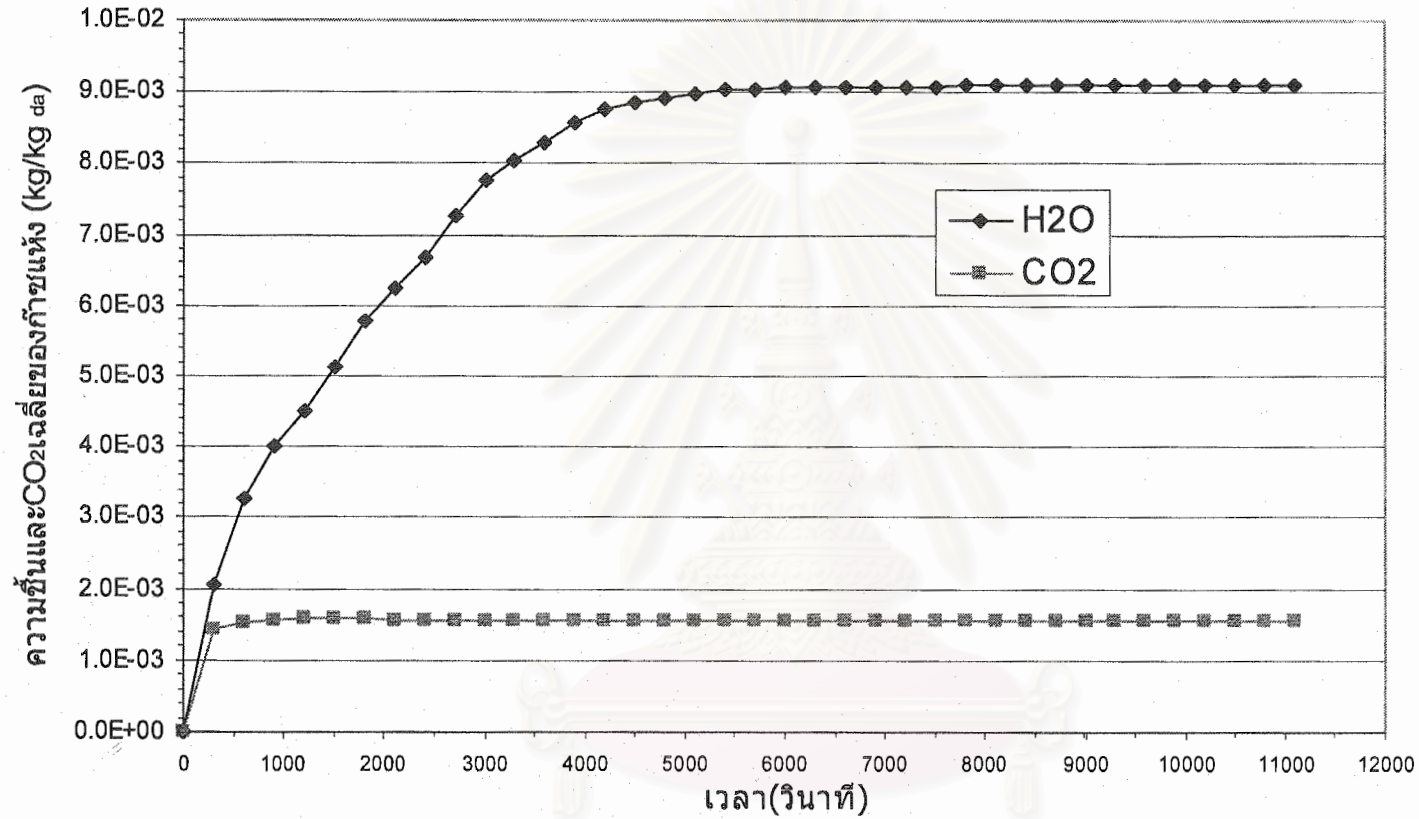
การศึกษารูปแบบของผลการจำลองในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของเครื่องดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ ได้นำกรณีการจำลองที่ 1 มาใช้อธิบายถึงผลการเข้าสู่สภาวะคงตัวกับเวลาที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ถูกดูดซับ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยในอากาศ มีลักษณะกราฟความชันเป็นเส้นตรงจากค่าเริ่มต้นแล้วเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ ความชันกราฟเท่ากับศูนย์ จะใช้เวลาประมาณเวลา 3000 วินาทีในการเข้าสู่สภาวะ

คงตัว โดยในช่วง 600 วินาทีแรกนั้นจุดเวลาเริ่มเข้าสู่ภาวะคงตัว และในช่วง 600-3000 วินาที ยังมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับตัวเข้าสู่ภาวะคงตัว แต่สำหรับปริมาณเฉลี่ยของน้ำที่ถูกดูดซับ ความชื้นสัมบูรณ์จะใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวประมาณ 6000 วินาที ซึ่งจะใช้นานกว่า คาร์บอนไดออกไซด์ และในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิอากาศที่ทางออกด้านการดูดซับในช่วงเริ่มต้น ถึงประมาณ 250 วินาที จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูง จากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆตาม เวลาและมีค่าคงที่ในที่สุดเมื่อเข้าสู่ภาวะคงตัว ที่เวลาประมาณ 6000 วินาที

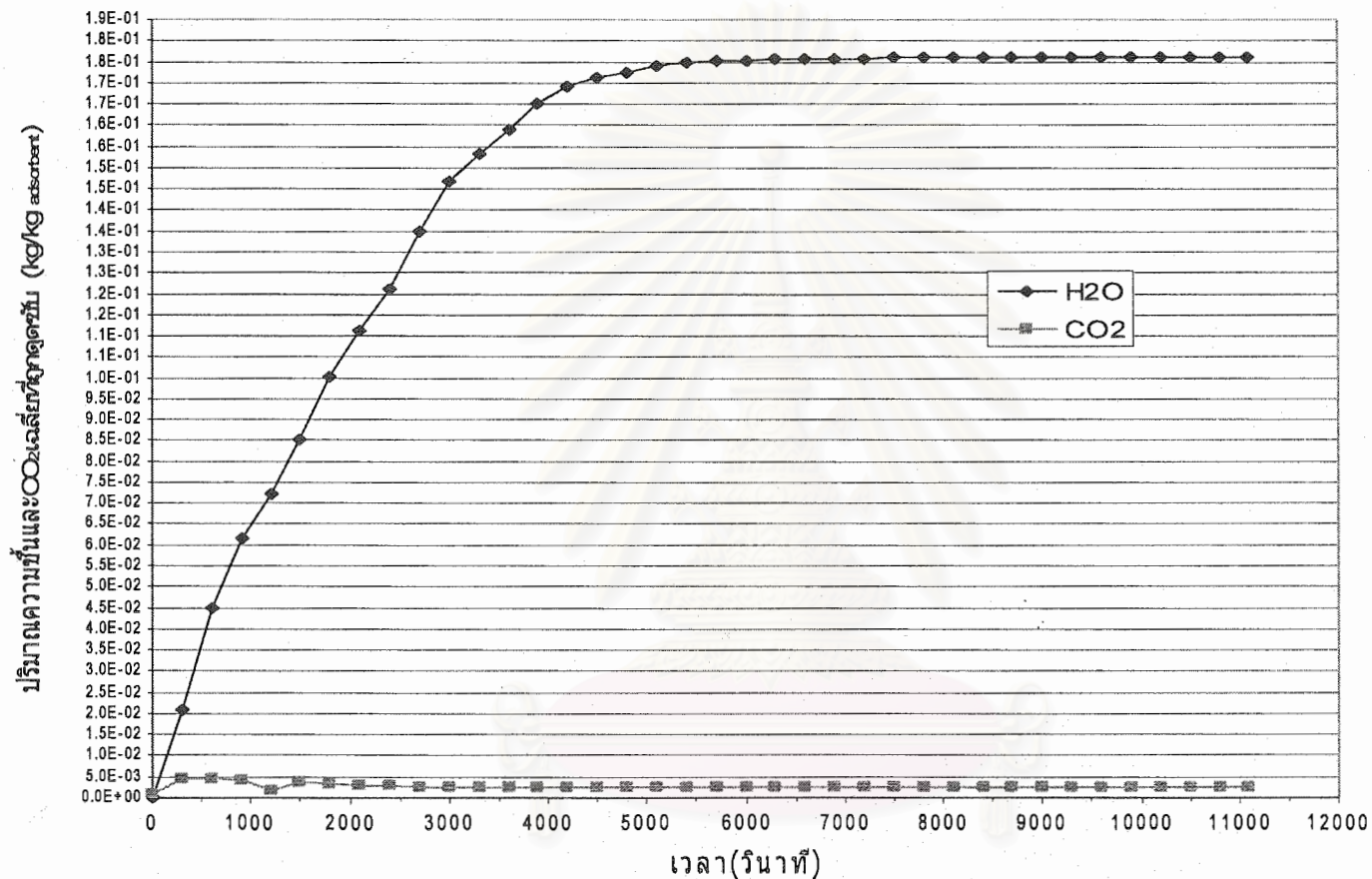
ในการใช้สารดูดซับใหม่ อุณหภูมิของก๊าซและสารดูดซับมีค่าต่ำนั้น อัตราการการดูดซับ ช่วงแรกมีค่าสูงพร้อมกันนี้จะมีการปลดปล่อยความร้อนของการดูดซับออกมามากด้วย เป็นผลให้ อุณหภูมิของก๊าซที่ทางออกมีค่าพุ่งขึ้นสูง แล้วเมื่อยังมีการสะสมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และ ไอน้ำที่ถูกดูดซับอย่างต่อเนื่องพบว่าอัตราการดูดซับจะลดลงทำให้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ เฉลี่ยและความชื้นเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น เป็นสาเหตุให้อุณหภูมิของก๊าซที่ทางออกด้านการดูดซับค่อยๆลด ลง จึงกล่าวได้ว่าพฤติกรรมสภาวะไม่คงตัวจะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ที่ใช้สารดูดซับใหม่



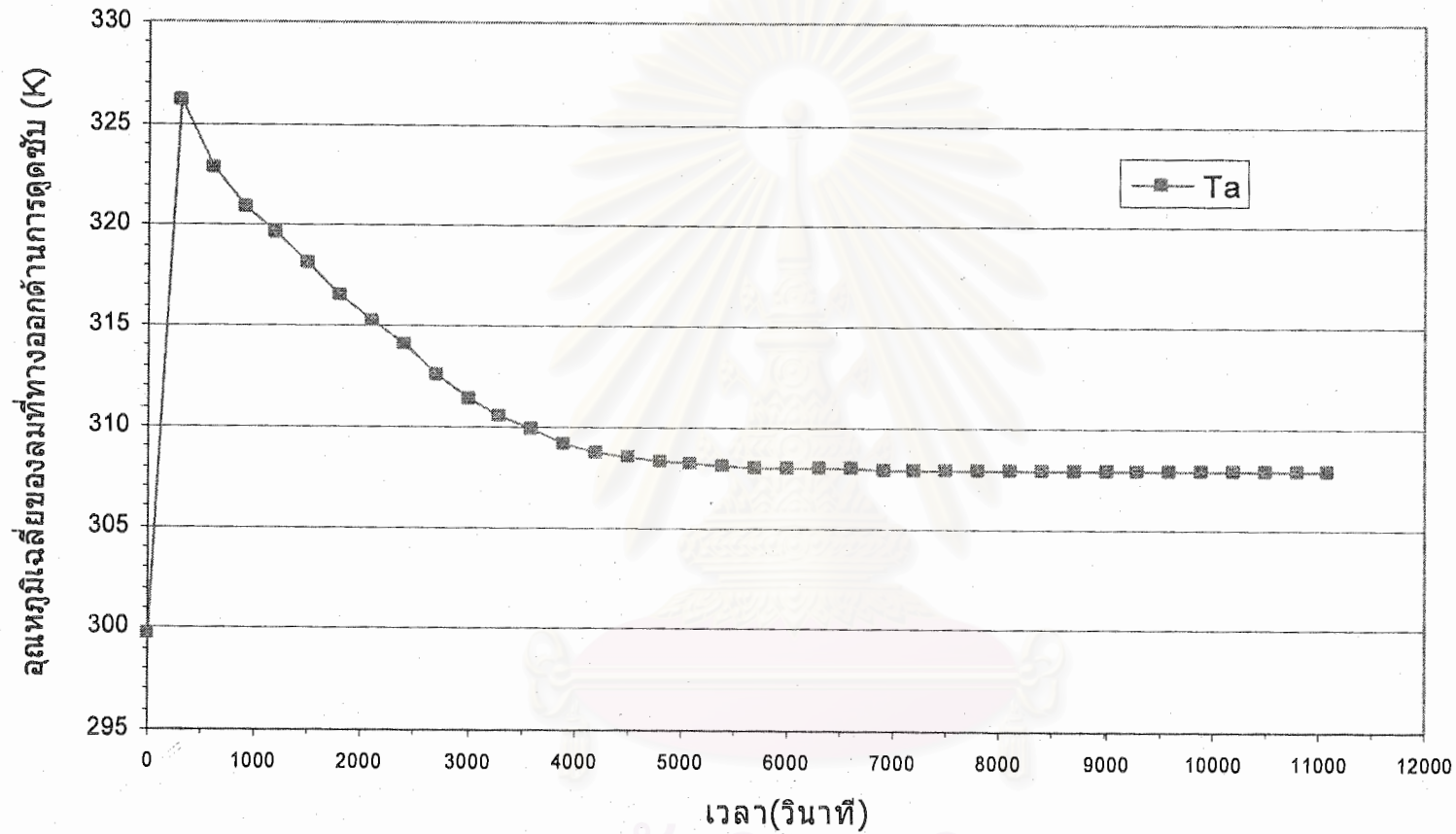
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ความชื้นและCO₂ เฉลี่ยของลมที่ออกจากโรเตอร์กับเวลา
กรณี ความเร็วรอบ 3 rph, อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K, ความยาวโรเตอร์ 0.2 m



รูปที่ 4.10 ปริมาณความชื้นและCO₂เฉลี่ยที่ถูกดูดซับกับเวลา
กรณี ความเร็วรอบ 3 rpm, อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K, ความยาวโรเตอร์ 0.2 m



รูปที่ 4.11 อุณหภูมิเฉลี่ยของลวดที่ทางออกด้านจุดจับของโรเตอร์กับเวลา
กรณี ความเร็วรอบ 3 rph ,อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K,ความยาวโรเตอร์ 0.2 m

4.3.2 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใน เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

เพื่อเป็นการอธิบายผลของปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมกัน (Phenomena of simultaneous heat and mass transfer) ที่เกิดขึ้นได้จากกรณีจำลองที่ 1, 2 และ 3 โดยทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

4.3.2.1 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและโรเตอร์ (ผนังรังผึ้ง) ภายในเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

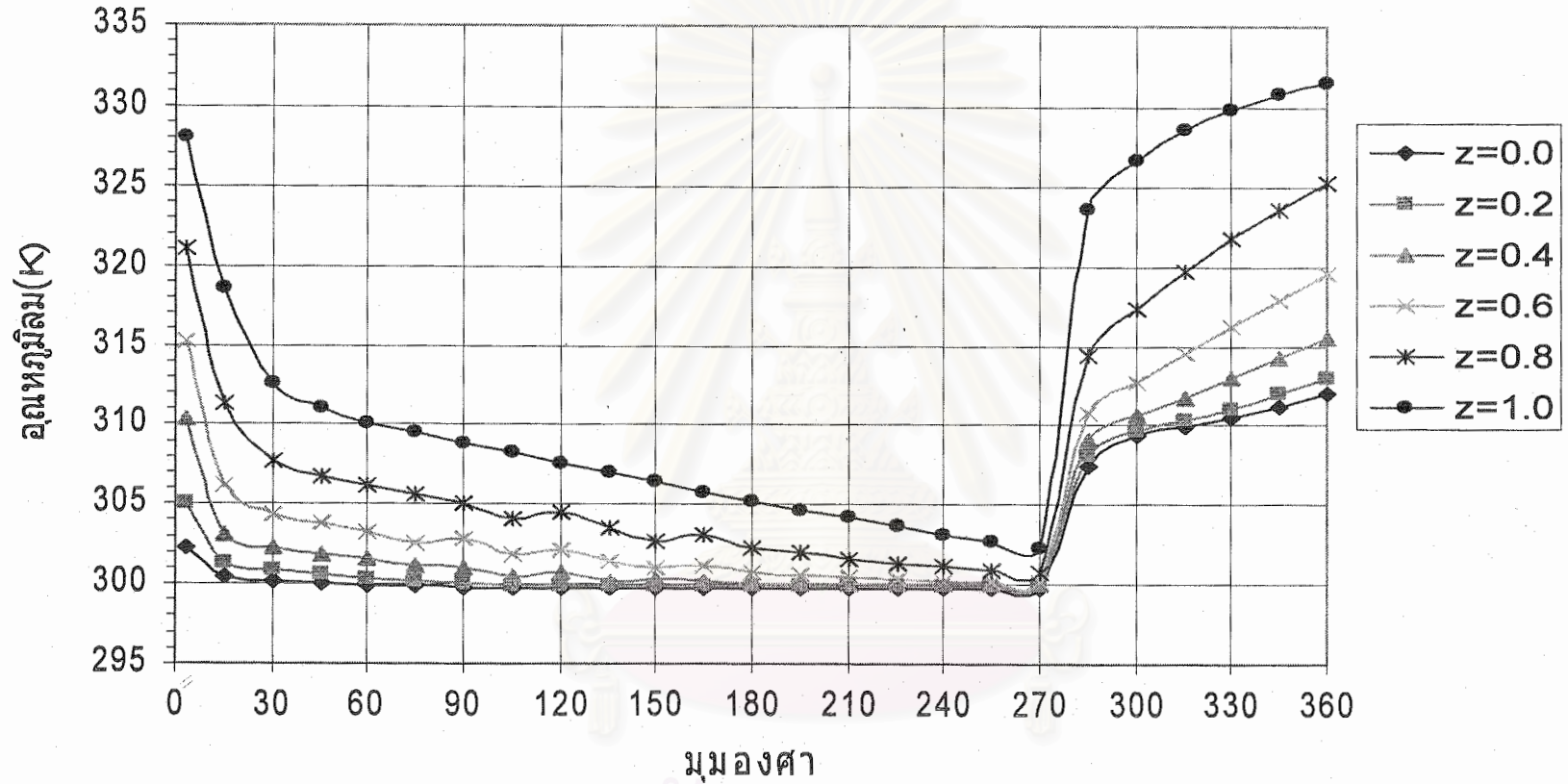
เพื่อแสดงปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ด้วยการพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิและผนังรังผึ้งภายในท่อของเครื่องดูดซับ ตามทิศมุมมองและทิศทางแกน (การไหลของลม) เมื่อความเร็วรอบหมุนโรเตอร์เท่ากับ 3, 15, 25 rpm และมีอุณหภูมิร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่น 333 K ดังรูปที่ 4.12-4.17 โดยที่ มุมมองจาก $\theta = 0 - 270^\circ$ เป็นด้านการดูดซับและ $\theta = 270-360^\circ$ เป็นด้านการรีเจนเรชั่น และ z เป็นความยาวไร้มิติ (Dimensionless length) ของระยะความยาวของโรเตอร์ที่ระยะต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า ช่วงมุมมอง 0 - 270 ° ของด้านการดูดซับและที่ตำแหน่ง $Z = 0.0$ เป็น ทางเข้าของลมด้านการดูดซับ ในขณะที่โรเตอร์หมุนไปอย่างช้าๆ ลมร้อนจากด้านการรีเจนเรชั่น จะเข้าค่อยๆ ขยับมาแทนที่ลมเย็นด้านการดูดซับ ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาที่มุมมองหมุนจาก 0 - 15° ถือว่าเป็นช่วงที่เกิดการแทนที่ ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อมุมมองเกิดขึ้น เรียกว่า Cooling stage ซึ่งที่ระยะ Z มากขึ้น (= 0.6, 0.8, 1.0) เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศชั้นที่ป้อนเข้ากับตัวโรเตอร์ที่ร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่วงมุมมองอาจขยายออกไปถึงที่ 30° หลังจากนั้นที่มุมมองเกิน 15° ช่วงเกรเดียนต์ของอุณหภูมิเท่ากับ 0 เรียกว่า Equilibrium stage ซึ่งอุณหภูมิค่อนข้างคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อมุมมองน้อย ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นช่วงมีการดูดซับเกิดขึ้น จากที่กล่าวมาถ้าเป็นที่ความเร็วรอบหมุนโรเตอร์สูงขึ้น ค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในช่วงมุมมอง 0-15° จะลดลง ประมาณเข้าใกล้ 0 มากขึ้นดังในรูปที่ 4.13 และ 4.14

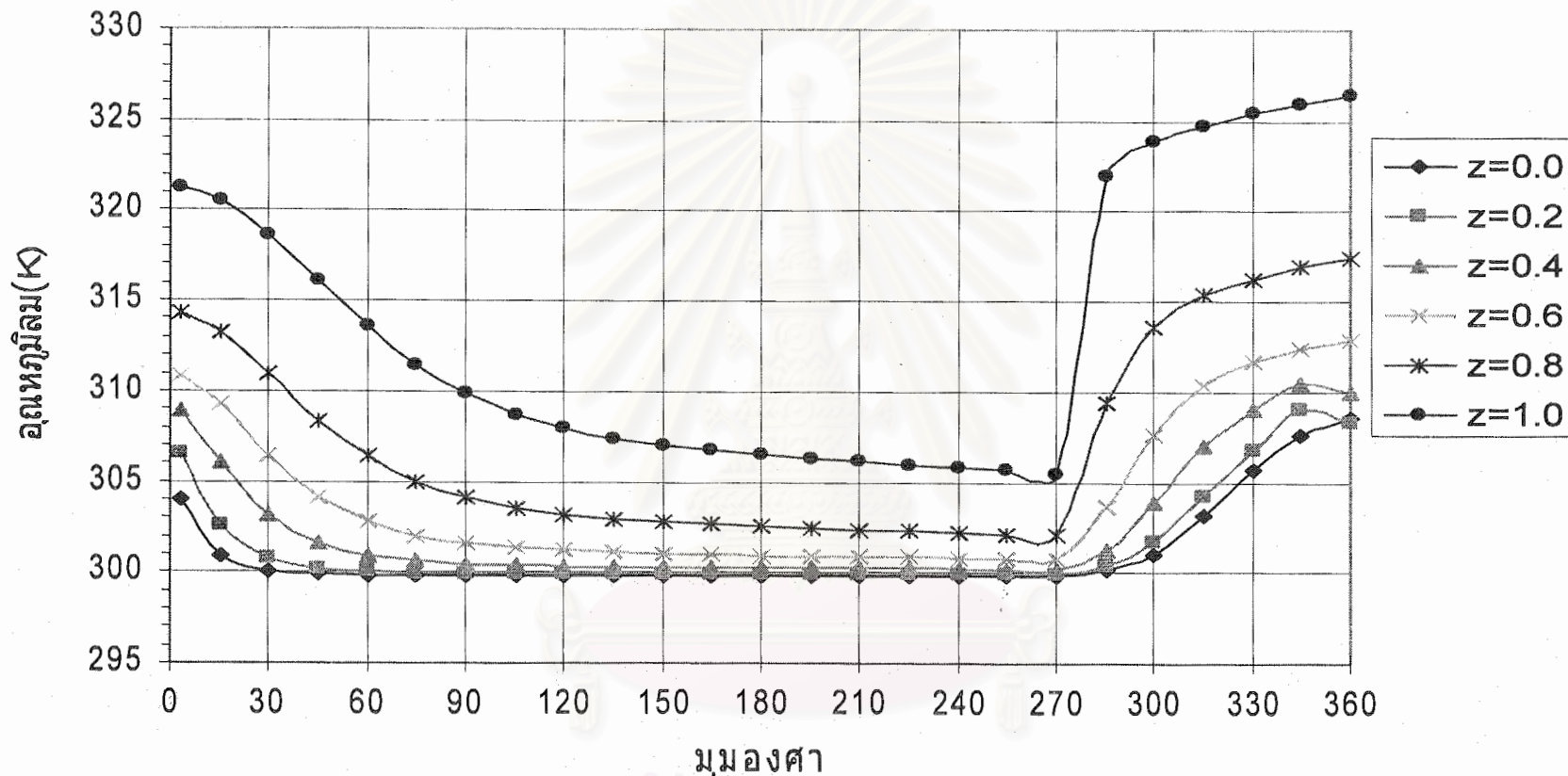
อากาศในช่วง Cooling stage นั้นได้รับอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนสัมผัส และเมื่ออุณหภูมิอากาศลดลงเรื่อยๆจนเกือบเท่าอุณหภูมิของตัวโรเตอร์ ถือเป็นการเข้าสู่ช่วงของการดูดซับ จากนั้นเมื่อมีการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น อากาศจะร้อนขึ้นเนื่องจากความร้อนของการดูดซับที่ปลดปล่อยออกมา ฉะนั้นการเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาของความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง นั้นมีอิทธิพลต่อในช่วงนี้ภายใต้การสมดุลของความร้อนทั้งหมด

ในด้านการรีเจนเรชั่น จะมีสถานการณ์เหมือนกับด้านการดูดซับ และในช่วงมุมมอง 270-360 ° ของตำแหน่งที่ $Z = 1.0$ เป็นทางเข้าของลมร้อน เมื่อโรเตอร์ขยับหมุนไปอย่างช้าๆจาก $\theta = 270^\circ$ ลมเย็นจะค่อยๆขยับเข้าแทนที่ลมร้อนด้านรีเจนเรชั่น ในช่วง $\theta = 270-285^\circ$ เป็นช่วง Cooling stage และมีช่วง Equilibrium stage ที่ $\theta = 285-360^\circ$ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในด้านการรีเจนเรชั่นของช่วงการคายการดูดซับนี้เกิดขึ้นมีมากกว่าในด้านการดูดซับของช่วงการดูดซับ ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของความร้อนแฝงทำให้อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่นลดลง แต่ต้องยังคงมีค่าเพียงพอในการคายการดูดซับที่ $Z = 0.0$ และเมื่อความเร็วรอบหมุนโรเตอร์สูงขึ้น ดังในรูปที่ 4.13 และ 4.14 เกรเดียนต์ของอุณหภูมิจะเข้าใกล้เท่ากับ 0 มากขึ้น

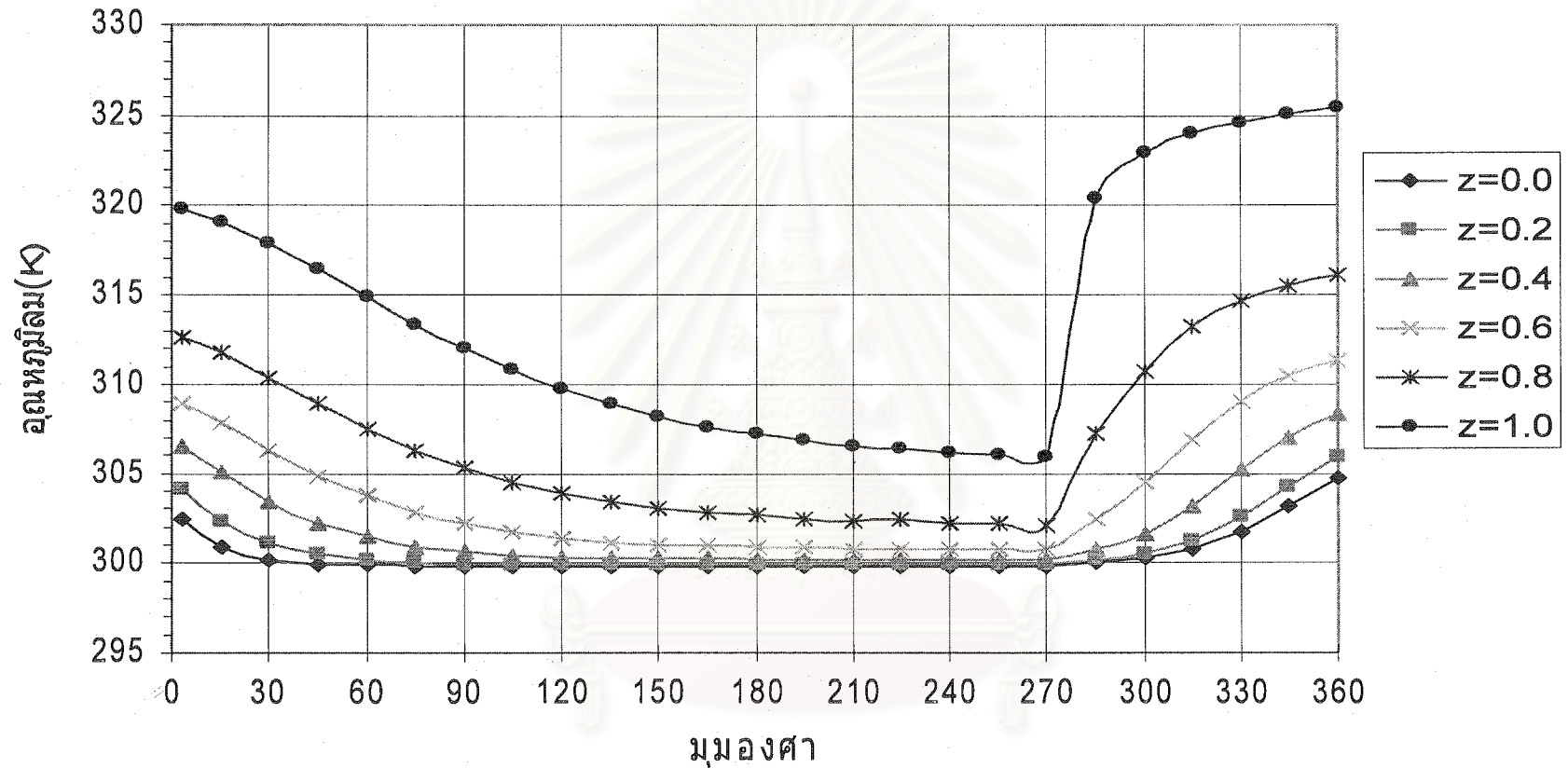
สำหรับการกระจายอุณหภูมิโรเตอร์ที่ผนังรังผึ้งจะมีลักษณะกราฟเช่นเดียวกับการกระจายอุณหภูมิลมดังที่กล่าวมาสามารถพิจารณาจากรูปที่ 4.15- 4.17



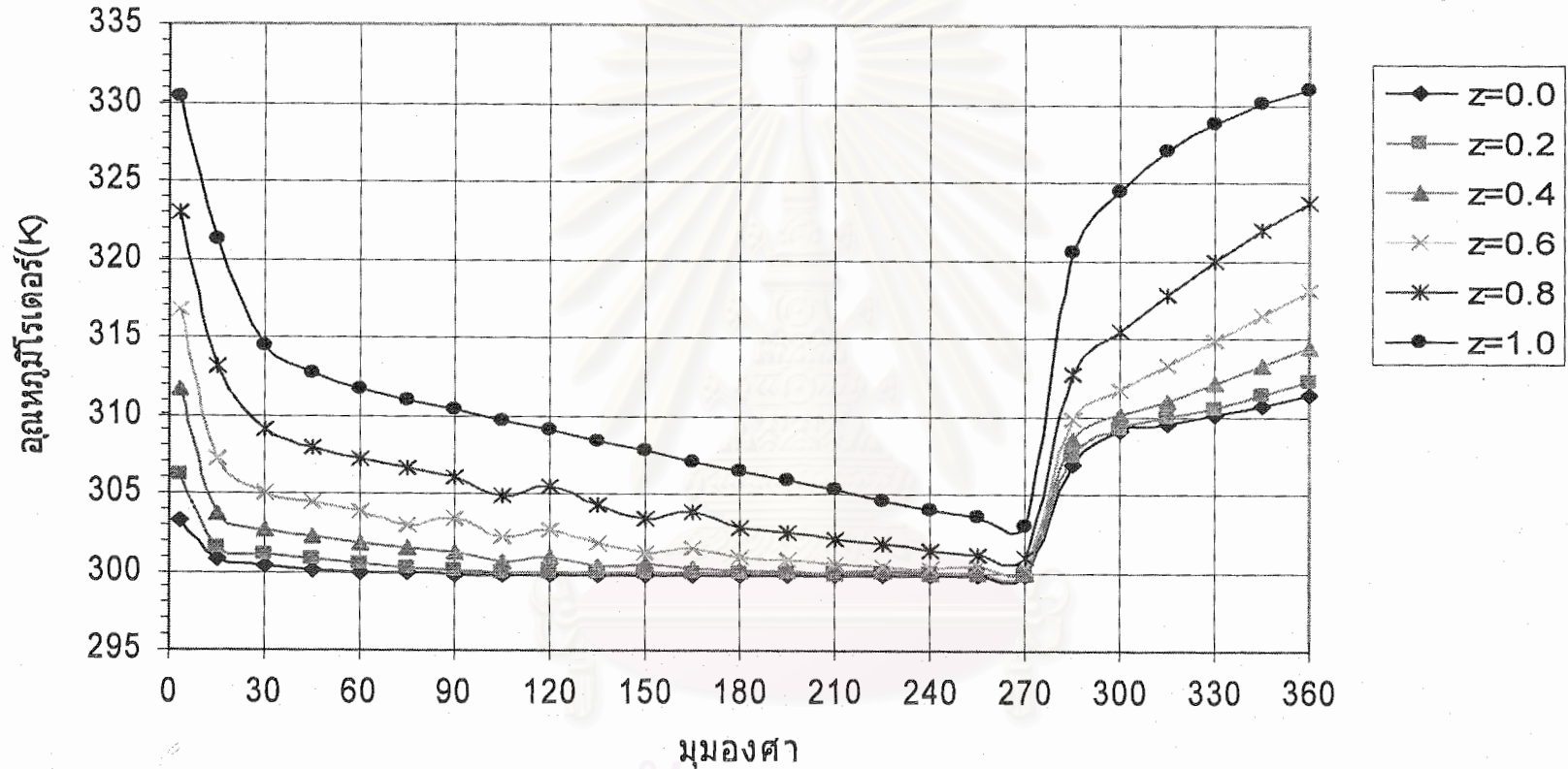
รูปที่ 4.12 การกระจายอุณหภูมิตามมุมมองของโรเตอร์ที่ระยะ z ต่างๆ
 ณ ความเร็วรอบ 3 rpm อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m



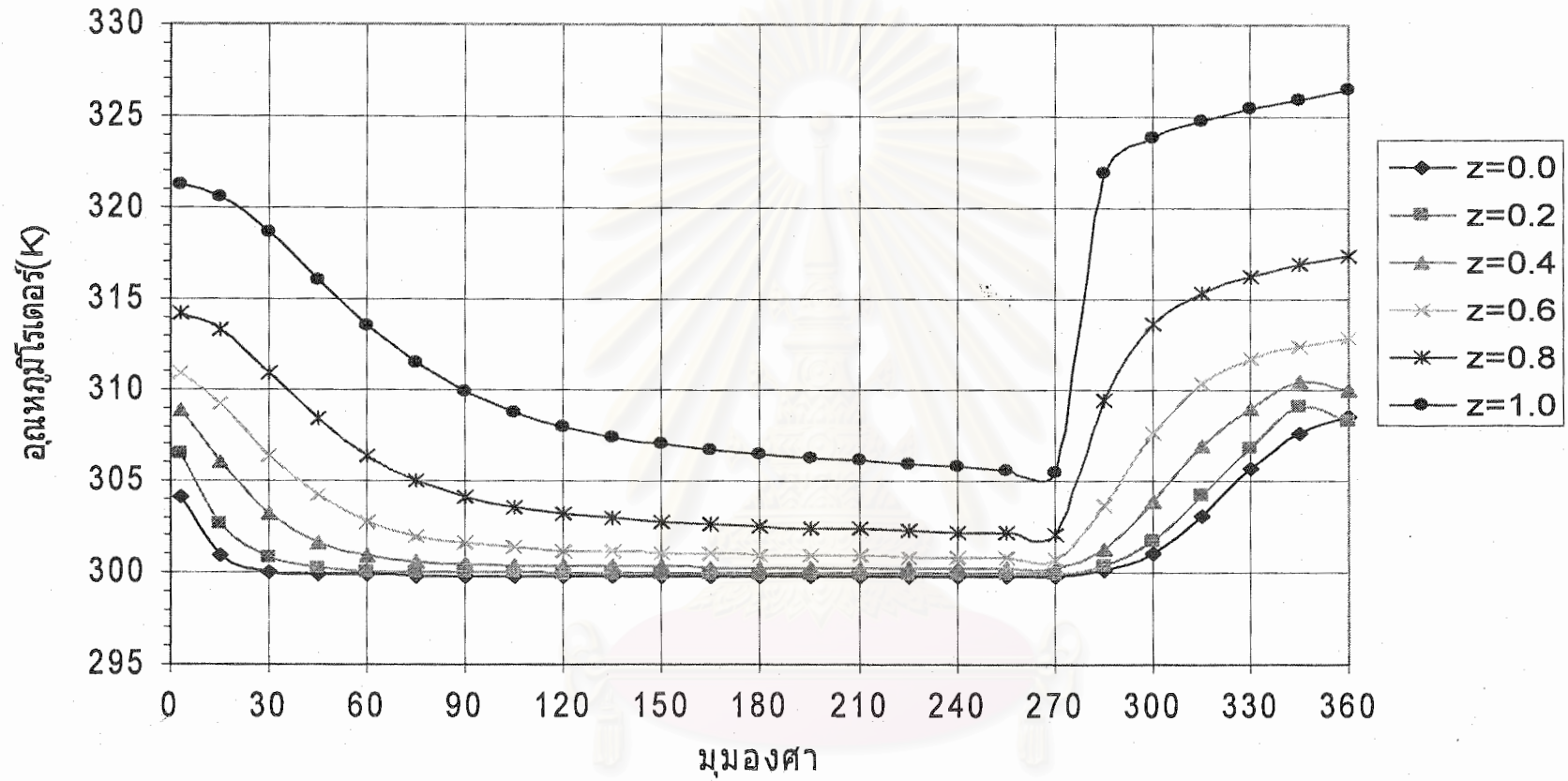
รูปที่ 4.13 การกระจายอุณหภูมิตามมุมมองของโรเตอร์ที่ระยะ z ต่างๆ
 ณ ความเร็วรอบ 15 rpm อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m



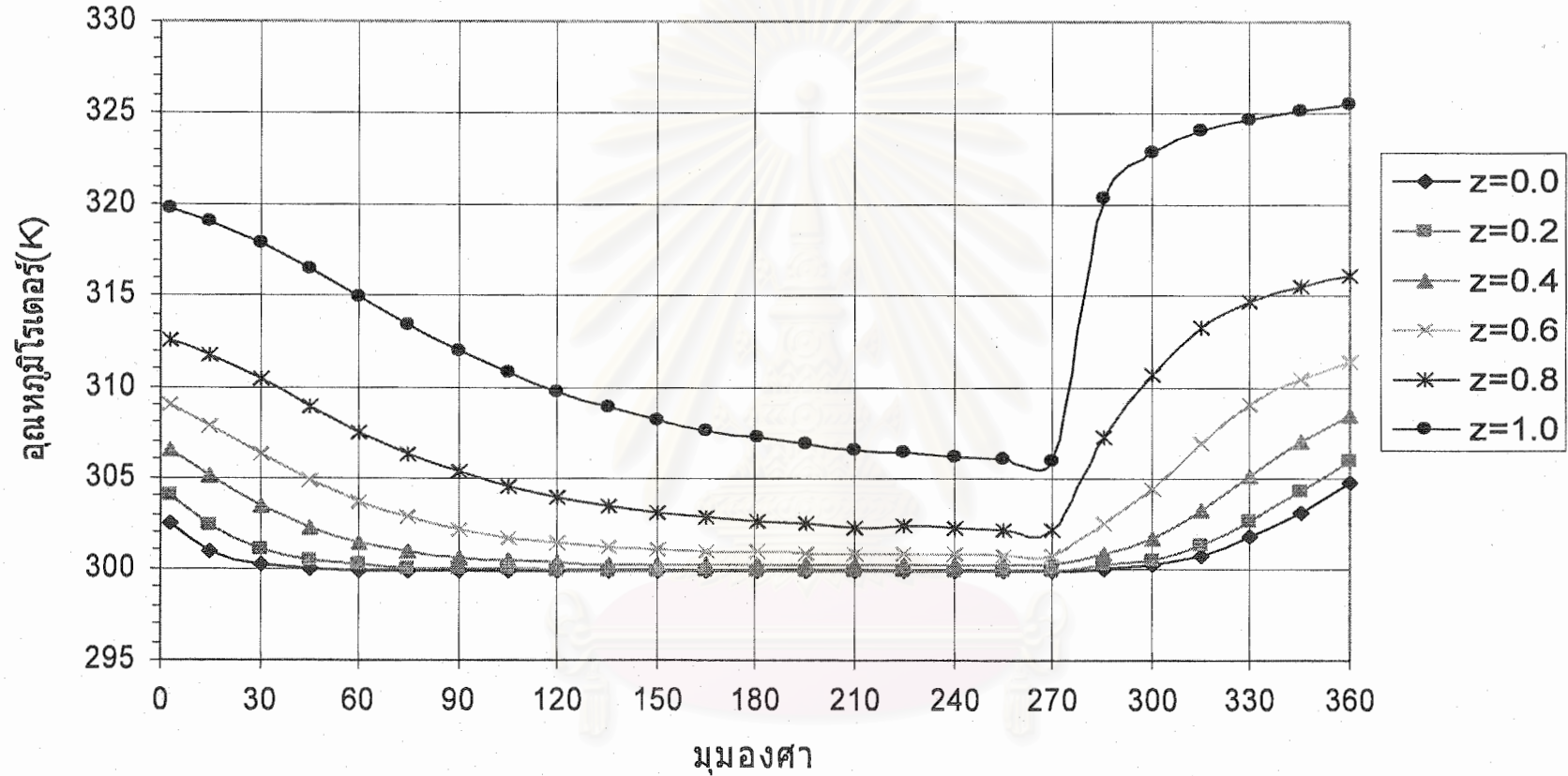
รูปที่ 4.14 การกระจายอุณหภูมิตามมุมมองของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ
 ณ ความเร็วรอบ 25 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชัน 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m



รูปที่ 4.15 การกระจายอุณหภูมิโรเตอร์(ผนังรังผึ้ง)กับมุมมองศาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 3 rpm อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m



รูปที่ 4.16 การกระจายอุณหภูมิโรเตอร์(ผนังรังผึ้ง)กับมุมองศาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 15 rpm อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m

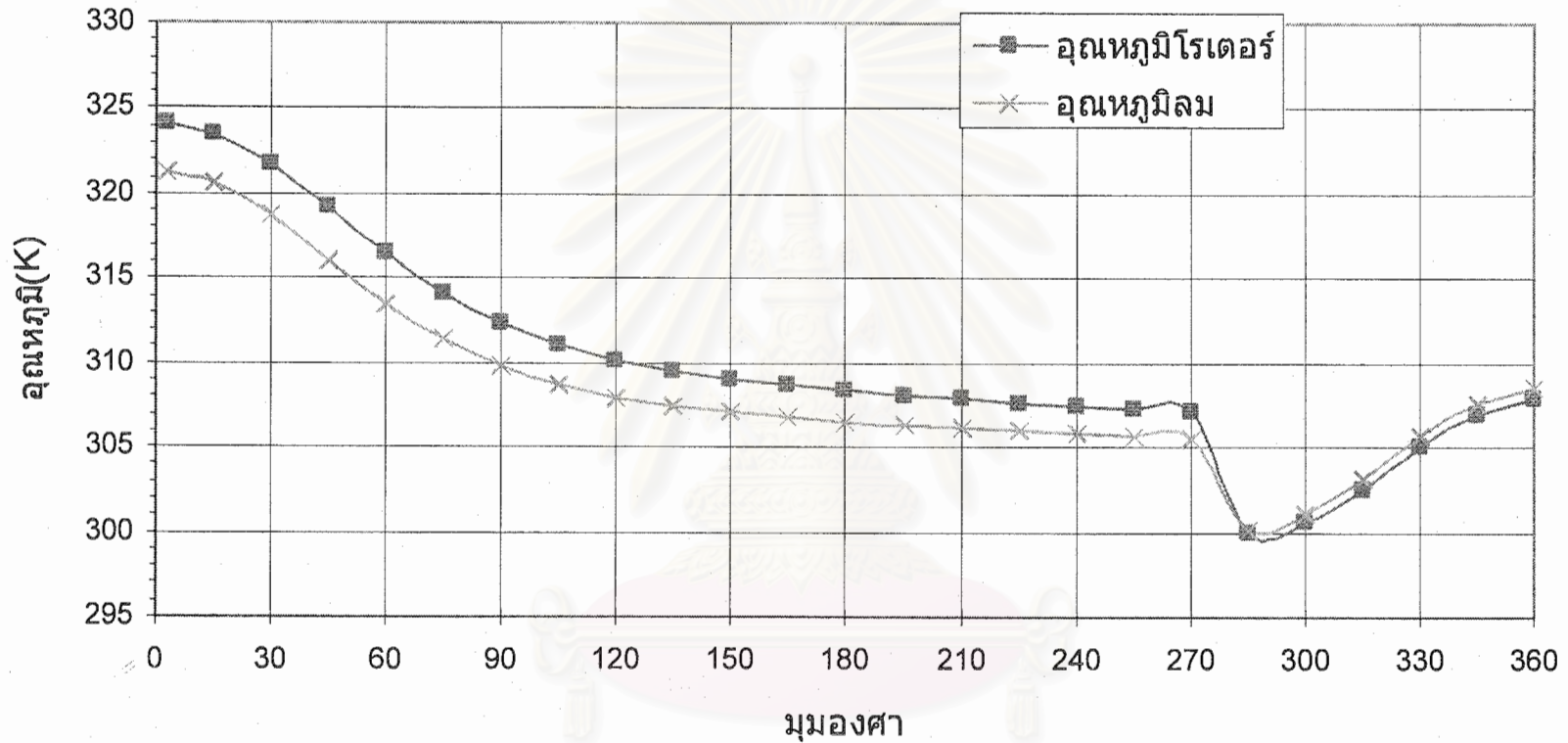


รูปที่ 4.17 การกระจายอุณหภูมิโรเตอร์(ผนังรังผึ้ง)ลมหักกับมุมมองศาของโรเตอร์ ที่ระยะ z ต่างๆ ณ ความเร็วรอบ 25 rpm อุณหภูมิรีเจเนเรชัน 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m

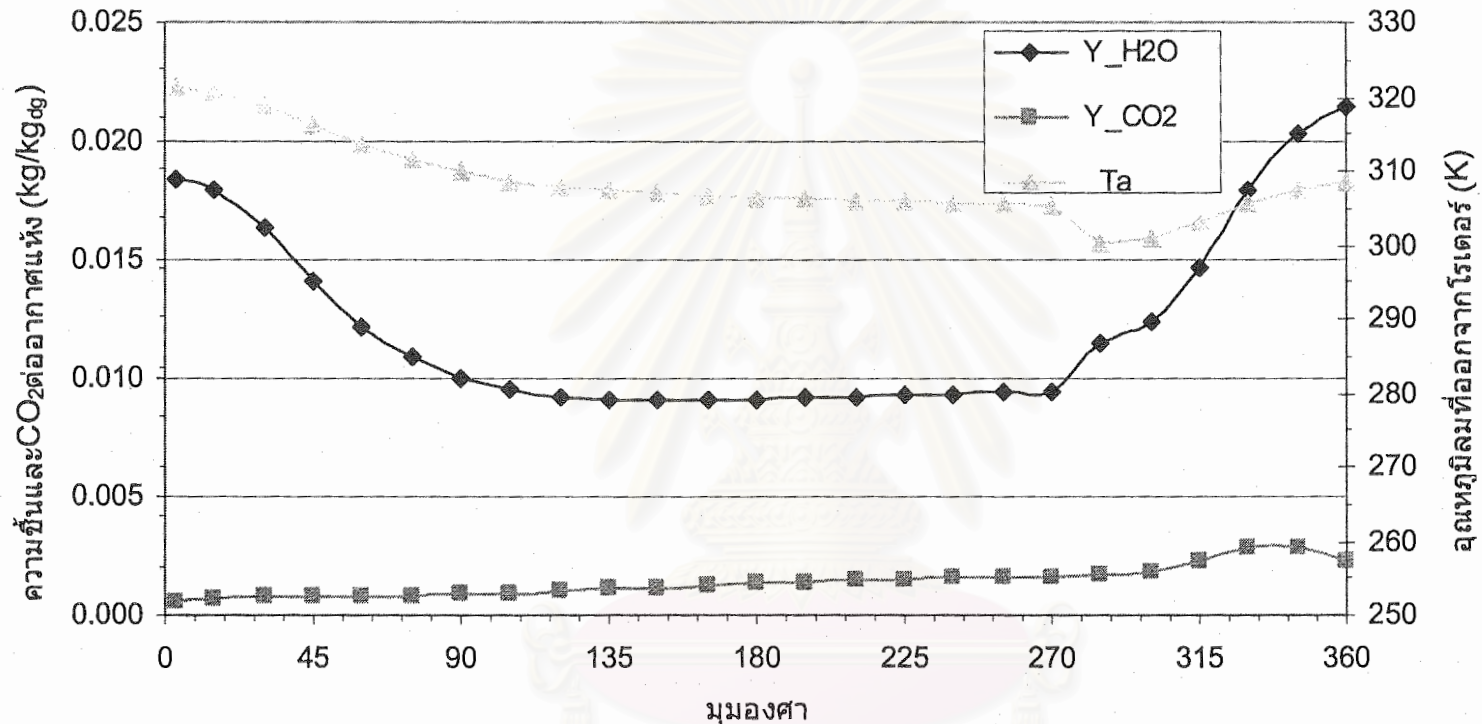
4.3.2.2 ลักษณะการกระจายตัวของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของด้านการดูดซับและด้านการรีเจนเรชั่นเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

เพื่อแสดงปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของด้านการดูดซับและด้านการรีเจนเรชั่นเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ด้วยลักษณะการกระจายความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 - 4.25 โดยจากรูปที่ 4.18-4.20 มาจากกรณีการจำลองที่ 2 มีความเร็วรอบหมุนโรเตอร์ 15 rpm และอุณหภูมิที่ใช้รีเจนเรชั่น 333 K พบว่า ขณะที่โรเตอร์หมุนไปอย่างช้าๆ ลมร้อนจากด้านรีเจนเรชั่น จะเข้าค่อยๆ ขยับมาแทนที่ลมเย็นด้านการดูดซับจะทำให้ ในช่วง $\theta = 0-270^\circ$ ของที่ทางออกด้านการดูดซับ ที่ θ เริ่มต้นมีอุณหภูมิต่ำและของโรเตอร์สูง ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง จากนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำและโรเตอร์ลดลงเรื่อยๆ จนถึงตามมุมมองที่เปลี่ยนจนถึงมุมมองที่ 270° มีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับนั้นก็เพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเกิดการดูดซับ ต่อจากนั้นในช่วง $\theta = 270-360^\circ$ ของที่ทางออกด้านการรีเจนเรชั่นซึ่งในช่วงที่อยู่ใกล้มุมมอง 270° พบว่าขณะที่โรเตอร์หมุนไป ลมเย็นจากด้านการดูดซับจะขยับเข้าแทนที่ลมร้อนด้านรีเจนเรชั่น ทำให้อุณหภูมิลดลง ความสามารถในการคายการดูดซับทั้งความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงด้วย แต่ในช่วงถัดไปจนมุมมอง 360° อิทธิพลของลมเย็นจะมีผลลดลง ทำให้อุณหภูมิต่ำและโรเตอร์เพิ่มขึ้น จะสามารถไล่ความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับไว้ออกจากตัวดูดซับได้มากขึ้น สามารถพิจารณาการกระจายความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขยายสเกลให้ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 4.21 และ 4.22

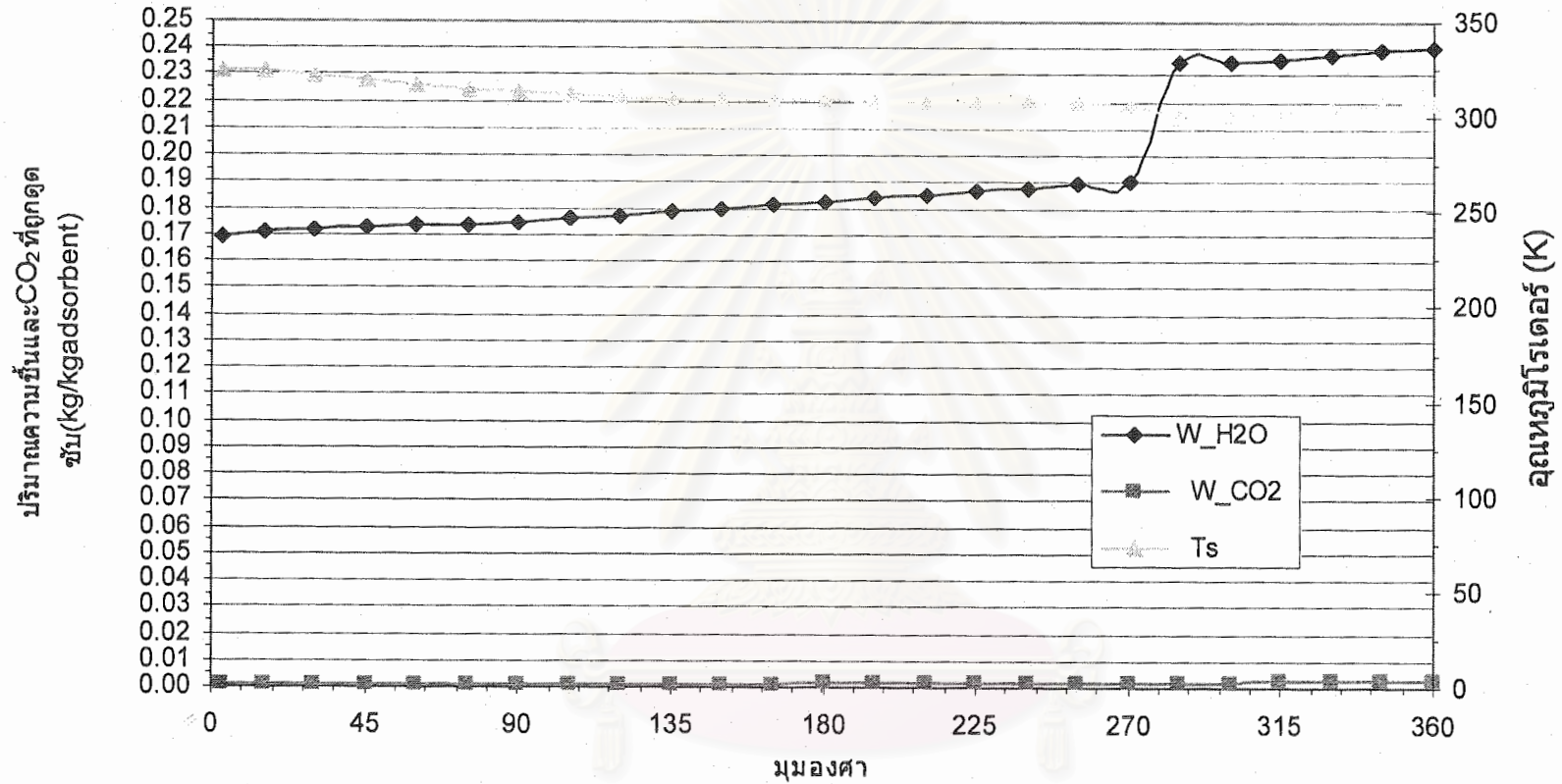
จากลักษณะการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่า สามารถถูกดูดซับได้เร็วและเกิดการอิ่มตัวตั้งแต่ในช่วง Equilibrium stage ของด้านการดูดซับ และสำหรับด้านการรีเจนเรชั่นเกิดเช่นกันแต่เป็นความสามารถไล่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับไว้ได้เร็ว สำหรับความชื้นจะค่อยๆ ถูกดูดซับไว้และยังไม่เกิดการอิ่มตัวในช่วง Equilibrium stage ของด้านการดูดซับ จากนั้นในช่วง Equilibrium stage ของด้านการรีเจนเรชั่นจะทำการไล่ความชื้นที่ถูกดูดซับออกไป และถ้ามีการเปลี่ยนความเร็วรอบหมุนโรเตอร์ให้เร็วขึ้นและช้าลง ตามรูปที่ 4.23-4.25 พบว่า ที่ความเร็วรอบหมุนเร็วขึ้น ช่วงมุมมองที่เกิดการดูดซับสั้น ทำให้ความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ยังถูกดูดซับได้ไม่มากก็ต้องถูกไล่ออกในช่วงการรีเจนเรชั่น และที่ความเร็วรอบหมุนช้าลง ช่วงมุมมองที่เกิดการดูดซับยาว เมื่อความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับจนอิ่มตัวก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงการรีเจนเรชั่นทำให้เกิดการคายความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับไว้ออกมาทำให้ความสามารถในการดูดซับที่เกิดขึ้นลดลง



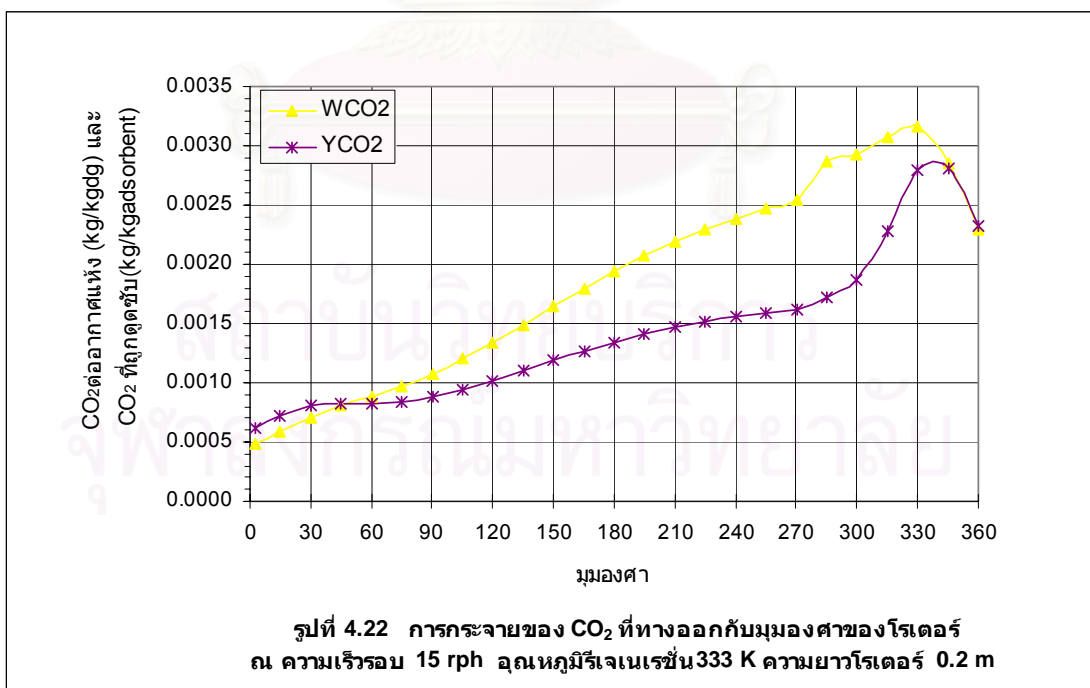
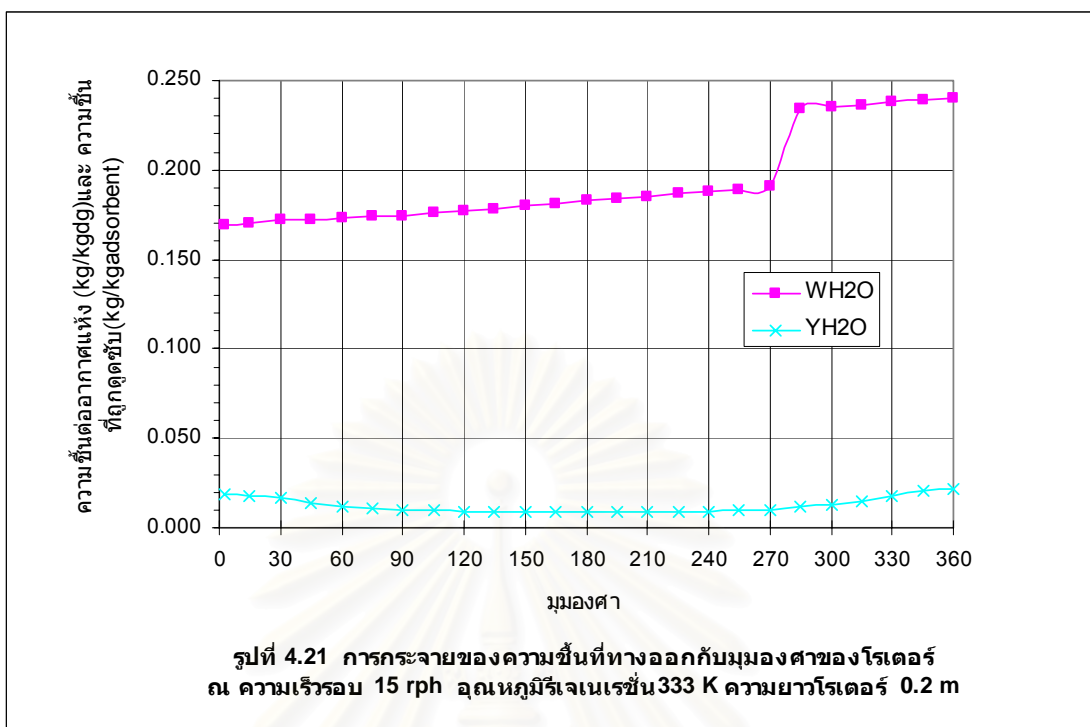
รูปที่ 4.18 การกระจายอุณหภูมิลมและโรเตอร์ที่ทางออกกับมุมองศาของโรเตอร์
 ณ ความเร็วรอบ 15 rph อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m

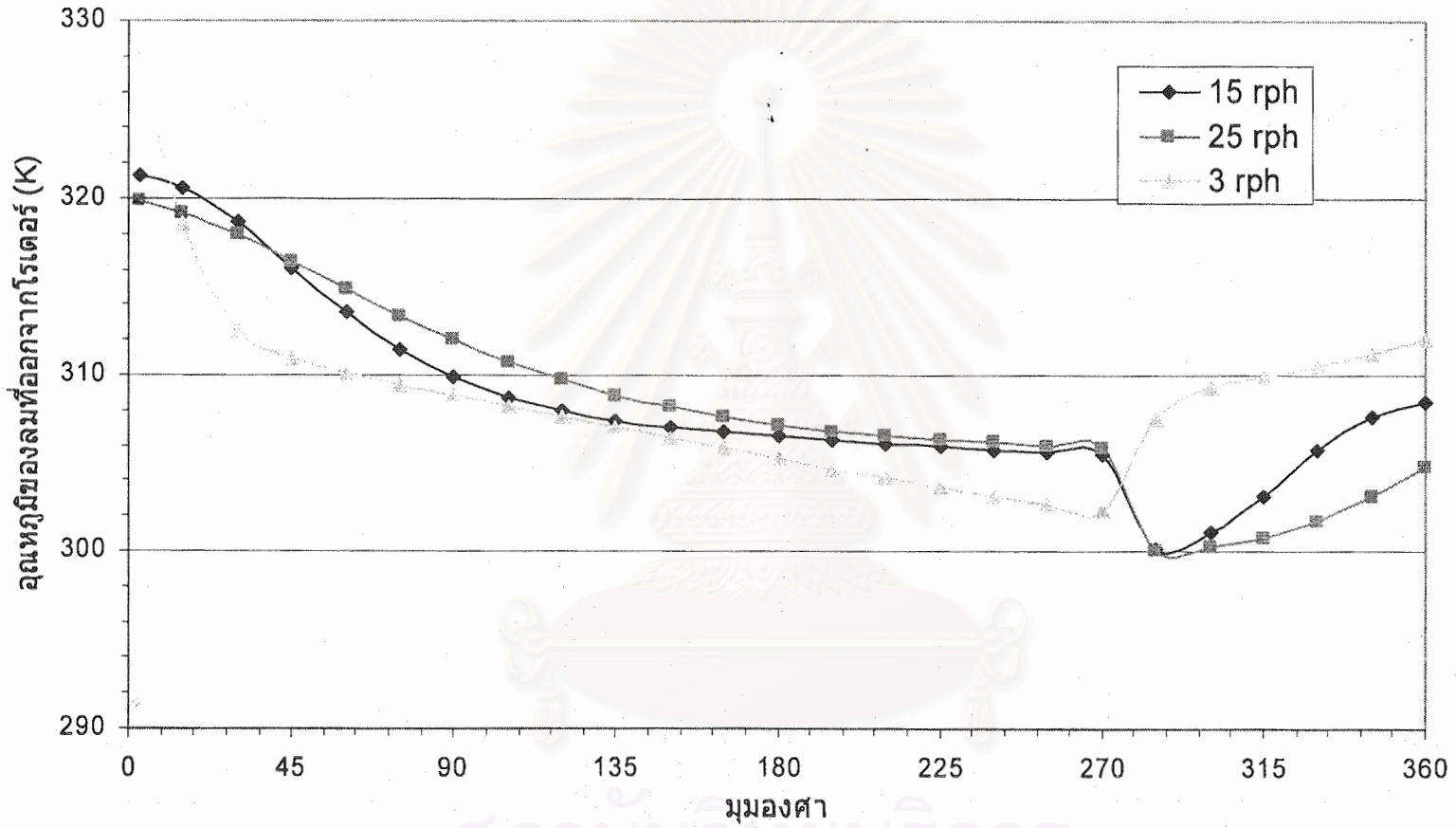


รูปที่ 4.19 การกระจายของความชื้น, CO₂ และอุณหภูมิของลมที่ทางออกของโรเตอร์กับมุมมองของโรเตอร์
กรณี ความเร็วรอบ 15 rpm, อุณหภูมิรีเจเนเรชัน 333 K, ความยาวโรเตอร์ 0.2 m



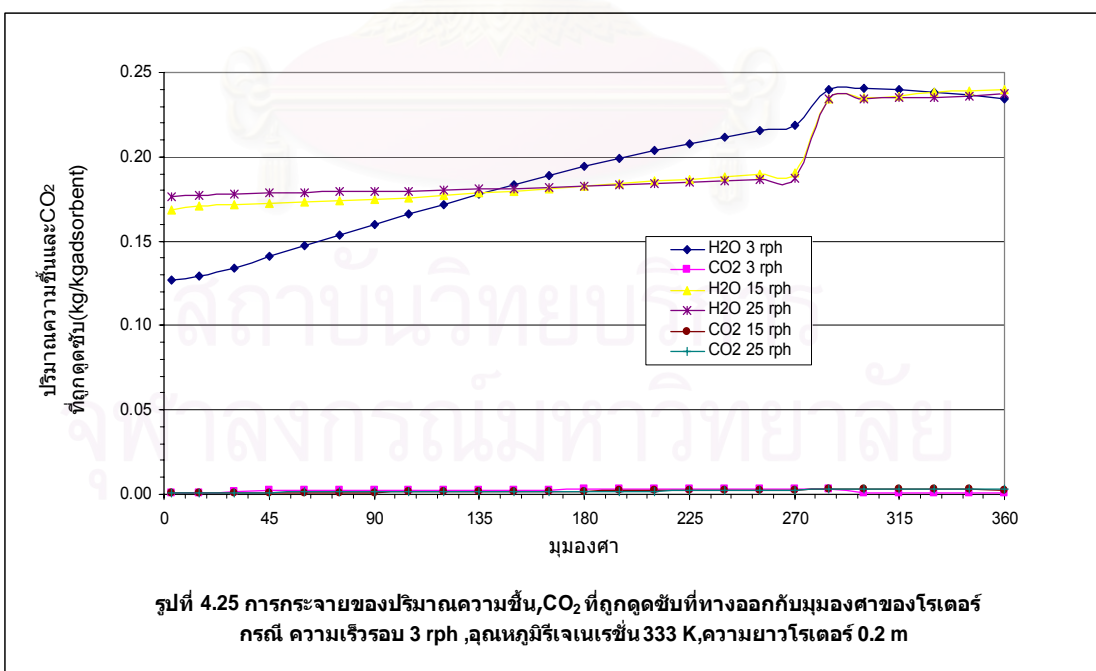
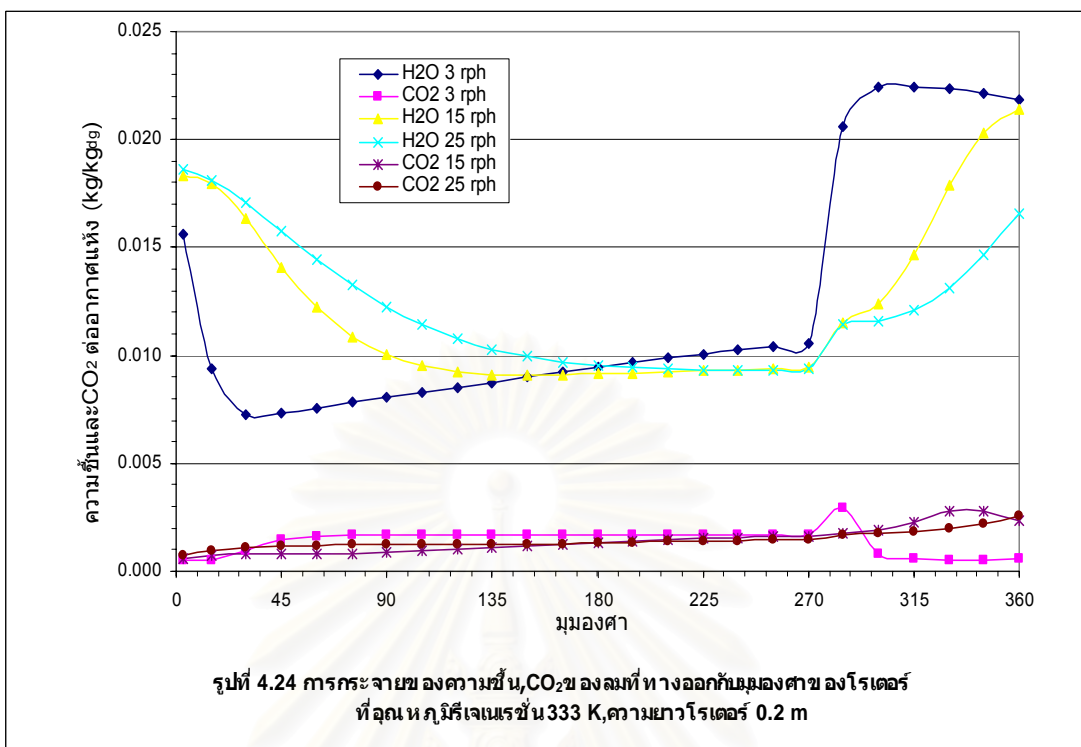
รูปที่ 4.20 การกระจายของปริมาณความชื้น, CO₂ ที่ดูดซับและอุณหภูมิโรเตอร์ที่ทางออกกับมุมมองของโรเตอร์
กรณี ความเร็วรอบ 15 rpm, อุณหภูมิโรเตอร์ 333 K, ความยาวโรเตอร์ 0.2 m





รูปที่ 4.23 การกระจายของอุณหภูมิของลมที่ทางออกกับมุมองศาของโรเตอร์ ที่อุณหภูมิรีเจเนเรชั่น 333 K ความยาวโรเตอร์ 0.2 m

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



4.3.3 ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์

ในการจำลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน มีกรณีการจำลองต่างๆที่ใช้ดังตารางที่ 4.4

4.3.3.1 อิทธิพลของความเร็วรอบหมุนโรเตอร์

จากตารางที่ 4.5 อิทธิพลจากความเร็วรอบหมุนโรเตอร์ ที่ 3, 15 และ 25 rpm โดยมีอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่น 333 K สามารถบอกได้ว่า ที่ความเร็วรอบหมุน 3 rpm สามารถให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 20.3% และมีประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ความเร็วรอบหมุน 15 rpm เท่ากับ 33.1% นอกจากนั้นพบว่า ในช่วงความเร็วรอบ 3- 15 rpm ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นจะลดลง แต่ประสิทธิภาพการดูดซับ CO₂ จะเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงความเร็วรอบ 15- 25 rpm ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและ CO₂ เปลี่ยนไปทิศทางลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 ผลของความเร็วรอบหมุนโรเตอร์กับประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและ CO₂

กรณี	ความเร็วรอบหมุน โรเตอร์ (rpm)	ประสิทธิภาพการดูดซับ(%)		ที่ทางออกด้านการดูดซับ		
		ความชื้น	CO ₂	ppmCO ₂	%RH	T _a
1	3	20.3%	9.3%	1002	26.3	307.9
2	15	4.4%	33.1%	740	29.4	310.5
3	25	-3.5%	27.0%	803	5.4	340.2

4.3.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่น

จากตารางที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่นที่ 333 K และ 423 K ณ ความเร็วรอบหมุนโรเตอร์ 25 rpm พบว่า ที่อุณหภูมิ 423 K ทั้งประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและ CO₂ มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 333 K และที่อุณหภูมิทั้งสอง ประสิทธิภาพการดูดซับของ CO₂ จะมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการดูดซับของความชื้น

ตารางที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชันกับประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและ CO₂

กรณี	อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชัน(K)	ประสิทธิภาพการดูดซับ(%)		ที่ทางออกด้านการดูดซับ		
		ความชื้น	CO ₂	ppmCO ₂	%RH	T _a
3	333	-3.5%	27.0%	803	5.4	340.2
4	423	18.9%	52.9%	520	4.5	334.9

4.3.3.3 อิทธิพลของความยาวโรเตอร์

จากตารางที่ 4.7 ที่ความยาวโรเตอร์เท่ากับ 0.1 และ 0.2 เมตร ณ อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชันเท่ากับ 423 K และความเร็รรอบ 25 rpm พบว่า ที่ความยาวโรเตอร์ 0.1 เมตร จะมีประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและ CO₂ มีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 45 % และอยู่ใกล้จุดตัดกันระหว่างของประสิทธิภาพการดูดซับความชื้น กับ CO₂ แต่เมื่อความยาวโรเตอร์เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นจะลดลงเหลือ 18.89% ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับ CO₂ เพิ่มขึ้นเป็น 52.93%

ตารางที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชันกับประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและ CO₂

กรณี	ความยาวโรเตอร์ (เมตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับ(%)		ที่ทางออกด้านการดูดซับ		
		ความชื้น	CO ₂	ppmCO ₂	%RH	T _a
4	0.2	18.9%	52.9%	520	4.5	334.9
5	0.1	47.0%	45.8%	601	28.3	309.8

4.4 ผลการจำลองการเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

มีการจำลองเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน โดยมีจำนวนคนอาศัยอยู่ 6 คนและมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของห้องปรับอากาศและเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนดังในตารางที่ 4.8 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของห้องปรับอากาศและเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน

	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ขนาดห้อง			
ความสูง	-	3	m
ความกว้าง	-	5	m
ความยาว	L_R	9	m
พื้นที่หน้าตัดห้อง	A_R	15	m^2
พื้นที่พื้นห้อง	-	45	m^2
ขนาดของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน			
ความยาวโรเตอร์, ความยาวท่อ	L	0.1	m
พื้นที่หน้าตัดของเซลล์	A_c	2.90×10^{-6}	m^2
พื้นที่หน้าตัดของเฟสของแข็งในท่อ	A_{ss}	6.38×10^{-8}	m^4
ลักษณะสมบัติของโรเตอร์			
ความจุความร้อนจำเพาะของสารดูดซับ		1.05	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของไฟเบอร์		1.2	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ		4.217	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของ CO_2 (ของเหลว)		2.5531	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความหนาแน่นของโรเตอร์		250	kg/m^3
ความหนาแน่นของเซรามิกไฟเบอร์		185	kg/m^3
สัดส่วนมวลของสารดูดซับ		0.7	(-)
พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตรของรังผึ้ง		3000	m^2/m^3

	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
อัตราส่วนช่องว่างของรังผึ้ง		0.825	(-)
ลักษณะสมบัติของก๊าซชื้น			
ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซแห้ง		1.003	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ		1.858	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความจุความร้อนจำเพาะของ CO_2 (ก๊าซ)		0.894	$\text{kJ}/(\text{kg}_{\text{da}} \cdot \text{K})$
ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำที่ 273 K		2501.3	kJ/kg_w
พารามิเตอร์ในการจำลอง			
จำนวนเซลล์ที่แบ่งตามความยาวห้อง	K_R	3	เซลล์
จำนวนเซลล์ที่แบ่งตามความยาวท่อ	N	5	เซลล์
จำนวนท่อทั้งหมด	M_{slot}	120	ท่อ
จำนวนท่อด้านการดูดซับ	M_{ads}	90	ท่อ
จำนวนท่อด้านการรีเจนเรชั่น	M_{des}	30	ท่อ
ช่วงเวลาการจำลองทั้งหมด	t_r	24.0	ชั่วโมง
ช่วงเวลาการอินทิเกรต	Δt	0.005	วินาที
เงื่อนไขแรกเริ่มของระบบ	$t=0$		
ความชื้นเฉลี่ยภายในห้อง	H_{0r}	0.017	$\text{kg}_v/\text{kg}_{\text{da}}$
อุณหภูมิอากาศภายในห้อง	$T_{a,0r}$	298	K
ความเร็วลมภายในห้อง	V_r	0.15	m/s
ความเข้มข้นของ CO_2 ในห้อง	Y_{0r}	0.001704	$\text{kg}_C/\text{kg}_{\text{da}}$
ความชื้นเฉลี่ยของสารดูดซับ	W_{w0}	0.10	$\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{sb}}$
ความเข้มข้นของ CO_2 ในสารดูดซับ	W_{CO}	0.0001	$\text{kg}_C/\text{kg}_{\text{sb}}$
อุณหภูมิโรเตอร์	T_{s0}	304	K
ความชื้นเฉลี่ยของอากาศในโรเตอร์	H_0	0.021	$\text{kg}_v/\text{kg}_{\text{da}}$
ความเข้มข้นของ CO_2 ในโรเตอร์	Y_0	0.000548	$\text{kg}_C/\text{kg}_{\text{da}}$
อุณหภูมิอากาศในโรเตอร์	T_{a0}	303.4	K

	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
สถานะที่ทางเข้าเครื่องดูดซับของระบบ	$t=t$ ใดๆ		
ความชื้นเฉลี่ยที่เข้าด้านการดูดซับ	$H_{in,ads}$	0.017	kg_v/kg_{da}
ความเข้มข้นของCO ₂ ที่เข้าด้านการดูดซับ	$Y_{in,ads}$	0.001704	kg_c/kg_{sa}
อุณหภูมิที่เข้าด้านการดูดซับ	$T_{a,in,ads}$	298	K
ความชื้นเฉลี่ยที่เข้าด้านรีเจนเรชั่น	$H_{in,des}$	0.0142	kg_v/kg_{da}
ความเข้มข้นของCO ₂ ที่เข้าด้านรีเจนเรชั่น	$Y_{in,des}$	0.0001	kg_c/kg_{da}
อุณหภูมิร้อนที่เข้าด้านรีเจนเรชั่น	$T_{a,in,des}$	353.0	K
ความเร็วลมที่เข้าโรเตอร์ด้านการดูดซับ	$V_{in,ads}$	1.37	m/s
ความเร็วลมที่เข้าโรเตอร์ด้านรีเจนเรชั่น	$V_{in,des}$	1.0	m/s
ความเร็วรอบของโรเตอร์	n	25	rph

นอกจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของห้องปรับอากาศและเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน แล้วยังมีข้อมูลต่างๆที่สำหรับใช้กับแบบจำลองนี้ได้แก่

- ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศภายนอกห้องในช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมงได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา ดังแสดงในภาคผนวก จ

- ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศซึ่งในการจำลองนี้มีค่าเท่ากับ 350 ppm (Godish,1991)

- ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอาจเป็น อีวาปอเรเตอร์ หรือเครื่องทำน้ำเย็น เพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิหลังออกจากโรเตอร์ที่ยังมีอุณหภูมิสูงเกินไปไม่เหมาะสมที่จะส่งเข้าสู่ภายในห้องทันที ให้มีอุณหภูมิที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพความสบายของคนที่อาศัยอยู่ในห้อง ซึ่งสภาพความสบายสำหรับประเทศไทย จะรู้สึกที่อุณหภูมิ 22-29°C และความชื้นสัมพัทธ์ 20-75% (ตริงใจ,2539) และ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องไม่ควรเกิน 700 ppm จาก Kukkonen,E. et al. (Godish, 2001) ซึ่งถ้าที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เกินค่านี้ จัดอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลางถึงสูงก่อให้เกิดอากาศเหม็นอับภายในห้อง

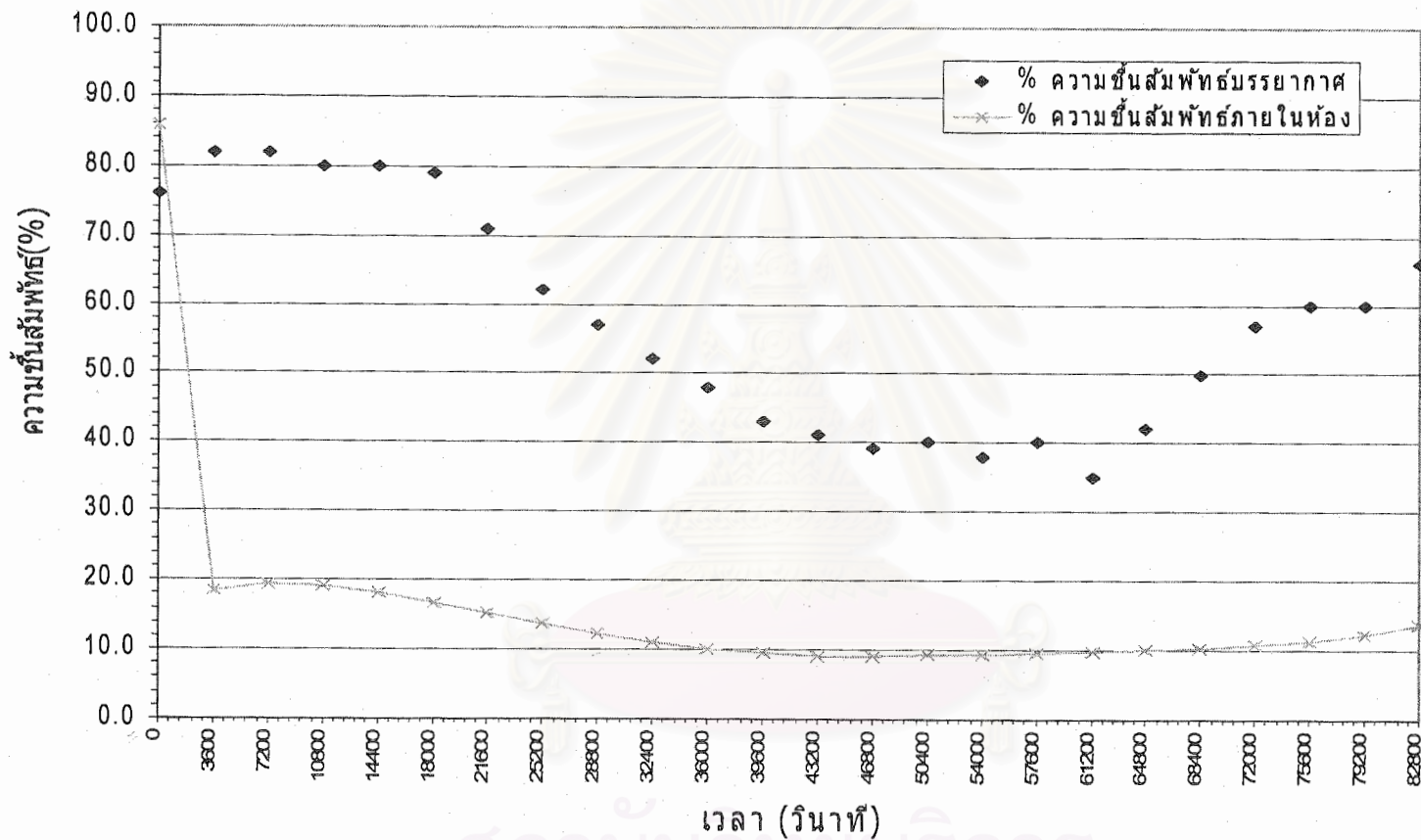
นอกจากนั้นทางผู้วิจัยได้มีทำการทดลองที่คล้ายแบบจำลองข้างต้นนี้แต่เป็นสภาวะที่ไม่มี การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า ที่ใช้อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจนเรชั่น 353 K (80°C) และ 423 K (150°C) ได้อุณหภูมิของอากาศในห้องจากการทดลองอยู่ที่ประมาณ 323 K (50°C) และ 353 K (80°C) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่สูงเกินกว่าที่คนสามารถอาศัยอยู่ได้ ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีขนาด 15 กิโลวัตต์ความร้อน

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการจำลองติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้อง

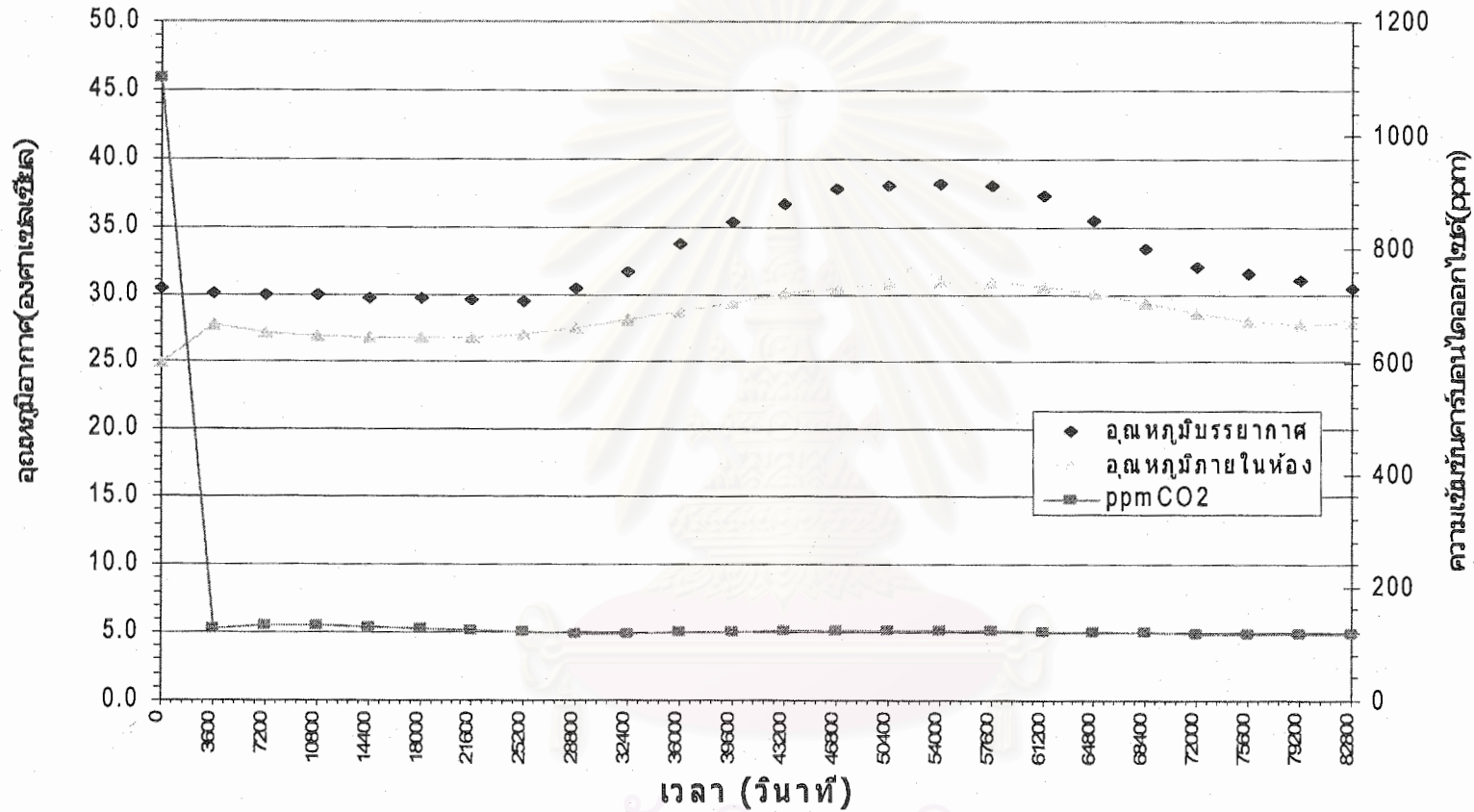
ชั่วโมงที่	จำนวนเวลา (วินาที)	อุณหภูมิ(K)	อุณหภูมิ(°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์(ppm CO2)
0	0	298.0	25.0	85.72	1100
1	3600	300.7	27.7	18.24	127
2	7200	300.2	27.2	19.41	133
3	10800	299.9	26.9	19.14	133
4	14400	299.8	26.8	18.14	130
5	18000	299.7	26.7	16.72	126
6	21600	299.8	26.8	15.17	122
7	25200	300.0	27.0	13.62	120
8	28800	300.5	27.5	12.16	118
9	32400	301.1	28.1	10.97	119
10	36000	301.7	28.7	10.08	120
11	39600	302.4	29.4	9.51	122
12	43200	303.0	30.0	8.95	123
13	46800	303.5	30.5	9.12	123
14	50400	303.8	30.8	9.18	123
15	54000	303.9	30.9	9.34	123
16	57600	303.9	30.9	9.51	122
17	61200	303.6	30.6	9.70	122
18	64800	303.1	30.1	9.96	120
19	68400	302.4	29.4	10.27	119
20	72000	301.6	28.6	10.67	118
21	75600	301.1	28.1	11.26	117
22	79200	300.8	27.8	12.20	116
23	82800	300.8	27.8	13.73	117
24	86400	301.9	28.9	15.79	122

จากผลการจำลองเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.26 ,4.27 ถึงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิอากาศของห้อง ณ เวลาใดๆ พบว่าที่เวลาเริ่มต้นความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 1100 ppm ความชื้นสัมพัทธ์ 85.72 % อุณหภูมิ 298 K (25°C) เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงมาอยู่ในระดับปริมาณ 127 ppm ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่เกินค่า 700 ppmตามที่แนะนำไว้(Godish, 2001) ความชื้นสัมพัทธ์ 18.24% ซึ่งใกล้เคียงกับค่าในช่วงสภาพความสบาย และอุณหภูมิอากาศของห้อง 300.8 K (27.8°C) มีค่าอยู่ในช่วงสภาพความสบายของประเทศไทย

แล้วเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ จนครบ 24 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักอยู่ในช่วง 116-133 ppm และที่เวลา 82,800 วินาที มีค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 122 ppm แต่สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของห้องนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์ตามกับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศภายนอกห้อง ณ เวลาต่างๆ ด้วย และที่เวลาสุดท้าย ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 15.79 % ที่อุณหภูมิอากาศของห้อง 301.9 K (28.9°C)



รูปที่ 4.26 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องกับเวลา ที่อุณหภูมิที่ใช้รีเจเนเรชั่น 353 K



รูปที่ 4.27 อุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องกับเวลาที่อุณหภูมิลมที่ใช้รีเจเนเรชั่น 353 K

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการนำแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบง่ายของสภาวะไม่คงตัวของเครื่องลดความชื้นแบบหมุนโดยการดูดซึมด้วยลิเทียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่อง(Continuous) (วิวัฒน์และอนวัช, 2001) มาดัดแปลงขยายผลให้สามารถใช้ในการทำนายสมรรถนะประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วยเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนที่มีสารดูดซับเป็นโมเลกุลวลาซีฟ 13X รวมทั้งใช้ในการศึกษาถึงปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมกันของทั้งความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ซึ่งจากที่ผู้วิจัยค้นคว้างานวิจัยเท่าที่ผ่านมา พบว่ายังไม่มียงานที่ทำการศึกษาลักษณะนี้มาก่อน

จากงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ลักษณะผลการเข้าสู่สภาวะคงตัวของการดูดซับ

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ถูกดูดซับ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยในอากาศจะใช้เวลาน้อยกว่าในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของปริมาณเฉลี่ยของน้ำที่ถูกดูดซับ ความชื้นสัมบูรณ์

2. ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน

ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิก๊าซภายในเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน พบว่าทั้งด้านการดูดซับและด้านการรีเจนเรชั่น อากาศในช่วง Cooling stage นั้นได้รับอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนสัมผัส และเมื่ออุณหภูมิก๊าซลดลงเรื่อยๆ จนเท่ากับอุณหภูมิของโรเตอร์ เป็นการเข้าสู่ช่วง Equilibrium stage จากนั้นเมื่อมีการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น อากาศจะร้อนขึ้นเนื่องจากความร้อนของการดูดซับที่ปลดปล่อยออกมา ฉะนั้นการเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาของความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง นั้นมีอิทธิพลต่อในช่วงนี้ภายใต้การสมดุลของความร้อนทั้งหมด

ลักษณะการกระจายตัวของมวลของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน มีการถ่ายเทมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น สามารถถูกดูดซับได้เร็วและเกิด

การอิมตัวก่อน แต่สำหรับความชื้นจะค่อยๆถูกดูดซับไว้และยังไม่เกิดการอิมซ้ากว่า ในการกระจายของมวลกับมุมมองของโรเตอร์

3. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์

อิทธิพลของความเร็รรอบหมุนโรเตอร์ ที่โรเตอร์ยาว 0.2 เมตร และอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น 333 K ที่ความเร็รรอบหมุน 3, 15 และ 25 rpm พบว่าที่ความเร็รรอบหมุน 3 rpm สามารถให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 20.3% และมีประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ความเร็รรอบหมุน 15 rpm เท่ากับ 33.1%

อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น ที่ความเร็รรอบหมุนโรเตอร์ 25 rpm และความยาวโรเตอร์ 0.2 เมตร พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น 423 K จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 333 K

อิทธิพลของความยาวโรเตอร์ ที่ความเร็รรอบหมุนโรเตอร์ 25 rpm และอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น 423 K พบว่าที่ความยาวโรเตอร์ 0.1 เมตร สามารถให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าประมาณ 45% และที่ความยาวโรเตอร์ 0.2 เมตร ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.9% และ 52.9% ตามลำดับ

จากการจำลองทั้งหมดของการใช้เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนในการกำจัดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันสามารถบอกได้ว่า สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมซึ่งสามารถให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูง คือ ที่ความยาวโรเตอร์ 0.1 เมตร ความเร็รรอบหมุนโรเตอร์ 25 rpm และอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น 423 K โดยมีประสิทธิภาพความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 47% และ 45.8% ตามลำดับ

4. ในการจำลองเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของคุณสมบัติอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุน ที่มีความยาวโรเตอร์ 0.1 เมตร ความเร็รรอบหมุนโรเตอร์ 25 rpm อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้รีเจเนเรชั่น 353 K และมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อช่วยลดอุณหภูมิอากาศก่อนที่ไหลกลับเข้าห้อง ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า สามารถลดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของห้องปรับอากาศ ให้อยู่ในระดับปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 122 ppm และความชื้นสัมพัทธ์ 16% ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 302 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากความสามารถของแบบจำลองเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนนั้น มีประโยชน์ที่นำไปพัฒนาขยายผลเพื่อศึกษาต่อไป อันได้แก่

1. การพัฒนาแบบจำลองการใช้เครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนนี้กับห้องปรับอากาศที่มีลักษณะการใช้งานที่ต่าง ๆ กัน เช่น ในโรงภาพยนตร์, โรงพยาบาล และอื่นๆ

2. ขยายการศึกษาในแง่สมรรถนะประสิทธิภาพกำจัดสารที่เป็นมลภาวะทางอากาศ เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ เรดอน และอื่นๆ ร่วมกับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกันด้วยการใช้แบบจำลองของเครื่องดูดซับแบบรังผึ้งหมุนนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. 2535. พระราชกฤษฎีกากำหนดอาคารควบคุม. กฎกระทรวงออกตามความในพระราชบัญญัติการส่งเสริมพลังงาน พ.ศ.2535, รหัส A2.
- ทนงเกียรติ เกียรติโรจน์, อติพงษ์ นันทพันธุ์, พิสุทธิ กลิ่นขจรและ วันรบ กิตินาน. 2545. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ การประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศและเพิ่มความร้อนโดยใช้สารดูดความชื้นแบบของแข็ง. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2546. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัชรวิระพจนานันท์. 2543. ผลของความชื้นต่อการดูดซับไอระเหยสารอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ตรึงใจ บุรณสมภพ. 2539. การออกแบบอาคารที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน. กรุงเทพมหานคร: บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด.

ภาษาอังกฤษ

- Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot E. N. 1960. Transport phenomena. New York: John Wiley & Sons.
- Busch, J.F. 1995. Thermal comfort in Thai air-conditioned and naturally ventilated offices. F. Nicol, M. Humphreys, O.Sykes, and S. Roaf , Standards for thermal comfort, 114-120. London: Chapman & Hall.
- Godish, T. 1990. Air quality. 2nd ed. Michigan: Lewis Publishers.
- Godish, T. 2001. Indoor air environmental quality. 2nd ed. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Hansen, S.J. 1991. Managing indoor air quality. Lilburn: The Fairmont Press.
- Hines, A. L., and Ghosh, T. K. 1992. Investigation of co-sorption of gases and vapors as a means to enhance indoor air quality-phase 2: Water vapor uptake and removal of chemical pollutants by solid adsorbents. Gas Research Institute Report No. GRI-92/0157.2 . Gas Research Institute, Chicago, IL.

- Hines, A. L., Ghosh, T. K., and Loyalka, S. K. 1993. Investigation of co-sorption of gases and vapors as a means to enhance indoor air quality-phase 2: Radon measurement and removal from indoor air by solid adsorbents. Gas Research Institute Report No. GRI-92/0157.4. Gas Research Institute Chicago, IL .
- Holcomb, L.C.,and Sterling E. M. 1991. Major combustion byproducts. Milton Mecker, Indoor air quality design guidebook, 93-115. Lilburn : The Fairmont Press.
- Incropera, F.P., and DeWitt, D.P. 1990. Fundamentals of heat and mass transfer. 3rd ed. Singapore: John Wiley&Sons.
- Kamiuto, K., Ermalina, and Ihara, K. 2001. CO₂ adsorption equilibria of the honeycomb zeolite beds. Applied Energy 69: 285–92.
- Kamiuto, K., Ermalina, and Ihara, K. 2002. Effect of desorption temperature on CO₂ adsorption equilibria of the honeycomb zeolite beds. Applied Energy 72: 555-564.
- Kamiuto K, Ermalina, and Ihara K. 2001. CO₂ adsorption equilibria of the honeycomb zeolite beds. Applied Energy 69: 285–92.
- Kodama, A., Goto, M., Hirose, T., and Kuma, T. 1993. Experimental study of optimal operation for a honeycomb adsorber operated with thermal swing. Journal of Chemical Engineering of Japan 26(5): 530-535.
- Kodama, A., Goto, M., Hirose, T., and Kuma, T. 1994. Temperature profile and optimal rotation speed of a honeycomb adsorber operated with thermal swing. Journal of Chemical Engineering of Japan 27(5): 644-649.
- Kodama, A., Goto, M., Hirose, T., and Kuma, T. 1998. An adsorptive desiccant cooling using honeycomb rotor dehumidifier. Journal of Chemical Engineering of Japan 31(5): 706-713.
- Kodama, A., Goto, M., Hirose, T., and Kuma, T. 1995. Performance evaluation for thermal swing honeycomb rotary adsorber operated with thermal swing. Journal of Chemical Engineering of Japan 28: 19-24.
- Kosar, D. 1990. Desiccant dryer. 1990. Handbook of HVAC Design. United States of America : McGraw-Hill.
- Kosar, D., et al. 1998. Dehumidification Issues of Standard 62-1989. ASHRAE Journal 40 (3): 71-75.
- Kreider, J. F., Curtiss, P. S., and Rabl, A. 2002. Heating and cooling of buildings: Design

- for efficiency. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- Kreyszig, E. 1999. Advanced engineering mathematics. 8th ed. Singapore: John Wiley & Sons.
- Lang, V. P. 1995. Principles of air conditioning. 5th ed. New York: Dalmar Publishers.
- Levenspiel, O. 1999. Chemical reaction engineering. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Mantell, C.L. 1951. Adsorption. 2nd ed. Chemical Engineering Series. New York: McGraw-Hill.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. 1993. Unit operations of chemical engineering. 5th ed. New York: McGraw-Hill.
- Perry, J.H. 1958. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Popescu, M., and Ghosh, T.K. 1999. Dehumidification and simultaneous removal of selected pollutants from indoor air by a desiccant wheel using a 1M type desiccant. Journal of Solar Energy Engineering 121: 1-12.
- Prawarnpit, A. 1997. Simulation of rotary adsorption dehumidifier system. M.S. thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University.
- Press, W. H. 1992. Numerical recipes in Fortran: the art of scientific computing. 2nd ed. United States of America : Cambridge University Press.
- Rajnish, J. 2002. Indoor Air Quality (IAQ) ASHRAE Standard. India : www.bryair.com.
- Rungarunsangchai O. 2001. Simulation of removal of humidity in a factory using various rotary honeycomb dehumidifiers. M.S. thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University.
- Seppanen, O., Fisk, W. J., and Mendell, M. J. 2002. Ventilation rates and health. ASHRAE Journal 44, 8: 56-58.
- Shen, C. M. and Worek, W. M. 1994. Cosorption characteristics of solid adsorbents. International Journal of Heat and Mass Transfer 37: 2123-2129.
- Shen, C. M., and Worek, W. M. 1996. Simulation of adsorption filters for air quality control. HVAC&R Research 2: 231-246.
- Shen, C. M., and Worek, W. M. 1996. Second-law analysis of a recirculation cycle desiccant cooling system: cosorption of water vapor and carbon dioxide. Atmospheric Environment 30: 1429-1435.
- Sircar, S. 1991. Isoteric heats of multicomponent gas adsorption on heterogeneous adsorbents. Langmuir, 7: 3065-3069.

- Sircar, S. 1992. Estimation of isotheric heats of adsorption of single gas and multicomponent gas mixtures. Ind. Eng. Chem. Res., 31: 1813-1819.
- Tanthapanichkoon, W., and Prawarnpit, A. 2002. New simple mathematical model of a honeycomb rotary adsorption-type dehumidifier. Chemical Engineering Journal 86: 11-15.
- Tanthapanichkoon, W., and Prawarnpit, A. 2003. Dynamic performance of dehumidification system using the adsorption-type rotary honeycomb dehumidifier. Journal of Chemical Engineering. 36: 1289-1297.
- Turiel, I. 1985. Indoor air quality and human health. California: Stanford University Press.
- Vanculik, F. 1991. Evaluation of methods measuring major indoor air pollutants. Milton Mecker, Indoor air quality design guidebook, 93-115. Lilburn : The Fairmont Press.
- Yang, R.T. 1987. Gas separation by adsorption processes. London: Butterworths.
- Zhang, L.Z.,and Niu, J.L. 2002. Performance comparisons of desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery. Thermal Engineering 22: 1347-1367.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สูตรการคำนวณ

- ก.1 ค่าความร้อนของการดูดซับ
- ก.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวล
- ก.3 ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ
- ก.4 ความชื้นสัมบูรณ์อิ่มตัวของอากาศชื้น
- ก.5 สัดส่วนมวลของไอน้ำ และสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์
- ก.6 ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น
- ก.7 คุณสมบัติของอากาศชื้น
- ก.8 ประสิทธิภาพการดูดซับ

ก.1 ค่าความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption)

เนื่องจากตามที่ได้ค้นคว้า ไม่พบข้อมูลการทดลองของความร้อนของการดูดซับสำหรับสารผสม 2 องค์ประกอบของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์บนสารโมเลกุลเลซีฟ 13 X แต่จาก Shen และ Worek (1996) ได้ทำการคำนวณด้วยวิธีของ Sircar (1991, 1992) ซึ่งแนะนำไว้ว่า Isosteric heat of adsorption ของก๊าซบริสุทธิ์ หรือก๊าซผสม สามารถประเมินหาในเชิงการวิเคราะห์จากสมการไอโซเทอมของการดูดซับ โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับดังจากสมการนี้

$$(Q_{st})_i = RT \left[\frac{\partial(p_i^b)}{\partial T} \right]_{n_i^c}$$

ถ้าจากเชิงการวิเคราะห์เป็นไอโซเทอมการดูดซับของก๊าซผสมเป็น $n_i^c = n_i^c(P_i, T, X_i^b)$ แล้วใช้ กฎลูกโซ่ (Chain rule) หรือ Jacobian transforms ในการคำนวณสมการข้างต้น สำหรับสารผสม 2 องค์ประกอบสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{(Q_{st})_i}{RT} = \frac{\frac{\partial(\ln p_i^b, n_1^e, n_2^e)}{\partial(P_i, T, X_1^b)}}{\frac{\partial(\ln T, n_1^e, n_2^e)}{\partial(P_i, T, X_1^b)}} \quad , \quad p_1^b = P_i X_1^b \quad \text{สำหรับองค์ประกอบที่ 1}$$

$$p_2^b = P_i(1 - X_1^b) \quad \text{สำหรับองค์ประกอบที่ 2}$$

จากการหาค่าความร้อนของการดูดซับตามวิธีดังกล่าว จึงสามารถคำนวณได้ตามนี้

ก.1.1 ความร้อนของการดูดซับของไอน้ำ

สามารถแสดงได้ด้วย

$$\Delta H_{ads,W} = \frac{R(T_m)^2}{M_w} \left(\frac{\partial \ln(P_{s,w})}{\partial T_m} + \frac{\partial \ln(RH)}{\partial T_m} \right)$$

ก.1.2 ความร้อนของการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์

สามารถแสดงได้ด้วย

$$\Delta H_{ads,C} = \frac{R(T_m)^2}{M_C} \left(\frac{\partial \ln(P_{da})}{\partial T_m} + \frac{\partial \ln(Y_{m,C})}{\partial T_m} \right)_{W_C}$$

จะได้

$$\Delta H_{ads,C} = \frac{R(T_m)}{M_C} \left(1 + T_m \left(\frac{\partial \ln(Y_{m,C})}{\partial T_m} \right)_{W_C} \right)$$

ก.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass transfer coefficient)

ก.2.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$Nu = 1.86 \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot d_h}{L} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

$$h_f = \frac{Nu \cdot k_{cond}}{d_h}$$

ก.2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

$$\frac{h_f}{k_f C_s} = Le$$

$$k_f = \frac{h_f}{C_s \cdot Le}$$

$$C_s = 1.003 + 1.858H + 0.894Y_c \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 298 \text{ K}$$

ค่า เลวิส นัมเบอร์ (Overall Lewis number, Le) เท่ากับ 0.96 สำหรับไอน้ำ และเท่ากับ 0.90 สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ (Shen และ Worek, 1996)

ก.2.2.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสำหรับไอน้ำ

$$k_{f,w} = \frac{h_f}{(0.96)C_s}$$

ก.2.2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์

$$k_{f,c} = \frac{h_f}{(0.9)C_s}$$

ก.3 ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

สหสัมพันธ์ของความดันไออิ่มตัวของน้ำ (Perry, 1958) เป็น

$$P_{\text{sat, w}} = \exp\left(68.756 - \left(\frac{7258.2}{T}\right) - (7.3037 \times \ln T) + (4.1653 \times 10^{-6})(T^2)\right)$$

- ความดันไอ มีหน่วยเป็น mmHg และอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น K

- สหสัมพันธ์นี้ใช้ใน ช่วง 273.16 - 647.13 K

ก.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศชื้น

ความดันรวม = ความดันอากาศแห้ง + ความดันไอน้ำ + ความดันคาร์บอนไดออกไซด์

$$P_t = P_{da} + P_w + P_c$$

$$H = \frac{(MW)_w P_w}{(MW)_{da} P_{da}} \quad Y = \frac{(MW)_c P_c}{(MW)_{da} P_{da}}$$

$$P_{da} = \frac{P_t}{1 + \frac{(MW)_{da}}{(MW)_w} H + \frac{(MW)_{da}}{(MW)_c} Y}$$

$$H = \left(1 - \frac{P_t}{P_{da}} + \frac{(MW)_{da}}{(MW)_c} Y \right) \frac{(MW)_w}{(MW)_{da}}$$

$$P_w = \frac{P_t}{1 + \frac{(MW)_w}{(MW)_{da}} \left(\frac{1}{H} \right) + \frac{(MW)_w}{(MW)_c} \left(\frac{Y}{H} \right)}$$

$$P_c = \frac{P_t}{1 + \frac{(MW)_c}{(MW)_{da}} \left(\frac{1}{Y} \right) + \frac{(MW)_c}{(MW)_w} \left(\frac{H}{Y} \right)}$$

ที่ ความดันรวม; $P_t = 101325 \text{ Pa}$ หรือ 760 mmHg

$$P_w = \frac{P_t}{1 + 0.622 \left(\frac{1}{H} \right) + 0.409 \left(\frac{Y}{H} \right)}$$

โดยที่ H มีหน่วยเป็น $[\text{kg}_w/\text{kg}_{dg}]$ และ Y มีหน่วยเป็น $[\text{kg}_c/\text{kg}_{dg}]$

จาก $\%RH = \frac{P_w}{P_{sat,w}} \times 100$

ดังนั้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศชื้น

$$\%RH = \left[\frac{P_t}{1 + 0.622 \left(\frac{1}{H} \right) + 0.409 \left(\frac{Y}{H} \right)} \right] \frac{1}{P_{sat,w}} \times 100$$

ก.5 สัดส่วนมวลของไอน้ำ และสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์

ก.5.1 สัดส่วนมวลของไอน้ำ

$$H = \frac{(RH)P_{sat,w} \left(\frac{MW_w}{MW_{da}} \right) \left[1 + \left(\frac{MW_{da}}{MW_C} \right) Y \right]}{P_t - (RH)P_{sat,w}}$$

ก.5.2 สัดส่วนมวลของ คาร์บอนไดออกไซด์

$$Y = \left(\frac{MW_C}{MW_{da}} \right) \left[1 - \frac{(P_t - (RH)P_{sat,w})}{(RH)P_{sat,w} \left(\frac{MW_w}{MW_{da}} \right)} H \right]$$

ก.6 ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น

จากสมมติฐานที่ว่าอากาศชื้นเป็นของผสมในอุดมคติ (ก๊าซในอุดมคติ) ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้นสามารถหาได้จาก

$$V_{HY} = \frac{(22.4)(T)}{273} \left(\frac{1}{(MW)_{da}} + \frac{H}{(MW)_w} + \frac{Y}{(MW)_C} \right)$$

โดยแทน : $(MW)_{da} = 28.97$ kg/kmol

$(MW)_w = 18.015$ kg/kmol

$(MW)_C = 44.01$ kg/kmol

$$V_{HY} = \frac{(22.4)(T)}{273} \left(\frac{(18.015 \times 44.01) + (28.97 \times 44.01)H + (28.97 \times 18.015)Y_C}{(28.97 \times 18.015 \times 44.01)} \right)$$

$$V_{HY} = \frac{(22.4)(T)}{273} ((0.0345) + (0.0555)H + (0.0227)Y_C)$$

ในที่นี้ V_{HY} มีหน่วยเป็น m^3/kg_{da} และอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น K

ก.7 คุณสมบัติของอากาศชื้น

ก.7.1 ความหนืดของอากาศ (Viscosity of air)

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{0.65} \quad ; \quad \mu_0 = 0.0000712 \quad \text{N/(m}\cdot\text{s)}$$

$$\mu \text{ [kg /m}\cdot\text{s]}$$

ก.7.2 ค่าการนำความร้อนของอากาศ (Conductivity of air)

$$k_{cond} = \left(\frac{1}{860.4115} \right) \left(\frac{8.2784}{T + 125} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{1.5} \quad ; \quad k_{cond} \text{ [w/m.K]}$$

ก.8 ประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ} = \left(\frac{\text{ความเข้มข้นที่ทางออก}_{ads} - \text{ความเข้มข้นที่ทางเข้า}_{ads}}{\text{ความเข้มข้นที่ทางออก}_{ads}} \right) \times 100$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ระเบียบวิธีของรุงเง-คูตตาอันดับ 4

จากงานวิจัยนี้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation) ที่มีตัวแปรตาม เป็น W_w, W_c, T_s, T_a, H, Y และตัวแปรต้นเป็น t เพียงตัวเดียว โดยใช้วิธีการแก้สมการอนุพันธ์ด้วยระเบียบวิธีของรุงเง-คูตตาอันดับ 4 (Four-order Runge-Kutta method) ซึ่งจัดเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในการคำนวณที่ต้องการผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง แนวความคิดที่ใช้ในการประดิษฐ์ระเบียบวิธีของรุงเง-คูตตานี้คือ การหาค่าความชันที่มีความเที่ยงตรงสูงเพื่อก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงตามมา และสำหรับสมการรุงเง-คูตตาอันดับ 4 ซึ่งให้ค่าความผิดพลาดในรูปแบบของความกว้างช่วงอันดับ 4 $O(h^4)$

รูปแบบของสมการรุงเง-คูตตาอันดับ 4 ที่ใช้โดยทั่วไป ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงนั้นมีลักษณะดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + [(1/6)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)] h$$

โดย

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + (1/2)h, y_i + (1/2)hk_1)$$

$$k_3 = f(x_i + (1/2)h, y_i + (1/2)hk_2)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3)$$

เมื่อเทียบสมการคณิตศาสตร์จากงานวิจัยกับรูปแบบดังกล่าว ซึ่ง h คือ Δt เขียนใหม่ได้เป็น

$$W_{w_{i+1}} = W_{w_i} + [(1/6)(k_{1,W_w} + 2k_{2,W_w} + 2k_{3,W_w} + k_{4,W_w})] \Delta t$$

$$W_{c_{i+1}} = W_{c_i} + [(1/6)(k_{1,W_c} + 2k_{2,W_c} + 2k_{3,W_c} + k_{4,W_c})] \Delta t$$

$$T_{s_{i+1}} = T_{s_i} + [(1/6)(k_{1,T_s} + 2k_{2,T_s} + 2k_{3,T_s} + k_{4,T_s})] \Delta t$$

$$T_{a_{i+1}} = T_{a_i} + [(1/6)(k_{1,T_a} + 2k_{2,T_a} + 2k_{3,T_a} + k_{4,T_a})] \Delta t$$

$$H_{i+1} = W_{w_i} + [(1/6)(k_{1,H} + 2k_{2,H} + 2k_{3,H} + k_{4,H})] \Delta t$$

$$Y_{i+1} = Y_i + [(1/6)(k_{1,Y} + 2k_{2,Y} + 2k_{3,Y} + k_{4,Y})] \Delta t$$

โดย

$$k_{1,Ww} = f_{Ww} (t, Ww, Wc, Ts, Ta, H, Y)$$

$$k_{1,Wc} = f_{Ts} (t, Ww, Wc, Ts, Ta, H, Y)$$

$$k_{1,Ts} = f_{Wc} (t, Ww, Wc, Ts, Ta, H, Y)$$

$$k_{1,Ta} = f_{Ta} (t, Ww, Wc, Ts, Ta, H, Y)$$

$$k_{1,H} = f_H (t, Ww, Wc, Ts, Ta, H, Y)$$

$$k_{1,Y} = f_Y (t, Ww, Wc, Ts, Ta, H, Y)$$

$$k_{2,Ww} = f_{Ww} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{1,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{1,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{1,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{1,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{1,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{1,Y})$$

$$k_{2,Wc} = f_{Ts} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{1,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{1,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{1,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{1,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{1,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{1,Y})$$

$$k_{2,Ts} = f_{Wc} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{1,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{1,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{1,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{1,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{1,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{1,Y})$$

$$k_{2,Ta} = f_{Ta} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{1,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{1,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{1,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{1,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{1,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{1,Y})$$

$$k_{2,H} = f_H (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{1,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{1,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{1,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{1,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{1,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{1,Y})$$

$$k_{2,Y} = f_Y (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{1,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{1,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{1,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{1,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{1,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{1,Y})$$

$$k_{3,Ww} = f_{Ww} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{2,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{2,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{2,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{2,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{2,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{2,Y})$$

$$k_{3,Wc} = f_{Wc} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{2,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{2,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{2,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{2,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{2,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{2,Y})$$

$$k_{3,Ts} = f_{Ts} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{2,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{2,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{2,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{2,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{2,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{2,Y})$$

$$k_{3,Ta} = f_{Ta} (t+(1/2)\Delta t, Ww+(1/2)\Delta t k_{2,Ww}, Wc+(1/2)\Delta t k_{2,Wc}, Ts+(1/2)\Delta t k_{2,Ts}, \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{2,Ta}, H+(1/2)\Delta t k_{2,H}, Y+(1/2)\Delta t k_{2,Y})$$

$$k_{3,H} = f_H (t+(1/2)\Delta t , Ww+(1/2)\Delta t k_{2,Ww} , Wc+(1/2)\Delta t k_{2,Wc} , Ts+(1/2)\Delta t k_{2,Ts} , \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{2,Ta} , H+(1/2)\Delta t k_{2,H} , Y+(1/2)\Delta t k_{2,Y})$$

$$k_{3,Y} = f_Y (t+(1/2)\Delta t , Ww+(1/2)\Delta t k_{2,Ww} , Wc+(1/2)\Delta t k_{2,Wc} , Ts+(1/2)\Delta t k_{2,Ts} , \\ Ta+(1/2)\Delta t k_{2,Ta} , H+(1/2)\Delta t k_{2,H} , Y+(1/2)\Delta t k_{2,Y})$$

$$k_{4,Ww} = f_{Ww} (t+\Delta t , Ww+\Delta t k_{3,Wwc} , Wc+\Delta t k_{3,Wc} , Ts+\Delta t k_{3,Ts} , \\ Ta+\Delta t k_{3,Ta} , H+\Delta t k_{3,H} , Y+\Delta t k_{3,Y})$$

$$k_{4,Wc} = f_{Wc} (t+\Delta t , Ww+\Delta t k_{3,Wwc} , Wc+\Delta t k_{3,Wc} , Ts+\Delta t k_{3,Ts} , \\ Ta+\Delta t k_{3,Ta} , H+\Delta t k_{3,H} , Y+\Delta t k_{3,Y})$$

$$k_{4,Ts} = f_{Ts} (t+\Delta t , Ww+\Delta t k_{3,Wwc} , Wc+\Delta t k_{3,Wc} , Ts+\Delta t k_{3,Ts} , \\ Ta+(\Delta t k_{3,Ta} , H+\Delta t k_{3,H} , Y+(\Delta t k_{3,Y})$$

$$k_{4,Ta} = f_{Ta} (t+\Delta t , Ww+\Delta t k_{3,Wwc} , Wc+\Delta t k_{3,Wc} , Ts+\Delta t k_{3,Ts} , \\ Ta+\Delta t k_{3,Ta} , H+\Delta t k_{3,H} , Y+\Delta t k_{3,Y})$$

$$k_{4,H} = f_H (t+\Delta t , Ww+\Delta t k_{3,Wwc} , Wc+\Delta t k_{3,Wc} , Ts+\Delta t k_{3,Ts} , \\ Ta+\Delta t k_{3,Ta} , H+\Delta t k_{3,H} , Y+\Delta t k_{3,Y})$$

$$k_{4,Y} = f_Y (t+\Delta t , Ww+\Delta t k_{3,Wwc} , Wc+\Delta t k_{3,Wc} , Ts+\Delta t k_{3,Ts} , \\ Ta+\Delta t k_{3,Ta} , H+\Delta t k_{3,H} , Y+\Delta t k_{3,Y})$$

ภาคผนวก ค

ข้อมูลรายละเอียดของสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์

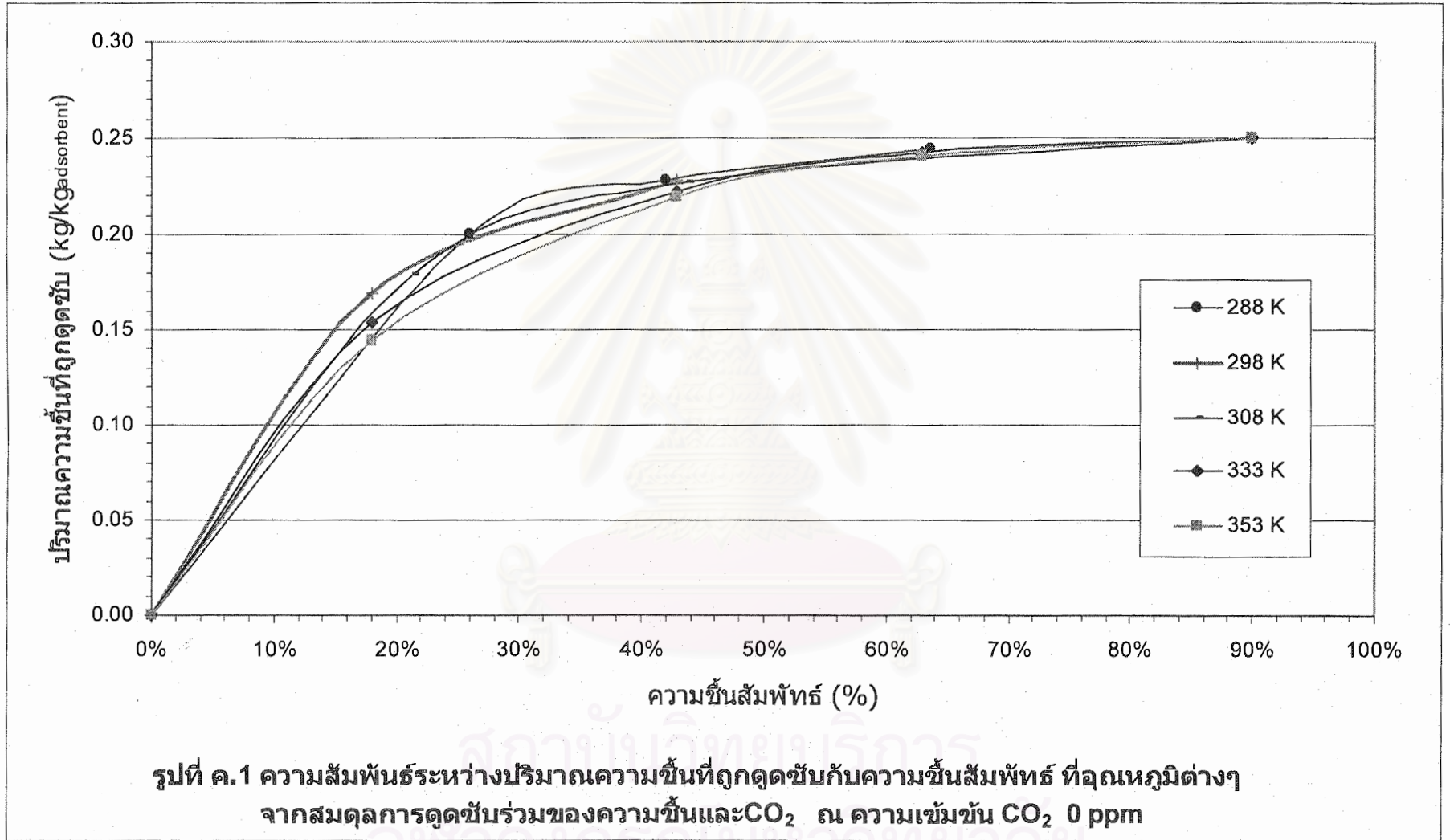
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลจากการคำนวณของสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

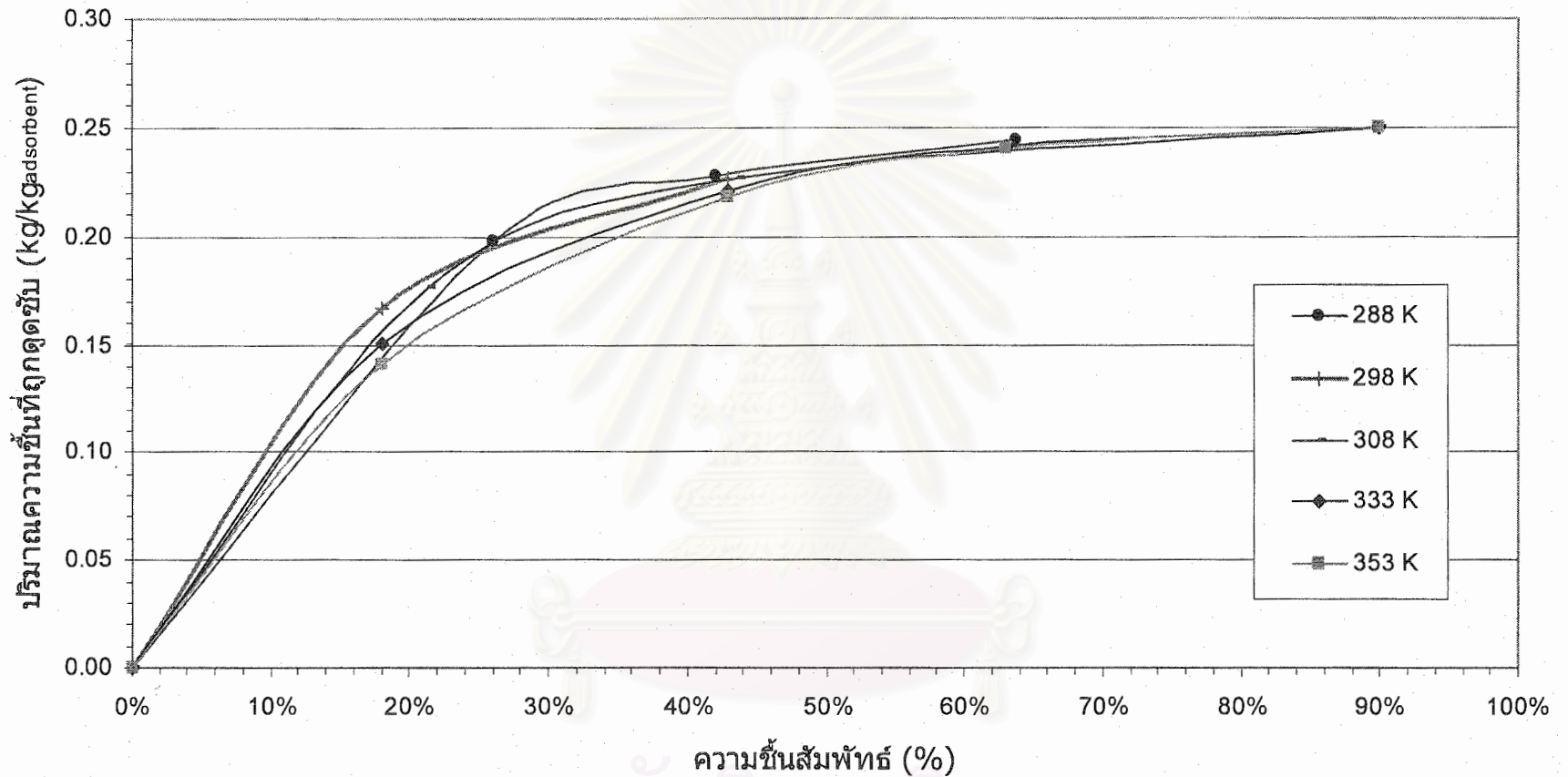
T_m	%RH	ppm CO ₂	$Y_{m,c}$ (kg/kg _{da})	W_c (kg/kg _{adsorbent})	W_H (kg/kg _{adsorbent})
288	0%	0	0	0.00000	0.000
		350	0.000548	0.00796	0.000
		500	0.000774	0.01124	0.000
		1100	0.001704	0.02475	0.000
		1500	0.002323	0.03374	0.000
	26%	0	0	0.00000	0.200
		350	0.000548	0.00188	0.198
		500	0.000774	0.00265	0.197
		1100	0.001704	0.00584	0.194
		1500	0.002323	0.00797	0.191
	42%	0	0	0.00000	0.228
		350	0.000548	0.00183	0.227
		500	0.000774	0.00259	0.227
		1100	0.001704	0.00570	0.225
		1500	0.002323	0.00777	0.224
	64%	0	0	0.00000	0.244
		350	0.000548	0.00092	0.244
		500	0.000774	0.00131	0.244
		1100	0.001704	0.00287	0.243
		1500	0.002323	0.00392	0.243
298	0%	0	0	0.00000	0.000
		350	0.000548	0.00524	0.000
		500	0.000774	0.00740	0.000
		1100	0.001704	0.01630	0.000
		1500	0.002323	0.02222	0.000

T_m	%RH	ppm CO ₂	$Y_{m,c}$ (kg/kg _{da})	W_c (kg/kg _{adsorbent})	W_H (kg/kg _{adsorbent})
298	18%	0	0	0.00000	0.169
		350	0.000548	0.00130	0.167
		500	0.000774	0.00184	0.165
		1100	0.001704	0.00405	0.160
		1500	0.002323	0.00552	0.157
	43%	0	0	0.00000	0.228
		350	0.000548	0.00119	0.227
		500	0.000774	0.00168	0.226
		1100	0.001704	0.00371	0.225
		1500	0.002323	0.00506	0.224
	63%	0	0	0.00000	0.244
		350	0.000548	0.00063	0.243
		500	0.000774	0.00089	0.243
		1100	0.001704	0.00196	0.243
		1500	0.002323	0.00267	0.242
	90%	0	0	0.00000	0.250
		350	0.000548	0.00027	0.250
		500	0.000774	0.00038	0.250
		1100	0.001704	0.00084	0.250
		1500	0.002323	0.00115	0.250
308	0%	0	0	0.00000	0.000
		350	0.000548	0.00355	0.000
		500	0.000774	0.00501	0.000
		1100	0.001704	0.01103	0.000
		1500	0.002323	0.01504	0.000
	21%	0	0	0.00000	0.179
		350	0.000548	0.00083	0.176
		500	0.000774	0.00118	0.175
		1100	0.001704	0.00259	0.170
		1500	0.002323	0.00354	0.167
	44%	0	0	0.00000	0.227
		350	0.000548	0.00080	0.226
		500	0.000774	0.00113	0.226

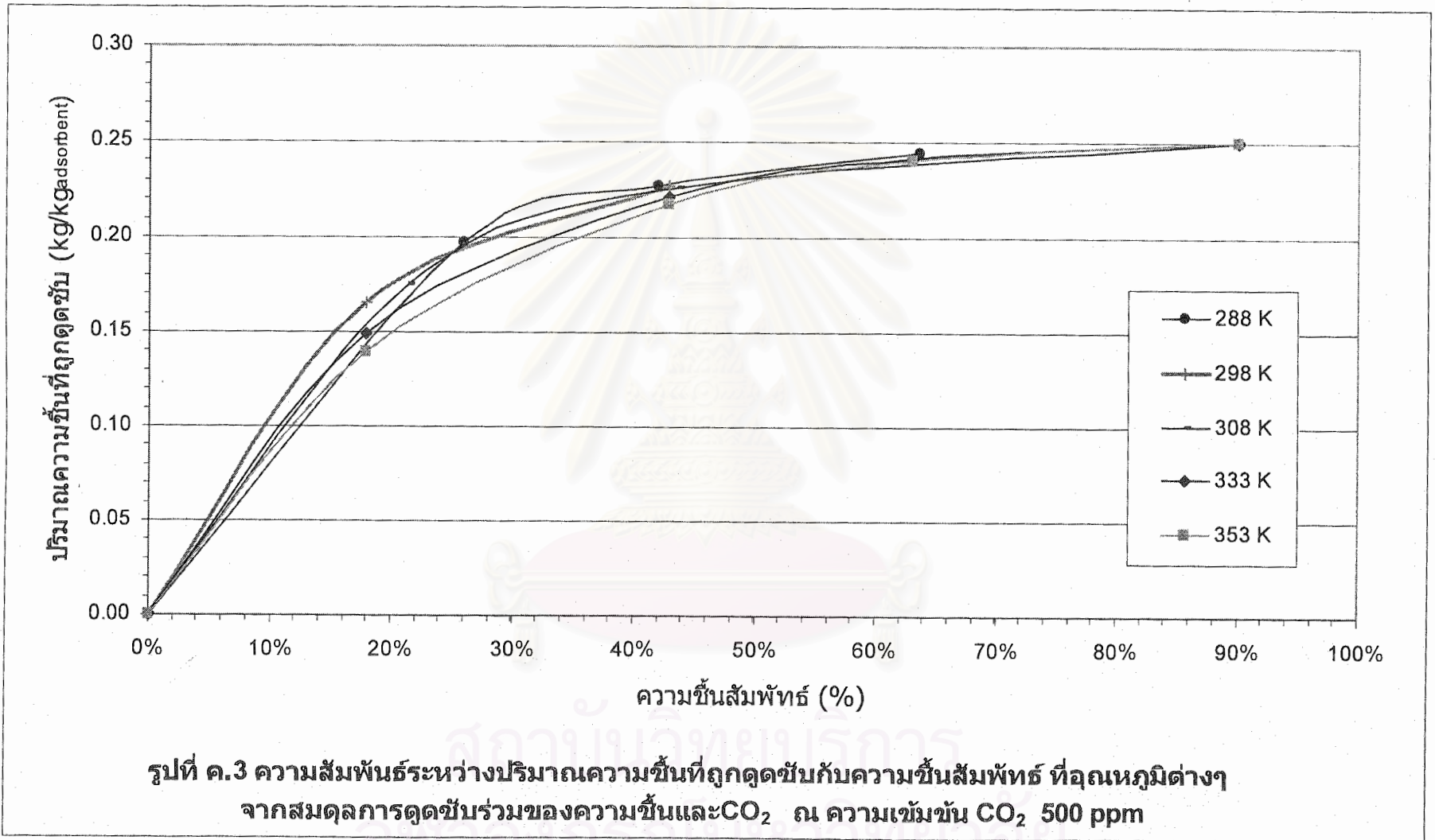
T_m	%RH	ppm CO ₂	$Y_{m,c}$ (kg/kg _{da})	W_c (kg/kg _{adsorbent})	W_H (kg/kg _{adsorbent})	
304		1100	0.001704	0.00248	0.224	
		1500	0.002323	0.00338	0.223	
	90%	0	0	0.00000	0.250	
		350	0.000548	0.00018	0.250	
		500	0.000774	0.00026	0.250	
		1100	0.001704	0.00057	0.250	
		1500	0.002323	0.00078	0.250	
333	0%	0	0	0.00000	0.000	
		350	0.000548	0.00148	0.000	
		500	0.000774	0.00209	0.000	
		1100	0.001704	0.00460	0.000	
		1500	0.002323	0.00628	0.000	
	18%	0	0	0.00000	0.154	
		350	0.000548	0.00037	0.150	
		500	0.000774	0.00052	0.149	
		1100	0.001704	0.00114	0.143	
		1500	0.002323	0.00156	0.139	
	43%	0	0	0.00000	0.222	
		350	0.000548	0.00034	0.221	
		500	0.000774	0.00048	0.221	
		1100	0.001704	0.00105	0.219	
		1500	0.002323	0.00143	0.217	
	63%	0	0	0.00000	0.242	
		350	0.000548	0.00018	0.241	
		500	0.000774	0.00025	0.241	
		1100	0.001704	0.00055	0.241	
		1500	0.002323	0.00075	0.240	
	90%	0	0	0.00000	0.250	
		350	0.000548	0.00008	0.250	
		500	0.000774	0.00011	0.250	
		1100	0.001704	0.00024	0.250	
		1500	0.002323	0.00032	0.250	

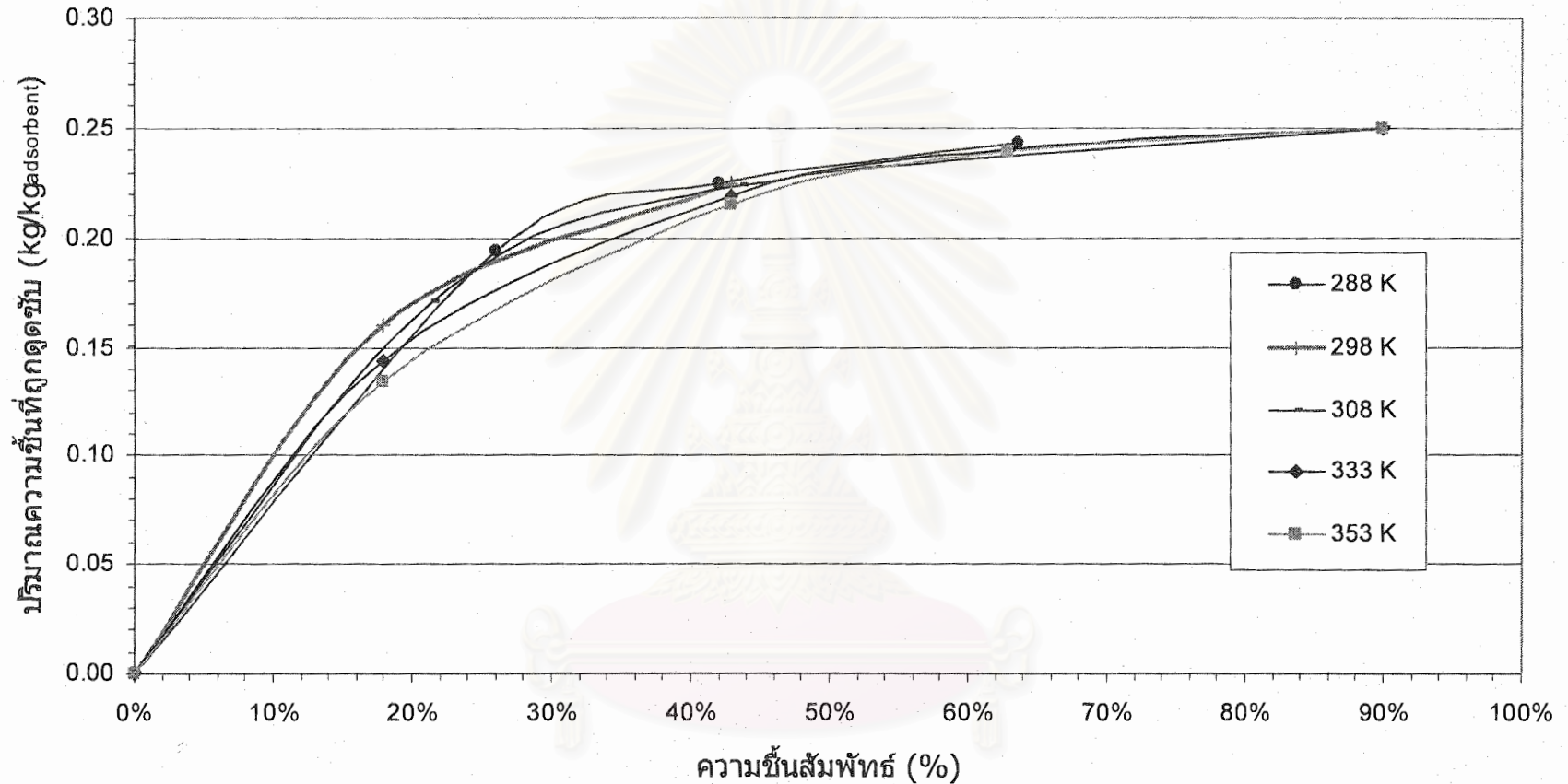
T_m	%RH	ppm CO ₂	$Y_{m,c}$ (kg/kg _{da})	W_c (kg/kg _{adsorbent})	W_H (kg/kg _{adsorbent})
353	0%	0	0	0.00000	0.000
		350	0.000548	0.00080	0.000
		500	0.000774	0.00114	0.000
		1100	0.001704	0.00250	0.000
		1500	0.002323	0.00341	0.000
	18%	0	0	0.00000	0.145
		350	0.000548	0.00020	0.141
		500	0.000774	0.00028	0.140
		1100	0.001704	0.00062	0.134
		1500	0.002323	0.00085	0.130
	43%	0	0	0.00000	0.219
		350	0.000548	0.00018	0.218
		500	0.000774	0.00026	0.217
		1100	0.001704	0.00057	0.215
		1500	0.002323	0.00078	0.213
	63%	0	0	0.00000	0.241
		350	0.000548	0.00010	0.240
		500	0.000774	0.00014	0.240
		1100	0.001704	0.00030	0.239
		1500	0.002323	0.00041	0.239
90%	0	0	0.00000	0.250	
	350	0.000548	0.00004	0.250	
	500	0.000774	0.00006	0.250	
	1100	0.001704	0.00013	0.250	
	1500	0.002323	0.00018	0.250	



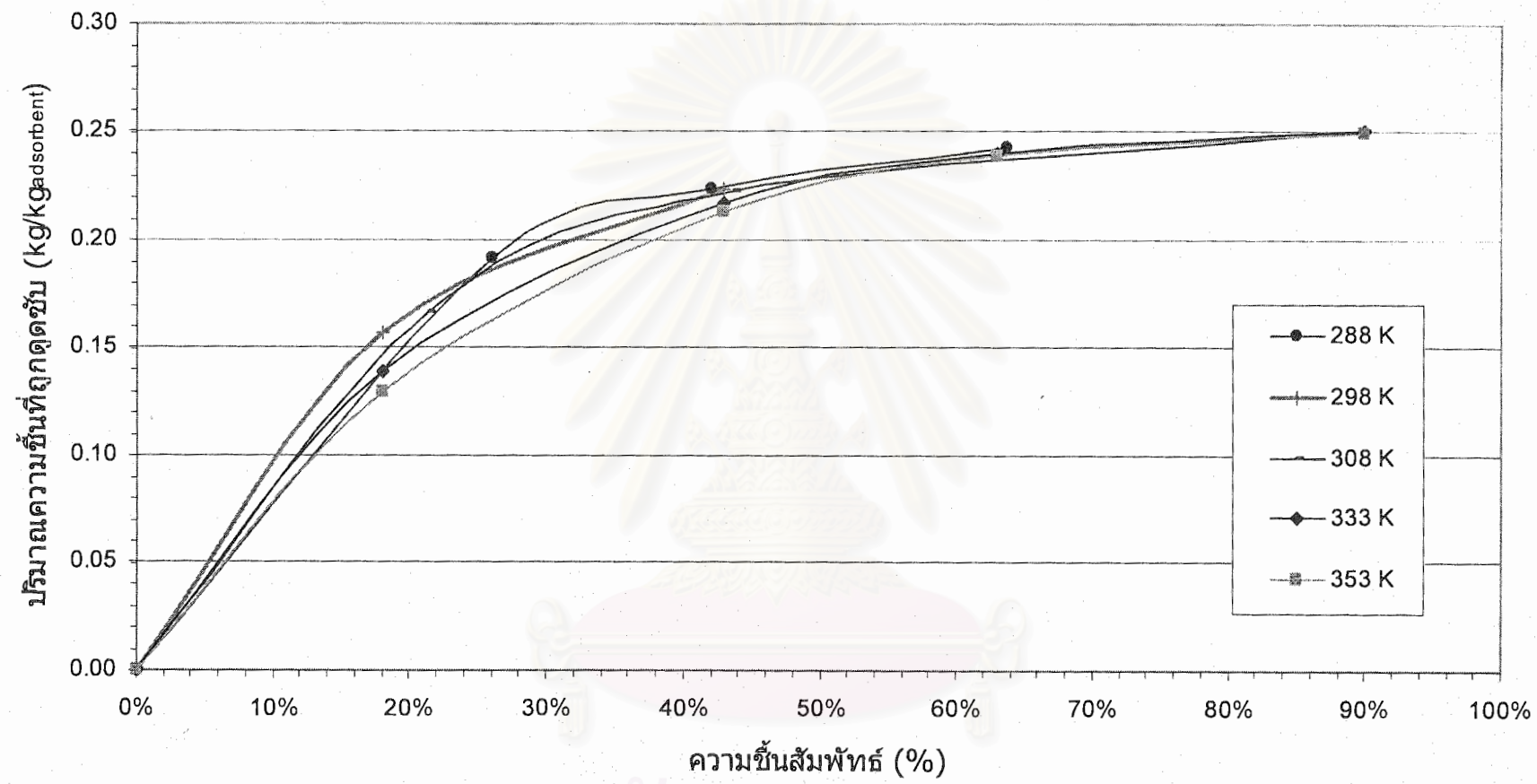


รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและCO₂ ณ ความเข้มข้น CO₂ 350 ppm



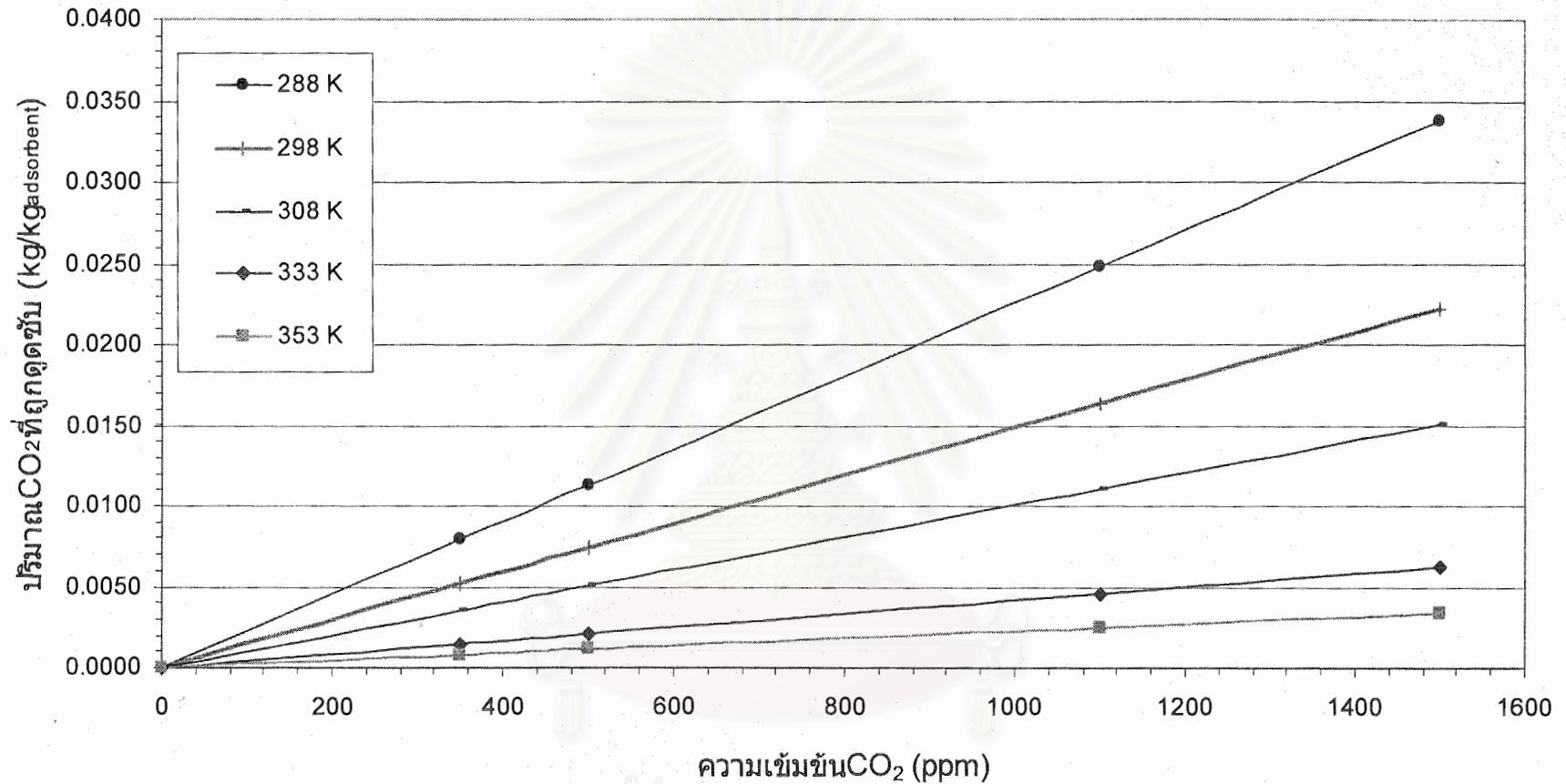


รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO_2 ณ ความเข้มข้น CO_2 1100 ppm

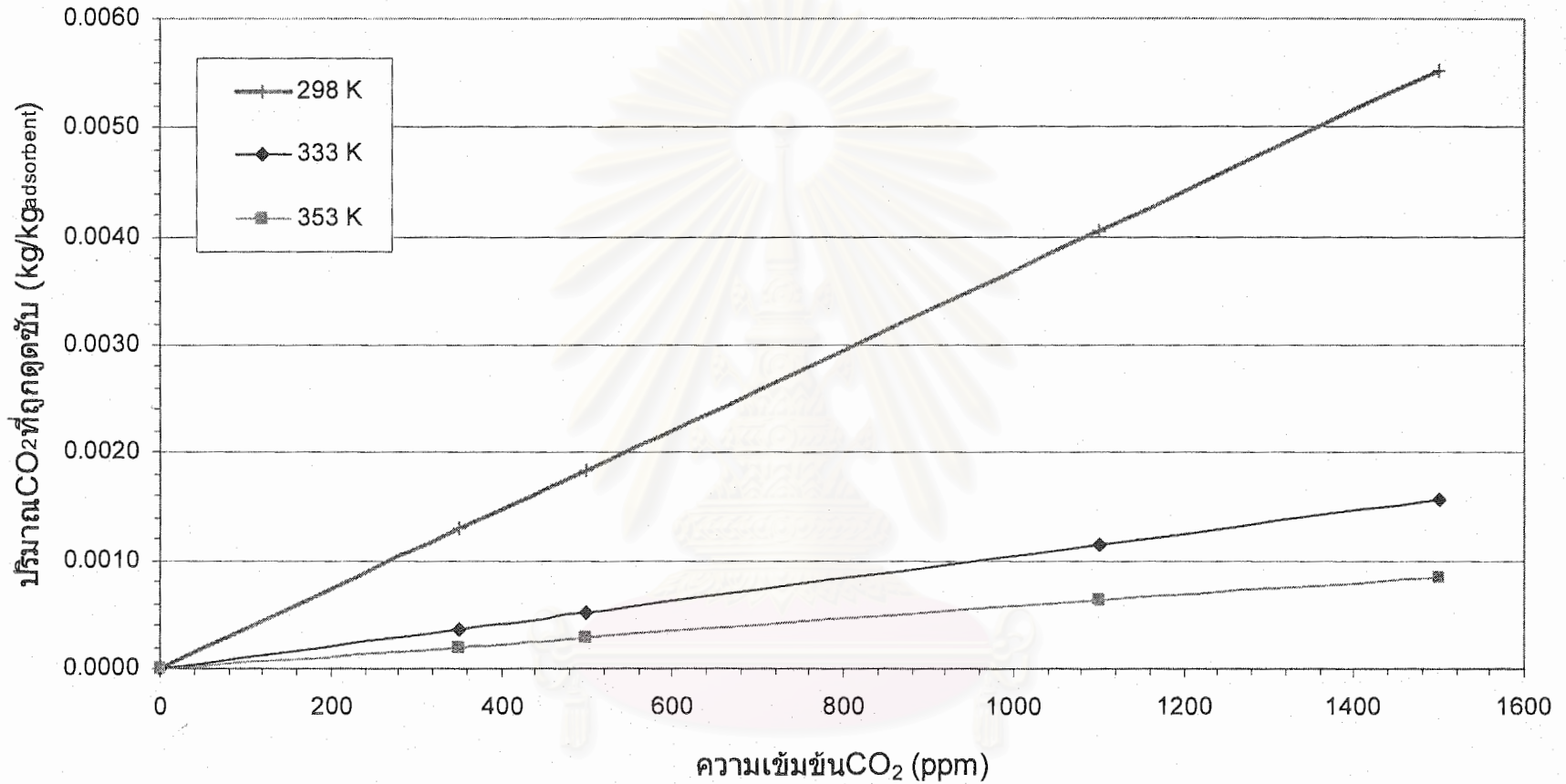


รูปที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับร่วมของความชื้นและCO₂ ณ ความเข้มข้น CO₂ 1500 ppm

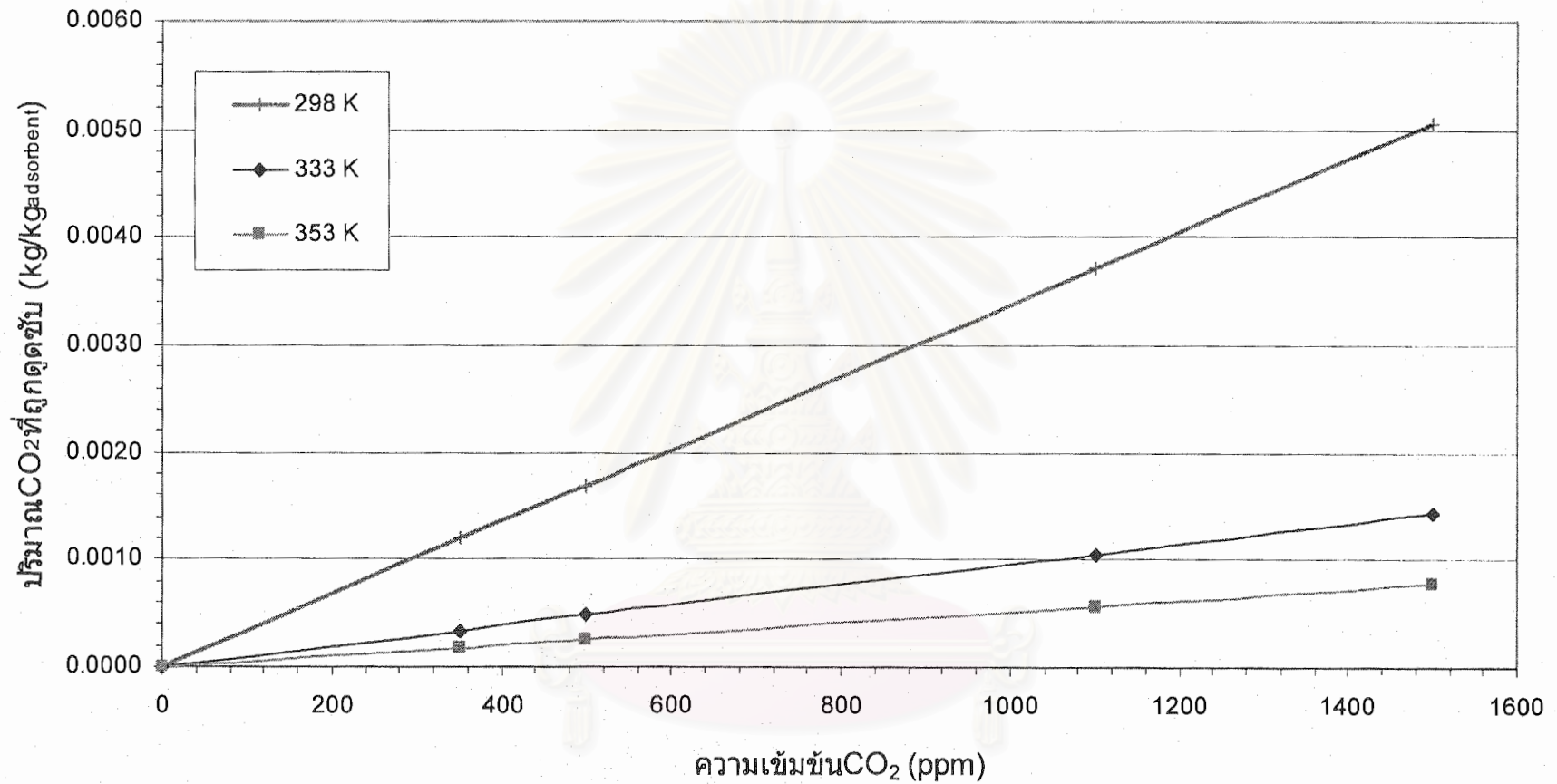
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



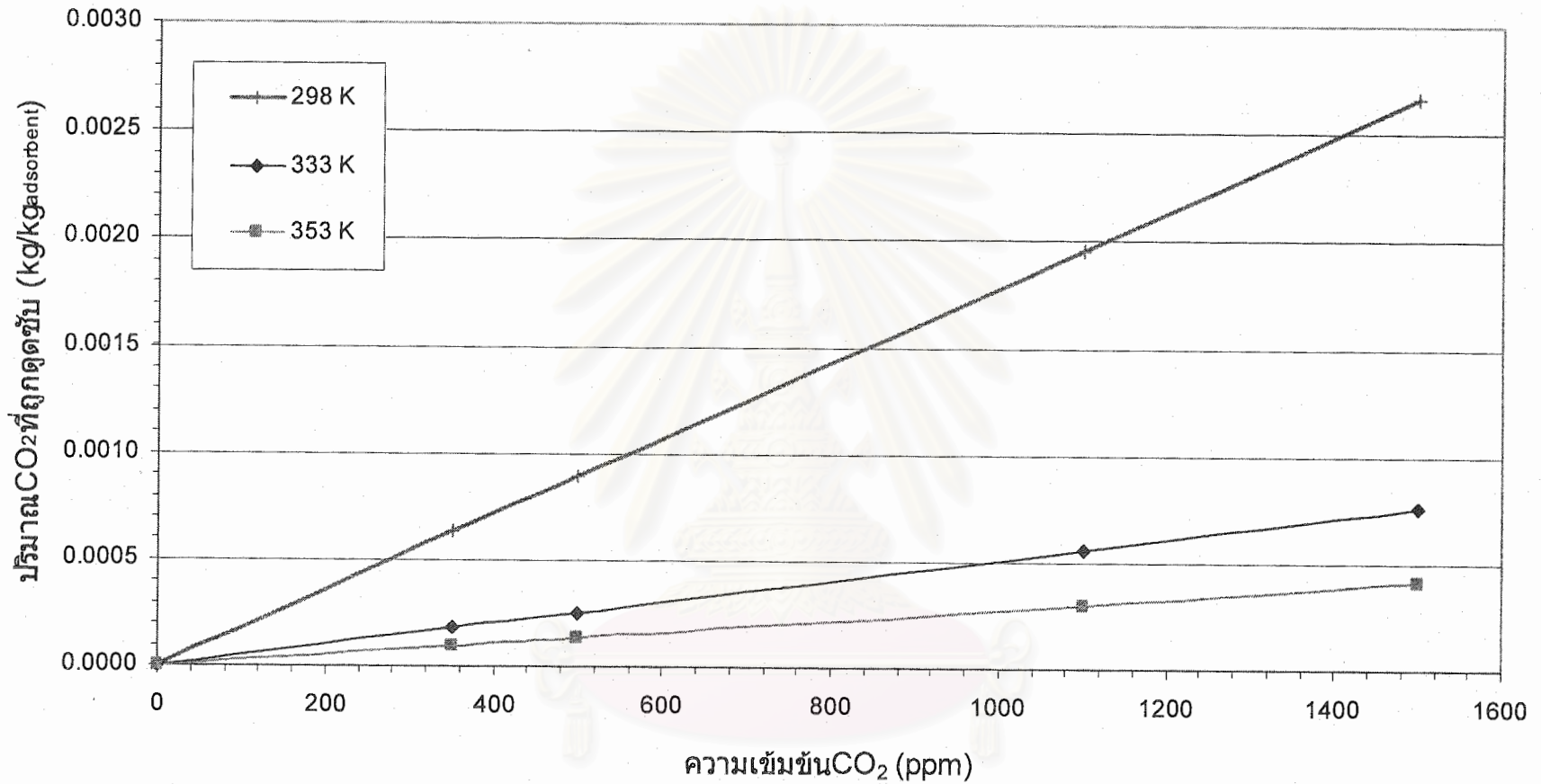
รูปที่ ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCO₂ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมการการดูดซับรวมของความชื้นและCO₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0 %



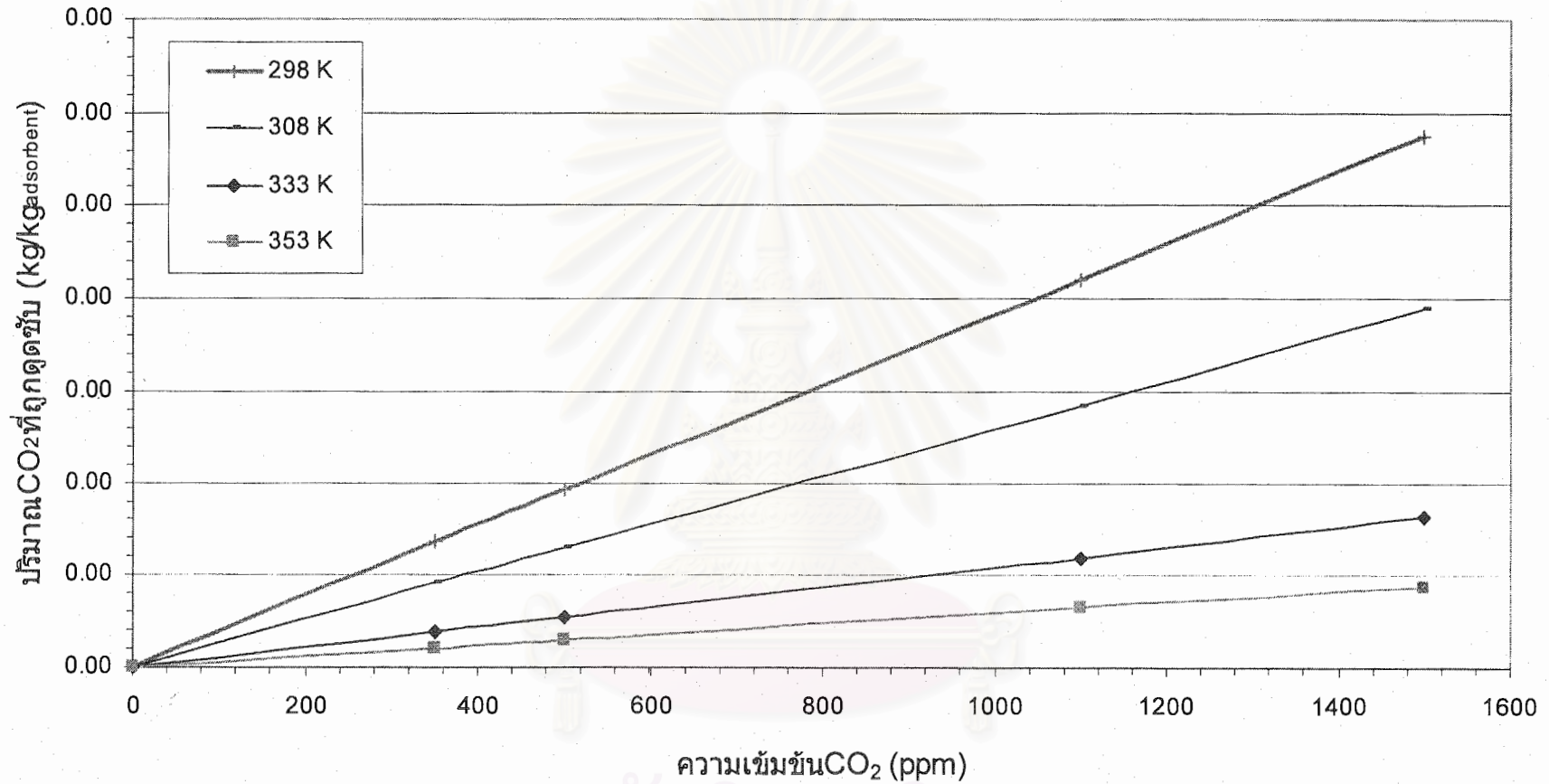
รูปที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมดุลการดูดซับรวมของความชื้นและ CO₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 18 %



รูปที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมการดูดซับรวมของความชื้นและ CO₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 42.9 %



รูปที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO₂ ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมการการดูดซับรวมของความชื้นและ CO₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 63 %



รูปที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCO₂ที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้น CO₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมการดูดซับรวมของความชื้นและCO₂ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 90 %

ภาคผนวก ง

ตารางข้อมูลผลจากการณีการจำลองต่างๆ

เป็นข้อมูลผลจากการจำลองของกรณีที่ 1, 2 และ 3 ใช้ประกอบกับรูปกราฟที่ 4.18-4.24

ตารางที่ ง.1 ผลจากการณีการจำลองที่ 1

CELL	SLOT	θ	W_H2O	Ts	Y_H2O	Ta	W_CO2	Y_CO2
10	1	3	1.27E-01	330.4	1.56E-02	328.0	5.02E-04	5.46E-04
10	5	15	1.30E-01	321.2	9.37E-03	318.6	5.83E-04	4.83E-04
10	10	30	1.34E-01	314.4	7.23E-03	312.5	1.38E-03	9.54E-04
10	15	45	1.41E-01	312.7	7.35E-03	311.0	2.13E-03	1.44E-03
10	20	60	1.47E-01	311.7	7.57E-03	310.1	2.39E-03	1.63E-03
10	25	75	1.54E-01	311.0	7.81E-03	309.4	2.43E-03	1.68E-03
10	30	90	1.60E-01	310.3	8.04E-03	308.8	2.42E-03	1.69E-03
10	35	105	1.66E-01	309.7	8.28E-03	308.2	2.43E-03	1.69E-03
10	40	120	1.72E-01	309.0	8.52E-03	307.6	2.47E-03	1.69E-03
10	45	135	1.78E-01	308.4	8.75E-03	307.0	2.52E-03	1.69E-03
10	50	150	1.84E-01	307.7	8.98E-03	306.4	2.59E-03	1.69E-03
10	55	165	1.89E-01	307.1	9.21E-03	305.8	2.68E-03	1.70E-03
10	60	180	1.94E-01	306.5	9.43E-03	305.2	2.77E-03	1.70E-03
10	65	195	1.99E-01	305.8	9.66E-03	304.7	2.86E-03	1.70E-03
10	70	210	2.04E-01	305.2	9.86E-03	304.1	2.95E-03	1.70E-03
10	75	225	2.08E-01	304.6	1.01E-02	303.6	3.03E-03	1.71E-03
10	80	240	2.12E-01	304.0	1.02E-02	303.1	3.10E-03	1.71E-03
10	85	255	2.15E-01	303.5	1.04E-02	302.7	3.15E-03	1.71E-03
10	90	270	2.19E-01	303.0	1.06E-02	302.3	3.18E-03	1.72E-03
1	95	285	2.40E-01	306.8	2.06E-02	307.5	2.86E-03	2.93E-03
1	100	300	2.41E-01	309.0	2.24E-02	309.3	7.78E-04	8.25E-04
1	105	315	2.40E-01	309.6	2.25E-02	309.9	5.15E-04	5.56E-04
1	110	330	2.39E-01	310.1	2.23E-02	310.5	5.26E-04	5.42E-04
1	115	345	2.37E-01	310.7	2.21E-02	311.2	5.62E-04	5.47E-04
1	120	360	2.35E-01	311.4	2.19E-02	312.1	5.95E-04	5.51E-04

ตารางที่ ง.2 ผลจากกรณีการจำลองที่ 2

CELL	SLOT	θ	W_H2O	Ts	Y_H2O	Ta	W_CO2	Y_CO2
10	1	3	1.69E-01	324.19	1.84E-02	321.3	4.91E-04	6.16E-04
10	5	15	1.71E-01	323.51	1.80E-02	320.6	5.88E-04	7.27E-04
10	10	30	1.72E-01	321.74	1.63E-02	318.7	7.09E-04	8.10E-04
10	15	45	1.73E-01	319.12	1.41E-02	316.1	8.02E-04	8.25E-04
10	20	60	1.73E-01	316.44	1.22E-02	313.5	8.82E-04	8.24E-04
10	25	75	1.74E-01	314.12	1.09E-02	311.4	9.70E-04	8.38E-04
10	30	90	1.75E-01	312.32	1.00E-02	309.8	1.08E-03	8.75E-04
10	35	105	1.76E-01	311	9.51E-03	308.7	1.20E-03	9.35E-04
10	40	120	1.77E-01	310.07	9.24E-03	307.9	1.34E-03	1.01E-03
10	45	135	1.78E-01	309.42	9.12E-03	307.4	1.49E-03	1.10E-03
10	50	150	1.80E-01	308.97	9.09E-03	307	1.64E-03	1.18E-03
10	55	165	1.81E-01	308.61	9.10E-03	306.7	1.80E-03	1.27E-03
10	60	180	1.83E-01	308.31	9.13E-03	306.5	1.94E-03	1.35E-03
10	65	195	1.84E-01	308.05	9.18E-03	306.3	2.07E-03	1.41E-03
10	70	210	1.85E-01	307.84	9.23E-03	306.1	2.19E-03	1.47E-03
10	75	225	1.87E-01	307.64	9.29E-03	305.9	2.30E-03	1.52E-03
10	80	240	1.88E-01	307.43	9.34E-03	305.8	2.39E-03	1.56E-03
10	85	255	1.89E-01	307.23	9.39E-03	305.6	2.47E-03	1.59E-03
10	90	270	1.91E-01	307.03	9.43E-03	305.4	2.54E-03	1.62E-03
1	95	285	2.35E-01	299.97	1.15E-02	300.1	2.87E-03	1.72E-03
1	100	300	2.35E-01	300.62	1.24E-02	301	2.92E-03	1.87E-03
1	105	315	2.36E-01	302.46	1.47E-02	303.1	3.08E-03	2.28E-03
1	110	330	2.38E-01	304.97	1.79E-02	305.7	3.16E-03	2.79E-03
1	115	345	2.39E-01	306.86	2.03E-02	307.6	2.85E-03	2.80E-03
1	120	360	2.40E-01	307.9	2.14E-02	308.5	2.29E-03	2.33E-03

ตารางที่ ง.3 ผลจากกรณีการจำลองที่ 3

CELL	SLOT	θ	W_H2O	Ts	Y_H2O	Ta	W_CO2	Y_CO2
10	1	3	1.77E-01	322.87	1.86E-02	319.8	5.57E-04	7.62E-04
10	5	15	1.77E-01	322.21	1.81E-02	319.1	7.22E-04	9.26E-04
10	10	30	1.78E-01	321.03	1.71E-02	317.9	9.11E-04	1.08E-03
10	15	45	1.79E-01	319.55	1.58E-02	316.5	1.07E-03	1.16E-03
10	20	60	1.79E-01	317.92	1.45E-02	314.9	1.19E-03	1.20E-03
10	25	75	1.79E-01	316.3	1.33E-02	313.4	1.29E-03	1.21E-03
10	30	90	1.79E-01	314.78	1.22E-02	312	1.37E-03	1.21E-03
10	35	105	1.80E-01	313.42	1.14E-02	310.8	1.45E-03	1.21E-03
10	40	120	1.80E-01	312.25	1.08E-02	309.7	1.52E-03	1.22E-03
10	45	135	1.81E-01	311.25	1.03E-02	308.9	1.59E-03	1.23E-03
10	50	150	1.81E-01	310.44	9.95E-03	308.2	1.66E-03	1.25E-03
10	55	165	1.82E-01	309.77	9.70E-03	307.6	1.73E-03	1.27E-03
10	60	180	1.83E-01	309.24	9.54E-03	307.2	1.81E-03	1.30E-03
10	65	195	1.84E-01	308.82	9.43E-03	306.8	1.88E-03	1.33E-03
10	70	210	1.84E-01	308.48	9.37E-03	306.6	1.96E-03	1.36E-03
10	75	225	1.85E-01	308.21	9.34E-03	306.3	2.03E-03	1.39E-03
10	80	240	1.86E-01	307.98	9.33E-03	306.2	2.10E-03	1.42E-03
10	85	255	1.87E-01	307.8	9.34E-03	306	2.17E-03	1.45E-03
10	90	270	1.88E-01	307.62	9.35E-03	305.9	2.23E-03	1.48E-03
1	95	285	2.35E-01	299.9	1.14E-02	300	2.86E-03	1.71E-03
1	100	300	2.35E-01	300.03	1.16E-02	300.2	2.86E-03	1.73E-03
1	105	315	2.35E-01	300.41	1.21E-02	300.7	2.89E-03	1.81E-03
1	110	330	2.35E-01	301.2	1.31E-02	301.7	2.95E-03	1.97E-03
1	115	345	2.36E-01	302.45	1.47E-02	303.1	3.03E-03	2.23E-03
1	120	360	2.37E-01	303.97	1.66E-02	304.7	3.10E-03	2.54E-03

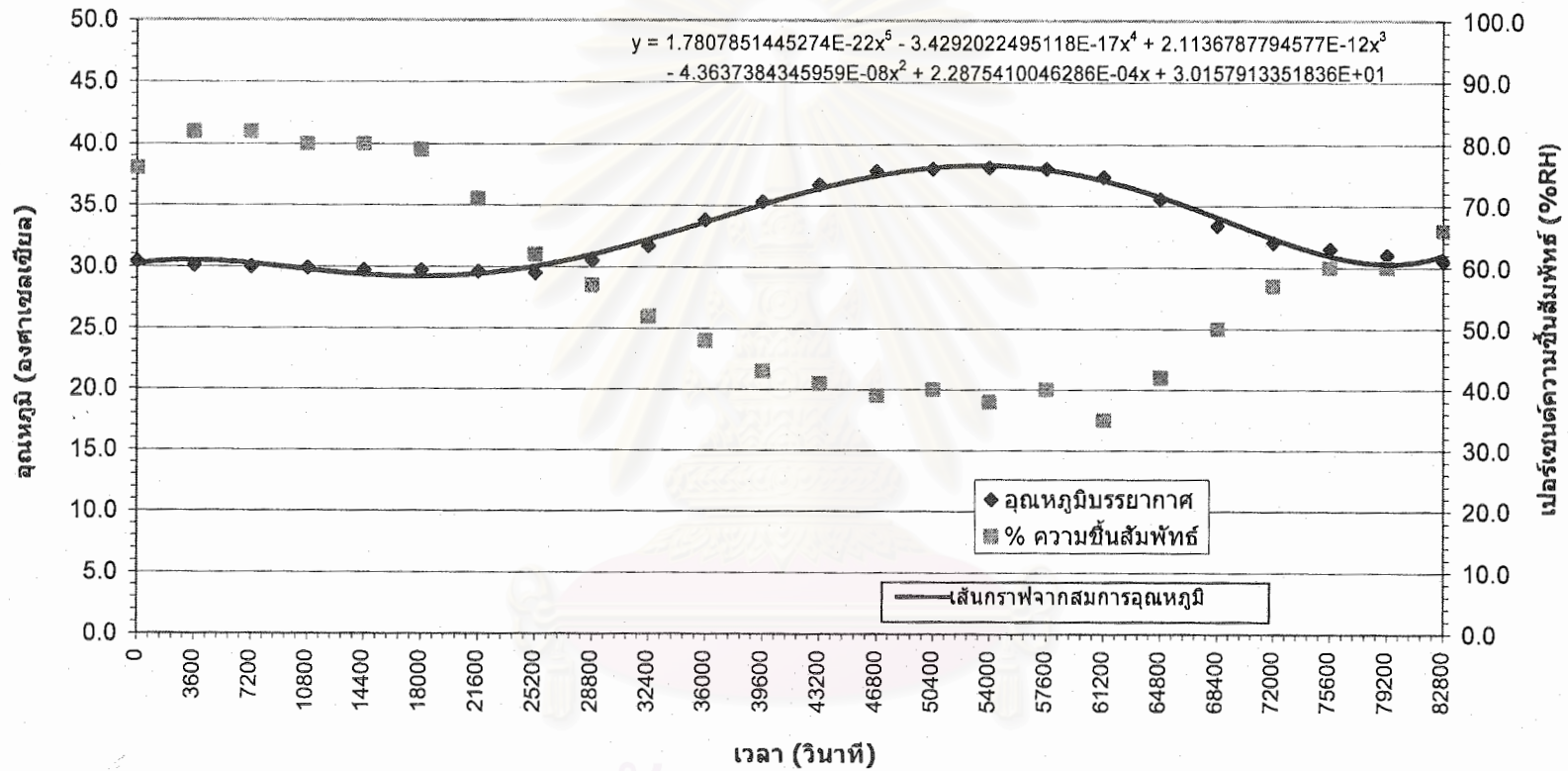
ภาคผนวก จ

ข้อมูลของอากาศในบรรยากาศ

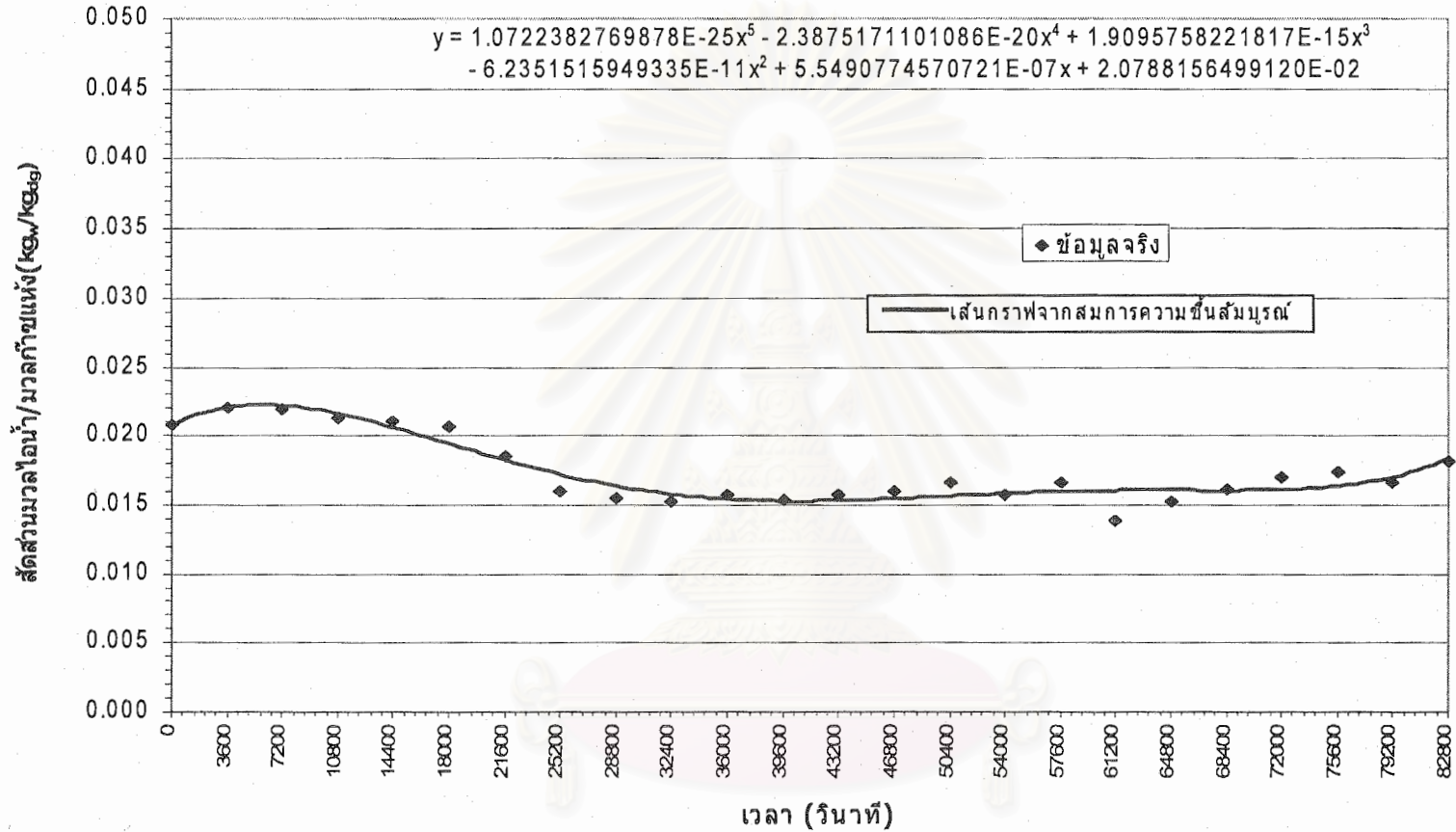
ตารางที่ จ.1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในบรรยากาศ

ข้อมูลจาก : สถานีศูนย์สิริกิติ์ กรุงเทพฯ ของ กรมอุตุนิยมวิทยา ณ วันที่ 18 เมษายน 2542

เวลา(น.)	จำนวนวินาที	อุณหภูมิ(°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความชื้นสัมบูรณ์ (kg _w /kg _a)
0.00	0	30.4	76.0	0.0208
1.00	3600	30.1	82.0	0.0221
2.00	7200	30.0	82.0	0.0219
3.00	10800	29.9	80.0	0.0213
4.00	14400	29.7	80.0	0.0210
5.00	18000	29.7	79.0	0.0207
6.00	21600	29.6	71.0	0.0185
7.00	25200	29.5	62.0	0.0160
8.00	28800	30.5	57.0	0.0155
9.00	32400	31.7	52.0	0.0152
10.00	36000	33.8	48.0	0.0158
11.00	39600	35.3	43.0	0.0154
12.00	43200	36.7	41.0	0.0158
13.00	46800	37.8	39.0	0.0160
14.00	50400	38.0	40.0	0.0166
15.00	54000	38.1	38.0	0.0158
16.00	57600	38.0	40.0	0.0166
17.00	61200	37.3	35.0	0.0139
18.00	64800	35.5	42.0	0.0152
19.00	68400	33.4	50.0	0.0161
20.00	72000	32.0	57.0	0.0170
21.00	75600	31.5	60.0	0.0174
22.00	79200	31.0	60.0	0.0166
23.00	82800	30.5	66.0	0.0181



รูปที่ จ.1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศในบรรยากาศกับเวลา



รูปที่ จ.2 ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในบรรยากาศกับเวลา

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรี ชิมเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 24 ธันวาคม พ.ศ.2517 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2539 ปัจจุบันทำงานอยู่ที่ สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย 5 พร้อมเข้ารับการศึกษาต่อในระดับปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีพ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย