

แบบจำลองของระบบลดความชื้นแบบเบตนึ่งโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

แบบจำลองของระบบลดความชื้นแบบเบตนึ่งโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODELING IN DESICCANT PACKED BED WITH SILICA GEL



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง แบบจำลองของระบบลดความชื้นแบบเบคกิ้งโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล  
โดย นายกรณัฏฐ์ ศรีจันทร์วิจิตร  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาชัยกุลกษณ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

  
.....ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาชัยกุลกษณ์)

  
.....กรรมการ  
(รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา)

  
.....กรรมการ  
(ดร. อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง แบบจำลองของระบบลดความชื้นแบบเบคนิ่ง โดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล  
โดย นายกรณัฏฐ์ ศรีจันทร์วิจิตร  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2559  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาชัยลักษณ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา

#### บทคัดย่อ

ระบบลดความชื้นแบบเบคนิ่ง โดยใช้ตัวดูดซับเป็นซิลิกาเจล เป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร และยา ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลดความชื้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม เนื่องจาก ในการทดลองนั้นจะต้องสิ้นเปลืองทั้งงบประมาณและเวลาเป็นอย่างมาก ผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาาระบบลดความชื้น โดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง คือ ซิลิกาเจล บรรจุในเบคนิ่ง ซึ่งพฤติกรรมของการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยการถ่ายโอนมวล และการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศชื้นกับซิลิกาเจล โดยศึกษาความสำคัญของการนำความร้อนในแนวแกน และให้ระบบมีกระบวนการแบบอะเดียแบติก บนสมมติฐานความดันคงที่แต่อุณหภูมิไม่คงที่ ควบคู่กับการแก้สมการด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน และมีการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้กับการทดลองในงานวิจัยอื่น ๆ และนำแบบจำลองที่ได้ไปคำนวณหาคุณสมบัติของระบบลดความชื้น เช่น ความเร็วของอากาศ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิอากาศขาเข้า พบว่าเมื่อคุณสมบัติทั้งสามมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้จุดคืนสภาพเกิดเร็วขึ้น

คำสำคัญ: ซิลิกาเจล; เบคบรรจุ; ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน; แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**Report Title** Modeling in desiccant packed bed with silica gel  
**By** Mr. Koranut Srichanvichit  
**Degree** Bachelor of Engineering  
**Program** Chemical Engineering  
**Year** 2016  
**Advisor** Ms. Siripan Murathathunyaluk  
**Co-Advisor** Dr. Amata Anantpinijwatna

### ABSTRACT

Dehumidification of moist air by a silica gel desiccant packed bed is widely used in the food and pharmaceutical industries. The system is a non-isothermal adiabatic process under constant pressure which described by heat and mass transfers between the moist air vapor phase and the silica gel bed solid phase. The experimental procedure for the improved and innovative design of this process is costly and time-consuming; therefore, mathematical modeling of this system is a suitable alternative. The explicit finite difference method is applied to numerically solved the mathematical model containing the mentioned phenomena. The experimental data conducted under diverse condition are taken from other literature for validating the model. This model will then be used to investigate the influence of design parameters such as air velocity, air humidity ratio and air temperature. It has been found that increasing these parameters will reduce breakthrough time.

**Keywords:** Silica gel; Packed bed; Explicit finite difference method; Mathematical model

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำขอขอบคุณ อาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาชัยลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาในการทำงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอด

ขอบคุณ ดร. อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา ที่ได้ให้คำปรึกษาและแสดงแนวทางในการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรม MATLAB

ขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในด้านวิชาการ คำปรึกษา และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณบุพการี และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ช่วยอบรมสั่งสอนและให้การศึกษาก่อร่างสร้างรวมทั้งรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาการทำงานมาโดยตลอด

กรณีภูฏ ศรีจันทร์วิจิตร

## สัญลักษณ์

$A_b$	พื้นที่หน้าตัดของเบด ( $m^2$ )
$a$	อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ( $m^{-1}$ )
$Bi$	เลขไบออท (dimensionless)
$c_a$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ [ $J/(kg \cdot K)$ ]
$c_s$	ความจุความร้อนจำเพาะของซิลิกาเจล [ $J/(kg \cdot K)$ ]
$c_v$	ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ [ $J/(kg \cdot K)$ ]
$d_b$	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเบด (m)
$d_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของซิลิกาเจล (m)
$H_A$	ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ (J/kg)
$h$	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
$h_m$	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ]
$k_a$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ [ $W/(m \cdot K)$ ]
$k_b$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของเบด [ $W/(m \cdot K)$ ]
$k_{ra}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน [ $W/(m \cdot K)$ ]
$k_s$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซิลิกาเจล [ $W/(m \cdot K)$ ]
$L$	ความยาวของเบด (m)
$Le$	เลขลิวอิส (dimensionless)
$m_a$	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
$m_s$	มวลของซิลิกาเจล (kg)
$NTU_m$	จำนวนหน่วยของการถ่ายโอนมวล (dimensionless)
$NTU_h$	จำนวนหน่วยของการถ่ายโอนความร้อน (dimensionless)
$P_{sat}$	ความดันอิ่มตัว (kPa)
$P_{tot}$	ความดันรวม (kPa)
$q$	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ( $kg_w/kg_s$ )
$R$	รัศมีของซิลิกาเจล (m)
$RH_s$	ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (dimensionless)
$Re$	เลขเรโนลด์ (dimensionless)

$T_a$	อุณหภูมิของอากาศ (K)
$T_s$	อุณหภูมิของเบด (K)
$t$	เวลา (s)
$v$	ความเร็วของอากาศ (m/s)
$w_a$	อัตราส่วนความชื้นในอากาศ ( $kg_w/kg_{air}$ )
$w_s$	อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่สมดุลกับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ( $kg_w/kg_{air}$ )
$z$	ความยาวตามแนวแกน (m)
$\bar{z}$	อัตราส่วนความยาวของเบด

#### กรีก

$\rho_a$	ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )
$\rho_b$	ความหนาแน่นของเบด ( $kg/m^3$ )
$\rho_p$	ความหนาแน่นของซิลิกาเจล ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลซมันน์ [ $W/(m^2 \cdot K^4)$ ]
$\varepsilon$	ความเป็นรูพรุนของเบด (dimensionless)
$\bar{\varepsilon}$	ค่าการแผ่รังสีของซิลิกาเจล (dimensionless)
$\nu$	ความหนืดของอากาศแบบคิเนมาติกส์ ( $m^2/s$ )

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สัญลักษณ์.....	IV
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 มุมมองของระบบสำหรับการสร้างแบบจำลอง.....	3
2.2 วิธีการสร้างแบบจำลอง.....	4
2.3 การুদ্ধซ้ำ.....	5
2.3.1 ประเภทของการুদ্ধซ้ำ.....	6
2.3.2 ความร้อนของการুদ্ধซ้ำ.....	7
2.3.3 ตัวুদ্ধซ้ำ.....	7
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการুদ্ধซ้ำ.....	9
2.4.1 สมการคูลมวลสารในเฟสของก๊าซ.....	9
2.4.2 สมการคูลมวลสารในเฟสของของแข็ง.....	10
2.4.3 สมการคูลพลังงานในเฟสของก๊าซ.....	10
2.4.4 สมการคูลพลังงานในเฟสของของแข็ง.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ.....	11
2.5 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน (explicit finite difference method) .....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	17
3.1 วิธีการดำเนินงาน.....	17
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	17
3.3 วิธีการคำนวณ .....	18
3.3.1 สมมติฐานในแบบจำลอง .....	18
3.3.2 เปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปเทอมไร้นหน่วย .....	18
3.3.3 การแก้สมการด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน.....	20
3.3.4 งานวิจัยที่ใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลอง.....	21
3.3.5 การประยุกต์ใช้ขั้นตอนทางคณิตศาสตร์เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล .....	24
4.1 ผลการจำลองเทียบกับงานวิจัยของ Pesaran และ Mills.....	24
4.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองแบบอะเดียแบติก และอุณหภูมิคงที่.....	25
4.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์.....	26
4.3.1 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศ .....	26
4.3.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในอากาศ .....	27
4.3.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ.....	28
4.3.4 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้น และอุณหภูมิภายในเวลาที่แตกต่างกัน .....	29
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

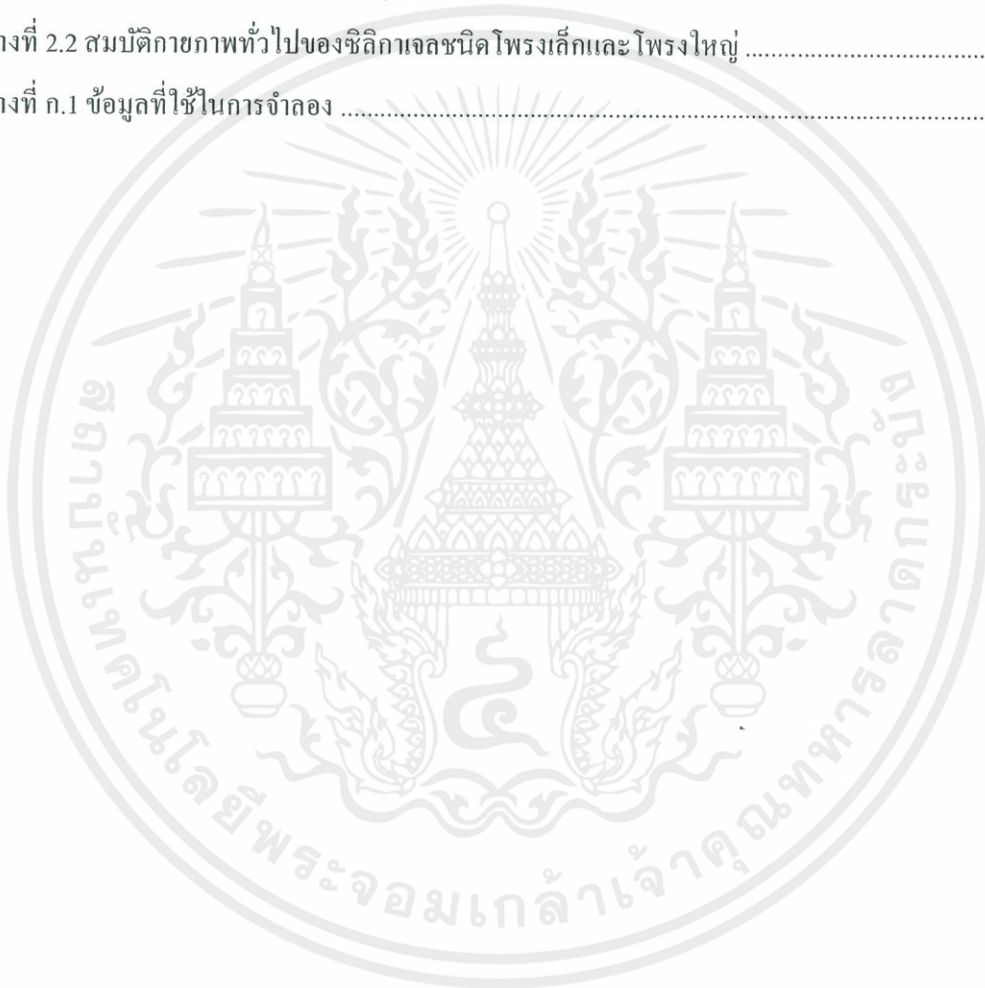
	หน้า
ภาคผนวก .....	33
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง .....	34
ภาคผนวก ข การเขียน code ในโปรแกรม MATLAB .....	35



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติกายภาพทั่วไปของตัวดูดซับพาณิชย์ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี.....	8
อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม	
ตารางที่ 2.2 สมบัติกายภาพทั่วไปของซิลิกาเจลชนิดโพรงเล็กและโพรงใหญ่ .....	9
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง .....	34



## สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบทั่วไปสำหรับแบบจำลอง .....	4
รูปที่ 2.2 วิธีการสร้าง และพัฒนาโมเดล .....	5
รูปที่ 2.3 การแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายๆส่วนเพื่อใช้กับวิธีการผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจน .....	14
รูปที่ 2.4 แผนภาพการคำนวณ โดยระเบียบวิธีแบบชัดเจน .....	15
รูปที่ 3.1 เบคคูลชันที่ถูกแบ่งเป็นหลายส่วน .....	20
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงกระบวนการแก้สมการด้วยการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	23
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองเทียบกับงานวิจัยแสดงอัตราส่วนความชื้น ในอากาศขาออกที่เวลาต่าง ๆ .....	24
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองเทียบกับงานวิจัยแสดงอุณหภูมิของอากาศขาออกที่เวลาต่าง ๆ .....	25
รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ในอากาศขาออก ของแบบจำลอง .....	26
แบบอะเดียแบติก และอุณหภูมิคงที่	
รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ของแบบจำลอง .....	26
แบบอะเดียแบติก และอุณหภูมิคงที่	
รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่มีต่ออัตราส่วนความชื้น ในอากาศขาออก .....	27
รูปที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่มีต่ออุณหภูมิของอากาศขาออก .....	27
รูปที่ 4.7 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่มีต่ออัตราส่วนความชื้น .....	28
ในอากาศขาออก	
รูปที่ 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่มีต่ออุณหภูมิของอากาศขาออก .....	28
รูปที่ 4.9 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่มีต่ออัตราส่วนความชื้น ในอากาศขาออก .....	29
รูปที่ 4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่มีต่ออุณหภูมิของอากาศขาออก .....	29
รูปที่ 4.11 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเบดที่เวลาต่าง ๆ .....	30
รูปที่ 4.12 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกายในเบดที่เวลาต่าง ๆ .....	30

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบลดความชื้นของอากาศโดยทั่วไปที่นิยมใช้งานมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบการทำความชื้นแบบกล ซึ่งเหมาะสำหรับลดความชื้นในอากาศที่มีอุณหภูมิสูงและได้อากาศแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 45% และระบบลดความชื้นโดยสารดูดความชื้น ซึ่งเหมาะสำหรับลดความชื้นในอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและได้อากาศที่มีความชื้นต่ำ

ระบบลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้องการควบคุมสภาวะอากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10-45% และอุณหภูมิระหว่าง 5-30 องศาเซลเซียส ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร (น้ำผลไม้ แป้งสำหรับทำอาหาร ลูกกวาด และคุกกี้), อุตสาหกรรมยา (แคปซูล และผงยา), อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสารดูดความชื้นที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gel), ฝลิกอะลูมินา (activated alumina), โมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve) เป็นต้น โดยประโยชน์ของสารดูดความชื้นชนิดของแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดความชื้นชนิดของเหลวคือ เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่า นอกจากนี้ประโยชน์ของระบบลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นคือ ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสารดูดความชื้นไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ โดยการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการกระบวนการคายซับความชื้นออกจากสารดูดความชื้น

กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบสารดูดความชื้นที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา มีอยู่ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการอุณหภูมิคงที่ (isothermal process) เป็นกระบวนการในอุดมคติที่เกิดขึ้นจริงยากสามารถใช้ได้กับระบบเล็ก ๆ เท่านั้น และกระบวนการอะเดียแบติก (adiabatic process) เป็นกระบวนการที่ระบบไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อม แต่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไปกับระบบที่หุ้มฉนวนความร้อน

ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงได้ทำการศึกษา ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง คือ ซิลิกาเจล บรรจุในเบดนิ่ง (packed bed) เป็นอุปกรณ์สำหรับลดความชื้นในอากาศและ

กำหนดให้ระบบมีกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์แบบกระบวนการอะเดียแบติก เพื่อสร้างแบบจำลองการคำนวณ และนำแบบจำลองที่ได้ไปคำนวณหาคุณสมบัติของระบบลดความชื้นรวมถึงประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่นๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของระบบลดความชื้นที่ใช้วิธีการบรรจุแบบเบคนิ่ง

1.2.2 เพื่อศึกษาโปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.3.2 เปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้กับการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ

1.3.3 ศึกษาตัวแปร และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษามีค่าดังนี้

- ความเร็วของอากาศ 0.2, 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที
- อัตราส่วนความชื้นในอากาศ 0.14, 0.16 และ 0.18 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
- อุณหภูมิอากาศขาเข้า 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส

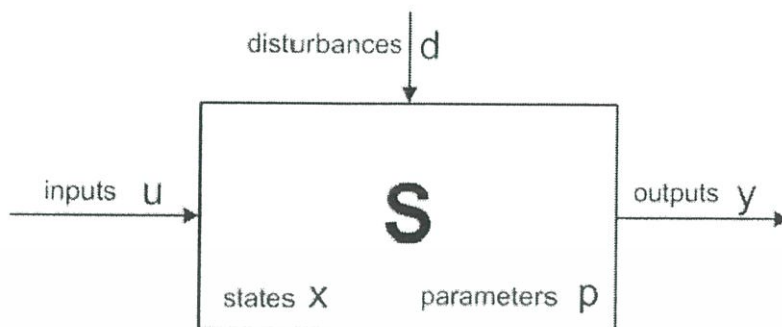
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 มุมมองของระบบสำหรับการสร้างแบบจำลอง [1]

ในการสร้างหรือพัฒนาแบบจำลอง เราต้องมีวิธีการจัดการแบบจำลองอย่างเป็นระบบ โดยสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมาก คือ การประยุกต์ใช้มุมมองของระบบให้เข้ากับการสร้างแบบจำลอง ซึ่งโครงสร้างของระบบทั่วไปที่ใช้ในการสร้างแนวคิดของแบบจำลองแสดงดัง รูปที่ 2.1 ซึ่งผู้สร้างแบบจำลองสามารถใช้รูปดังกล่าวเป็นต้นแบบเพื่ออธิบายระบบของตนเองได้ไม่ว่าจะเป็น แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความซับซ้อน หรือการคิดสารเคมีผสมใส่พื้นผิวใบไม้เพื่อการเกษตร โดยที่ความท้าทายสำหรับนักออกแบบ คือต้องมีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งต่อระบบที่กำลังศึกษาอยู่ โดยในระบบทั่วไป (S) ที่ใช้เป็นต้นแบบการอธิบายจะมีขอบเขตเป็นกล่อง ซึ่งสามารถนิยามส่วนประกอบต่างๆของระบบได้เป็นดังนี้

- ขอบเขต (boundary) เป็นข้อจำกัดของการพิจารณาแบบจำลอง โดยการสร้างแบบจำลองจะต้องมีการกำหนดขอบเขตไว้อย่างชัดเจน ซึ่งการกำหนดขอบเขตที่ต่างกัน ไปจะทำให้เป้าหมายที่ต้องการเปลี่ยนตามด้วย
- ระบบ (system, S) เป็นส่วนหลักในขอบเขต และเป็นกลไกหลักที่นักออกแบบต้องทำความเข้าใจซึ่งอาจเป็นไปได้หลายความหมาย เช่น ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ คน อนุภาค เป็นต้น
- สถานะ (states, x) เป็นตัวที่บอกสถานะของระบบ ณ เวลา และตำแหน่งใดๆ มีหน้าที่ระบุคุณสมบัติที่สำคัญของระบบ และมักจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่แสดงถึงจำนวนของมวล พลังงานหรือโมเมนตัมในระบบ
- การนำเข้า (input, u) เป็นตัวที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของระบบ เช่น อัตราการไหล อุณหภูมิ เป็นต้น
- ผลลัพธ์ (output, y) เป็นตัว ที่สะท้อนถึงคุณสมบัติภายในของระบบ เช่น อัตราการผลิต เป็นต้น
- สิ่งรบกวน (disturbances, d) เป็นตัวที่ไม่สามารถควบคุมได้ตามปกติ เช่น คุณภาพของวัตถุดิบ เป็นต้น
- พารามิเตอร์ (parameters, p) เป็นตัว ที่กำหนดให้เป็นค่าคงที่ในระบบที่เราสนใจ

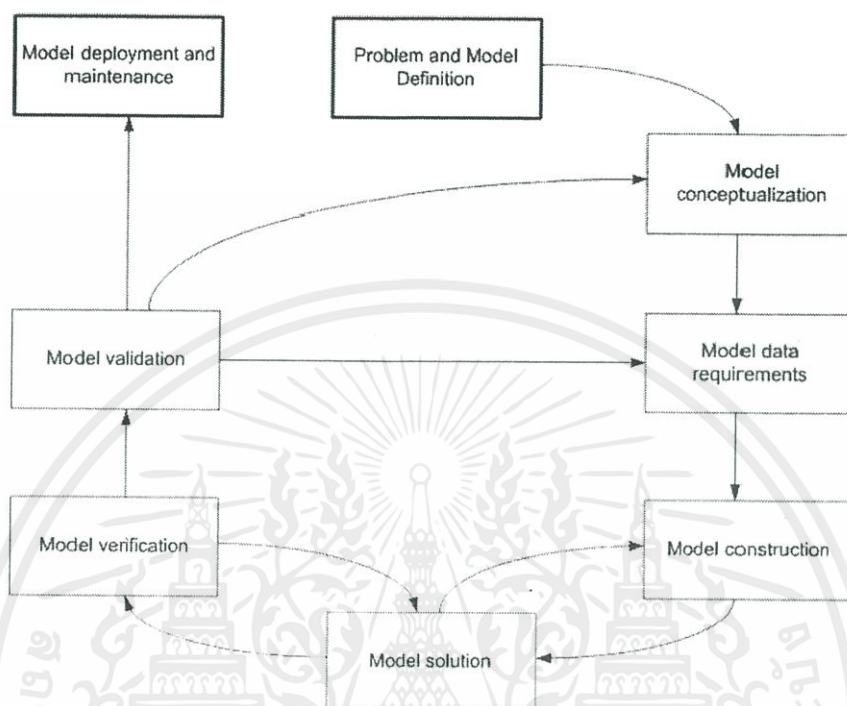


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบทั่วไปสำหรับแบบจำลอง [1]

## 2.2 วิธีการสร้างแบบจำลอง [1]

ในการสร้างแบบจำลองนั้นมีความเกี่ยวข้องกับทั้งความหลากหลายของงาน ความรู้ และทักษะที่ต้องใช้ในงานนั้น ๆ โดยเหตุผลหลักของการสร้างแบบจำลอง คือเพื่อทดแทนการทดลองที่เสียเวลามากและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ซึ่งวิธีการสร้างแบบจำลองของ Cameron และ Newell (2008) เป็นวิธีต้นแบบที่ใช้กันในปัจจุบันซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรชีวิตแบ่งออกเป็น 8 หัวข้อหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.2

- ปัญหาและนิยามของแบบจำลอง (problem and model definition) สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ ต้องระบุเป้าหมายของการสร้างแบบจำลอง ซึ่งในปัจจุบัน เมื่อระบุเป้าหมายได้ให้ทำการคิดปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับระบบของแบบจำลองนั้น ๆ
- แนวความคิดของแบบจำลอง (model conceptualization) ต้องทำความเข้าใจกับระบบที่เราจะทำ ในเรื่องของการกำหนดขอบเขต และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบนั้น
- ข้อมูลที่จำเป็นต่อแบบจำลอง (model data requirements) เป็นขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลที่จำเป็น อาจจะเป็น คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลของเฟส 2 เฟส อัตราการเกิดปฏิกิริยา ปัญหาและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ เป็นต้น
- การสร้างแบบจำลอง (model construction) เป็นขั้นตอนเลือกโปรแกรมที่ช่วยในการจำลอง เช่น โปรแกรม MATLAB หรือ microsoft excel เป็นต้น
- วิธีการแก้ปัญหของแบบจำลอง (model solution) เป็นขั้นตอนที่ต้องหาวิธีแก้ปัญหาคงของสมการซึ่งอาจเป็น สมการพีชคณิต หรือสมการเชิงอนุพันธ์ เป็นต้น
- การยืนยันแบบจำลอง (model verification) เป็นขั้นตอนที่นำผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองแล้วมาเปรียบเทียบกับแนวความคิดที่คิดไว้แต่ต้นว่ามันตรงตามคุณสมบัติของระบบที่เรากำหนดไว้หรือไม่
- การตรวจสอบแบบจำลอง (model validation) เป็นขั้นตอนที่นำผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองแล้วมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองนั้นสามารถนำไปใช้ได้จริงหรือไม่



รูปที่ 2.2 วิธีการสร้าง และพัฒนาโมเดล [1]

- การใช้งาน และการบำรุงรักษาแบบจำลอง (model deployment and maintenance) เป็นขั้นตอนที่นำแบบจำลองไปใช้จริง และต้องมีการตรวจสอบขั้นตอนการทำแบบจำลอง และจัดบันทึกไว้เป็นเอกสารอย่างละเอียดเพื่อป้องกันปัญหาเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงระบบจริง

### 2.3 การดูดซับ (Adsorption) [2]

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งเป็นอย่างน้อย ณ บริเวณผิวร่วม (interface) ระหว่างวัฏภาค (phase) เช่น ผิวร่วมระหว่างก๊าซกับของเหลว ผิวร่วมระหว่างของเหลวกับของเหลว ผิวร่วมระหว่างก๊าซกับของแข็ง เป็นต้น ซึ่งความหมายของการดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย หมายถึง “ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็งโดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของแข็งนั้น” ของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่น ๆ ไว้บนผิว เรียกว่า “ตัวดูดซับ (adsorbent)” ส่วนสารประกอบต่าง ๆ ที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า “สารถูกดูดซับ (adsorbate)”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากขึ้นจะมีผลให้สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งที่มีโพรงจำนวนมาก แม้ว่าการเพิ่มปริมาณโพรงขนาดเล็กลงในตัวดูดซับมีผลให้ตัวดูดซับมีพื้นผิวจำเพาะมากขึ้น แต่โพรงขนาดเล็กลงเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของสารที่ถูกดูดซับภายในโพรงของตัวดูดซับไปยังพื้นผิวในโพรงขนาดเล็กลงดังกล่าว เมื่อพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของโพรงในตัวดูดซับ โพรงส่วนใหญ่ของตัวดูดซับจึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับในสถานะก๊าซ เพื่อให้สารที่ถูกดูดซับนั้นสามารถแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับและสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวในโพรงเหล่านั้นได้อย่างสะดวก

### 2.3.1 ประเภทของการดูดซับ [2], [3]

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ดังนี้

- (1) การดูดซับแบบกายภาพ (physisorption) คือ การดูดซับสารที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่
- แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารที่ถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจล ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น เป็นต้น
  - แรงดึงดูดมวลระหว่างประจุของสารที่ถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น
  - แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิบรรยากาศ และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ สามารถเกิดการดูดซับได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง หรือเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว จึงจะเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)”

(2) การดูดซับแบบเคมี (chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ช้าหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูง ๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น จึงจะเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption)”

### 2.3.2 ความร้อนของการดูดซับ [3]

เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์การดูดซับตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ การดูดซับเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้และสามารถเกิดขึ้นได้เอง ดังนั้น ระบบดูดซับที่สมดุลแล้วจะมีพลังงานกิบส์ของการดูดซับ (Gibbs energy,  $G_{ads}$ ) น้อยที่สุด กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานกิบส์ของการดูดซับจะน้อยกว่าศูนย์ ( $\Delta G_{ads} < 0$ ) และเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลการเปลี่ยนแปลงของพลังงานกิบส์ของการดูดซับจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\Delta G_{ads} = 0$ )

สารถูกดูดซับเมื่อถูกดูดซับไปบนผิวของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับจะมีอิสระการเคลื่อนที่ได้ลดลง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีของการสุทธิต่อการดูดซับจะลดลง ( $T\Delta S_{ads} < 0$ )

การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบดูดซับดังกล่าว ภายหลังการดูดซับจะลดลง ( $\Delta H_{ads} < 0$ ) ซึ่งอธิบายได้ตามสมการ (2.1) ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน

$$\Delta H_{ads} = \Delta G_{ads} + T\Delta S_{ads} \quad (2.1)$$

### 2.3.3 ตัวดูดซับ [4]

ตัวดูดซับต้องมีพื้นผิวจำเพาะมาก ๆ เพื่อให้สามารถดูดซับสารถูกดูดซับได้ปริมาณมาก ๆ ดังนั้น ตัวดูดซับจึงมีลักษณะพรุนหรือมีโพรงภายในเพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะให้มากขึ้น โดยมีขนาดเท่าเดิม เมื่อตัวดูดซับมีโพรงภายในมากขึ้น แต่ตัวดูดซับมีขนาดเท่าเดิม ตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นลดลง สมบัติกายภาพของตัวดูดซับพหุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างแพร่หลาย แสดงในตารางที่ 2.1 และสมบัติกายภาพทั่วไปของซิลิกาเจลชนิดโพรงเล็กและโพรงใหญ่ แสดงในตารางที่ 2.2

ความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับแบ่งออกเป็นสามประเภท นิยามไว้ดังนี้

(1) ความหนาแน่นของวัสดุตัวดูดซับ (solid density,  $\rho_s$ ) คือ สมบัติเฉพาะของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเม็ดตัวดูดซับ และวัสดุเหล่านั้นมักไม่มีโพรง

(2) ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับ (adsorbent density,  $\rho_p$ ) คือ ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับซึ่งเป็นวัสดุของแข็งที่มีโพรงอยู่ภายในวัสดุนั้น เพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้สูงมากขึ้นจากพื้นผิวจำเพาะเดิม

(3) ความหนาแน่นของชั้นเม็ดตัวดูดซับ (bulk density,  $\rho_b$ ) คือ ความหนาแน่นของชั้นเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับ จึงเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดตัวดูดซับ (void fraction,  $\varepsilon$ ) ที่บรรจุไว้ในชั้นตัวดูดซับนั้น ทำให้ค่าความหนาแน่นประเภทนี้น้อยสุดเมื่อเทียบกับความหนาแน่นประเภทอื่น ๆ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับและช่องว่างระหว่างเม็ดตัวดูดซับแสดงดังนี้

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.1 สมบัติกายภาพทั่วไปของตัวดูดซับพาณิชย์ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม [4]

ตัวดูดซับ	ซิลิกาเจล (silica gel)	ผลึกอะลูมินา (activated alumina)	โมเลกุลลาร์ซีฟ (molecular sieve)	ถ่านดูดซับ (activated carbons)
ขนาดเม็ด (มม.)	1-5	2-10	1-5	3-10
ความหนาแน่น*				
วัสดุตัวดูดซับ ( $\rho_s$ )	2,200	3,000	2,600	2,000-2,200
เม็ดตัวดูดซับ ( $\rho_p$ )	1,100	1,200	1,100-1,500	600-800
ชั้นเม็ดตัวดูดซับ ( $\rho_b$ )	400-800	700-850	600-900	300-500

\* หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.2 สมบัติกายภาพทั่วไปของซิลิกาเจลชนิดโพรงเล็กและโพรงใหญ่ [4]

ซิลิกาเจล	ชนิดโพรงเล็ก	ชนิดโพรงใหญ่
ความหนาแน่นชั้นเม็ดตัวดูดซับ* ( $\rho_p$ )	700-800	400-800
ปริมาตรโพรงจำเพาะ** ( $V_p$ )	< 0.10	0.10-0.25
พื้นที่ผิวจำเพาะ*** ( $S_p$ )	600-850	250-350

\* หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

\*\* หน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ

\*\*\* หน่วยตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ

## 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับ

เนื่องจากการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการคายความร้อน ดังนั้นสมมติฐานของการดูดซับภายใต้อุณหภูมิคงที่จึงไม่เกิดขึ้นในระบบดูดซับจริง สำหรับระบบดูดซับสารเดี่ยวที่อุณหภูมิไม่คงที่มีสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับในระบบดูดซับแบบเบตนิ่งดังต่อไปนี้

### 2.4.1 สมการดุลมวลสารในเฟสของก๊าซ [5]

เป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นในอากาศ กับตำแหน่งภายในเบต ณ เวลาต่าง ๆ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยประกอบไปด้วยเทอมอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลา เทอมการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเทียบกับความสูงของเบต และเทอมการถ่ายโอนมวลเข้าสู่อนุภาคตัวดูดซับ

$$\frac{\partial w_a}{\partial t} = - \frac{m_a}{\rho_a \epsilon \cdot 4b} \frac{\partial w_a}{\partial z} - \frac{h_m a}{\rho_a \epsilon} (w_a - w_s) \quad (2.3)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) และเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) คือ

ที่  $t = 0$  และทุกค่า  $z$ ,  $w_a = w_s$

ที่  $t > 0$  และ  $z = 0$ ,  $w_a = w_{a,in}$

เมื่อ  $m_a$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

$\rho_a$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m<sup>3</sup>)

$w_a$  คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{air}}$ )

$w_s$  คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่สมดุลกับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{air}}$ )

$h_m$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$a$  คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ( $\text{m}^{-1}$ )

$A_b$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด ( $\text{m}^2$ )

$t$  คือ เวลา (s)

$z$  คือ ความยาวตามแนวแกน (m)

$\varepsilon$  คือ ความเป็นรูพรุนของเบด

#### 2.4.2 สมการดุลมวลสารในเฟสของของแข็ง

เป็นสมการที่อธิบายอัตราการถ่ายโอนมวลเข้าสู่ตัวดูดซับ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลเท่ากับอัตราการถ่ายโอนมวลของน้ำในอากาศต่อน้ำหนักของซิลิกาเจล

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{m_a}{m_s} (w_{a,in} - w_{a,out}) \quad (2.4)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) คือ

ที่  $t=0$  และทุกค่า  $z$ ,  $q = q_0$

เมื่อ  $q$  คือ อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ( $\text{kg}_w/\text{kg}_s$ )

$m_s$  คือ มวลของซิลิกาเจล (kg)

#### 2.4.3 สมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซ [5]

เป็นสมการที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเมื่อเกิดการดูดซับที่ตำแหน่งภายในเบด ณ เวลาต่าง ๆ โดยประกอบไปด้วยเทอมอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเทียบกับเวลา เทอมการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเทียบกับความยาวของเบด และเทอมการถ่ายโอนความร้อนสู่อนุภาคตัวดูดซับ

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -\frac{m}{\rho_a \varepsilon A_b} \frac{\partial T_a}{\partial z} + \left( -\frac{ha}{\rho_a c_a \varepsilon} + \frac{c_v h_m a}{\rho_a c_a \varepsilon} (w_a - w_s) \right) (T_a - T_s) \quad (2.5)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) และเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) คือ

ที่  $t=0$  และทุกค่า  $z$ ,  $T_a = T_s$

ที่  $t > 0$  และ  $z=0$ ,  $T_a = T_{a,in}$

เมื่อ  $T_a$  คือ อุณหภูมิของอากาศ (K)

$c_a$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ [J/(kg·K)]

$c_v$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ [J/(kg·K)]

$T_s$  คือ อุณหภูมิของเบด (K)

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน [W/(m<sup>2</sup> K)]

#### 2.4.4 สมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็ง [5]

เป็นสมการที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบดที่ตำแหน่ง ณ เวลาต่าง ๆ โดยคิดถึงความสำคัญของการนำความร้อนในแนวแกนเป็นหลัก โดยประกอบไปด้วย เทอมฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อนของซีกิลาเจลจากชั้นหนึ่งไปสู่อีกชั้นหนึ่ง เทอมอัตราการคายความร้อนเนื่องจากการดูดซับ เทอมการพาความร้อนระหว่างอากาศกับเบด และเทอมสะสมความร้อนในเบด

$$k_b \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + H_A h_m a (w_a - w_s) + ha (T_a - T_s) = \rho_b c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (2.6)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) คือ

ที่  $t=0$  และทุกค่า  $z$ ,  $T_s = T_{s,0}$

เมื่อ  $k_b$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของเบด [W/(m·K)]

$H_A$  คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ (J/kg)

$\rho_b$  คือ ความหนาแน่นของเบด (kg/m<sup>3</sup>)

$c_s$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของซีกิลาเจล [J/(kg·K)]

#### 2.4.5 ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ

ตัวแปรต่างๆที่ต้องใช้ในการจำลองกระบวนการดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมบัติของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับภายใต้สภาวะที่ทำการจำลอง โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของสมการเอมพิริคัลที่ได้มาจากการทดลองของงานวิจัยอื่น ซึ่งมีดังนี้

(1) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของเบด ( $k_b$ ) [6]

คำนวณจากสมการของ บอเออร์-ชลันเดอร์ (Bauer-Schlunder)

$$k_b = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon}) \left[ \frac{\varepsilon k_a}{\varepsilon - 1} + \varepsilon k_{ra} \right] + k_s \sqrt{1 - \varepsilon} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $k_a$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ [ W/(m·K) ] [7]

$k_{ra}$  คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน [ W/(m·K) ]

$k_s$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซิลิกาเจล [ W/(m·K) ]

(2) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ( $k_{ra}$ ) [6]

เป็นสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบดูดซับคำนวณได้ดังนี้

$$k_{ra} = \frac{4\sigma \bar{\varepsilon} d_p T_s^3}{2 - \bar{\varepsilon}} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลซมันน์ [ W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>) ]

$\bar{\varepsilon}$  คือ ค่าการแผ่รังสีของซิลิกาเจล

$d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของซิลิกาเจล (m)

(3) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซิลิกาเจล ( $k_s$ ) [6]

เป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซิลิกาเจลในระบบดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลกับอุณหภูมิของเบด คำนวณได้ดังนี้

$$k_s = 0.37 + 0.97q + 0.0014T_b \quad (2.9)$$

(4) ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศกับซิลิกาเจล ( $c_a, c_s$ ) [7]

คำนวณจากสมการของพีซาร์น และมิลล์ (Pesaran and Mills)

$$c_a = 1,884w_a + 1,004(1 - w_a) \quad (2.10)$$

$$c_s = 4,186q + 921 \quad (2.11)$$

(5) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ ( $H_A$ ) [7]

เป็นค่าความร้อนที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล คำนวณได้ดังนี้

$$H_A = \begin{cases} 1,000(3,500 - 12,400q) & q \leq 0.05 \\ 1,000(2,950 - 1,400q) & q > 0.05 \end{cases} \quad (2.12)$$

(6) อัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล ( $w_s$ ) [7]

ในกระบวนการดูดซับที่มีการถ่ายโอนมวลจะมีจุดสมดุลระหว่าง อากาศกับซิลิกาเจล โดยอัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล คำนวณจากการประยุกต์ของสมการก๊าซสมบูรณ์ และกฎของดัลตัน

$$w_s = \frac{0.622RH_s \times P_{sat}}{P_{tot} - 0.378RH_s \times P_{sat}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $RH_s$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล

$P_{sat}$  คือ ความดันอิ่มตัว (kPa)

$P_{tot}$  คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)

(7) ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล ( $RH_s$ ) [9]

เป็น ไอโซเทอมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์กับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล คำนวณจากการทดลองของพีซาร์น และมิลล์ (Pesaran and Mills)

$$RH_s = 0.0078 - 0.05759q + 24.16554q^2 - 124.478q^3 + 2,004.226q^4 \quad (2.14)$$

(8) ความดันอิ่มตัว ( $P_{sat}$ ) [10]

เป็นความดันอิ่มตัวของน้ำในอากาศ คำนวณจากสมการองตัน (Antoine equation)

$$\ln P_{sat} = 16.3872 - \frac{3,885.70}{T_a - 42.980} \quad (2.15)$$

(9) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และความร้อน ( $h_m, h$ ) [8]

คำนวณจากสมการเอมพิริคัลของพีซาร์น และมิลล์

$$h_m = 1.70 \rho_a v Re^{-0.42} \quad (2.16)$$

$$h = 1.60 \rho_a v c_a Re^{-0.42} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

$Re$  คือ เลขเรโนลด์

(10) เลขเรโนลด์ ( $Re$ ) [8]

คำนวณจากสมการหาค่าเลขเรโนลด์สำหรับการไหลของของไหลผ่านคอลัมน์แบบเบดนิ่ง

$$Re = \frac{2Rv}{\nu} \quad (2.18)$$

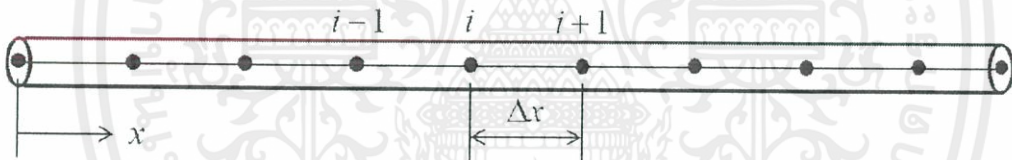
เมื่อ  $R$  คือ รัศมีของซิลินดาร์ (m)  
 $\nu$  คือ ความหนืดของอากาศแบบคินแมติกส์ ( $m^2/s$ )

**2.5 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจน (explicit finite difference method) [11]**

ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจนเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบหนึ่งที่ใช้ในการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยตัวอย่างวิธีการใช้งานสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟที่แสดงการถ่ายเทความร้อนในแท่งโลหะภายใต้สถานะไม่คงที่ (non-steady state) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบพาราโบลา ดังสมการ

$$\frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.19}$$

ในขั้นตอนแรกจะต้องแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายๆส่วน โดยในแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ  $\Delta x$  และส่วนต่างๆเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันที่จุดต่อต่างๆซึ่งใช้สัญลักษณ์  $i-1, i, i+1$



รูปที่ 2.3 การแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายๆส่วนเพื่อใช้กับวิธีการผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจน [11]

ที่จุดต่อต่างๆจะเป็นตำแหน่งที่ใช้สำหรับการคำนวณอุณหภูมิ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดย ใช้การประมาณผลของผลต่างแบบไปข้างหน้า (forward difference) เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่แปรผันกับเวลาดังสมการ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \tag{2.20}$$

สำหรับพจน์อนุพันธ์อันดับสองที่แปรผันกับระยะทาง จะประยุกต์โดยใช้การประมาณผลของผลต่างแบบตรงกลาง (central difference) ดังสมการ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \tag{2.21}$$

และเมื่อนำสมการ (2.20) และ (2.21) มาแทนกลับลงในสมการเชิงอนุพันธ์ (2.19) จะได้ว่า

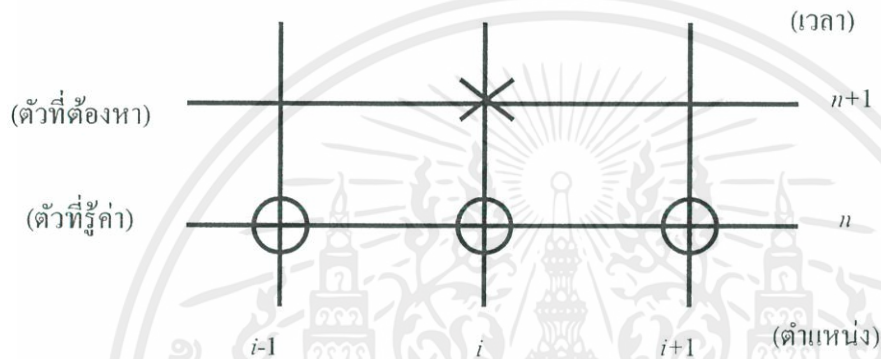
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{k}{\rho c} \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (2.22)$$

จากนั้นทำการจัดรูปสมการ (2.22) จะได้

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \alpha(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) \quad (2.23)$$

โดย 
$$\alpha = \frac{k\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.4 แผนภาพการคำนวณโดยระเบียบวิธีแบบชัดเจน [11]

วิธีการคำนวณ โดยระเบียบวิธีแบบชัดเจนมีข้อจำกัด คือ ถ้าหากเรากำหนด  $\Delta x$  ค่าใดค่าหนึ่งแล้ว จะก่อให้เกิดเงื่อนไขของการใช้  $\Delta t$  สูงสุดได้เพียงค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าค่าช่วงเวลาวิกฤติ หากใช้สูงกว่าค่าดังกล่าวในการคำนวณ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการลู่ออกจากผลลัพธ์ที่ควรจะเป็น จากสมการ (2.19) ค่า  $\Delta t$  ควรจะมีค่าดังนี้

$$\Delta t \leq \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2k} \quad (2.25)$$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ahmed Ramzy และคณะ (2014) [12] ศึกษาแบบจำลองของระบบลดความชื้นแบบเบตนิ่งโดยใช้อนุภาคดินเหนียวที่ถูกเคลือบด้วย  $\text{CaCl}_2$  ซึ่งมีการเปรียบเทียบแบบจำลองกับการทดลองของงานวิจัยอื่น โดยแบบจำลองมี 3 ชนิด คือ ระบบที่มีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal system) ระบบที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนของการดูดซับ (Adiabatic system) และระบบที่คิดถึงผลของการถ่ายโอนมวลภายในอนุภาค (Adiabatic diffusion system) พบว่า ในระบบลดความชื้นแบบเบตนิ่งแบบจำลอง

ของระบบที่มีอุณหภูมิคงที่มีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมากสำหรับแบบจำลองที่เหลื้อสามารถยอมรับได้และใช้จริงได้

Hui T. Chua และคณะ (2002) [13] ศึกษาคุณลักษณะการดูดซับของระบบ ซิลิกาเจลกับน้ำ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 298 ถึง 338 เคลวิน และความดันตั้งแต่ 500 ถึง 7,000 พาสกาล เพื่อวัดปริมาณของน้ำที่ ซิลิกาเจลดูดซับที่จุดสมดุล ณ อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ และนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่า แบบจำลองสมดุลการดูดซับของทอมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับอื่น ๆ

Joselma และ คณะ (2010) [14] ศึกษาผลของความเร็วที่เปลี่ยนไปของอากาศโดยใช้ซิลิกาเจล ขนาด 4 มิลลิเมตรมาใส่ในเบดนิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร สูง 600 มิลลิเมตร ซึ่งทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ 77% แล้วทำการเปลี่ยนความเร็วของอากาศ 3 ค่า คือ 0.78, 1.20 และ 1.80 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เพื่อวัดปริมาณของน้ำที่ ซิลิกาเจลดูดซับ ณ เวลาต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง พบว่า เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นซิลิกาเจลจะสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการสร้างแบบจำลองของ Cameron และ Newell (2008) [1] เป็นวิธีต้นแบบที่ใช้กันในปัจจุบันซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในครั้งนี้

- (1) ทำความเข้าใจกับระบบที่สนใจ และตั้งสมมติฐานเพื่อลดความยุ่งยากต่อการคำนวณ
- (2) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการทำการคลุมมวลสาร และพลังงาน แล้วทำการเปลี่ยนสมการคลุมมวลสาร และพลังงานที่ได้ ให้อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วยเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ
- (3) สืบค้น และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง เช่น สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของซิลิกาเจล หรืออากาศ
- (4) สืบค้นงานวิจัยที่มีการทดลองเกี่ยวกับระบบที่สนใจ เพื่อนำข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลอง มาใช้ในการแก้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้ในการเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองที่ได้
- (5) ทำการเลือกโปรแกรมที่จะใช้แก้สมการ คือ โปรแกรม MATLAB และ ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจนเพื่อจัดรูปสมการเทอมไร้หน่วยที่ได้ ให้สามารถแก้ในโปรแกรมที่เลือกได้
- (6) แก้สมการเทอมไร้หน่วยที่ผ่านการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจนแล้ว ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนทางคณิตศาสตร์เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- (7) เปรียบเทียบผลจากการทดลองที่อ้างอิงกับผลจากการแก้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- (8) วิเคราะห์ และสรุปผล

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) คอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-3770 CPU @3.40GHz, RAM 8.0 GB, Window 7 (64-bit)
- (2) โปรแกรม MATLAB

### 3.3 วิธีการคำนวณ

#### 3.3.1 สมมติฐานในแบบจำลอง

จากระบบลดความชื้นแบบเบคหนึ่งโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณ คือ สมการถ่ายโอนมวล และสมการถ่ายโอนพลังงาน และเพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จึงทำการตั้งสมมติฐาน ดังนี้

- (1) อนุภาคของตัวดูดซับความชื้นชนิดซิลิกาเจลมีลักษณะทรงกลมและมีขนาดเท่ากันทุกเม็ด
- (2) ซิลิกาเจลสามารถดูดซับไอน้ำในอากาศเท่านั้น
- (3) ความเข้มข้นของน้ำในตัวดูดซับมีค่าเท่ากันตลอดแนวแกน  $r$  และ  $\theta$  แต่เปลี่ยนไปตามแนวแกน  $z$
- (4) ความดันลดยุคมีค่าน้อยจึงไม่ต้องคิดผลของความดันลด
- (5) คิดผลการถ่ายเทความร้อนผ่านแนวแกน  $z$  เท่านั้น และให้เป็นระบบแบบพุ่มฉนวน
- (6) การถ่ายโอนมวลของของไหลผ่านเข้าไปในตัวดูดซับที่มีรูพรุนเป็นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม
- (7) ความหนาแน่นของอากาศมีค่าคงที่ตลอดการทำแบบจำลอง

#### 3.3.2 เปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบดูดซับแบบเบคหนึ่งที่อุณหภูมิไม่คงที่จำเป็นต้องอาศัยการคำนวณจากสมการหลัก 4 สมการ คือ สมการดุลมวลสารในเฟสของก๊าซดังสมการ (2.3) สมการดุลมวลสารในเฟสของของแข็งดังสมการ (2.4) สมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซดังสมการ (2.5) และ สมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็งดังสมการ (2.6) ซึ่งผู้จัดทำ จะทำให้สมการ (2.3), (2.5) และ (2.6) อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วยเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ดังนั้น จึงต้องมีเทอมเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อช่วยเปลี่ยนรูป [14] ดังนี้

$$NTU_m = \frac{h_m a A_b L}{m} \quad (3.1)$$

$$NTU_h = \frac{ha_b L}{mc_a} \quad (3.2)$$

$$Bi = \frac{haL}{k_b / L} \quad (3.3)$$

$$\bar{z} = \frac{z}{L} \quad (3.4)$$

$$\gamma = \frac{c_v}{c_a} \quad (3.5)$$

$$\beta = \left( 1 + \gamma \frac{NTU_m (w_a - w_s)}{NTU_h} \right) \quad (3.6)$$

$$Le = \left( \frac{c_a h_m}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.7)$$

- เมื่อ  $NTU_m$  คือ จำนวนหน่วยของการถ่ายโอนมวล  
 $NTU_h$  คือ จำนวนหน่วยของการถ่ายโอนความร้อน  
 $Bi$  คือ เลขไบออต  
 $L$  คือ ความยาวของเบด (m)  
 $\bar{z}$  คือ อัตราส่วนความยาวของเบด  
 $Le$  คือ เลขลิวอิส

จากสมการควบคุมมวลสารในเฟสของก๊าซดังสมการ (2.3) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสามารถตัดเทอมที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาได้ เนื่องจากคิดให้เทอมของการสะสมความชื้นในอากาศไม่ส่งผลต่อระบบ และทำการแทนสมการ (3.1) และ (3.4) ลงในสมการ (2.3) แล้วทำการจัดรูป จะได้สมการควบคุมมวลสารในเฟสของก๊าซที่อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย ดังนี้

$$\frac{\partial w_a}{\partial \bar{z}} = NTU_m (w_s - w_a) \quad (3.8)$$

จากสมการควบคุมพลังงานในเฟสของก๊าซดังสมการ (2.5) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสามารถตัดเทอมอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเทียบกับเวลาได้ เนื่องจากคิดให้เทอมของการสะสม

ความร้อนในอากาศไม่ส่งผลต่อระบบ และทำการแทนสมการ (3.1), (3.2), (3.4), (3.5) และ (3.6) ลงในสมการ (2.5) แล้วทำการจัดรูป จะได้สมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซที่อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย ดังนี้

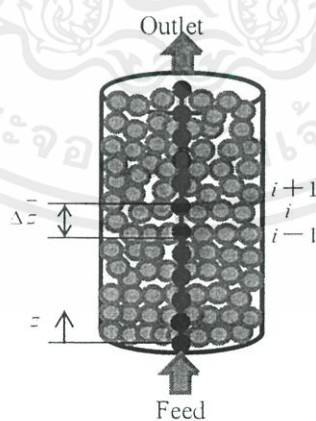
$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = \beta NTU_h (T_s - T_a) \quad (3.9)$$

จากสมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็งดังสมการ (2.6) เมื่อทำการแทนสมการ (3.3) และ (3.7) แล้วทำการจัดรูป จะได้สมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็งที่อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย ดังนี้

$$\frac{\rho_b c_s L^2}{k_b} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + Bi \left( \frac{H \cdot L}{c_a} Le^3 (w_a - w_s) + (T_a - T_s) \right) \quad (3.10)$$

### 3.3.3 การแก้สมการด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน

สมการหลักที่ต้องใช้ในการแก้ปัญหาตอนนี้ คือ สมการดุลมวลสารในเฟสของก๊าซดังสมการ (3.8) สมการดุลมวลสารในเฟสของของแข็งดังสมการ (2.4) สมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซดังสมการ (3.9) และ สมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็งดังสมการ (3.10) ซึ่งใน 4 สมการมีบางสมการที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ซึ่งไม่สามารถแก้ในโปรแกรม MATLAB ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน เพื่อเปลี่ยนจากสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดให้เป็นสมการพีชคณิตก่อนซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.1 เบดดูดซับที่ถูกแบ่งเป็นหลายส่วน

(1) แบ่งเบดคูดซ์บออกเป็หลายๆส่วนโดยในแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ  $\Delta z$  และแต่ละส่วนเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันที่จุดต่อต่างๆซึ่งใช้สัญลักษณ์  $i-1, i, i+1$  แต่ละตำแหน่งของ  $z$  ก็จะมีแต่ละตำแหน่งของเวลาซึ่งใช้สัญลักษณ์  $j-1, j, j+1$  ดังรูปที่ 3.1

(2) สำหรับสมการคูลมวลาสารในเฟสของก๊าซตั้งสมการ (3.8) สมการคูลมวลาสารในเฟสของของแข็งตั้งสมการ (2.4) และสมการคูลพลังงานในเฟสของก๊าซตั้งสมการ (3.9) สามารถใช้การประมาณผลของผลต่างแบบไปข้างหน้า เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ ดังนี้

$$\frac{w_{a,i+1}^j - w_{a,i}^j}{\Delta z} = NTU_m (w_{s,i}^j - w_{a,i}^j) \quad (3.11)$$

$$\frac{q_i^{j+1} - q_i^j}{\Delta t} = \frac{m_a}{m_s} (w_{a,i}^j - w_{a,i+1}^j) \quad (3.12)$$

$$\frac{T_{a,i+1}^j - T_{a,i}^j}{\Delta z} = \beta NTU_h (T_{s,i}^j - T_{a,i}^j) \quad (3.13)$$

(3) สำหรับสมการคูลพลังงานในเฟสของของแข็งตั้งสมการ (3.10) สามารถใช้การประมาณผลของผลต่างแบบไปข้างหน้า เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่ง และใช้การประมาณผลของผลต่างแบบตรงกลาง เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับสองได้ ดังนี้

$$\frac{\rho_b c_s I_s^2}{k_b} \frac{T_{s,i}^{j+1} - T_{s,i}^j}{\Delta t} = \frac{T_{s,i+1}^j - 2T_{s,i}^j + T_{s,i-1}^j}{\Delta z^2} + Bi \left( \frac{H_A}{c_u} Le^3 (w_{a,i}^j - w_{s,i}^j) + (T_{a,i}^j - T_{s,i}^j) \right) \quad (3.14)$$

### 3.3.4 งานวิจัยที่ใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลอง [9]

จากการค้นหาข้อมูลสภาวะการทดลอง ผู้จัดทำได้เลือกใช้งานวิจัยอ้างอิงของ Pesaran และ Mills ซึ่งเป็นการคูดซ์บความชื้นด้วยซิลิกาเจล เนื่องจากมี ความครบถ้วนของข้อมูล และเหมาะสมกับระบบที่เลือกใช้

### 3.3.5 การประยุกต์ใช้ขั้นตอนทางคณิตศาสตร์เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เป็นการ ประยุกต์ใช้ระหว่างความรู้ทางคณิตศาสตร์ในเรื่องระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมแสดงดังรูปที่ (3.2)

(1) ป้อนข้อมูลเข้าระบบ (input) เป็นการสร้าง และแนะนำตัวแปรว่ามีค่าข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นเท่าไร

(2) ป้อนสมการเงื่อนไขเริ่มต้นและสมการเงื่อนไขขอบเข้าสู่ระบบ แล้วกำหนดความกว้าง และจำนวนครั้งในการคำนวณ

(3) สร้างระบบวนซ้ำของ  $i$  และ  $j$  เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของตัวแปร อัตราส่วนของน้ำในอากาศ ( $w_a$ ) อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ( $q$ ) อุณหภูมิของอากาศ ( $T_a$ ) และอุณหภูมิของเบด ( $T_s$ ) ซึ่งค่าของ  $i$  จะใช้ระบุตำแหน่งของระยะทาง (bed height step) และค่าของ  $j$  จะใช้ระบุตำแหน่งของเวลา (time step) โดยจะถูกโปรแกรม MATLAB เก็บข้อมูลในรูปแบบของเมทริก ค่า  $i$  จะแสดงตำแหน่งในแถว ส่วนค่า  $j$  จะแสดงตำแหน่งในหลัก

(4) ในระบบวนซ้ำจะมีขั้นตอนการคำนวณ คือ คำนวณตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับตั้งแต่ สมการ (2.7) ถึงสมการ (2.18) ที่เวลา และตำแหน่งนั้น ๆ เพื่อใช้เป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณสมการดุลมวลสาร และพลังงาน หลังจากนั้นจึงคำนวณ ค่าอัตราส่วนของน้ำในอากาศที่ตำแหน่งของระยะทางถัดไป ( $w_{a,i+1}^j$ ) ดังสมการ (3.11) อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งของระยะทางถัดไป ( $T_{a,i+1}^j$ ) ดังสมการ (3.13) อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่ตำแหน่งของเวลาถัดไป ( $q_i^{j+1}$ ) ดังสมการ (3.12) และ อุณหภูมิของเบดที่ตำแหน่งของเวลาถัดไป ( $T_{s,i}^{j+1}$ ) ดังสมการ (3.14)

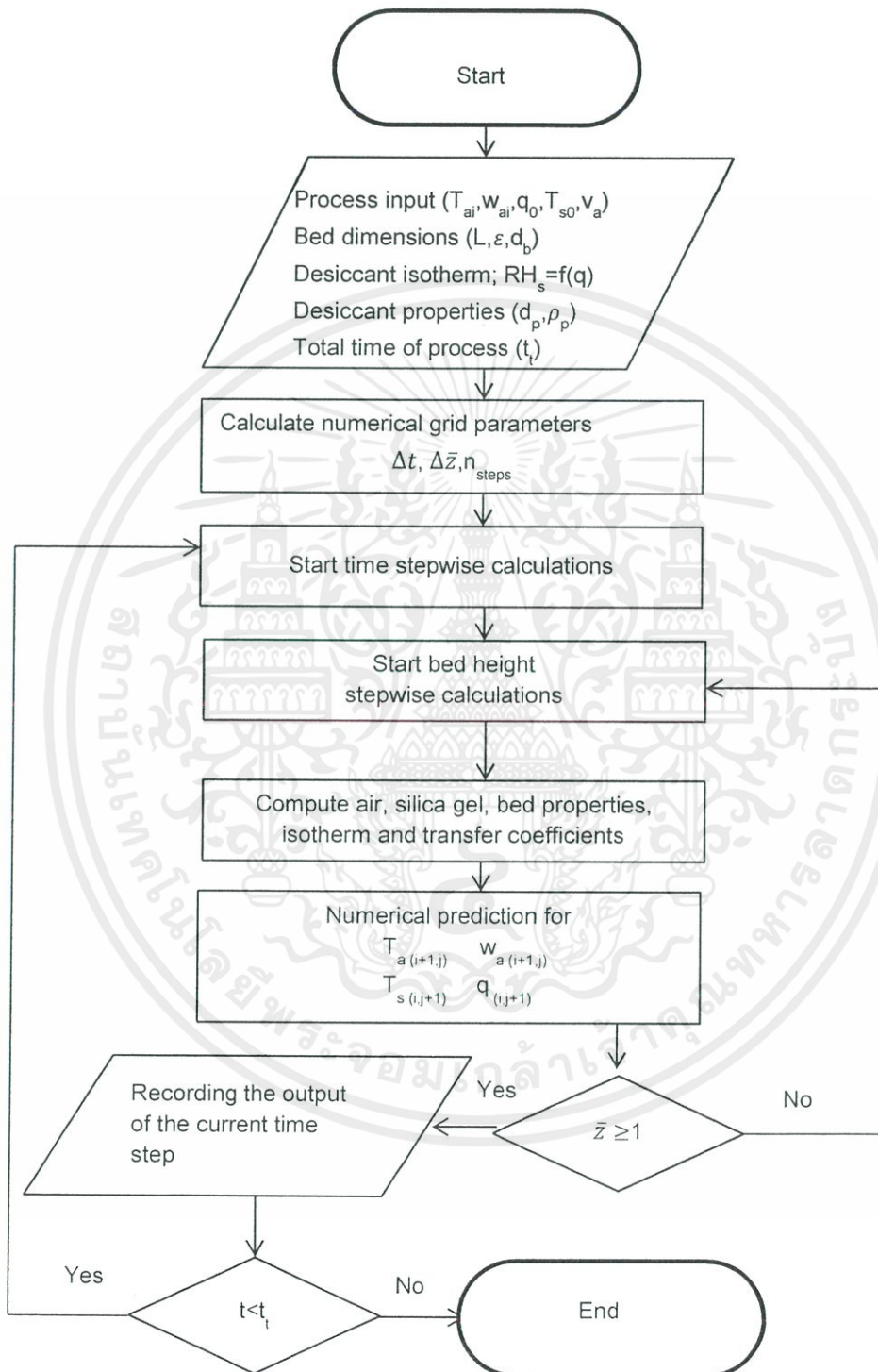
(5) เมื่อผ่านระบบวนซ้ำ จะได้ค่าต่าง ๆ ที่ต้องการจนครบทุกค่า และสามารถนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลได้

(6) นำผลที่ได้มายืนยันแบบจำลอง (Model verification) โดยการยืนยันการเปรียบเทียบระหว่างสมการดุลมวลสารในเฟสของก๊าซดังสมการ (3.11) กับสมการดุลมวลสารในเฟสของของแข็ง (3.12) ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องภายในแบบจำลอง โดยคำนวณจากสมการ (3.15) ดังนี้

$$\left[ \frac{\sum_{i=1}^N (m_{a,in,i} - m_{a,out,i})}{m_{a,in,i}} \right] \times 100 = 0.61\% \quad (3.15)$$

N

ซึ่งพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนจากสมการดุลมวลสารเล็กน้อย เนื่องจากสมมติให้ความเร็วอากาศมีค่าคงที่



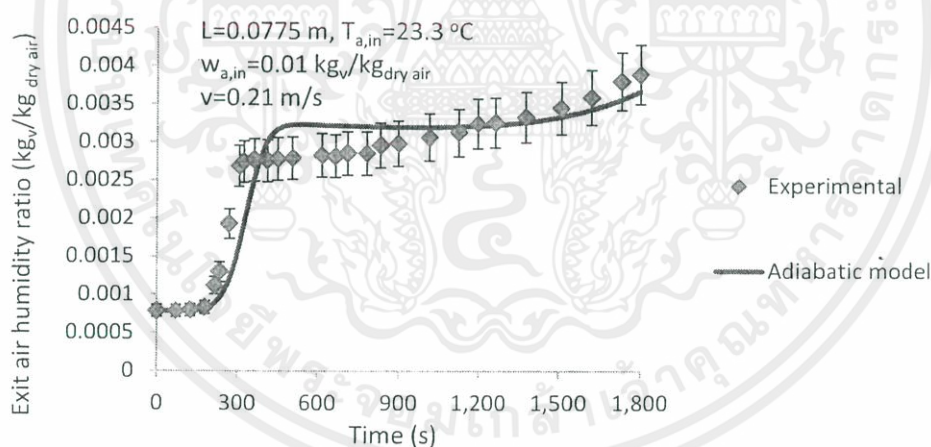
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงกระบวนการแก้สมการด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## บทที่ 4

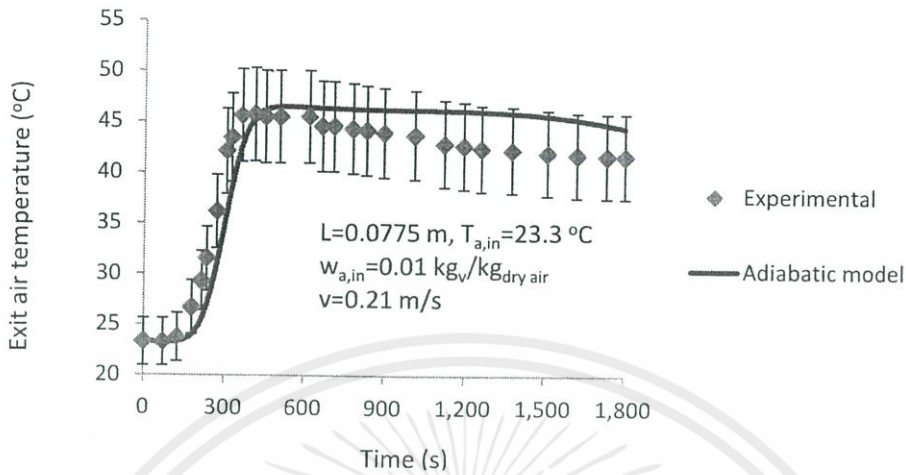
### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการจำลองเทียบกับงานวิจัยของ Pesaran และ Mills

ในการจำลองระบบลดความชื้นแบบเบตนิ่งโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล ที่ความเร็วของอากาศ 0.21 เมตรต่อวินาที ความยาวของเบต 7.75 เซนติเมตร อุณหภูมิของอากาศขาเข้า 23.3 องศาเซลเซียส และ อัตราส่วนความชื้นในอากาศขาเข้า 0.01 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Pesaran และ Mills [9] พบว่าในรูปที่ 4.1 แบบจำลองแบบอะเดียแบติกมีความคลาดเคลื่อน 9.65% ในรูปที่ 4.2 มีความคลาดเคลื่อน 6.60% เนื่องจากในแบบจำลองมีการสมมติให้ความเร็วของอากาศมีค่าคงที่ตลอดแบบจำลอง และไม่คิดผลของความดันตกที่เกิดขึ้นในระบบ จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ยังเป็นความคลาดเคลื่อนในช่วงที่สามารถยอมรับได้



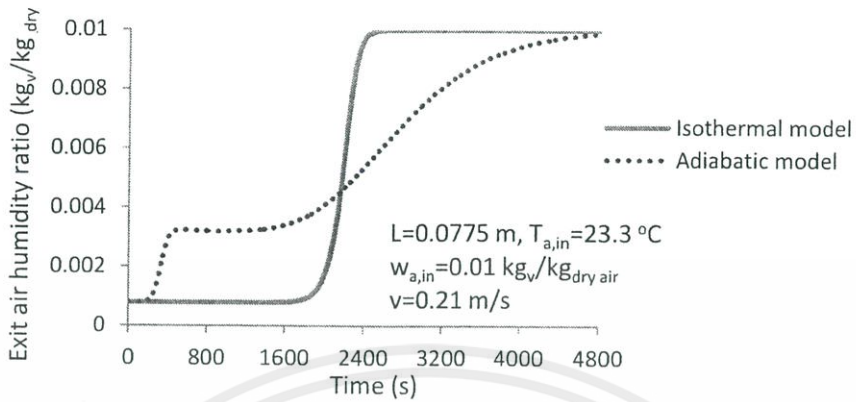
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองเทียบกับงานวิจัยแสดงอัตราส่วนความชื้นในอากาศขาออกที่เวลาต่าง ๆ



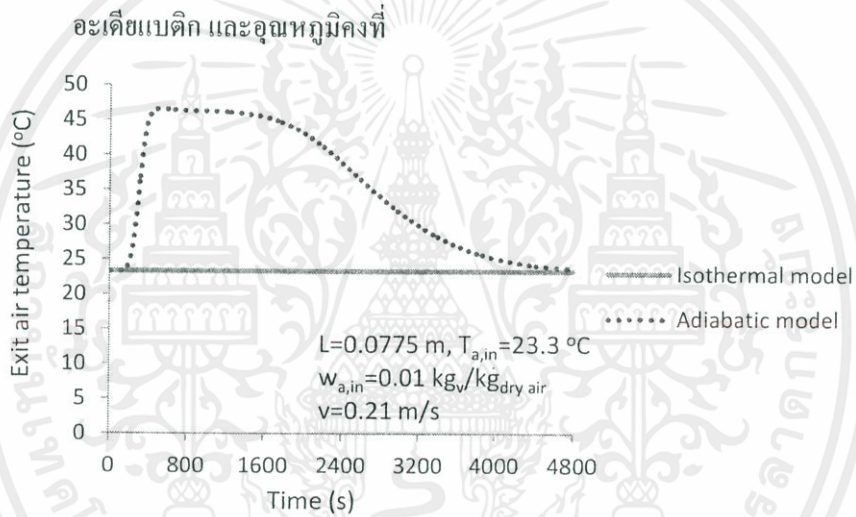
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองเทียบกับงานวิจัยแสดงอุณหภูมิของอากาศออกที่เวลาต่าง ๆ

#### 4.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองแบบอะเดียแบติก และอุณหภูมิคงที่

การเปรียบเทียบแบบจำลองแบบอะเดียแบติก และอุณหภูมิคงที่ที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ในช่วงแรกของการดูดซับสำหรับแบบจำลองแบบอะเดียแบติก ปริมาณอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ( $q$ ) มีค่าต่ำ ทำให้ซิลิกาเจลดูดซับความชื้นในอากาศได้มาก ส่งผลให้เกิดความร้อนจากการดูดซับสูง อุณหภูมิของอากาศออกจึงมีค่าสูงขึ้นถึงประมาณ 45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ความดันไออิ่มตัวของน้ำในอากาศ ( $P_{sat}$ ) และค่าอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่จุดสมดุล ( $w_s$ ) มีค่าสูงขึ้น ดังสมการ (2.15) และ (2.13) ทำให้แรงขับเคลื่อน (driving force) ของการถ่ายโอนมวลมีค่าน้อยลง ดังสมการ (2.3) อัตราส่วนความชื้นในอากาศออก ( $w_{a,out}$ ) ของแบบจำลองแบบอะเดียแบติกจึงมีค่ามากกว่าแบบจำลองแบบอุณหภูมิคงที่ และเมื่อซิลิกาเจลดูดซับปริมาณน้ำจนใกล้ถึงจุดอิ่มตัวแล้ว จะทำให้อัตราการดูดซับลดลง อัตราส่วนความชื้นในอากาศออกจึงมีค่าสูงขึ้น แต่เนื่องจากความร้อนจากการดูดซับน้อยลง อุณหภูมิของอากาศออกจึงลดลงในช่วงหลัง



รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นในอากาศขาออก ของแบบจำลองแบบ

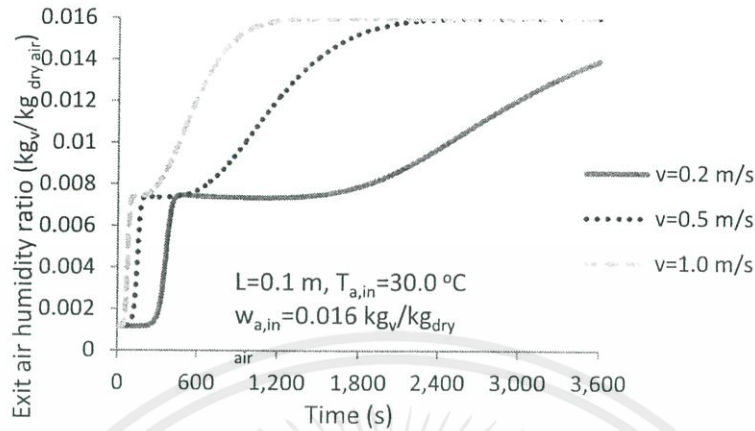


รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ของแบบจำลองแบบ  
 อะเดียแบติก และอุณหภูมิคงที่

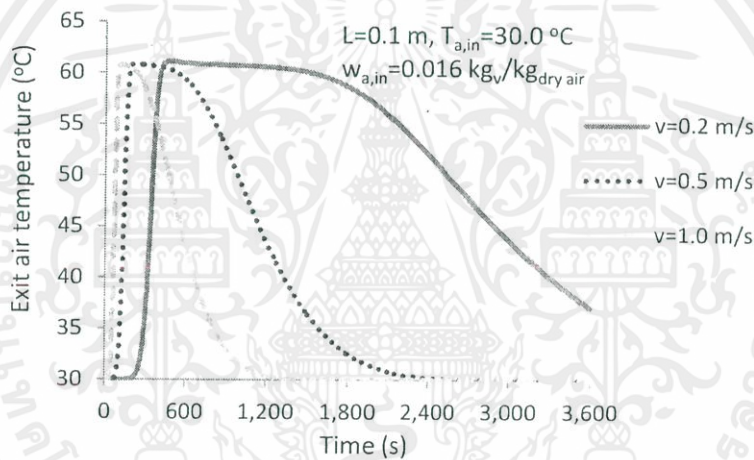
#### 4.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

##### 4.3.1 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศ

การเพิ่มความเร็วของอากาศ ( $v$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ( $h_m$ ) และความร้อน ( $h$ ) เพิ่มขึ้น ดังสมการ (2.16) และ (2.17) จึงทำให้การดูดซับเกิดเร็วขึ้น เบบดจึงอิมตัวเร็วส่งผลให้จุดสั่นสภาพเกิดขึ้นที่เวลาต่ำลง



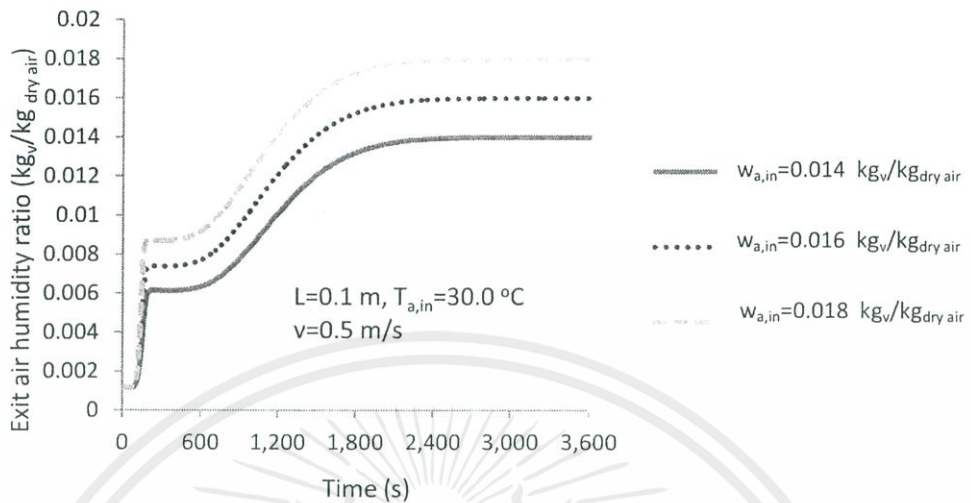
รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่มีต่ออัตราส่วนความชื้นในอากาศขาออก



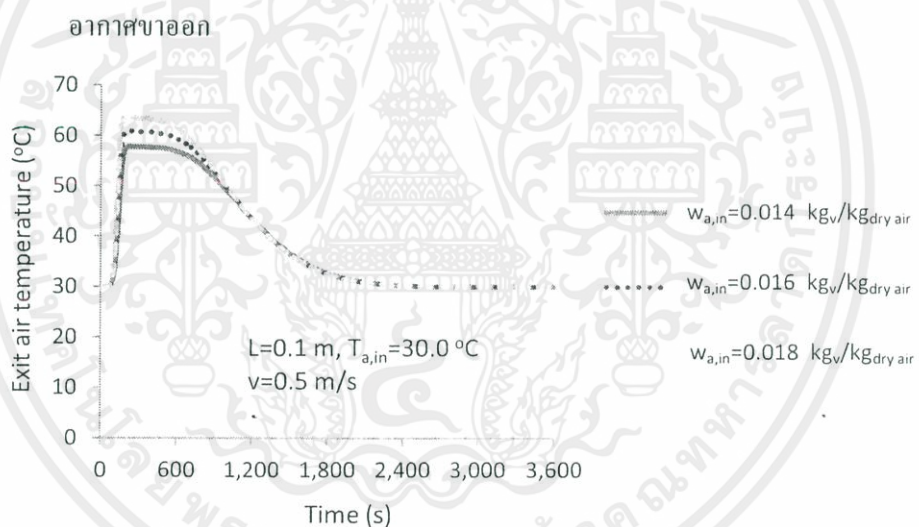
รูปที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่มีต่ออุณหภูมิของอากาศขาออก

#### 4.3.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของอากาศ

การเพิ่มอัตราส่วนความชื้นในอากาศ ( $w_{a,in}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะทำให้ความดันไอน้ำในอากาศมีค่าสูงขึ้น แรงขับเคลื่อน (driving force) และปริมาณน้ำที่ดึงดูดซับจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่กลไกจึงดูดซับน้ำเร็วขึ้น และเมื่อดูดซับน้ำในอัตราที่เร็วขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิขาออกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และจุดเสกสภาพจะเกิดเร็วขึ้น



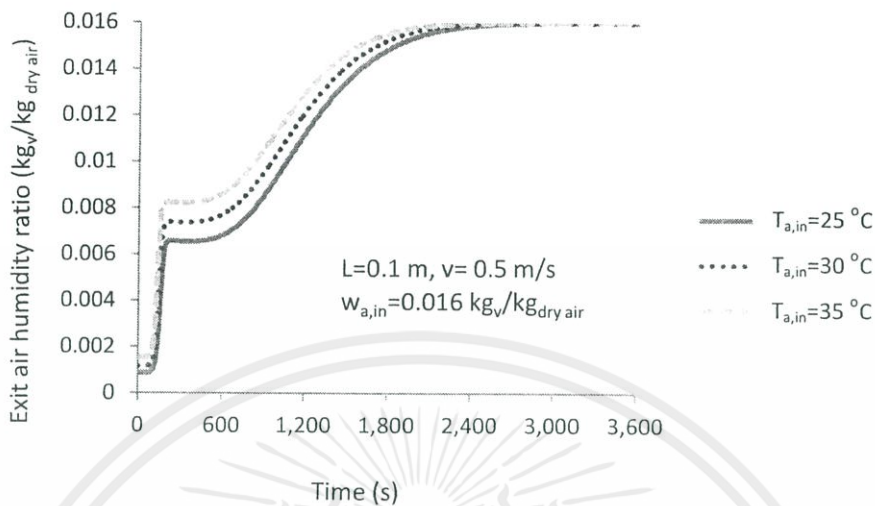
รูปที่ 4.7 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่มีต่ออัตราส่วนความชื้นใน



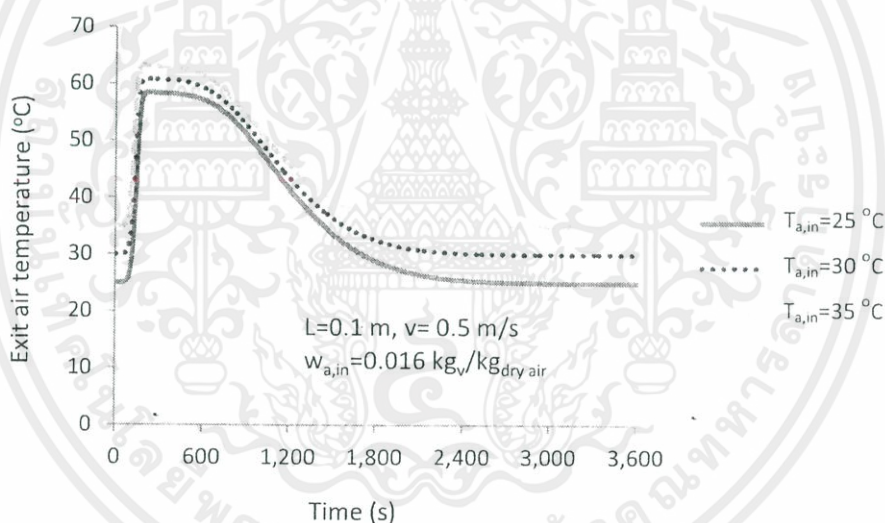
รูปที่ 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่มีต่ออุณหภูมิของอากาศขาออก

#### 4.3.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ

การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้า ( $T_{a,in}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะทำให้ปริมาณของน้ำในอากาศที่ซึกลิกาเจลสามารถดูดซับได้นั้นมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่สมดุลกับอัตราส่วนของน้ำในซึกลิกาเจล ( $w_s$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการ (2.13) ส่งผลให้อุณหภูมิขาออกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และจุดสิ้นสุดสภาพจะเกิดเร็วขึ้น



รูปที่ 4.9 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่มีต่ออัตราส่วนความชื้นในอากาศขาออก

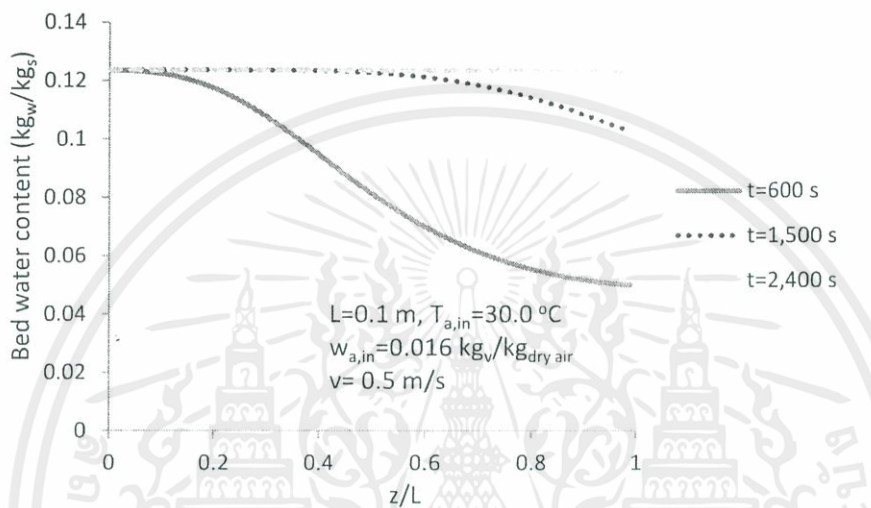


รูปที่ 4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่มีต่ออุณหภูมิของอากาศขาออก

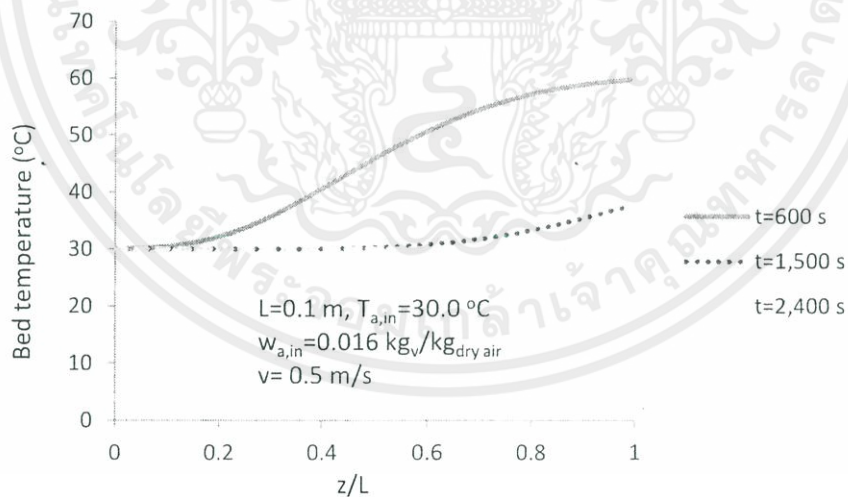
#### 4.3.4 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้น และอุณหภูมิภายในเบดที่เวลาต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงความชื้น และอุณหภูมิภายในเบด ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที ความยาวของเบด 10 เซนติเมตร อุณหภูมิของอากาศขาเข้า 30.0 องศาเซลเซียส และ อัตราส่วนความชื้นในอากาศขาเข้า 0.016 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ให้นำเวลา 600, 1,500 และ 2,400 วินาที มาพิจารณา ซึ่งเมื่อดูจากรูปที่ 4.7 ที่เวลา 600 วินาที เป็นจุดที่

อัตราส่วนความชื้นในอากาศขาออกเริ่มมีค่าสูงขึ้น ที่เวลา 1,500 วินาที เป็นจุดที่อัตราส่วนความชื้นในอากาศขาออกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่สูงที่เวลา 2,400 วินาที เป็นจุดที่พบว่าซิลิกาเจลในเบดดูดซับจนอิ่มตัวเกือบทั้งหมดแล้ว ซึ่งบริเวณที่ซิลิกาเจลดูดซับจนอิ่มตัวจะมีอุณหภูมิในเบดเท่ากับอุณหภูมิขาเข้า แต่ในส่วนที่ซิลิกาเจลยังมีการดูดซับอยู่ อุณหภูมิในเบดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนของการดูดซับ



รูปที่ 4.11 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเบดที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบดที่เวลาต่าง ๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลดความชื้นแบบเบตนึ่งโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล ซึ่งมีการสมมติว่าเป็นกระบวนการอะเดียแบติก และใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบซัดแองจ์ช่วยในการแก้ปัญหา เพื่อจำลองผลของตัวแปร และศึกษาปัจจัยที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับ คือ ความเร็วของอากาศ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิอากาศขาเข้า พบว่าเมื่อคุณสมบัติทั้งสามมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้จุดสิ้นสุดสภาพเกิดเร็วขึ้น และนอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบกับการทดลองของ พีซาร์ัน และมิลล์ ซึ่งผลการจำลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองจากงานวิจัยที่อ้างอิง โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ แต่การแก้ปัญหาคับด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบซัดแองจ์ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ซึ่งวิธีนี้อาจจะไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการคำนวณในระบบดูดซับ โดยอาจพิจารณาใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบปริยาย (Implicit finite difference method) หรือวิธีการของแครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson method) ที่มีความซับซ้อนในการแก้ปัญหามากกว่า แต่มีความแม่นยำที่มากกว่า

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ian Cameron and Rafiqul Gani. Product and Process Modelling, Elsevier, 2011, 1-31.
- [2] C.L. Mantell. Adsorption, chapter The Unit Operation of Adsorption. McGraw-Hill, 1951, 2.
- [3] D. M. Ruthven. Principles of Adsorption and Adsorption processes. John Wiley & Sons, 1984, 29-30.
- [4] A. Mersmann. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, volume 1. Wiley-VCH, 2003, 471.
- [5] K.A. Ramzy. Significance of axial heat conduction in non-isothermal adsorption process in a desiccant packed bed. International Journal of Thermal Sciences 76, 2014, 68-81.
- [6] R. Bauer, E.U. Schlunder, Effective radial thermal conductivity of packings in gas flow. Part II. Thermal conductivity of the packing fraction without gas flow, Int. Chem. Eng. 18, 1978, 189-204.
- [7] K.D. Kafu, Transient heat and moisture transfer in thin silica gel beds, ASME J. Heat Transfer 116, 1994, 946-953.
- [8] A.A. Pesaran, Anthony F. Mills, Moisture transport in silica gel packed beds-I. Theoretical study, Int. J. Heat Mass Transfer 30, 1987, 1037-1049.
- [9] A.A. Pesaran, Anthony F. Mills, Moisture transport in silica gel packed beds-II. Experimental study, Int. J. Heat Mass Transfer 30, 1987, 1051-1060.
- [10] J.M. Smith, Introduction to chemical engineering thermodynamics 7th edition. McGraw-Hill, 2004.
- [11] ปราโมทย์ เคชะอำไพ และนิพนธ์ วารณโสภากย์. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 9). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2014.
- [12] Ahmed Ramzy et al. Modelling of heat and moisture transfer in desiccant packed bed utilizing spherical particles of clay impregnated with CaCl<sub>2</sub>. Applied Thermal Engineering 66, 2014, 499-506.
- [13] Hui T. Chua. Adsorption Characteristics of Silica Gel + Water Systems. J. Chem. Eng. Data 2002, 47, 1177-1181.
- [14] Joselma Araújo de Amorim et al. Experimental study of dynamic adsorption in packed bed. 13<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**  
**ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง**

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองนั้น ได้มาจากการทดลองของ Pesaran และ Mills [9] และงานวิจัยของ Kafui [7] ซึ่งแสดงดังนี้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง

ชื่อตัวแปร	ค่าของตัวแปร	หน่วย
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, $c_v$	1,884	J/(kg·K)
เส้นผ่านศูนย์กลางของเบด, $d_b$	0.13	m
เส้นผ่าศูนย์กลางของซิลิกาเจล, $d_p$	3.88	mm
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ, $k_a$	0.029	W/(m·K)
ความยาวของเบด, $L$	0.0775	m
ความดันรวม, $P_{tot}$	101.325	kPa
อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เวลาเริ่มต้น, $q_0$	0.0417	kg <sub>w</sub> /kg <sub>s</sub>
อุณหภูมิอากาศขาเข้า, $T_{a,i}$	23.3	°C
ช่วงเวลา, $t$	1,800	s
ความเร็วของอากาศ, $v$	0.21	m
อัตราส่วนของน้ำในอากาศขาเข้า, $w_a$	0.01	kg <sub>w</sub> /kg <sub>air</sub>
ความหนาแน่นของเม็ดซิลิกาเจล, $\rho_p$	1,200	kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของอากาศ, $\rho_a$	1.2	kg/m <sup>3</sup>
ความเป็นรูพรุนของเบด, $\epsilon$	0.31	-
ค่าการแผ่รังสีของซิลิกาเจล, $\bar{\epsilon}$	0.9	-
ความหนืดของอากาศแบบคิเนมาติกส์, $\nu$	1.568x10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup> /s

## ภาคผนวก ข

## การเขียน Code ในโปรแกรม MATLAB

```

clc;
clear;
close all;
%Constant:
R=1.94*10^-3;
d_p=2*R;
d_b=0.13;
A_b=pi()*d_b^2/4;
v=0.21;
por=0.31;
new=1.568*10^-5;
a=6*(1-por)/(2*R);
rho_a=1.2;
rho_b=1200;
L=0.0775;
P_tot=101.325;
stefan=5.67*10^-8;
emiss=0.9;
k_a=0.029;
c_v=1884;
% Number of time and length steps
t_init=0;   t_max=3600;   maxt = 3600;   dt=(t_max-t_init)/maxt;
z_init=0;   z_max=1;     maxz = 100;   dz = (z_max-z_init)/maxz;
% Mass silica gel
Vol=A_b*L*(1-por)/maxz;
Mass_s=Vol*rho_b;
%build matrix
w_a = zeros(maxz,maxt);
T_a = zeros(maxz,maxt);
T_s = zeros(maxz,maxt);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

q = zeros(maxz,maxt);
w_s = zeros(maxz,maxt);
% Initial condition
q(:,1) = 0.0417;
T_s(:,1) = 296.45;
T_a(:,1) = 296.45;
w_a(:,1) = 0.00078;
% Boundary condition
w_a(1,:) = 0.01;
T_a(1,:) = 296.45;
T_s(1,:) = 296.45;
q(1,:) = 0.0417;
% Time loop
for j=1:maxt-1;
    for i=1:maxz-1;
        P_sat=exp(16.3872-(3885.70/(T_s(i,j)-42.98)));
        RH_s=(0.0078-0.05759*q(i,j)+24.16554*q(i,j)^2-124.478*q(i,j)^3+2004.226*q(i,j)^4);
        w_s(i,j)=0.622*RH_s*P_sat/(P_tot-(0.378*RH_s*P_sat));
        Re=2*R*v/new;
        h_m=1.7*rho_a*v*(Re^-0.42);
        NTU_m=h_m*a*A_b*L/(rho_a*v*A_b);
        c_a=1884*w_a(i,j)+1004*(1-w_a(i,j));
        gamma=c_v/c_a;
        h=1.6*rho_a*v*c_a*(Re^-0.42);
        NTU_h=h*a*A_b*L/(rho_a*v*A_b*c_a);
        beta=(1+(gamma*NTU_m/NTU_h*(w_a(i,j)-w_s(i,j)))));
        c_b=4186*q(i,j)+921;
        k_ra=4*stefan*emiss*d_p*T_s(i,j)^3/(2-emiss);
        k_s=0.37+(0.97*q(i,j))+0.0014*T_s(i,j);
        k_b=(1-sqrt(1-por))*(por*k_a/(por-1)+(por*k_ra)+sqrt(1-por)*k_s);
        Bi=h*a*L/(k_b/L);
        Le=c_a*h_m/h;
        if q(i,j)<=0.05
            H_A=1000*(3500-12400*q(i,j));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
    H_A=1000*(2950-1400*q(i,j));
end
alpha=k_b/(rho_b*c_b);
if i==1
    w_a(i+1,j)=w_a(i,j)+dz*NTU_m*(w_s(i,j)-w_a(i,j));
    T_a(i+1,j)=T_a(i,j)+dz*beta*NTU_h*(T_s(i,j)-T_a(i,j));
else if j==1
    T_s(i,j+1)=T_s(i,j)+(alpha*dt/L^2)*((T_s(i+1,j)-2*T_s(i,j)+T_s(i-1,j))/dz^2+Bi*(H_A/c_a*Le
    *(w_a(i,j)-w_s(i,j)))+(T_a(i,j)-T_s(i,j))));
    q(i,j+1)=q(i,j)+dt/Mass_s*v*A_b*rho_a*(w_a(i,j)-w_a(i+1,j));
else
    T_s(i,j+1)=T_s(i,j)+(alpha*dt/L^2)*((T_s(i+1,j)-2*T_s(i,j)+T_s(i-1,j))/dz^2+Bi*(H_A/c_a*Le
    *(w_a(i,j)-w_s(i,j)))+(T_a(i,j)-T_s(i,j))));
    w_a(i+1,j)=w_a(i,j)+dz*NTU_m*(w_s(i,j)-w_a(i,j));
    T_a(i+1,j)=T_a(i,j)+dz*beta*NTU_h*(T_s(i,j)-T_a(i,j));
    q(i,j+1)=q(i,j)+dt/Mass_s*v*A_b*rho_a*(w_a(i,j)-w_a(i+1,j));
end
end
q(1,j+1)=q(2,j);
T_s(1,j+1)=T_s(2,j);
T_s(maxz,j+1)=T_s(maxz-1,j);
q(maxz,j+1)=q(maxz-1,j);
end
t(j+1)=t_init+j*dt;
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้