

การศึกษาผลของการลดความชื้นในฟลูอิดิซ์เบดและเบดบรรจุ เพื่อการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่อง

Effect of Dehumidification in Fluidized Bed and Packed Bed for Designing Continuous Dehumidifier

ศิริพันธ์ มุรธาชัยลักษณ์* ณัฏพล ไม้ขุน* ธนทัต ศิริสุวรรณโชติ*

*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: siripan.mu@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การลดความชื้นในอากาศด้วยเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่องขับเคลื่อนด้วยความร้อนเหลือทิ้ง ตัวดูดซับที่เลือกใช้คือ ซิลิกาเจล โดยได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับและคายซับความชื้น ได้แก่ ความสูงของซิลิกาเจลในกระบวนการดูดซับ ความเร็วของอากาศในกระบวนการดูดซับ-คายซับ และอุณหภูมิของอากาศร้อนในกระบวนการคายซับ โดยเปรียบเทียบการออกแบบหอดูดซับและคายซับแบบสภาวะฟลูอิดิซ์เบดและสภาวะเบดบรรจุ จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับความชื้น คือ สภาวะฟลูอิดิซ์เบดที่ความเร็วของอากาศและความสูงของซิลิกาเจลมีค่ามาก เนื่องจากการดูดซับที่สภาวะฟลูอิดิซ์เบดมีค่าความดันตกคร่อมและอุณหภูมิของอากาศขาออกที่ต่ำกว่าที่สภาวะเบดบรรจุ สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการคายซับความชื้น คือ อุณหภูมิ 70 - 80 องศาเซลเซียส ความเร็วของอากาศร้อนมีค่าสูงแต่ไม่เกิน 0.86 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิซ์

คำสำคัญ : ลดความชื้น, สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง, ซิลิกาเจล

Abstract

Dehumidification with continuous dehumidifier is the temperature swing adsorption process. The objective of this study is to evaluate the optimal condition to design continuous dehumidifier driven by waste heat. The adsorbent was silica gel. This experiment studied parameters that affect the efficiency of adsorption process and desorption process. The parameters were height of silica gel in adsorption process, velocity of air in adsorption - desorption process and temperature of hot air in desorption process. This study compared between fluidized bed and packed bed. The results showed that the optimal condition for adsorption process is fluidized bed at high air velocity and high height of silica gel. As a result, the pressure drop and exit air temperature of fluidized bed are lower than of packed bed. The optimal condition for the desorption process is 70-80 °C with high velocity, which does not exceed minimum fluidization velocity of 0.86 m/s

Keywords : dehumidification, solid desiccant, silica gel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

สำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการเก็บรักษาคุณภาพของวัตถุดิบหรือสินค้าให้มีอายุการใช้งานได้ยาวนาน จำเป็นจะต้องมีการควบคุมระดับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เหมาะสม การลดความชื้นของอากาศในปัจจุบันที่นิยมใช้งานมีอยู่ 2 ระบบ [1] คือ ระบบทำความเย็นเชิงกล (Mechanical Refrigeration) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการลดความชื้นในอากาศที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง และระบบลดความชื้น โดยใช้สารดูดความชื้น (Desiccant Dehumidification) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการลดความชื้นในอากาศที่มีความชื้นและอุณหภูมิต่ำ หากมีการใช้ระบบทำความเย็นเชิงกลเพื่อลดความชื้นในอากาศให้ต่ำกว่า 40% ความชื้นสัมพัทธ์ จะทำให้เกิดน้ำแข็งบนคอยล์เย็น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นลดลง ดังนั้น หากใช้ระบบนี้ควรมีช่วงของการไล่น้ำแข็งออกจากคอยล์เย็น (Defrost Cycle) หรือวิธีอื่นๆ ซึ่งทำให้ระบบซับซ้อนและมีราคาแพง ดังนั้นการใช้ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นสำหรับการลดความชื้นในอากาศที่มีความชื้นและอุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า นอกจากนี้ การนำระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นมาใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศ [2] ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าระบบปรับอากาศด้วยวิธีอัดไอ แต่ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์นั้น ระบบปรับอากาศด้วยวิธีลดความชื้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เพราะมีต้นทุนสูง และระยะเวลาการคืนทุนที่นาน

ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น ได้แก่ ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง และระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว ซึ่งมีจุดเด่นและจุดด้อยของแต่ละระบบดังแสดงในตารางที่ 1 ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งที่นิยมใช้กันมาก คือ วงล้อดูดความชื้น (Desiccant Wheel) มีส่วนประกอบหลัก คือ ชุดวงล้อบรรจุสารดูดความชื้นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ และฮีทเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศเพื่อใช้ในการคายซับความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงมากและผล

ที่ตามมา คือ อากาศแห้งที่ได้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งและของเหลว [3]

คุณสมบัติ	ชนิดของระบบลดความชื้น	
	สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง	สารดูดความชื้นชนิดของเหลว
กลไกการลดความชื้น	การดูดซับ	การดูดซึม
ความดันตกคร่อมของระบบ	สูง	ต่ำ
ความร้อนในการฟื้นฟูสารดูดซับ	สูง	ต่ำ
ความซับซ้อนของระบบ	ไม่ซับซ้อน	ซับซ้อน
การกักคร่อน	ไม่กักคร่อน	บางชนิดกักคร่อน
การปนเปื้อนของสารดูดความชื้นในอากาศแห้ง	ไม่ปนเปื้อน	อาจจะปนเปื้อน
ตัวอย่างสารดูดความชื้น	ซิลิกาเจล โมเลกุลาร์ซีฟ แคลเซียมซัลเฟต	สารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ ไตรเอทิลีน-ไกลคอล

เพิ่มขึ้นประมาณ 10-25 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิห้อง [4] อีกทั้งการบรรจุสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นมีลักษณะเป็นเบดบรรจุ (packed bed) ทำให้มีความดันตกคร่อมสูง การนำฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed) มาใช้แทนเบดบรรจุ เป็นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น [5]

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับและคายซับความชื้น เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาใช้สำหรับการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่องขับเคลื่อนด้วยความร้อนเหลือทิ้ง ตัวดูดซับที่นำมาใช้คือซิลิกาเจล เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ประมาณ 35-50% และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการคายความชื้นออกด้วยการให้ความร้อน การทดลองได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับและคายซับสำหรับสภาวะฟลูอิดไคซ์เบดและสภาวะเบดบรรจุ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความสูงของตัวดูดซับ ความเร็วของอากาศในกระบวนการดูดซับและคายซับ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการคาย

ซับ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้น อัตราการคายซับ

จะเพิ่มขึ้นด้วย [6] การใช้อุณหภูมิสำหรับการคายซับที่ไม่สูงเกินไป ทำให้สามารถออกแบบระบบให้มีการใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต เช่น ความร้อนจากคอนเดนเสทมาใช้ในการคายซับความชื้นได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและเกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมที่มีความร้อนเหลือทิ้งและมีความต้องการระบบการควบคุมความชื้น ทำให้สามารถเกิดการต่อยอดในเชิงพาณิชย์ในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎี

เมื่อมีของไหลเคลื่อนที่เข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ที่อยู่ในมืออนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ หากใช้ความเร็วของของไหลต่ำ อนุภาคจะอยู่กับที่เรียกว่าเบดบรรจุ และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปเรื่อยๆ ถึงจุดหนึ่งที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนไหว ความเร็วของของไหลในสภาวะนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอส์ (u_{mf}) [7] สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร

$$u_{mf} = \left(\frac{\epsilon_{mf}^3 \rho_p d_p}{1.75 \rho_g} (\rho_s - \rho_g) g \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ค่าความดันตกคร่อมสำหรับสภาวะเบดบรรจุและฟลูอิดไอส์เบดหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ [8]

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu U}{(\varphi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_f U^2}{\varphi_s d_p} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \quad (3)$$

เมื่อทราบปริมาณความชื้นในอากาศที่ทางเข้าและออกของเบดจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$m_{ad} = AU(\rho_a Y_a - \rho_b Y_b) \quad (4)$$

$$M_{ad} = \int_0^t m_{ad} dt \quad (5)$$

เมื่อ M_{ad} คือ ค่าปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ U คือ ความเร็วของอากาศ ρ_a, ρ_b คือ ความหนาแน่นของอากาศขาเข้าและขาออกตามลำดับ

Y_a, Y_b คือ ค่าปริมาณความชื้นในอากาศขาเข้าและขาออกตามลำดับ โดยการหาค่าปริมาณความชื้นในอากาศคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$Y = 0.622 RH * P_v / (P - RH * P_v) \quad (6)$$

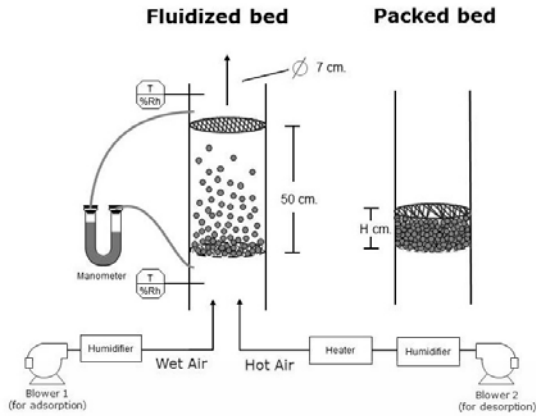
เมื่อ Y คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ (กิโลกรัมไอน้ำ/กิโลกรัมอากาศแห้ง) RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (สัดส่วน) P_v คือ ความดันไอของน้ำ (ปาสคาล)

3. วิธีดำเนินงาน

ใช้ท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สำหรับบรรจุซิลิกาเจล (ขนาดเฉลี่ย 3.5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 0.68 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยที่ทางเข้าและทางออกของท่อมีตะแกรงละเอียดติดตั้งไว้ ระยะห่างของตะแกรงสำหรับการทดลองในสภาวะฟลูอิดไอส์เบด คือ 50 เซนติเมตร และระยะห่างของตะแกรงสำหรับสภาวะเบดบรรจุ คือ ค่าความสูงของซิลิกาเจล (H) ทำให้เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ซิลิกาเจลในเบดบรรจุจึงไม่ประพฤติตัวแบบฟลูอิดไอส์ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ใช้ในการทดลองถูกควบคุมให้มีค่าประมาณ 33 องศาเซลเซียส และ 20 กรัม/น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้งตามลำดับ ทำการติดตั้งมาเนมิเตอร์รูปตัวยูเพื่อใช้ในการวัดค่าความดันตกคร่อม ใช้ฮีตเตอร์สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศสำหรับกระบวนการคายซับ อุปกรณ์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศถูกติดตั้งไว้ที่ทางเข้าและทางออกของชุดทดลอง ความเร็วลมของอากาศถูกปรับด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ต่ออยู่กับเครื่องเป่าลม ชุดอุปกรณ์สำหรับทดลอง แสดงดังรูปที่ 1 โดยก่อนทำการทดลอง ซิลิกาเจลถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นในอากาศด้วยซิลิกาเจลสำหรับสภาวะฟลูอิดไอส์เบดและสภาวะเบดบรรจุ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความสูงของซิลิกาเจลที่ 5 – 12.5 เซนติเมตร และความเร็วของอากาศที่ 0.5 – 2 เมตรต่อวินาที โดยทำการดูดซับความชื้นที่สภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ชุดการทดลองการดูดซับและคายซับสำหรับสภาวะฟลูอิด์เบดและสภาวะเบดบรรจุ

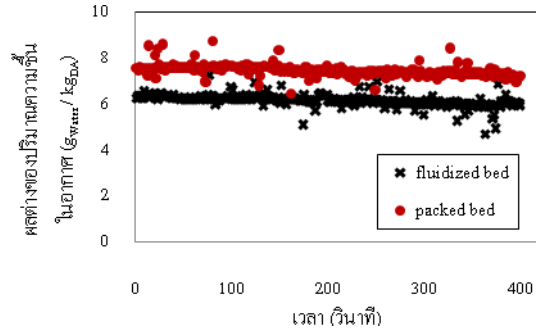
เป็นเวลา 5 นาที ประสิทธิภาพของการดูดซับความชื้นแสดงในรูปของปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจล (มวลของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นภายหลังการดูดซับ) ค่าความดันตกคร่อม และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศ

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคายซับความชื้น ได้แก่ ผลของความเร็วและอุณหภูมิของอากาศร้อนโดยทำการทดลองดูดซับความชื้นในอากาศที่ความเร็วอากาศ 1.5 เมตรต่อวินาที ความสูงของซิลิกาเจล 10 เซนติเมตร ในสภาวะฟลูอิด์เบด เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงทำการคายซับที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อนที่ 0.25 - 1.00 เมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 5 นาที ประสิทธิภาพของการคายซับความชื้นแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกคายซับออกจากซิลิกาเจล (มวลของซิลิกาเจลที่ลดลงภายหลังการคายซับ) ต่อค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

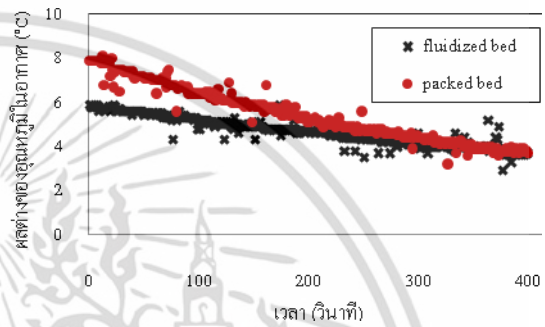
4. ผลการศึกษา/การทดลอง

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล

จากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจล เมื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่บริเวณทางเข้าและออกจากส่วนการดูดซับ พบว่าการดูดซับความชื้นที่สภาวะฟลูอิด์เบด มีค่าผลต่างของปริมาณความชื้นในอากาศ



รูปที่ 2 ผลต่างของปริมาณความชื้นในอากาศก่อนและหลังการดูดซับ



รูปที่ 3 ผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการดูดซับ

ก่อนและหลังการดูดซับต่ำกว่าการดูดซับที่สภาวะเบดบรรจุ ดังแสดงผลในรูปที่ 2 ดังนั้นปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับในสภาวะฟลูอิด์เบดมีปริมาณที่ต่ำกว่าในสภาวะเบดบรรจุ และเนื่องจากการดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจลเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้จากการดูดซับความชื้นด้วยการดูดซับแบบฟลูอิด์เบดมีค่าต่ำกว่าแบบเบดบรรจุ ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการดูดซับสำหรับการดูดซับความชื้นด้วยสภาวะฟลูอิด์เบดมีค่าต่ำกว่าสภาวะเบดบรรจุ ดังแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นที่สภาวะเบดบรรจุค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก แต่ที่สภาวะฟลูอิด์เบดค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกและเริ่มคงที่เมื่อความเร็วอากาศมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์เบด จนกระทั่งที่ความเร็วอากาศที่สูงมากพอ ทำให้เม็ดซิลิกาเจลขึ้นไปติดที่บริเวณตะแกรงด้านบนในลักษณะเบดบรรจุส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง ที่ค่าความเร็วอากาศเท่ากันการดูดซับในสภาวะฟลูอิด์เบดมีความดันตกคร่อมต่ำกว่า

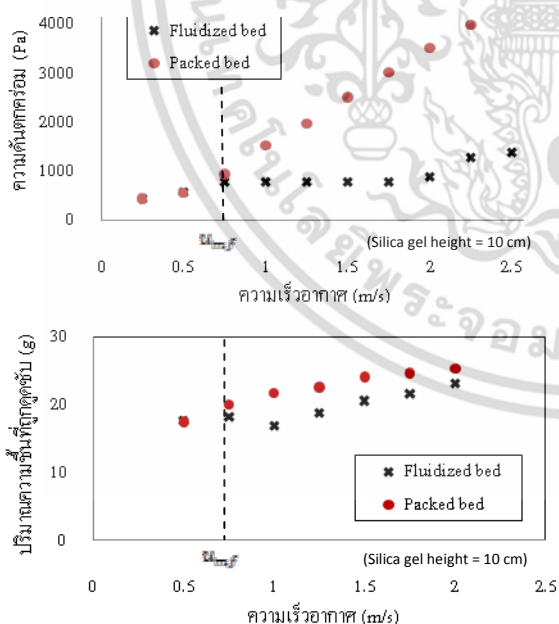
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะเบคบริจ และเมื่อพิจารณาความเร็วอากาศขึ้นที่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของทั้งสองสภาวะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่ความเร็วอากาศเท่ากัน ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับในสภาวะเบคบริจมีค่าสูงกว่าสภาวะฟลูอิดไคซ์เบค

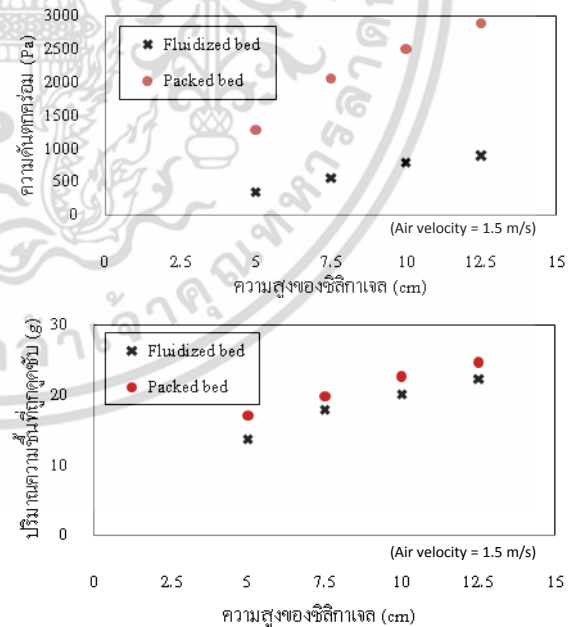
จากรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มความสูงของซิลิกาเจลที่ใช้ในการดูดซับทำให้ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของสภาวะฟลูอิดไคซ์เบคและสภาวะเบคบริจมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความดันตกคร่อมของระบบ พบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของซิลิกาเจล ค่าความดันตกคร่อมในสภาวะเบคบริจจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ในสภาวะ ฟลูอิดไคซ์เบคค่าความดันตกคร่อมที่ใช้นในการดูดซับสามารถเพิ่มปริมาณการดูดซับความชื้นได้แต่จะส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แม้ว่าที่ความสูงของซิลิกาเจลเท่ากันการดูดซับในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบคจะดูดซับความชื้นได้น้อยกว่าในสภาวะเบคบริจ แต่จากการทดลองพบว่าการเพิ่มความสูงของซิลิกาเจล ในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบคให้มากขึ้นทำให้

ปริมาณการดูดซับความชื้นมีค่าสูงกว่าการดูดซับความชื้นที่สภาวะเบคบริจที่ความสูงของซิลิกาเจลน้อย ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของสภาวะฟลูอิดไคซ์เบคที่ความสูงของซิลิกาเจล 12.5 เซนติเมตร กับสภาวะเบคบริจที่ความสูงของซิลิกาเจล 5 เซนติเมตร มีค่า 22.2 และ 17.0 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความดันตกคร่อมของสภาวะทั้งสองเท่ากับ 892 และ 1,285 ปาสคาล ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มความสูงของซิลิกาเจลในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบค ไม่ทำให้ค่าความดันตกคร่อมของระบบสูงกว่าในสภาวะเบคบริจ

จากรูปที่ 6 พบว่าการดูดซับความชื้นของสภาวะฟลูอิดไคซ์เบคและสภาวะเบคบริจมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศสูงขึ้นตามความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น โดยการดูดซับความชื้นที่สภาวะฟลูอิดไคซ์เบคจะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการดูดซับความชื้นที่สภาวะเบคบริจ เนื่องจากการดูดซับความชื้นที่สภาวะฟลูอิดไคซ์เบคจะมีค่าความดันตกคร่อมต่ำกว่าที่สภาวะเบคบริจมาก

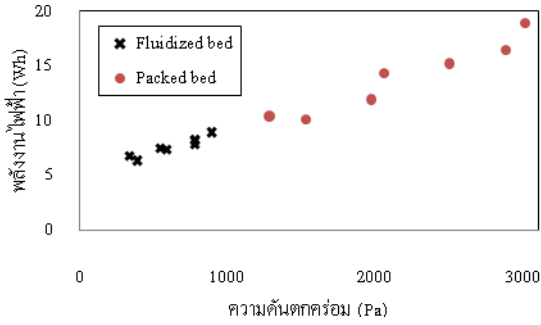


รูปที่ 4 ผลของความเร็วของอากาศต่อความดันตกคร่อมและปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 5 ผลของความสูงของซิลิกาเจลต่อความดันตกคร่อมและปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ

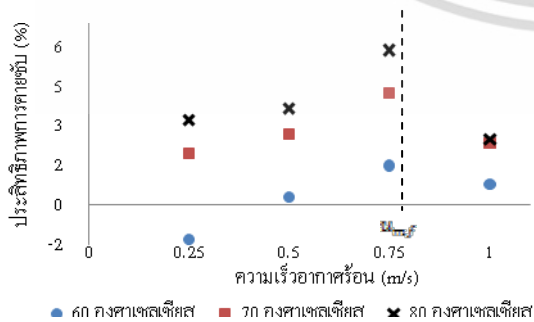
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 ผลของค่าความดันตกคร่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศ

ตารางที่ 2 ผลของความเร็วและอุณหภูมิของอากาศร้อนต่อประสิทธิภาพการคายซึบความชื้นของซิลิกาเจล

ความเร็วอากาศร้อน (m/s)	อุณหภูมิการคายซึบ (°C)	ปริมาณความชื้นที่ถูกคายซึบ (g_{H_2O})	พลังงานที่ใช้ (Wh)
0.25	60	-0.61	47.09
0.5	60	0.2	63.30
0.75	60	1.11	73.92
1	60	0.65	81.4
0.25	70	1.05	53.42
0.5	70	1.87	69.30
0.75	70	3.54	83.43
1	70	2.28	96.2
0.25	80	2.57	79.29
0.5	80	3.47	94.29
0.75	80	5.73	97.49
1	80	2.62	104.7



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการคายซึบความชื้นที่สภาวะต่างๆ

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการคายซึบความชื้นของซิลิกาเจล

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคายซึบความชื้นของซิลิกาเจล โดยนำซิลิกาเจลไปทำการดูดซึบที่สภาวะฟลูอิดไคซ์เบด จากนั้นทำการคายซึบที่สภาวะต่างๆ โดยทำการทดลองที่ความเร็วของอากาศร้อนในช่วง 0.25 ถึง 1 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซึบ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการคายความชื้นของซิลิกาเจลถูกแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกคายซึบต่อผลรวมของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าและฮีตเตอร์ ดังแสดงผลในตารางที่ 2 และ รูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการคายซึบพบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการคายซึบความชื้นมีค่าสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วของอากาศร้อนต่ำ ซิลิกาเจลไม่สามารถคายซึบความชื้นได้และคายซึบความชื้นได้น้อยที่ความเร็วอากาศร้อนสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลของความเร็วอากาศร้อนที่ใช้ในการคายซึบ พบว่าปริมาณการคายซึบความชื้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วอากาศร้อนสูงขึ้น และลดลงเมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงเกินค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ ในขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการคายซึบความชื้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงขึ้น แต่เมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงมากขึ้นจนทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดไคซ์ ประสิทธิภาพการคายซึบความชื้นของซิลิกาเจลจะลดลง

5. สรุปและการอภิปรายผล

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึบความชื้นในอากาศด้วยซิลิกาเจลสำหรับสภาวะฟลูอิดไคซ์เบดและสภาวะเบดบรรจุพบว่า ที่ความเร็วอากาศขึ้นหรือความสูงของซิลิกาเจลเท่ากัน ปริมาณการดูดซึบความชื้นในสภาวะเบดบรรจุมีค่าสูงกว่าสภาวะฟลูอิดไคซ์เบด แต่จะให้ค่าอุณหภูมิของอากาศแห้งที่ได้และค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงกว่าการลดความชื้นด้วยสภาวะฟลูอิดไคซ์เบด ส่งผลให้ที่สภาวะเบดบรรจุมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องเป่าอากาศสูงกว่าที่สภาวะฟลูอิดไคซ์เบด จากการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซึบความชื้นด้วยสภาวะฟลู-

ไคซ์เบคจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะเบคบรรจุ แต่เมื่อมีการเพิ่มความเร็ของอากาศขึ้นหรือเพิ่มความสูงของซิลิกาเจลจะทำให้ปริมาณการดูดซับความชื้นสำหรับสภาวะฟลูอิดไคซ์เบคมีค่าสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นในอากาศสูงขึ้นโดยไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อมมากนัก ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงเรื่องของการประหยัดพลังงาน สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับความชื้น คือ สภาวะ ฟลูอิดไคซ์เบคที่มีความเร็ของอากาศและความสูงของซิลิกาเจลมีค่ามาก

การศึกษาผลของความเร็อากาศร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับความชื้นของซิลิกาเจล พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการคายซับคือ อุณหภูมิ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ของอากาศสูงแต่มีค่าต่ำกว่าค่าความเร็อากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวค่าประสิทธิภาพการคายซับมีค่าสูงที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเงินสนับสนุนงานวิจัยปีงบประมาณ 2558 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pesaran, "A review of desiccant dehumidification technology," NREL/TP-472-7010, 1993.
- [2] M. Sultan, I. EI-Sharkawy, T. Miyazaki, B. Saha and S. Koyama, "An overview of solid desiccant dehumidification and air conditioning system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.46, pp.16-29, 2015.
- [3] S. Misha, S.Mat, M.H.Ruslan and K.Sopian, "Review of solid / liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.16, pp.4686-4707, 2012.
- [4] A.Yadav and V.Bajpai, "Optimization of operating parameters of desiccant wheel for rotation speed,"

International Journal of Advanced Science and Technology, Vol.32, pp.109-116, 2011.

- [5] A. M. Hamed, W. R. Abd El Rahman and S.H. El-Emam, "Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidized bed," Energy, Vol.35, pp.2468-2483, 2010.
- [6] A.E. Kabeel, "Adsorption-desorption operation of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications," Renewable Energy, Vol.34, pp.255-265, 2009.
- [7] R. Surbkar, T. Wongsiriamnuay and S. Surbkar, "Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles," Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering, Vol.8, No.1, pp.24-33, 2012.
- [8] C.H.Chen, G.Schmid, C.T.Chan, Y.C.Chiang and S.L.Chen, "Application of silica gel fluidized bed for air-conditioning systems," Applied Thermal Engineering, Vol.89, pp.229-238, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้