

การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย อติพงษ์ นันทพันธุ์^{a,*}, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์^b และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี^c

Performance Testing of Tray-type Desiccant Unit for Longan Drying Process

Atipoang Nuntaphan^{a,*}, Tanongkiat Kiatsiriroat^b and Natthawut Dussadee^c

^a กองศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง 52220

^b ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50200

^c ภาควิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อ. สันทราย จ. เชียงใหม่ 50290

^a Mae Moh Training Center, Electricity Generating Authority of Thailand, Mae Moh, Lampang 52220, Thailand.

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand.

^c Department of Agronomy, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Sansai, Chiang Mai 50290, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: atipoang.n@ecat.co.th (A. Nuntaphan)

Received 14 December 2004; accepted 12 April 2005

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเกษตรกรในเขตภาคเหนือของประเทศไทยได้ผลิตลำไยอบแห้งเป็นจำนวนมาก โดยเตาอบลำไยที่นิยมใช้คือ เตาอบลำไยแบบไต้หวันที่มีประสิทธิภาพต่ำประมาณ 30% หนทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบลำไยดังกล่าวคือ การลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งนอกจากจะช่วยประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงในการอบแห้งแล้ว ยังสามารถช่วยลดระยะเวลาของการอบแห้งลงได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดสารดูดความชื้น สำหรับใช้ในกระบวนการลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ของเตาอบลำไย โดยชุดสารดูดความชื้นมีลักษณะเป็นชั้นบรรจุซิลิกาเจลชั้นละ 3 กิโลกรัม ขนาด 49.5 x 49.5 x 2.5 เซนติเมตร จำนวน 10 ชั้นวางซ้อนกันในแนวตั้ง โดยมีระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 เซนติเมตร ทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นทั้งในกรณีของกระบวนการดูดความชื้น และกระบวนการอบไล่ความชื้น โดยนำชุดสารดูดความชื้นไปทดสอบสมรรถนะในอุโมงค์ลม และได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้น และเวลาที่ใช้ทดสอบ โดยพบว่าอัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการดูดความชื้นดังกล่าวจะลดลงในกรณีที่อุณหภูมิด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้น ในกรณีของการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้นพบว่าปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและอุณหภูมิด้านเข้าของอากาศเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาโมเดลที่ใช้คำนวณปริมาณมวลของน้ำที่ถูกดูดหรือขับออกจากสารดูดความชื้น ตลอดจนอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: กระบวนการอบแห้ง สารดูดความชื้น การทดสอบสมรรถนะ

Abstract

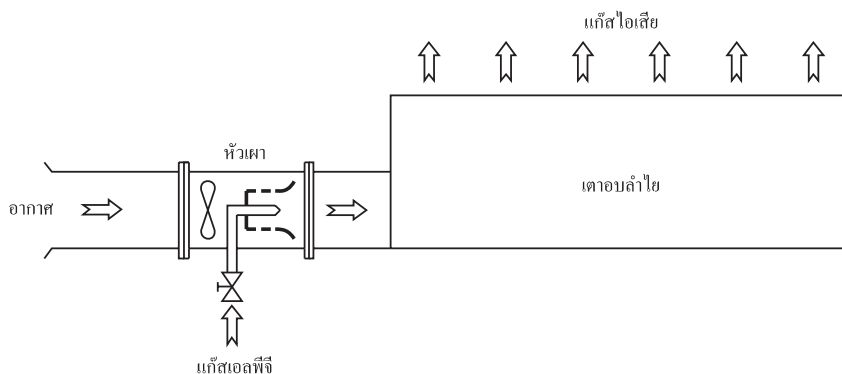
Nowadays, orchard owners in the northern part of Thailand produce dried longans in great quantities by using Taiwan-type longan-drying machine. However, this kind of machine is low in efficiency, approximately 30%. One method for improving the efficiency of the longan-drying machine is by reducing the humidity of the air before the combustion. This method not only decreases the fuel consumption but also reduces the drying period of the machine. The objective of this research work was to design and construct a desiccant unit for reducing the humidity in the air before putting longans in the combustion chamber. The desiccant unit was of the multi-tray-type and each tray contained 3 kgs of silica gel. The dimension of each tray was 49.5 x 49.5 x 2.5 cms. In each unit, there were 10 trays with 2.5 cms spacing between adjacent trays. A performance testing of the desiccant unit tested both air absorption and dehydration processes using the wind tunnel. The parameters affecting the performance of the system such as the air mass flow rate, the air relative humidity, the inlet temperature of air and the experimental time were investigated. It was found that the rate of absorption increased when the mass flow rate of air and the relative humidity of air increased. However, the rate of absorption decreased when the inlet air temperature increased. In case of dehydration process, it was found that the rate of dehydration increased when the mass flow rate of air and the inlet temperature of air increased. However, it decreased when the relative humidity increased. In this study, the models for predicting the mass of water in the absorbing and dehydrating process and the heat transfer rate were also developed. It was found that the model can predict the experimental value quite well.

Keywords: drying process, desiccant, performance testing

บทนำ

ปัจจุบันเกษตรกรในเขตภาคเหนือตอนบนมีการเพาะปลูกลำไยจำนวนมาก จากข้อมูลของศูนย์สถิติการพาณิชย์ (ศูนย์สถิติการพาณิชย์, 2542) พบว่า ผลผลิตของลำไยในเขตภาคเหนือต่อปีมีปริมาณมากกว่า 150,000 ตัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในอนาคต ผลผลิตลำไยที่ได้ส่วนหนึ่งนำไปขายเป็นลำไยสด โดยตลาดส่วนใหญ่จะเป็นตลาดภายในประเทศ และส่วนหนึ่งส่งออกไปยังต่างประเทศคิดเป็นมูลค่าโดยรวมต่อปีมากกว่า 1,000 ล้านบาท อย่างไรก็ตาม ผลผลิตส่วนหนึ่งเกษตรกรจะนำไปแปรรูปเป็นลำไยอบแห้ง เพื่อส่งไปจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 200 ล้านบาท ต่อปี

การแปรรูปลำไยเพื่อผลิตเป็นลำไยอบแห้ง เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมใช้เตาอบลำไยแบบได้หัววัน (รูปที่ 1) ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 30% (ธนวัต และณัฐวุฒิ, 2544) หนทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาที่เกษตรกรใช้งานอยู่ คือ การดึงความร้อนจากแก๊สไอเสียของเตาอบลำไยมาใช้ในการอุ่นอากาศเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบลำไยได้ในระดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สไอเสียไม่สูงมากนัก (ประมาณ 60 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 1 ลักษณะของเตาอบลำไยแบบได้หัววัน

ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการใช้สารดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศสำหรับกระบวนการต่างๆ เช่น ในระบบปั๊มความร้อน การลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์ของระบบสามารถช่วยประหยัดพลังงานของระบบได้ประมาณ 7-20% (Kiatsiriroat and Tachajapong, 2002; จุฑามาส และทองเกียรติ, 2546) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำสารดูดความชื้นมาใช้ลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ของเตาอบลำไย ซึ่งเมื่อความชื้นในอากาศลดลง ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจะลดลงตามไปด้วย ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลำไยอบแห้งลดลง

จากอดีตถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาการประยุกต์ใช้สารดูดความชื้น เช่น ในการลดความชื้นของอากาศสำหรับกับกระบวนการปรับอากาศ (Fu et al., 1994; Rengarajan and Nimmo, 1993) ซึ่งประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นแบบวงล้อหมุน (rotating desiccant wheel) เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบปรับอากาศพบว่า อัตราการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศลดลง

Kiatsiriroat and Tachajapong (2002) ได้นำเอาสารดูดความชื้น (ซิลิกาเจล) มาใช้ในระบบปั๊มความร้อน โดยสารดูดความชื้นบรรจุในท่อทรงกระบอกซึ่งมีรูพรุน และจัดเรียงแบบกลุ่มท่อ (tube bank) ใช้สำหรับการลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าสู่ชุดอีวาพอเรเตอร์ (evaporator) โดยจากการศึกษาพบว่า ระบบดังกล่าวสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 7-20% ขึ้นอยู่กับสภาวะในการทำงาน

ในกระบวนการอบแห้งได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นช่วยในการลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าสู่กระบวนการ อบแห้ง อาทิ เช่น

Ming and colleagues (1994) ได้ทำการศึกษาการใช้สารดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศในกระบวนการ

การอบแห้งใบชาเพื่อคงไว้ซึ่งกลิ่นและสีที่ดีของใบชาโดยได้ลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหลือ 1-30% และใช้อุณหภูมิในการอบแห้งระหว่าง 30-80 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า คุณภาพของใบชาดีขึ้น และในขณะเดียวกันสามารถประหยัดพลังงานได้ 15% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งใบชาแบบปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการลดความชื้นของอากาศลง ส่งผลให้สามารถลดอุณหภูมิการอบแห้งลงได้จากเดิม 110 องศาเซลเซียส เป็น 80 องศาเซลเซียส

Ismail and associates (1991) ได้ใช้สารดูดความชื้นลดความชื้นในอากาศก่อนเข้าไซโลเก็บธัญพืช ทั้งนี้เนื่องจากว่าอากาศที่เข้าไประบายความร้อนในไซลอนั้นต้องเป็นอากาศแห้ง ในกรณีของอากาศมีความชื้นสูงจะส่งผลเสียของธัญพืชที่เก็บในไซโลได้

จากผลงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสารดูดความชื้นมีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่าง ๆ และส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในระบบ

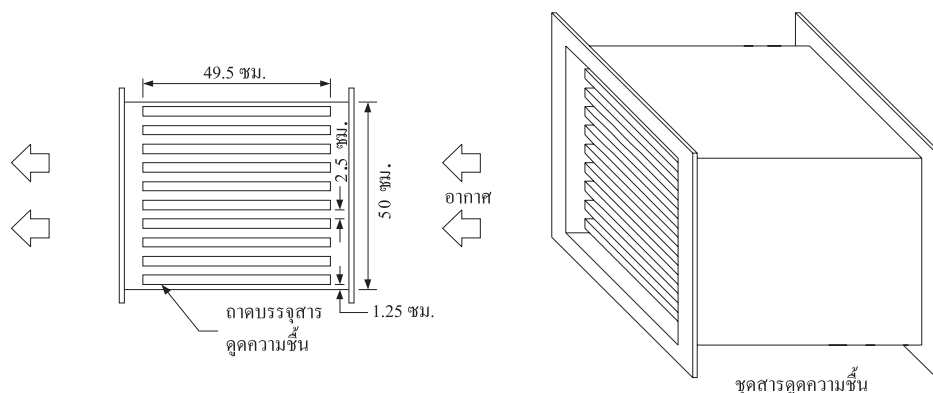
ปัจจุบันรูปแบบของชุดสารดูดความชื้นที่นำมาใช้ในระบบต่าง ๆ จะมีลักษณะเป็นแบบรังผึ้ง (honeycomb) เคลือบผิวด้วยสารดูดความชื้น ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดความชื้นสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวของการถ่ายเทมวลมาก แต่อย่างไรก็ตามมีราคาค่อนข้างแพง และไม่สามารถจัดหาได้ในประเทศไทย

อนึ่ง งานวิจัยนี้จะเสนอรูปแบบของชุดสารดูดความชื้นแบบถาด (tray-type desiccant unit) ซึ่งมีลักษณะเป็นภาชนะบรรจุสารดูดความชื้นวางซ้อนกันในแนวดิ่ง โดยระหว่างชั้นจะเป็นช่องว่างให้อากาศไหลผ่าน ซึ่งคาดว่าจะมีสมรรถนะการดูดความชื้นสูง ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสูง ตลอดจนความดันอากาศตกคร่อมต่ำ รวมทั้งสามารถจัดสร้างได้ง่าย ราคาประหยัด เหมาะสำหรับการที่เกษตรกรสามารถนำไปใช้กับเครื่องอบแห้งลำไย

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบชุดสารดูดความชื้นแบบชั้น

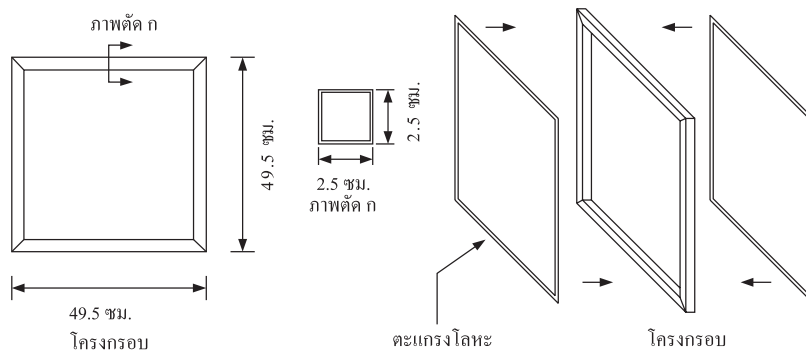
หลักสำคัญในการออกแบบชุดสารดูดความชื้นในงานวิจัยนี้ คือ จะต้องออกแบบให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสูงและความดันอากาศตกคร่อมต่ำ รวมทั้งสามารถนำไปใช้กับเตาอบลำไยได้อย่างดีตลอดจนจัดสร้างได้ง่าย โดยใช้วัสดุพื้นฐานทั่วไป ลักษณะของชุดสารดูดความชื้นที่ออกแบบจะเป็นชุดสารดูดความชื้นแบบถาดซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดสารดูดความชื้นแบบถาด

ชุดสารดูดความชื้นที่ได้ออกแบบสำหรับโครงการวิจัยนี้ ประกอบด้วยถาดบรรจุสารดูดความชื้นจำนวน 10 ชุดวางซ้อนกันในแนวดิ่ง โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ในกระบวนการดูดความชื้น อากาศจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างถาดของสารดูดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในอากาศลดลง ในทางกลับกัน ในกระบวนการอบไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น อากาศร้อนจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างชั้น ส่งผลให้ความชื้นที่ถูกดูดซับในสารดูดความชื้นถูกขับออกมา ลักษณะของถาดบรรจุสารดูดความชื้นที่ได้ออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีลักษณะเป็นกรอบโลหะ ทำด้วยเหล็กกล่องขนาด 2.5 เซนติเมตร x 2.5 เซนติเมตร โดยมีขนาดความยาวด้านละ

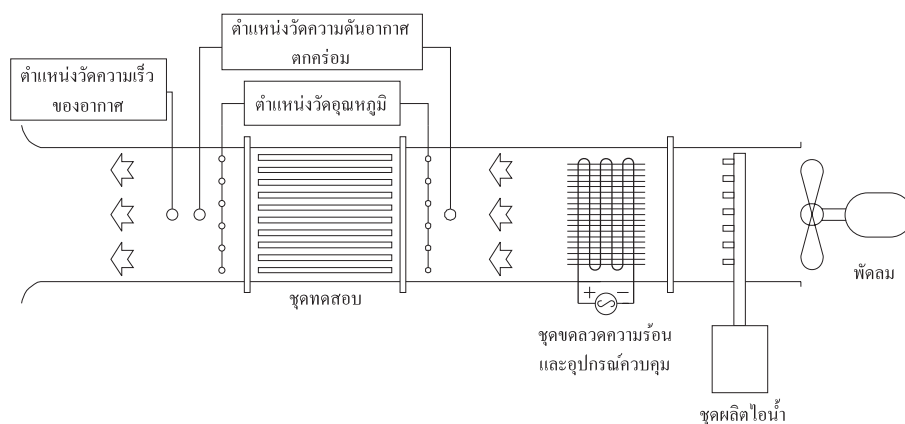
49.5 เซนติเมตร และติดมุ้งลวดโลหะทั้ง 2 ด้าน และในงานวิจัยนี้ใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้น โดยบรรจุซิลิกาเจลชั้นละ 3 กิโลกรัม



รูปที่ 3 ลักษณะและขนาดของภาชนะบรรจุสารดูดความชื้น

วิธีการทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นจะทดสอบในอุโมงค์ลมมาตรฐานตามรูปที่ 4 ซึ่งเป็นอุโมงค์ลมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 50 เซนติเมตร ยาวประมาณ 6 เมตร โดยในการทดสอบนั้นพัดลมขนาด 1/2 แรงม้า ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้โดยใช้เครื่องปรับความถี่ (frequency inverter) จะส่งอากาศเข้าสู่อุโมงค์ลม ผ่านชุดเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ ซึ่งมีลักษณะเป็นหม้อต้มน้ำขนาดเล็ก และในการทำงานจะส่งไอน้ำเข้าสู่ท่อส่งอากาศ เพื่อเพิ่มความชื้นให้กับอากาศที่ใช้ทดสอบ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านชุดลดอุณหภูมิ ความร้อน ขนาด 1,000 วัตต์ จำนวน 20 ชุด พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการปรับอุณหภูมิของอากาศให้ได้ตามต้องการ อากาศที่ถูกควบคุมความเร็ว อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ จะไหลผ่านชุดสารดูดความชื้น ซึ่งประกอบด้วยภาชนะบรรจุสารดูดความชื้น (ซิลิกาเจล) ภาชนะ 3 กิโลกรัม จำนวน 10 ชั้น และไหลออกจากอุโมงค์ลม



รูปที่ 4 ลักษณะของอุปกรณ์ทดสอบการดูดและการอบไล่ความชื้น จากชุดสารดูดความชื้น

ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) เพื่อวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศด้านเข้าและออกจากชุดสารดูดความชื้น โดยอุณหภูมิของอากาศจะถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (temperature data logger) และวัดค่าความเร็วของอากาศโดยเครื่องวัดความเร็วแบบขดลวดความร้อน (hot wire anemometer) และความดันอากาศตกคร่อมชุดสารดูดความชื้นถูกวัดโดยมาตรวัดแบบเอียง (incline manometer)

การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นที่ออกแบบ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบสมรรถนะการดูดความชื้น และการทดสอบสมรรถนะการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้น ซึ่งการทดสอบในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วิธีการทดสอบสมรรถนะการดูดความชื้นของชุดสารดูดความชื้น

การทดสอบสมรรถนะการดูดความชื้นของชุดสารดูดความชื้นเริ่มต้นจากการนำถาดบรรจุสารดูดความชื้นไปอบไล่ความชื้นที่อำจมีอยู่ออก โดยนำถาดไปติดตั้งในอุโมงค์ลม และเดินพัดลมให้มีความเร็วประมาณ 1 เมตรต่อวินาที และตั้งอุณหภูมิอากาศไว้ที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำถาดบรรจุสารดูดความชื้นที่อบแล้วมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า

บรรจุถาดบรรจุสารดูดความชื้นในอุโมงค์ลมเพื่อทดสอบการดูดความชื้น โดยในการทดสอบจะทดสอบที่สภาวะต่างๆ ดังนี้ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 กิโลกรัมต่อวินาที อุณหภูมิของอากาศอยู่ระหว่าง 25-45 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่าง 50-95 % ในขณะทดสอบ จะนำถาดบรรจุสารดูดความชื้นออกมาชั่งน้ำหนักทุก 2 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 8 ชั่วโมงจึงหยุดการทดสอบ ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าและออกจากชุดสารดูดความชื้น ตลอดจนค่าความดันอากาศตกคร่อมชุดสารดูดความชื้น โดยเก็บข้อมูลทุก 5 นาที จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง

วิธีการทดสอบสมรรถนะการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้น

การทดสอบสมรรถนะการอบไล่ความชื้นของชุดสารดูดความชื้นเริ่มต้นจากการนำถาดบรรจุสารดูดความชื้นไปติดตั้งในอุโมงค์ลม และเดินพัดลมให้มีความเร็วประมาณ 3 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อให้สารดูดความชื้นดูดความชื้นเต็มที่จนกระทั่งอิ่มตัว หลังจากนั้นนำถาดบรรจุสารดูดความชื้นมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่า

บรรจุถาดบรรจุสารดูดความชื้นในอุโมงค์ลมเพื่อทดสอบการอบไล่ความชื้น โดยในการทดสอบจะทดสอบที่สภาวะต่างๆ ดังนี้ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 กิโลกรัมต่อวินาที อุณหภูมิของอากาศอยู่ระหว่าง 50-70 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่าง 50-95 % ในขณะทดสอบ จะนำถาดบรรจุสารดูดความชื้นออกมาชั่งน้ำหนักทุก 2 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 8 ชั่วโมง จึงหยุดการทดสอบทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าและออกจากชุดสารดูดความชื้น ตลอดจนค่าความดันอากาศตกคร่อมชุดสารดูดความชื้น โดยเก็บข้อมูลทุก 5 นาที จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

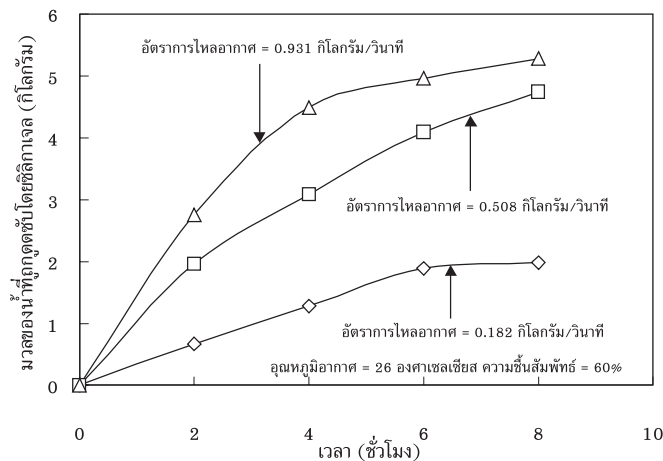
สมรรถนะการดูดความชื้นของชุดสารดูดความชื้น

ตัวอย่างของผลการทดสอบสมรรถนะการดูดความชื้นของชุดสารดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 5-7 รูปที่ 5 แสดงผลของความเร็วยของอากาศที่มีต่อมวลของไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล ณ เวลาต่าง ๆ โดยพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณของน้ำที่สะสมในสารดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น โดยในช่วงประมาณ 4 ชั่วโมงแรก อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลน้ำในสารดูดความชื้นจะมีอัตราค่อนข้างคงที่ และอัตราดังกล่าวจะเริ่มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารดูดความชื้นที่ผิวเริ่มเกิดการอิ่มตัว ทำให้อัตราการดูดความชื้นลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดจะสูงขึ้นตามไปด้วย กล่าวคือ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับจะต่ำที่สุด และในทางกลับกันที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.931 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับจะสูงสุด ปรากฏการณ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการของการถ่ายเทมวลดังนี้ (Incropera and De Witt, 1990)

$$R = h_m A_s (\rho_{ma} - \rho_{ms}) \quad (1)$$

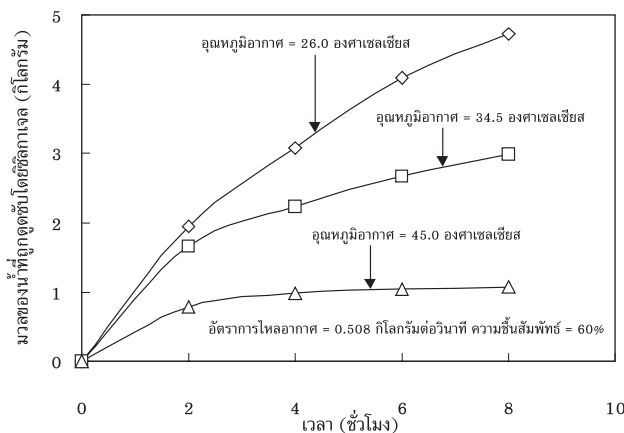
โดยที่

R	=	อัตราการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้น (กิโลกรัมต่อวินาที)
h_m	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (เมตรต่อวินาที)
A_s	=	พื้นที่ผิวของสารดูดความชื้น (ตารางเมตร)
ρ_{ma}	=	ความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ρ_{ms}	=	ความหนาแน่นของน้ำในสารดูดความชื้น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 5 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และ 60% ตามลำดับ

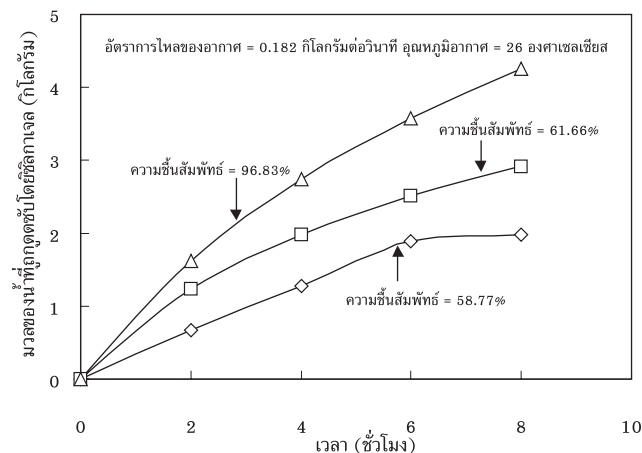
เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย และส่งผลให้อัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีข้างต้น



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิอากาศเข้าสารดูดความชื้นต่อมวลไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่อัตราการไหลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.508 กิโลกรัมต่อวินาที และ 60% ตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของผลของอุณหภูมิอากาศเข้าชุดสารดูดความชื้นต่อมวลของไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่ความเร็วอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.508 กิโลกรัมต่อวินาที และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 60 % ซึ่งพบว่า อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่ออัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล กรณีของอุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลจะน้อยที่สุด และมีแนวโน้มที่จะไม่สามารถดูดซับต่อไปได้อีกในกรณีที่เวลามากกว่า 2 ชั่วโมง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติการดูดความชื้นของสารดูดความชื้น การที่อุณหภูมิของอากาศ

เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นลดลง (Grimm and Rosaler, 1998) ส่งผลให้มวลของไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกดูดซับลดลงนั่นเอง



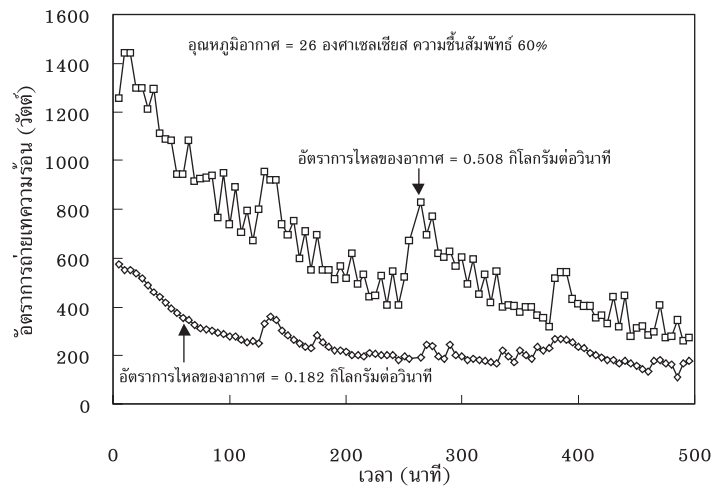
รูปที่ 7 ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าสู่สารดูดความชื้นต่อมวลของไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่อัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศด้านเข้าสู่สารดูดความชื้นเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาที และ 26 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างของผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าสู่สารดูดความชื้นต่อมวลของไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศด้านเข้าสู่สารดูดความชื้นเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศด้านเข้าสู่สารดูดความชื้นประมาณ 26 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการที่ 1 กล่าวคือ กรณีของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลต่างของความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศและสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น และทำให้ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

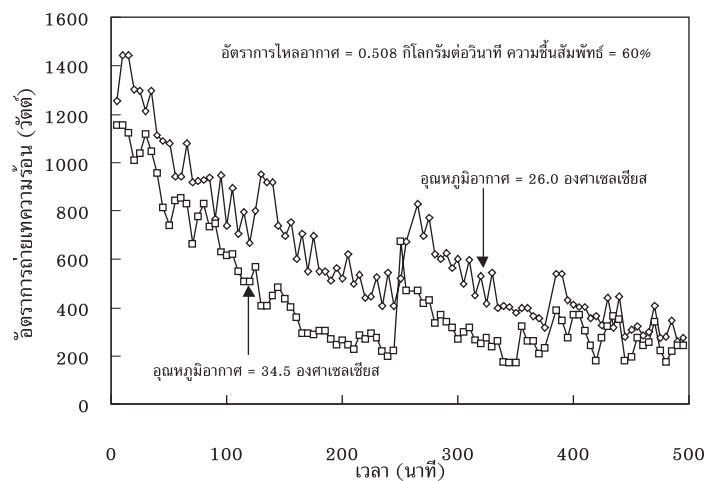
เนื่องจากว่า กระบวนการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้น เป็นกระบวนการคายความร้อน (Grimm and Rosaler, 1998) ดังนั้นอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชุดสารดูดความชื้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความร้อนที่ได้รับขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ และจากรูปที่ 8-10 จะพบว่า อัตราความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ กล่าวคือ อัตราการไหลเชิงมวลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มมากขึ้น และในทางกลับกัน อุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับลดลงนั่นเอง

จากรูปที่ 8-10 ยังพบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มลดลงอย่างเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลจะลดลง อนึ่ง ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการดูดซับความชื้นนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากว่าจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ป้อนให้ห้องเผาไหม้จะลดต่ำลง ซึ่งหมายความว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาอบลำไยลดลงด้วย

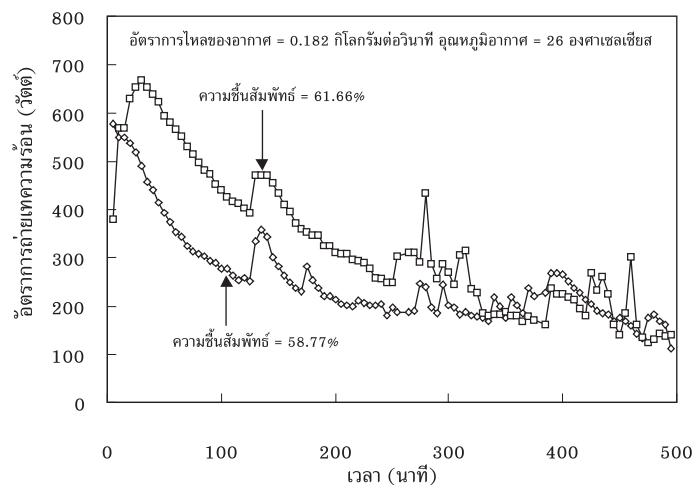
การนำผลการทดลองข้างต้น ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้งของเตาอบลำไยที่จะพัฒนาขึ้นนั้น จำเป็นจะต้องนำผลการทดลองมาสร้างเป็นโมเดล โดยเป้าหมายของโมเดลที่พัฒนาขึ้นจะต้องสามารถคำนวณสถานะของอากาศ (ความชื้นสัมพัทธ์, อุณหภูมิ) หลังจากผ่านชุดสารดูดความชื้นได้ เมื่อทราบค่าสถานะของอากาศด้านเข้าสู่สารดูดความชื้น



รูปที่ 8 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลอากาศที่มีต่ออัตราความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการดูดซับที่เวลาต่างๆ โดยที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส และ 60% ตามลำดับ



รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่ออัตราความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการดูดซับ ที่เวลาต่างๆ โดยที่อัตราการไหลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.508 กิโลกรัมต่อวินาที และ 60% ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อปริมาณความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการดูดซับ ที่เวลาต่างๆ โดยที่อัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาที และ 26 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

โมเดลที่พัฒนาขึ้น จะแบ่งออกเป็น 2 โมเดล คือ โมเดลการดูดความชื้น และโมเดลของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากกระบวนการดูดความชื้น โดยโมเดลทั้งสองจะเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ
- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้น
- อุณหภูมิของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้น
- เวลา

โมเดลการดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นจากผลการทดลองคือ

$$M_w = 34.412 m_a^{0.51427} RH^{1.3343} T_{ai}^{-1.2989} t^{0.51022} \quad (2)$$

โดยที่

- = ปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้น ณ เวลาต่าง ๆ (กิโลกรัม)
- m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
- RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (จุดทศนิยม)
- = อุณหภูมิอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้น (องศาเซลเซียส)
- t = เวลา (นาทีก)

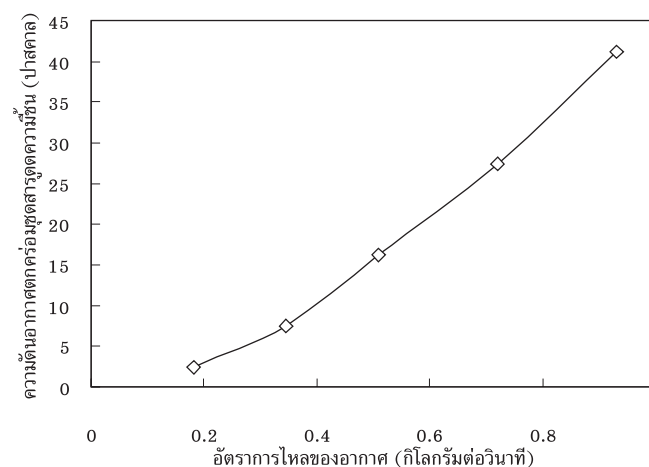
อนึ่ง โมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายข้อมูลการทดลองได้ 72.5% ในช่วง 20% โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เท่ากับ 0.233 ในทำนองเดียวกัน ในกรณีของอัตราการถ่ายเทความร้อนจากชุดสารดูดความชื้นที่สภาวะต่างๆ สามารถนำมาสร้างโมเดลได้ดังนี้

$$Q = 2.4523 \times 10^4 m_a^{0.54867} RH^{0.6843} T_{ai}^{-0.42818} t^{-0.33767} \quad (3)$$

โดยที่

- = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากชุดสารดูดความชื้น (วัตต์)

อนึ่ง โมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายข้อมูลการทดลองได้ 74.48% ในช่วง 30% โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.297



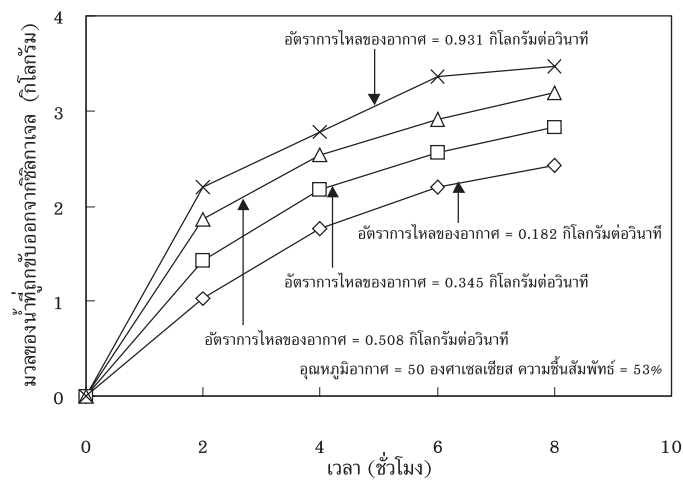
รูปที่ 11 ความชื้นอากาศตกคร่อมชุดสารดูดความชื้นที่อัตราการไหลเชิงมวลอากาศต่างๆ

รูปที่ 11 แสดงความชื้นอากาศตกคร่อมชุดสารดูดความชื้น ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่างๆ ซึ่งพบว่าความชื้นตกคร่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความดัน

ตกรวมจะแปรผันกับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่อย่างไรก็ตามค่าความดันอากาศตกรวมชุดสารดูดความชื้นมีค่าต่ำมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การติดตั้งชุดสารดูดความชื้นเข้ากับเตอบลำไยแบบได้วันจะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ และไม่จำเป็นจะต้องปรับเปลี่ยนขนาดของพัดลมส่งอากาศของเตอบลำไย

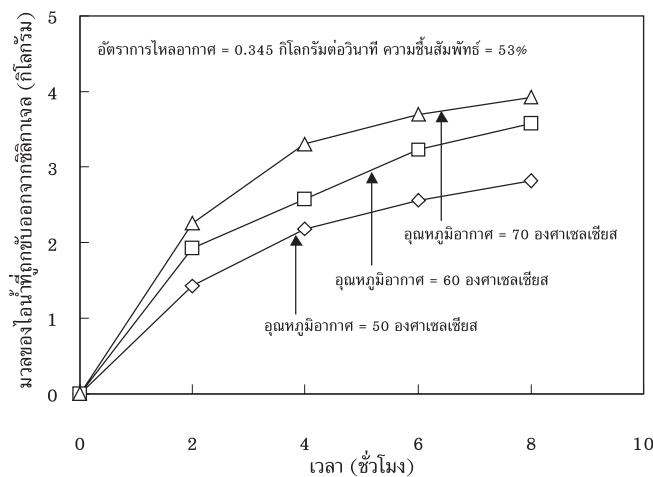
สมรรถนะการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้น

การทดสอบสมรรถนะการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้น ในงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจเฉพาะปริมาณน้ำที่ถูกขับออกมาจากสารดูดความชื้น ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ อุณหภูมิของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ รูปที่ 12-14 แสดงตัวอย่างผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ข้างต้น



รูปที่ 12 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อมวลของน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และ 53% ตามลำดับ

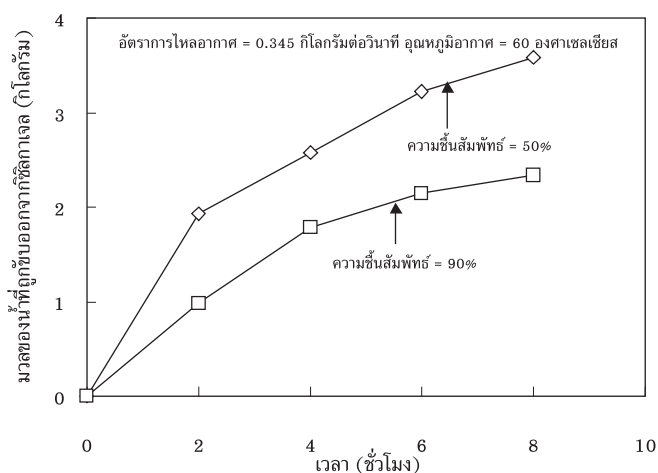
รูปที่ 12 ซึ่งแสดงตัวอย่างผลของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่มีต่อปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นที่เวลาต่างๆ ซึ่งพบว่า ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยในช่วงเวลาแรกอัตราการขับความชื้นจะสูง และจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณน้ำในสารดูดความชื้นลดลง อนึ่งอิทธิพลของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับสมการที่ 1



รูปที่ 13 ผลของอุณหภูมิอากาศเข้าชุดสารดูดความชื้นต่อมวลน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่อัตราการไหลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.345 กิโลกรัมต่อวินาที และ 53% ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศในรูปที่ 13 ก็ส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจากสารดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศส่งผลให้อุณหภูมิของสารดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือจะเป็นการเพิ่มความดันไอน้ำในสารดูดความชื้นในคราวเดียวกัน ทำให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำในสารดูดความชื้นและในอากาศเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความชื้นในสารดูดความชื้นจะถูกขับออกมามากขึ้น

ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าสู่ชุดสารดูดความชื้นต่อมวลน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 14 โดยพบว่า กรณีการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ขับออกจากสารดูดความชื้นลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีดังกล่าว ผลต่างของความหนาแน่นของไอน้ำในบรรยากาศและความหนาแน่นของน้ำในสารดูดความชื้นน้อย จึงทำให้แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลความชื้นลดน้อยลงด้วย ดังนั้นปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นจึงลดลง



รูปที่ 14 ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าสู่ชุดสารดูดความชื้นต่อมวลน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล ณ เวลาต่างๆ โดยที่อัตราการไหล และอุณหภูมิของอากาศด้านเข้าสู่ชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.345 กิโลกรัมต่อวินาที และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ในกรณีของกระบวนการอบไล่ความชื้นนั้น งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโมเดลขึ้นมาเพื่อใช้ทำนายปริมาณมวลของความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้น โดยเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ ด้านเข้าสู่ชุดสารดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

$$M_w = 9.9704 \times 10^{-4} \cdot m_a^{0.2993} RH^{-0.6090} T_{ai}^{1.2531} t^{0.4805} \quad (4)$$

โดยที่

= ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้น (กิโลกรัม)

โมเดลที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้ทำนายข้อมูลการทดลอง 81.4% ในช่วง +10% โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.089

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบซิลิกาเจล สามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ กล่าวคือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิอากาศด้านเข้าสู่ชุดสารดูดความชื้น รวมทั้งระยะเวลา ที่ทำการทดสอบส่งผลโดยตรงต่ออัตราการดูดความชื้น และอัตราการอบไล่ความชื้นของชุดสารดูดความชื้น และนอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการดูดความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณการดูดซับความชื้น โดยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณการดูดซับความชื้นเพิ่มมากขึ้น

อนึ่ง โมเดลที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้คำนวณปริมาณการดูดและอบไล่ความชื้น และอัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีพอสมควร และนอกจากนี้ยังพบว่า ความดันอากาศตกคร่อมชุดสารดูดความชื้น มีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และไม่ส่งผลต่อการทำงานของเตอบลำไยที่จะพัฒนาขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- จุฑามาส ภควัฒน์, & ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2546, มีนาคม). การถ่ายเทความร้อนและมวลในแผ่นดูดซับความชื้นที่วางเรียงตัวแบบแผ่นสลับ. บทความเสนอในการประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน, ลำปาง.
- คุณุต เพ็ญอัน, & ณัฐภูมิ ดุษฎี. (2544). การศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพเตอบเพื่ออุตสาหกรรมครัวเรือนขนาดเล็กในการอบแห้งลำไย. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ศูนย์สถิติการพาณิชย์. (2542). ตลาดส่งออกลำไย 10 ประเทศแรกของไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงพาณิชย์.
- Fu, Y. M., Perng, J. C., & Tseng, P. C. (1994, April). Study on the Performance of Hybride Desiccant Cooling System for Low Humidity Application. Paper presented at the 5th ASEAN Conference on Energy Technology, Bangkok, Thailand.
- Grimm, N. R., & Rosaler, R. C. (1998). *Desiccant dehumidification: HVAC system and component handbook* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1990). *Fundamental of heat and mass transfer* (3rd ed.). New York: John Wiley.
- Ismail, M. Z., Angus, D. E., & Thorpe, G. R. (1991). The performance of a solar-regenerated open-cycle desiccant bed gain cooling system. *Solar Energy*, 46, 63-70.
- Kiatiriroat, T., & Tachajapong, W. (2002). Analysis of a heat pump with solid desiccant tube bank. *International Journal of Energy Research*, 26, 527-542.
- Ming, F. Y., Zhang, H. J., & Chang, T. P. (1994, April). Agricultural applications of desiccant drying technology. Paper presented at the 5th ASEAN Conference on Energy Technology, Bangkok, Thailand.
- Rengarajan, K., & Nimmo, B. G. (1993). Desiccant enhanced air conditioning (DEAC): An approach to improved comfort. *AES: Heat Pump and Refrigeration Systems Design, Analysis, and Applications*, 29, 129-138.