บทความวิจัย

บทความจากงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (TIchE2016)

การทำแห้งข้าวเปลือกในเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซาน

จิรโรจน์ อานุสาร และ ขันทอง สุนทราภา*
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0–2218–7678 อีเมล: khantong.s@chula.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.019
รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2560 ตอบรับเมื่อ 30 สิงหาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 23 พฤศจิกายน 2560
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซานที่ประกอบอยู่ในอุปกรณ์หนึ่งในการทำหน้าที่แยกไอน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกชื้นให้ออกจากอุปกรณ์ไป ได้ข้าวเปลือกที่แห้งมากขึ้นเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า "เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรน" โดยมีเป้าหมายเพื่อใช้แทนการตากแห้งกลางแจ้งตามแบบดั้งเดิมในกรณีซึ่งไม่สามารถดำเนินการได้ เช่น ฝนตกหรือน้ำท่วม งานวิจัยนี้ใช้ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในขั้นตอนการออกแบบสร้างเครื่องทำแห้งต้นแบบเพื่อให้ได้ลักษณะของเครื่องทำแห้งที่เหมาะสม โดยพบว่ารูปแบบการไหลของอากาศแบบ Over Flow ที่มีช่องทางการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมเป็นลักษณะที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกพบว่าเครื่องทำแห้งที่ใช้เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวางแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ให้อัตราการทำแห้งสูงสุดในเวลา 1 ชั่วโมง เท่ากับ 0.0464±0.0004 และ 0.0578±0.0009 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลเปียก ตามลำดับ ในขณะที่วิธีการตากแห้งกลางแจ้งและการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ให้อัตราการทำแห้งสูงสุดในเวลา 1 ชั่วโมง เท่ากับ 0.0527±0.0011 และ 0.0402±0.0007 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลเปียก ตามลำดับ แสดงว่าสามารถใช้เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซานตามงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำแห้งวัสดุชีวมวล เช่น ข้าวเปลือก ได้ โดยการใช้เมมเบรนไม่เชื่อมขวางแบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์สามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกจาก 22–23% เหลือ 14–15% ภายใน 2 ชั่วโมง

คำสำคัญ: การทำแห้งข้าวเปลือก, แบบจำลองคณิตศาสตร์, เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรน, เมมเบรนไคโตซาน

การอ้างอิงบทความ: จิรโรจน์ อานุสาร และ ขันทอง สุนทราภา, "การทำแห้งข้าวเปลือกในเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซาน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 4, หน้า 783–791, ต.ค.–ธ.ค. 2560

Research Article

Selected Paper from the 26th TIChe National Conference "Innovative Technology toward Sustainable Development"

Paddy Drying in Chitosan Membrane Dryer

Jirarot Arnusan and Khantong Soontarapa*

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0–2218–7678, E–mail: khantong.s@chula.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.019

Received 1 June 2017; Accepted 30 August 2017; Published online: 23 November 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

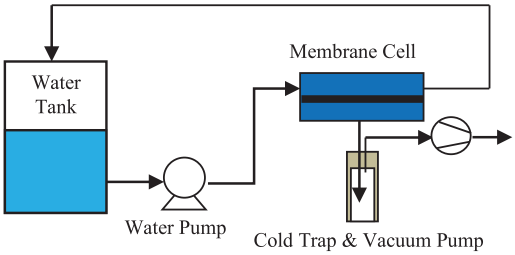
Chitosan membrane equipped in an apparatus was used to separate water vapor evaporated from moist paddy out of the apparatus. The said apparatus was called "membrane dryer". This study aimed at developing an alternative approach of paddy drying instead of the traditional open air technique which commonly encounter rainy or flooding problems. The prototype of membrane dryer was designed from mathematical air flow pattern analysis results. It was found that the airflow in overflow mode with triangular air flow path was the desired feature of the dryer. The performance results showed that the dryer using uncrosslinked dense and composite-on-spunbond chitosan membranes presented the highest drying rate in the first hour at 0.0464±0.0004 and 0.0578±0.0009 kg water/kg wet mass, respectively. As compared the drying rate by an open air technique and a hot air oven at 40°C of 0.0527±0.0011 and 0.0402±0.0007 kg water/kg wet mass respectively, the chitosan membrane dryer could be used as an alternative in drying biomass such as paddy. It was found that the uncrosslinked composite chitosan membrane dryer could reduce the moist paddy from 22–23% to 14–15% within 2 hours.

Keywords: Paddy Drying, Mathematical Model, Membrane Dryer, Chitosan Membrane

Please cite this article as: J. Arnusan and K. Soontarapa, "Paddy drying in chitosan membrane dryer," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 27, no. 4, pp. 783–791, Oct.–Dec. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

กระบวนการทำแห้งมีหลายวิธีซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ในแต่ละกระบวนการล้วนต้องใช้พลังงานความร้อนรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งในการทำแห้ง งานวิจัยนี้สนใจใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเพื่อทำข้าวเปลือกให้แห้ง ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดยเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนในงานวิจัยนี้ทำงานตามหลักกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor Permeation) คือให้มีการเป่าอากาศไหลผ่านวัสดุภายในเครื่องทำแห้งเพื่อให้น้ำระเหยออกจากวัสดุในรูปของไอน้ำแล้วให้อากาศชื้นแพร่ผ่านเมมเบรนออกไป แรงขับดันในการแพร่ผ่านเมมเบรน (Permeation Driving Force) ของกระบวนการนี้คือความแตกต่างของความดันย่อย (Partial Pressure) ทางด้านสารป้อนกับด้านเพอร์มิเอตของเมมเบรน ในการออกแบบสร้างเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนนี้ ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชื่อ Solidworks จำลองรูปแบบการไหลของอากาศ 2 แบบ คือ แบบ Through Flow และแบบ Over Flow เนื่องจากงานวิจัยของ Udomkun *et al.* [1] ซึ่งศึกษาทิศทางการไหลของอากาศแบบ Though Flow และแบบ Over Flow ต่อจลนศาสตร์การอบแห้งมะละกอภายในเตาอบด้วยการพา (Convective Type Dryer) พบว่าทิศทางการไหลของอากาศในรูปแบบ Through Flow ทำให้ได้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น Ryu *et al.* [2] ศึกษารูปแบบการไหลของอากาศ 4 แบบ ภายในเครื่องอบแห้งแบบ Thin Layer Dryer ที่มีถาดหลายชั้นโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS FLUENT พบว่าการออกแบบที่ให้ลักษณะการไหลของอากาศมีลักษณะเป็นแบบสามเหลี่ยมโดยเสริมแผ่นกั้นข้างใต้ตัวให้ความร้อนและแผ่นกระจายอากาศ (Triangular-shaped Flow Path with Blocking under the Heater and Flow Distribution Plate) ให้การกระจายของความเร็วลมที่สม่ำเสมอมากที่สุด งานวิจัยของ Amjad *et al.* [3] ศึกษาโพรไฟล์การกระจายความเร็วของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน (Hot Air Dryer) ในส่วนกระบะใส่ผลิตภัณฑ์ที่มีช่องทางการไหลของอากาศแบบแนวตรง (Straight Air Flow Channel) และแนวทแยงมุม (Diagonal Air Flow Channel) พบว่าการวางกระบะใส่มันฝรั่งที่ลาดเอียงทำมุม 1.42° จากทางด้านขาเข้าให้ผลการอบแห้งที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 1 ชุดทดสอบวัดฟลักซ์ไอน้ำ

งานวิจัยนี้จึงใช้ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้การกระจายตัวของอากาศสม่ำเสมอ เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนต้นแบบเพื่อนำมาใช้ทดสอบผลของชนิดเมมเบรนและศึกษารูปแบบการไหลของอากาศที่มีต่อลักษณะการแห้งของข้าวเปลือก

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุเมมเบรนและการศึกษาลักษณะสมบัติ

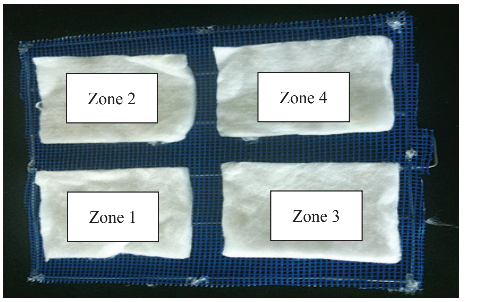
งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง 2 ชนิด คือแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ เนื่องจากค่าฟลักซ์ไอน้ำตามกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันมีค่าต่ำมาก งานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนในเทอมของค่าฟลักซ์ไอน้ำตามหลักกระบวนการเพอร์แวพอเรชัน (Pervaporation) แทน โดยใช้ชุดทดสอบแบบแผ่นและกรอบ (Plate and Frame Module) ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารป้อนและสร้างสภาวะสุญญากาศทางด้านเพอร์มิเอตด้วยปั๊มสุญญากาศเพื่อให้ของเหลวน้ำเปลี่ยนเฟสเป็นไอน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนออกมา ดังไดอะแกรมในรูปที่ 1

2.2 การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ

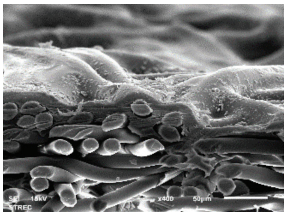
ใช้โปรแกรม Solidworks จำลองรูปแบบการไหลของอากาศ 4 แบบ ได้แก่ แบบ Through Flow (TF) แบบ Over Flow (OF) แบบ Over Flow ที่มีการติดตั้ง

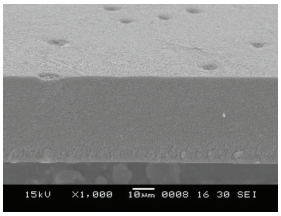
แผ่นบังคับการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือวัสดุ (OF+BF) และแบบ Over Flow ที่มีการออกแบบช่องทางการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมและติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือวัสดุ (OF+BF+TFP) กำหนดความเร็วของอากาศขาเข้าเท่ากับ 3.2 เมตร/วินาที อุณหภูมิเท่ากับ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 50% เพื่อการออกแบบเครื่องทำแห้งที่มีรูปแบบการไหลที่เหมาะสม

ในการแสดงความสมเหตุผลของผลจากแบบจำลอง (Model Justification) ได้ศึกษาอัตราการทำแห้งของแผ่นสำลี (แทนชีวมวล) ขนาด 5×6 ตร.ซม. จำนวน 4 ชิ้น วางกระจายบนถาดใส่ชีวมวลของเครื่องทำแห้งเพื่อแทนตำแหน่ง 4 โซน ดังแสดงในรูปที่ 2 และทำให้แผ่นสำลีชุ่มน้ำมีความชื้นเท่ากับ 5 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลสำลี



รูปที่ 2 ตำแหน่งแผ่นสำลีในถาดใส่ชีวมวลของเครื่องทำแห้ง





(ก) (ข)

รูปที่ 3 ภาพภาคตัดขวางของเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง (ก) แบบคอมโพสิต กำลังขยาย 400 เท่า (ข) แบบเนื้อแน่น กำลังขยาย 1000 เท่า [4]

2.3 การศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของเครื่องทำแห้ง

ในการศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนได้ใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสัมพัทธ์ เริ่มต้นเท่ากับ 22–23% ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ควบคุมความเร็วของอากาศขาเข้าซึ่งวัดด้วย Anemometer คงที่ เท่ากับ 3.2 เมตร/วินาที และใช้ความดันสุญญากาศจากปั๊มสุญญากาศเต็มความสามารถประมาณ –850 มิลลิบาร์ เปรียบเทียบสมรรถนะการทำแห้งกับตู้อบชนิด Natural Convection Oven ที่ 40°C และการตากแห้งกลางแจ้ง แสดงในเทอมของอัตราการดึงน้ำออก (น้ำหนัก/เวลา) ต่อน้ำหนักชีวมวล (ข้าวเปลือก)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะสมบัติของเมมเบรน

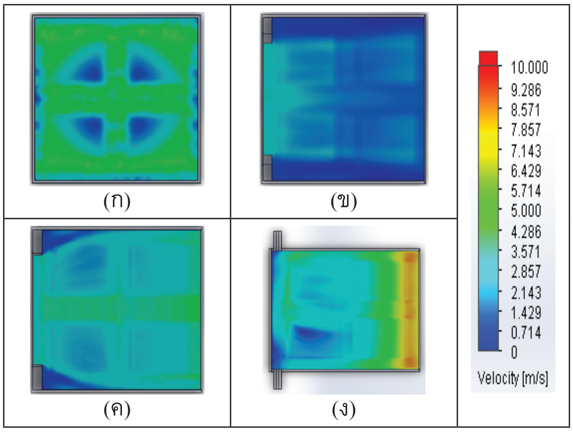
ความหนาของเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวางแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 40±2 และ 156.6±4.7 ไมครอน ตามลำดับ โดยผ้าสปันปอนด์มีความหนาเท่ากับ 128.3±12.7 ไมครอน ค่าฟลักซ์ไอน้ำของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิตมีค่าเท่ากับ 88.2±0 และ 352.9±0 กรัมน้ำต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ แสดงว่าไอน้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวางแบบคอมโพสิตได้มากกว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่น เนื่องจากผ้าสปันปอนด์ที่เป็นตัวรองรับมีโครงสร้างเป็นรูพรุนทำให้ไอน้ำที่แพร่ผ่านเนื้อเมมเบรนออกมาแล้วสามารถผ่านรูของผ้าสปันปอนด์ออกไปได้เลย ประกอบกับชั้นเนื้อเมมเบรนบนผ้าสปันปอนด์มีความบางกว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมาก ดังภาพภาคตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 3 ทำให้ค่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านเมมเบรนแบบคอมโพสิตต่ำกว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่น

3.2 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ

ผลการวิเคราะห์ความเร็วและการกระจายตัวของอากาศที่เกิดขึ้นภายในเครื่องทำแห้งทั้ง 4 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าแบบ TF ให้ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุไม่สม่ำเสมอแต่มีความสมมาตรเนื่องจากมีการให้อากาศไหล

ปะทะกับวัสดุ โดยรูปแบบนี้ให้ความเร็วของอากาศที่ผ่านวัสดุสูงสุดเท่ากับ 5 เมตร/วินาที ในรูปแบบ OF ซึ่งเป็นการให้ อากาศไหลผ่านเข้าทางด้านข้าง จากผลการจำลองพบว่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับรูปแบบ TF และในส่วนที่อยู่ห่างจากทางเข้าความเร็วของอากาศมีค่าลดลงทำให้ความสามารถในการทำแห้งลดลงด้วย รูปแบบนี้ให้ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุสูงสุดเท่ากับ 2.2 เมตร/วินาที ในรูปแบบ OF+BF มีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือวัสดุทำให้ได้ความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุด เท่ากับ 3.6 เมตร/วินาที นอกจากนั้นยังพบว่ามีการกระจายของอากาศออกไปทางด้านข้างดีขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบ OF และในส่วนของรูปแบบ OF+BF+TFP ซึ่งมีการออกแบบช่องทางการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมและติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือวัสดุทำให้อากาศไหลไปในช่องทางที่กำหนดดีขึ้นทำให้มีอากาศไหลเข้าถึงทุกๆ ส่วนของห้องทำแห้งภายในเครื่องทำแห้งโดยมีความเร็วของอากาศผ่านวัสดุสูงถึง 8 เมตร/วินาที

เมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของอัตราการทำแห้งของแผ่นสำลี ณ แต่ละโซนของแต่ละรูปแบบการไหลของอากาศดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าอัตราการทำแห้งในแต่ละชั่วโมงของมวลสำลีมีความสอดคล้องกับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุ โดยรูปแบบ TF มีอัตราการทำแห้งในแต่ละโซนใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.65–0.67 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลสำลี/ชั่วโมง สอดคล้องกับความสมมาตรของอากาศที่ปะทะกับวัสดุ ในรูปแบบ OF พบว่าอัตราการทำแห้งในโซนที่ 1 และ 2 มีค่าสูงใกล้เคียงกัน (ประมาณ 0.61 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลสำลี/ชั่วโมง) เนื่องจากอยู่ใกล้กับทางขาเข้าของอากาศและมีค่าลดลงในโซนที่ 3 (0.53 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลสำลี/ชั่วโมง) และ 4 (0.52 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลสำลี/ชั่วโมง) ซึ่งใกล้กับทางขาออกของอากาศสอดคล้องกับโพรไฟล์ความเร็วของอากาศซึ่งมีค่าสูงกว่าในโซนที่อยู่ใกล้กับทางขาเข้าและต่ำลงในโซนที่อยู่ใกล้กับทางขาออกของอากาศ [(รูปที่ 4 (ข)]

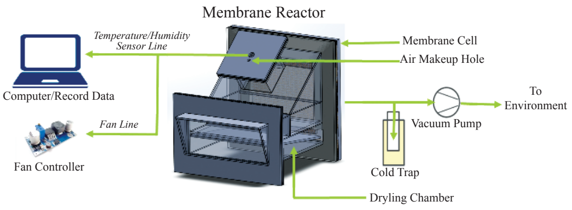


รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศแบบ (ก) TF (ข) OF (ค) OF+BF และ (ง) OF+BF+TFP

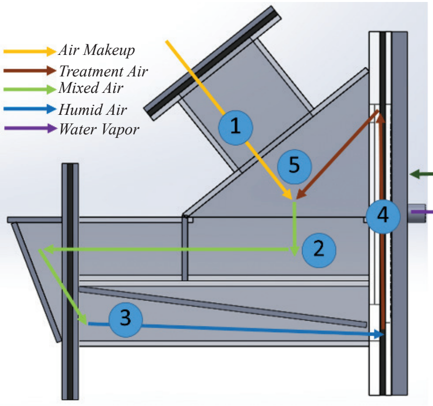
ในรูปแบบ OF+BF พบว่าการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือวัสดุทำให้ได้อัตราการทำแห้งในแต่ละโซนสม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากความเร็วของอากาศทางขาออกเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราการทำแห้งในโซนที่ 3 และ 4 มีค่า เพิ่มขึ้น และในรูปแบบ OF+BF+TFP ซึ่งมีโพรไฟล์ความเร็วของอากาศทางขาออกสูงกว่าทำให้ได้อัตราการทำแห้งในแต่ละโซนสม่ำเสมอขึ้น งานวิจัยนี้จึงสร้างเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนที่ให้รูปแบบการไหลของอากาศเป็นแบบ OF+BF+TFP ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากรูปแบบนี้ทำให้ได้การกระจายตัวของอากาศและอัตราการทำแห้งของชีวมวลภายในเครื่องทำแห้งที่สม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่ง

ตารางที่ 1 อัตราการทำแห้งของแผ่นสำลีในเครื่องทำแห้ง

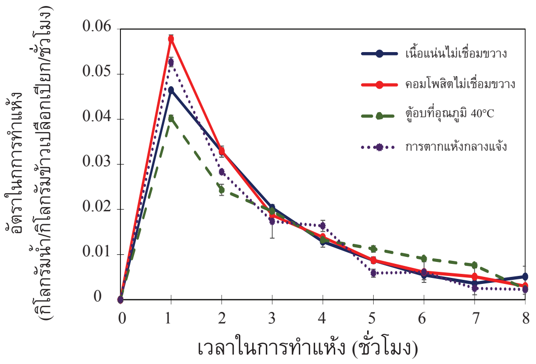
รูปแบบการไหล	อัตราการทำแห้งในแต่ละโซน (กก.น้ำ/กก.มวลสำลี/ชั่วโมง)			
	โซนที่ 1	โซนที่ 2	โซนที่ 3	โซนที่ 4
TF	0.6546 ± 0.0239	0.6372 ± 0.0760	0.6496 ± 0.1096	0.6682 ± 0.0772
OF	0.6065 ± 0.0814	0.6136 ± 0.0679	0.5271 ± 0.0280	0.5234 ± 0.0330
OF+BF	0.7262 ± 0.0186	0.7171 ± 0.1060	0.7028 ± 0.0387	0.6601 ± 0.0708
OF+BF+TFP	0.7379 ± 0.0729	0.6721 ± 0.0717	0.6681 ± 0.0314	0.6501 ± 0.0096



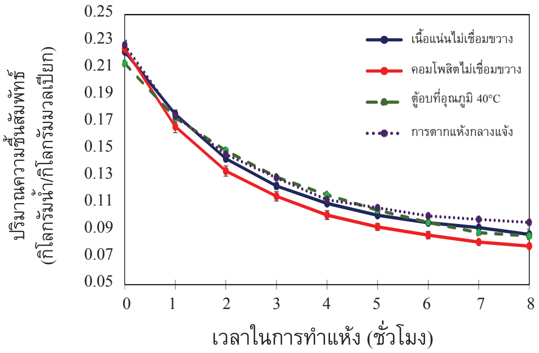
รูปที่ 5 ชุดเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนในงานวิจัยนี้



รูปที่ 6 ลักษณะการไหลเวียนของอากาศภายในเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนในงานวิจัยนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือก (ก) อัตราการทำแห้ง (ข) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก

3.3 สมรรถนะการทำแห้งของเครื่องทำแห้ง

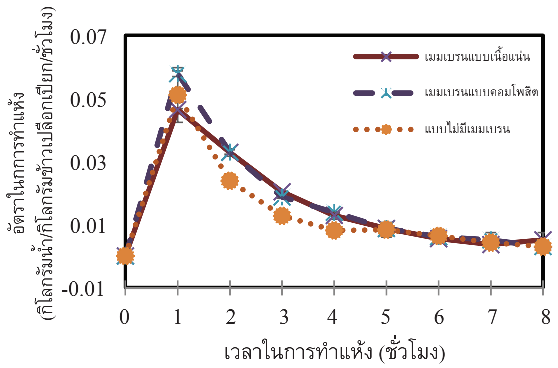
เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนมีลักษณะการไหลเวียนของอากาศแสดงในรูปที่ 6 ดังนี้ พัดลมหมุนเวียนอากาศทำให้อากาศภายนอกที่ถูกดูดเสริมเข้ามาในตัวเครื่อง (เส้นหมายเลข 1) ผสมกับอากาศแห้งที่ไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนมาแล้ว (เส้นหมายเลข 5) ได้เป็นอากาศผสม (เส้นหมายเลข 2) สำหรับหมุนเวียนไหลผ่านผิวหน้าของข้าวเปลือกในถาดซึ่งวางอยู่ล่างสุดของเครื่อง ทำให้ความชื้นในข้าวเปลือกระเหยออกมาได้เป็นอากาศชื้น(เส้นหมายเลข 3) เมื่ออากาศชื้นไหลผ่านผิวหน้าของเมมเบรน ไอน้ำในอากาศชื้นเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรน (เส้นหมายเลข 4) ด้วยแรงขับดันจากปั๊มสุญญากาศและถูกดักไว้ในที่ดักเย็น (Cold Trap)

งานวิจัยนี้ดำเนินการเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง 2 ชนิด คือ แบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิต ที่อุณหภูมิห้องและควบคุมความเร็วลมขาเข้าให้คงที่ด้วยกำลังของพัดลมเท่ากับ 3.2 เมตร/วินาที ได้ผลสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกดังแสดงในรูปที่ 7(ก) ซึ่งพบว่าเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนสามารถดึงน้ำออกได้สูงสุดภายในเวลา 1 ชั่วโมงเท่ากับ 0.0464±0.0004 และ 0.0578±0.0009 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก/ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผลการตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติและการอบแห้งในตู้อบที่ 40°C ซึ่งเท่ากับ 0.0527±0.0011 และ 0.0402±0.0007 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก/ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงว่าอาจใช้เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนของงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำแห้งข้าวเปลือกได้

เป็นที่สังเกตว่าผลอัตราการทำแห้งจากเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนไม่เชื่อมขวางแบบคอมโพสิตต่างจากเมมเบรน

แบบเนื้อแน่นไม่มากนัก ทั้ง ๆ ที่มีความแตกต่างของค่าฟลักซ์ไอน้ำจากเมมเบรนแบบคอมโพสิตสูงกว่าแบบเนื้อแน่นถึง 4 เท่า อธิบายได้ว่าเนื่องจากในการทดสอบค่าฟลักซ์ไอน้ำด้วยกระบวนการเพอร์แวพอเรชัน ใช้สารป้อนเป็นของเหลวน้ำซึ่งสามารถถูกดูดซับเข้าไปในเนื้อเมมเบรนในปริมาณตามระดับความชอบน้ำ ทำให้เมมเบรนมีการบวมตัวและอิ่มตัวด้วยโมเลกุลน้ำ แล้วเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นไอน้ำ ณ ขอบเขตใดขอบเขตหนึ่งภายในเมมเบรนจากผลการลดความดันของปั๊มสุญญากาศ [5] เมมเบรนจึงมีความต้านทานในการถ่ายโอนมวลน้อยกว่ากรณีที่ใช้สารป้อนเป็นไอน้ำ เพราะเมมเบรนแห้งย่อมมีความต้านทานในการถ่ายโอนมวลสูงกว่าเมมเบรนที่บวมตัวและเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้องเปลี่ยนวิธีการทดสอบค่าฟลักซ์ไอน้ำตามกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันเป็นกระบวนการเพอร์แวพอเรชัน

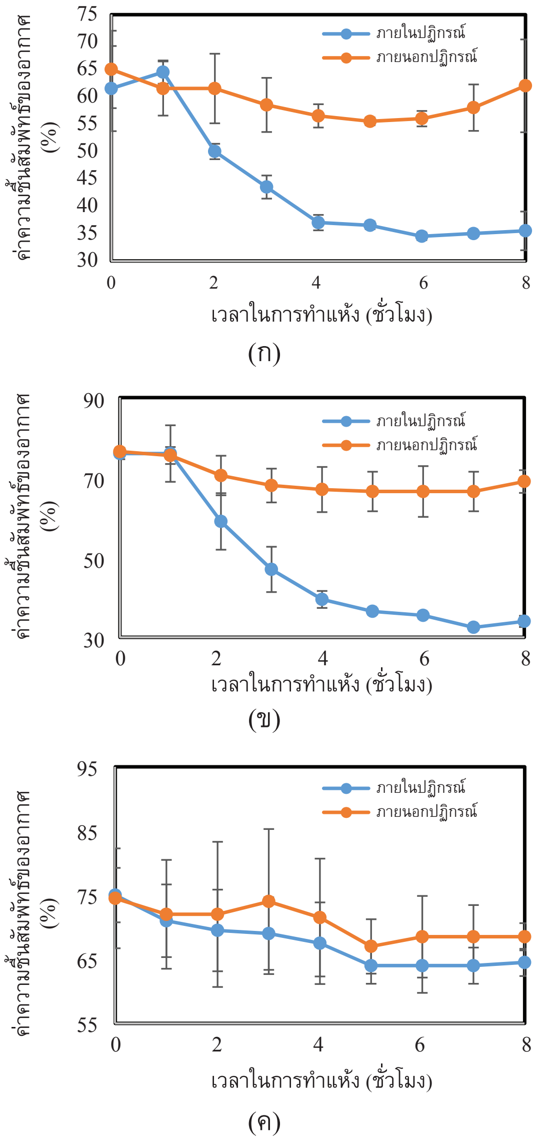
แนวโน้มการลดลงของค่าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกจากเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซาน 2 ชนิด เทียบกับการตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติและการอบแห้งในตู้อบที่ 40°C ในรูปที่ 7(ข) แสดงผลในทำนองเดียวกัน คือการใช้เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบคอมโพสิตทำให้ความชื้นในข้าวเปลือกลดลงมากกว่าวิธีอื่น ๆ ในทุก ๆ ช่วงเวลา โดยสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 22.5±0.5% เหลือ 16.7±0.4% และ 13.4±0.4% ในชั่วโมงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ขณะที่การใช้เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบเนื้อแน่นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 22.3±0.1% เหลือ 17.6±0.1% และ 14.3±0.2% ตาม ลำดับ การตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 22.8±0.3% เหลือ 17.5±0.4% และ 14.7±0.5% ตามลำดับ และการอบแห้งในตู้อบที่ 40°C สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 21.4±0.0% เหลือ 17.4±0.1% และ 14.9±0.1% ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อการลดความชื้นของข้าวเปลือกให้เหลือไม่เกิน 15% (ค่าความชื้นกลางในการซื้อขายข้าวเปลือก [6]) พบว่าการใช้เครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบคอมโพสิตต้องการเวลาในการทำแห้งไม่ถึง 2 ชั่วโมง ขณะที่วิธีอื่น ๆ



รูปที่ 8 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในเครื่องทำแห้งเมื่อมีและไม่มีเมมเบรน

อีก 3 วิธี ต้องการเวลาในการทำแห้งไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง โดยเหลือค่าความชื้นในข้าวเปลือกใกล้เคียงกัน

เพื่อแสดงว่าเมมเบรนช่วยกำจัดไอน้ำออกจากอากาศที่หมุนเวียนอยู่ในเครื่องทำแห้งของงานวิจัยนี้ ได้ใช้ผ้าสปันปอนด์แทนตำแหน่งของแผ่นเมมเบรนและไม่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งถึงแม้ไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าในชั่วโมงที่ 1 เครื่องทำแห้งแบบไม่มีเมมเบรนให้อัตราการทำแห้งเท่ากับ 0.0511±0.0087 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก/ชั่วโมง น้อยกว่าอัตราการทำแห้งที่ได้จากเครื่องทำแห้งแบบใช้เมมเบรนคอมโพสิต (0.0578±0.0009 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก/ชั่วโมง) เล็กน้อย อธิบายได้ว่า เนื่องจากความโปร่งของผ้าสปันปอนด์ทำให้เกิดการถ่ายเทของอากาศภายในและภายนอกเครื่องทำแห้งแบบไม่มีเมมเบรน ดังเห็นได้จากค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในและภายนอกเครื่องทำแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 9 (ค) แต่เนื่องจากผลของชั้นเนื้อเมมเบรนบาง ๆ บนผ้าสปันปอนด์ของเมมเบรนแบบคอมโพสิต (รูปที่ 3) ทำให้เกิดการถ่ายโอนไอน้ำผ่านเมมเบรนตามกลไก “การละลาย-การแพร่” ดังเห็นได้จากค่าความชื้นของอากาศภายในเครื่องทำแห้งตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 ต่ำกว่าค่าความชื้นของอากาศภายนอกเครื่องทำแห้ง โดยมีความแตกต่างมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะ



รูปที่ 9 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ก) แบบเนื้อแน่น (ข) แบบคอมโพสิต (ค) แบบไม่มีเมมเบรน

เวลาการทำแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) และยังพบว่า อัตราการทำแห้งของเครื่องทำแห้งแบบไม่มีเมมเบรนนี้ มากกว่าที่ได้จากเครื่องทำแห้งแบบใช้เมมเบรนเนื้อแน่น (0.0464±0.0004 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก/ชั่วโมง) เล็กน้อย เนื่องจากผลของชั้นเนื้อเมมเบรนไคโตซานที่เป็นแบบเนื้อแน่นไม่มีรูพรุนที่หนากว่าชั้นเนื้อเมมเบรนของเมมเบรนแบบคอมโพสิต ทำให้มีการถ่ายโอนไอน้ำผ่านเมมเบรนน้อยลง ดังเห็นได้จากค่าความชื้นของอากาศภายในเครื่องทำแห้งแบบมีเมมเบรนเนื้อแน่นในชั่วโมงที่ 1 สูงขึ้นกว่าเริ่มต้น (ชั่วโมงที่ 0) และสูงกว่าค่าความชื้นของอากาศภายนอกเครื่องทำแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) แต่เมื่อระบบได้รับแรงขับดันจากปั๊มสุญญากาศต่อเนื่องทำให้มีการถ่ายโอนไอน้ำผ่านเมมเบรนออกไปอย่างต่อเนื่อง ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องทำแห้งด้วยแมมเบรนแบบเนื้อแน่นจึงลดลงตามระยะเวลาการทำแห้ง โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 43±3% และ 35±0% ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ยังไม่มีการเปรียบเทียบข้อแตกต่างในเชิงเศรษฐศาสตร์เนื่องจากมีวัตถุประสงค์เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อทดสอบสมมติฐานความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเพื่อทำชีวมวล เช่น ข้าวเปลือก ให้แห้ง ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ อีกทั้งเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็ก หากจะเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์กับตู้อบลมร้อนก็ควรมีปริมาณความจุใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนตามงานวิจัยนี้มีข้อดีเหนือกว่าการตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติ คือสามารถกันการปนเปื้อนของชีวมวลที่ต้องการทำแห้งได้เป็นอย่างดี เช่น การอบแห้งผลไม้ ที่ต้องคำนึงถึงความสะอาดถูกสุขลักษณะ ซึ่งประเมินเป็นมูลค่าเงินได้ยาก และยังสามารถใช้อุปกรณ์นี้ในทุกสภาพภูมิอากาศโดยไม่ต้องใช้พื้นที่มาก

4. สรุป

การดำเนินการของเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนตามงานวิจัยนี้สามารถดึงไอน้ำออกจากอากาศในเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนได้ตามหลักกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน โดยเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวางแบบคอมโพสิตมีความชอบน้ำมากกว่าแบบเนื้อแน่น เมื่อนำมาใช้ในเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนสามารถทำให้ชีวมวล เช่น ข้าวเปลือก แห้งได้ตามต้องการ จึงสามารถใช้เป็นเทคโนโลยี

ทางเลือกแทนเทคโนโลยีแบบดั้งเดิม เช่น การตากแห้งกลางแจ้ง หรือการอบแห้งในตู้อบ โดยเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนที่ใช้เมมเบรนแบบคอมโพสิตให้อัตราการทำแห้งสูงสุดสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 22.5±0.5% เหลือ 16.7±0.5% และ 13.4±0.4% ในเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ดีกว่าการตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติที่สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 22.8±0.3% เหลือ 17.5±0.4% และ 14.7±0.5% ตามลำดับ ดีกว่าเครื่องทำแห้งด้วยเมมเบรนที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นซึ่งสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 22.3±0.1% เหลือ 17.6±0.1% และ 14.3±0.2% ตามลำดับ และดีกว่าผลการอบแห้งในตู้อบที่ 40°C ซึ่งสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 21.4±0.0% เหลือ 17.4±0.1% และ 14.9±0.1% ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทเอสเอสเมมเบรนจำกัดและทุนวิจัยจากศูนย์ส่งเสริมการวิจัยในภูมิภาคเอเชียของมูลนิธิเกาหลีเพื่อการศึกษาขั้นสูง ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Udomkun, D. Argyropoulos, M. Nagle, B. Mahayothee, S. Janjai, and J. Müller, "Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 64, no. 1, pp. 67–73, 2015.

[2] J. B. Ryu, C. Y. Jung, and S. C. Yi, "Three-dimensional simulation of humid-air dryer using computational fluid dynamics," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, no. 4, pp. 1092–1098, 2013.

[3] W. Amjad, A. Munir, A. Esper, and O. Hensel, "Spatial homogeneity of drying in a batch type food dryer with diagonal air flow design," *Journal of Food Engineering*, vol. 144, pp. 148–155, 2015.

[4] C. Phuchaiyanan, "Rolling configuration of chitosan membrane as spiral wound module for dye wastewater treatment," M.S. thesis, Science Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2014.

[5] K. Soontarapa. *Membrane Separation Technology*. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 2004 (in Thai).

[6] V. Thepent. "Moisture measurement in seeds," Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Bangkok (in Thai).