

แบบจำลองสำหรับการฟื้นฟูระบบลดความชื้นแบบเบดบรรจุ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

แบบจำลองสำหรับการฟื้นฟูระบบลดความชื้นแบบเบตบรจุ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODELING OF DESORPTION PROCESS
ON THE DESICCANT PACKED BED



A REPORT IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง แบบจำลองสำหรับการฟื้นฟูระบบลดความชื้นแบบเบตบรรจ
นักศึกษา นายจารุกิตต์ จันทร์เจียวใช้
รหัสนักศึกษา 57010169
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์

บทคัดย่อ

การศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขของปฏิสัมพันธ์ความร้อนและความชื้น ระหว่างอากาศและอนุภาคที่ดูดซับความชื้นภายในเบตช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงและประสิทธิภาพภายในเบตดูดซับความชื้น ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมของระบบการฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นที่ถูกดูดซับความชื้นโดยอาศัยข้อมูลเชิงทฤษฎี ซึ่งการจำลองที่ประกอบไปด้วยการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศชื้นและอนุภาคซิลิกาเจลในเบตจะถูกศึกษาโดยใช้โปรแกรม MATLAB แบบจำลองนี้จะพิจารณาว่ามีเพียงการพาความร้อนเท่านั้นไม่มีการนำความร้อนไปที่เบตบรรจสารดูดซับความชื้น และไม่มีการสูญเสียความร้อนระหว่างผนังของเบต ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจนถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาแบบจำลอง ผลการจำลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองที่ถูกศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลายจากงานวิจัยอื่นๆ โดยค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก และอุณหภูมิของอากาศขาออกเฉลี่ยสำหรับกระบวนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 4.74–5.54% และ 1.58–6.33% ตามลำดับ และสำหรับกระบวนการคายซับมีค่าเท่ากับ 7.93–9.82% และ 3.33–6.09% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นแสดงโดยความสามารถในการลดความชื้น (moisture removal capacity: MRC) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (dehumidification coefficient of performance: DCOP) ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นและอัตราส่วนของความเร็วของอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้น พบว่าเมื่อปัจจัยทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการลดความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น มีค่าลดลง นอกจากนี้จากการศึกษาตัวแปรยังพบว่าช่วงของอุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอัตราส่วนความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูระบบลดความชื้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้น 80–100 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของความเร็วเท่ากับ 1 ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเหล่านี้มีส่วนช่วยในการลดต้นทุนพลังงานที่ต้องใช้ เช่น พลังงานที่ใช้เพื่อให้ความร้อนกับอากาศที่ใช้คายความชื้น และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเวียนอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Modeling of desorption process on the desiccant packed bed
By Mr. Jarukit Junjiewchai
Student ID 57010169
Degree Bachelor of Engineering
Programme Chemical Engineering
Year 2017
Report Advisor Ms. Siripan Murathathunyaluk

ABSTRACT

Numerical simulation of heat and moisture interactions between air stream and the particles in a desiccant bed provide useful insight into the dynamics of the bed and performance characteristics. In the present study introduces a dynamic performance of dehumidification desiccant regeneration system has been investigated theoretically. The simulation of the combined heat and moisture transfers between the moist air vapor phase and the silica gel in the packed bed is carried out with MATLAB. The model has been considered only forced convection, no heat conduction along the bed and no heat loss across the wall. The explicit finite difference numerical method is used to solve the problem. The simulated results are validated with the experimental data that conducted under diverse condition are taken from other literature. The root means square of errors ranges of the exit air humidity ratio and exit air temperature for adsorption process from 4.74–5.54% and 1.58–6.33% respectively and for desorption process from 7.93–9.82% and 3.33–6.09% respectively. The performance of dehumidification systems is presented by moisture removal capacity (MRC) and dehumidification coefficient of performance (DCOP). To evaluate the effect of regeneration temperature and regeneration to process air flow ratio, increasing of these two factors has a positive correlation with MRC but negative correlation with DCOP. In addition, it has been found from the parametric study that the cycle efficiency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

iii

is optimization for regeneration temperature between 80 °C to 100 °C and regeneration to process air flow ratio 1. The optimization of these effect reduces the cost of energy consumption such as energy provided to heat the regeneration air and the electric power used by the fan.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์หลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างสูง ท่านได้ให้ความรู้ คำเสนอแนะ คำปรึกษา แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณดร.อมตะ อนันต์พิณีจวัฒนา และนางสาวอัษฎนันท์ เสถียรกิจอำไพ สำหรับคำปรึกษา และความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรม MATLAB

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในด้านวิชาการ คำปรึกษา คำเสนอแนะ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ขอบคุณเพื่อนๆ ที่ช่วยให้คำแนะนำดีๆ กำลังใจทำงานวิจัย ห้องทำงานไว้อาศัยอยู่ และขอบคุณนางสาวศุภิสรา จันทร์ประพันธ์ที่คอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน และช่วยอบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาโดยตลอดจนผู้วิจัยสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

จารุกิตติ์ จันทร์เจียวใช้

รายการสัญลักษณ์

A_b	พื้นที่หน้าตัดของเบต (m^2)	V	ความหนืดของอากาศแบบคิเนมาติกส์ (m^2/s)
a	อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (m^{-1})		ดรชนีกำกับ
c	ความจุความร้อนจำเพาะ $J/(kg \cdot K)$	0	สภาวะเริ่มต้น
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของเบต (m)	a	อากาศ
H_A	ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ (J/kg)	ad	กระบวนการดูดซับ
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน $W/(m^2 \cdot K)$	b	เบต
h_m	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล $kg/(m^2 \cdot s)$	de	กระบวนการคายซับ
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน $W/(m \cdot K)$	s	ซิลิกาเจล
L	ความยาวของเบต (m)	v	ไอน้ำ
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)	w	น้ำ
m	มวล (kg)	z	ทิศทางการแนวแกน
n	จำนวนครั้ง หรือ ครั้งที่		
P_{sat}	ความดันอิ่มตัว (kPa)		
P_{tot}	ความดันรวม (kPa)		
q	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล (kg_w/kg_s)		
R	รัศมีของซิลิกาเจล (m)		
Re	เลขเรย์โนลด์ (dimensionless)		
RH_s	ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (dimensionless)		
T	อุณหภูมิ (K)		
Δt	ช่วงเวลา (s)		
T	เวลา (s)		
v	ความเร็วของอากาศ (m/s)		
w_o	อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (kg_w/kg_{air})		
w_s	อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่สมดุลกับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล (kg_w/kg_{air})		
z	ความยาวตามแนวแกน (m)		
กรีก			
\mathcal{E}	ความเป็นรูพรุนของเบต (dimensionless)		
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)		

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	V
รายการสัญลักษณ์	VI
สารบัญ	VII
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูปภาพ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แนวคิดสำหรับระบบการสร้างแบบจำลอง	3
2.2 วิธีการสร้างแบบจำลอง	4
2.3 การดูดซับ (Adsorption).....	5
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	6
2.3.2 ความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption).....	7
2.3.3 สารดูดซับ (Adsorbent).....	8
2.3.4 รูพรุน (Pores)	9
2.4 การคายซับ (Desorption)	10
2.4.1 การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่.....	10
2.4.2 แหล่งความร้อนที่ใช้คายซับ.....	11
2.5 วัฏจักรการดำเนินงานของระบบลดความชื้นแบบเบตบรจ	12
2.6 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับ และคายซับ.....	13
2.6.1 ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ และคายซับ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2	สมการดุลมวลในเฟสก๊าซ	15
2.6.3	สมการดุลมวลในเฟสของแข็ง	15
2.6.4	สมการดุลพลังงานในเฟสก๊าซ	15
2.6.5	สมการดุลพลังงานในเฟสของแข็ง	15
2.7	ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น	16
2.8	ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดแจ้ง (Finite Difference Explicit Method).....	17
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review).....	19
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินงาน	20
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	20
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3	วิธีการคำนวณ	21
3.3.1	สมมติฐานของแบบจำลอง.....	21
3.3.2	การจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปเทอมไร้นิพจน์	21
3.3.3	การประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	23
3.3.4	การประยุกต์ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์	24
3.3.5	การเปรียบเทียบแบบจำลองกับงานวิจัย	25
บทที่ 4	ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	27
4.1	ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับงานวิจัย.....	27
4.2	ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการลดความชื้น	30
4.2.1	ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้น	30
4.2.2	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้น.....	32
4.3	ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น	32
4.3.1	ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้น	32
4.3.2	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้น.....	33

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลการวิจัย	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก.....	41
ภาคผนวก ข.....	42
ภาคผนวก ค.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับพาณิชย์ประเภทต่างๆ	9
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสภาวะของการทดลองจากงานวิจัยต่างๆ.....	27
ตารางที่ 4.2 ค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยกำลังสองของแต่ละการเปรียบเทียบ	28
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง.....	41
ตารางที่ ข.1 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 1]	42
ตารางที่ ข.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ($^{\circ}C$) [Test 1].....	43
ตารางที่ ข.3 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 2]	44
ตารางที่ ข.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ($^{\circ}C$) [Test 2].....	44
ตารางที่ ข.5 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 3]	45
ตารางที่ ข.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ($^{\circ}C$) [Test 3].....	46
ตารางที่ ข.7 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 4]	47
ตารางที่ ข.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ($^{\circ}C$) [Test 4].....	47
ตารางที่ ข.9 สภาวะที่ใช้จำลองผลของตารางที่ ข.10 และ ข.11	48
ตารางที่ ข.10 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อ MRC....	48
ตารางที่ ข.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อ DCOP .	48
ตารางที่ ข.12 สภาวะที่ใช้จำลองผลของตารางที่ ข.13 และ ข.14	49
ตารางที่ ข.13 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นต่อ MRC	49
ตารางที่ ข.14 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นต่อ DCOP	50

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	โครงสร้างของระบบทั่วไปสำหรับแบบจำลอง.....	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างการสร้างแบบจำลอง.....	5
รูปที่ 2.3	แผนภูมิอย่างง่ายแสดงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ.....	6
รูปที่ 2.4	แผนภาพการไหลของระบบลดความชื้นแบบหนึ่งเบดบรรจุ.....	13
รูปที่ 2.5	การแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายๆส่วนเพื่อใช้กับวิธีการแบบชุดแห้ง.....	17
รูปที่ 2.6	แผนภาพการคำนวณโดยระเบียบวิธีแบบชุดแห้ง.....	18
รูปที่ 3.1	เบดบรรจุสารดูดซับความชื้นที่ถูกแบ่งเป็นหลายๆส่วน.....	23
รูปที่ 3.2	แผนผังแสดงกระบวนการแก้สมการด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	26
รูปที่ 4.1	เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองกระบวนการดูดซับ (Test 1).....	28
รูปที่ 4.2	เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองกระบวนการดูดซับ (Test 2).....	29
รูปที่ 4.3	เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองกระบวนการคายซับ (Test 3).....	29
รูปที่ 4.4	เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองกระบวนการคายซับ (Test 4).....	30
รูปที่ 4.5	ผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อความสามารถในการลดความชื้น.....	31
รูปที่ 4.6	ผลของอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นต่อความสามารถในการลดความชื้น.....	31
รูปที่ 4.7	ผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น.....	33
รูปที่ 4.8	ผลของอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น.....	34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรอย่างรวดเร็ว เทคโนโลยีได้รับการพัฒนาและคิดค้นขึ้นมากมาย ส่งผลให้แหล่งพลังงานลดลง ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เทคโนโลยีระบบทำความร้อน ระบายอากาศ และทำความเย็น (heating ventilation and air conditioning : HVAC) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่เผชิญกับปัญหาดังกล่าว

ระบบ HVAC มีส่วนสำคัญในด้านการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งพบว่ามีการใช้ตั้งแต่ในระดับครัวเรือนไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมการถนอมและผลิตอาหาร (น้ำผลไม้ แป้งสำหรับทำอาหาร ลูกกวาด และคุกกี้) อุตสาหกรรมยา (แคปซูล และผงยา) อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ งานสถาปัตยกรรม และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการลัดวงจร และการกักความร้อน เป็นต้น เนื่องจากอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลกระทบต่อในหลายด้าน เช่น ทำให้เชื้อโรคจับตัวกับฝุ่นและเกิดการแพร่กระจายได้ง่ายขึ้น ทำให้เหล็กที่สัมผัสกับหยดน้ำที่เกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำเกิดสนิม เกิดเชื้อราในท่อขนส่งผ่านลม ซึ่งพบในอุตสาหกรรมบรรจุผงกาแฟ ผงปรุงรสของบะหมี่สำเร็จรูป หรืออุตสาหกรรมผลิตยาผง ดังนั้นอากาศแห้งจึงจำเป็นสำหรับการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และการขนส่ง

การลดความชื้นในอากาศ (air dehumidification) เป็นส่วนหนึ่งของระบบ HVAC มีหลายเทคโนโลยีที่ถูกใช้สำหรับการลดความชื้นในอากาศ เทคโนโลยีที่นิยมใช้งานกันมีอยู่ 2 ระบบ คือระบบทำความเย็นทางกล (mechanical refrigeration) ซึ่งเหมาะสำหรับลดความชื้นในอากาศที่มีอุณหภูมิสูง แต่ได้อากาศแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง และระบบการลดความชื้นโดยใช้สารดูดซับความชื้น (desiccant dehumidification) ซึ่งเหมาะสำหรับลดความชื้นในอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ และได้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

การลดความชื้นโดยใช้สารดูดซับความชื้นชนิดของแข็งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสารดูดซับความชื้นที่ใช้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ โดยการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในกระบวนการคายซับ (desorption) ความชื้นออกจากสารดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นความชื้น การนำสารดูดซับความชื้นที่อยู่ในเครื่องลดความชื้นกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้โดยการป้อนอากาศร้อนให้ไหลผ่านสารดูดซับความชื้น อากาศที่ได้ออกมาจะมีอุณหภูมิลดลงและความชื้นเพิ่มขึ้น

นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาระบบการคายซับเพื่อนำสารดูดซับความชื้นชนิดของแข็งกลับมาใช้ใหม่ [1]–[6] โดยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระบบการคายซับออกจากสารดูดซับความชื้นโดยใช้สารดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง คือซิลิกาเจล บรรจุอยู่ในเบดนิ่ง (packed bed) พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ และใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของกระบวนการคายซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหลักการทำงานของระบบลดความชื้นแบบเบตบรรจุสารดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการคายซับด้วยวิธีการแก้ปัญหาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB
- 2) เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ได้กับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ
- 3) ศึกษาตัวแปรและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการคายซับ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้น และอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้น
- 4) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับระบบลดความชื้นแบบเบตบรรจุสารดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และพื้นฐานของระบบการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นิยามของการดูดซับ กลไกการดูดซับ คุณสมบัติของสารดูดซับ กระบวนการคายซับ และวัฏจักรการดำเนินงานของระบบลดความชื้น นอกจากนี้นิยามของประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นได้ถูกอธิบายไว้ ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและการสร้างแบบจำลองของกระบวนการคายซับสำหรับเบตบรจุสารดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง

2.1 แนวคิดสำหรับระบบการสร้างแบบจำลอง

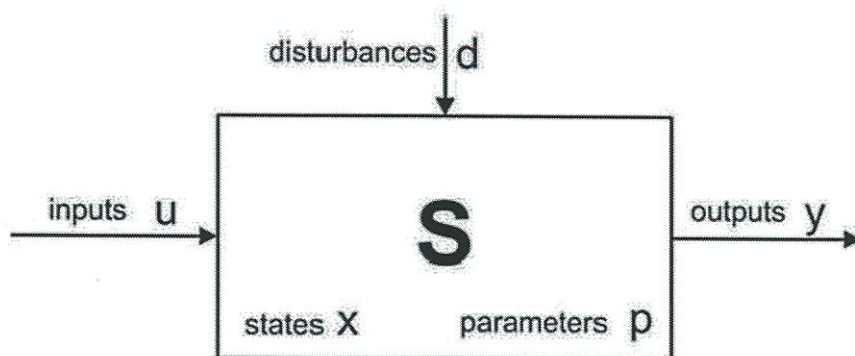
ในการสร้างหรือพัฒนาแบบจำลอง เราจำเป็นต้องมีวิธีการจัดการแบบจำลองอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้มุมมองของระบบให้เข้ากับการสร้างแบบจำลอง รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของระบบทั่วไปที่แสดงแนวคิดในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจะช่วยให้ผู้สร้างแบบจำลองอธิบายระบบของตนเองได้ เช่น แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความซับซ้อน การศึกษาแบบจำลองการปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ปฏิบัติงานกับเทคโนโลยี หรือการฉีดสารเคมีผสมใส่พื้นผิวใบไม้เพื่อการเกษตร เป็นต้น ความท้าทายสำหรับผู้สร้างแบบจำลอง คือต้องมีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งต่อระบบที่กำลังศึกษาอยู่ จากรูปที่ 2.1 ระบบทั่วไป (S) มีขอบเขตเป็นดังรูป และประกอบไปด้วยข้อมูลที่ป้อนเข้า ผลลัพธ์ และตัวรบกวน แสดงดังนี้ [7]

- ขอบเขต (boundary) เป็นข้อจำกัดของการพิจารณาแบบจำลอง โดยการสร้างแบบจำลองจะต้องมีการกำหนดขอบเขตไว้อย่างชัดเจน ซึ่งการกำหนดขอบเขตที่ต่างกันไปจะทำให้เป้าหมายที่ต้องการเปลี่ยนตามด้วย

- ระบบ (system, S) เป็นส่วนหลักในขอบเขต และเป็นกลไกหลักที่ผู้สร้างแบบจำลองต้องทำความเข้าใจ ซึ่งมีหลายความหมาย เช่น ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ คน อนุภาค เป็นต้น

- สถานะ (states, x) เป็นตัวที่บอกสถานะของระบบ ณ เวลา และตำแหน่งใดๆ มีหน้าที่ระบุคุณสมบัติที่สำคัญของระบบ และมักจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่แสดงถึงจำนวนของมวล พลังงานหรือโมเมนตัมในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบทั่วไปสำหรับแบบจำลอง [7]

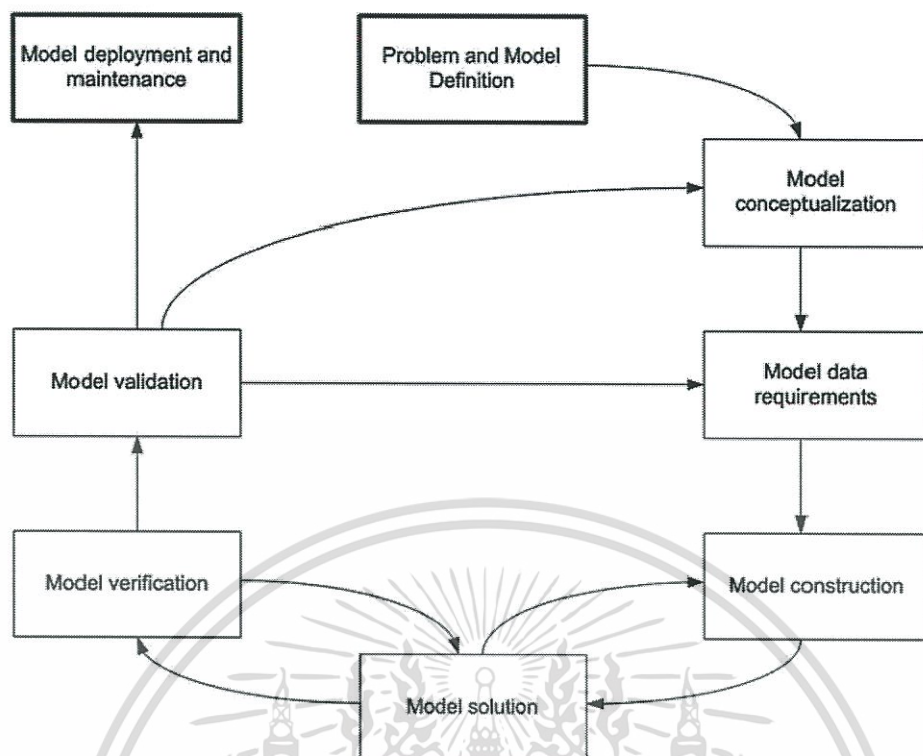
- ข้อมูลที่ป้อนเข้า (input, u) เป็นตัวที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของระบบ เช่น อัตราการไหล อุณหภูมิ เป็นต้น
- ผลลัพธ์ (output, y) เป็นตัวที่สะท้อนถึงคุณสมบัติภายในของระบบ เช่น อัตราการผลิต เป็นต้น
- ตัวรบกวน (disturbances, d) เป็นตัวที่ไม่สามารถควบคุมได้ตามปกติ เช่น คุณภาพของวัตถุดิบ เป็นต้น
- พารามิเตอร์ (parameters, p) เป็นตัวที่กำหนดให้เป็นค่าคงที่ในระบบที่เราสนใจ

2.2 วิธีการสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองวิธีการสร้างแบบจำลองของ Cameron & Newell (2008) เป็นวิธีต้นแบบที่ใช้กันทั่วไป ซึ่ง Cameron & Newell ได้อธิบายแนวคิดที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองโดยแบ่งออกเป็น 8 หัวข้อ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [8]

- ปัญหา และนิยามของแบบจำลอง (problem and model definition)
- แนวความคิดของแบบจำลอง (model conceptualization)
- ข้อมูลที่จำเป็นต่อแบบจำลอง (model data requirements)
- การสร้างแบบจำลอง (model construction)
- การแก้ปัญหาแบบจำลอง (model solution)
- การยืนยันแบบจำลอง (model verification)
- การตรวจสอบแบบจำลอง (model validation)
- การใช้งาน และการบำรุงรักษาแบบจำลอง (model deployment and maintenance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการสร้างแบบจำลอง [8]

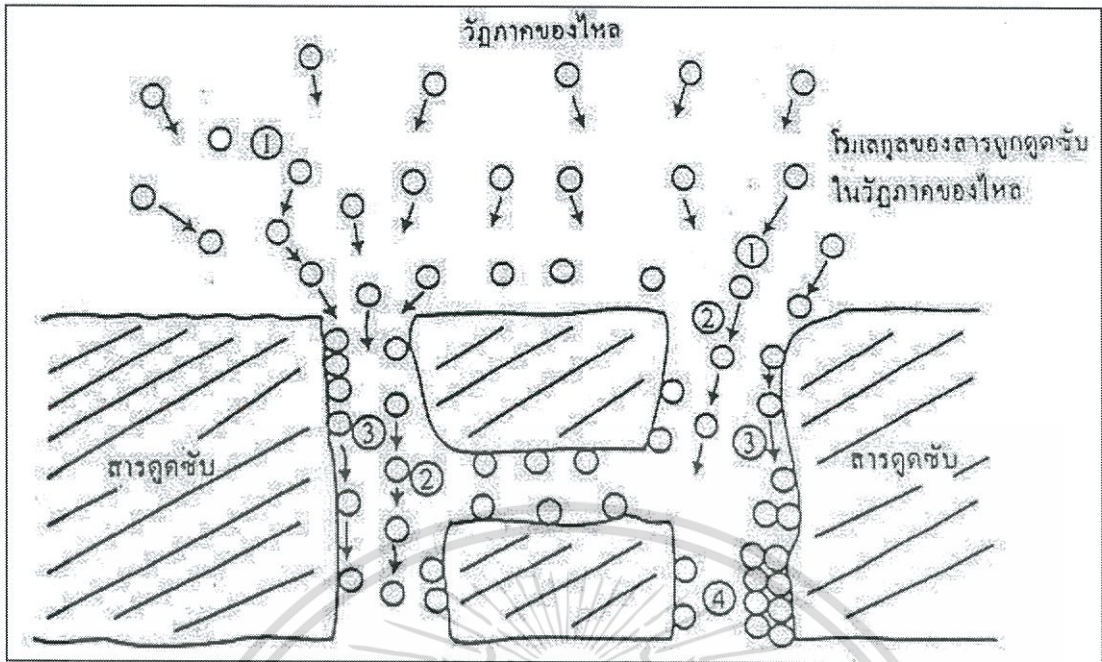
2.3 การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับสารเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (ก๊าซ ไอ ของเหลว) เช่น ผิwrวมระหว่างก๊าซกับของเหลว ผิwrวมระหว่างของเหลวกับของเหลว ผิwrวมระหว่างก๊าซกับของแข็ง เป็นต้น โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก ซึ่งจะเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ หรือสารถูกดูดซับ (adsorbate)” โดยกลไกของการแพร่ไปสะสมอยู่บนพื้นผิวภายในของของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็น “ตัวดูดซับ หรือสารดูดซับ (adsorbent)” ทำให้ความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนผิวของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล การดูดซับนี้เกิดขึ้นได้จากแรงกระทำ (interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ

เนื่องจากการดูดซับสารเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) ดังนั้นคุณลักษณะเบื้องต้นของสารดูดซับที่ดี หมายถึงมีความสามารถดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนัก หรือต่อหน่วยปริมาตรได้มาก ดังนั้นสารดูดซับต้องมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง หรือกล่าวอีกทางหนึ่งจะต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุน และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากเพื่อให้มีพื้นที่ผิวภายในสูงนั่นเอง อย่างไรก็ตามลักษณะของโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสม ได้แก่ สัดส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดต่างๆ ก็

มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภูมิอย่างง่ายแสดงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ [9]

รูปที่ 2.3 แสดงภาพรวมของกระบวนการดูดซับสารซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังตำแหน่งพื้นผิวภายนอกของอนุภาค (1) ตามด้วยการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับซึ่งประกอบด้วย การแพร่ภายในช่องว่างของรูพรุน (pore diffusion) (2) และการแพร่ไปบนพื้นผิวภายในรูพรุน (surface diffusion) (3) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการดูดซับบนตำแหน่งที่เหมาะสมบนพื้นผิว (adsorption site) (4) [9]

2.3.1 กลไกการดูดซับ

ระบบดูดซับสารสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแรงกระทำ หรือแรงดึงดูด เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับ โดยแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ แรงกายภาพและแรงเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของสารดูดซับ ดังนี้

1) ระบบดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption)

การดูดซับสารที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของสารดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน โดยแรงดึงดูดชนิดนี้จะค่อนข้างอ่อน และเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงดูด (dispersive or attractive force) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่อยู่รอบๆนิวเคลียสของอะตอม รูปร่างของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะไม่สมมาตรแต่จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดสภาพคู่ขั้วที่

มีระดับต่างกันระหว่างอะตอม หรือโมเลกุลของสาร ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับ และสารดูดซับ สำหรับแรงผลักระยะใกล้ (short-range repulsive) จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอม หรือโมเลกุลเข้ามาใกล้กันจนเกิดการกักรบกวนของอิเล็กตรอน

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิบรรยากาศ และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ สามารถเกิดการดูดซับได้ทั้งบนผิวของ สารดูดซับโดยตรง หรือเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับที่สะสมบนผิวของสารดูดซับแล้ว จึงจะเรียการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)”

2) ระบบดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption)

การเกิดแรงยึดเหนี่ยวจากการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน นำไปสู่การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้ อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ในลักษณะเดียวกันกับการ เกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทั่วไป ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูง ๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้น เฉพาะบนผิวของสารดูดซับเท่านั้น จึงจะเรียการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption)” [9]

2.3.2 ความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพโดยสารดูดซับจะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ การดูดซับตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ การดูดซับเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้ อีกทั้งยัง สามารถเกิดขึ้นได้เอง เมื่อสารดูดซับได้ดูดซับสารดูดซับไปบนผิวของสารดูดซับ สารดูดซับจะมี อิสรเสรีเคลื่อนที่ได้น้อยลง การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีของการดูดซับจึงลดลง ($S_{ads}-S_{gas}<0$) ซึ่งชี้ว่าภายหลังการดูดซับโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นดูดซับ (adsorbed phase) มีเสถียรภาพ มากกว่าเมื่ออยู่ในวัฏภาคของไหล ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบส์ของการดูดซับจะต้องน้อยกว่า ศูนย์ ($\Delta G<0$)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.1)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.1) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบดูดซับดังกล่าว ภายหลังการดูดซับจะลดลง ($\Delta H<0$) ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สารดูดซับ (Adsorbent)

เพื่อให้ได้สารดูดซับสามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมาก สารดูดซับที่นำมาใช้จำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง กล่าวคือต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เมื่อสารดูดซับมีโพรงภายในมากขึ้น แต่สารดูดซับมีขนาดเท่าเดิม สารดูดซับจะมีความหนาแน่นลดลง สมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับประเภทต่างๆ ที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่าแพร่หลายแสดงในตารางที่ 2.1 และสมบัติเบื้องต้นของซิลิกาเจลชนิดพื้นที่ผิวมาก และพื้นที่ผิวน้อยแสดงในตารางที่ 2.2 [9]

ความหนาแน่นของชั้นสารดูดซับแบ่งออกเป็นสามประเภท นิยามไว้ดังนี้ [10]

1) ความหนาแน่นของวัสดุสารดูดซับ (solid density, ρ_s)

สมบัติเฉพาะของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเม็ดสารดูดซับ และวัสดุเหล่านั้นมักไม่มีโพรง

2) ความหนาแน่นของเม็ดสารดูดซับ (adsorbent density, ρ_p)

ความหนาแน่นของเม็ดสารดูดซับซึ่งเป็นวัสดุของแข็งที่มีโพรงอยู่ภายในวัสดุนั้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับให้สูงมากขึ้นจากพื้นที่ผิวจำเพาะเดิม

(3) ความหนาแน่นของชั้นเม็ดสารดูดซับ (bulk density, ρ_b)

ความหนาแน่นของชั้นเม็ดสารดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับ จึงเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดสารดูดซับ (void fraction, ε) ที่บรรจุไว้ในชั้นสารดูดซับนั้น ทำให้ค่าความหนาแน่นประเภทนี้น้อยสุดเมื่อเทียบกับความหนาแน่นประเภทอื่น ๆ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเม็ดสารดูดซับและช่องว่างระหว่างเม็ดสารดูดซับ แสดงดังนี้

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

ตารางที่ 2.1 สมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับพาณิชย์ประเภทต่างๆ [9]

สารดูดซับ (Adsorbent)	ขนาดรูพรุน (pore diameter)*	ความหนาแน่นชั้นเม็ดสารดูดซับ (particle density)**	พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific area)***
ถ่านดูดซับชนิดโพรงใหญ่ (activated carbon large pore)	1 - 10 ³	0.6 - 0.8	200 - 600
ถ่านดูดซับชนิดโพรงเล็ก (activated carbon small pore)	1 - 10	0.5 - 0.9	400 - 1200
โมเลกุลลาร์ซีฟ (molecular sieve)	0.4 - 0.5, 10 - 10 ²	0.9 - 1.0	100 - 300
ผลึกอะลูมินา (activated alumina)	2 - 10	1.2 - 1.3	300 - 400
ซีโอไลต์ (zeolite)	0.3 - 1.1	1.92 - 2.8	400 - 800
ซิลิกาเจลชนิดโพรงใหญ่ (Silica gel large pore)	10 - 50	0.62	300
ซิลิกาเจลชนิดโพรงเล็ก (Silica gel small pore)	2 - 10	1.09	800

* หน่วยนาโนเมตร ** หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร *** หน่วยตารางเมตรต่อกรัมของสารดูดซับ

2.3.4 รูพรุน (Pores)

เส้นทางสำหรับการเดินทางเข้า และออกของโมเลกุลระหว่างบริเวณภายนอกกับพื้นที่ผิวภายในของอนุภาคสารดูดซับ สารดูดซับทุกชนิดที่ใช้ในกระบวนการแยกสารจะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวภายใน และความจุของการดูดซับ เราสามารถแบ่งช่วงขนาดของรูพรุนของอนุภาคสารดูดซับได้ ซึ่งในที่นี้ขนาดของรูพรุนจะหมายถึงความกว้าง หรือระยะห่างของรูพรุน หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน นิยามของขนาดรูพรุนแบ่งได้เป็นสามช่วงขนาดดังนี้

- 1) รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) ได้แก่ รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร
- 2) รูพรุนขนาดกลาง (mesopores) ได้แก่ รูพรุนที่มีขนาดอยู่ในช่วง 2 - 50 นาโนเมตร
- 3) รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) ได้แก่ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแง่ของปริมาณการดูดซับพบว่าการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในรูพรุนขนาดเล็ก เนื่องจากผนังของรูพรุนอยู่ใกล้กันมาก จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดต่อโมเลกุลสูงมาก ประกอบกับรูพรุนขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสูง ดังนั้นการดูดซับจะเกิดขึ้นในรูพรุนขนาดเล็กก่อนจนเต็มปริมาตร จากนั้นจึงจะเกิดในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เป็นลำดับ [9]

2.4 การคายซับ (Desorption)

การคายซับคือปรากฏการณ์ที่เกิดในทิศตรงกันข้ามกับการดูดซับ เกิดจากการที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิวภายในของสารดูดซับ เรียกว่า “กระบวนการคายซับ” ซึ่งเป็นกระบวนการที่กระทำเพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับไว้ออกจากสารดูดซับ ทำให้สามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เรียกกระบวนการนี้ว่า “การคืนสภาพ (adsorbent regeneration)” สำหรับกระบวนการดูดซับก๊าซ การคายซับทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การลดความดันของระบบ และการให้ความร้อนแก่ระบบ โดยใช้ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูง ได้แก่ ไอน้ำ ก๊าซเฉื่อย หรือก๊าซผสมจากกระบวนการอื่น เป็นต้น [9]

2.4.1 การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจากการใช้งานจริง กระบวนการดูดซับสารจะถูกจำกัดด้วยความจุของสารดูดซับ กล่าวคือ เมื่อสารดูดซับถูกใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง และเกิดสภาพอิ่มตัว (saturation) จะต้องทำการคืนสภาพให้กับสารดูดซับเป็นระยะๆ เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ เป็นการประหยัดการใช้สารดูดซับ ซึ่งการคืนสภาพสารดูดซับสามารถทำได้โดย 2 วิธีดังนี้

1) ระบบดูดซับแบบแปรอุณหภูมิ (temperature swing adsorption: TSA)

ในระบบนี้การนำสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วกลับมาใช้ใหม่จะทำได้โดยการให้ความร้อนกับระบบดูดซับ เช่น การใช้ไอน้ำ หรือก๊าซร้อน เพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับให้ไหลปนออกมากับตัวกลางให้ความร้อน วิธีการนี้ใช้ได้กับระบบดูดซับที่ความเข้มข้นของสารดูดซับอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากการให้ความร้อนจะช่วยให้การไล่สารในปริมาณน้อยเกิดได้อย่างรวดเร็ว

2) ระบบดูดซับแบบสลับความดัน (pressure swing adsorption: PSA)

ในระบบนี้จะใช้วิธีลดความดันของระบบเพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับที่ใช้งานจนอิ่มตัวแล้ว เป็นวิธีที่สามารถใช้กับระบบดูดซับที่มีอัตราไหลสูงได้ดี เนื่องจากมีความรวดเร็ว และคล่องตัวของวงจรการทำงาน ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรการดูดซับ และวงจรการคายสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งทำงานสลับกัน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 แหล่งความร้อนที่ใช้คายซับ

วิธีอย่างง่ายที่ใช้คืนสภาพให้กับสารดูดซับที่ดูดซับความชื้นในอากาศเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่คือระบบดูดซับแบบแปรอุณหภูมิ โดยการให้ความร้อนกับระบบดูดซับ ซึ่งเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย และสามารถลดต้นทุนได้โดยการใช้ความร้อนจากแหล่งความร้อนต้นทุนต่ำ ได้แก่ ความเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม และความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น

1) ความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat)

ความร้อนที่ใช้ไม่หมดจากกระบวนการดำเนินงานต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม หรือพลังงานที่ไหลออกไปพร้อมกับกระแสของอากาศ ก๊าซไอเสีย ของเหลว ที่ออกไปจากขอบเขตของอาคารหรือโรงงาน สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานเหล่านั้นไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างของความร้อนทิ้งดังกล่าว ได้แก่

- ก๊าซไอเสียจากอุปกรณ์ที่มีการเผาไหม้ เช่น อุตสาหกรรม หม้อไอน้ำ
- ก๊าซหรือลมร้อนจากกระบวนการผลิต
- น้ำระบายความร้อน

ในระบบดูดซับสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ถือว่าเป็นอากาศที่มีพลังงานอยู่ใน เมื่อผ่านอากาศร้อนเข้าไปในสารดูดซับที่อิ่มตัว จะช่วยให้เกิดการคืนสภาพของสารดูดซับได้ [11]

2) ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (solar thermal energy)

ระบบเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงรังสีคลื่นสั้น (short wave radiation) ให้เป็นพลังงานความร้อนผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) โดยอาศัยอุปกรณ์ในการรวมแสงอาทิตย์เพื่อสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์ ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้รวมแสงอาทิตย์ ได้แก่

- ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการดูดซับและสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนไปให้ตัวกลาง (medium) ที่ลำเลียงไปตามระบบท่อเพื่อนำไปใช้

- ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ (flat plate collector) คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นแผงโลหะ ประกอบด้วยตัวดูดกลืนที่เป็นแผ่นเรียบรับแสงทำด้วยโลหะ และมีระบบท่อเชื่อมติดอยู่ด้านบนของแผ่นรับแสงปิดทับด้วยกระจก ด้านบนแผ่นรับแสงเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสีช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์ส่อง

เข้ามาในแผงโลหะ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดูดกลืนจะส่งผ่านให้ตัวกลางเพื่อนำความร้อนไปใช้

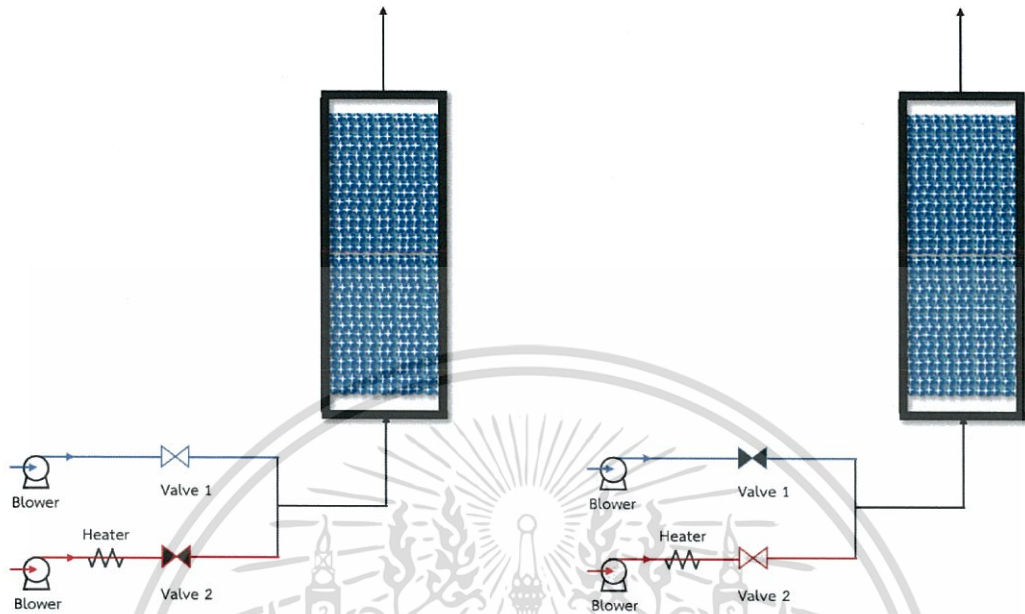
- ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลิก (parabolic trough collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีแผ่นสะท้อนแสง (reflector) รูปทรงพาราโบลาค่อยรวมแสงอาทิตย์ไปยังจุดโฟกัส ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งแนวท่อที่มีตัวกลางไหลผ่านทำให้ดูดกลืนความร้อนได้ในปริมาณสูงมาก ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลิกยังสามารถออกแบบให้มีระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าเพื่อรับแสงอาทิตย์จากรังสีตรง (direct radiation) ความเข้มสูงได้ตลอดทั้งวัน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานให้เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย [12]

ตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ การศึกษาการคืนสภาพให้กับสารดูดซับจากการประยุกต์ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการคายซับ ซึ่งใช้ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลิกผสมมาเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่อากาศร้อนที่ใช้คืนสภาพสารดูดซับ

2.5 วัฏจักรการดำเนินงานของระบบลดความชื้นแบบเบตบรจุ

วัฏจักรการดำเนินงานของเบตบรจุสารดูดซับความชื้นได้รับการออกแบบเพื่อประเมิณผลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบการลดความชื้นแบบเบตบรจุ รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศที่ใช้ในการจำลองระบบลดความชื้นแบบเบตบรจุนี้ ระบบประกอบด้วยหนึ่งเบตบรจุสารดูดซับความชื้นและวาล์วควบคุมสองตัว สารดูดซับความชื้นคือซิลิกาเจลที่มีอนุภาคทรงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค 3.5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดของเบตมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร ความพรุนของซิลิกาเจลเท่ากับ 0.35 วัฏจักรการดำเนินงานเริ่มจากกระบวนการดูดซับความชื้น ป้อนลมจะทำงานโดยป้อนลมเข้าระบบ วาล์วหมายเลข 1 จะถูกเปิดใช้งานเพื่อให้อากาศชื้นไหลเข้าสู่เบตบรจุสารดูดซับความชื้นและเกิดกระบวนการดูดซับความชื้น ในขณะที่วาล์วหมายเลข 2 จะถูกปิดไว้ เมื่อเบตบรจุสารดูดซับความชื้นดูดซับความชื้นจนอิ่มตัวแล้ว เพื่อต้องการนำสารดูดซับความชื้นกลับมาใช้ใหม่วาล์วหมายเลข 2 จะถูกเปิดใช้งานเพื่อเปลี่ยนแปลงเป็นโหมดกระบวนการคายซับ โดยอากาศที่ไหลผ่านวาล์วหมายเลข 2 ที่ถูกให้ความร้อนโดยเครื่องให้ความร้อน อากาศจะไหลเข้าสู่เบตบรจุสารดูดซับความชื้นและเกิดกระบวนการคายซับความชื้น โดยอากาศที่ออกมาจากเบตจะมีความชื้นสูงกว่าขาเข้า การเกิด

กระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับซ้ำๆอย่างสม่ำเสมอลักษณะนี้จะเรียกว่าการดำเนินงานเป็นวัฏจักรของระบบลดความชื้น



(a) กระบวนการดูดซับ

(b) กระบวนการคายซับ

รูปที่ 2.4 แผนภาพการไหลของระบบลดความชื้นแบบหนึ่งเบตบรรจุ

2.6 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับ และคายซับ

ระบบลดความชื้นมีตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับ และคายซับในระบบลดความชื้นแบบเบตหนึ่งบรรจूसารดูดซับซิลิกาเจลดังต่อไปนี้

2.6.1 ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ และคายซับ

ตัวแปรต่างๆที่ต้องใช้ในการจำลองกระบวนการดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมบัติของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับภายใต้สภาวะที่ทำการจำลอง ซึ่งสมการส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสมการเอมพิริคัล ดังนี้

- 1) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของเบต (k_b) [6]

$$k_b = k_a^\varepsilon k_s^{1-\varepsilon} \quad (2.3)$$

- 2) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซิลิกาเจล (k_s) [6]

$$k_s = 0.37 + 0.97q + 0.0014T_s \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศกับซิลิกาเจล (c_a, c_s) [6]

$$c_a = 1,884w_a + 1,004(1 - w_a) \quad (2.5)$$

$$c_s = 4,186q + 921 \quad (2.6)$$

4) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ (H_A) [13]

$$H_A = \begin{cases} 1,000(3,500 - 12,400q) & q \leq 0.05 \\ 1,000(2,950 - 1,400q) & q > 0.05 \end{cases} \quad (2.7)$$

5) อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่สมดุลกับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล (w_s) [6]

$$w_s = \frac{0.622RH_s \times P_{sat}}{P_{tot} - (RH_s \times P_{sat})} \quad (2.8)$$

6) ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (RH_s) [13]

ไอโซเทอมความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล

$$RH_s = 55.61 - 2,069.22q + 27,864.76q^2 - 169,543.09q^3 + 560,955.771q^4 - 968,999.184q^5 + 682,782.534q^6 \quad (2.9)$$

7) ความดันอิ่มตัว (P_{sat}) [14]

$$\ln P_{sat} = 16.2886 - \frac{3816.44}{T_s + 227.02} \quad (2.10)$$

8) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และความร้อน (h_m, h) [6]

$$h_m = 0.704 \rho_a v \text{Re}^{-0.51} \quad (2.11)$$

$$h = 0.683 \rho_a v c_a \text{Re}^{-0.51} \quad (2.12)$$

9) เลขเรย์โนลด์ (Re) [13]

$$\text{Re} = \frac{2Rv}{V} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 สมการดุลมวลในเฟสก๊าซ

อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นในอากาศกับตำแหน่งภายในเบต ณ เวลาต่าง ๆ [6]

$$\frac{\partial w_a}{\partial t} = -\frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon A_b} \frac{\partial w_a}{\partial z} - \frac{h_m a}{\rho_a \varepsilon} (w_a - w_s) \quad (2.14)$$

โดยมีสภาวะเริ่มต้น (initial condition) และขอบเขต (boundary condition) คือ

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

2.6.3 สมการดุลมวลในเฟสของแข็ง

อธิบายอัตราการถ่ายโอนมวลของสารดูดซับ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำในซิลิกาเจล เท่ากับอัตราการถ่ายโอนมวลของน้ำในอากาศต่อน้ำหนักของซิลิกาเจล [6]

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\dot{m}_a}{m_s} (w_{a,in} - w_{a,out}) \quad (2.15)$$

โดยมีสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) คือ

ที่ $t = 0$ และทุกค่า z , $q = q_0$

2.6.4 สมการดุลพลังงานในเฟสก๊าซ

อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเมื่อเกิดการดูดซับที่ตำแหน่งภายในเบต ณ เวลาต่าง ๆ [6]

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -\frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon A_b} \frac{\partial T_a}{\partial z} + \left(-\frac{ha}{\rho_a c_a \varepsilon} + \frac{c_v h_m a}{\rho_a c_a \varepsilon} (w_a - w_s) \right) (T_s - T_a) \quad (2.16)$$

โดยมีสภาวะเริ่มต้น (initial condition) และขอบเขต (boundary condition) คือ

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

2.6.5 สมการดุลพลังงานในเฟสของแข็ง

อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบตที่ตำแหน่ง ณ เวลาต่าง ๆ โดยคิดความสำคัญของการนำความร้อนในแนวแกนเป็นหลัก [6]

$$k_b \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + H_A h_{ma} (w_a - w_s) + ha (T_a - T_s) = \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (2.17)$$

โดยมีสภาวะเริ่มต้น (initial condition) คือ

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

2.7 ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น

ในงานวิจัยนี้ได้นิยามประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นแบบเบตบรจู่ไว้ 2 แบบด้วยกัน ได้แก่

1) ความสามารถในการลดความชื้น (moisture removal capacity: MRC) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.18

$$MRC = \frac{\dot{m}_a}{\Delta t_{cycle}} \int_0^{\Delta t_{ad}} |w_{a,in} - w_{a,out}| dt \quad (2.18)$$

โดย Δt_{cycle} คือช่วงเวลาของกระบวนการดูดซับความชื้นและกระบวนการคายความชื้นซึ่งกำหนดให้ค่า $\Delta t_{ad} = \Delta t_{de}$ โดย $w_{a,in}$ และ $w_{a,out}$ เป็นอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในอากาศชื้นและอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟู สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานของระบบลดความชื้นระบบจะทำงานจนกระทั่ง $MRC_{ad} = MRC_{de}$ ซึ่งหมายความว่าระบบจะทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา

2) สัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (dehumidification coefficient of performance: DCOP) คืออัตราส่วนระหว่างความร้อนแฝงระหว่างกระบวนการดูดซับความชื้นกับความร้อนสัมผัสในระหว่างกระบวนการฟื้นฟู ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.19

$$DCOP = \frac{LH \times \dot{m}_{ad} \int_0^{\Delta t_{ad}} (w_{a,in} - w_{a,out}) dt}{c_a \times \dot{m}_{de} \int_0^{\Delta t_{de}} (T_{a,in,de} - T_{a,amb}) dt} \quad (2.19)$$

โดย LH คือความร้อนแฝงของไอน้ำในอากาศชื้น ส่วน Δt_{ad} และ Δt_{de} คือช่วงเวลาของกระบวนการดูดซับความชื้นและกระบวนการคายความชื้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดแจ้ง (Finite Difference Explicit Method)

ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดแจ้งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบพาราโบลิก ตัวอย่างของปัญหาที่ใช้ทำความเข้าใจและอธิบาย คือปัญหาของการถ่ายเทความร้อนในแท่งโลหะภายใต้สถานะไม่คงที่ (non-steady state) ซึ่งแสดงเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้ [15]

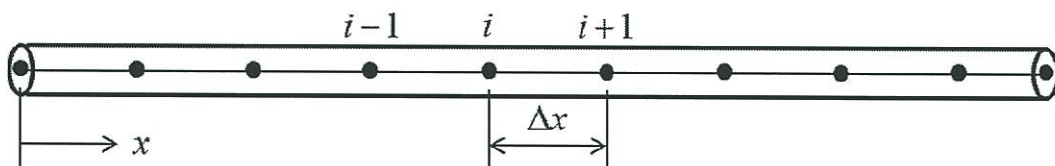
$$\frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.20)$$

เริ่มต้นจากการแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายส่วนโดยกำหนดให้แต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ Δx และส่วนต่างๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อต่างๆ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ $i-1, i, i+1$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จุดต่อต่างๆ จะเป็นตำแหน่งที่ใช้คำนวณอุณหภูมิ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการใช้การประมาณของผลต่างแบบไปข้างหน้า (forward difference) เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่แปรผันกับเวลาดังสมการที่ 2.21

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (2.21)$$

ขณะเดียวกันก็จะประยุกต์ใช้การประมาณผลของผลต่างแบบตรงกลาง (central difference) เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับสองที่แปรผันกับระยะทาง ดังสมการที่ 2.22

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.5 การแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายๆส่วนเพื่อใช้กับวิธีการแบบชัดแจ้ง [15]

นำสมการ (2.21) และ (2.22) มาแทนกลับลงในสมการเชิงอนุพันธ์ (2.20) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

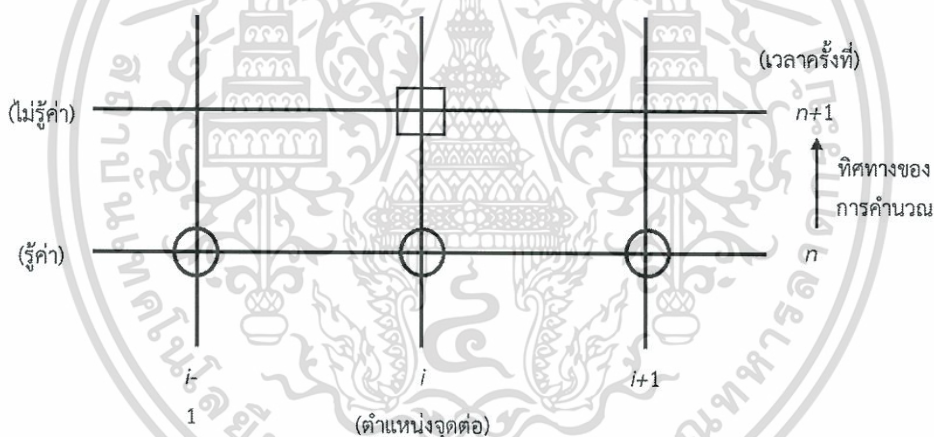
$$\frac{k}{\rho c} \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (2.23)$$

ทำการจัดพจน์ต่างๆจะได้สมการที่ (2.23)

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \alpha(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) \quad (2.24)$$

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

จากสมการที่ (2.24) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่จุดต่อ i ณ เวลาครั้งที่ $n+1$ สามารถคำนวณได้โดยตรงจากอุณหภูมิของ 3 จุดต่อที่ $i-1, i$ และ $i+1$ ซึ่งรู้ค่ามาแล้วจากการคำนวณที่เวลาครั้งที่ n ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพการคำนวณโดยระเบียบวิธีแบบชัดเจน [15]

วิธีการคำนวณโดยระเบียบวิธีแบบชัดเจนมีข้อจำกัด คือ เมื่อเรากำหนดจุดต่อที่ระยะห่างกันเท่ากับค่า Δx ค่าใดค่าหนึ่งแล้ว จะก่อให้เกิดเงื่อนไขของการใช้ Δt สูงสุดได้เพียงค่าๆหนึ่งซึ่งเรียกว่าเป็นค่าช่วงเวลาวิกฤติ (critical time step) หากใช้ Δt ที่มีค่ามากกว่าค่าดังกล่าวในการคำนวณผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการลู่ออกจากผลลัพธ์ที่ควรจะเป็นซึ่งจากสมการ (2.20) ค่า Δt ควรมีค่าดังนี้

$$\Delta t \leq \frac{\rho c(\Delta x)^2}{2k} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

K.A. Ramzy และคณะ (2013) [6] ศึกษาแบบจำลองของระบบลดความชื้นแบบเบตนิ่งโดยใช้สารดูดซับความชื้นซิลิกาเจลผ่านกระบวนการดูดซับความชื้น และคายความชื้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง ในการศึกษาผลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพของวงจรลดความชื้นได้ศึกษาตัวแปรในช่วงต่างๆ ดังนี้ ความเร็วอากาศ 0.35 – 0.75 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอากาศ 27.5 – 38.0 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลเริ่มต้น 0.08 – 0.31 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมซิลิกาเจล ความสูงของเบต 0.055 – 0.215 เมตร และช่วงระยะเวลา 2,800 – 29,600 วินาที ประสิทธิภาพของวงจรลดความชื้นนิยามจากผลรวมของความร้อนแฝงที่ใช้ลดความชื้นต่อผลรวมของความร้อนจำเพาะของอากาศที่ใช้คายความชื้น จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพของวงจรสูงสุด คือ อุณหภูมิของอากาศร้อน 90 – 95 องศาเซลเซียส เมื่อความสูงของเบตมีค่าในช่วง 0.05 – 0.3 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิลิกาเจลอยู่ในช่วง 2 – 5 มิลลิเมตร

Sukhmeet และ Parm Singh (1998) [3] ศึกษาการนำสารดูดซับความชื้นชนิดของแข็งซิลิกาเจลกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เบตดูดซับความชื้นชนิดหลายชั้น และเบตดูดซับความชื้นชนิดหนึ่งชั้น การศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการนำซิลิกาเจลกลับมาใช้ใหม่ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนไปตามเวลาที่ให้อากาศร้อนไหลผ่านเบต ซิลิกาเจล 3 กิโลกรัมถูกบรรจุลงในแต่ละชั้นของเบตอย่างเท่ากัน และแผงรับแสงขนาด 2 ตารางเมตรถูกใช้เพื่อรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ไปให้ความร้อนกับอากาศก่อนเป่าเข้าสู่เบตด้วยเครื่องเป่าลม เบตที่ใช้บรรจุซิลิกาเจลมีขนาดยาว 0.28 เมตร กว้าง 0.28 เมตร และสูง 0.65 เมตร ซึ่งเบตดูดซับความชื้นแบ่งเป็นแบบ 1 - 4 ชั้น ให้แต่ละชั้นมีขนาดยาว 0.2 เมตร กว้าง 0.2 เมตร และสูง 0.09 เมตร ตัวแปรที่ศึกษาอยู่ในช่วงต่างๆ ดังนี้ ความเร็วของอากาศร้อน 0.175 – 0.55 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศร้อน 42 – 72 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้เพื่อนำซิลิกาเจลกลับมาใช้ใหม่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อน และความเร็วของอากาศร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วอากาศร้อน และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ทำให้ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) เท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้พลังงานน้อยที่สุดคือ 0.175 เมตรต่อวินาที และ 52 องศาเซลเซียส ตามลำดับโดยไม่คำนึงถึงชั้นของเบต

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน ซึ่งเนื้อหาจะประกอบไปด้วยการวางแผนทำงานวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการคำนวณ ซึ่งเริ่มจากตั้งสมมติฐานและจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมไร้หน่วย จากนั้นจึงใช้วิธีเชิงตัวเลขผลต่างสี่เหลี่ยมทำให้เป็นสมการพีชคณิตเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสุดท้ายคืองานวิจัยที่ใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลอง

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดูดซับความชื้น และคายความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง
- 2) ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 3) รวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต่อแบบจำลอง เช่น สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของซิลิกาเจลหรืออากาศ สภาวะที่ใช้ทดลอง
- 4) ศึกษางานวิจัยที่มีการทดลองเกี่ยวกับระบบที่สนใจ เพื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้ในการเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองที่ได้
- 5) ตั้งสมมติฐานเพื่อลดความยุ่งยากต่อการคำนวณ
- 6) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการทำการตุลมวลสาร และพลังงาน แล้วทำการเปลี่ยนสมการตุลมวลสาร และพลังงานที่ได้ ให้อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วยเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ
- 7) เลือกโปรแกรมที่จะใช้แก้สมการ คือ โปรแกรม MATLAB และใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจนเพื่อจัดรูปสมการเทอมไร้หน่วยที่ได้ ให้สามารถแก้ในโปรแกรมที่เลือกได้
- 8) แก้สมการเทอมไร้หน่วยที่ผ่านการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจนแล้ว ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนทางคณิตศาสตร์เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 9) เปรียบเทียบผลจากการทดลองที่อ้างอิงกับผลจากการแก้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 10) วิเคราะห์ และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) คอมพิวเตอร์ Lenovo CPU: AMD A8-6410 APU with AMD Radeon R5 Graphics 2.00 GHz, Ram: 12.0 GB, Windows 10 Education 64-bit

2) โปรแกรม MATLAB – R2017a

3.3 วิธีการคำนวณ

3.3.1 สมมติฐานของแบบจำลอง

จากระบบลดความชื้นแบบเบตนิ่งโดยใช้สารดูดซับชนิดซิลิกาเจล สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณ คือ สมการถ่ายโอนมวล และสมการถ่ายโอนพลังงาน และเพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จึงทำการตั้งสมมติฐาน ดังนี้

- 1) สารดูดซับความชื้นที่ใช้บรรจุในเบตเป็นซิลิกาเจลที่มีอนุภาคเป็นทรงกลมและมีขนาดเท่ากัน
- 2) ซิลิกาเจลสามารถดูดซับได้เพียงไอน้ำจากอากาศเท่านั้น
- 3) ปริมาณความชื้นในสารดูดซับความชื้นจะคงที่ตลอดแนวแกน r และแกน θ หมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางรัศมี แต่เปลี่ยนไปตามทิศทางในแนวแกน z เท่านั้น
- 4) ไม่คิดผลของความดันลดยภายในเบตบรรจุซิลิกาเจล
- 5) สมมติให้การถ่ายเทความร้อนผ่านเบตเกิดในแนวแกน z เท่านั้น และให้เป็นระบบแบบหุ้มฉนวน
- 6) แบบจำลองนี้จะไม่คำนึงถึงการกระจายตัวของความชื้นตามแนวแกนของเบต เพราะการถ่ายโอนมวลของของไหลผ่านเข้าไปในสารดูดซับที่มีรูพรุนเป็นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม

3.3.2 การจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบดูดซับและคายซับแบบเบตบรรจุที่อุณหภูมิไม่คงที่ ประกอบด้วยสมการหลัก 4 สมการ คือ สมการดุลมวลในเฟสของก๊าซ (2.14) สมการดุลมวลในเฟสของของแข็ง (2.15) สมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซ (2.16) และ สมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็ง (2.17) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงจัดสมการให้อยู่ในรูปของเทอมไร้หน่วยทำให้ได้รูปสมการดังนี้ [16]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$NTU_h = \frac{ha_b L}{\dot{m}c_a} \quad (3.2)$$

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

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

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

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

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

เมื่อ NTU_m คือ จำนวนหน่วยของการถ่ายโอนมวล
 NTU_h คือ จำนวนหน่วยของการถ่ายโอนความร้อน
 Bi คือ เลขไบออต
 L คือ ความยาวของเบต (m)
 \bar{z} คือ อัตราส่วนความยาวของเบต
 Le คือ เลขลิอวิส

จากสมการดุลมวลสารในเฟสของก๊าซ (2.14) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณกำหนดให้เทอมของการสะสมความชื้นในอากาศไม่ส่งผลต่อระบบ และแทนค่าสมการ (3.1) และ (3.4) ลงในสมการ (2.14) ทำให้ได้สมการดุลมวลสารในเฟสของก๊าซที่อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย ดังนี้

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

จากสมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซ (2.16) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณกำหนดให้เทอมของการสะสมความร้อนในอากาศไม่ส่งผลต่อระบบ และแทนค่าสมการ (3.1), (3.2), (3.4), (3.5) และ (3.6) ลงในสมการ (2.16) ทำให้ได้สมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซที่อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

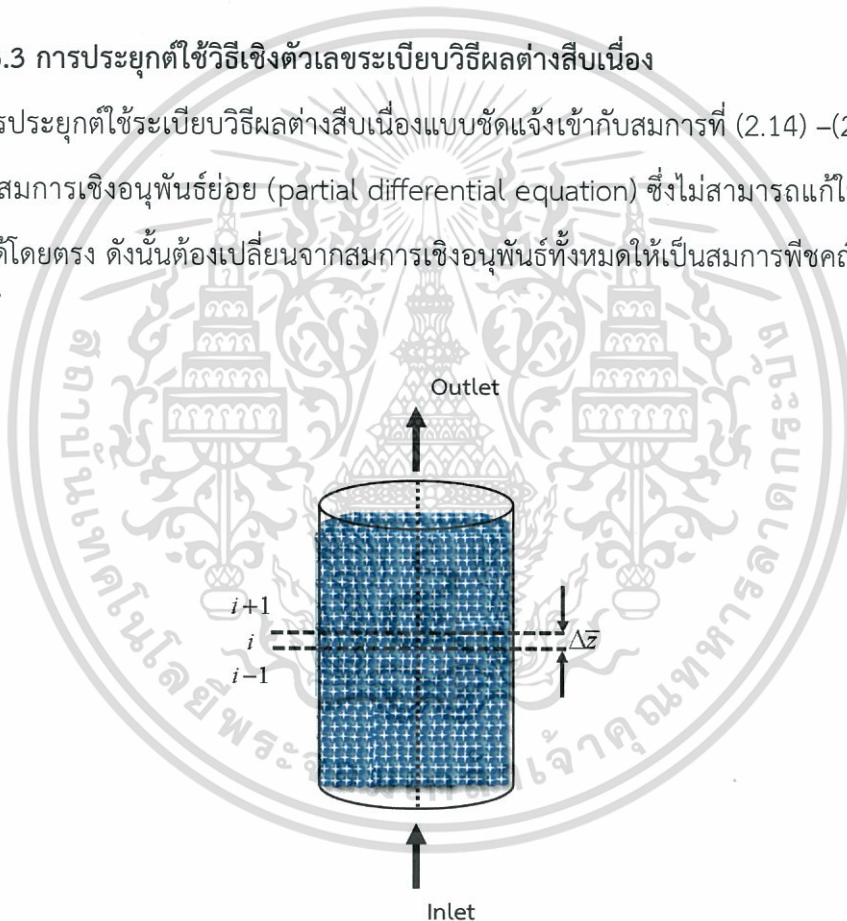
$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = \beta NTU_h (T_s - T_a) \quad (3.9)$$

จากสมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็งดังสมการ (2.17) เมื่อแทนค่าสมการ (3.3) และ (3.7) ทำให้ได้สมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็งที่อยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย ดังนี้

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

3.3.3 การประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจนเข้ากับสมการที่ (2.14) –(2.17) ที่บางสมการเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ซึ่งไม่สามารถแก้ในโปรแกรม MATLAB ได้โดยตรง ดังนั้นต้องเปลี่ยนจากสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดให้เป็นสมการพีชคณิตก่อนซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.1 เบทบรรจุสารดูดซับความชื้นที่ถูกแบ่งเป็นหลายๆส่วน

1) กำหนดขอบเขตและแบ่งเขตดูดซับออกเป็นหลายๆส่วน โดยให้แต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ Δz และเชื่อมต่อกันที่จุดต่อต่างๆซึ่งใช้สัญลักษณ์ $i-1$, i , $i+1$ และกำหนดให้ระยะห่างของเวลาแต่ละค่าใช้สัญลักษณ์ $j-1$, j , $j+1$ ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ใช้วิธีประมาณผลต่างแบบไปข้างหน้าเข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่งจากสมการดุลมวลในเฟสของก๊าซ (2.14) สมการดุลมวลในเฟสของของแข็ง (2.15) และสมการดุลพลังงานในเฟสของก๊าซ (2.16) ได้ดังนี้

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

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

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

3) ใช้วิธีประมาณผลต่างแบบตรงกลางเข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับสอง และวิธีประมาณผลต่างแบบไปข้างหน้าเข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่งจากสมการดุลพลังงานในเฟสของของแข็ง (2.17) ได้ดังนี้

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

3.3.4 การประยุกต์ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สมการทางคณิตศาสตร์ของการดุลมวลสารและการดุลพลังงานสำหรับกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับในเบดบรรจุสารดูดซับความชื้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย วิธีเชิงตัวเลขผลต่างสี่เหลี่ยมนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยจำลองและคำนวณเชิงตัวเลข โดยมีขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.2

- 1) ป้อนข้อมูลเข้าโปรแกรมเพื่อสร้าง และแนะนำตัวแปรว่ามีข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ใดบ้าง ค่าคงที่ต่างๆ และแต่ละตัวแปรที่ค่าเท่าไร
- 2) สร้างเมทริกซ์สำหรับเก็บข้อมูลโดยกำหนดเป็นความกว้าง และจำนวนครั้งในการคำนวณข้อมูล จากนั้นป้อนข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเข้าในโปรแกรม

3) สร้างระบบทำซ้ำของ i และ j เพื่อใช้ในการเก็บค่าของตัวแปรไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ ในเมทริกซ์ กำหนดให้ i คือตำแหน่งของระยะทาง (bed height step) จะแสดงตำแหน่งในแถว และ j คือตำแหน่งของเวลา (time step) จะแสดงตำแหน่งในหลัก โดยตัวแปรที่จะเก็บค่าประกอบไปด้วย อัตราส่วนของน้ำในอากาศ (w_a) อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล (q) อุณหภูมิของอากาศ (T_a) และ อุณหภูมิของเบต (T_s)

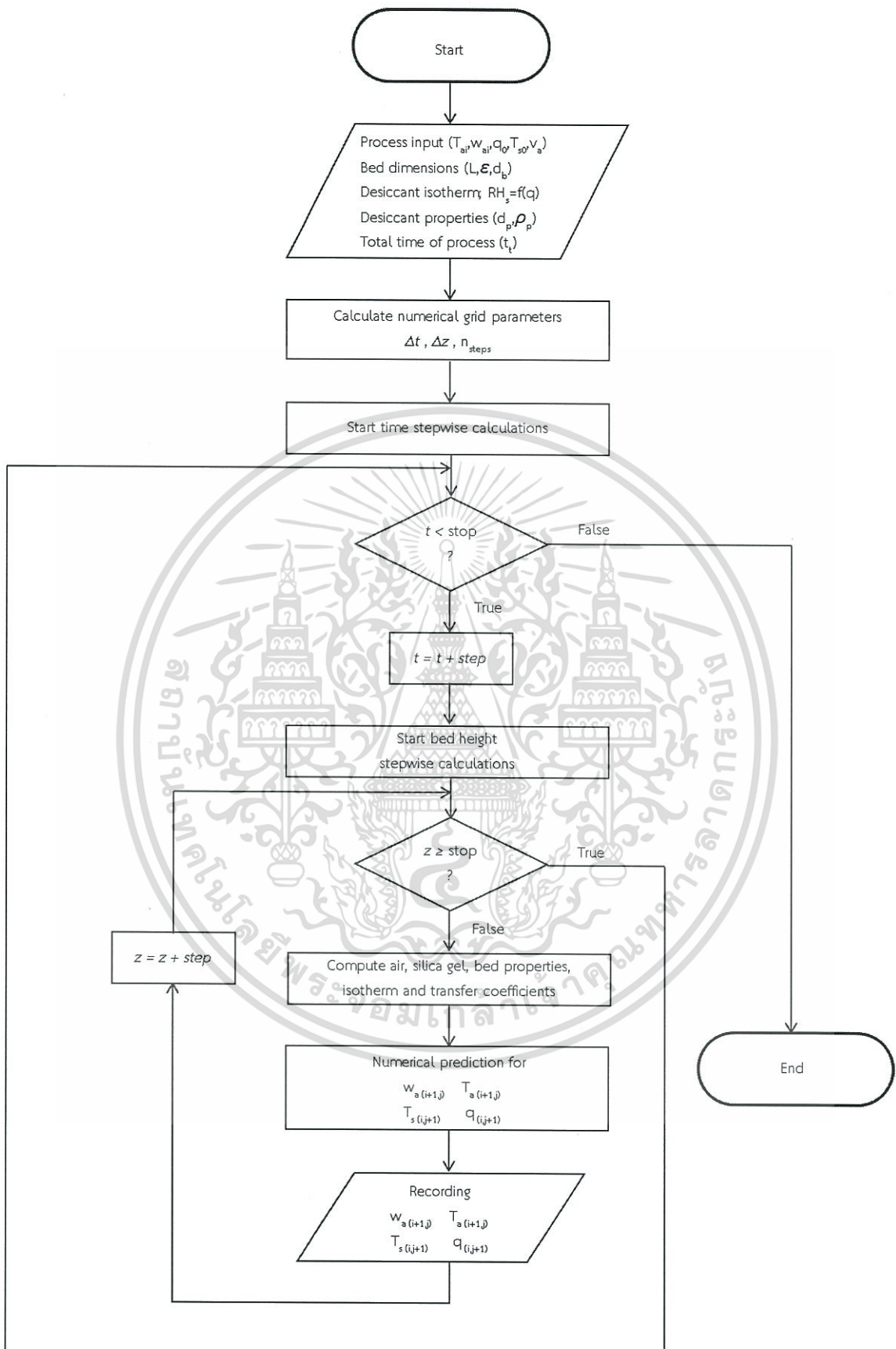
4) ในระบบทำซ้ำจะมีขั้นตอนการคำนวณ คือ คำนวณตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบลดความชื้นตั้งแต่ สมการ (2.3) ถึงสมการ (2.13) ที่ระยะทางและเวลานั้นๆ เพื่อใช้เป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณสมการดุลมวลสารและสมการดุลพลังงาน ค่าตั้งต้นจะถูกแทนเข้าในสมการดุลมวลสารและพลังงานเพื่อทำการคำนวณหาค่าของอัตราส่วนของน้ำในอากาศที่ตำแหน่งของระยะทางถัดไป ($w_{a,i+1}^j$) ดังสมการ (3.11) อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่ตำแหน่งเดิมที่เวลาถัดไป (q_i^{j+1}) ดังสมการ (3.12) อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งของระยะทางถัดไป ($T_{a,i+1}^j$) ดังสมการ (3.13) และ อุณหภูมิของเบตที่ตำแหน่งเดิมของเวลาถัดไป ($T_{s,i}^{j+1}$) ดังสมการ (3.14)

5) เมื่อผ่านระบบทำซ้ำจนครบตามความกว้างและจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ข้างต้น จะได้ค่าอัตราส่วนของน้ำในอากาศ อุณหภูมิของอากาศ อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล และอุณหภูมิของเบตที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ และสามารถนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลได้

3.3.5 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับงานวิจัย

จากการค้นหาข้อมูลสภาวะการทดลอง ผู้วิจัยได้เลือกอ้างอิงงานวิจัยของ Pesaran [13] และ Ramzy [6] ซึ่งได้ศึกษากระบวนการดูดซับความชื้น และกระบวนการคายซับความชื้นแบบเบตบรรจุสารดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจล เนื่องจากงานวิจัยทั้งสองมีความครบถ้วนของข้อมูล และเหมาะสมกับระบบที่เลือกใช้ ผลการเปรียบเทียบงานวิจัยกับแบบจำลองจะแสดงโดยค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square relative errors : RMSRE) ของค่าอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก $\sigma(w_a)$ และอุณหภูมิของอากาศขาออก $\sigma(T_a)$ ซึ่งแสดงดังสมการ

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{model}}}{X_{\text{exp}}} \right)^2}{n}} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงกระบวนการแก้สมการด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น กับผลการทดลอง จากงานวิจัยก่อนหน้า เพื่อดูว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองหรือไม่ จากนั้นจึงจะนำแบบจำลองไปใช้ในการศึกษาต่อ โดยจะศึกษาว่ามีพารามิเตอร์ตัวใดที่มีผลต่อความสามารถการลดความชื้น และนำพารามิเตอร์นั้นมาศึกษาความสามารถในการลดความชื้น และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น

4.1 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับงานวิจัย

การจำลองระบบลดความชื้นในเบตนึ่งบรรจุสารดูดซับความชื้นชนิดซิลิกาเจล ข้อมูลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของ Pesaran [13] และ Ramzy [6] ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานเพื่อที่จะเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งจะถูกนำไปใช้เพื่อหาความสามารถในการลดความชื้น และหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้นของกระบวนการดูดซับและคายซับ ข้อมูลจากการทดลองจะแสดงผลของกระบวนการดูดซับ และการคายซับสำหรับเบตนึ่งที่บรรจุสารดูดซับความชื้นชนิดซิลิกาเจลที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ข้อมูลสถานะต่างๆที่ใช้เปรียบเทียบซึ่งอ้างอิงมาจากการทดลองจากงานวิจัยได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสถานะของการทดลองจากงานวิจัยต่างๆ

Test	L (m)	d_b (m)	d_s (mm)	V (m/s)	\mathcal{E}	ρ_s (kg/m ³)	q_0 (kg _w /kg _s)	T_{s0} (°C)	$w_{a,in}$ (kg _w /kg _a)	$T_{deh,in}$ (°C)	$T_{reg,in}$ (°C)
1	0.055	0.16	3.00	0.75	0.35	1,200	0.1000	31.0	0.020	42.0	-
2	0.077	0.13	3.80	0.21	0.31	1,200	0.0417	23.3	0.010	23.3	-
3	0.060	0.16	3.00	0.75	0.35	1,200	0.2830	34.5	0.018	-	85.0
4	0.050	0.13	5.20	0.67	0.31	1,200	0.2600	25.4	0.0007	-	25.4

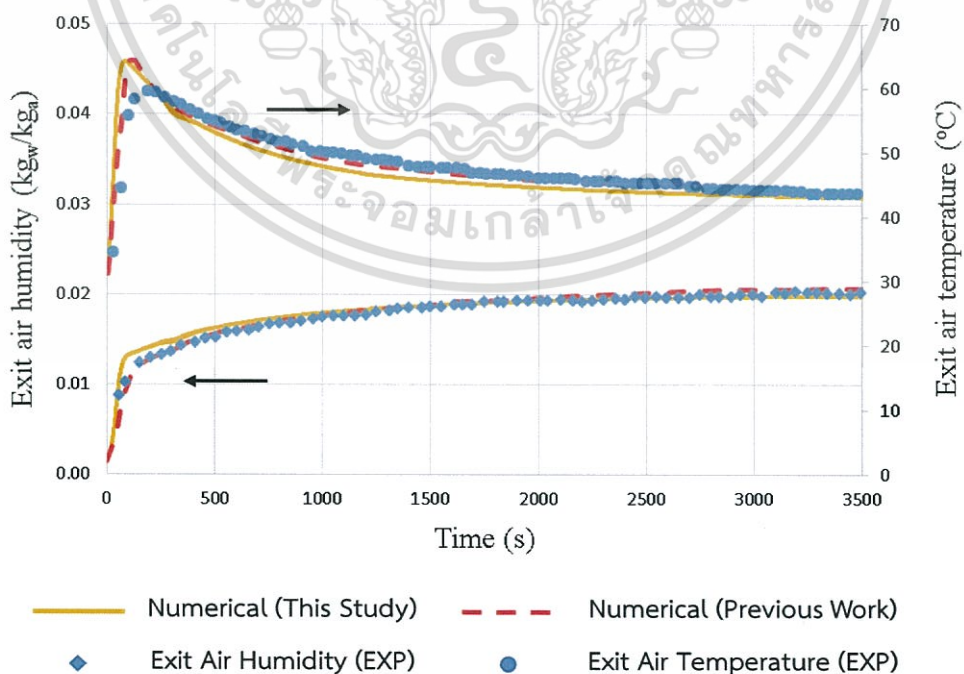
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยกำลังสองของแต่ละการเปรียบเทียบ

Test	Ref.	Process	$\sigma(w_d)$ [%]	$\sigma(T_d)$ [%]
1	[6]	Adsorption	4.74	6.33
2	[13]	Adsorption	5.54	1.58
3	[6]	Desorption	9.82	6.09
4	[13]	Desorption	7.93	3.33

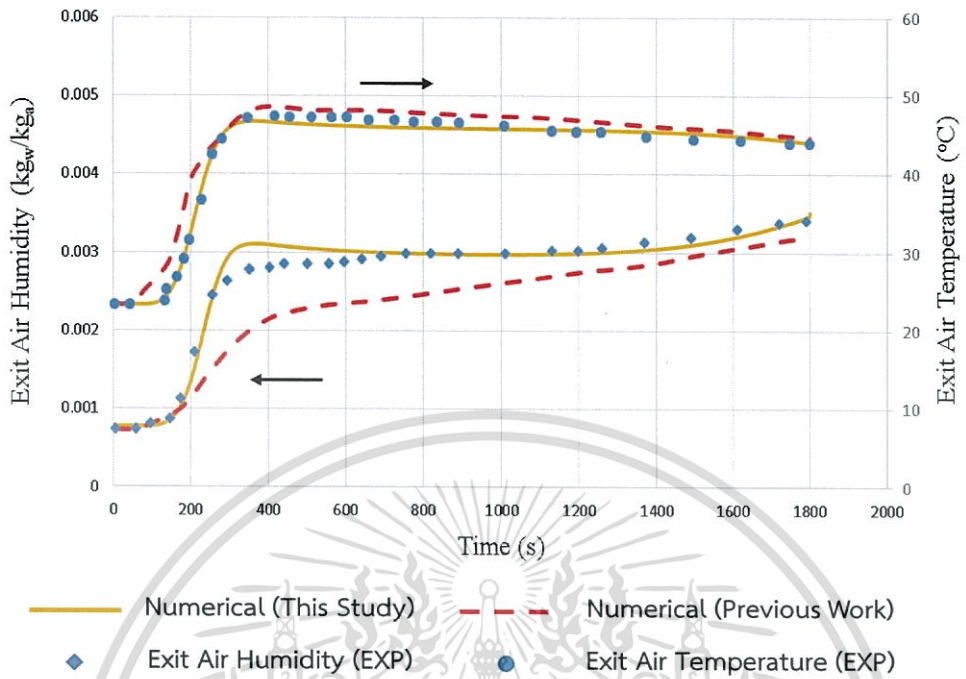
การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลของแบบจำลองของอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก และอุณหภูมิของอากาศขาออก พบว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองและผลการทดลองของ Pesaran [13] และ Ramzy [6] โดยค่าคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก และอุณหภูมิของอากาศขาออก แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

การเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองและผลของแบบจำลองระหว่างกระบวนการดูดซับแสดงในรูปที่ 4.1–4.2 พบว่าค่าคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก และอุณหภูมิของอากาศขาออกเฉลี่ยประมาณ 4.74–5.54% และ 1.58–6.33% ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองและผลของแบบจำลองระหว่างกระบวนการคายซับจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.3–4.4 มีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 7.93–9.82% และ 3.33–6.09% ตามลำดับ

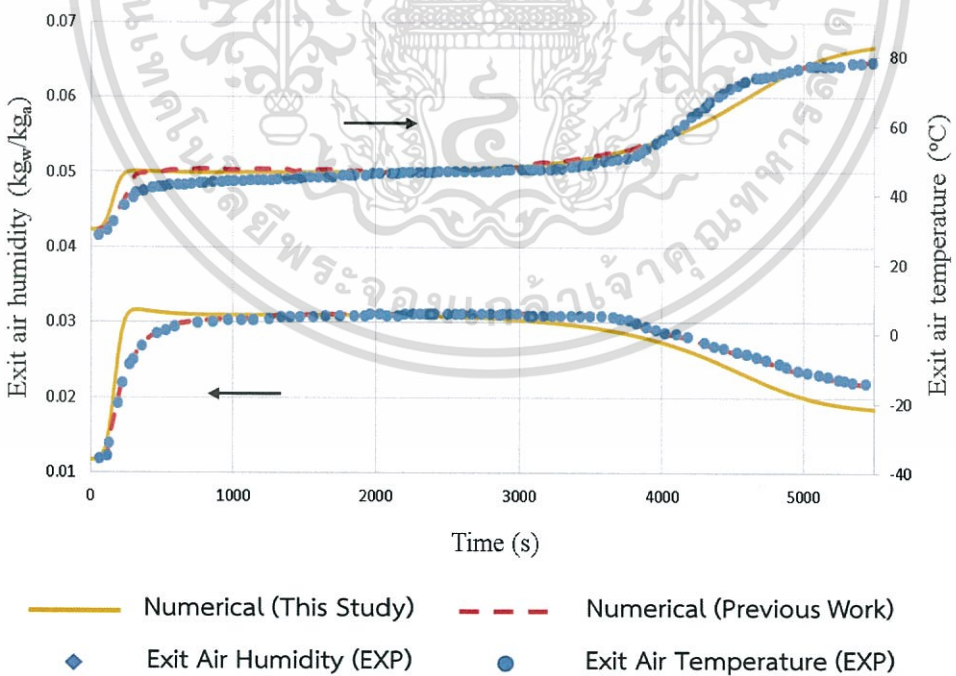


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองของกระบวนการดูดซับ (Test 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

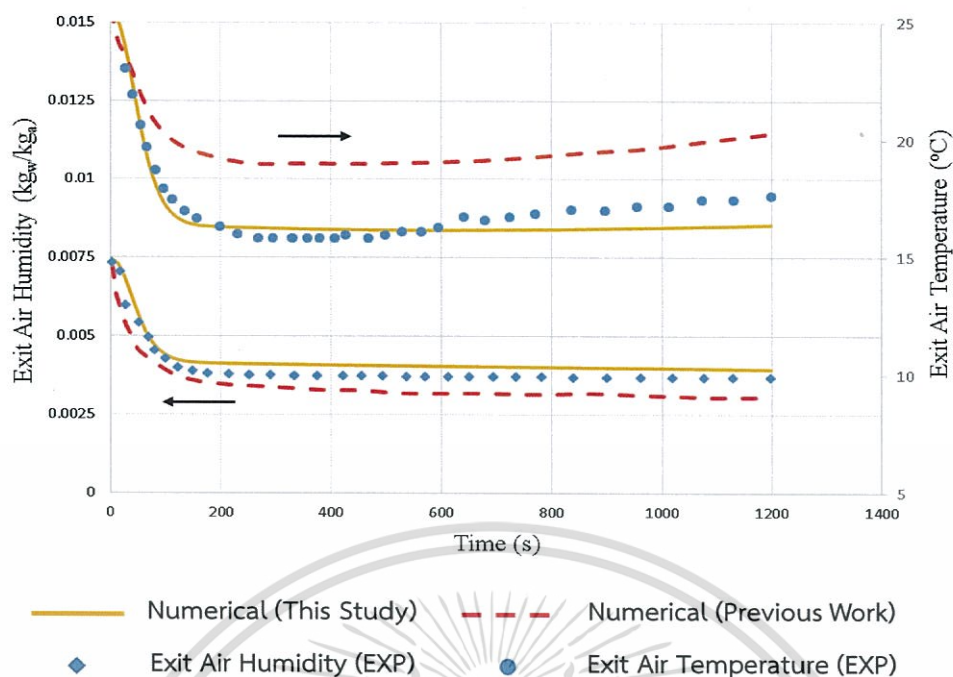


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองของกระบวนการดูดซับ (Test 2)



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองของกระบวนการคายซับ (Test 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลองของกระบวนการคายซับ (Test 4)

เนื่องจากในแบบจำลองมีการสมมติให้ความเร็วของอากาศมีค่าคงที่ตลอดแบบจำลอง และไม่คิดผลของความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบ จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ยังเป็นความคลาดเคลื่อนในช่วงที่สามารถยอมรับได้

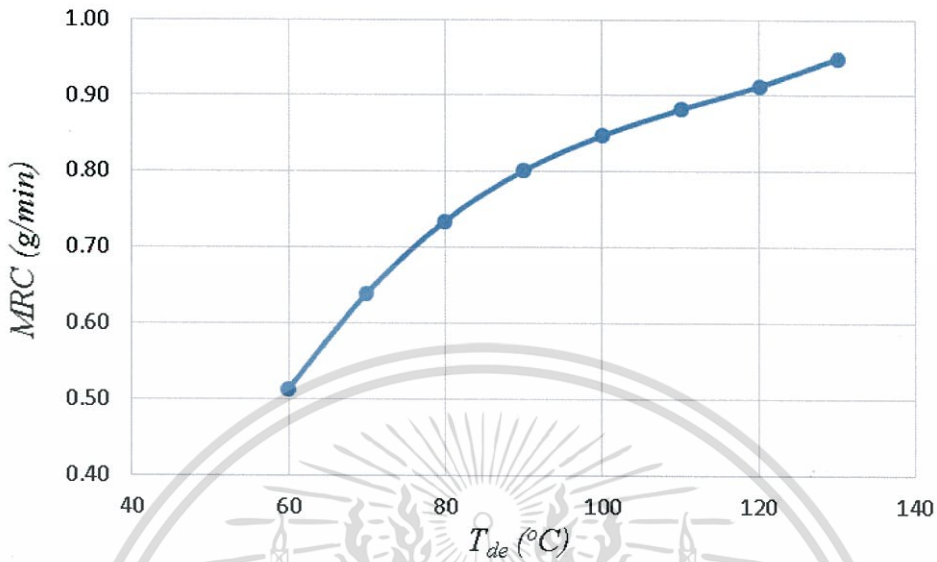
4.2 ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการลดความชื้น

จากผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขเปรียบเทียบวิธีผลต่างสลับเนื่องแบบชัดเจน โดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ได้ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นระหว่าง 60 ถึง 130 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นระหว่าง 0.2 ถึง 8

4.2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้น

การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิ 60 70 80 90 100 110 120 และ 130 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ความเร็วของอากาศชื้นและอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูมีค่าเท่ากันที่ 0.75 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า MRC จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสูง ความชื้นที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลจะถูกดึงออกได้มาก เพราะที่อุณหภูมิสูงแรง

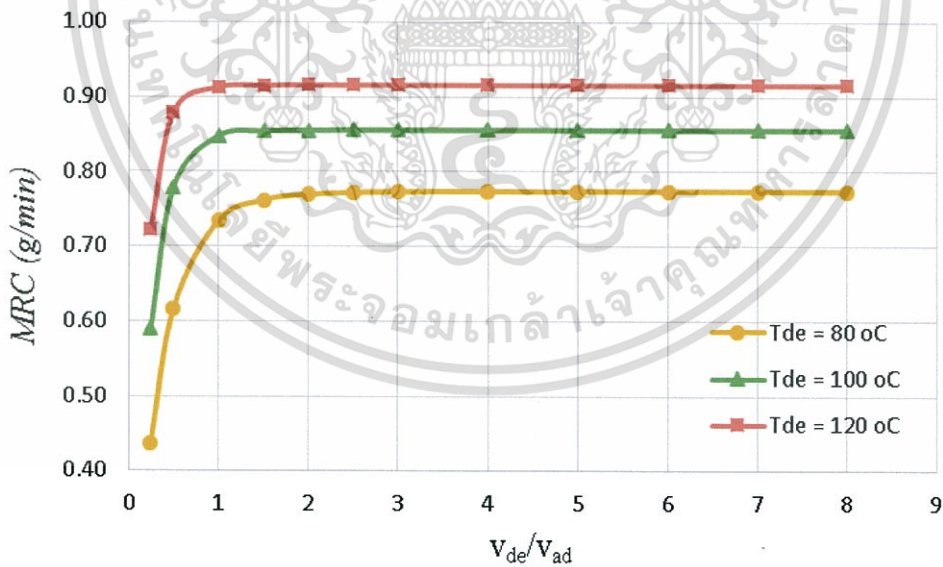
ขับเคลื่อนของไอน้ำที่ผิวของสารดูดซับและอากาศมีค่าสูง ทำให้สารดูดซับความชื้นสามารถกลับมาดูดซับได้ในปริมาณที่สูงเมื่อกลับเข้าสู่ขั้นตอนของการลดความชื้นในช่วงถัดมา



$$(q_0 = 0.08 \text{ kg}_w/\text{kg}_s, T_{s0} = 30^\circ\text{C}, w_{a,in} = 0.018 \text{ kg}_w/\text{kg}_a, T_{a,in} = 30^\circ\text{C})$$

$$L = 0.15 \text{ m}, d_b = 0.1 \text{ m}, v = 0.75 \text{ m/s}$$

รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อความสามารถในการลดความชื้น



$$(q_0 = 0.08 \text{ kg}_w/\text{kg}_s, T_{s0} = 30^\circ\text{C}, w_{a,in} = 0.018 \text{ kg}_w/\text{kg}_a, T_{a,in} = 30^\circ\text{C})$$

$$L = 0.15 \text{ m}, d_b = 0.1 \text{ m}, v_{ad} = 0.75 \text{ m/s}$$

รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นต่อความสามารถในการลดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

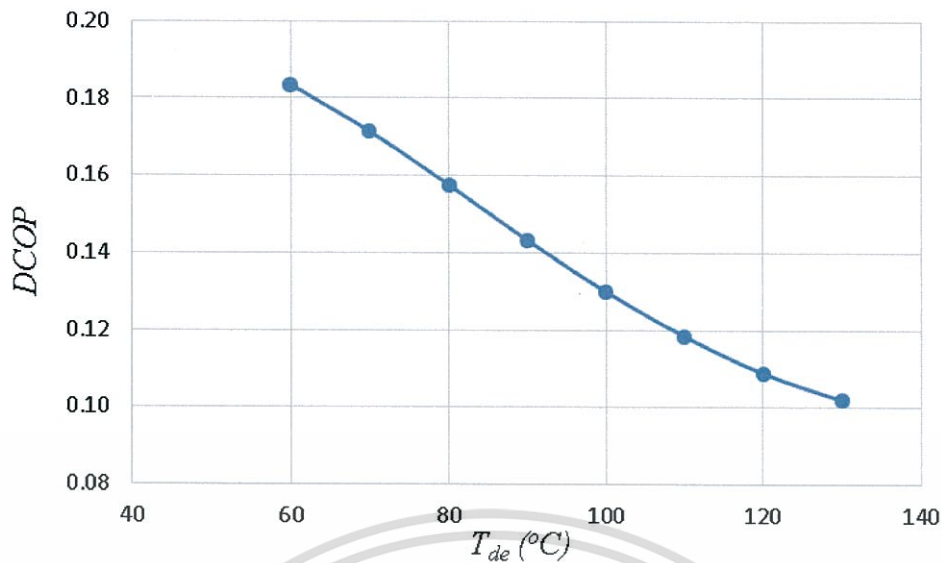
4.2.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้น

การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูต่ออากาศชื้นที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 2.00 2.50 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 และ 8.00 ที่อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟู 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ความเร็วของอากาศชื้นมีค่าเท่ากับ 0.75 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูต่ออากาศชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า MRC จะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นถึงเพียงค่าหนึ่ง จากนั้นการเพิ่มความเร็ของอากาศร้อนจะไม่ทำให้ค่า MRC เพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากการเพิ่มความเร็ของอากาศร้อนส่งผลให้พลังงานที่สารดูดซับได้รับเพื่อใช้ในการพื้นฟูมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า MRC จึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วของอากาศร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง สารดูดซับความชื้นจะมีค่า MRC คงที่ เนื่องจากระบบถูกจำกัดด้วยขั้นตอนของการดูดซับหรือการลดความชื้น การเพิ่มความเร็ของอากาศร้อนที่สูงเกินไป จึงไม่ได้รับการเพิ่มความสามารถในการลดความชื้นของระบบ แต่จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ

4.3 ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น

4.3.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้น

การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิ 60 70 80 90 100 110 120 และ 130 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ความเร็วของอากาศชื้นและอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูมีค่าเท่ากันที่ 0.75 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.7 พบว่าค่า DCOP จะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะการทำให้อุณหภูมิอากาศปกติกกลายเป็นอากาศร้อนจะต้องให้พลังงานความร้อนกับอากาศ เมื่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปมีค่าสูง ทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการพื้นฟู ซึ่งมากกว่าความร้อนที่ถูกคายออกมาจากกระบวนการดูดซับ เพราะอัตราการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นน้อยกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพของวัฏจักรของระบบลดความชื้นจึงลดลง



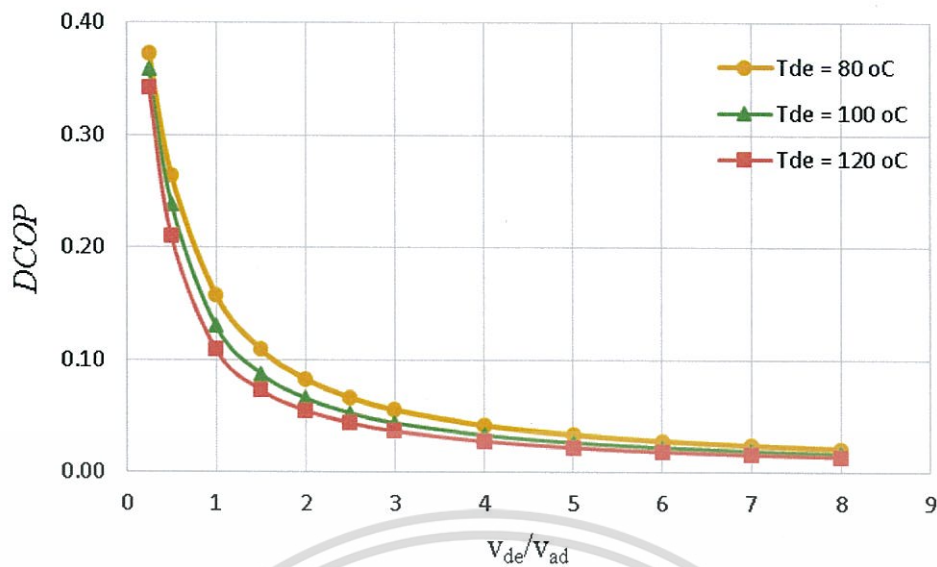
$$(q_0 = 0.08 \text{ kg}_w/\text{kg}_s, T_{s0} = 30 \text{ }^\circ\text{C}, w_{a,in} = 0.018 \text{ kg}_w/\text{kg}_a, T_{a,in} = 30 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$(L = 0.15 \text{ m}, d_b = 0.1 \text{ m}, v = 0.75 \text{ m/s})$$

รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น

4.3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้น

การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูต่ออากาศชื้นที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 2.00 2.50 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 และ 8.00 ที่อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟู 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ความเร็วของอากาศชื้นมีค่าเท่ากับ 0.75 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พื้นฟูต่ออากาศชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า DCOP จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแต่จะช้าลงเมื่อถึงค่าหนึ่ง เนื่องจากในช่วงแรกพลังงานของกระบวนการคายซับยังมีค่าต่ำ เพราะความเร็วของอากาศชื้นมีค่าสูงกว่าความเร็วของอากาศร้อน เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศร้อนทำให้พลังงานสำหรับกระบวนการคายซับที่ใส่เข้าไปมีค่ามากกว่าพลังงานที่ถ่ายเทออกจากกระบวนการดูดซับ ค่า DCOP จึงลดลง ดังนั้นการเพิ่มความเร็วของอากาศร้อนที่สูงเกินไปจึงไม่ได้เพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น แต่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ



$$(q_0 = 0.08 \text{ kg}_w/\text{kg}_s, T_{s0} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}, w_{a,in} = 0.018 \text{ kg}_w/\text{kg}_a, T_{a,in} = 30\text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$L = 0.15 \text{ m}, d_b = 0.1 \text{ m}, v_{ad} = 0.75 \text{ m/s}$$

รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พ่นฟลูสสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองปัจจัยต่อความสามารถในการลดความชื้นและสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น พบว่าเมื่อปัจจัยทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลในเชิงบวกต่อค่าความสามารถในการลดความชื้น แต่ส่งผลเชิงลบต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งสองมีผลทำให้ใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นการพ่นฟลูสสารดูดซับความชื้นควรดำเนินการในสถานะที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พ่นฟลูสสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นเท่ากับ 1 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้นจะอยู่ในช่วง 0.1–0.16 การเพิ่มความเร็วกว่านี้อาจส่งผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้นลดลงแต่ความสามารถในการลดความชื้นคงที่แล้ว

นอกจากนี้ที่อัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้พ่นฟลูสสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นเดียวกัน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้นเท่ากับ 0.16 และค่าความสามารถในการลดความชื้นเท่ากับ 0.7343 กรัมต่ออนาที แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 120 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการลดความชื้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แต่สัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้นจะลดลง 31 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นคือ อัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นเท่ากับ 1 และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นประมาณ 80–100 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการคายซับ สำหรับเบตบรจจุสารดูดซับความชื้นชนิดซิลิกาเจล โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องแบบชัดเจนเข้ามาช่วยแก้ปัญหาของแบบจำลอง สมการคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ทำนายพฤติกรรมของระบบลดความชื้นได้ถูกนำมาใช้จำลอง โดยมีข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาก่อนหน้านี้มาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าผลจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลจากการทดลอง ปัจจัยของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้น และอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูต่ออากาศชื้นได้ถูกนำมาศึกษา พบว่าเมื่อปัจจัยทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการลดความชื้น (MRC) เพิ่มขึ้น แต่ส่งผลเชิงลบกับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (DCOP) เนื่องจากการเพิ่มปัจจัยทั้งสองมีผลทำให้ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นการฟื้นฟูระบบลดความชื้นควรดำเนินการในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นกับอากาศชื้นเท่ากับ 1 และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นประมาณ 80–100 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการคายซับ สำหรับเบตบรจจุสารดูดซับความชื้นชนิดซิลิกาเจล เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองสามารถใช้ศึกษาได้ จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลองแต่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ แสดงว่าการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องแบบชัดเจนยังคงเกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นอาจพิจารณาใช้วิธีผลต่างสี่บเนื่องแบบปริยาย (Implicit finite difference method) หรือวิธีการของแครงก์-นิโคลสัน (Crank–Nicolson method) ที่มีความความแม่นยำมากกว่า แต่มีความซับซ้อนในการแก้ปัญหามากกว่า นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าค่าอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วอากาศร้อน จะทำให้สามารถนำสารดูดซับความชื้นกลับมาใช้ใหม่ได้ไวขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าทั้งสองนี้จะทำให้เกิดการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพ

ของระบบลดความชื้นลดลง ดังนั้นหากสามารถเพิ่มระยะเวลาของกระบวนการดูดซับ หรือลดระยะเวลากระบวนการคายซับลงได้ จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. E. Kabeel, "Adsorption-desorption operations of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 255–265, 2009.
- [2] A. M. Hamed, "Desorption characteristics of desiccant bed for solar dehumidification/ humidification air conditioning systems," *Renew. Energy*, vol. 28, no. 13, pp. 2099–2111, 2003.
- [3] S. Singh and P. Singh, "Regeneration of silica gel in multi-shelf regenerator," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 1, pp. 105–119, 1998.
- [4] Y. A. F. El-samadony, A. M. Hamed, and A. E. Kabeel, "Performance Evaluation of Single Bed Desiccant Desorption Process," *Nat. Resour.*, vol. 2013, no. 4, pp. 69–75, 2013.
- [5] S. Pramuang and R. H. B. Exell, "The regeneration of silica gel desiccant by air from a solar heater with a compound parabolic concentrator," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 1, pp. 173–182, 2007.
- [6] A. K. Ramzy, R. Kadoli, and T. P. Ashok Babu, "Experimental and theoretical investigations on the cyclic operation of TSA cycle for air dehumidification using packed beds of silica gel particles," *Energy*, vol. 56, pp. 8–24, 2013.
- [7] M. Fundamentals, "Modelling : Nature and Use," *Nature*, no. M, pp. 1–17, 2001.
- [8] M. Methodologies, "Modelling Practice," *Current*, pp. 19–32, 2008.
- [9] ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, "บทที่ 1 บทนำ," in *กระบวนการดูดซับสาร Adsorption process*, นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.
- [10] ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, "บทที่ 2 สมดุลการดูดซับของสารเดี่ยว," in *กระบวนการดูดซับสาร Adsorption process*, นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.
- [11] "การนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่," .
- [12] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "การใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์," กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557. [Online]. Available: <https://ienergyguru.com/2015/07/solar-thermal-heat-system/>.
- [13] A. Pesaran and A. Mills, "Moisture transport in silica gel packed beds - II. Experimental study," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 30, no. 6, pp. 1037–1049,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1987.

- [14] J. M. Smith, *Introduction to chemical engineering thermodynamics 7th edition*, 7th ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- [15] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1998.
- [16] K. A. Ramzy, R. Kadoli, and T. P. Ashok Babu, "Significance of axial heat conduction in non-isothermal adsorption process in a desiccant packed bed," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 76, pp. 68–81, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง

ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และค่าคงตัวต่างๆที่ใช้สร้างแบบจำลองนั้นได้มาจากงานวิจัยที่ได้รับการทดลองของ Ahmed K. Ramzy, Ravikiran Kadoli, Ashok Babu T.P. [6] และงานวิจัยของ Ahmad A. Pesaran and Anthony F. Mills [13] ซึ่งแสดงดังนี้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง

ชื่อตัวแปร	ค่าของตัวแปร	หน่วย
เส้นผ่าศูนย์กลางของซิลิกาเจล, d_p	3.5	mm
ความเป็นรูพรุนของเบด, ϵ	0.35	-
เส้นผ่านศูนย์กลางของเบด, d_b	0.10	m
ความเร็วของอากาศ, V	0.75	m/s
ความหนืดของอากาศแบบคิเนมาติกส์, ν	1.604×10^{-5}	m^2/s
ความหนาแน่นของเม็ดซิลิกาเจล, ρ_p	1,200	kg/m^3
ความหนาแน่นของเบด, ρ_b	780	kg/m^3
ความหนาแน่นของอากาศ, ρ_a	1.2	kg/m^3
ความยาวของเบด, L	0.15	m
ความดันรวม, P_{tot}	101.325	kPa
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ, k_a	0.0265	$W/(m \cdot K)$
น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ, MW	29	-
ค่าคงตัวของก๊าซ, R	0.082	$L \cdot atm / mol \cdot K$
ความร้อนแฝงของการระเหย, LH	2,258	kJ/kg
อุณหภูมิอากาศชั้นขาเข้า, $T_{a,i}$	30.0	$^{\circ}C$
อุณหภูมิอากาศที่พื้นฟูขาเข้า, $T_{a,i}$	100.0	$^{\circ}C$
อัตราส่วนของน้ำในอากาศขาเข้า, $w_{a,in}$	0.018	kg_w/kg_{air}
อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เวลาเริ่มต้น, q_0	0.08	kg_w/kg_s
ช่วงเวลา, t	3,600	s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ ข.1 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 1]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
56	0.0088	0.0100	1350	0.0184	0.0186	2650	0.0197	0.0196	3100	0.0202	0.0198
84	0.0103	0.0129	1400	0.0186	0.0186	2699	0.0197	0.0196	3142	0.0201	0.0198
148	0.0124	0.0137	1460	0.0185	0.0187	2749	0.0200	0.0196	3192	0.0204	0.0198
204	0.0130	0.0142	1500	0.0187	0.0188	2798	0.0199	0.0197	3248	0.0202	0.0198
253	0.0133	0.0146	1550	0.0187	0.0188	2840	0.0198	0.0197	3290	0.0203	0.0198
295	0.0137	0.0149	1610	0.0189	0.0189	2896	0.0198	0.0197	3339	0.0202	0.0198
344	0.0144	0.0150	1650	0.0189	0.0189	2938	0.0200	0.0197	3395	0.0201	0.0198
408	0.0147	0.0157	1690	0.0189	0.0190	2995	0.0200	0.0197	3445	0.0200	0.0198
457	0.0151	0.0160	1750	0.0192	0.0190	3037	0.0198	0.0197	3494	0.0203	0.0198
506	0.0153	0.0163	1810	0.0192	0.0191	3100	0.0202	0.0198	3543	0.0203	0.0198
555	0.0158	0.0165	1840	0.0192	0.0191	3142	0.0201	0.0198			
605	0.0159	0.0167	1900	0.0193	0.0192	3192	0.0204	0.0198			
661	0.0161	0.0169	1950	0.0193	0.0192	3248	0.0202	0.0198			
703	0.0164	0.0171	2010	0.0193	0.0193	3290	0.0203	0.0198			
752	0.0167	0.0173	2040	0.0193	0.0193	3339	0.0202	0.0198			
801	0.0168	0.0174	2100	0.0194	0.0193	3395	0.0201	0.0198			
851	0.0168	0.0176	2160	0.0193	0.0194	3445	0.0200	0.0198			
900	0.0171	0.0177	2200	0.0192	0.0194	3494	0.0203	0.0198			
956	0.0173	0.0178	2250	0.0193	0.0194	3543	0.0203	0.0198			
998	0.0175	0.0179	2299	0.0195	0.0194	2749	0.0200	0.0196			
1050	0.0176	0.0180	2355	0.0196	0.0195	2798	0.0199	0.0197			
1100	0.0176	0.0181	2397	0.0194	0.0195	2840	0.0198	0.0197			
1150	0.0176	0.0182	2446	0.0198	0.0195	2896	0.0198	0.0197			
1200	0.0177	0.0183	2496	0.0197	0.0195	2938	0.0200	0.0197			
1250	0.0181	0.0184	2545	0.0198	0.0196	2995	0.0200	0.0197			
1310	0.0182	0.0185	2594	0.0197	0.0196	3037	0.0198	0.0197			

ตารางที่ ข.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก (°C) [Test 1]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
28	34.6	44.6	1050	50.1	47.6	2070	46.1	44.5	3070	44.2	43.4
63	44.6	62.6	1090	49.9	47.3	2100	46.1	44.5	3100	44.2	43.4
98	55.8	64.0	1130	49.6	47.1	2140	46.1	44.4	3150	44.2	43.3
127	58.4	63.0	1160	49.6	46.9	2170	45.9	44.4	3180	44	43.3
190	59.7	60.8	1200	49.2	46.7	2220	45.7	44.3	3220	44	43.3
225	59.5	59.7	1250	49	46.5	2260	45.7	44.2	3260	43.7	43.2
267	58.6	58.2	1280	49	46.4	2280	45.7	44.2	3290	43.7	43.2
309	58	56.5	1310	48.8	46.3	2330	45.7	44.1	3340	43.7	43.2
344	57.5	55.5	1350	48.6	46.2	2360	45.7	44.1	3370	43.7	43.2
387	56.7	55.1	1400	48.1	46.0	2400	45.3	44.1	3410	43.7	43.1
422	56.2	54.1	1440	47.9	45.9	2440	45.3	44.0	3440	43.7	43.1
464	55.3	53.8	1480	47.9	45.8	2470	45.3	44.0	3480	43.7	43.1
499	55.1	53.2	1500	47.9	45.7	2510	45.3	43.9	3510	43.7	43.1
527	54.7	52.8	1550	47.7	45.6	2540	45.3	43.9	3560	43.7	43.0
569	54	52.2	1580	47.7	45.5	2590	45.3	43.8			
605	53.6	51.7	1620	47.7	45.4	2630	45.3	43.8			
640	53.4	51.2	1660	47.5	45.3	2650	45.3	43.8			
682	52.9	50.7	1690	47	45.3	2700	44.8	43.7			
717	52.7	50.3	1730	47	45.2	2730	44.8	43.7			
759	52.1	49.9	1760	46.8	45.1	2780	44.6	43.6			
787	51.8	49.6	1800	46.8	45.0	2810	44.6	43.6			
830	51.8	49.2	1830	46.8	45.0	2850	44.4	43.6			
858	51.4	49.0	1870	46.6	44.9	2880	44.4	43.5			
907	51	48.6	1910	46.6	44.8	2920	44.4	43.5			
949	50.3	48.3	1950	46.4	44.7	2960	44.4	43.5			
991	50.3	48.0	2000	46.1	44.6	3000	44.2	43.4			
1020	50.1	47.8	2030	46.1	44.6	3030	44.2	43.4			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 2]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
6	0.0007	0.0008	404	0.0028	0.0031	890	0.0030	0.0030	1790	0.0034	0.0035
58	0.0007	0.0008	442	0.0029	0.0031	1010	0.0030	0.0030			
96	0.0008	0.0008	500	0.0029	0.0031	1130	0.0030	0.0030			
147	0.0009	0.0009	557	0.0029	0.0030	1200	0.0030	0.0030			
173	0.0011	0.0010	596	0.0029	0.0030	1260	0.0031	0.0030			
211	0.0017	0.0015	641	0.0029	0.0030	1370	0.0031	0.0030			
256	0.0025	0.0024	692	0.0030	0.0030	1490	0.0032	0.0031			
295	0.0026	0.0029	756	0.0030	0.0030	1610	0.0033	0.0032			
352	0.0028	0.0031	820	0.0030	0.0030	1720	0.0034	0.0033			

ตารางที่ ข.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ($^{\circ}C$) [Test 2]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
3	23.3	23.3	346	47.1	46.7	892	46.5	45.8
42	23.3	23.3	417	47.4	46.6	1008	46.1	45.8
132	23.8	24.1	455	47.3	46.5	1130	45.6	45.7
138	25.3	24.4	513	47.3	46.3	1194	45.4	45.6
164	26.8	26.6	565	47.2	46.2	1259	45.4	45.6
184	29.1	29.5	603	47.2	46.1	1374	44.9	45.5
197	31.6	31.8	661	46.9	46.0	1496	44.5	45.2
229	36.7	38.1	725	46.9	46.0	1619	44.3	44.9
256	42.5	42.4	777	46.7	45.9	1747	44.0	44.3
281	44.5	44.9	834	46.7	45.9	1799	44.0	44.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 3]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
64	0.0119	0.0120	2080	0.0309	0.0309	3660	0.0308	0.0289
116	0.0122	0.0144	2150	0.0309	0.0309	3710	0.0305	0.0287
127	0.0140	0.0154	2200	0.0311	0.0309	3770	0.0303	0.0285
190	0.0193	0.0249	2260	0.0311	0.0309	3820	0.0300	0.0283
222	0.0220	0.0289	2310	0.0311	0.0309	3890	0.0295	0.0280
275	0.0244	0.0313	2350	0.0311	0.0308	3960	0.0290	0.0276
296	0.0250	0.0316	2380	0.0311	0.0308	4020	0.0287	0.0273
360	0.0269	0.0316	2410	0.0311	0.0308	4100	0.0285	0.0268
466	0.0285	0.0313	2500	0.0311	0.0308	4180	0.0281	0.0263
529	0.0289	0.0312	2560	0.0311	0.0307	4300	0.0274	0.0255
593	0.0295	0.0311	2600	0.0311	0.0307	4370	0.0269	0.0249
751	0.0300	0.0310	2670	0.0311	0.0307	4440	0.0266	0.0244
857	0.0301	0.0310	2740	0.0311	0.0306	4530	0.0261	0.0236
963	0.0303	0.0309	2800	0.0311	0.0306	4600	0.0258	0.0230
1060	0.0303	0.0309	2860	0.0311	0.0305	4670	0.0255	0.0224
1140	0.0303	0.0310	2890	0.0311	0.0305	4740	0.0250	0.0218
1250	0.0305	0.0310	2940	0.0311	0.0304	4830	0.0245	0.0212
1340	0.0308	0.0310	2990	0.0311	0.0304	4880	0.0241	0.0208
1400	0.0308	0.0310	3060	0.0309	0.0303	4960	0.0237	0.0203
1470	0.0308	0.0310	3100	0.0309	0.0302	5030	0.0234	0.0199
1560	0.0308	0.0310	3170	0.0309	0.0301	5110	0.0231	0.0196
1650	0.0309	0.0310	3230	0.0309	0.0300	5170	0.0228	0.0193
1750	0.0309	0.0310	3290	0.0309	0.0299	5250	0.0225	0.0191
1850	0.0309	0.0310	3370	0.0309	0.0297	5290	0.0223	0.0190
1920	0.0309	0.0310	3430	0.0309	0.0296	5350	0.0221	0.0188
1960	0.0311	0.0310	3500	0.0309	0.0294	5440	0.0220	0.0186
2030	0.0311	0.0309	3580	0.0309	0.0292	5510	0.0217	0.0185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก (°C) [Test 3]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
53	28.6	30.2	1430	44.8	46.7	2850	47.0	48.0	4210	62.8	59.7
116	29.9	33.3	1470	45.0	46.7	2900	47.5	48.2	4250	64.1	60.5
159	32.3	38.8	1500	45.3	46.7	2940	47.5	48.3	4310	65.7	61.7
233	37.1	45.9	1540	45.3	46.7	3020	47.5	48.5	4340	67.0	62.3
296	39.3	46.9	1600	45.3	46.7	3060	47.5	48.7	4400	68.9	63.6
317	40.7	47.0	1660	45.3	46.7	3100	47.5	48.8	4430	69.6	64.3
370	41.3	46.9	1700	45.3	46.8	3150	47.5	49.0	4480	70.9	65.5
434	42.2	46.8	1770	45.7	46.8	3220	47.5	49.3	4540	72.0	66.9
476	42.4	46.8	1810	45.9	46.8	3260	47.9	49.5	4590	72.9	68.1
508	42.6	46.7	1850	45.9	46.8	3300	47.9	49.7	4660	74.0	69.8
550	43.1	46.7	1930	45.9	46.9	3370	48.3	50.1	4700	74.2	70.8
614	43.1	46.7	1980	46.4	46.9	3410	48.6	50.3	4740	74.4	71.8
656	43.1	46.6	2030	46.4	46.9	3450	48.8	50.6	4790	74.6	73.0
709	43.3	46.6	2110	46.4	47.0	3490	48.8	50.9	4850	75.5	74.4
772	43.5	46.6	2150	46.4	47.0	3530	49.4	51.2	4900	76.0	75.4
804	43.5	46.6	2190	46.6	47.0	3600	49.9	51.7	4960	76.6	76.6
857	43.9	46.6	2240	46.6	47.1	3650	50.3	52.2	5050	77.5	78.2
921	43.9	46.6	2300	46.6	47.1	3690	50.5	52.5	5090	77.5	78.9
963	44.2	46.6	2360	46.8	47.2	3760	51.0	53.2	5150	77.5	79.7
1010	44.2	46.6	2400	46.8	47.2	3820	51.8	53.9	5200	77.5	80.4
1070	44.2	46.6	2440	47.0	47.3	3850	52.5	54.2	5260	77.5	81.0
1120	44.4	46.6	2500	47.0	47.4	3890	53.8	54.7	5350	78.2	81.9
1170	44.4	46.6	2560	47.0	47.4	3960	55.1	55.7	5410	78.2	82.3
1210	44.4	46.6	2620	47.0	47.5	4000	56.2	56.2	5490	78.6	82.8
1270	44.4	46.6	2690	47.0	47.7	4050	57.8	57.0			
1310	44.8	46.6	2750	47.0	47.8	4100	59.1	57.8			
1380	44.8	46.7	2790	47.0	47.9	4160	60.6	58.8			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (kg_w/kg_{air}) [Test 4]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
4	0.0073	0.0074	252	0.0038	0.0041	693	0.0037	0.0040
17	0.0070	0.0072	291	0.0038	0.0041	735	0.0037	0.0040
28	0.0060	0.0068	333	0.0037	0.0041	781	0.0037	0.0040
50	0.0054	0.0057	375	0.0037	0.0041	839	0.0037	0.0040
69	0.0050	0.0050	421	0.0037	0.0041	900	0.0037	0.0040
80	0.0045	0.0047	455	0.0037	0.0041	961	0.0037	0.0040
99	0.0043	0.0044	494	0.0037	0.0041	1019	0.0037	0.0040
122	0.0040	0.0042	536	0.0037	0.0041	1076	0.0037	0.0040
149	0.0039	0.0042	570	0.0037	0.0040	1130	0.0037	0.0040
176	0.0038	0.0041	613	0.0037	0.0040	1199	0.0037	0.0039
214	0.0038	0.0041	651	0.0037	0.0040			

ตารางที่ ข.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศขาออก ($^{\circ}C$) [Test 4]

Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model	Time (s)	Exp	Model
1	25.1	25.4	268	15.8	16.3	640	16.7	16.2
28	23.0	23.9	295	15.8	16.2	679	16.6	16.2
39	21.9	22.5	330	15.8	16.2	725	16.7	16.2
54	20.6	20.6	356	15.8	16.2	771	16.9	16.2
66	19.7	19.4	379	15.8	16.2	836	17.0	16.2
81	18.7	18.2	406	15.8	16.2	897	17.0	16.2
96	17.9	17.4	425	16.0	16.2	955	17.2	16.3
111	17.4	16.9	468	15.8	16.2	1012	17.2	16.3
134	17.0	16.5	498	16.0	16.2	1074	17.5	16.3
157	16.6	16.4	529	16.1	16.2	1131	17.5	16.4
199	16.3	16.3	563	16.1	16.2	1200	17.6	16.4
230	16.0	16.3	594	16.3	16.2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 สภาวะที่ใช้จำลองผลของตารางที่ ข.10 และ ข.11

Condition			Adsorption	Initial Condition			Boundary Condition		
Cycle time	3600	sec		q	0.08	kg _w /kg _s	T _a	30	°C
				T _s	30	°C	w _a	0.018	kg _w /kg _a
				T _a	30	°C			
Bed Length (L)	0.15	m	w _a	0.00041	kg _w /kg _a				
			Desorption	Initial Condition			Boundary Condition		
Bed Diameter (d _b)	0.1	m		q	0.08	kg _w /kg _s	T _a	60-120	°C
				T _s	30	°C	w _a	0.018	kg _w /kg _a
				T _a	30	°C			
Velocity	0.75	m/s	w _a	0.00041	kg _w /kg _a				

ตารางที่ ข.10 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อ MRC

Temperature of Regeneration (°C)	MRC rate (g/min)
60	0.5132
70	0.6391
80	0.7343
90	0.8010
100	0.8473
110	0.8821
120	0.9126
130	0.9490

ตารางที่ ข.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับความชื้นต่อ DCOP

Temperature of Regeneration (°C)	DCOP
60	0.18
70	0.17
80	0.16
90	0.14
100	0.13
110	0.12
120	0.11
130	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 สภาวะที่ใช้จำลองผลของตารางที่ ข.13 และ ข.14

Condition			Adsorption	Initial Cond.			Boundary Cond.		
Cycle time	3600	sec		q	0.08	kg _w /kg _s	T _a	30	°C
			T _s	30	°C	w _a	0.018	kg _w /kg _a	
			T _a	30	°C				
Bed Length (L)	0.15	m	w _a	0.00041	kg _w /kg _a				
			Desorption	Initial Cond.			Boundary Cond.		
Bed Diameter (d _b)	0.1	m		q	0.08	kg _w /kg _s	T _a	80-120	°C
				T _s	30	°C	w _a	0.018	kg _w /kg _a
				T _a	30	°C			
Velocity	0.75	m/s		w _a	0.00041	kg _w /kg _a			

ตารางที่ ข.13 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับ ความชื้นกับอากาศชื้นต่อ MRC

V _{de} /V _{ad}	DCOP		
	T ₁ (°C) = 80	T ₂ (°C) = 100	T ₃ (°C) = 120
0.25	0.4368	0.5902	0.7224
0.5	0.6170	0.7795	0.8799
1	0.7343	0.8473	0.9126
1.5	0.7619	0.8543	0.9153
2	0.7697	0.8554	0.9157
2.5	0.7723	0.8557	0.9158
3	0.7733	0.8557	0.9158
4	0.7739	0.8557	0.9158
5	0.7740	0.8557	0.9158
6	0.7740	0.8557	0.9158
7	0.7740	0.8557	0.9158
8	0.7740	0.8557	0.9158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดซับ ความชื้นกับอากาศชื้นต่อ DCOP

V_{de}/V_{ad}	DCOP		
	T_1 (°C) = 80	T_2 (°C) = 100	T_3 (°C) = 120
0.25	0.37	0.36	0.34
0.5	0.26	0.24	0.21
1	0.16	0.13	0.11
1.5	0.11	0.09	0.07
2	0.08	0.07	0.05
2.5	0.07	0.05	0.04
3	0.06	0.04	0.04
4	0.04	0.03	0.03
5	0.03	0.03	0.02
6	0.03	0.02	0.02
7	0.02	0.02	0.02
8	0.02	0.02	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การเขียน Code ในโปรแกรม MATLAB

```

clc;
clear;
close all;
% Constant:
r=1.75*10^-3; %change m
d_p=2*r; % m
d_b=0.10; %change m
A_b=pi()*d_b^2/4; %m^2
v_sup=0.75; %velocity superficial change m/s
por=0.35; %change
new=1.604*10^-5; %m^2/s @30oC change
a=6*(1-por)/(2*r);
rho_b=780; %kg/m^3 rho_silica*(1-por) kg/m^3
L=0.15; %change m
P_tot=101.325; %kPa
k_a=0.0265; %W/m.K @30oC
MW=29; %OF AIR
R=0.082; %L.atm/mol.K
LH=2258; %Latent heat of vaporization kJ/kg
%Specify Boundary condition
T_proc = 30.0; %oC
T_regen = 130.0; %oC
w_a_in = 0.018; %inlet humid
%Time criteria (adsorption time = regen. time)
Cytime = 7200; % =adsorption time + regen. time
% Built matrix
w_a = zeros(100,100000);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

T_a = zeros(100,100000);
T_s = zeros(100,100000);
q = zeros(100,100000);
w_s = zeros(100,100000);
Q_a = zeros(1,100000);
Q_d = zeros(1,100000);
% Built matrix for save data
w_aneu = zeros(100,25);
T_aneu = zeros(100,25);
q_new = zeros(100,25);
w_sneu = zeros(100,25);
T_sneu = zeros(100,25);
MRC_a = zeros(1,25);
MRC_d = zeros(1,25);
DCOP = zeros(1,25);
Cytime_a = zeros(1,25);
Cytime_d = zeros(1,25);
for m=0:5
% Number of time and length steps
dt = 1; %step size for no deviation <= rho_b(1-por)dz^2/2k_b & 1/dt is integer
z_init = 0;      z_max = 1;      maxz = 100;      dz = (z_max-z_init)/maxz;
% Mass silica gel
Mass_s=A_b*L*rho_b/maxz;
% Moisture removal capacity
MRC_a(1,m+1)=0;
MRC_d(1,m+1)=0;
% Initial condition of Adsorption
if m==0
    j=1; %start time
    % Initial condition of Adsorption 1st
    q(:,1) = 0.08; %from exp.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

T_s(:,1)= 30.0; %use 30.0 oC from graph
T_a(:,1) = 30.0; %Ta=Ts
w_a(:,1) = 0.00041; %wa=ws
else
    % Get initial cond. from final to the next loop
    w_a(:,j+1)= w_aneu(:,m);
    T_a(:,j+1)= T_aneu(:,m);
    q(:,j+1)= q_new(:,m);
    w_s(:,j+1)= w_sneu(:,m);
    T_s(:,j+1)= T_sneu(:,m);
end
% Boundary condition of Adsorption (m^th)
w_a(1,:) = w_a_in;
T_a(1,:) = T_proc;
% Adsorption @ 1-2 sec.
while j==1
    for j=1:2 % t_init = 1 s
        for i=1:maxz-1
            P_sat=exp(16.2886-(3816.44/(T_s(i,j)+227.02)));
            RH_s=((55.61-2069.22*q(i,j)+27864.76*q(i,j)^2-
169543.090*q(i,j)^3+560955.771*q(i,j)^4-
968999.184*q(i,j)^5+682782.534*q(i,j)^6))/100;
            w_s(i,j)=0.622*RH_s*P_sat/(P_tot-(RH_s*P_sat));
            rho_sup=(P_tot/101.325*MW)/(R*(T_a(maxz,1)+273.15)); %@temp input
            rho_a=(P_tot/101.325*MW)/(R*(T_a(i,j)+273.15));
            v=v_sup*rho_sup/rho_a;
            Re=2*R*v/new;
            h_m=0.704*rho_a*v*(Re^-0.51);
            NTU_m=h_m*a*A_b*L/(rho_a*v*A_b);
            c_v=1859+0.382*T_a(i,j);
            c_a=1884*w_a(i,j)+1004*(1-w_a(i,j));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

gamma=c_v/c_a;
h=0.683*rho_a*v*c_a*(Re^-0.51);
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_s=0.37+(0.97*q(i,j))+(0.0014*T_s(i,j));
k_b=(k_a^por)*(k_s^(1-por));
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));
else
    H_A=1000*(2950-1400*q(i,j));
end
alpha=k_b/(rho_b*c_b);
if i==1 %boundary cond.
    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));
else,if j==1 %initial cond.
    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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

T_s(1,j+1)=T_s(2,j);
q(maxz,j+1)=q(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
T_s(maxz,j+1)=T_s(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
w_s(maxz,j+1)=w_s(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
end
% Find MRC
Q_a(1,j)=rho_a*A_b*v*(w_a(1,j)-w_a(maxz,j))*dt;
MRC_a(1,m+1)=MRC_a(1,m+1)+Q_a(1,j);
end
end
% Time loop for Adsorption
while j<(Cytime/2)+(m*Cytime)
j=j+1; % @ 3 second++
for i=1:maxz-1
P_sat=exp(16.2886-(3816.44/(T_s(i,j)+227.02)));
RH_s=((55.61-2069.22*q(i,j)+27864.76*q(i,j)^2-
169543.090*q(i,j)^3+560955.771*q(i,j)^4-
968999.184*q(i,j)^5+682782.534*q(i,j)^6))/100;
w_s(i,j)=0.622*RH_s*P_sat/(P_tot-(RH_s*P_sat));
rho_sup=(P_tot/101.325*MW)/(R*(T_a(maxz,1)+273.15)); %@temp input
rho_a=(P_tot/101.325*MW)/(R*(T_a(i,j)+273.15));
v=v_sup*rho_sup/rho_a;
Re=2*R*v/new;
h_m=0.704*rho_a*v*(Re^-0.51);
NTU_m=h_m*a*A_b*L/(rho_a*v*A_b);
c_v=1859+0.382*T_a(i,j); %add in
c_a=1884*w_a(i,j)+1004*(1-w_a(i,j));
gamma=c_v/c_a;
h=0.683*rho_a*v*c_a*(Re^-0.51);
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))));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c_b=4186*q(i,j)+921;
k_s=0.37+(0.97*q(i,j))+(0.0014*T_s(i,j));
k_b=(k_a^por)*(k_s^(1-por));
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));
else
    H_A=1000*(2950-1400*q(i,j));
end
alpha=k_b/(rho_b*c_b);
if i==1 %boundary cond.
    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));
else ,if j==1 %initial cond.
    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
T_s(1,j+1)=T_s(2,j);
q(maxz,j+1)=q(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
T_s(maxz,j+1)=T_s(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
w_s(maxz,j+1)=w_s(maxz-1,j); %add data to the last row (100)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end

% Find MRC
Q_a(1,j)=rho_a*A_b*v*(w_a(1,j)-w_a(maxz,j))*dt;
MRC_a(1,m+1)=MRC_a(1,m+1)+Q_a(1,j);
end

% Save cycle time
Cytime_a(1,m+1) = j;

% MRC rate
MRC_a(1,m+1)=(MRC_a(1,m+1)/Cytime)*(60*1000); % kg/s -> g/min

% Boundary condition of Desorption (m^th)
w_a(1,:) = 0.018; %inlet humid
T_a(1,:) = T_regen; %inlet air temp 70 oC

% Time loop for Desorption
while j<Cytime+(m*Cytime)
j=j+1; % time
for i=1:maxz-1
P_sat=exp(16.2886-(3816.44/(T_s(i,j)+227.02)));
RH_s=((55.61-2069.22*q(i,j)+27864.76*q(i,j)^2-
169543.090*q(i,j)^3+560955.771*q(i,j)^4-
968999.184*q(i,j)^5+682782.534*q(i,j)^6)/100;
w_s(i,j)=0.622*RH_s*P_sat/(P_tot-(RH_s*P_sat));
rho_sup=(P_tot/101.325*MW)/(R*(T_a(maxz,1)+273.15)); %not change use =
initial from absorption
rho_a=(P_tot/101.325*MW)/(R*(T_a(i,j)+273.15));
v=v_sup*rho_sup/rho_a;
Re=2*R*v/new;
h_m=0.704*rho_a*v*(Re^-0.51);
NTU_m=h_m*a*A_b*L/(rho_a*v*A_b);
c_v=1859+0.382*T_a(i,j);
c_a=1884*w_a(i,j)+1004*(1-w_a(i,j));
gamma=c_v/c_a;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

h=0.683*rho_a*v*c_a*(Re^-0.51);
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_s=0.37+(0.97*q(i,j))+(0.0014*T_s(i,j));
k_b=(k_a^por)*(k_s^(1-por));
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));
else
    H_A=1000*(2950-1400*q(i,j));
end
alpha=k_b/(rho_b*c_b);
if i==1 %boundary cond.
    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));
else ,if j==1 %initial cond.
    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
end
T_s(1,j+1)=T_s(2,j);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

q(maxz,j+1)=q(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
T_s(maxz,j+1)=T_s(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
w_s(maxz,j+1)=w_s(maxz-1,j); %add data to the last row (100)
end
% Find MRC
Q_d(1,j)=rho_a*A_b*v*(w_a(1,j)-w_a(maxz,j))*dt;
MRC_d(1,m+1)=MRC_d(1,m+1)+Q_d(1,j);
end
% Save cycle time
Cytime_d(1,m+1) = j;
% MRC rate
MRC_d(1,m+1)=(MRC_d(1,m+1)/Cytime)*(60*1000); % kg/s -> g/min
% Find DCOP
DCOP(1,m+1)=LH*((MRC_a(1,m+1)*Cytime)/(60*1000))/((c_a/1000)*(v_sup*A_b*rho_su
p)*(T_regen-30)*(Cytime/2));
% Save data from final cond. desorption to initial cond. adsorp.
w_aneu(:,m+1)= w_a(:,j);
T_aneu(:,m+1)= T_a(:,j);
q_new(:,m+1)= q(:,j);
w_sneu(:,m+1)= w_s(:,j);
T_sneu(:,m+1)= T_s(:,j);
end
% Transpose Matrix
Wa = w_a.';
Ta = T_a.';

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้