

การควบคุมวัฏจักรการทำงานของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับ
ชนิดของแข็ง



ปริญญาานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การควบคุมวัฏจักรการทำงานของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับ
ชนิดของแข็ง



ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTROL SYSTEM FOR SOLID DESICCANT
DEHUMIDIFICATION CYCLE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การควบคุมวัฏจักรการทำงานของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับ
ชนิดของแข็ง

โดย นางสาวภัทรภา จังศิริพรภรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(ผศ. ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)


กรรมการ
(ผศ.ดร. ธนวรรณ พิณรัตน์)


กรรมการ
(ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การควบคุมวัฏจักรการทำงานของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง
นักศึกษา	นางสาวภัทรภา จังศิริพรภรณ์
รหัสนักศึกษา	58010946
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวัฏจักรของกระบวนการลดความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง โดยตัวดูดซับเป็นซิลิกาเจล สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (conventional steady cyclic operation: CSC) เวลาการดูดซับคายซับจะเท่ากัน ส่วนวัฏจักรการทำงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (temperature break point cyclic operation: TBC) เวลาจุดยุติจะถูกกำหนดด้วยอุณหภูมิ ผลการทดลองนำไปเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษา โดยใช้โปรแกรม MATLAB ภายใต้ข้อมูลเดียวกัน โดยค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ใช้ไอโซเทอมจากงานวิจัย [1] จะอยู่ช่วง 10.6 – 16.3% ส่วนของแบบจำลองไอโซเทอมที่ศึกษาจะเท่ากับ 7.6 – 13.6%

ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นพิจารณาจากความสามารถในการลดความชื้น (moisture removal capacity: MRC) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (dehumidification coefficient of performance: DCOP) ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวัฏจักร พบว่าที่อุณหภูมิคายซับสูงชันจะมีค่าความสามารถในการลดความชื้นสูงชันทั้งสองวัฏจักร เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้นของวัฏจักรการทำงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ แต่สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอจะมีค่าลดลง ส่งผลให้วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติเป็นวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการดำเนินงานระบบลดความชื้น

Report Title	Control system for solid desiccant dehumidification cycle
By	Miss Patarapa Jangsiripornpakorn
Student ID	58010946
Degree	Bachelor of Engineering
Programme	Chemical Engineering
Year	2018
Report Advisor	Asst. Prof. Siripan Murathathunyaluk

ABSTRACT

This research was conducted to study the cycle of the solid desiccant dehumidification system by using the silica gel as the solid desiccant. For the conventional steady cyclic operation: CSC, the duration time of the adsorption is same as desorption. For the temperature break point cyclic operation: TBC, break point time is determined by temperature. The experimental results were compared with the mathematical model results using MATLAB program under the same conditions which the isotherm model error in the research [1] is between 10.6 – 16.3% while isotherm model error in this study 7.6 – 13.6%.

The performance of dehumidification system is considered by the moisture removal capacity: MRC and dehumidification coefficient of performance: DCOP. In comparison between CSC and TBC operations, it found that increasing regeneration temperature led to increase in moisture removal capacity in both operations. However, it led to increase in dehumidification coefficient of performance in TBC operation but decrease in CSC operation. In conclusion, TBC is the optimum operation in the solid desiccant dehumidification process.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์หลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ. ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างสูง ท่านได้ให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา สำหรับความอนุเคราะห์สารเคมีในงานวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สำหรับคำแนะนำในการทดลองหาไอโซเทอมของตัวดูดความชื้นชนิดของแข็ง

ขอขอบคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาเคมี รุ่นที่ 22 ที่ให้กำลังใจในการทำงานวิจัย คอยถามสารทุกข์สุกดิบให้ที่อาศัยในการทำงาน และขอบคุณเพื่อนภาควิชากรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมการวัดคุม วิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับความช่วยเหลือในการทดลอง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา พี่ชาย และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ซึ่งสนับสนุนทางการศึกษาเล่าเรียน อบรมสั่งสอน ตักเตือน พร้อมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา ตลอดจนผู้วิจัยสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ภัทรภา จังศิริพรภรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีการดูดซับ	4
2.2 สมดุลการดูดซับ	10
2.3 การคายซับ	13
2.4 การดูดซับและการคายซับความชื้นของเบตบรจุชิลิกาเจล	16
2.5 วัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่่าเสมอ (CSC)	16
2.6 วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุนหุมิจดุยตุติ (TBC)	18
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)	24
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	25
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	25
3.2 การหาไอโซเทอม	26
3.3 การทดลองเครื่องลดความชื้นด้วยชิลิกาเจล	27
3.4 การหาประสิทธิภาพของการทดลองวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่่าเสมอ (CSC) และวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุนหุมิจดุยตุติ (TBC)	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	32
4.1 ผลการหาไอโซเทอม	32
4.2 ผลการคำนวณความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Validation)	34
4.3 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นด้วยซิลิกาเจลจากการทดลอง และผลจากแบบจำลอง	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการวิจัย	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	42
ภาคผนวก ก ข้อมูลการหาไอโซเทอมของซิลิกาเจล	43
ภาคผนวก ข วงจรไฟฟ้าของวัฏจักรการดำเนินงานและอุปกรณ์ในการทดลอง	44
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลองกระบวนการดูดซับและการคายซับด้วยวัฏจักรการ ดำเนินงาน	49
ภาคผนวก ง วิธีการคำนวณสมการเอมพิริคัล ค่าความแม่นยำของแบบจำลอง และการคำนวณประสิทธิภาพของวัฏจักร	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกประเภทของสารดูดซับ	7
2.2 สมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับประเภทต่างๆ	7
3.1 สภาวะของการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น	31
4.1 น้ำหนักและอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลในสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ	32
4.2 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลจากผลการคำนวณสมการเอมพิริกัลและผลจากแบบจำลอง	34
4.3 แสดงค่าสมรรถนะของระบบลดความชื้นที่สภาวะคงตัว ค่า MRC ค่า DCOP จากผลการทดลองกับผลจากแบบจำลอง	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนภูมิอย่างง่ายของกระบวนการดูดซับที่เกิดภายในรูพรุนของสารดูดซับ	5
2.2 ชนิดของเส้นไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สตามการจำแนกโดย IUPAC	11
2.3 ผลของแบบจำลองของความชื้นในอากาศขาออก ($w_{a,out}$) และอุณหภูมิอากาศขาออก ($T_{a,out}$) ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ที่ t_{cyc} 180 นาที ภายใต้อุณหภูมิการคายซับต่างๆ	18
2.4 แผนภาพวิธีเชิงสถิติ	22
3.1 สารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ ในขวดโหลที่ปิดสนิท	27
3.2 วัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (1) บรรจุซิลิกาเจลในถาด (2) ตู้ขนาด 30x30x30 ซม. ³ (3) วงจรการทำงานของวัฏจักร	29
3.3 วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดเยติ (1) ตู้ขนาด 30x30x30 ซม. ³ (2) วงจรการทำงานขณะกระบวนการดูดซับในอากาศ (3) วงจรการทำงานขณะกระบวนการคายซับ	30
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล	33

คำอธิบายสัญลักษณ์

A_b	พื้นที่หน้าตัดของเบต (m^2)	ดรรชนีกำกับ	
a	อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (m^{-1})	0	สถานะเริ่มต้น
c	ความจุความร้อนจำเพาะ ($J/(kg \cdot K)$)	a	อากาศ
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของเบต (m)	ad	กระบวนการดูดซับ
h_m	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($kg/m^2 \cdot s$)	b	เบต
L	ความยาวของเบต (m)	de	กระบวนการคายซับ
LH	ความร้อนแฝงของไอ (kJ/kg)	s	ซิลิกาเจล
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)	w	น้ำ
m	มวล (kg)	z	ทิศทางตามแนวแกน
n	จำนวนครั้ง หรือ ครั้งที่		
P_{sat}	ความดันอิ่มตัว (kPa)		
P_{tot}	ความดันรวม (kPa)		
q	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล (kg_w/kg_s)		
R	รัศมีของซิลิกาเจล (m)		
RH_s	ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (dimensionless)		
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)		
Δt	ช่วงเวลา (s)		
v	ความเร็วของอากาศ (m/s)		
w_a	อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (kg_w/kg_{air})		
w_s	อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่สมดุลกับ อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล (kg_w/kg_{air})		
z	ความยาวตามแนวแกน (m)		
กรีก			
\mathcal{E}	ความเป็นรูพรุนของเบต (dimensionless)		
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)		
ν	ความหนืดของอากาศแบบคิเนมาติกส์ (m^2/s)		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตรจึงทำให้มีสภาพอากาศร้อนชื้นปกคลุมตลอดทั้งปี มีอิทธิพลของมรสุม การควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์จึงมีความจำเป็นในระดับภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ กระบวนการแปรรูปอาหารและการเก็บรักษา (การแช่เย็นอาหารทะเล นมพาสเจอร์ไรซ์ เครื่องดื่ม แอลกอฮอล์ และไส้กรอก) อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมยา (แคปซูล และผงยา) อุตสาหกรรมไม้ อุตสาหกรรมเส้นใย อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงหรือต่ำเกินไปเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหาย อย่างการเจริญเติบโตของเชื้อราบริเวณที่มีความชื้นสูง อัตราการระเหยของละอองสีเพิ่มขึ้นขณะพ่นสีไปที่ชิ้นงานซึ่งพบในอุตสาหกรรมรถยนต์ ในอุตสาหกรรมกระดาษเมื่ออากาศมีความชื้นต่ำกระดาษจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเกิดไฟฟ้าสถิต ทำให้มีแรงดูดฝุ่นมาเกาะบนกระดาษ ส่วนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เกิดปัญหาการนำไฟฟ้าและการสึกกร่อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในปัจจุบันเครื่องลดความชื้นมีรูปร่างที่หลากหลาย เช่น ระบบวงล้อลดความชื้น ฮีทปั๊ม เป็นต้น แต่หลักการของระบบควบคุมความชื้นของอากาศโดยทั่วไปที่ใช้กันมี 2 ระบบ คือ ระบบดูดความชื้นด้วยสารดูดความชื้น (desiccant dehumidification) สำหรับลดความชื้นในอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ อากาศที่ได้มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ส่วนสารดูดความชื้นจะมีลักษณะเป็นโพรง มีรูพรุนทำให้มีพื้นผิวในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก เช่น ซิลิกาเจล โมเลกุลสารซีฟ มอนต์โมริลโลไนต์ เคลย์ พอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น สารดูดความชื้นที่กักเก็บความชื้นไว้จะกลับสู่สภาพเดิมต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อดึงความชื้นออก แหล่งพลังงานความร้อน ได้แก่ ไฟฟ้า ความร้อนสูญเสีย แสงอาทิตย์ หรือก๊าซธรรมชาติ สำหรับการดูดซับด้วยระบบทำความเย็นแบบกล (mechanical refrigeration) ใช้สารทำความเย็นเพื่อคงอุณหภูมิที่สูงและต่ำด้วยคุณสมบัติที่สามารถดูดซับและนำพาความร้อนเปลี่ยนสถานะจากของเหลวให้กลายเป็นไอ ด้วยหลักการบีบความร้อนจะถ่ายเทความร้อนโดยการดึงความร้อนจากอากาศที่อุณหภูมิปกติแล้วนำไปถ่ายเทให้แก่ น้ำหรือลมร้อน ส่วนความเย็นนั้นเป็นผลพลอยได้

การศึกษาจากการทดลองระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบลดความชื้นแบบวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (conventional steady cyclic operation) และแบบวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (temperature break point cyclic operation) โดยพิจารณาค่าความสามารถในการลดความชื้น (moisture removal capacity : MRC) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (dehumidification coefficient of performance : DCOP) ด้วยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทำงานของระบบลดความชื้น อาทิ อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการคายซับ ความเร็วอากาศ ความสูงเบต เส้นผ่านศูนย์กลางเบต ระยะเวลาในการสลับกระบวนการดูดซับกับการคายซับในวัฏจักร เป็นต้น การทำงานของวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพในสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบ ส่งผลให้ลดต้นทุนพลังงานของระบบ อีกทั้งเป็นการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคายซับระบบลดความชื้นแบบเบตบรรจุโดยใช้โปรแกรม MATLAB สามารถนำมาพัฒนาประยุกต์ใช้คาดการณ์ผลของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็งได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัฏจักรระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง รวมทั้งลดต้นทุนการใช้พลังงานในระบบ เปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (conventional steady cyclic operation) กับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (temperature break point cyclic operation)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการหาไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดของแข็ง
- 2) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็งที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (conventional steady cyclic operation) และวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (temperature break point cyclic operation) ด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง
- 4) เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หากพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ก็จะสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายสถานะที่เหมาะสม ส่งผลให้การดำเนินงานสามารถลดต้นทุนพลังงานที่ใช้ในระบบ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการควบคุมความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดอื่นๆได้ ไม่เพียงแค่อธิกาเจลเท่านั้น ซึ่งจะปรับสมการไอโซเทอมของตัวดูดซับในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ในเนื้อหาของบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีการดูดซับ การคายซับ กลไกการดูดซับ สมบัติของสารดูดซับความชื้น ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น วัฏจักรการดำเนินงานของระบบลดความชื้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.1 ทฤษฎีการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคการไหล (แก๊ส ของเหลว หรือไอ) โดยอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก ซึ่งเรียกว่า สารถูกดูดซับหรือตัวถูกดูดซับ (adsorbate) โดยกลไกของการแพร่ไปสะสมบนพื้นผิวภายในของของแข็ง ซึ่งเป็นสารดูดซับหรือตัวดูดซับ (adsorbent) ทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของแข็งมีค่าสูงกว่าบริเวณวัฏภาคของไหลภายนอก การดูดซับเกิดขึ้นได้จากแรงกระทำ (interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ อาจเป็นแรงที่กระทำแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) ถือเป็นารดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) หรืออาจเกิดการสร้างพันธะเคมีที่ความแข็งแรง ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) ที่มีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเท่านั้น โดยทั่วไปการใช้ระบบดูดซับสารเพื่อการแยกจะใช้หลักการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากสามารถดูดซับโมเลกุลสารได้หลายชั้น ทำให้มีค่าความจุต่อน้ำหนักของสารดูดซับที่สูง และการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ สามารถนำสารดูดซับที่อิ่มตัวจากการใช้งานกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ปริมาณการดูดซับสารขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และสถานะของกระบวนการดูดซับ เช่น ความเข้มข้น ความดัน อุณหภูมิ และความเร็วของสารถูกดูดซับ ภาพที่ 2.1 เป็นขั้นตอนกระบวนการดูดซับสารซึ่งประกอบด้วย

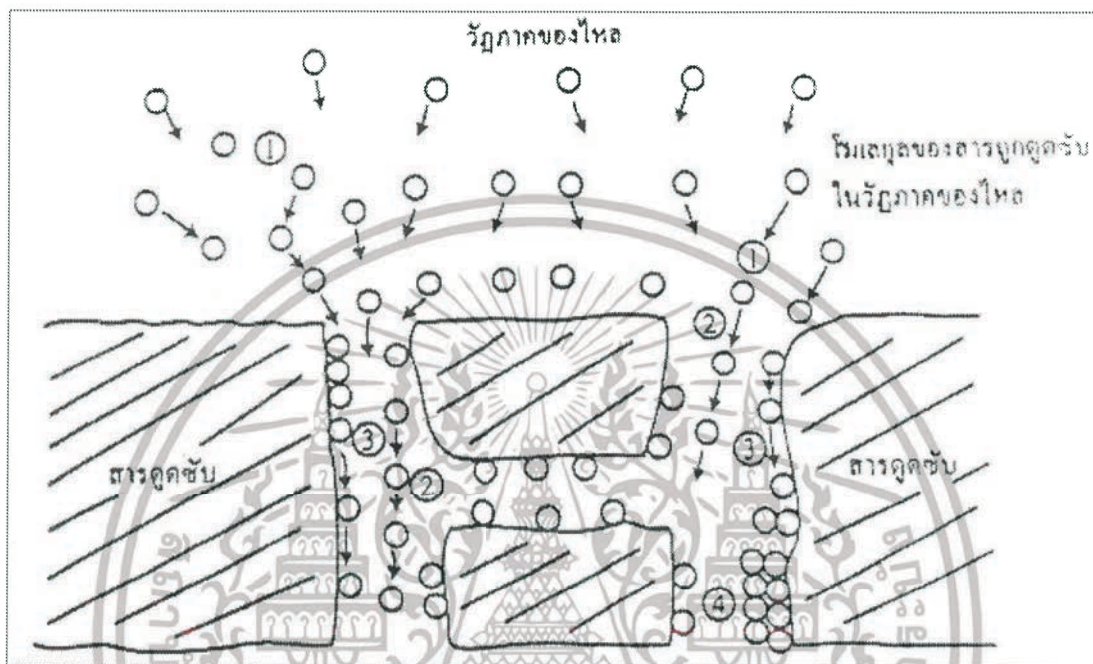
(1) การถ่ายโอนมวลของสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปตำแหน่งพื้นผิวภายนอกของอนุภาค

การแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับ ประกอบด้วย (2) การแพร่ภายในช่องว่างของรูพรุน (pore diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) การแพร่ไปบนพื้นผิวภายในรูพรุน (surface diffusion)

(4) การดูดซับบนตำแหน่งพื้นผิวที่เหมาะสม (adsorption site) [7]



ภาพที่ 2.1 แผนภูมิอย่างง่ายของกระบวนการดูดซับที่เกิดภายในรูพรุนของสารดูดซับ [7]

2.1.1 กลไกการดูดซับ

จำแนกตามลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (interaction force) ของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) ระบบดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

แรงดึงดูดโดยแรงแวนเดอร์วาลส์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่อยู่รอบๆนิวเคลียสของอะตอม รูปร่างของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะไม่สมมาตรแต่จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดสภาพคู่ขั้ว (electric dipole) ที่มีระดับต่างกันระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของสาร ทำให้เกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ แรงดึงดูดนี้เกิดขึ้นได้กับสารทุกชนิด ทั้งชนิดที่มีขั้วอย่างถาวร (polar substances) หรือชนิดไม่มีขั้ว (nonpolar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

substances) สำหรับแรงผลักระยะใกล้ (short-range repulsive) จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอม หรือโมเลกุลเข้ามาใกล้กันจนเกิดการทับซ้อนของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (overlapping of electron cloud) ดังนั้นแรงดึงดูดสุทธิระหว่างอะตอม หรือโมเลกุลจะเป็นผลต่างระหว่างแรงดึงดูด และแรงผลัก โดยแรงนี้ไม่มีผลของพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย สามารถกำจัดสารดูดซับออกจากผิวของสารดูดซับได้ง่าย โดยการดูดซับชนิดนี้สามารถเกิดที่อุณหภูมิปกติได้ และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มความดันจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากสารดูดซับจะเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับ (desorption) เป็นการทำให้สารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

2) ระบบดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

แรงยึดเหนี่ยวจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีระหว่างสารดูดซับและพื้นผิวของสารดูดซับ การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้น เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นแรงดึงดูดจึงมีค่ามากกว่าแรงที่เกิดในระบบดูดซับทางกายภาพ และมีสภาพที่จำเพาะของสารดูดซับต่อสารที่ถูกดูดซับมากกว่าด้วย การกำจัดสารดูดซับออกจากผิวสารดูดซับจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) เนื่องจากองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและการดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) [7]

2.1.2 สารดูดซับ

ความสามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมาก สารดูดซับที่นำมาใช้งานควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง กล่าวคือ ต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ความสามารถในการดูดซับนอกจากจะขึ้นกับโครงสร้างของรูพรุน ได้แก่ ขนาด และการกระจายขนาดของรูพรุน ยังขึ้นกับเคมีพื้นผิวของสารดูดซับด้วย รวมถึงสมบัติความเป็นขั้ว และหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนพื้นผิว ดังตารางที่ 2.1 แสดงชนิดสารดูดซับที่จำแนกตามลักษณะ โครงสร้าง ขนาดรูพรุน และความมีขั้วของพื้นผิวดูดซับ ได้แก่ ซีโอไลต์ (zeolite) ซิลิกาเจล (silica gel) ซิลิกาไลต์ (silicalite) อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และคาร์บอนโมเลกุลลาร์ซีฟ (carbon molecular sieve: CMS) ส่วนตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับที่มีโครงสร้างอสังฐาน และโครงสร้างผลึก [7]

ตาราง 2.1 การจำแนกประเภทของสารดูดซับ [7]

ความมีขี้ ของพื้นผิว	การกระจายขนาดของรูพรุน		โครงสร้าง
	แคบ	กว้าง	
ความมีขี้	¹ ซีโอไลต์ (ปริมาณอะลูมิเนียมสูง)	^{1,2} อะลูมินากัมมันต์ ² ซิลิกาเจล	1 = โครงสร้างผลึก 2 = โครงสร้างอสัณฐาน
ความไม่มีขี้	¹ ซิลิกาไลต์ (ปริมาณซิลิกอนสูง) ² คาร์บอนโมเลกุลอาชีพ (CMS)	² ถ่านกัมมันต์	

ตารางที่ 2.2 สมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับประเภทต่างๆ [7]

สารดูดซับ (Adsorbent)	ขนาดรูพรุน (Pore diameter) (nm)	ความหนาแน่นสารดูดซับ (Particle density) (g/cm ³)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific area) (m ² /g)
ถ่านกัมมันต์ชนิดโพรงใหญ่ (activated carbon large pore)	1-1,000	0.6-0.8	200-600
ถ่านกัมมันต์ชนิดโพรงเล็ก (activated carbon small pore)	1-10	0.5-0.9	400-1,200
อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina)	2-10	1.2-1.3	400-800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (carbon molecular sieve)	0.4-0.5 หรือ 10-100	0.9-1.0	100-300
ซิลิกาเจลพื้นที่ผิวสูง (silica gel high area)	2-10	1.09	800
ซิลิกาเจลพื้นที่ผิวต่ำ (silica gel low area)	10-50	0.62	300
ซีโอไลต์ (zeolite)	0.3-1.1	1.92-2.8	400-800

2.1.3 รูพรุนของตัวดูดซับ

บทบาทของรูพรุนในการทำหน้าที่เป็นเส้นทางสำหรับเข้าและออกของโมเลกุลระหว่างบริเวณภายนอก และพื้นที่ภายในของอนุภาคดูดซับ ตัวดูดซับทุกชนิดที่ใช้ในกระบวนการแยกสารจะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว และความจุของการดูดซับ สามารถจำแนกช่วงขนาดรูพรุนของอนุภาคดูดซับโดยใช้นิยามสำหรับขนาดรูพรุน ซึ่งเสนอโดย IUPAC ในที่นี้ขนาดรูพรุนหมายถึง ความกว้าง หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับรูพรุนรูปทรงกระบอก (cylindrical pores) หรือระยะห่างของรูพรุนแบบแผ่นขนาน (slit pores) นิยามของขนาดรูพรุนแบ่งได้เป็น 3 ช่วงขนาดดังนี้

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

นอกจากนี้รูพรุนขนาดเล็กสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ช่วงขนาดขึ้นกับบทบาท และกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้น ได้แก่ อัลตราไมโครพอร์ (ultramicro pores) เป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 nm

ไมโครพอร์ (micropores) เป็นรูพรุนที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.5-1.4 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซูเปอร์ไมโครพอร์ (supermicropores) เป็นรูพรุนที่ขนาดในช่วง 1.4-2.0 nm

ในแง่ของปริมาณการดูดซับพบว่า การดูดซับส่วนใหญ่ จะเกิดในรูพรุนขนาดเล็ก เนื่องจากผนังของรูพรุนอยู่ใกล้กัน (ประมาณ 2-3 เท่าของขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ) ทำให้เกิดแรงดึงดูดต่อโมเลกุลสูง ประกอบกับรูพรุนขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับรูพรุนขนาดกลาง และขนาดใหญ่ กลไกการดูดซับที่เกิดในรูพรุนขนาดเล็กเป็นแบบบรรจุหรือเติมโมเลกุลเข้าไปภายในรูพรุน โดยการดูดซับจะเกิดในรูพรุนที่มีขนาดเล็กก่อนจนเต็มปริมาตรของรูพรุน จากนั้นจะเกิดการดูดซับในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ สำหรับรูพรุนขนาดกลาง และขนาดใหญ่มีหน้าที่ในการดูดซับค่อนข้างน้อย แต่จะเป็นทางผ่านของโมเลกุลเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามตัวดูดซับที่เหมาะสมจำเป็นต้องมีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง และขนาดใหญ่ในสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการแพร่โมเลกุลไปยังบริเวณที่มีการรองรับกระบวนการดูดซับ ช่วยให้กระบวนการมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [7]

2.1.4 ปัจจัยที่ผลต่อการดูดซับ

1) สมบัติของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย นอกจากนี้พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน ถ้ารูพรุนมีจำนวนมากทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมาก และอัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ

2) อุณหภูมิ มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลง และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exothermic reaction)

3) ระยะเวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเวลาที่ตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการดูดซับเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นเวลาที่สัมผัสเลยจากช่วงนั้นไปจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

4) สมบัติของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ สภาพการละลายได้ น้ำหนักและขนาดโมเลกุล สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายก่อนเกิดกระบวนการดูดซับ ถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็ไม่สามารถเกิดดูดซับได้ ส่วนน้ำหนักและขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น [7]

2.1.5 ค่าความร้อนของการดูดซับ

การดูดซับแก๊สทางกายภาพจะมีความร้อนเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์การดูดซับตามหลักทางเทอร์โมไดนามิกส์ การดูดซับเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้ อีกทั้งยังสามารถเกิดขึ้นได้เอง เมื่อตัวดูดซับได้ดูดซับสารถูกดูดซับไปบนผิวของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับจะมีอิสระการเคลื่อนที่ได้น้อยลง การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีของการดูดซับจึงลดลง ($S_{\text{adsorption}} - S_{\text{gas}} < 0$) ซึ่งชี้ว่า ภายหลังจากการดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นดูดซับ (adsorbed phase) มีเสถียรภาพมากกว่าเมื่ออยู่ในวัฏภาคของไหล ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบส์ของการดูดซับจะต้องน้อยกว่าศูนย์ ($\Delta G < 0$)

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

เมื่อพิจารณาจากสมการ 2.1 การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีของระบบดูดซับดังกล่าว ภายหลังจากการดูดซับจะลดลง ($\Delta H < 0$) ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน [8]

2.2 สมดุลการดูดซับ

การดูดซับในสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มจะหลุดออกสู่สารละลาย เมื่อปริมาณของการดูดซับและการหลุดออกจากผิวมีจำนวนเท่ากัน อัตราการดูดซับและการหลุดออกจะเข้าสู่ภาวะคงที่ (equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่จุดนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบ การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) โดยทั่วไปไอโซเทอมจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายกับปริมาณตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ และอาจมีการสร้างกราฟแบบอื่น [8]

2.2.1 ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption Isotherm)

สำหรับระบบการดูดซับสารเพียงชนิดเดียว ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุลจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ความสัมพันธ์เป็นดังนี้

สำหรับระบบดูดซับในของเหลว

$$V = f [c, T, \text{ชนิดของตัวดูดซับ, ชนิดของตัวถูกดูดซับ}]$$

สำหรับระบบดูดซับแก๊ส

$$V = f [P, T, \text{ชนิดของตัวดูดซับ, ชนิดของตัวถูกดูดซับ}]$$

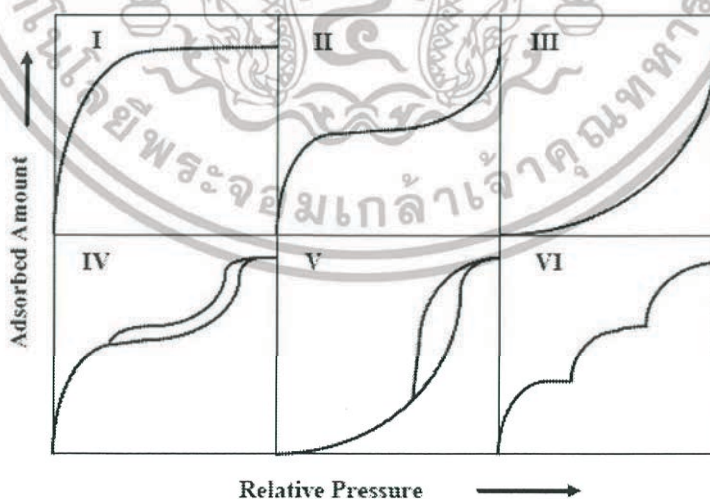
เมื่อ V = ปริมาณการดูดซับ ซึ่งอาจมีหน่วยเป็นจำนวนโมล น้ำหนัก หรือปริมาตร ถ้าตัวถูกดูดซับเป็นแก๊สต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mole/g, g/g, cm³ STP/g)

P = ความดันของระบบ

T = อุณหภูมิของการดูดซับ

c = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย

ไอโซเทอมเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหล เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ใช้อธิบายถึงกลไกและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในรูพรุน ลักษณะส่วนใหญ่ของไอโซเทอมสำหรับการดูดซับทางกายภาพของระบบดูดซับแก๊สสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 แบบ ตามการจำแนกของ IUPAC ดังภาพที่ 2.2 แสดงรูปของไอโซเทอมของการดูดซับทั้งหมด มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2.2 ชนิดของเส้นไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สตามการจำแนกโดย IUPAC [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แบบที่ 1 (Type I isotherm)

เรียกว่าไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ จะมีลักษณะสำคัญคือจะเกิดการดูดซับที่รวดเร็วในช่วงที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำ เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นปริมาณการดูดซับก็จะเริ่มคงที่ แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว พบในตัวดูดซับที่มีรูพรุน หรือหากเป็นตัวดูดซับที่มีความพรุนก็จะมีรูขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์บางชนิด หรือซีโอไลต์ สามารถพบได้ทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับแบบกายภาพ

2) แบบที่ 2 (Type II isotherm)

ลักษณะของไอโซเทอมแบบนี้แบ่งได้เป็น 3 ช่วง ประกอบด้วย ช่วงแรกไอโซเทอมจะมีการเพิ่มของปริมาณดูดซับในลักษณะโค้งคว่ำเข้าหาแกนของความดันสัมพัทธ์ ต่อด้วยช่วงที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง และช่วงสุดท้ายปริมาณการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ไอโซเทอมแบบนี้เป็นลักษณะการดูดซับที่แสดงการดูดซับแบบหลายชั้น พบในตัวดูดซับที่ไม่มี ความพรุน หรือในตัวดูดซับที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดกลาง และขนาดใหญ่ มีการกระจายขนาดของรูพรุน ซึ่งสามารถรองรับการดูดซับแบบหลายชั้นได้

3) แบบที่ 3 (Type III isotherm)

ไอโซเทอมมีลักษณะโค้งหงายเข้าหาแกนความดันสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับมีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ทำให้ที่ความดันต่ำๆ ปริมาณการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดได้น้อย แต่เมื่อความดันสูงถึงค่าหนึ่ง แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเองจะช่วยให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นได้ ไอโซเทอมแบบนี้พบในตัวดูดซับที่ไม่มี ความพรุน หรือที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ อาจเป็นชนิดมีขั้ว หรือไม่มีขั้วก็ได้

4) แบบที่ 4 (Type IV isotherm)

ไอโซเทอมมีลักษณะคล้ายกับแบบที่ 2 ในช่วงแรก แต่เมื่อความดันถึงจุดหนึ่งจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วทำให้กราฟชันขึ้น และเมื่อความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้ 1 กราฟจะมีความชันลดลงจนกระทั่งคงที่ แต่เมื่อลดความดันนั้น จะพบว่าไอโซเทอมของการคายซับจะอยู่เหนือเส้นไอโซเทอมของการดูดซับ ทำให้เกิดวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ซึ่งเกิดการควบแน่นในหลอดรูเล็ก (capillary

condensation) ซึ่งภายในรูพรุน ตัวถูกดูดซับจะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งที่ผิวหน้าส่วนที่ไว้จะมีแรงดึงดูดทำให้การคายซับนั้นต้องลดความดันมากกว่าปกติ และเมื่อความดันสัมพัทธ์ต่ำลงเส้นกราฟของการคายซับก็จะกลับมาอยู่ในเส้นเดียวกันกับเส้นของการดูดซับ ไอโซเทอมแบบนี้จะพบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง

5) แบบที่ 5 (Type V isotherm)

ไอโซเทอมแบบนี้ลักษณะคล้ายแบบที่ 3 แต่มีวงฮิสเทอรีซิสเกิดขึ้นด้วย ในช่วงที่ความดันสัมพัทธ์สูง เส้นไอโซเทอมอาจจะมียลักษณะคงที่หรือเพิ่มขึ้นก็ได้ และเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเองมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ส่วนใหญ่พบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง หรือรูพรุนขนาดเล็ก

6) แบบที่ 6 (Type VI isotherm)

มีลักษณะเป็นแบบขั้นบันได (stepped isotherm) เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีความสม่ำเสมอของแรงระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ซึ่งในแต่ละขั้นนั้นจะแสดงลักษณะของการดูดซับในแต่ละขั้น

2.3 การคายซับ

การคายซับเกิดในทิศตรงกันข้ามกับการดูดซับ เกิดจากการที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิวภายในของสารดูดซับ เรียกว่า กระบวนการคายซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่กระทำเพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับไว้ออกจากสารดูดซับ ทำให้สามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อีก กระบวนการนี้เรียกว่า การคืนสภาพ (adsorbent regeneration) สำหรับกระบวนการดูดซับแก๊ส การคายซับทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การลดความดันของระบบ และการให้ความร้อนแก่ระบบ โดยใช้ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูง ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สเฉื่อย หรือแก๊สผสมจากกระบวนการอื่น เป็นต้น [7]

2.3.1 การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจากการใช้งานจริง กระบวนการดูดซับสารจะถูกจำกัดด้วยความจุของสารดูดซับ กล่าวคือ เมื่อสารดูดซับถูกใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง และเกิดสภาพอิ่มตัว (saturation) จะต้องทำ

การคืนสภาพให้กับสารดูดซับเป็นระยะๆ เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ เป็นการประหยัดการใช้สารดูดซับ ซึ่งการคืนสภาพสารดูดซับสามารถทำได้โดย 2 วิธีเป็นดังนี้

1) ระบบดูดซับแบบสลับความดัน (pressure swing adsorption: PSA)

ในระบบนี้ใช้วิธีลดความดันของระบบเพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับที่ใช้งานจนอิ่มตัวแล้ว เป็นวิธีที่สามารถใช้กับระบบดูดซับที่มีอัตราการไหลสูงได้ดี เนื่องจากมีความรวดเร็ว และ คล่องตัวของวงจรการทำงาน ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรการดูดซับ และวงจรการคายสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งทำงานสลับกัน

2) ระบบดูดซับแบบแปรอุณหภูมิ (temperature swing adsorption: TSA)

ในระบบนี้เป็นการนำสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทำโดยการให้ความร้อนกับระบบดูดซับ เช่น การใช้ไอน้ำ หรือแก๊สร้อน เพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับให้ไหลปนออกมากับตัวกลางที่ให้ความร้อน วิธีการนี้ใช้ได้กับระบบดูดซับที่ความเข้มข้นของสารดูดซับอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากการให้ความร้อน จะช่วยให้การไล่สารในปริมาณน้อยเกิดได้อย่างรวดเร็ว [7]

2.3.2 แหล่งความร้อนที่ใช้คายซับ

วิธีอย่างง่ายที่ใช้คืนสภาพให้กับสารดูดซับที่ดูดซับความชื้นในอากาศเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ คือ ระบบดูดซับแบบแปรอุณหภูมิ โดยการให้ความร้อนแก่ระบบดูดซับ ซึ่งเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย และสามารถลดต้นทุนได้โดยการใช้ความร้อนจากแหล่งความร้อนต้นทุนต่ำ ได้แก่ ความร้อนเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม และความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น

1) ความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat)

ความร้อนที่ใช้ไม่หมดจากกระบวนการต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือพลังงานที่ไหลออกไปพร้อมกับกระแสของอากาศ แก๊สไอเสีย ของเหลว ที่ออกไปจากขอบเขตของอาคารหรือโรงงานสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานเหล่านั้นไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างของความร้อนเหลือทิ้ง ได้แก่

- แก๊สไอเสียจากอุปกรณ์ที่มีการเผาไหม้ เช่น อุตสาหกรรม หม้อไอน้ำ
- แก๊สหรือลมร้อนจากกระบวนการผลิต
- น้ำระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบดูดซับสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ถือว่าเป็นอากาศที่มีพลังงานอยู่ภายใน เมื่ออากาศร้อนผ่านเข้าไปในสารดูดซับที่อิ่มตัว จะช่วยให้เกิดการคืนสภาพของสารดูดซับได้ [10]

2) ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (solar thermal energy)

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

- ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการดูดซับและสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และถ่ายเทความร้อนไปให้ตัวกลาง (medium) ที่ลำเลียงไปตามระบบท่อเพื่อนำไปใช้

- ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ (flat plate collector) เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นแผงโลหะ ประกอบด้วยตัวดูดกลืนที่เป็นแผ่นเรียบรับแสงที่ทำด้วยโลหะ และมีระบบท่อเชื่อมติดอยู่ด้านบนของแผ่นรับแสงปิดทับด้วยกระจก ด้านบนแผ่นรับแสงเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสีช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องเข้ามาในแผงโลหะ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดูดกลืนจะส่งผ่านให้ตัวกลางเพื่อนำความร้อนไปใช้

- ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลิก (parabolic trough collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีแผ่นสะท้อนแสง (reflector) รูปทรงพาราโบลาคอยรวมแสงอาทิตย์ไปยังจุดโฟกัส ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งแนวท่อที่มีตัวกลางไหลผ่านทำให้ดูดกลืนความร้อนได้ในปริมาณสูงมาก ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลิกยังสามารถออกแบบให้มีระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เพื่อรับแสงอาทิตย์จากรังสีโดยตรง (direct radiation) ทำให้ความเข้มแสงสูงได้ตลอดทั้งวัน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานให้สูงขึ้นได้อีกด้วย [11]

2.4 การดูดซับและการคายซับความชื้นของเบตบรจุซิลิกาเจล

นิยามให้ค่าปริมาณการถ่ายโอนความชื้น (q) คือ ปริมาณความชื้นที่ถูกถ่ายโอนระหว่างอากาศและสารดูดความชื้นในกระบวนการดูดซับ (q_{ad}) และการคายซับ (q_{de}) ที่เวลาใดๆ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$q_{ad} = \rho_a A_b v \int_0^{t_{ad}} (w_{a,in}(t) - w_{a,out}(t)) \quad (2.2)$$

$$q_{de} = \rho_a A_b v \int_0^{t_{de}} (w_{a,out}(t) - w_{a,in}(t)) \quad (2.3)$$

สำหรับระบบลดความชื้นในอากาศด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็งในเบตบรจุ กระบวนการดูดซับและการคายซับจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ คือ ความชื้นในซิลิกาเจลจะสมดุลกับความชื้นในอากาศขาเข้า เมื่อความชื้นในอากาศขาออกมีค่าเท่ากับความชื้นในอากาศขาเข้า นั่นคือ ซิลิกาเจลจะไม่สามารถดูดซับหรือคายซับความชื้นได้อีก ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศขาออกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศขาเข้า [5]

2.5 วัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (CSC)

วัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (conventional steady cyclic operation; CSC) เป็นกระบวนการของระบบลดความชื้นที่มีความคาบการดำเนินงานของการลดความชื้นหรือการดูดซับ และคาบของการฟื้นฟูหรือการคายซับเกิดขึ้นอย่างซ้ำๆ เป็นวัฏจักรสลับกัน คาบดำเนินงานของการดูดซับและการคายซับมีค่าเท่ากัน ($t_{ad} = t_{de}$) การจำลองกระบวนการซึ่งแสดงผลในส่วนนี้ สภาวะการดำเนินงานของเบตบรจุซิลิกาเจล เช่น ความชื้นอากาศขาเข้า อัตราการไหลของอากาศชื้นและอากาศร้อนมีค่าเท่ากันที่ $0.018 \text{ kg}_w/\text{kg}_a$ และ 0.75 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ อุณหภูมิของอากาศคายซับเท่ากับ 60 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส และคาบการดำเนินงานของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (t_{cyc}) มีค่าเท่ากับ 180 นาที แสดงดังภาพที่ 2.3 คาบของการดูดซับและคาบของการคายซับจะดำเนินการสลับกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความชื้นที่ถูกดูดซับในคาบของการดูดซับเท่ากับความชื้นที่ถูกคายซับในคาบของการคายซับมีค่าเท่ากัน พบว่ารูปแบบของความชื้นในอากาศขาออกและอุณหภูมิอากาศขาออกของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอที่ได้จากการจำลองกระบวนการ มีรูปแบบที่เกิดแบบซ้ำๆ ทั้งในคาบของการดูดซับและคาบของการคายซับ

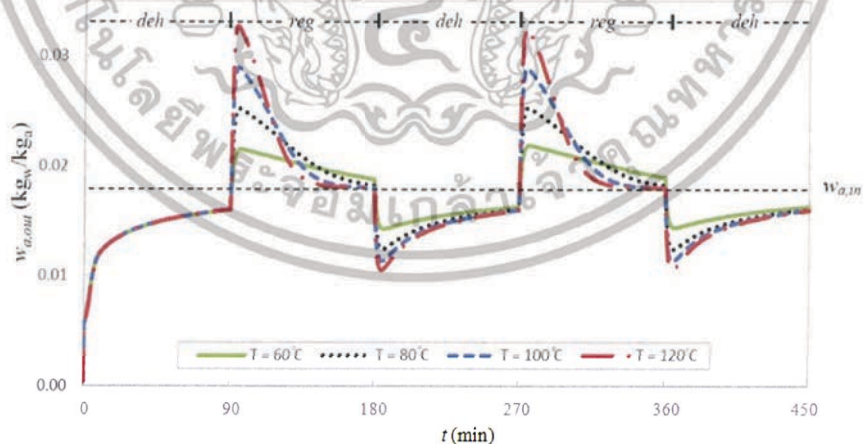
ในภาพที่ 2.3 (ก) กับ (ข) ในช่วงเริ่มต้นของคาบของการดูดซับ ความชื้นในอากาศขาออกมีค่าต่ำกว่าความชื้นในอากาศขาเข้ามาก เนื่องจากปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของซิลิกาเจลมีค่าต่ำ ทำให้ซิลิกาเจลมี

ประสิทธิภาพในการดูดซับสูง และเมื่อเข้าสู่คาบของการคายซับ อากาศร้อนจะผ่านเบดบรรจุซิลิกาเจล ทำให้ความชื้นในอากาศขาออกและอุณหภูมิอากาศขาออกมีค่าสูงขึ้น และค่าทั้งสองจะมีค่าลดลงอีกครั้งเมื่อกระบวนการกลับเข้าสู่คาบของการดูดซับอย่างไรก็ตาม อุณหภูมิของซิลิกาเจลภายหลังจากคาบของการคายซับจะมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับมีค่าต่ำลง เมื่อเทียบกับในคาบของการดูดซับช่วงแรก

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอากาศขาออกในภาพที่ 2.3 (ข) ที่เวลา 180 นาที สำหรับอุณหภูมิการคายซับ 60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศขาออกต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศคายซับขาเข้า แสดงว่ากระบวนการคายซับซิลิกาเจลโดยการกำจัดความชื้นออกจากซิลิกาเจลยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้การดูดซับความชื้นในคาบของการดูดซับในช่วงถัดมามีค่าลดลง จากผลการจำลองกระบวนการอุณหภูมิการคายซับที่เหมาะสมที่สุดคือ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิอากาศขาออกและอุณหภูมิอากาศคายซับขาเข้ามีค่าเท่ากันที่เวลาการสิ้นสุดคาบของการคายซับ แสดงให้เห็นว่าความร้อนจากอากาศคายซับขาเข้าถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการคายซับซิลิกาเจล และอุณหภูมิอากาศคายซับสูงทำให้พาความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่ภายในตัวดูดซับออกได้มาก เนื่องจากจะมีแรงขับเคลื่อนของไอน้ำที่ผิวของตัวดูดซับและอากาศมีค่าสูง

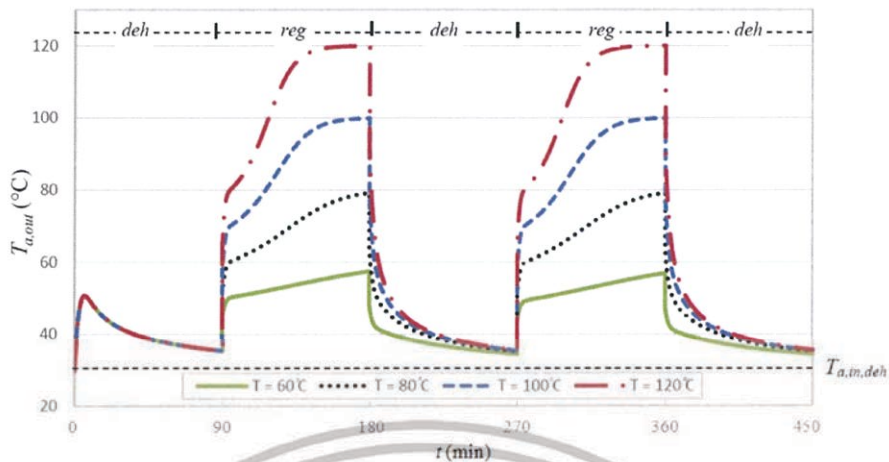
แต่เนื่องจากในความเป็นจริงความชื้นและอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (w_{amb} และ T_{amb}) จะแปรผันตามช่วงเวลาตลอดทั้งวัน ทำให้การคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอุณหภูมิการคายซับ (T_{de}) และคาบการดำเนินงานของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสลับสม่ำเสมอ (t_{cyc}) จากแบบจำลองกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากในการดำเนินงานของวัฏจักรมีค่า T_{de} หรือ t_{cyc} ที่สูงเกินไปจะทำให้ต้นทุนของพลังงานที่ใช้ในระบบมีค่าสูง [5]

(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)



ภาพที่ 2.3 ผลของแบบจำลองของความชื้นในอากาศขาออก ($w_{a,out}$) และอุณหภูมิอากาศขาออก ($T_{a,out}$) ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ที่ t_{cyc} 180 นาที ภายใต้อุณหภูมิการคายชื้นต่างๆ [5]

2.6 วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (TBC)

วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (temperature break point cyclic operation; TBC) จากภาพที่ 2.3 (ข) สำหรับกระบวนการคายชื้นที่ T_{de} เท่ากับ 100 และ 120 องศาเซลเซียส การคายชื้นเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากเมื่อสิ้นสุดกระบวนการคายชื้น อุณหภูมิอากาศขาออกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศขาเข้า และเมื่อพิจารณาที่กระบวนการดูดซับในขั้นตอนของการดูดซับ พบว่ากระบวนการดูดซับความชื้นถูกหยุดลง ก่อนที่ซิลิกาเจลจะดูดซับความชื้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยสังเกตได้จากค่าอุณหภูมิอากาศขาออกมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้า แนวความคิดในการใช้อุณหภูมิจุดยุติเป็นค่าที่กำหนดการสลับโหมดการทำงานระหว่างกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายชื้น ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับจะพิจารณาจากกราฟเบรคทู โดยปกติกระบวนการดูดซับจะไม่ดำเนินการจนกระทั่งตัวดูดซับอิ่มตัว เนื่องจากจะทำให้สารที่ถูกดูดซับปนเปื้อนไปกับอากาศขาออก แต่จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเมื่อเริ่มมีสารหลุดออกมาไม่เกินระดับความเข้มข้นที่กำหนด เวลาสุดท้ายที่สามารถป้อนสารเข้าสู่เบดบรรจุเรียกว่า จุดยุติ

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ เป็นการยากที่ใช้ค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับซึ่งคือ ค่าความชื้นในอากาศในการควบคุมการทำงานเปิดหรือปิดเครื่องให้ความร้อน เพื่อเปลี่ยนโหมดการทำงานระหว่างการดูดซับและการคายชื้น เนื่องจากค่าความชื้นในอากาศที่วัดได้จากเครื่องมือวัด

ความชื้น แสดงผลเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ แต่สำหรับการหาจุดยุติต้องใช้ความชื้นสัมบูรณ์ในหน่วยกิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศ สำหรับการคำนวณหาค่าความชื้นขาออกเทียบกับค่าความชื้นขาเข้า แนวคิดที่ใช้อุณหภูมิจุดยุติสำหรับการหาจุดยุติจึงเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิสามารถส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ควบคุม เช่น เครื่องให้ความร้อน หรือวาล์ว เป็นต้น และสำหรับวัฏจักรนี้ จะยืดเวลาของการดูดซับให้นานขึ้นและลดเวลาการคายซับให้สั้นลง จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นได้

วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (temperature break point cyclic operation: TBC) เป็นการดำเนินงานที่ใช้อุณหภูมิจุดยุติสำหรับกระบวนการดูดซับและการคายซับ (T_{ad}^b และ T_{de}^b) ในการตัดสินใจเพื่อจะควบคุมสวิตช์และสลับโหมดการทำงานระหว่างการดูดซับและการคายซับ

หากสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิอากาศขาออกและค่าความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศขาออก จะทำให้สามารถใช้อุณหภูมิจุดยุติเป็นจุดยุติแทนการใช้ค่าความชื้นสัมบูรณ์ขาออกเป็นจุดยุติได้ สำหรับกระบวนการคายซับการหาค่าอุณหภูมิจุดยุติจะเกิดจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาออก ($T_{a,out}$) และค่าปริมาณความชื้นที่ถูกถ่ายโอนระหว่างอากาศกับสารดูดความชื้นในกระบวนการคายซับ (q_{de}) เนื่องจาก ค่า q_{de} เป็นตัววัดความสามารถในการถ่ายโอนความชื้นออกจากซิลิกาเจล เทอมไร้หน่วยของค่าความชื้นสัมบูรณ์ในกระบวนการดูดซับ (w_{ad}^*) และเทอมไร้หน่วยของอุณหภูมิอากาศในกระบวนการดูดซับ (T_{ad}^*) และกระบวนการคายซับ (T_{de}^*) ตามลำดับ แสดงในสมการ (2.4) (2.5) และ (2.6) [5]

$$w_{ad}^* = \frac{w_{a,out} - w_{a,in}}{w_{a,in}} \quad \text{สำหรับกระบวนการดูดซับ} \quad (2.4)$$

$$T_{ad}^* = \frac{T_{a,out} - T_{a,in}}{T_{a,in}} \quad \text{สำหรับกระบวนการดูดซับ} \quad (2.5)$$

$$T_{de}^* = \frac{T_{a,in} - T_{a,out}}{T_{a,in}} \quad \text{สำหรับกระบวนการคายซับ} \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.5) และ (2.6) อุณหภูมิจุดยุติสำหรับกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับ (T_{ad}^b และ T_{de}^b) สามารถหาได้จาก สมการ (2.7) และ (2.8) [5]

$$T_{ad}^b = T_{a,in} \left(1 + T_{ad}^* \right) \quad \text{สำหรับกระบวนการดูดซับ} \quad (2.7)$$

$$T_{de}^b = T_{a,in} \left(1 - T_{de}^* \right) \quad \text{สำหรับกระบวนการคายซับ} \quad (2.8)$$

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับระบบดูดซับมีตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรม การคายซับในระบบคายซับแบบเบดนิ่งบรรจุสารดูดซับซิลิกาเจล [5] ดังต่อไปนี้

2.7.1 ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ และการคายซับ

ตัวแปรต่างๆที่ต้องใช้ในการจำลองกระบวนการดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมบัติของ สารถูกดูดซับ และสารดูดซับภายใต้สภาวะที่ทำการจำลอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น ซึ่งสมการส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสมการเอมพิริคัล ดังนี้

1) อัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล (w_s) [1]

เป็นการแปลงค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็นค่าความชื้นในอากาศเพื่อใช้ คำนวณประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$w_s = \frac{0.622RH_s \times P_{sat}}{P_{tot} - (RH_s \times P_{sat})} \quad (2.9)$$

2) ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (RH_s) [2]

ไอโซเทอมเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล

$$RH_s = 55.61 - 2,069.22q + 27,864.76q^2 - 169,543.09q^3 + 560,955.771q^4 - 968,999.184q^5 + 682,782.534q^6 \quad (2.10)$$

3) ความดันอิ่มตัว (P_{sat}) [3]

$$\ln P_{sat} = 16.2886 - \frac{3816.44}{T_s + 227.02} \quad (2.11)$$

2.7.2 สมการดุลมวลในเฟสแก๊ส [1]

อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นในอากาศกับตำแหน่งภายในเบด ณ เวลา ต่างๆ

$$\frac{\partial w_a}{\partial t} = -\frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon A_b} \frac{\partial w_a}{\partial z} - \frac{h_m a}{\rho_a \varepsilon} (w_a - w_s) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีสภาวะเริ่มต้น (initial condition) และขอบเขต (boundary condition) คือ
 ที่ $t = 0$ และทุกค่า z , $w_a = w_s$

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

เมื่อ \dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg s^{-1})

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg m^{-3})

w_a คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ ($\text{kg}_w/\text{kg}_a^{-1}$)

w_s คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่สมดุลกับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ($\text{kg}_w/\text{kg}_a^{-1}$)

h_m คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

a คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (m^{-1})

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด (m^2)

t คือ เวลา (s)

z คือ ความยาวตามแนวแกน (m)

ε คือ ความเป็นรูพรุนของเบด

2.7.3 สมการสมดุลมวลในเฟสของแข็ง

อธิบายอัตราการถ่ายโอนมวลของสารดูดซับ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำในซิลิกาเจลเท่ากับอัตราการถ่ายโอนมวลของน้ำในอากาศต่อน้ำหนักของซิลิกาเจล [1]

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\dot{m}_a}{m_s} (w_{a,in} - w_{a,out}) \quad (2.13)$$

โดยมีสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) คือ ที่ $t = 0$ และทุกค่า z , $q = q_0$

เมื่อ q คือ อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล ($\text{kg}_w/\text{kg}_s^{-1}$)

m_s คือ มวลของซิลิกาเจล (kg)

2.7.4 ไอโซเทอมความชื้น

ไอโซเทอมความชื้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของวัสดุหรือตัวดูดซับกับค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศหรือค่าอวอเตอร์แอกติวิตี้ ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง และเป็น

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาแบบจำลองการลดความชื้นด้วยตัวดูดซับ โดยวิธีการหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ (1) วิธีสถิตย์ (2) วิธีจลน์ และ (3) วิธีการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีจากจุดกลั่นตัวของน้ำ ได้ดังนี้

1) วิธีเชิงสถิตย์ (static desiccator isotherm method) เป็นวิธีที่วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาพแวดล้อมโดยปราศจากการรบกวนทางด้านพลศาสตร์ของอากาศ เป็นการปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศแวดล้อมจนกว่าจะถึงจุดสมดุล หลังจากนั้นจึงมีการวัดความชื้นของวัสดุ ณ จุดสมดุล วิธีการจะแสดงไว้ในภาพที่ 2.4 โดยนิยมนำสารเคมีที่มีความสามารถในการดูดความชื้นส่วนเกินมาใช้ ได้แก่ สารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด โดยทั่วไปนิยมใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเนื่องจากการกักกร่อนน้อยและราคาถูกกว่า ส่วนสารละลายกรดนั้นกักกร่อนโลหะง่าย จึงใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวที่จะต้องมีความสมบัติที่สามารถรักษาความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายเกลือ โดยไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป



2) วิธีจลน์ (dynamic sorption method) เป็นการปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศแวดล้อมโดยทำให้อากาศหรือวัสดุเกิดการเคลื่อนไหว แล้วตรวจวัดน้ำหนักของวัสดุเพื่อหาค่าความชื้นสมดุลโดยความชื้นของอากาศจะถูกวัดด้วยเซนเซอร์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH sensor) วิธีนี้การเข้าสู่จุดสมดุลจะเป็นไปอย่างรวดเร็วจึงเหมาะกับวัสดุที่มีความชื้นสูงเพราะการใช้วิธีสถิตย์วัสดุอาจจะเสียหายได้จากการเจริญเติบโตของเชื้อรา ค่าความชื้นที่วัดได้ก็อาจจะไม่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีความเที่ยงตรงสูงซึ่งส่วนมากมีราคาแพง

3) วิธีการวัดจุดกลั่นตัวของน้ำ (dynamic dew point isotherm method: DDI) วิธีนี้วัสดุจะอยู่ในห้องควบคุมที่สามารถจำลองสภาวะอากาศได้ทั้งสภาวะเปียกและแห้ง และมีการวัดค่า a_w และค่าความชื้นของวัสดุ ซึ่งสามารถกระทำได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องรอให้วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาวะ

อากาศโดยใช้เซนเซอร์ ส่วนการวัดความชื้นของวัสดุ สามารถวัดได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักเชิงเลข (electronic balance) ทำให้การศึกษาความชื้นสมดุลโดยวิธีนี้ใช้เวลาสั้นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสองวิธีแรก [4]

2.7.5 ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น

ในงานวิจัยได้นิยามประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นแบบเบตบรรจุไว้ 2 แบบ ได้แก่

1) ความสามารถในการลดความชื้น (moisture removal capacity: MRC) แสดงดังสมการที่ 2.14

$$MRC = \frac{\dot{m}_a}{\Delta t_{cycle}} \int_0^{\Delta t_{ad}} |w_{a,in} - w_{a,out}| dt \quad (2.14)$$

โดย Δt_{cycle} คือช่วงเวลาของกระบวนการดูดซับความชื้นและกระบวนการคายความชื้น ซึ่งกำหนดให้ค่า $\Delta t_{ad} = \Delta t_{de}$ ส่วน $w_{a,in}$ และ $w_{a,out}$ เป็นอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเกิดกระบวนการดูดซับและของอากาศร้อนที่ใช้คายซับในกระบวนการคายซับ สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานของระบบลดความชื้นระบบจะทำงานจนกระทั่ง $MRC_{ad} = MRC_{de}$ (MRC_{ad} คือความสามารถในการลดความชื้นของกระบวนการดูดซับ กับ MRC_{de} คือ ความสามารถในการลดความชื้นของกระบวนการคายความชื้น) ซึ่งหมายความว่าระบบจะทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา [5]

2) สัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (dehumidification coefficient of performance: DCOP) คือ อัตราส่วนระหว่างความร้อนแฝงระหว่างกระบวนการดูดซับความชื้นกับความร้อนสัมผัสในระหว่างกระบวนการคายซับ แสดงดังสมการที่ 2.15

$$DCOP = \frac{LH \times \dot{m}_{ad} \int_0^{\Delta t_{ad}} (w_{a,in} - w_{a,out}) dt}{c_a \times \dot{m}_{de} \int_0^{\Delta t_{de}} (T_{a,in,de} - T_{a,amb}) dt} \quad (2.15)$$

โดย LH เป็นความร้อนแฝงของไอน้ำในอากาศชื้น ส่วน Δt_{ad} และ Δt_{de} เป็นช่วงเวลาของกระบวนการดูดซับความชื้นและกระบวนการคายความชื้นตามลำดับ [5]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

Ahmed K. Ramzy และคณะ (2013) [1] การลดความชื้นด้วยการใช้สารดูดซับแบบเบตเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับระบบระบายความร้อนด้วยไอน้ำ สารดูดซับความชื้นในระบบลดความชื้นด้วยสารดูดซับควรใช้ได้ทั้งกระบวนการดูดซับและคายซับ ในงานวิจัยจึงได้มีการทดลองระบบดูดซับแบบแปรอุณหภูมิ (TSA) นำไปใช้กับสองเบตบรรจุอนุภาคซิลิกาเจลทรงกลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ควบคุมด้วยแก๊สสมมติด้านข้างถูกนำมาใช้ทำนายวงจรการทำงาน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกตรวจสอบด้วยวิธีการใช้ผลการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 1.15% - 9.03% สำหรับอัตราส่วนความชื้นอากาศขาออก และ 1.08% - 9.68% สำหรับอุณหภูมิอากาศขาออก พลวัตของเบตสารดูดซับความชื้นจะเป็นวัฏจักร นอกจากนี้พบว่าจากการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพของวงจรสูงสุด คือ อุณหภูมิของอากาศร้อน 90 - 95 องศาเซลเซียส เมื่อความสูงของเบตมีค่าในช่วง 0.05 - 0.3 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิลิกาเจลอยู่ในช่วง 2 - 5 มิลลิเมตร

Ahmad A. Pesaran และคณะ (1987) [2] การทดลองจะแสดงการตอบสนองชั่วคราวของเบตบรรจุซิลิกาเจลที่เป็นอะเดียเบติกจะไม่มี การถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ หลังจากอากาศขาเข้า ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับการทำงานที่ใช้แบบจำลองความต้านทานด้านข้างที่เป็นของแข็งและแบบจำลองที่ควบคุมด้วยแก๊สสมมติด้านข้าง ถือเป็นที่ยอมรับสำหรับรูปแบบของแบบจำลอง อย่างไรก็ตามเห็นได้ว่าจะเกิดพลวัตแบบฮิสเตอร์ิซิสสำหรับกระบวนการดูดซับและคายซับด้วยสารดูดซับชนิดซิลิกาเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก อาจเป็นผลมาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ด้านที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น หรืออยู่ขอบเขตที่น้อยกว่าช่วงฮิสเตอร์ิซิสของไอโซเทอมการดูดซับ

Ahmad A. Pesaran และคณะ (1987) [12] การศึกษากลไกการกระจายตัวของความชื้นภายในอนุภาคซิลิกาเจล จากการศึกษาพบว่าการแพร่กระจายที่ผิวของซิลิกาเจลรูพรุนขนาดเล็กเป็นกลไกสำคัญในการถ่ายเทความชื้น ขณะที่ซิลิกาเจลรูพรุนขนาดใหญ่ ทั้งแบบ Knudsen และการแพร่กระจายของพื้นผิวมีความสำคัญ มีการเสนอแบบจำลองสำหรับการถ่ายโอนความร้อนและมวลในเบตบรรจุชนิดบางของอนุภาคสารดูดซับความชื้น ซึ่งอธิบายถึงการแพร่กระจายความชื้นในอนุภาค ทั้งแบบ Knudsen และการแพร่กระจายของพื้นผิว ใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์แก๊สสมการเชิงอนุพันธ์ ทำให้เกิดการคาดการณ์การตอบสนองของอนุภาคซิลิกาเจลในเบตบรรจุชนิดบาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศขาเข้า และเทียบกับการควบคุมแบบจำลองแก๊สสมมติด้านข้างที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการออกแบบเครื่องลดความชื้นด้วยสารดูดซับที่มีคุณสมบัติปรับอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

กล่าวถึงการดำเนินงาน ซึ่งเนื้อหาในบทที่ 3 ประกอบด้วย ขั้นตอนการดำเนินงาน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการหาไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดของแข็ง และการทดลองวัฏจักรระบบลดความชื้น การดำเนินงานแบบสมำเสมอกับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดเยติที่สภาวะการทำงานเดียวกัน และการหาประสิทธิภาพของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสมำเสมอกับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดเยติ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการหาไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดของแข็ง
- 2) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดูดซับความชื้นและคายความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง
- 3) ศึกษางานวิจัยที่มีผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ทำการศึกษาเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง
- 4) ใช้สมการไอโซเทอมของซิลิกาเจลที่ได้แทนในสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 5) ชั่งน้ำหนักซิลิกาเจลก่อนและหลังระบบดูดซับและคายซับความชื้น
- 6) ทดลองเครื่องลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล โดยบันทึกข้อมูล อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าและขาออกของเบดบรรจุซิลิกาเจล และกำหนดความเร็วอากาศขาเข้าทั้งระบบดูดซับและคายซับความชื้นให้เท่ากัน ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับกำหนดให้คงที่ตลอดการดำเนินงาน
- 7) คำนวณความแม่นยำของผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 8) ทดลองเครื่องลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล โดยบันทึกข้อมูล อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าและขาออกของเบดบรรจุซิลิกาเจล วัฏจักรการดำเนินงานแบบสมำเสมอจะมีระยะเวลาหรือคาบการดูดซับและการคายซับที่เท่ากัน ส่วนอีกวัฏจักรจะดำเนินงานที่ใช้อุณหภูมิจุดเยติ ในการสลับการทำงานระหว่างการดูดซับและการคายซับ โดยกำหนดให้ทั้งสองวัฏจักรทำงานที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) พิจารณาวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ กับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุนหภูมิจุลยติ ด้วยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากการคำนวณผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.2 การหาไอโซเทอม

ในการหาไอโซเทอมของซิลิกาเจลจะใช้วิธีเชิงสถิติ โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว คือ โพลแทสเซียมแอซิเตด โพลแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์ เนื่องจากการกักต่อน้ำน้อย และมีคุณสมบัติที่สามารถรักษาความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายเกลือและอุนหภูมิแวดล้อม ซึ่งส่งผลต่อวิธีเชิงสถิติได้น้อย

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาไอโซเทอม

- | | |
|---|-----------|
| 1) ขวดโพลพลาสติก | 4 ขวด |
| 2) เกลือ (โพแทสเซียมแอซิเตด โพลแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์) | |
| 3) น้ำ | |
| 4) ภาชนะบรรจุซิลิกาเจล | 4 ใบ |
| 5) กระจกบอควาง แท่งคน | 4 แท่ง |
| 6) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง | 1 เครื่อง |

3.2.2 ขั้นตอนการหาไอโซเทอม

1) เตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว ซึ่งเกลือ (โพแทสเซียมแอซิเตด โพลแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์) มาอย่างละ 200.0 กรัม ใส่ลงในขวดโหลที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ แล้วเติมน้ำลงในแต่ละโหล 65 90 60 และ 80 มิลลิลิตร ตามลำดับ คนให้ละลายจนกระทั่งเป็นสารละลายเกลืออิ่มตัว (การใช้ปริมาณน้ำต่างกัน เนื่องจากความสามารถในการละลายของเกลือแต่ละชนิดต่างกัน)

2) ชั่งซิลิกาเจลน้ำหนัก 5.0 กรัม ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง มา 4 จำนวน บรรจุในแต่ละภาชนะที่วางอยู่ในขวดโพลพลาสติกที่ปิดสนิท

3) นำซิลิกาเจลออกมาชั่งทุกๆ 24 ชั่วโมง บันทึกผลที่ได้จนกระทั่งน้ำหนักซิลิกาเจลถึงจุดสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

4) อบซิลิกาเจลเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้น ชั่งซิลิกาเจล แล้วบันทึกผล

5) คำนวณความชื้นสมดุลของซิลิกาเจล และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวกับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่สมดุล



ภาพที่ 3.1 สารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ ในขวดโหลที่ปิดสนิท

3.3 การทดลองเครื่องลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- | | |
|--|-----------|
| 1) เครื่องเป่าลม | 2 เครื่อง |
| 2) ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 4 นิ้ว | |
| 3) ท่ออ่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว | |
| 4) เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง | 1 เครื่อง |
| 5) เครื่องแอนิเมเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 6) เครื่องไฮโกรมิเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 7) ตู้เหล็กสำหรับกระบวนการลดความชื้น/คายความชื้นขนาด 30x30x30 ซม. ³ | 2 ตู้ |

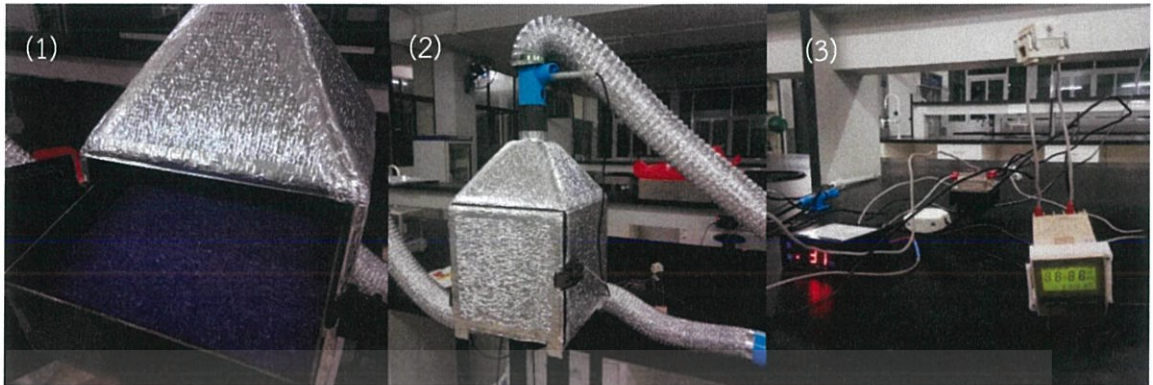
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- | | |
|--|-----------|
| 8) อุปกรณ์ทำความร้อน พร้อมเครื่องควบคุม | 2 เครื่อง |
| 9) ภาชนะทรงบรรจุซิลิกาเจลขนาด 27.5x27.5 ซม. ² | 2 ภาชนะ |
| 10) หลอดไฟ | 1 แท่ง |
| 11) โปรแกรม MATLAB – R2017a | |

3.3.2 ขั้นตอนการทดลองเครื่องลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล

3.3.2.1 วัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ

- 1) ประกอบเครื่องลดความชื้น ภายในเครื่องติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน ส่วนภายนอกติดตั้งเครื่องเป่าลมต่อเข้ากับท่อด้านบนของตู้ พร้อมติดตั้งเครื่องไฮโกรมิเตอร์โดยให้เซนเซอร์อยู่ตำแหน่งท่อขาเข้าและขาออกของตู้
- 2) กำหนดเงื่อนไขในการทดลอง ได้แก่ ความสูงเบด ความเร็วอากาศ อุณหภูมิอากาศในการคายซิลิกาเจล ระยะเวลาในการดำเนินการดูดซับการคายซิลิกาเจล เป็นต้น
- 3) เตรียมซิลิกาเจล และชั่งน้ำหนักซิลิกาเจลบรรจุลงภาชนะให้ความสูงเบดเป็นตามที่กำหนด และบรรจุภาชนะซิลิกาเจลในตู้เหล็ก
- 4) เปิดเครื่องเป่าลมให้ทำงาน เริ่มจับเวลา พร้อมทั้งวัดค่าและบันทึกอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าและขาออกที่ผ่านภาชนะบรรจุซิลิกาเจลด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์
- 5) สำหรับในกระบวนการดูดซับเมื่อถึงเวลาที่กำหนดจะนำซิลิกาเจลออกมาชั่งน้ำหนัก
- 6) สลับโหมดเป็นกระบวนการคายซิลิกาเจล โดยเปิดอุปกรณ์ทำความร้อนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิอากาศเพิ่มจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิอากาศในการคายซิลิกาเจลตามที่กำหนด
- 7) นำซิลิกาเจลกลับเข้าตู้เพื่อทำการคายซิลิกาเจลความชื้นออกจากซิลิกาเจล โดยระยะเวลาดำเนินงานของการคายซิลิกาเจลจะเท่ากับการลดความชื้น
- 8) หลังจากนั้นดำเนินการสลับโหมดเป็นกระบวนการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม และจะสลับรูปแบบนี้ซ้ำๆ จนกระทั่งความชื้นที่ถูกดูดซับในการดูดซับเท่ากับความชื้นที่ถูกคายซิลิกาเจลในกระบวนการคายซิลิกาเจล



ภาพที่ 3.2 วัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (1) บรรจุซิลิกาเจลในภาต (2) ตู้ขนาด 30x30x30 ซม.³
(3) วงจรการทำงานของวัฏจักร

3.3.2.2 วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิคงที่

1) ประกอบเครื่องลดความชื้น ภายในเครื่องติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน ส่วนภายนอกติดตั้งเครื่องเป่าลมต่อเข้ากับท่อด้านบนของตู้ พร้อมติดตั้งเครื่องไฮโกรมิเตอร์โดยให้เซนเซอร์อยู่ตำแหน่งท่อขาเข้าและขาออกของตู้

2) กำหนดเงื่อนไขในการทดลอง ได้แก่ ความสูงเบต ความเร็วอากาศ อุณหภูมิอากาศในการคายซับซิลิกาเจล เทอมไร์หน่วยของอุณหภูมิอากาศในกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับ เป็นต้น

3) เตรียมซิลิกาเจล และชั่งน้ำหนักซิลิกาเจลบรรจุลงภาตให้ความสูงเบตเป็นตามที่กำหนด และบรรจุภาตซิลิกาเจลในตู้ให้เล็ก

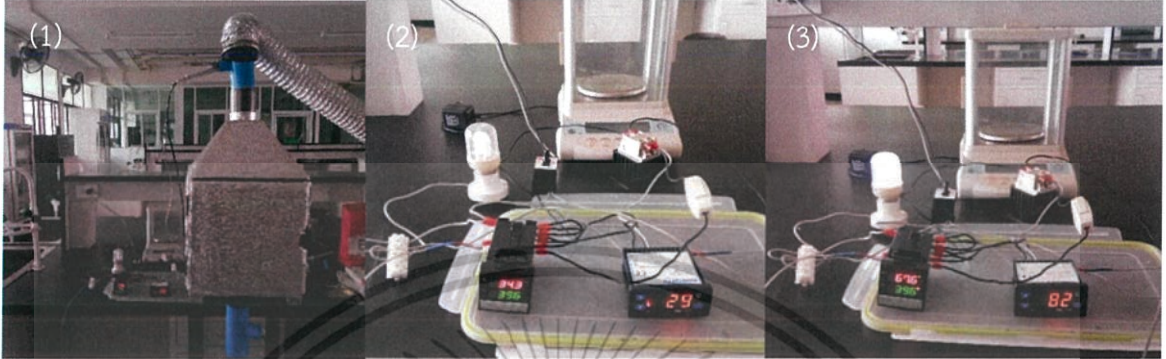
4) เปิดเครื่องเป่าลมให้ทำงาน พร้อมทั้งวัดค่าและบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าและขาออกที่ผ่านภาตบรรจุซิลิกาเจลด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์

5) สำหรับในกระบวนการคายซับ จะเปิดอุปกรณ์ทำความร้อนทำให้อุณหภูมิอากาศเพิ่มจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิอากาศในการคายซับตามที่กำหนด เมื่ออุณหภูมิอากาศขาออกสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิตั้งเดิมของกระบวนการคายซับ หลอดไฟจะติด จึงนำซิลิกาเจลออกมาชั่งน้ำหนัก และสลัปโหมตเป็นกระบวนการดูดซับ

6) นำภาตซิลิกาเจลกลับเข้าตู้เพื่อทำการลดความชื้น โดยระยะเวลาดำเนินงานของการดูดซับจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิอากาศขาออกลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิตั้งเดิมของกระบวนการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) หลังจากนั้นดำเนินการสลับโหมดเป็นกระบวนการคายซับ และจะสลับรูปแบบนี้ซ้ำๆ จนกระทั่งความชื้นที่ถูกดูดซับใน การดูดซับเท่ากับความชื้นที่ถูกคายซับในกระบวนการคายซับ



ภาพที่ 3.3 วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุนทุมิจูดยุติ (1) ตู้ขนาด 30x30x30 ซม.³ (2) วงจรการทำงานขณะกระบวนการดูดซับในอากาศ (3) วงจรการทำงานขณะกระบวนการคายซับ

3.4 การหาประสิทธิภาพของการทดลองวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (CSC) และวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุนทุมิจูดยุติ (TBC)

วัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (conventional steady cyclic operation: CSC) คาบของการลดความชื้นหรือการดูดซับ และคาบของการฟื้นฟูหรือการคายซับเกิดขึ้นอย่างซ้ำๆ เป็นวัฏจักรสลับกัน คาบดำเนินงานของการดูดซับและการคายซับมีค่าเท่ากัน ($t_{ad} = t_{de}$) สภาวะของการดำเนินงานเบตบรจูลิกาเจล ความชื้นอากาศขาเข้า ความเร็วของอากาศขึ้นและอากาศร้อนมีค่าเท่ากันที่ 0.018 kg_w/kg_a และ 0.34 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ อุณหภูมิของอากาศคายซับสำหรับงานวิจัยนี้จะเท่ากับ 75 กับ 85 องศาเซลเซียส และจากการศึกษางานวิจัย จึงกำหนดคาบการดำเนินงานของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (t_{cyc}) มีค่าเท่ากับ 90 นาที ส่วนกระบวนการคายซับของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุนทุมิจูดยุติ (TBC) กำหนดให้เทอมไรหน่วยของอุนทุมืออากาศในกระบวนการดูดซับ (T_{ad}^*) และกระบวนการคายซับ (T_{de}^*) มีค่าเท่ากับ 0.2 และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิสำหรับกระบวนการดูดซับ (T_{ad}^b) เท่ากับ 38.4 องศาเซลเซียส และสำหรับกระบวนการคายซับที่อุณหภูมิในการคายซับ 75 กับ 85 องศาเซลเซียส (T_{de}^b) เท่ากับ 67.5 กับ 76.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งใช้ในการตัดสินใจเพื่อจะควบคุมสวิตช์และสลับโหมดการทำงานระหว่างการดูดซับและการคายซับ ทั้งหมดนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น แสดงดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สภาวะของการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น

Cond.	ϵ	t_{cyc} (min)	L (m)	d_b (m)	v ($m \cdot s^{-1}$)	ρ_s ($kg \cdot m^{-3}$)	q_0 ($kg_w \cdot kg_s^{-1}$)	T_{ad}^* ($^{\circ}C$)	T_{de}^* ($^{\circ}C$)	$T_{ad, in}$ ($^{\circ}C$)	$T_{de, in}$ ($^{\circ}C$)
1	0.35	90	0.07	0.275	0.34	1,200	0.02	-	-	32.0	75.0
2	0.35	90	0.07	0.275	0.34	1,200	0.02	-	-	32.0	85.0
3	0.35	-	0.07	0.275	0.34	1,200	0.02	0.2	0.1	32.0	75.0
4	0.35	-	0.07	0.275	0.34	1,200	0.02	0.2	0.1	32.0	85.0

หมายเหตุ : Condition 1 กับ 2 เป็นวัฏจักรการดำเนินแบบสม่ำเสมอ (CSC)

Condition 3 กับ 4 เป็นวัฏจักรการดำเนินแบบอุณหภูมิจุดยุติ (TBC)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

กล่าวถึงข้อมูลจากการทดลองหาไอโซเทอมของซิลิกาเจลด้วยวิธีเชิงสถิตย์ (static desiccator isotherm method) สมการไอโซเทอมของซิลิกาเจล ผลการคำนวณความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการคำนวณประสิทธิภาพของของระบบลดความชื้นด้วยซิลิกาเจลจากผลการทดลอง และผลจากแบบจำลอง

4.1 ผลการหาไอโซเทอม

จากการทดลองด้วยวิธีเชิงสถิตย์ ระยะเวลาที่ใช้จนถึงจุดสมดุลที่น้ำหนักซิลิกาเจลไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญประมาณ 1-2 สัปดาห์ และเมื่อนำน้ำหนักซิลิกาเจลก่อนและหลังอบมาคำนวณค่าอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักและอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลในสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ

สารละลายเกลืออิมิตัว	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์, RH)	น้ำหนักซิลิกาเจลที่สมดุล (กรัม)	น้ำหนักซิลิกาเจลหลังอบมร้อน (กรัม)	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล (กรัม น้ำ/กรัม ซิลิกาเจลแห้ง, q)
โพแทสเซียมแอสซิเตต (CH_3COOK)	22.60	2.9327	2.6868	0.0915
โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3)	43.80	5.4982	4.8560	0.1322
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	75.32	6.1717	4.8442	0.2740
โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	84.32	6.2206	4.8313	0.2876

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวกับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล สมการจะเท่ากับ $RH_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$, $R^2 = 0.9896$ ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 4.1 และจะนำสมการที่ได้ไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ เพื่อต้องการทราบอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่แสดงอยู่ในรูปของความสามารถในการลดความชื้น (moisture removal capacity) มาเปรียบเทียบกับค่าทดลองที่บันทึกผลของน้ำหนักซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลงไปในกระบวนการลดความชื้นและคายซับที่ดำเนินการอย่างซ้ำๆ สลับกัน



ภาพที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล

4.2 ผลการคำนวณความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Validation)

การทดลองกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับของวัฏจักรการดำเนินงานแบบ สม่่าเสมอ ในสภาวะเงื่อนไขเดียวกัน อุณหภูมิอากาศ 32 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.34 เมตรต่อ วินาที ความสูงเบต 0.07 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเบต 0.275 เมตร ระยะเวลาของกระบวนการดูดซับและ การคายซับเท่ากับ 45 นาที ความชื้นอากาศขาเข้า เท่ากับ 0.018 กรัม/น้ำต่อกรัมของซิลิกาเจล อุณหภูมิ อากาศในการคายซับ 75 กับ 85 องศาเซลเซียส

ข้อมูลการทดลองได้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง ซึ่งจะ นำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของเบตระหว่างกระบวนการดูดซับและการคายซับ ข้อมูลผลการ ทดลอง ผลจากการคำนวณสมการเอมพิริกัล และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ และการคายซับด้วยซิลิกาเจลจะแสดงในภาคผนวก ค ตาราง ค.1 และ ค.2 ความแม่นยำจะพิจารณาจาก ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล: $\sigma(q)$ เห็นได้ชัดว่าผลลัพธ์จาก แบบจำลองที่ใช้ไอโซเทอมที่ศึกษาสอดคล้องกับผลจากการทดลอง ซึ่งที่อุณหภูมิอากาศในการคายซับ 75 กับ 85 องศาเซลเซียส จะมีช่วงค่าความคลาดเคลื่อน 7.6 - 13.6% ค่าความคลาดเคลื่อนของผลจากการ คำนวณสมการเอมพิริกัล และความคลาดเคลื่อนของผลแบบจำลองที่ใช้สมการไอโซเทอมงานวิจัยของ Ramzy [1] สรุปดังตาราง 4.2 และวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลจากผลการคำนวณสมการเอมพิริกัล และ ผลจากแบบจำลอง

อุณหภูมิอากาศในการคายซับของ วัฏจักรการดำเนินแบบสม่่าเสมอ (องศาเซลเซียส)	$\sigma(q)$ (เปอร์เซ็นต์)		
	ผลจากการคำนวณ สมการเอมพิริกัล	ผลแบบจำลอง	
		(อ้างอิง [1])	(ที่ศึกษา*)
75	284.8	10.6	7.6
85	599.9	16.3	13.6

หมายเหตุ : [1] $RH_s = (682,782q^6 - 968,999q^5 + 560,955q^4 - 169,543q^3 + 27,864q^2 - 2,069q + 55.61)/100$

* $RH_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 4.2 ผลการคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลด้วยสมการเอมพิริกัล ซึ่งใช้ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าและขาออกจากเบตบรรจุซิลิกาเจลที่บันทึกขณะทดลองจะให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนมากกว่าผลจากการคำนวณอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลจากการชั่งน้ำหนักซิลิกาเจลเมื่อสิ้นสุดกระบวนการลดความชื้นและคายซ้บทุกครั้ง งานวิจัยนี้จึงเลือกการคำนวณอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลงไปในการคำนวณความแม่นยำของผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สมการไอโซเทอมของงานวิจัย Ramzy [1] และสมการไอโซเทอมที่ศึกษา และพบว่าผลจากแบบจำลองที่ใช้สมการไอโซเทอมที่ศึกษาจะมีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง ดังนั้นการหาประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นของทั้งวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอกับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิคงที่โดยใช้ข้อมูลอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลงหรือการชั่งน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลงไปในการคำนวณ

4.3 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นด้วยซิลิกาเจลจากผลการทดลองและผลจากแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้มีการประเมินประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับความชื้นซิลิกาเจลในเบตบรรจุ เงื่อนไขในการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 3.1 ของบทที่ 3 และข้อมูลในการคำนวณประสิทธิภาพจะใช้ในช่วงที่สภาวะคงตัวหรืออัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลงอย่างคงที่ ซึ่งแสดงในภาคผนวก ค โดยประสิทธิภาพของระบบลดความชื้นพิจารณาจากความสามารถในการกำจัดความชื้น (moisture removal capacity: MRC) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (dehumidification coefficient of performance: DCOP) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าความร้อนที่แฝงของกระบวนการดูดซับกับค่าความร้อนสัมผัสของกระบวนการคายซ้บ และประสิทธิภาพจากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สมการไอโซเทอมที่ศึกษา ดังตารางที่ 4.3 และวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสมรรถนะของระบบลดความชื้นที่สภาวะคงตัว ค่า MRC ค่า DCOP จากผลการทดลองกับผลจากแบบจำลอง

วัฏจักรการดำเนินงาน (อุณหภูมิอากาศในการคายซับ)	MRC (กรัมของน้ำต่ออนาที)		DCOP	
	ผลการทดลอง	ผลจาก แบบจำลอง (ที่ศึกษา*)	ผลการทดลอง	ผลจาก แบบจำลอง (ที่ศึกษา*)
แบบสม่ำเสมอ (75°C)	2.222	2.278	0.128	0.131
แบบสม่ำเสมอ (85°C)	2.333	2.651	0.109	0.124
แบบอุณหภูมิจุดยุติ (75°C)	2.364	2.282	0.145	0.143
แบบอุณหภูมิจุดยุติ (85°C)	2.778	2.742	0.147	0.149

หมายเหตุ : * $RH_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$

จากตารางที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนของค่า MRC และ DCOP จากแบบจำลองที่ใช้สมการไอโซเทอมที่ศึกษาจะอยู่ช่วง -13.6 – 3.5% และ -13.8 – 1.4% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 วัฏจักร ทั้งอุณหภูมิอากาศในการคายซับที่ 75 และ 85 องศาเซลเซียส วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ในด้านการใช้พลังงานภายในระบบ เนื่องจาก MRC และ DCOP ที่มีค่าสูงกว่า และทั้งผลการทดลองและผลจากแบบจำลอง ค่า MRC ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (TBC) จะมีค่าสูงกว่าวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (CSC) เช่นเดียวกับค่า DCOP เนื่องจากที่สภาวะคงตัวของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติจะเกิดการคายซับได้ดีกว่า ส่วนค่า DCOP ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการคายซับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ก่อนถึงคาบหรือระยะเวลาในกระบวนการคายซับ จึงเกิดการใช้พลังงานที่สิ้นเปลืองในช่วงกระบวนการคายซับ

สำหรับผลจากแบบจำลองค่า MRC ไม่สามารถเป็นค่าบ่งบอกประสิทธิภาพของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอและวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติได้ เนื่องจากค่า MRC ใกล้เคียงกัน DCOP จึงถูกใช้เพื่อเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่สภาวะต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 วัฏจักร วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ เนื่องจาก DCOP ที่มีค่าสูงกว่า สำหรับผลแบบจำลองของสมการไอโซเทอมที่ศึกษา ที่อุณหภูมิอากาศในการคายซับ 75 องศาเซลเซียส ค่า MRC และ DCOP ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติมีค่าสูงกว่าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอประมาณ 0.18% และ 9.16%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิกาศในการคายซับ 85 องศาเซลเซียส ค่า MRC และ DCOP ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติมีค่าสูงกว่าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอประมาณ 3.43% และ 20.16% ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการหาไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล พบว่าสมการไอโซเทอมจะเท่ากับ $[RH]_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$ นำสมการไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับผลจากการทดลอง ความคลาดเคลื่อนของผลจากแบบจำลองที่ใช้ไอโซเทอมที่ศึกษากับผลการทดลองคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการใช้ไอโซเทอมของงานวิจัย Ramzy [1] จึงยอมรับสมการไอโซเทอมที่ศึกษา

ออกแบบเครื่องลดความชื้นจากการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจะดำเนินการทดลองระบบลดความชื้นแบบวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอกับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิคงที่ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ผลลัพธ์จะมีผลจากการทดลองที่คำนวณอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลหลังกระบวนการดูดซับและกระบวนการการคายซับ ผลการคำนวณด้วยสมการเอมพิริกัลซึ่งใช้ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่บันทึกขณะทดลองในการคำนวณ และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สมการไอโซเทอมของงานวิจัย Ramzy [1] กับสมการไอโซเทอมที่ศึกษาเกิดปัญหาผลการคำนวณด้วยสมการเอมพิริกัลมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากข้อมูลที่บันทึกด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์ไม่มีความเสถียร จึงเลือกการคำนวณประสิทธิภาพของวัฏจักรจากอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลงไปในการเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง ซึ่งผลจากแบบจำลองที่ใช้ไอโซเทอมที่ศึกษาสอดคล้องกับผลการทดลอง จึงยอมรับได้ว่าผลจากแบบจำลองสามารถคาดการณ์ผลของระบบลดความชื้นด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็งได้สำหรับการศึกษาเบื้องต้น และพบว่า วัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิคงที่ เป็นวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการดำเนินงานระบบลดความชื้น เนื่องด้วยเมื่ออุณหภูมิในการคายซับที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดความชื้น (MRC) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (DCOP) สูงขึ้นเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองกระบวนการดูดซับกับกระบวนการคายซับ สำหรับเบดบรรจุสารดูดซับความชื้นชนิดซิลิกาเจล เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ศึกษาได้ จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองภายใต้สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน พบว่าผลแบบจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลองแต่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ แสดงว่าการใช้สมการไอโซเทอมของตัวดูดซับและการวัดตัวแปรในการทดลอง เช่น ความเร็ว อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศยังคงเกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นจึงพิจารณาการหาไอโซเทอมของตัวดูดซับ และปรับเทียบเครื่องวัดให้มีความแม่นยำ นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่าการเพิ่มค่าอุณหภูมิอากาศร้อนในการคายซับสารดูดซับ จะทำให้สามารถลดความชื้นในอากาศด้วยตัวดูดซับได้ไวขึ้น ดังนั้นหากสามารถศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น และเกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ระยะเวลาการทดลองวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติจะใช้เวลาานกว่าเวลาที่แสดงในผลจากแบบจำลอง ดังนั้นหากศึกษาและปรับแก้แบบจำลองให้สอดคล้องกับการทดลอง จะทำให้การคาดการณ์ผลการทดลองระบบลดความชื้นมีความเป็นไปได้มากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] 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, 1987.
- [3] J. M. Smith, *Introduction to chemical engineering thermodynamics 7th edition*, 7th ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- [4] B. Carter, "Fundamentals of water activity – product characterization using moisture sorption isotherm," Paper presented at the Product Characterization Using Moisture Sorption Isotherm. March 28, 2008. Kasetsart University, Bangkok, Thailand. 40 pp. 2008.
- [5] จารุกิตติ์ จันทน์เสียวใช้, "แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับและคายซับ," แบบจำลองสำหรับการฟื้นฟูระบบลดความชื้นแบบเบ็ดบรรจ, กรุงเทพฯ: สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [6] ชนนท์ ราชภูมิยม และคณะ, "การทำไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี," *วิธีการหาความชื้นสมดุล*, เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2555.
- [7] ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, "บทที่ 1 บทนำ," in *กระบวนการดูดซับสาร Adsorption process*, นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.
- [8] ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, "บทที่ 2 สมดุลการดูดซับของสารเดี่ยว," in *กระบวนการดูดซับสาร Adsorption process*, นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.
- [9] สุพจน์ ตุงคเศรวงค์, "Technology Promotion," *เทคนิคการวัดความชื้น*, กรุงเทพฯ: บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด, 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] “การนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่,”.
- [11] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “การใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์,” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557. [Online]
- [12] A. Pesaran and A. Mills, “Moisture transport in silica gel packed beds - I. Theoretical study,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 30, no. 6, pp. 1037–1049, 1987.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการหาไอโซเทอมของซิลิกาเจล

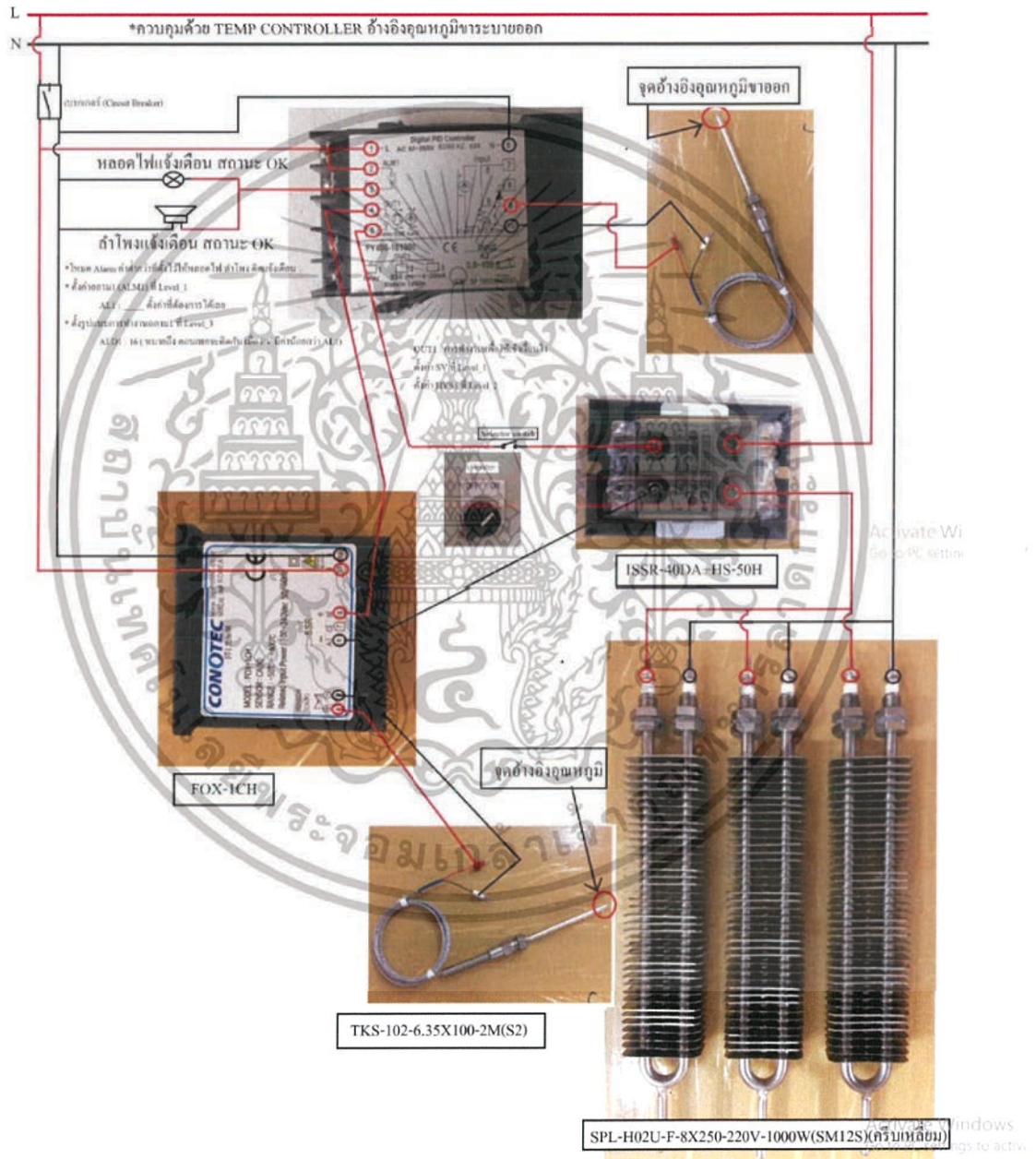
ตารางที่ ก.1 บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลในขวดโหลที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวจำนวน 5 ขวด ทุกๆ 24 ชั่วโมง

สารละลายเกลืออิ่มตัว	น้ำหนักของซิลิกาเจล (กรัม)										
	วันที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
โพแทสเซียมแอสซิเตด	5.0056	4.1685	3.5301	2.9277	2.9422	2.9353	2.9314	2.9311	2.9313	2.9323	2.9327
โพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.0029	5.2116	5.3511	5.4007	5.4373	5.4508	5.4737	5.4853	5.4897	5.4950	5.4982
โซเดียมคลอไรด์	5.0029	5.4205	6.0045	6.1338	6.1535	6.1586	6.1633	6.1692	6.1703	6.1711	6.1717
โพแทสเซียมคลอไรด์	5.0033	5.5028	5.8620	6.0884	6.1897	6.1985	6.2187	6.2235	6.2235	6.2201	6.2206

ภาคผนวก ข

วงจรไฟฟ้าของวัฏจักรการดำเนินงานและอุปกรณ์ในการทดลอง

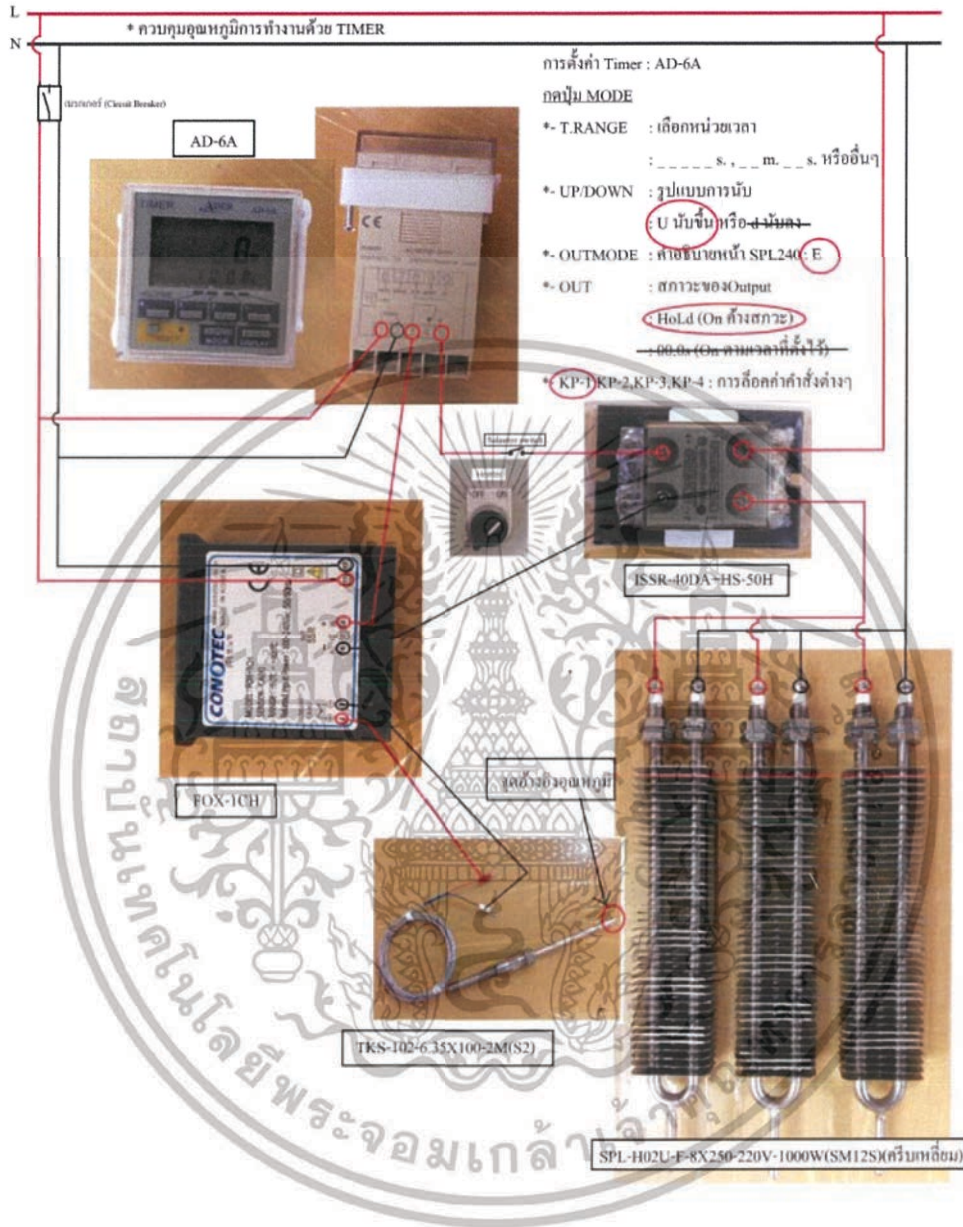
ข.1 วงจรไฟฟ้าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสมำเสมอ



ภาพภาคผนวก ข ที่ 1 วงจรไฟฟ้าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสมำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 วงจรไฟฟ้าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอนุกรมมิจุตยติ



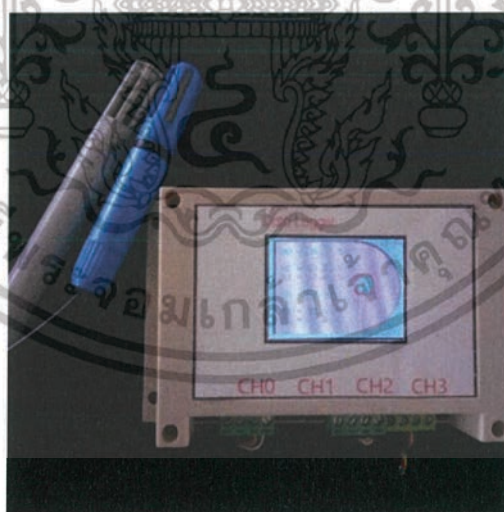
ภาพภาคผนวก ข ที่ 2 วงจรไฟฟ้าของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอนุกรมมิจุตยติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 อุปกรณ์ในการทดลอง

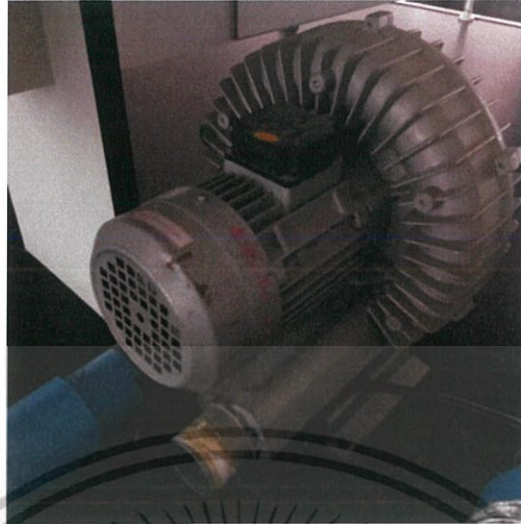


ภาพภาคผนวก ข ที่ 3 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

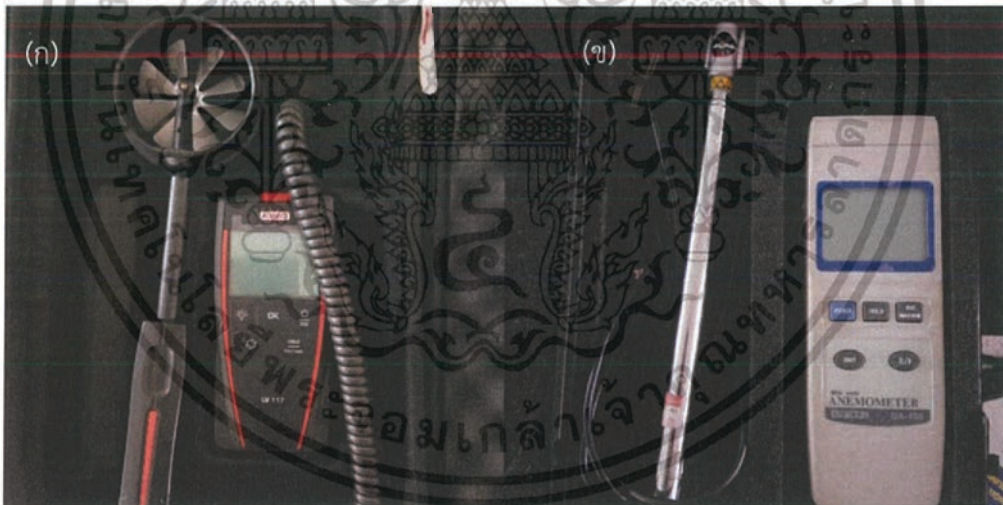


ภาพภาคผนวก ข ที่ 4 เครื่องไฮโกรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพภาคผนวก ข ที่ 5 เครื่องเป่าลม (Blower)



ภาพภาคผนวก ข ที่ 6 เครื่องแอนนิมอมิเตอร์ (Anemometer) (ก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความเร็วที่วัดได้มากที่สุด 35.0 เมตรต่อวินาที และต่ำสุด 0.3 เมตรต่อวินาที (ข) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ความเร็วที่วัดได้มากที่สุด 12.0 เมตรต่อวินาที และต่ำสุด 0.8 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพภาคผนวก ข ที่ 7 ตู้ขนาด 30x30x30 ซม.³ พร้อมถาดบรรจุซิลิกาเจลขนาด 27.5x27.5x12 ซม.³ และ อุปกรณ์ทำความร้อนขนาด 1,000 วัตต์ จำนวน 3 ชิ้น



ภาพภาคผนวก ข ที่ 8 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

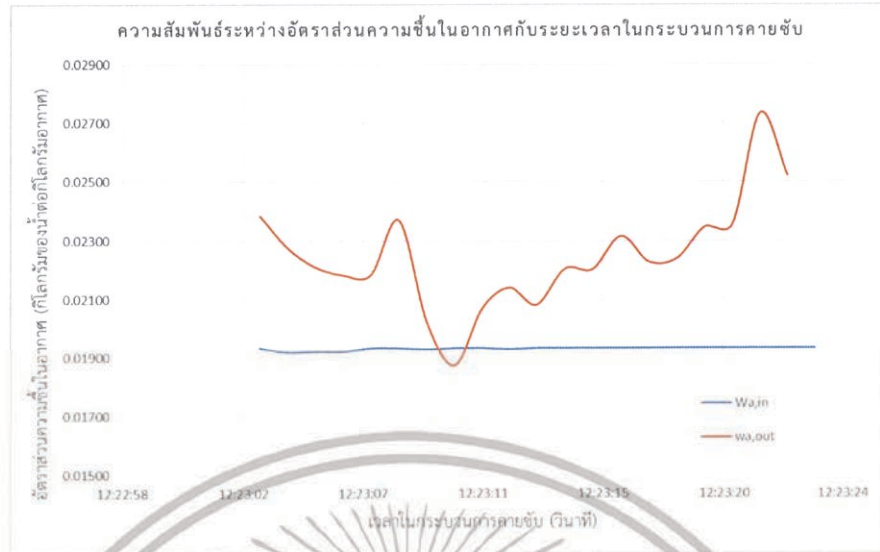
ข้อมูลการทดลองกระบวนการดูดซับและการคายซับด้วยวัฏจักรการดำเนินงาน

ค.1 ข้อมูลจากเครื่องวัดไฮโกรมิเตอร์

สำหรับการทดลองวัฏจักรการดำเนินงานแบบสลับ (CSC) ที่อุณหภูมิอากาศในการคายซับ 75 องศาเซลเซียส จะให้ผลของคำนวณจากสมการเอมพิริคัลที่ใช้ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์ที่บันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาเข้าและขาออกจากเบตซิลิกาเจล คำนวณให้อยู่ในรูปอัตราส่วนความชื้นในอากาศ ($w_{a,in}$ กับ $w_{a,out}$) เป็นดังภาพภาคผนวก ค ที่ 1 และ 2



ภาพภาคผนวก ค ที่ 1 ความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นในอากาศกับเวลาในกระบวนการดูดซับ



ภาพภาคผนวก ค ที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นในอากาศกับเวลาในกระบวนการคายซั้บ

ค.2 การทดลองปฏิบัติการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ (CSC)

การทดลองที่สภาวะ

อุณหภูมิอากาศขาเข้า (T_{air}) = 32 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ = 0.34 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิอากาศในการคายซั้บ (T_{de}) = 75 ถึง 85 องศาเซลเซียส ความสูงเบต = 0.07 เมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางเบต = 0.275 เมตร

อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลตอนเริ่มทดลอง (q_0) = 0.02 กรัมของน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล

ระยะเวลาในการดำเนินการดูดซั้บและการคายซั้บ (t_{cycle}) = 90 นาที ($t_{ad} + t_{de}$)

โดยที่ระยะเวลาในกระบวนการดูดซั้บเท่ากับระยะเวลาในกระบวนการคายซั้บ ($t_{ad} = t_{de}$)

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลผลการทดลอง ผลจากการคำนวณสมการเอมพิริกัล และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ($T_{de} = 75^{\circ}\text{C}$)

กระบวนการ (เวลาในการทดลอง)	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลง (กรัมของน้ำ)			
	ผลการทดลอง	ผลจากการ คำนวณสมการ เอมพิริกัล	ผลจากแบบจำลอง	
			(อ้างอิง [1])	(ที่ศึกษา*)
ดูดซับ1 (0-45 นาที)	250.0	61.7	462.1	292.0
คายซับ1 (45-90 นาที)	200.0	1,168.0	76.5	179.5
ดูดซับ2 (90-135 นาที)	190.0	40.3	240.0	211.9
คายซับ2 (135-180 นาที)	220.0	1,061.0	192.9	202.0
ดูดซับ3 (180-225 นาที)	180.0	45.4	215.3	206.2
คายซับ3 (225-270 นาที)	200.0	764.7	207.3	205.0
ดูดซับ4 (270-315 นาที)	200.0	45.1	211.2	205.5
คายซับ4 (315-360 นาที)	200.0	1,166.0	209.8	205.4

หมายเหตุ : [1] $RH_s = (682,782q^6 - 968,999q^5 + 560,955q^4 - 169,543q^3 + 27,864q^2 - 2,069q + 55.61)/100$

* $RH_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลผลการทดลอง ผลจากการคำนวณสมการเอมพิริกัล และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ($T_{de} = 85^{\circ}\text{C}$)

กระบวนการ (เวลาในการทดลอง)	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลง (กรัมของน้ำ)			
	ผลการทดลอง	ผลจากการ คำนวณสมการ เอมพิริกัล	ผลจากแบบจำลอง	
			(อ้างอิง [1])	(ที่ศึกษา*)
ดูดซับ1 (0-45 นาที)	240.0	57.1	462.1	292.3
คายซับ1 (45-90 นาที)	220.0	2,207.4	122.2	231.3
ดูดซับ2 (90-135 นาที)	180.0	144.8	263.1	239.9
คายซับ2 (135-180 นาที)	210.0	1,933.9	233.9	238.1
ดูดซับ3 (180-225 นาที)	210.0	131.0	246.1	238.7
คายซับ3 (225-270 นาที)	210.0	1,896.2	243.0	238.6
ดูดซับ4 (270-315 นาที)	210.0	135.7	244.3	238.6
คายซับ4 (315-360 นาที)	210.0	2,078.9	244.0	238.7

หมายเหตุ : [1] $RH_s = (682,782q^6 - 968,999q^5 + 560,955q^4 - 169,543q^3 + 27,864q^2 - 2,069q + 55.61)/100$

* $RH_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3 การทดลองของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ (TBC)

การทดลองที่สภาวะ

อุณหภูมิก๊าซเข้า ($T_{a,in}$) = 32 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ = 0.34 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิก๊าซในการคายซึบ (T_{de}) = 75 กับ 85 องศาเซลเซียส ความสูงเบด = 0.07 เมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางเบด = 0.275 เมตร

อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลตอนเริ่มทดลอง (q_0) = 0.02 กรัมของน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล

เทอมไร่น้ำของอุณหภูมิก๊าซในกระบวนการดูดซึบและการคายซึบ = 0.2 และ 0.1 ตามลำดับ

อุณหภูมิก๊าซที่ยุติในกระบวนการดูดซึบ = 38.4 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิก๊าซที่ยุติในกระบวนการคายซึบ = 67.5 กับ 76.5 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลผลการทดลอง ผลจากการคำนวณสมการเอมพิริกัล และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอนุกรมวิธาน (T_{de} = 75°C)

กระบวนการ (เวลาในการทดลอง)	เวลาที่แสดงใน แบบจำลอง (นาทีก)	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลง (กรัมของน้ำ)			
		ผลการทดลอง	ผลจากการ คำนวณสมการ เอมพิริกัล	ผลจากแบบจำลอง	
				(อ้างอิง [1])	(ที่ศึกษา*)
คายซึบ1 (0-19 นาที)	0-1.77	20.0	150.9	15.9	25.0
ดูดซึบ1 (19-62 นาที)	1.77-1.80	180.0	13.4	0.74	0.81
คายซึบ2 (62-201 นาที)	1.80-25.80	200.0	1,185.6	150.0	120.9
ดูดซึบ2 (201-232 นาที)	25.80-73.80	300.0	24.1	621.2	279.1
คายซึบ3 (232-249 นาที)	73.80-97.80	130.0	191.4	142.7	117.0
ดูดซึบ3 (249-277 นาที)	97.80-125.80	130.0	20.0	140.0	116.4
คายซึบ4 (277-303 นาที)	125.80- 149.80	130.0	72.9	141.0	117.0
ดูดซึบ4 (303-332 นาที)	149.80- 177.80	130.0	35.0	141.0	116.8

หมายเหตุ : [1] $RH_s = (682,782q^6 - 968,999q^5 + 560,955q^4 - 169,543q^3 + 27,864q^2 - 2,069q + 55.61)/100$

* $RH_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลผลการทดลอง ผลจากการคำนวณสมการเอมพิริกัล และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิคงที่ ($T_{de} = 85^{\circ}\text{C}$)

กระบวนการ (เวลาในการทดลอง)	เวลาที่แสดงใน แบบจำลอง (นาที)	อัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลง (กรัมของน้ำ)			
		ผลการทดลอง	ผลจากการ คำนวณสมการ เอมพิริกัล	ผลจากแบบจำลอง	
				(อ้างอิง [1])	(ที่ศึกษา*)
คายซับ1 (0-89 นาที)	0-2.25	20.0	1,317.6	16.4	25.0
ดูดซับ1 (89-141 นาที)	2.25-2.28	80.0	31.9	0.76	0.81
คายซับ2 (141-240 นาที)	2.28-31.28	100.0	1,580.1	223.0	120.9
ดูดซับ2 (240-299 นาที)	31.28-79.28	250.0	5.5	603.0	279.1
คายซับ3 (299-323 นาที)	79.28-108.28	150.0	430.7	216.4	117.0
ดูดซับ3 (323-354 นาที)	108.28- 146.28	150.0	39.6	215.3	116.4
คายซับ4 (354-383 นาที)	146.28- 175.28	150.0	162.4	215.8	117.0
ดูดซับ4 (383-411 นาที)	175.28- 213.28	150.0	104.8	215.6	116.8

หมายเหตุ : [1] $RH_s = (682,782q^6 - 968,999q^5 + 560,955q^4 - 169,543q^3 + 27,864q^2 - 2,069q + 55.61)/100$

* $RH_s = (-3,734.4q^3 + 1,402.6q^2 + 188.11q - 0.4303)/100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณสมการเอมพิริกัล คำนวณความแม่นยำของแบบจำลอง และการ คำนวณประสิทธิภาพของวัฏจักร

ง.1 การคำนวณสมการเอมพิริกัล

สมการเอมพิริกัลที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจล แสดงดังสมการที่ (1) (2) (3) และ (4) ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมาจากการวัดและบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วอากาศ ความหนาแน่นอากาศ และพื้นที่หน้าตัดของเบตซิลิกาเจล

$$\ln P_{sat} = 16.2886 - \frac{3816.44}{T_s + 227.02} \quad (1)$$

$$w_s = \frac{0.622 RH_s \times P_{sat}}{P_{tot} - (RH_s \times P_{sat})} \quad (2)$$

$$q_{ad} = \rho_a A_b v \int_0^{t_{ad}} (w_{a,in}(t) - w_{a,out}(t)) \quad (3)$$

$$q_{de} = \rho_a A_b v \int_0^{t_{de}} (w_{a,out}(t) - w_{a,in}(t)) \quad (4)$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิในการคายซับ 75 องศาเซลเซียส ช่วงกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากเบตซิลิกาเจลในกระบวนการดูดซับที่บันทึกด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์

เวลา (วินาที)	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (RH _s , เปอร์เซ็นต์)		อุณหภูมิอากาศ (T _s , องศาเซลเซียส)	
	ขาเข้าเบตซิลิกาเจล	ขาออกเบตซิลิกาเจล	ขาเข้าเบตซิลิกาเจล	ขาออกเบตซิลิกาเจล
9:37:30	67.1	48.3	31.7	34.9
9:37:31	67.1	48.3	31.6	34.9
9:37:32	67.1	48.3	31.6	34.9
9:37:33	67.1	48.3	31.7	34.9

ที่เวลา 9:37:30 ขาเข้าเบตซิลิกาเจล

$$P_{sat,in} = e^{(16.2886 - \frac{3816.44}{31.7+227.02})} = 4.55231 \text{ kPa}$$

$$w_{s,in} = \frac{(0.622 \times 0.671) \times 4.55231}{101.325 - (0.671 \times 4.55231)} = 0.01977 \text{ kg}_w \text{ kg}_a^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาออกเบตซิลิกาเจล

$$P_{sat,out} = e^{\left(\frac{16.2886 - 3816.44}{34.9 + 227.02}\right)} = 5.57106 \text{ kPa}$$

$$w_{s,out} = \frac{(0.622 \times 0.483) \times 5.57106}{101.325 - (0.483 \times 5.57106)} = 0.01697 \text{ kg}_w \text{ kg}_a^{-1}$$

ผลต่างอัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล

$$w_{a,in} - w_{a,out} = 0.01977 - 0.01697 = 0.00280 \text{ kg}_w \text{ kg}_a^{-1}$$

จากการคำนวณความดันอิ่มตัว อัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล และผลต่างอัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุลสำหรับกระบวนการดูดซับ จะแสดงดังตารางที่ ง.2

ตารางที่ ง.2 ผลการคำนวณค่าความดันอิ่มตัว อัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล และผลต่างอัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุลในกระบวนการดูดซับ

เวลา (วินาที)	ความดันอิ่มตัว (P_{sat})		อัตราส่วนความชื้นที่จุด สมดุล (w_s)		ผลต่างอัตราส่วน ความชื้นที่จุด สมดุล ($w_{a,in} - w_{a,out}$)
	ขาเข้าเบต ซิลิกาเจล	ขาออกเบต ซิลิกาเจล	ขาเข้าเบต ซิลิกาเจล	ขาออกเบต ซิลิกาเจล	
9:37:30	4.65231	5.57106	0.01977	0.01697	0.00280
9:37:31	4.62585	5.57106	0.01966	0.01697	0.00269
9:37:32	4.62585	5.57106	0.01966	0.01697	0.00269
9:37:33	4.65231	5.57106	0.01977	0.01697	0.00280
	รวม				0.01098

ข้อมูลการคำนวณ

ความเร็วอากาศ = 0.34 เมตรต่อวินาที ความหนาแน่นอากาศ = 1.159 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
พื้นที่หน้าตัดของเบตซิลิกาเจล = 0.0756 ตารางเมตร

ปริมาณการถ่ายโอนความชื้นของกระบวนการดูดซับ (q_{ad})

$$q_{ad} = \rho_a A_b v \int_0^{t_{ad}} (w_{a,in}(t) - w_{a,out}(t))$$

$$q_{ad} = 1.159 \frac{\text{kg}_a}{\text{m}^3} \times 0.0756 \text{ m}^2 \times 0.34 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times (0.01098 \frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_a}) \times 4 \text{ s}$$

$$q_{ad} = 0.0013 \text{ kg}_w$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงกระบวนการคายซั้บ

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากเบตซิลิกาเจลในกระบวนการคายซั้บที่บันทึกด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์

เวลา (วินาที)	ความชื้นสัมพัทธ์ (RH _s , เปอร์เซ็นต์)		อุณหภูมิอากาศ (T _s , องศาเซลเซียส)	
	ขาเข้าเบตซิลิกาเจล	ขาออกเบตซิลิกาเจล	ขาเข้าเบตซิลิกาเจล	ขาออกเบตซิลิกาเจล
12:23:07	62.4	19.3	32.6	63.7
12:23:08	62.4	19.4	32.6	63.8
12:23:09	62.3	19.3	32.6	63.9
12:23:10	62.4	19.3	32.6	63.9

ที่เวลา 12:23:07 ขาเข้าเบตซิลิกาเจล

$$P_{sat,in} = e^{\left(\frac{16.2886 \cdot 3816.44}{32.6 + 227.02}\right)} = 4.89640 \text{ kPa}$$

$$w_{s,in} = \frac{(0.622 \times 0.624) \times 4.89640}{101.325 - (0.624 \times 4.89640)} = 0.01934 \text{ kg}_w \text{ kg}_a^{-1}$$

ขาออกเบตซิลิกาเจล

$$P_{sat,out} = e^{\left(\frac{16.2886 \cdot 3816.44}{63.7 + 227.02}\right)} = 23.59547 \text{ kPa}$$

$$w_{s,out} = \frac{(0.622 \times 0.193) \times 23.59547}{101.325 - (0.193 \times 23.59547)} = 0.02927 \text{ kg}_w \text{ kg}_a^{-1}$$

ผลต่างอัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล

$$w_{a,in} - w_{a,out} = 0.01934 - 0.02927 = -0.00993 \text{ kg}_w \text{ kg}_a^{-1}$$

จากการคำนวณความดันอ้อมตัว อัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล และผลต่างอัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุลสำหรับกระบวนการคายซั้บ จะแสดงดังตารางที่ ง.4

ตารางที่ ง.4 ผลการคำนวณค่าความดันอิ่มตัว อัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุล และผลต่างอัตราส่วนความชื้นที่จุดสมดุลในกระบวนการคายชื้น

เวลา (วินาที)	ความดันอิ่มตัว (P_{sat})		อัตราส่วนความชื้นที่จุด สมดุล (w_s)		ผลต่างอัตราส่วน ความชื้นที่จุดสมดุล ($w_{a,in} - w_{a,out}$)
	ขาเข้าเบต ซิลิกาเจล	ขาออกเบต ซิลิกาเจล	ขาเข้าเบต ซิลิกาเจล	ขาออกเบต ซิลิกาเจล	
12:23:07	4.89640	23.59547	0.01934	0.02927	-0.00993
12:23:08	4.89640	23.70222	0.01934	0.02957	-0.01023
12:23:09	4.89640	23.80938	0.01931	0.02955	-0.01024
12:23:10	4.89640	23.80938	0.01934	0.02955	-0.01021
รวม					-0.04061

ปริมาณการถ่ายโอนความชื้นของกระบวนการคายชื้น (q_{de})

$$q_{de} = \rho_a A_b v \int_0^{t_{de}} (w_{a,out}(t) - w_{a,in}(t))$$

$$q_{de} = 1.159 \frac{kg_a}{m^3} \times 0.0756 m^2 \times 0.34 \frac{m}{s} \times (-0.04061 \frac{kg_w}{kg_a}) \times 4 s$$

$$q_{de} = -0.0142 kg_w$$

ผลการคำนวณสมการเอนพีริกัลในกระบวนการดูดซับกระบวนการคายชื้นของวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอกับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอณูหภูมิจุดยุติ แสดงในภาคผนวก ค ตาราง ค.1 ค.2 ค.3 และ ค.4

ง.2 การคำนวณความแม่นยำของแบบจำลอง

ผลการคำนวณความแม่นยำผลแบบจำลองกับผลการทดลองของงานวิจัยจะแสดงโดยค่าคลาดเคลื่อน แสดงดังสมการที่ (5) ซึ่งข้อมูลผลการทดลอง ผลการคำนวณสมการเอนพีริกัล และผลจากแบบจำลองแสดงในภาคผนวก ค ตาราง ค.1 และ ค.2

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{exp} - x_{model}}{x_{exp}} \right)^2}{n}} \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอที่สภาวะคงตัว อุณหภูมิในการคายซับ 75 องศาเซลเซียส

ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลของผลการคำนวณสมการ

เอมพิริกัล : $\sigma(q)$

$$\left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2 = \left(\frac{180-45.4}{180}\right)^2 = 0.599$$

$$\sum_{i=1}^4 \left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2 = 0.599 + 7.972 + 0.600 + 23.329 = 32.460$$

$$\frac{\sum \left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2}{4} = 8.115$$

$$\sigma(q) = 8.115^{1/2} = 2.848$$

$$\sigma(q) = 284.8$$

ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลของผลจากแบบจำลองสมการ

ไอโซเทอมงานวิจัย [1]

$$\left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2 = \left(\frac{180-215.3}{180}\right)^2 = 0.038$$

$$\sum_{i=1}^4 \left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2 = 0.038 + 0.003 + 0.001 + 0.002 = 0.045$$

$$\frac{\sum \left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2}{4} = 0.011$$

$$\sigma(q) = 0.011^{1/2} = 0.106$$

$$\sigma(q) = 0.106 \times 100 = 10.6$$

ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลของผลจากแบบจำลองสมการ

ไอโซเทอมที่ศึกษา*

$$\left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2 = \left(\frac{180-206.2}{180}\right)^2 = 0.021$$

$$\sum_{i=1}^4 \left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2 = 0.021 + 0.001 + 0.001 + 0.001 = 0.023$$

$$\frac{\sum \left(\frac{x_{exp}-x_{model}}{x_{exp}}\right)^2}{4} = 0.006$$

$$\sigma(q) = 0.006^{1/2} = 0.076$$

$$\sigma(q) = 0.076 \times 100 = 7.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.3 การคำนวณประสิทธิภาพของวัฏจักรที่สภาวะคงตัว

ข้อมูลอัตราส่วนของน้ำในซิลิกาเจลที่เปลี่ยนแปลงที่สภาวะคงตัวและระยะเวลาของกระบวนการดูดซับกระบวนการคายซับสำหรับการใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของวัฏจักรที่สภาวะคงตัวจะแสดงในภาคผนวก ค ตาราง ค.1 ค.2 ค.3 และ ค.4

ความสามารถในการลดความชื้น (moisture removal capacity: MRC) แสดงดังสมการที่ (6)

$$MRC = \frac{\dot{m}_a}{\Delta t_{cycle}} \int_0^{\Delta t_{ad}} |w_{a,in} - w_{a,out}| dt \quad (6)$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิในการคายซับ 75 องศาเซลเซียส

$$MRC = \frac{0.2 \text{ kg} \times 60 \text{ s} \times 1000 \text{ g}}{5400 \text{ s} \times 1 \text{ min} \times 1 \text{ kg}}$$

$$MRC = 2.222 \text{ g/min}$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ ที่อุณหภูมิในการคายซับ 75 องศาเซลเซียส

$$MRC = \frac{0.13 \text{ kg} \times 60 \text{ s} \times 1000 \text{ g}}{(1560 + 1740 \text{ s}) \times 1 \text{ min} \times 1 \text{ kg}}$$

$$MRC = 2.364 \text{ g/min}$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิในการคายซับ 85 องศาเซลเซียส

$$MRC = \frac{0.21 \text{ kg} \times 60 \text{ s} \times 1000 \text{ g}}{5400 \text{ s} \times 1 \text{ min} \times 1 \text{ kg}}$$

$$MRC = 2.333 \text{ g/min}$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ ที่อุณหภูมิในการคายซับ 85 องศาเซลเซียส

$$MRC = \frac{0.15 \text{ kg} \times 60 \text{ s} \times 1000 \text{ g}}{(1440 + 1800 \text{ s}) \times 1 \text{ min} \times 1 \text{ kg}}$$

$$MRC = 2.778 \text{ g/min}$$

สัมประสิทธิ์สมรรถนะของการลดความชื้น (dehumidification coefficient of performance: DCOP) แสดงดังสมการที่ (7)

$$DCOP = \frac{LH \times \dot{m}_{ad} \int_0^{\Delta t_{ad}} (w_{a,in} - w_{a,out}) dt}{c_a \times \dot{m}_{de} \int_0^{\Delta t_{de}} (T_{a,in,de} - T_{a,amb}) dt} \quad (7)$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิในการคายชื้น 75 องศาเซลเซียส

$$DCOP = \frac{2258 \frac{kJ}{kg} \times 1000 g \times 0.2 kg}{5400 s/2 \times 1.0211 \times 10^3 \frac{J}{kg K} \times 0.34 \frac{m}{s} \times 0.0756 m^2 \times 1.159 kg/m^3 \times (75 - 32^\circ C) \times 1 kg}$$

$$DCOP = 0.128$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจุดยุติ ที่อุณหภูมิในการคายชื้น 75 องศาเซลเซียส

$$DCOP = \frac{2258 \frac{kJ}{kg} \times 1000 g \times 0.13 kg}{1560 s \times 1.0219 \times 10^3 \frac{J}{kg K} \times 0.34 \frac{m}{s} \times 0.0756 m^2 \times 1.159 kg/m^3 \times (75 - 32^\circ C) \times 1 kg}$$

$$DCOP = 0.145$$

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิในการคายชื้น 85 องศาเซลเซียส

$$DCOP = \frac{2258 \frac{kJ}{kg} \times 1000 g \times 0.21 kg}{5400 s/2 \times 1.0211 \times 10^3 \frac{J}{kg K} \times 0.34 \frac{m}{s} \times 0.0756 m^2 \times 1.159 kg/m^3 \times (85 - 32^\circ C) \times 1 kg}$$

$$DCOP = 0.109$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวัฏจักรการดำเนินงานแบบอุณหภูมิจนคติ ที่อุณหภูมิในการคายซับ 85 องศาเซลเซียส

$DCOP$

$$= \frac{2258 \frac{kJ}{kg} \times 1000 g \times 0.15 kg}{1440 s \times 1.0221 \times 10^3 \frac{J}{kg K} \times 0.34 \frac{m}{s} \times 0.0756 m^2 \times 1.159 kg/m^3 \times (85 - 32^\circ C) \times 1 kg}$$

$$DCOP = 0.147$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้