การทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน

นายจิรโรจน์ อานุสาร

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PADDY DRYING IN CHITOSAN MEMBRANE REACTOR

Mr. Jirarot Arnusan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2016
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน
โดย	นายจิรโรจน์ อานุสาร
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทราภา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทราภา)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวัฒนานนท์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จิรโรจน์ อานุสาร : การทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน (PADDY DRYING IN CHITOSAN MEMBRANE REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ขันทอง สุนทราภา, 86 หน้า.

งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซานที่ประกอบอยู่ในอุปกรณ์หนึ่งในการทำหน้าที่แยกไอน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกชื้นให้ออกจากอุปกรณ์ไป เพื่อให้ได้ข้าวเปลือกที่แห้งมากขึ้นเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า “ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน” โดยมีเป้าหมายเพื่อใช้แทนการตากแห้งกลางแจ้งตามแบบดั้งเดิมในกรณีซึ่งไม่สามารถดำเนินการได้ เช่น ฝนตกหรือน้ำท่วม งานวิจัยนี้ใช้ผลวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในขั้นตอนการออกแบบสร้างปฏิกรณ์ต้นแบบเพื่อให้ได้ลักษณะของปฏิกรณ์ทำแห้งที่เหมาะสม โดยพบว่าปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการไหลของอากาศจากทางด้านข้างที่มีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเหนือวัสดุเป็นแบบสามเหลี่ยมและมีการออกแบบช่องทางการไหลของอากาศขาเข้าเป็นแบบสามเหลี่ยม (HF+BF+TFP) ร่วมกับให้มีการหมุนเวียนของอากาศหลังการสัมผัสกับเมมเบรนแล้วกลับมาใช้ใหม่ (ปฏิกรณ์แบบ TypeA) เป็นลักษณะที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ศึกษาเมมเบรนไคโตซาน 4 ชนิด ได้แก่ แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์มีการเชื่อมขวาง โดยมีสมบัติความชอบน้ำในเทอมของค่าฟลักซ์การแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์เรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ เมมเบรนแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบคอมโพสิตไม่มีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง เท่ากับ 608.7±99.4, 364.6±22.2, 205.8±13.5 และ 120.6±18.4 กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ อัตราในการทำแห้งสูงสุดในเวลา 1 ชั่วโมง ของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวางเท่ากับ 0.0464±0.0004, 0.0517±0.0067, 0.0578±0.0009 และ 0.0715±0.0049 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่วิธีการตากแห้งกลางแจ้งและการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้อัตราในการทำแห้งสูงสุดในเวลา 1 ชั่วโมง เท่ากับ 0.0527±0.0007 และ 0.0402±0.0007 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ตามลำดับ แสดงว่าสามารถใช้ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซานตามงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำแห้งวัสดุชีวมวล เช่น ข้าวเปลือก ได้ โดยการใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวางสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกจาก 22.8±0.4% เหลือ 15.7±0.9% ภายใน 1 ชั่วโมง

ภาควิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
ปีการศึกษา 2559	

5771939023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORDS:

JIRAROT ARNUSAN: PADDY DRYING IN CHITOSAN MEMBRANE REACTOR. ADVISOR: ASSOC. PROF.KHANTONG SOONTARAPA, Ph.D., 86 pp.

Chitosan membrane equipped in an apparatus was used to separate water vapor evaporated form moist paddy out of the apparatus. The said apparatus was called “membrane reactor” in this research. It was aimed as an alternative in drying moist paddy instead of the traditional open air technique encountering rainy or flooding problem. The prototype of membrane reactor was designed from mathematical air flow pattern analysis results. It was found that the reactor in horizontal flow mode with baffle plate and triangle air flow path (HF+BF+TFP) associated with membrane dried circulation air (TypeA membrane reactor) was the appropriate feature. The chitosan membranes studied in this research were uncrosslinked dense, crosslinked dense, uncrosslinked composite-on-spunpond and crosslinked composite-on-spunpond membranes. The hydrophilicity sequence in term of pure water vapor flux were crosslinked composite > uncrosslinked composite > crosslinked dense > uncrosslinked dense with the value of 608.7±99.4, 364.6±22.2, 205.8±13.5 and 120.6±18.4 $g/m^2/hr$, respectively. The highest drying rate of membrane reactor equipped with uncrosslinked dense, crosslinked dense, uncrosslinked composite and crosslinked composite were occurred in the first hour of operation at 0.0464±0.0004, 0.0517±0.0067, 0.0578±0.0009 and 0.0715±0.0049 kg water/kg wet mass/hr, respectively. Comparing to the drying rate by an open air technique and a hot air oven at 40^{o}C of 0.0527±0.0007 and 0.0402±0.0007 kg water/kg wet mass/hr, respectively, it could be stated that the chitosan membrane reactor could be used as an alternative in drying biomass such as paddy. It was found that the crosslinked composite chitosan membrane reactor could reduce the moist paddy from 22.8±0.4% to 15.7±0.9% within 1 hour.

Department:	Chemical Technology	Student's Signature	....
Field of Study:	Chemical Technology	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2016		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำทั้งกระบวนการวิจัย การวิเคราะห์ผล แนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินงานวิจัย การติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัย และความดูแลเอาใจใส่มาโดยตลอดการทำงานวิจัยจากท่าน รองศาสตราจารย์ ดร. ขันทอง สุนทราภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ผู้ทำวิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทราภาเป็นอย่างยิ่งขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือวิเคราะห์ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เมมเบรนไคโตซานเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวัฒนานนท์ และ ดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต ที่ให้ความกรุณาสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อีกทั้งให้คำแนะนำและข้อเสนอที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและผู้วิจัยอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้การอบรมในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์และการใช้ห้องปฏิบัติการ อีกทั้งให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในเรื่องต่างๆและให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ทุนภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนผู้ทำวิจัยตลอดหลักสูตร

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตภาควิชาเคมีเทคนิคทุกๆคนที่ให้คำแนะนำ ข้อคิด ข้อเสนอแนะและให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆด้านและเป็นกำลังใจให้ผู้ทำวิจัยตลอดการทำงานวิจัยจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ญ

สารบัญรูป.....ฎ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....1

1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 กระบวนการทำแห้ง.....3

2.2 ข้าวเปลือก (Paddy).....9

2.3 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation process).....10

2.4 เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane).....12

2.5 โปรแกรม Solidworks.....13

2.6 ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน (Membrane reactor).....13

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....14

บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย.....17

3.1 วัตถุดิบ.....17

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.. 17
3.3.1 การทดสอบสมบัติของเมมเบรน 17
3.3.1.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water uptake) 17
3.3.1.2 ความชอบน้ำของเมมเบรน 18
3.3.1.3 ความสามารถทนต่อแรงดึง... 20
3.3.1.4 สมบัติเชิงความร้อน... 22
3.3.2 การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ 23
3.3.2.1 การกำหนดรูปแบบโมเดลศึกษาและการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศ 23
3.3.2.2 ประเมินความสม่ำเสมอของการทำแห้งภายในห้องทำแห้ง 24
3.3.3 การสร้างปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน.. 26
3.3.4 การศึกษาตัวแปรในกระบวนการทำแห้งของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน................ 26
3.3.5 การศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน............................. 26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 28
4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรน.. 28
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรน 28
4.1.2 ผลการศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซาน 30
4.1.2.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ 30
4.1.2.2 ค่าฟลักซ์จากการแพร่ผ่านไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน 31
4.1.3 ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน.. 32
4.1.4 สมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนไคโตซาน... 34
4.2 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ 36
4.2.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศด้วยโปรแกรม Solidworks 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.2.2 ผลการประเมินความสม่ำเสมอของการทำแห้งภายในห้องทำแห้งด้วยโมเดลกายภาพ 38
4.3 ลักษณะปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนของงานวิจัยนี้ 40
4.4 ผลการศึกษากระบวนการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeA 44
4.4.1 ผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณข้าวเปลือก 44
4.4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน 45
4.4.2.1 อัตราในการดึงน้ำออกจากข้าวเปลือก 45
4.4.2.2 ผลของกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันต่ออัตราการทำแห้งข้าวเปลือก 48
4.4.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่น 50
4.5 ผลการศึกษากระบวนการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeB 52
4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeA และ TypeB 54
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 57
5.1 สรุปผลการศึกษา 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 58
รายการอ้างอิง 59
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณค่าฟลักซ์ไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน 63
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรนไคโตซาน 64
ภาคผนวก ค วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณอัตราในการทำแห้งและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือก 65
ภาคผนวก ง ค่าที่ได้จากการทดลอง 68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงเอกลักษณ์และกลไกของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน 11

4.1 ค่าความหนาของเมมเบรนไคโตซาน..30

4.2 ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานทั้ง 4 ชนิด 31

4.3 ค่าฟลักซ์ของไอน้ำบริสุทธิ์ผ่านเมมเบรนไคโตซาน 32

4.4 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นตามมาตรฐาน D882 33

4.5 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตตามมาตรฐาน D638........ 34

4.6 อัตราการทำแห้งของแผ่นสำลีในปฏิกรณ์ 40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบถัง ... 4

2.2 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบถาด ... 4

2.3 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบสายพาน ... 5

2.4 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ... 6

2.5 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบถังหมุน ... 7

2.6 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบพ่นเป็นละอองฝอย ... 7

2.7 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบอุโมงค์ ... 8

2.8 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ... 8

2.9 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบสุญญากาศ ... 9

2.10 การจำแนกกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน ... 11

2.11 โครงสร้างของไคติน(บน) และไคโตซาน(ล่าง) ... 12

2.12 ปฏิกรณ์ทำชีวมวลแห้งเริ่มแรกของงานวิจัยนี้ ... 14

2.13 กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) ... 14

3.1 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความสามารถในการการดูดซับน้ำ ... 18

3.2 ชุดทดสอบวัดฟลักซ์ไอน้ำ ... 20

3.3 เซลล์หน้าแปลนเมมเบรน ... 20

3.4 ขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน D882 ... 21

3.5 ขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน D638 ... 21

3.6 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล Universal testing machine ... 22

3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน TG/DTA analyzer ... 22

3.8 แบบจำจองรูปการไหลของอากาศ ... 24

3.9 ตำแหน่งแผ่นสำลีในถาดใส่ชีวมวลของปฏิกรณ์ 25

4.1 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน.......... 29

4.2 โครงสร้างเชื่อมขวางแบบไอออนิกของไคโตซานด้วยกรดซัลฟิวริก 29

4.3 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของเมมเบรนไคโตซาน.......... 31

4.4 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของเมมเบรนไคโตซาน 35

4.5 โมเดล 3 มิติที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ.......... 36

4.6 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศภายในปฏิกรณ์แบบ 38

4.7 โมเดลกายภาพที่ใช้ประเมินความสม่ำเสมอของอัตราในการทำแห้ง 39

4.8 ตำแหน่งแผ่นสำลีในถาดใส่ชีวมวลของปฏิกรณ์ 39

4.9 ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนต้นแบบ.......... 41

4.10 ชุดปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน 41

4.11 การไหลเวียนของอากาศภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeA.......... 42

4.12 การไหลเวียนของอากาศภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeB.......... 43

4.13 ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน (ซ้ายมือ) ส่วนประกอบของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน (ขวามือ) ชุดปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนที่ประกอบเสร็จ 43

4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศขาเข้ากับอัตราการทำแห้งข้าวเปลือก.......... 44

4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศขาเข้ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์ 45

4.16 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในเทอมของอัตราการ.......... 46

4.17 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก 47

4.18 ผลของชนิดเมมเบรนต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์เทียบกับ อากาศภายนอก.......... 47

4.19 อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในระหว่างกระบวนการทำแห้ง 48

4.20 ผลของการดำเนินกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันต่อสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ในเทอมของอัตราการทำแห้ง 49

4.21 ผลของการดำเนินกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันต่อสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก 49

4.22 ผลของชนิดเมมเบรนต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์เทียบกับอากาศภายนอก 50

4.23 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานที่ใช้เมมเบรนแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางเทียบกับตู้อบและการตากแห้งกลางแจ้ง 51

4.24 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือกจากการทำแห้งในปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeA ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางเทียบกับตู้อบและการตากแห้งกลางแจ้ง 52

4.25 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeB ในเทอมของอัตราในการทำแห้ง 53

4.26 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeB ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก 53

4.27 อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ระหว่างการทำแห้งของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeB 54

4.28 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางแบบ TypeA เทียบกับแบบ TypeB ในเทอมของอัตราในการทำแห้ง 55

4.29 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางแบบ TypeA เทียบกับแบบ TypeB ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก 55

4.30 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์เทียบกับ อากาศภายนอกปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง 56

4.31 อุณหภูมิระหว่างการทำแห้งภายในปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางแบบ TypeA เทียบกับแบบ TypeB 56

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการทำแห้งมีหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป เช่น กระบวนการใช้ลมร้อนในการทำแห้งซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งแบบทั่วไป ได้แก่ เครื่องอบแบบถาด แบบอุโมงค์ ตู้อบลมร้อน เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น เครื่องอบเหล่านี้สามารถใช้ทำแห้งวัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อน ชิ้น ผง เส้นใย อาหารขึ้นรูปกึ่งเหลว กึ่งแข็ง ของเหลว และเมล็ดพืช แต่การทำแห้งแบบนี้จะสิ้นเปลืองพลังงานมาก เนื่องจากต้องให้ความร้อนแก่อากาศอยู่ตลอดเวลาและใช้เวลาในการทำแห้งนานพอสมควร อีกทั้งในระหว่างกระบวนการทำแห้งรูปแบบการไหลของอากาศที่ไหลเวียนอยู่อาจไม่เหมาะสมทำให้อัตราการทำแห้งไม่คงที่ตลอดปริมาตรของตู้อบซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นในการทำแห้งของสารหรือวัสดุบางชนิดมีความไวต่อความร้อนหรือมีองค์ประกอบของสารที่สามารถสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนทำให้สารหรือวัสดุเหล่านั้นสูญเสียสมบัติที่สำคัญต่าง ๆ ได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนเพื่อทำข้าวเปลือกแห้ง ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเป็นกระบวนการทางเลือกในการทำแห้ง โดยมีสมมติฐานว่าเครื่องปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซานที่ทำงานตามหลักกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) สามารถดึงน้ำออกจากระบบได้เนื่องจากเมมเบรนไคโตซานเป็นเมมเบรนชอบน้ำ โดยการเป่าอากาศแห้งไหลผ่านข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากข้าวเปลือกแล้วกำจัดน้ำออกจากอากาศด้วยการให้แพร่ผ่านเมมเบรนไคโตซาน ไอน้ำจะถูกควบแน่นในที่ดักเย็น (Cold trap) ได้อากาศแห้งเพื่อหมุนเวียนกลับเข้าไปในปฏิกรณ์ใหม่ โดยอาจให้ผ่านปั๊มอากาศ (Air pump) เพื่อการสร้างอัตราการไหลตามกำหนด ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในงานวิจัยนี้ออกแบบจากการวิเคราะห์รูปแบบการไหลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ลักษณะปฏิกรณ์ที่เหมาะสมเบื้องต้น เมื่อทำการทดลองยืนยันและปรับปรุงปฏิกรณ์จะได้ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนต้นแบบที่มีลักษณะและสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมปฏิบัติงานได้จริงมีสมรรถนะสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) ออกแบบรูปแบบที่เหมาะสมของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนโดยใช้การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ

2) ศึกษาลักษณะการแห้งของข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) ใช้โปรแกรม Solidworks ในการออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน
2) ใช้สำลีชุ่มน้ำเป็นมวลจำลอง เพื่อทดสอบยืนยันการไหลเวียนของอากาศจากผลของแบบจำลอง
3) ใช้ไคโตซานเมมเบรนเชิงพาณิชย์จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด
4) สร้างปฏิกรณ์ทำแห้งเพื่อใช้ศึกษาการทำแห้งข้าวเปลือก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซานที่มีรูปแบบเหมาะสมและสมรรถนะสูงในการทำแห้งข้าวเปลือก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการทำแห้ง

กระบวนการทำแห้งหรือการทำแห้ง (Drying or dehydration) เป็นการใช้ความร้อนเพื่อดึงน้ำออกจากวัสดุหรือสารด้วยวิธีการระเหย (Evaporation) อย่างไรก็ตามทั้ง 2 เทอม มีความหมายที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปการใช้เทอม Drying หมายถึงการลดความชื้นของวัสดุลงเหลือประมาณ 15 – 20% ขณะที่เทอม Dehydration มีเป้าหมายเพื่อลดความชื้นของวัสดุลงเหลือ 2 – 5% สำหรับกระบวนการดึงน้ำออก (Dewatering) เป็นการแยกน้ำออกจากวัสดุหรือสารด้วยวิธีการที่ไม่ใช้ความร้อน [1]

กระบวนการทำแห้งหรือการทำแห้งวัสดุ [2] สามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ กระบวนการทำแห้งแบบกะ (Batch) โดยในกระบวนการนี้จะดำเนินการตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ ส่วนอีกกระบวนการหนึ่งคือกระบวนการทำแห้งแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยในกระบวนการนี้มีการเติมวัสดุที่จะทำแห้งและนำวัสดุที่ถูกลดความชื้นแล้วออกจากระบบอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้กระบวนการทำแห้งยังสามารถแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนและการกำจัดไอน้ำออก ดังนี้

1. การให้ความร้อนโดยการให้สัมผัสโดยตรงกับอากาศร้อนที่ความดันบรรยากาศและมีการกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุด้วยอากาศ

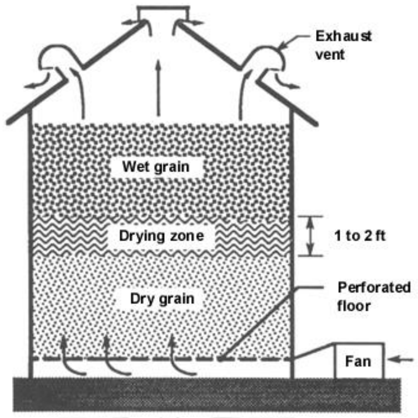
2. การทำแห้งในภาวะสุญญากาศ (Vacuum drying) โดยการดำเนินการภายใต้ภาวะสุญญากาศนี้ทำให้มีการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว โดยอาจมีการให้ความร้อนทางอ้อมด้วยการให้สัมผัสกับผนังโลหะร้อนหรือจากการแผ่รังสีความร้อน หรืออาจกระทำที่สภาวะอุณหภูมิบรรยากาศสำหรับวัสดุหรือสารที่อาจเกิดการเปลี่ยนสีหรือเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน

3. กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ในกระบวนการนี้น้ำที่อยู่ในวัสดุจะถูกเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งหลังจากนั้นจะถูกลดความดันจนเกิดการระเหิดกลายเป็นไอออกจากวัสดุไป

เครื่องทำแห้งในเชิงพาณิชย์แบ่งออกได้หลายประเภทดังนี้

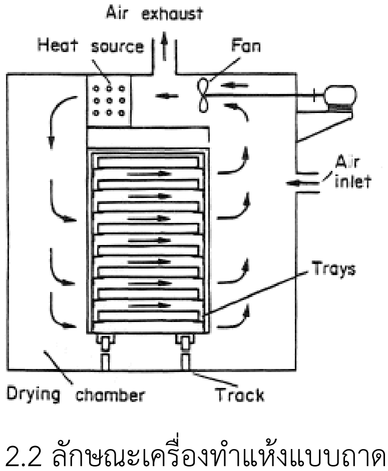
1. เครื่องทำแห้งแบบถัง (Bin dryer) เป็นภาชนะรูปทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยมมีตะแกรงสำหรับรองรับวัสดุที่ต้องการทำแห้งอยู่ทางด้านใต้ของตัวถัง โดยป้อนอากาศร้อนเข้าทางด้านใต้ของถังด้วยความเร็วที่ค่อนข้างต่ำ เช่น 0.5 ลูกบาศก์เมตร/วินาที/ตารางเมตรพื้นที่ ถังลอยขึ้นสู่ทางด้านบน

ผ่านชั้นวัสดุที่ต้องการทำแห้งของตัวเครื่องพร้อมกับพาความชื้นออกจากระบบไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เครื่องทำแห้งแบบถังนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคเกษตรกรรมเพื่อลดความชื้นเบื้องต้นให้กับผักและเมล็ดพืช



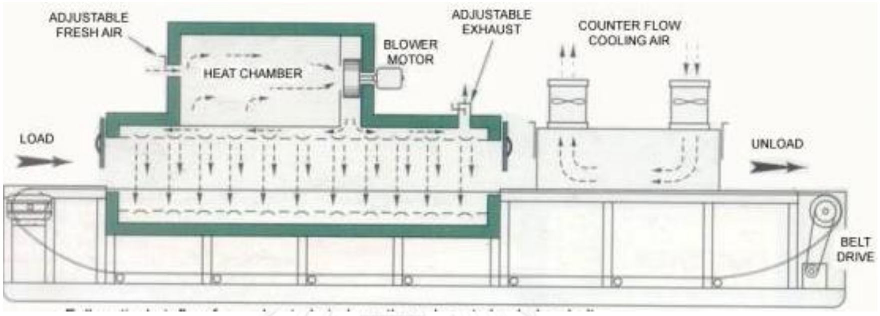
รูปที่ 2.1 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบถัง [3]

2. เครื่องทำแห้งแบบถาด (Tray dryer) มีลักษณะเป็นตู้ ภายในมีถาดที่ใช้วางวัสดุเป็นชั้น ๆ ในแนวดิ่ง มีการหมุนเวียนของอากาศร้อนภายในตัวเครื่องที่ความเร็ว 0.5 – 5 เมตร/วินาที/ตารางเมตรพื้นที่ถัง โดยการดึงอากาศจากภายนอกด้วยพัดลมผ่านขดลวดให้ความร้อนแล้วไหลผ่านวัสดุที่วางอยู่บนถาดก่อนระบายออกสู่ภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยอาจมีลักษณะการออกแบบเป็นแบบผ่านครั้งเดียว (One pass) หรือเป็นแบบมีการหมุนเวียนของอากาศกลับมาใช้ใหม่ (Recirculation design) ก็ได้ โดยในแบบมีการหมุนเวียนของอากาศกลับมาใช้ใหม่ต้องมีการกำจัดความชื้นของอากาศออกก่อนหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.2 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบถาด [4]

3. เครื่องทำแห้งแบบสายพาน (Conveyor Dryer) วัสดุเปียกจะถูกจ่ายลงทางปลายด้านซ้ายของสายพานที่มีลักษณะเป็นตะแกรง (Mesh belt) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปอย่างช้า ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในรูปแบบหนึ่งอาจให้มีการป้อนอากาศร้อนความชื้นปานกลางที่ส่วนต้น ๆ ของสายพานได้ เพราะการระเหยอย่างรวดเร็วของวัสดุเปียกสามารถทำให้อุณหภูมิของอากาศเย็นลง แต่อากาศที่ใช้ในการทำแห้งขั้นสุดท้ายควรเป็นอากาศแห้งอุณหภูมิต่ำเพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ หรืออาจออกแบบแยกเป็น 2 สายพานต่อเป็นอนุกรมกันทำให้สามารถถ่ายวัสดุที่แห้งเป็นบางส่วนในขั้นตอนที่หนึ่งส่งต่อไปทำแห้งเพิ่มขึ้นอีกในเครื่องทำแห้งแบบสายพานตัวต่อไป



รูปที่ 2.3 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบสายพาน [5]

4. เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed Dryer) ประกอบด้วยถาดโลหะที่มีลักษณะเป็นตะแกรงหรือแผ่นเจาะรูสำหรับวางวัสดุทางด้านล่างของเครื่องทำแห้ง ข้างใต้ถาดวางวัสดุมีตัวกระจายลม (Gas distributor) พร้อมตัวให้ความร้อน (Air heater) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดต้องมีความสูงเพียงพอเพื่อให้วัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบของไหลหรือมีการลอยตัวอย่างอิสระ วัสดุที่เหมาะสำหรับเครื่องทำแห้งแบบนี้ควรมีลักษณะดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก. มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่าง 20 ไมครอน ถึง 10 มม. เพื่อป้องกันการเกิด Channeling และ Slugging โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอน มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวเป็นก้อนเนื่องจากการมีพื้นที่ผิวมาก

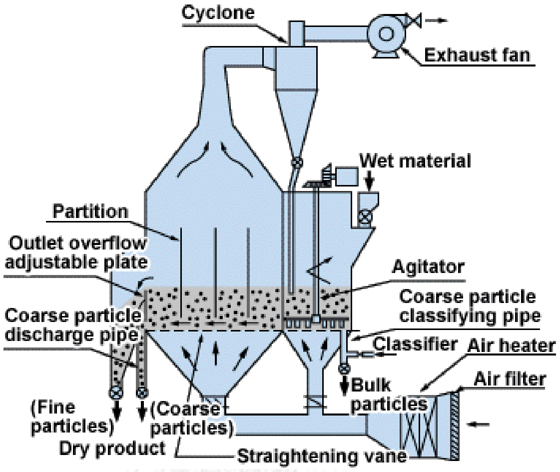
ข. ควรมีการกระจายขนาดอนุภาคแคบ เพื่อให้แน่ใจว่าอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในสภาพฟลูอิไดเซชันเพื่อลดการสูญเสียหลุดลอยไปกับอากาศเพียงเล็กน้อย

ค. อนุภาคควรมีลักษณะเป็นทรงกลมเพื่อให้เกิดสภาพฟลูอิไดเซชันที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคขนาดใหญ่

ง. ถ้าวัสดุมีการจับตัวกันเป็นก้อนต้องสามารถแตกออกได้ทันทีในเครื่องทำแห้งเพื่อให้เกิดสภาพฟลูอิไดเซชัน

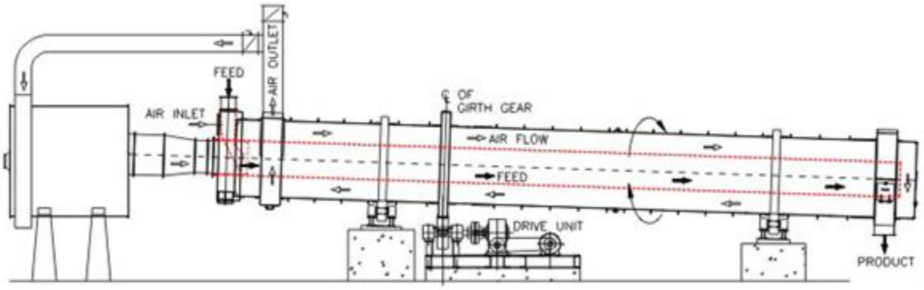
จ. อนุภาคต้องมีความแข็งแรงพอที่จะทนต่อการผสมอย่างรุนแรงในฟลูอิไดซ์เบด

ฉ. ผลิตภัณฑ์สุดท้ายต้องไม่เหนียวเยิ้ม ณ สภาวะอุณหภูมิขาออก



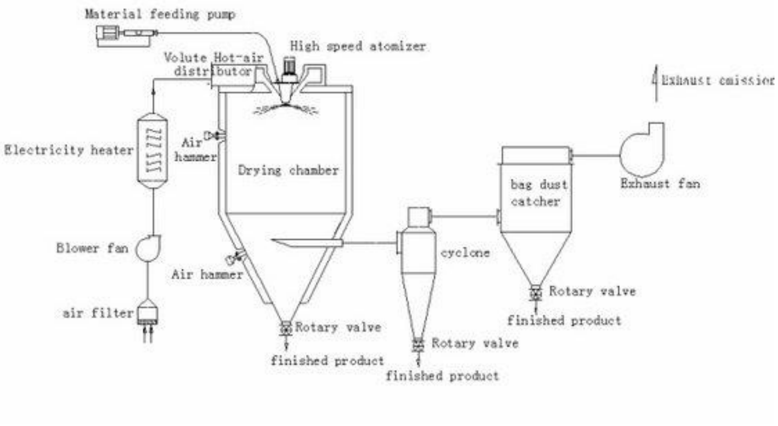
รูปที่ 2.4 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด [6]

5. เครื่องทำแห้งแบบถังหมุน (Rotary Dryer) ประกอบด้วยตัวถังอบมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกวางนอนหรือวางเอียงเล็กน้อยที่หมุนรอบตัวอย่างช้า ๆ เพื่อให้วัสดุเกิดการคลุกเค้ากันและตกลงสู่พื้นของตัวถังหรือโปรยลงในแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 วัสดุที่ตกลงในแนวดิ่งนั้นจะมีการสัมผัสกับลมร้อนที่ถูกป้อนจากแกนกลางของตัวถัง โดยลมร้อนจะทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยและน้ำที่ระเหยก็จะถูกลมร้อนพาออกไปจากระบบ เครื่องทำแห้งแบบนี้ไม่เหมาะกับวัสดุที่เปราะไม่ทนต่อแรงกระแทก เนื่องจากวัสดุจะถูกกระแทกเนื่องจากการหมุนของตัวถังและการตกลงสู่พื้นของตัวถังในแนวดิ่งของวัสดุอยู่ตลอดเวลาในการทำแห้ง



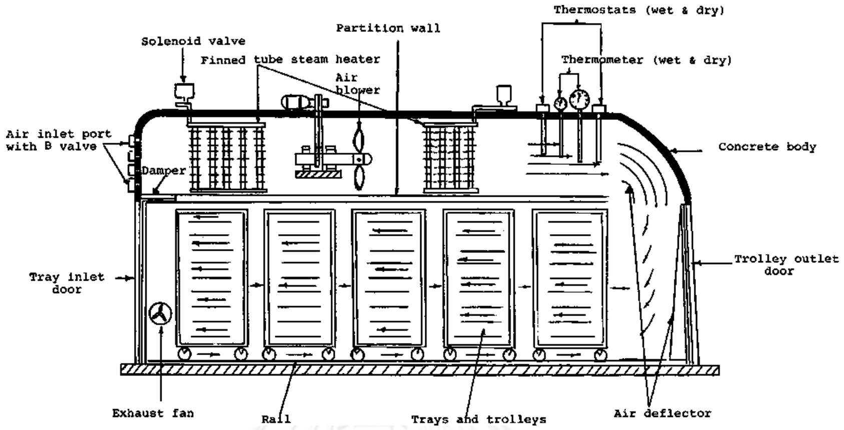
รูปที่ 2.5 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบถังหมุน [7]

6. เครื่องทำแห้งแบบพ่นเป็นละอองฝอย (Spray Dryer) วัสดุที่นำมาทำแห้งในเครื่องทำแห้งประเภทนี้จะถูกเปลี่ยนสภาพจากสเลอรี่ (Slurry) ให้เป็นผงโดยการฉีดพ่นละอองสเลอรี่เป็นฝอยเข้าไปในห้องทำแห้ง (Drying chamber) ที่มีกระแสลมร้อนซึ่งเป่าในทิศทางเดียวกับหรือตรงข้ามกับหรือผสมกันทั้งสองแบบกับการพ่นละอองฝอย โดยการเป่ากระแสลมร้อนในทิศทางเดียวกับวัสดุมักใช้ในกรณีกับวัสดุที่ไวต่อความร้อน เพราะอุณหภูมิของวัสดุแห้งจะต่ำลงกว่าอุณหภูมิของอากาศขาเข้า วัสดุแห้งจะตกลงสู่ภาชนะรองรับที่อยู่ด้านใต้ของห้องทำแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การดำเนินการในเครื่องทำแห้งแบบพ่นเป็นละอองฝอยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การพ่นเป็นละอองฝอย (Atomization) การทำแห้งโดยการสัมผัสของละอองฝอยกับอากาศร้อน และการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศ



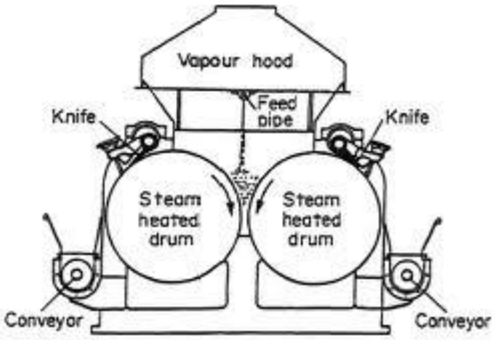
รูปที่ 2.6 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบพ่นเป็นละอองฝอย [8]

7. เครื่องทำแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel dryer) เครื่องทำแห้งแบบนี้มีวิธีการใช้งานคือนำวัสดุใส่ถาดที่อยู่ในรถ (Trays and trolleys) ซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์ลมร้อนตามความยาวจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 อาจออกแบบการเคลื่อนที่ของลมร้อนได้หลายรูปแบบ เช่น เคลื่อนที่สวนทางกับรถ ขนานกับรถ ดูดออกตรงกลาง หรือแบบผสม



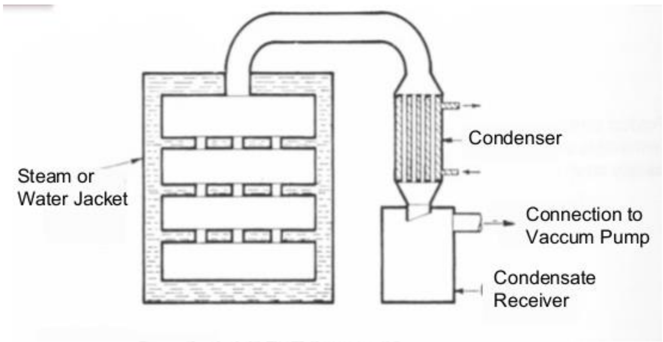
รูปที่ 2.7 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบอุโมงค์ [9]

8. เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) ประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกหนึ่งลูก (Single drum dryer) หรือสองลูก (Double drum dryer) ลูกกลิ้งมักทำด้วยเหล็กปลอดสนิม (Stainless steel) ผิวเรียบภายในกลวงสามารถหมุนได้ โดยการให้ความร้อนภายในลูกกลิ้งด้วยไอน้ำหรือไฟฟ้าใช้ในการทำแห้งของเหลวหรือของเหลวข้น โดยป้อนของเหลวดังกล่าวด้วยการพ่นหรือจุ่มลูกกลิ้งลงในของเหลว เมื่อลูกกลิ้งหมุนครบรอบ ของเหลวที่เคลือบบนผิวจะแห้งและถูกขูดออกจากผิวของลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง [10]

9. เครื่องทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum dryer) เป็นเครื่องทำแห้งที่ห้องทำแห้งมีภาวะเป็นสุญญากาศโดยการดูดอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) มีการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากผนัง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 การใช้ระบบสุญญากาศช่วยในการทำแห้งทำให้น้ำที่อยู่ในโครงสร้างรูพรุนของวัสดุระเหยออกมาที่ผิวนอกของวัสดุได้ง่ายขึ้น การทำแห้งด้วยเครื่องอบสุญญากาศช่วยรักษาคุณภาพของอาหารได้ดีกว่าการทำแห้งที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 2.9 ลักษณะเครื่องทำแห้งแบบสุญญากาศ [11]

2.2 ข้าวเปลือก (Paddy)

ข้าวเปลือก (Paddy) คือเมล็ดข้าวที่ยังไม่ได้เอาเปลือกออกเป็นธัญพืชเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ให้แก่ประเทศไทย การสีข้าว (Rice milling) เป็นกระบวนการในการกะเทาะเปลือกออกจากข้าวเปลือกเพื่อให้ได้ข้าวสำหรับการบริโภค โดยทั่วไปแล้วข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นสัมพัทธ์ในเมล็ดข้าวประมาณ 20 – 25% (ฐานมวลชื้น) ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งซึ่งเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของของเมล็ดข้าวเปลือกและในแง่ของราคาในการซื้อขาย ข้าวเปลือกที่จะนำมาสีต้องผ่านการลดความชื้นให้มีความชื้น 13 – 15% ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเกษตรกรจะใช้วิธีการตากแห้งกลางแจ้ง (Natural drying) ในวันที่สภาพอากาศปกติ แต่ในบางฤดูกาลสภาพอากาศไม่เหมาะสมในการตากแห้งข้าวเปลือกกลางแจ้งอาจทำแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องจักร (Drying machine) เนื่องจากข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในมวลต่ำ (ประมาณ 14%) ทำให้ข้าวเปลือกมีอายุในการเก็บรักษาที่ยาวนาน ลดความเสี่ยงต่อการขึ้นรา มีอัตราการงอกที่สูง และมีมูลค่าในการขายที่สูงอีกด้วย ในการทำแห้งข้าวเปลือกควรมีอุณหภูมิไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส และถ้าเป็นเมล็ดพันธุ์ไม่ควรสูงเกิน 43 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เมล็ดข้าวแตก และมีอัตราการงอกลดน้อยลง [12]

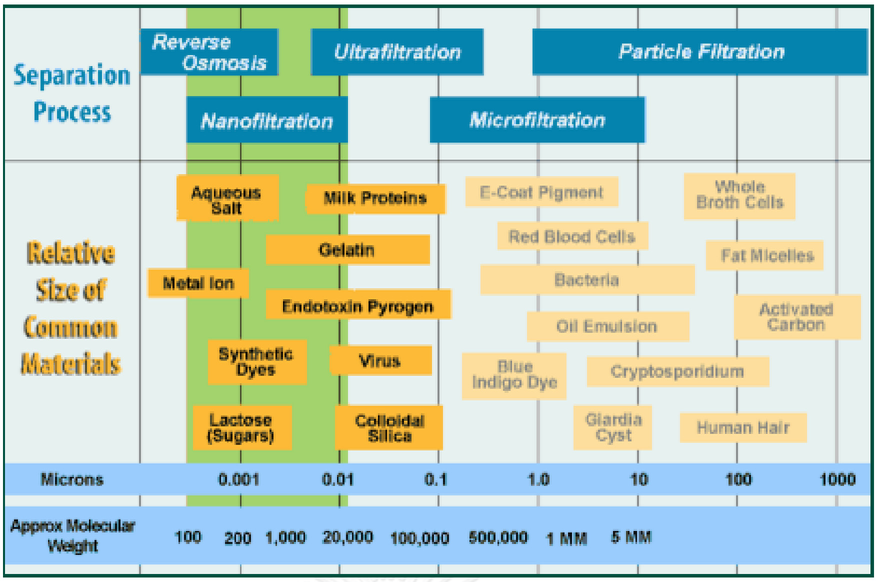
2.3 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation process)

เมมเบรน (Membrane) [13] เป็นตัวกลางเลือกผ่านที่ยอมให้สารบางชนิดผ่านเมมเบรนไปได้ โดยเมมเบรนมักให้มีความหนาน้อย ๆ เพื่อลดความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นทางด้านความหนานี้ สารที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่าเพอร์มิเอต (Permeate) ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนมวลภายใต้แรงขับดัน (Driving force) ส่วนสารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่ารีเทนเทต (Retentate) ก่อนที่จะนำเมมเบรนมาใช้งานจะต้องนำเมมเบรนมาทำการประกอบและติดตั้งภายในมอดูล (Module) เสียก่อนเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ โดยมอดูลมีหลายรูปแบบ เช่น มอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module) มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module) มอดูลแบบท่อ (Tubular module) และมอดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module) เป็นต้น

ในการนำเมมเบรนมาใช้จะต้องพิจารณาสมบัติและลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งาน อาทิเช่น

1. ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของเมมเบรน (Hydrophobicity and Hydrophobicity)
2. โครงสร้างของเมมเบรน เช่น โครงสร้างแบบเนื้อแน่น (Dense) หรือโครงสร้างแบบมีรูพรุน (Porous) เป็นต้น
3. สมบัติเชิงกลของเมมเบรน
4. เสถียรภาพทางความร้อนของเมมเบรน
5. เสถียรภาพทางเคมีของเมมเบรน
6. ความสามารถในการยอมให้สารผ่าน/ความสามารถในการกักกันสาร
7. ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเมมเบรน

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนสามารถจำแนกได้หลายประเภทตามขนาดของอนุภาคที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ดังรูปที่ 2.10 และเอกลักษณ์ของกลไกการแยกด้วยเมมเบรนดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.10 การจำแนกกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [14]

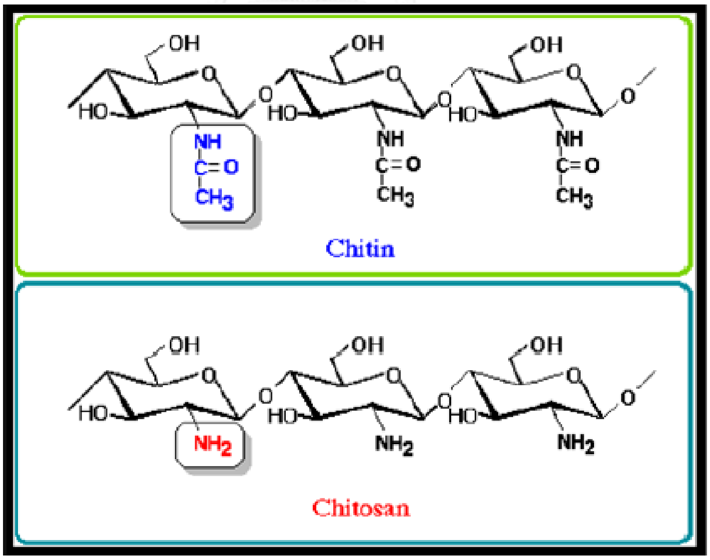
ตารางที่ 2.1 แสดงเอกลักษณ์และกลไกของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [13]

ชนิดของกระบวนการ	เฟสของสารป้อน	เฟสของสารเพอร์มิเอต	ชนิดแรงขับดัน	กลไกการแยก
Particle filtration	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน	การคัดขนาด
Microfiltration	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน	การคัดขนาด
Ultrafiltration	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน	การคัดขนาด
Nanofiltration	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน	การคัดขนาด
Reverse Osmosis	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน	การละลาย/การแพร่
Pervaporataion	ของเหลว	ไอ	ความดันย่อย	การละลาย/การแพร่
Vapor permeation	ไอ	ไอ	ความดันย่อย	การละลาย/การแพร่
Gas separation	แก๊ส	แก๊ส	ความดันย่อย	การละลาย/การแพร่

2.4 เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane)

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน (N-deacetlated derivative of chitin) [15] มีโครงสร้างดังแสดง ในรูปที่ 2.11 ไคตินพบได้ในสัตว์เปลือกแข็งจำพวกกุ้ง ปู และในแมลงบางชนิด ไคโตซานเตรียมได้จากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่แอซิทิลของไคตินออก (Chitin deacetylate)

เมมเบรนไคโตซานเตรียมได้จากวิธีผกผันเฟส (Phase inversion technique) ของสารละลายไคโตซานซึ่งได้จากการละลายไคโตซานด้วยสารละลายแอซิติก ขึ้นรูป (Casting) ให้มีลักษณะเป็นแผ่นมีมิติ (ด้านกว้างและด้านยาว) และความหนาระดับหนึ่งตามที่ต้องการ ทำให้ตัวทำละลายแอซิติกระเหยไปด้วยความร้อนหรือตั้งทิ้งให้แห้งในอากาศจะได้แผ่นเมมเบรนไคโตซาน สะเทินแผ่นเมมเบรนไคโตซานในสารละลายด่างโซดาไฟ ล้างด้วยน้ำและทำให้แห้ง จะได้แผ่นเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง นำแผ่นเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางแช่ในสารละลายกรดกำมะถัน ล้างด้วยน้ำและทำให้แห้งจะได้แผ่นเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง [15] แต่งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซานที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ซึ่งผลิตเมมเบรนให้ทั้งแบบเนื้อแน่นและแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์ทั้งชนิดไม่เชื่อมขวางและเชื่อมขวาง



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของไคติน (บน) และไคโตซาน (ล่าง) [15]

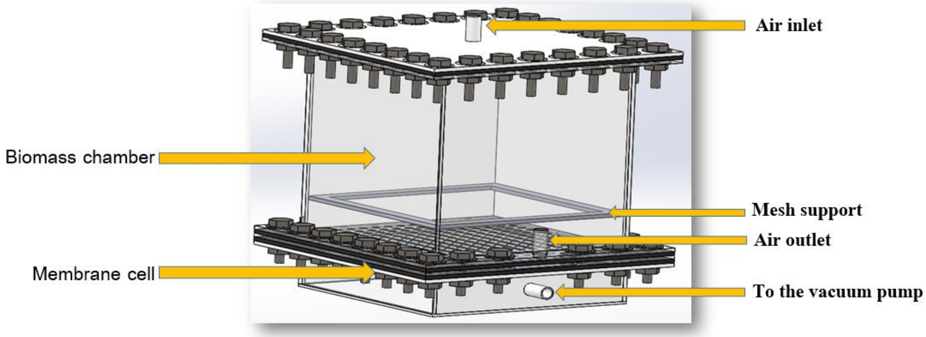
2.5 โปรแกรม Solidworks

โปรแกรม Solidworks เป็นโปรแกรมออกแบบสำเร็จรูปที่พัฒนาโดยบริษัท Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. โดยโปรแกรมนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานออกแบบด้านวิศวกรรม เนื่องจากง่ายต่อการใช้งานและครอบคลุมหลากหลายฟังก์ชันการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถจำลองสถานการณ์การใช้งาน (Simulation) และรูปแบบการไหลของของไหลทั้งระหว่างและภายในชิ้นงานที่ทำการออกแบบได้ (Computational fluid dynamics: CFD simulation) งานวิจัยนี้จึงได้เลือกโปรแกรม Solidworks ในการออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในการทำแห้งชีวมวล

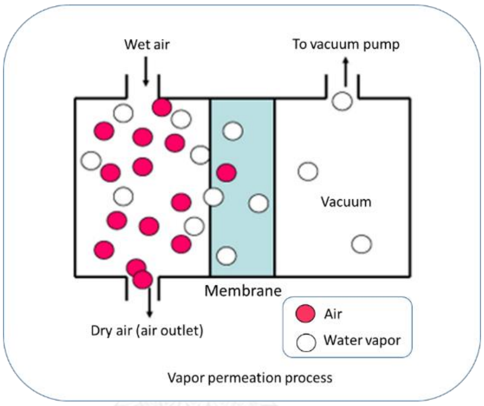
2.6 ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน (Membrane reactor)

ปฏิกรณ์ทำแห้งชีวมวลเริ่มแรกของงานวิจัยนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.12 ประกอบด้วยส่วนบรรจุชีวมวล (Biomass chamber) อยู่เหนือเซลล์เมมเบรน (Membrane cell) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นตะแกรงสำหรับรองรับแผ่นเมมเบรน ส่วนเหนือเซลล์เมมเบรนและส่วนใต้เซลล์เมมเบรนยึดติดเป็นหน่วยเดียวกันด้วยหน้าแปลน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมมเบรนไคโตซานเพราะเป็นเมมเบรนชอบน้ำ [16] ไอน้ำที่ถูกอากาศเป่าออกจากชีวมวลแพร่ผ่านเมมเบรนเข้าไปในส่วนใต้เซลล์เมมเบรนที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศซึ่งจะถูกดูดให้ผ่านไปที่ดักเย็น (Cold trap) เพื่อให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำได้อากาศแห้งหมุนเวียนกลับเข้าไปในปฏิกรณ์ โดยอาจให้ผ่านปั๊มอากาศ (Air pump) เพื่อสร้างอัตราการไหลตามกำหนดก่อนกลับเข้าไปในส่วนบรรจุชีวมวล โดยปกติระบบนี้ทำงานแบบระบบปิดหากไม่ต้องมีการเพิ่มอากาศเข้าไปในปฏิกรณ์ แต่หากต้องการเพิ่มอัตราการไหลหรือเมื่ออัตราการไหลต่ำกว่ากำหนดก็สามารถเป่าอากาศจากภายนอกเข้าไปได้ เพื่อการควบคุมความชื้นของอากาศในปฏิกรณ์ได้ให้อากาศหมุนเวียนกลับ (Recycled air) และอากาศเสริม (Makeup air) ผ่านหน่วยปรับความชื้นก่อนเข้าไปในปฏิกรณ์ด้วย ลักษณะการดำเนินการของปฏิกรณ์เมมเบรนนี้เป็นไปตามหลักการของกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) ตามรูปที่ 2.13

อย่างไรก็ตามยังมีความต้องการเพิ่มสมรรถนะของปฏิกรณ์ให้สูงขึ้นอีก จึงมีแนวความคิดใช้การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบปฏิกรณ์ต้นแบบใหม่และกำหนดภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม



รูปที่ 2.12 ปฏิกรณ์ทำชีวมวลแห้งเริ่มแรกของงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.13 กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) [17]

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาวัตถุดิบคือ ข้าวเปลือก เพื่อเพิ่มมูลค่าของข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว โดยการลดความชื้นก่อนจำหน่ายแทนการตากกลางแจ้งซึ่งขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sun และคณะ [18] จำลองรูปแบบการไหลของอากาศ การกระจายความเร็วและความดันในเตาอบไม้ขนาดอุตสาหกรรม (Industrial dehumidifier wood drying kiln) ด้วย CFD (Computational fluid dynamics) model พบว่าการติดตั้งคอนเดนเซอร์ไว้ต่ำกว่าระดับของกองไม้ที่จะอบแห้งมีความเสี่ยงที่จะเกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณหน้าคอนเดนเซอร์มากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งลดลงโดยต้องใช้พลังงานมากขึ้นประมาณ 18% และใช้เวลาในการอบนานขึ้นประมาณ 14% ผลการจำลองยังแสดงว่าเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง ๆ เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการหมุนเวียนของอากาศภายในเตาอบจึงได้ปรับปรุงรูปแบบการไหลของอากาศใหม่

โดยใช้ท่ออากาศต่อท่อปล่อยลมออกของคอนเดนเซอร์เข้ากับช่องอากาศด้านบนของเตาอบ เพื่อไม่ให้เกิดการหมุนวนกลับของลมปล่อยออกจากคอนเดนเซอร์กลับเข้าไปในหน่วยคอนเดนเซอร์ได้อีก ทำให้สามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบดึงความชื้นให้ดีขึ้นได้

Amjad และคณะ [19] ศึกษาโพรไฟล์การกระจายความเร็วของอากาศในเครื่องอบแห้งอาหารเครื่องหนึ่งที่มีขนาด 11 ม.×1.20 ม.×1.25 ม. ในส่วนอบแห้งมีช่องทางการไหลของอากาศในแนวทแยงมุม (Diagonal air flow channel) โดยกะบะใส่อาหารมีจำนวน 25 ใบ แต่ละใบมีขนาด 0.6 ม×0.4 ม×0.29 ม. วางบนรางลำเลียง (Rolling track) ลาดเอียงตั้งแต่ทางด้านขาเข้าในแนวทแยงทำมุม 1.42° กับผนังห้องอบแห้งตามแนวยาว โดยแต่ละกะบะกินระยะทาง 0.4 ม. ของห้องอบแห้ง ใช้ซอฟแวร์ ANSYS-Fluent จำลองลักษณะการไหลของอากาศในห้องอบแห้ง พบว่าลักษณะการจัดวางตัวของเครื่องอบแห้งนี้ทำให้มีการกระจายที่ดีของอากาศในห้องอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับชิ้นมันฝรั่งหนา 4 มม. ที่ 48°C ให้ผลการอบแห้งทั่วตลอดชิ้นสม่ำเสมอ ให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของความเร็วอากาศระหว่างผลการทดลองเทียบกับผลจากแบบจำลองสูงถึง 87.09%

Ryu และคณะ [20] ศึกษารูปแบบการไหลในแนวดิ่งภายในเครื่องอบแห้งแบบ Thin-layer drying ที่มีถาดแบบหลายชั้นโดยใช้ซอฟแวร์ ANSYS-Fluent ในการจำลองรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้ง 4 แบบ คือ 1) การออกแบบที่ให้ลักษณะการไหลของอากาศมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมโดยไม่มีผนังเสริม (Rectangular-shaped flow path without additional wall) 2) การออกแบบที่ให้ลักษณะการไหลของอากาศมีลักษณะเป็นแบบสามเหลี่ยมโดยไม่มีผนังเสริม (Triangular-shaped flow path without additional wall) 3) การออกแบบที่ให้ลักษณะการไหลของอากาศมีลักษณะเป็นแบบสามเหลี่ยมโดยเสริมแผ่นกั้นข้างใต้ตัวให้ความร้อน (Triangular-shaped flow path with blocking under the heater) และ 4) การออกแบบที่ให้ลักษณะการไหลของอากาศมีลักษณะเป็นแบบสามเหลี่ยมโดยเสริมแผ่นกั้นข้างใต้ตัวให้ความร้อนและแผ่นกระจายอากาศ (Triangular-shaped flow path with blocking under the heater and flow distribution plate) พบว่ารูปแบบที่ 4 ให้การกระจายของความเร็วลมที่สม่ำเสมอมากที่สุดคืออยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 เมตรต่อวินาที และพบว่ากราฟการอบแห้ง (Drying curve) ของค่าความชื้นกับเวลาจากแบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งพริกแดงเป็นอย่างดี

Udomkun และคณะ [21] ศึกษาผลของทิศทางการไหลของอากาศแบบ Through-flow และแบบ Over-flow ต่อจลนศาสตร์การอบแห้งมะละกอในเตาอบด้วยการพา (Convective-type dyer) ที่สภาวะอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองนิวตัน (Newton model) พบว่าทิศทางการไหลของอากาศในรูปแบบ Through-flow ทำให้ได้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงกว่า

ทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง และพบว่าอัตราการอบแห้งในลักษณะการไหลทั้งสองแบบขึ้นกับอุณหภูมิและความเร็วของอากาศอย่างมากแต่ไม่ขึ้นกับความชื้นจำเพาะ

Pan และคณะ [22] วิเคราะห์ความเร็วของของไหลภายในเพลทช่องจุลภาค (Micro channel plate) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของไหลในเพลทช่องจุลภาคโดยใช้ซอฟแวร์ ANSYS-Fluent ที่ความยาวของช่องขนาดต่าง ๆ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มม. และค่าความเร็วขาเข้าต่างๆ กัน คือ 1, 10, 100, 500 และ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าความแตกต่างของความเร็วในแต่ละช่องมีค่าที่ลดลงที่ความเร็วขาเข้าเท่ากัน เมื่อเพิ่มความเร็วขาเข้ามากขึ้นจะทำให้ความเร็วของของไหลในแต่ละช่องเป็นแบบไม่สมมาตรมากขึ้นและที่ขนาดความกว้างของช่องต่าง ๆ กัน คือ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 มม. พบว่าช่องที่มีความกว้างน้อย ๆ จะมีความเร็วของของไหลสม่ำเสมอมากกว่าช่องที่กว้างกว่าที่ทุก ๆ ค่าของความเร็วขาเข้าและจากการศึกษาขนาดช่องว่างด้านขาเข้าและขาออกจากช่อง พบว่ายิ่งช่องว่างก่อนเข้าช่องกว้างมากเท่าไหร่ก็จะทำให้ของไหลไหลเข้าช่องด้วยความเร็วที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

1) เมมเบรนไคโตซาน 4 ชนิด ได้แก่ แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก แบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ที่ไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด

2) ข้าวเปลือก (Paddy) ที่มีค่าความชื้นในมวลเริ่มต้นเท่ากับ 23-26% (ฐานมวลเปียก (Wet basis))

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1) Universal Testing: LLOYD Instruments LR 5K (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

2) Thermal analysis: TG/DTA PerkinElmer PYRIS DIAMOND (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดสอบสมบัติของเมมเบรน

3.3.1.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water uptake)

ศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของเมมเบรนทั้ง 4 ชนิดจากน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปในเนื้อของเมมเบรนต่อน้ำหนักของเมมเบรนแห้ง [23] โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1) ตัดเมมเบรนให้มีขนาดเท่ากับ 2×2 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1
2) นำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3) ชั่งน้ำหนักของเมมเบรนแห้งก่อนทำการแช่ลงในน้ำบริสุทธิ์
4) นำเมมเบรนแห้งทั้ง 4 ชนิด แช่ลงในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5) เมื่อครบเวลานำเมมเบรนขึ้นมาจากน้ำบริสุทธิ์ ทำการซับน้ำที่ผิวของเมมเบรนให้แห้ง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของเมมเบรนดังกล่าว

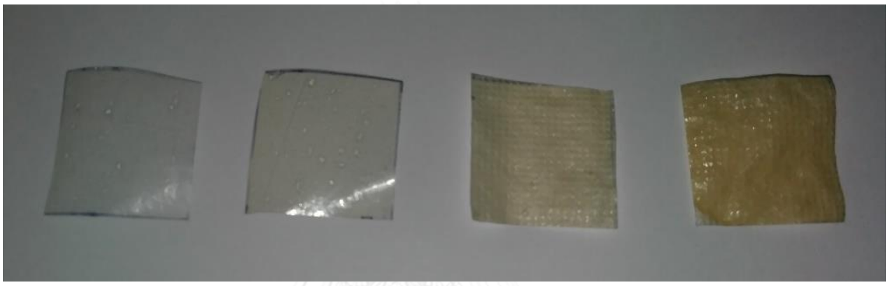
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับน้ำของเมมเบรน ตามสมการที่ 3.1

$$\text{\% Water uptake} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดยที่ W_w คือ น้ำหนักเมมเบรนหลังการดูดซับน้ำ

W_d คือ น้ำหนักเมมเบรนก่อนการดูดซับน้ำ



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความสามารถในการการดูดซับน้ำ

3.3.1.2 ความชอบน้ำของเมมเบรน

ศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนในเทอมของค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์ตามหลักการของกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) ที่ใช้ในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนของงานวิจัยนี้ โดยใช้ชุดทดสอบแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module) แต่ได้ฟลักซ์ไอน้ำต่ำมากจึงเปลี่ยนไปวัดฟลักซ์ไอน้ำตามกระบวนการเพอร์แวพอเรชัน (Pervaporation) แทน เนื่องจากทั้งสองกระบวนการมีความคล้ายกันต่างกันที่ในกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันจะทำให้น้ำเปลี่ยนเฟสก่อนสัมผัสกับผิวเมมเบรน แต่ในกระบวนการเพอร์แวพอเรชันน้ำจะเกิดการเปลี่ยนเฟส ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในเมมเบรนหรือที่ผิวของเมมเบรนด้านสารป้อนหรือที่ผิวของเมมเบรนด้านขาออก [13] ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารป้อนและสร้างสภาวะสุญญากาศทางด้านเพอร์มิเอตที่ความดันประมาณ -850 มิลลิบาร์ (ความสามารถสูงสุดของปั๊มสุญญากาศ) เพื่อให้ของเหลวน้ำเปลี่ยนเฟสเป็นไอน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนออกมาเก็บไว้ในอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็น (Cold trap) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

1) ตัดเมมเบรนทั้ง 4 ชนิดเป็นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 38 มิลลิเมตร
2) ประกอบเมมเบรนเข้ากับโมดูลแบบแผ่นและกรอบ โดยเมมเบรนแบบเนื้อแน่นจะวางลงบนผ้าสปันปอนด์เปล่าเป็นตัวรองรับก่อนที่จะนำมาวางบนหน้าแปลนของมอดูลดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อป้องกันการฉีกขาดของเมมเบรนในระหว่างการทดสอบ
3) ประกอบชุดทดสอบ โดยทางขาเข้าของมอดูลต่อเข้ากับปั๊มน้ำ ส่วนทางด้านเพอร์มิเอต (Permeate) ต่อกับอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็นที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ
4) ป้อนน้ำบริสุทธิ์เข้าไปทางด้านขาเข้าของมอดูลและให้มีการไหลเวียนน้ำอยู่ตลอดเวลาโดยใช้ปั๊มทำหน้าที่ในการไหลเวียนน้ำ
5) เปิดปั๊มสุญญากาศ ทำการวัดปริมาณของน้ำที่ควบแน่นภายในอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็นทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหรือปริมาณน้ำที่วัดได้มีค่าคงที่
6) เปลี่ยนชนิดของเมมเบรนและดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 และ 5
7) คำนวณค่าฟลักซ์ของไอน้ำ ตามสมการที่ 3.2

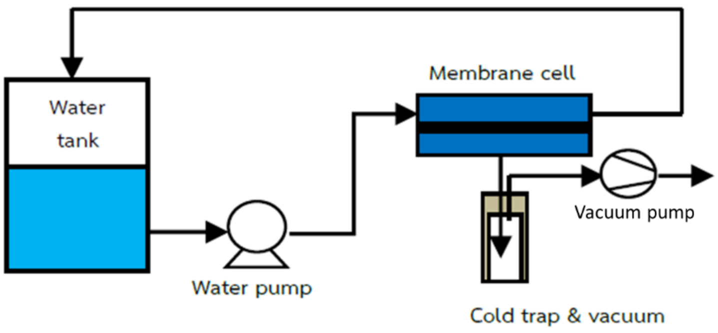
$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \qquad (3.2)$$

โดยที่ J คือ ค่าฟลักซ์ของไอน้ำ (กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

Q คือ ปริมาณไอน้ำที่แพร่ผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่ (กรัม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน (ตารางเมตร)

Δt คือ เวลาในการวัดปริมาณไอน้ำที่ผ่านเมมเบรน (ชั่วโมง)



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบวัดฟลักซ์ไอน้ำ

รูปที่ 3.3 เซลล์หน้าแปลนเมมเบรน

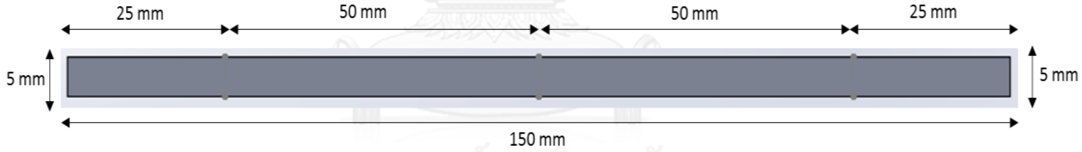
3.3.1.3 ความสามารถทนต่อแรงดึง

ในการทดสอบความสามารถในการทนแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืดออก (% Elongation) ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นทั้งแบบเชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง ดำเนินตามมาตรฐาน D882 เนื่องจากเมมเบรนมีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร และเมมเบรนแบบคอมโพสิตทั้งแบบเชื่อมขวางและแบบไม่เชื่อมขวาง ดำเนินตามมาตรฐาน D638 ซึ่งใช้ทดสอบกับพลาสติกแผ่นที่มีการเสริมแรงและไม่มีการเสริมแรง โดยพลาสติกจะต้องมีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตรแต่ไม่เกิน 14 มิลลิเมตร [24]

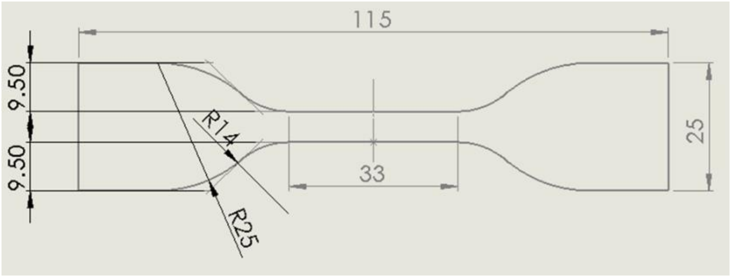
การทดสอบตามมาตรฐาน D882 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ตัดเมมเบรนให้มีความกว้าง 5 มิลิลิเมตรและยาว 150 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4
2) วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
3) ทำการทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing machine แสดงดังในรูปที่ 3.6 โดยมีภาวะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้
    ก. ใช้โหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 10 กิโลนิวตัน
    ข. ใช้ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที
    ค. ระยะในการจับชิ้นงาน (Initial grip) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร

การทดสอบตามมาตรฐาน D638 มีขั้นตอนและสภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับมาตรฐาน D882 แต่ชิ้นงานในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นแบบ Dog bone แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน D882



รูปที่ 3.5 ขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน D638

รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล Universal testing machine

3.3.1.4 สมบัติเชิงความร้อน

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนด้วยเครื่อง TG/DTA PerkinElmer รุ่น PYRIS DIAMOND แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยมีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

1) ตัดชิ้นงานให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ

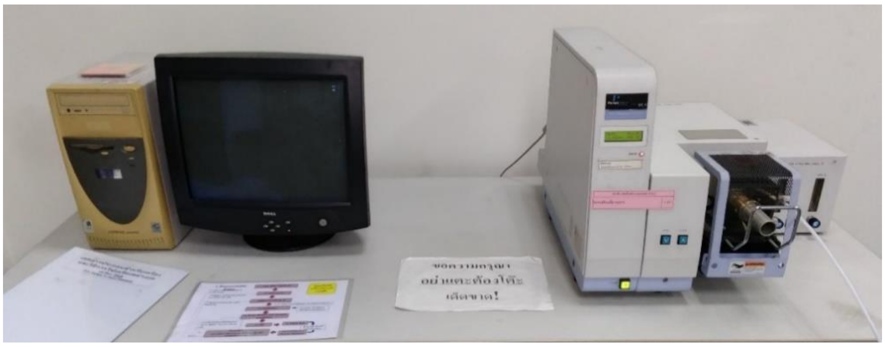
2) ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนที่ภาวะการทดสอบดังนี้

ก. ใช้ปริมาณเมมเบรนประมาณ 10 – 20 มิลลิกรัม

ข. ใช้อุณหภูมิทดสอบในช่วง 40 – 700 องศาเซลเซียส

ค. ใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน TG/DTA analyzer

3.3.2 การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ

ประกอบด้วยการกำหนดรูปแบบโมเดลที่ต้องการศึกษา วิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นภายในห้องทำแห้ง (Drying chamber) จากแต่ละโมเดลด้วยโปรแกรม Solidworks และการประเมินความสม่ำเสมอของการทำแห้งจากโมเดลกายภาพ ดังนี้

3.3.2.1 การกำหนดรูปแบบโมเดลศึกษาและการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศ

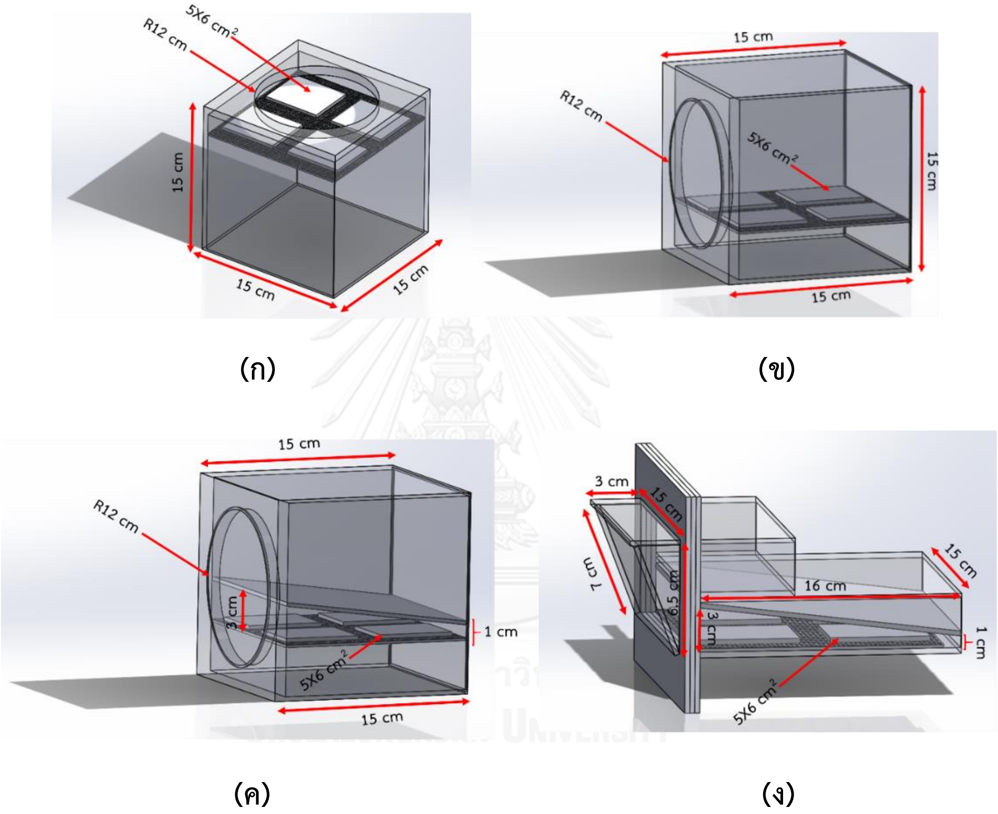
1) กำหนดห้องทำแห้ง (Drying chamber) มีขนาด 15×15×15 ลูกบาศก์เซนติเมตร พร้อมด้วยถาดตะแกรงสำหรับวางชีวมวล
2) กำหนดรูปแบบโมเดลศึกษา 4 แบบ ได้แก่ แบบ Vertical flow (VF), แบบ Horizontal flow (HF), แบบ Horizontal flow ที่มีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศ (Baffle plate) เหนือวัสดุ (HF+BF), และแบบ Horizontal flow ที่มีการออกแบบช่องทางการไหลของอากาศเป็นแบบสามเหลี่ยมและมีแผ่นบังคับการไหลของอากาศเหนือวัสดุ (HF+BF+TFP)
3) โมเดลแบบ VF, HF และ HF+BF มีช่องทางเข้าของอากาศเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 เซนติเมตร โดยแบบ VF อากาศจะไหลตั้งฉากกับถาดตะแกรงวางชีวมวล แบบ HF และแบบ HF+BF อากาศจะไหลขนานกับถาดตะแกรงวางชีวมวล แต่แบบ HF+BF มีแผ่นบังคับการไหลของอากาศวางเอียงทำมุมเหนือถาดตะแกรงวางชีวมวลโดยมีระยะห่างของแผ่นบังคับการไหลเหนือถาดชีวมวลด้านขาเข้าเท่ากับ 3 เซนติเมตร และด้านขาออกมีระยะห่างลดลงเหลือ 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.8 ก. ถึง ค. ตามลำดับ
4) สำหรับโมเดลแบบ HF+BF+TFP มีแผ่นบังคับการไหลเหนือถาดชีวมวลด้านขาเข้าห่างเป็นระยะเท่ากับ 3 เซนติเมตร และด้านขาออกมีระยะห่างลดลงเหลือ 1 เซนติเมตร ช่องทางเข้าของอากาศทำให้มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมมุมฉากมีด้านฐาน×สูง×ด้านตรงข้ามมุมฉาก เท่ากับ 3×6.5×7 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.8 ง.
5) กำหนดสภาวะในการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศภายในโมเดลทั้ง 4 แบบ ดังนี้

ก. ความเร็วของอากาศขาเข้าเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที

ข. อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

ค. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 50%

ง. จำลองในสภาวะคงที่ (Steady state)



รูปที่ 3.8 แบบจำจองรูปการไหลของอากาศ ก. VF ข. HF ค. HF+BF และ ง. HF+BF+TFP

3.3.2.2 ประเมินความสม่ำเสมอของการทำแห้งภายในห้องทำแห้ง

1) สร้างโมเดลกายภาพให้มีลักษณะและขนาดเหมือนกับรูปแบบโมเดลศึกษาทั้ง 4 แบบ

2) ติดตั้งพัดลมเข้ากับโมเดลกายภาพที่สร้างขึ้น ควบคุมความเร็วของลมด้วย Fan controller และวัดความเร็วลมด้วยเครื่อง Anemometer

3) ใช้สำลีเป็นชีวมวลจำลอง โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

ก. ใช้แผ่นสำลีขนาด 5×6 ตารางเซนติเมตร จำนวน 4 ชิ้น วางกระจายบนถาดใส่ชีวมวลเพื่อแทนตำแหน่ง 4 โซน ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ข. กำหนดให้มวลจำลองดังกล่าวมีค่าความชื้นภายในมวลเท่ากับ 5 กิโลกรัมน้ำต่อ กิโลกรัมมวลสำลี (ฐานมวลเปียก (Wet basis)) โดยเป็นผลจากการทดลอง เบื้องต้นซึ่งพบว่าเป็นค่าสูงสุดที่สำลีสามารถอุ้มน้ำไว้ได้โดยไม่ไหลเยิ้มออกมา และเพื่อลดระยะเวลาในการศึกษา เนื่องจากสำลีที่มีค่าความชื้นสูง ๆ สามารถ เห็นความแตกต่างของอัตราการทำแห้งตั้งแต่ในชั่วโมงที่หนึ่งชัดเจนกว่าสำลีที่มีค่าความชื้นในมวลต่ำ ๆ

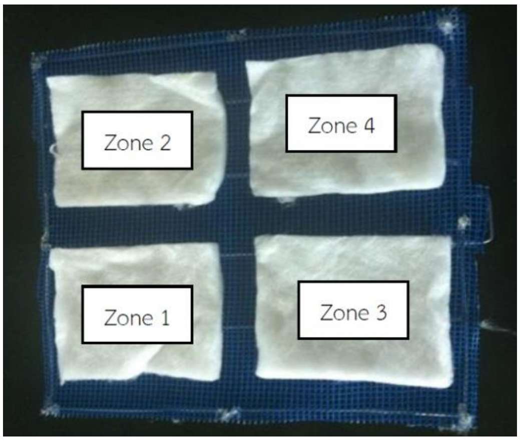
ค. เติมน้ำให้แก่สำลีในปริมาณที่คำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$\text{น้ำหนักน้ำที่เติม} = \text{น้ำหนักมวลแห้งของมวลจำลอง} \times 5 \qquad \textbf{(3.3)}$$

ง. เปิดเครื่องทดลองในภาวะเดียวกับภาวะที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม Solidworks เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จ. ประเมินและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ของแต่ละรูปแบบจากอัตราในการทำแห้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งแผ่นสำลีในถาดใส่ชีวมวลของปฏิกรณ์

3.3.3 การสร้างปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน

1) ออกแบบส่วนของเซลล์เมมเบรนให้มีขนาดของเมมเบรนเท่ากับ 12×12 ตารางเซนติเมตร

2) สร้างปฏิกรณ์ทำแห้งจากรูปแบบโมเดลที่เหมาะสมที่ได้จากผลการศึกษาด้วยโปรแกรม Solidworks ด้วยวัสดุแผ่นอะคริลิคใส 2 แบบ คือ TypeA และ TypeB ที่มีรูปแบบการไหลแตกต่างกัน ดังนี้

   ก. แบบ TypeA มีสมมุติฐานว่าอากาศส่วนใหญ่ภายในปฏิกรณ์ยังคงไหลวนอยู่ภายในปฏิกรณ์ โดยที่เมมเบรนยังคงทำการดึงไอน้ำออกจากอากาศชื้นที่ไหลวนอยู่ภายในปฏิกรณ์อยู่ตลอดเวลา

   ข. แบบ TypeB มีสมมุติฐานว่าอากาศจากภายนอกปฏิกรณ์จะถูกดึงไอน้ำออกก่อนที่จะให้ไหลผ่านวัสดุที่จะทำแห้งและอากาศชื้นจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

3.3.4 การศึกษาตัวแปรในกระบวนการทำแห้งของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน

1) ศึกษาอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณข้าวเปลือก โดยใช้ปริมาณข้าวเปลือกคงที่เท่ากับ 40 กรัม ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 23-24% และเพิ่มความเร็วของอากาศขาเข้าเป็น 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8 และ 3.2 เมตรต่อวินาที

2) หาอัตราในการทำแห้งและค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก ที่ค่าความเร็วต่าง ๆ ของอากาศขาเข้าในข้อ 1)

3) วัดค่าความชื้นของอากาศหมุนเวียนภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน

3.3.5 การศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน

1) ศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์ในเทอมของอัตราในการดึงน้ำออกจากข้าวเปลือกของเมมเบรนทั้ง 4 ชนิด

2) ศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์ในเทอมของค่าความชื้นต่ำสุดที่ได้หลังจากการทำแห้งของเมมเบรนทั้ง 4 ชนิด

3) ระยะเวลาในการทำแห้งข้าวเปลือก

4) ผลของการดำเนินตามหลักกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) ต่ออัตราการทำแห้งข้าวเปลือก

5) เปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกรณ์แบบ TypeA กับการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีอื่น ๆ

6) ศึกษาสมรรถนะของปฏิกรณ์แบบ TypeB

7) เปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeA และ TypeB โดยใช้ปริมาณข้าวเปลือกเท่ากับ 40 กรัม ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 25-26%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

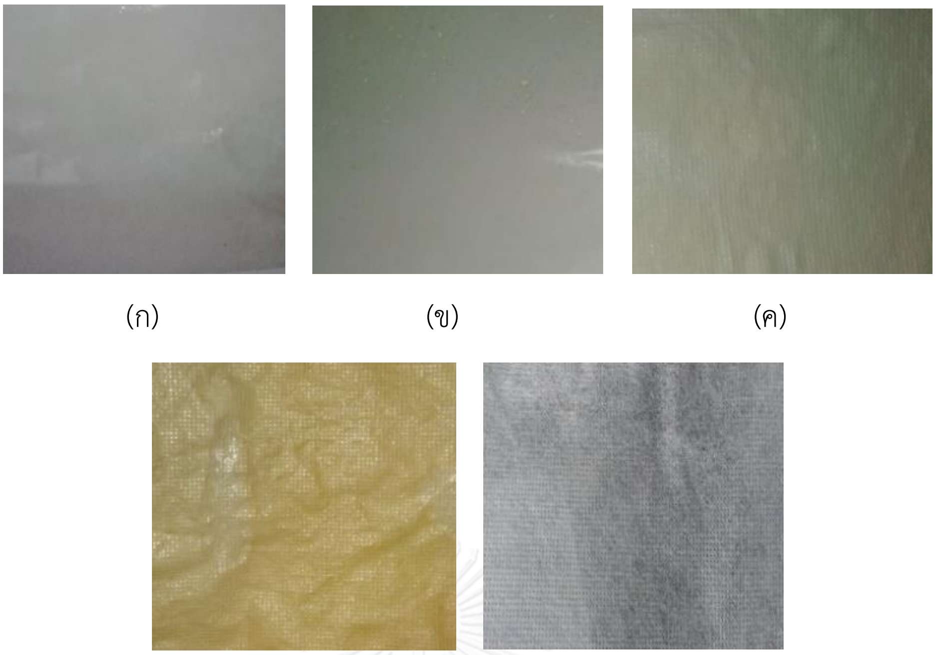
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรน

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรน

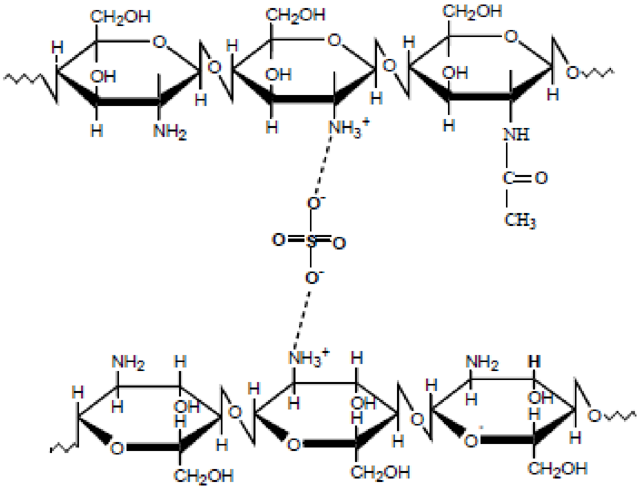
งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซานเชิงพาณิชย์ 4 ชนิด ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ได้แก่ แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก แบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ที่ไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตบนผ้าสปันปอนด์ที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยการเชื่อมขวางทำให้สีเข้มขึ้นทั้งแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมมเบรนแบบคอมโพสิตจะเห็นเนื้อเมมเบรนสีเหลืองเข้มชัดเจน โดยผ้าสปันปอนด์ที่ใช้เป็นตัวรองรับเพื่อเพิ่มแข็งแรงให้กับแผ่นเมมเบรนมีสีขาว นอกจากนั้นการเชื่อมขวางทำให้เมมเบรนแข็งแรงขึ้น (ไม่ฉีกขาดง่าย) และหนาขึ้นซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนกับเมมเบรนแบบเนื้อแน่น ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์คนละสายโซ่ด้วยกรดซัลฟิวริกที่หมู่เอมีนดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยเมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวางและมีการเชื่อมขวางมีความหนาเท่ากับ 39.1±7.1 และ 49.6±5.2 ไมครอน ตามลำดับ และเมมเบรนแบบคอมโพสิตที่ไม่มีการเชื่อมขวางและที่มีการเชื่อมขวางมีความหนาเท่ากับ 168.4±17.0 และ 179.2±20.0 ไมครอน ตามลำดับ โดยผ้าสปันปอนด์มีความหนาเท่ากับ 136.8±11.4 ไมครอน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

Chulalongkorn University



(จ)

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน
(ก) แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง (ข) แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง (ค) แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง
(ง) แบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง (จ) ผ้าสปันปอนด์



รูปที่ 4.2 โครงสร้างเชื่อมขวางแบบไอออนิกของไคโตซานด้วยกรดซัลฟิวริก [25]

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาของเมมเบรนไคโตซาน

ชนิดของเมมเบรนไคโตซาน	ความหนา (μm)
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	39.1±7.1
แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง	49.6±5.2
แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง	168.4±17.0
แบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง	179.2±20.0
ผ้าสปันปอนด์	136.8±11.4

4.1.2 ผลการศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซาน

การศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนสามารถหาได้จากค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากโมเลกุลน้ำที่แพร่ผ่านเมมเบรนในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปของไอน้ำจึงได้วัดค่าฟลักซ์ไอน้ำด้วย แต่เนื่องจากการวัดค่าฟลักซ์ไอน้ำตามหลักของกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) มีค่าต่ำมาก จึงเปลี่ยนไปวัดฟลักซ์ไอน้ำตามหลักของกระบวนการเพอร์แวพอเรชัน (Pervaporation) แทน เนื่องจากทั้งสองกระบวนการมีความคล้ายกันต่างกันที่ในกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันจะทำให้น้ำเปลี่ยนเฟสก่อนสัมผัสกับผิวเมมเบรน แต่ในกระบวนการเพอร์แวพอเรชันน้ำจะเกิดการเปลี่ยนเฟส ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในเมมเบรนหรือที่ผิวของเมมเบรนด้านสารป้อนหรือที่ผิวของเมมเบรนด้านขาออกดังกล่าวในบทที่ 3 ได้ผลการศึกษา ดังนี้

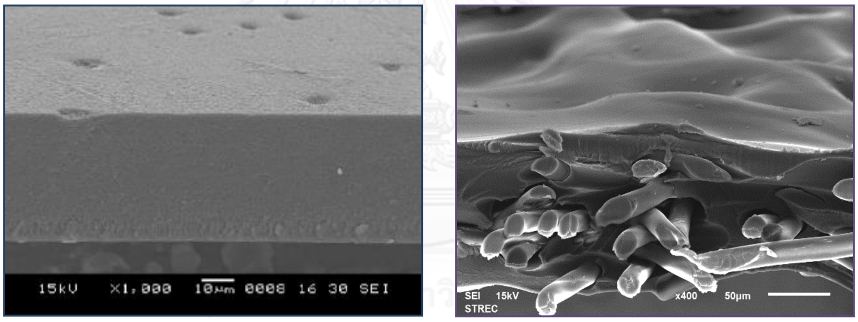
4.1.2.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำบริสุทธิ์

จากผลการทดลองพบว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่ไม่มีการเชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตที่ไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตที่มีการเชื่อมขวาง มีค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์เท่ากับ 135.7±7.3, 102.4±11.8, 82.7±0.1 และ 73.3±2.6% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีค่าการดูดซับน้ำสูงกว่าเมมเบรนแบบคอมโพสิต อธิบายได้ว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีชั้นเนื้อของพอลิเมอร์ไคโตซานซึ่งเป็นส่วนดูดซับน้ำไว้หนากว่าแบบคอมโพสิต โดยในเมมเบรนแบบคอมโพสิตมีเนื้อพอลิเมอร์ไคโตซานเพียงบาง ๆ เคลือบอยู่บนผิวของผ้าสปันปอนด์ที่เป็นรูพรุนและสอดแทรกไประหว่างเส้นใยของผ้าสปันปอนด์จนถึงผิวด้านล่างของผ้าดังสามารถเห็นได้จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 4.3 [26] และเหตุผลที่ทำให้เมมเบรนไม่มีการเชื่อมขวางมีค่าการดูดซับน้ำมากกว่าเมมเบรนมีการเชื่อมขวางทั้งแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิต ทั้ง ๆที่การเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกควรทำให้เมมเบรนมีความชอบน้ำมากขึ้นเนื่องจากความ

เป็นกรดที่แรงของหมู่ซัลเฟต คาดว่าเนื่องจากการเชื่อมขวางแบบไอออนิกระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ไคโตซานทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันไว้ของสายโซ่อย่างแข็งแรงทำให้การบวมตัวได้ของเมมเบรน (Swollen) จากการดูดซับน้ำไว้ลดลง

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์)
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	135.7±7.3
แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง	102.4±11.8
แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง	82.7±0.1
แบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง	73.3±2.6



Chulalongkorn University

ก. ข.

รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของเมมเบรนไคโตซาน [26]

ก. แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง กำลังขยาย 1000 เท่า

ข. แบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง กำลังขยาย 400 เท่า

4.1.2.2 ค่าฟลักซ์จากการแพร่ผ่านไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ค่าฟลักซ์จากการแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์ (Pure water vapor flux) ภายใต้กระบวนการเพอร์แวพอเรชันของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวางเท่ากับ 120.6±18.4, 205.8±13.5, 364.6±22.2 และ 608.7±99.4 กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าเป็นไป

อย่างที่คาดหวังไว้คือ เมมเบรนที่มีความชอบน้ำมากกว่าจะให้ค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์มากกว่า โดยเรียงลำดับความชอบน้ำของเมมเบรนจากมากไปน้อยได้ดังนี้ เมมเบรนแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง โดยในการทดสอบนี้ฟลักซ์ไอน้ำมีปริมาณไม่พอที่จะทำให้เมมเบรนบวมตัวได้ ทำให้การแพร่ผ่านของไอน้ำเกิดขึ้นจากสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรน และในกรณีของเมมเบรนแบบคอมโพสิตซึ่งให้ค่าฟลักซ์ไอน้ำสูงกว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่น อธิบายได้ว่าผ้าสปันปอนด์ที่เป็นตัวรองรับมีโครงสร้างเป็นรูพรุนทำให้ไอน้ำที่แพร่ผ่านเนื้อเมมเบรนออกมาแล้วสามารถผ่านรูของผ้าสปันปอนด์ออกไปได้เลยประกอบกับชั้นเนื้อเมมเบรนบนผ้าสปันปอนด์มีความบางกว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมากทำให้ความต้านทานในการถ่ายโอนมวลในเมมเบรนแบบคอมโพสิตต่ำกว่าในเมมเบรนแบบเนื้อแน่น

ตารางที่ 4.3 ค่าฟลักซ์ของไอน้ำบริสุทธิ์ผ่านเมมเบรนไคโตซาน

ชนิดของเมมเบรน	**ฟลักซ์การแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์ (กรัม/ตารางเมตร/ชั่วโมง)**
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	120.6±18.4
แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง	205.8±13.5
แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง	364.6±22.2
แบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง	608.7±99.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.3 ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นทั้ง 2 ชนิด ตามมาตรฐาน D882 พบว่าเมมเบรนแบบเชื่อมขวางมีความแข็งแรงกว่าเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวาง โดยค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางและของแบบเชื่อมขวางมีค่าเท่ากับ 55.8±2.4 และ 65.0±2.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สอดคล้องกับค่ามอดูลัสของยัง (Young’s modulus) ซึ่งเป็นค่าบอกระดับความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุหรือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้น (Stress) ต่อความเครียด (Stain) ซึ่งในกรณีนี้คือความสัมพันธ์ของความเค้นต่อความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ขณะที่ค่าความทนต่อแรงดึงคือค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนที่วัสดุจะขาดออกจากกันจาก Tensile Force โดย

เมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางและของแบบเชื่อมขวางมีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 1041.6±114.6 และ 1583.2±142.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แต่เมมเบรนแบบเชื่อมขวางมีความเหนียวน้อยกว่าเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดออก (%Elongation) ที่มีค่าเท่ากับ 4.1±0.4 และ 5.4±0.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตทั้ง 2 ชนิด ตามมาตรฐาน D638 ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับเมมเบรนแบบเนื้อแน่น โดยค่ามอดูลัสของยังของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางน้อยกว่าของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางซึ่งเท่ากับ 159.9±20.6 และ 240.6±44.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แต่เมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางมีความเหนียวมากกว่าเมมเบรนแบบเชื่อมขวางจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดออกซึ่งเท่ากับ 12.9±1.2 และ 8.1±0.8 ตามลำดับ เป็นเพราะว่าเนื้อไคโตซานที่เคลือบอยู่บนผ้าสปันปอนด์ของเมมเบรนแบบคอมโพสิตทั้ง 2 ชนิดทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นกว่าผ้าสปันปอนด์เปล่า แต่ไม่เห็นความแตกต่างชัดเจนของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดออกจากเมมเบรนแบบเนื้อแน่น เนื่องจากผลของความเหนียวของผ้าสปันปอนด์ช่วยลดความเค้นจากแรงดึง

การทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนมีประโยชน์ในแง่การนำเมมเบรนไปใช้ในภาวะสุญญากาศเนื่องจากเมมเบรนต้องถูกตรึงด้วยแรงดึงไว้กับเซลล์เมมเบรนอยู่ตลอดเวลา เมมเบรนที่มีความสามารถทนต่อแรงดึง จึงไม่เกิดการฉีกขาดในระหว่างการดำเนินงาน

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นตามมาตรฐาน D882

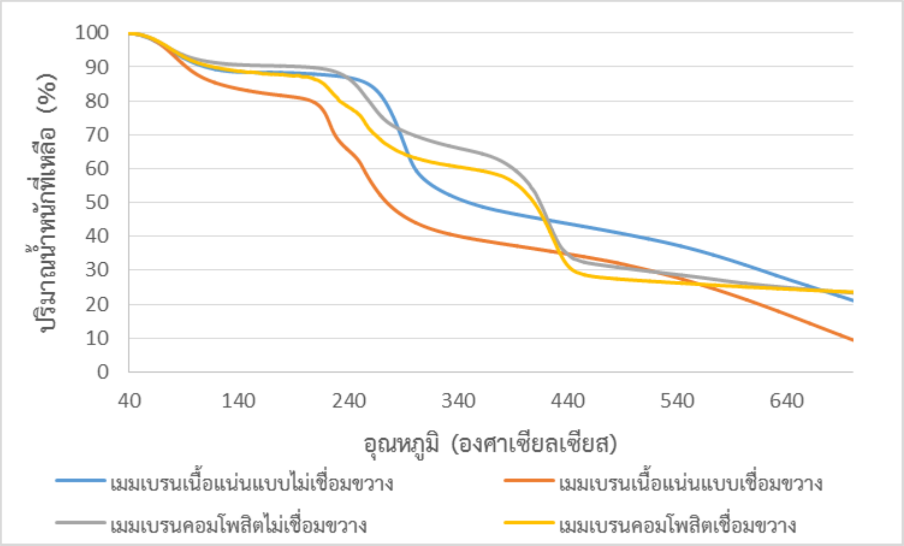
ชนิดเมมเบรน	**ความหนา (μm)**	**ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)**	**มอดูลัสของยัง (MPa)**	**% การยืดออก**
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	23.3±1.0	55.8±2.4	1041.6±114.6	5.4±0.5
แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง	38.3±4.3	65.0±2.6	1583.2±142.5	4.1±0.4

ตารางที่ 4.5 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตตามมาตรฐาน D638

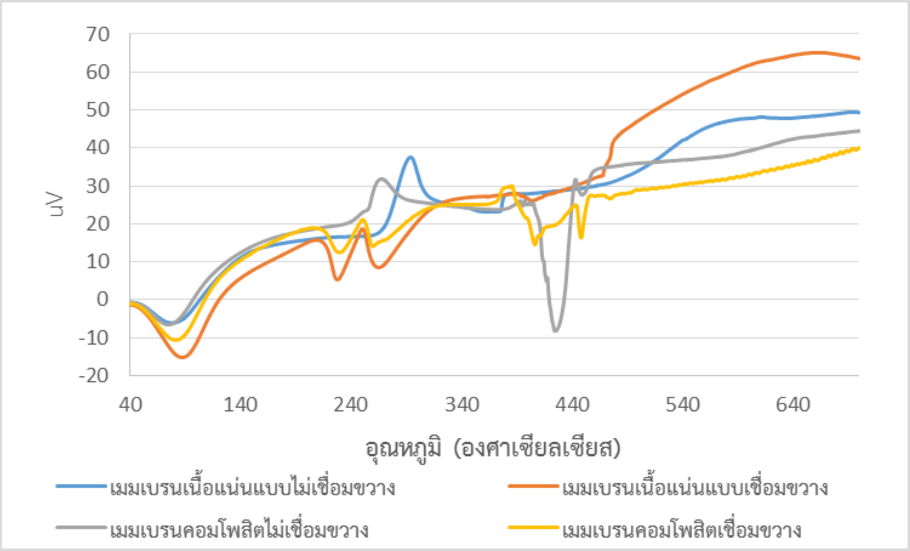
ชนิดเมมเบรน	ความหนา (μm)	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)	มอดูลัสของยัง (MPa)	% การยืดออก
แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง	160.1±13.9	20.5±3.2	159.9±20.6	12.9±1.2
แบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง	177.1±17.9	19.5±4.3	240.6±44.9	8.1±0.8
ผ้าสปันปอนด์	132.9±18.1	10.7±0.7	43.9±5.3	24.6±1.9

4.1.4 สมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนไคโตซาน

ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนไคโตซานด้วยเครื่อง Thermal analysis: TG/DTA ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การสูญเสียมวลทางความร้อนของเมมเบรน พบว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่นจะแสดงกราฟการสลายตัว 3 ขั้นตอน แต่เมมเบรนแบบคอมโพสิตจะแสดงกราฟการสลายตัว 4 ขั้นตอน จากรูปที่ 4.4 การสลายตัวในช่วงที่หนึ่งที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำหนักจากการระเหยของโมเลกุลน้ำในเมมเบรน โดยเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางแสดงการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือเมมเบรนแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง แสดงว่าการเชื่อมขวางทำให้เมมเบรนมีความชอบน้ำมากขึ้นทำให้สามารถดูดซับไอน้ำในอากาศไว้ได้มากกว่าแบบไม่เชื่อมขวาง จึงทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงนี้มากกว่าแบบไม่เชื่อมขวาง ซึ่งผลการศึกษาการสูญเสียมวลทางความร้อนของเมมเบรนในช่วงนี้จึงมีความสอดคล้องกันกับความชอบน้ำของเมมเบรนในเทอมของค่าฟลักซ์จากการแพร่ผ่านไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน หลังจากนั้นเมมเบรนทั้ง 4 ชนิดแสดงการสูญเสียน้ำหนักในช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 240 – 310 องศาเซลเซียส จากการสลายตัวของโครงสร้างไคโตซาน [27-29] โดยเมมเบรนมีการเชื่อมขวางทั้งแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิตมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าในช่วงต้นของการสลายตัวในช่วงที่สองเนื่องจากการสูญเสียของหมู่ซัลเฟตในโครงสร้างก่อนที่โครงสร้างไคโตซานจะสลายตัวโดยสมบูรณ์ ในช่วงที่สามที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส แต่เมมเบรนแบบคอมโพสิตยังคงมีน้ำหนักคงเหลืออยู่อีก 25% แม้จะเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 640 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำหนักส่วนของผ้าสปันปอนด์



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.4 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของเมมเบรนไคโตซาน

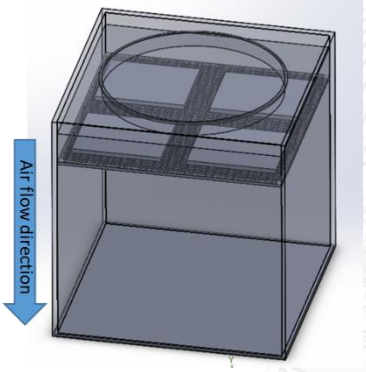
(ก.) TGA thermogram

(ข.) DTA thermogram

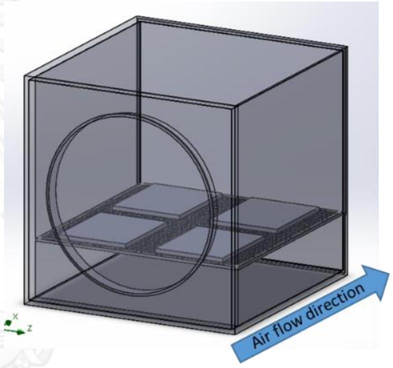
4.2 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศด้วยโปรแกรม Solidworks

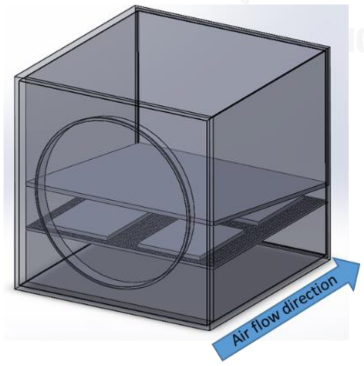
ลักษณะโมเดลที่ศึกษา 4 แบบ ได้แก่ รูปแบบที่มีการไหลของอากาศจากทางด้านบน (Vertical flow (VF)), รูปแบบที่มีการไหลของอากาศจากทางด้านข้าง (Horizontal flow (HF)), รูปแบบที่มีการไหลของอากาศจากทางด้านข้างและมีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเหนือวัสดุเป็นแบบสามเหลี่ยม (Horizontal flow with baffle (HF+BF)) และรูปแบบที่มีการไหลของอากาศจากทางด้านข้างที่มีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเหนือวัสดุเป็นแบบสามเหลี่ยมและมีการออกแบบช่องทางการไหลของอากาศขาเข้าเป็นแบบสามเหลี่ยม (Horizontal flow with baffle plate and triangle air flow path (HF+BF+TFP)) แสดงในรูปที่ 4.5(ก), (ข), (ค), และ(ง) ตามลำดับ



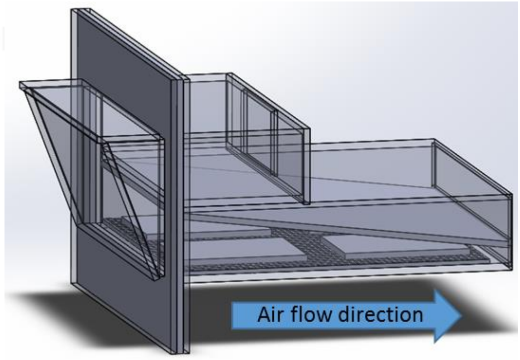
(ก)



(ข)



(ค)

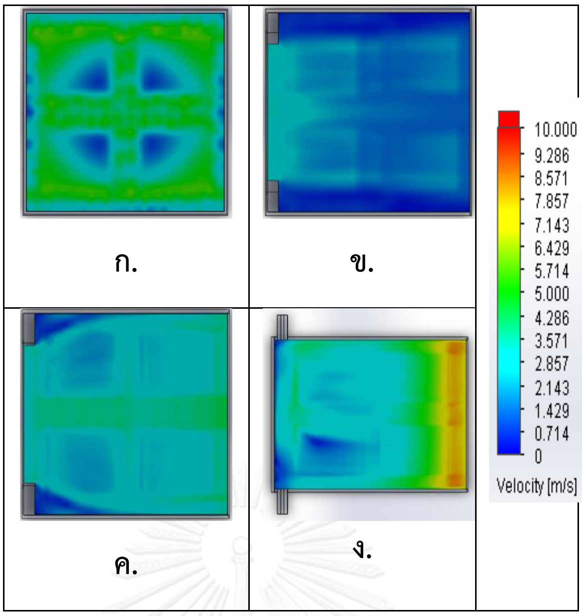


(ง)

รูปที่ 4.5 โมเดล 3 มิติที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศ
(ก) โมเดลที่ให้รูปแบบการไหลแบบ VF (ข) โมเดลที่ให้รูปแบบการไหลแบบ HF
(ค) โมเดลที่ให้รูปแบบการไหลแบบ HF+BF (ง) โมเดลที่ให้รูปแบบการไหลแบบ HF+BF+TFP

ผลการวิเคราะห์ความเร็วและการกระจายตัวของอากาศที่เกิดขึ้นภายในปฏิกรณ์ทั้ง 4 แบบ แสดง ดังรูปที่ 4.6 พบว่าแบบ VF ให้ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุไม่สม่ำเสมอแต่มีความสมมาตร เนื่องจากมีการให้อากาศไหลปะทะกับวัสดุ โดยรูปแบบนี้ให้ความเร็วของอากาศที่ผ่านวัสดุสูงสุดเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที ในรูปแบบ HF ซึ่งเป็นการให้อากาศไหลผ่านเข้าทางด้านข้าง ผลการจำลองพบว่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับรูปแบบ VF และความเร็วของอากาศมีค่าลดลงตามระยะทางที่ห่างจากทางเข้าเข้าไปด้านใน ทำให้ความสามารถในการทำแห้งลดลง โดยรูปแบบนี้ให้ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุสูงสุดเท่ากับ 2.2 เมตรต่อวินาที ในรูปแบบ HF+BF ซึ่งมีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศ (Baffle) เอียงทำมุมเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือถาดวัสดุ โดยมีระยะห่างของแผ่นบังคับการไหลเหนือถาดวัสดุด้านขาเข้าเท่ากับ 3 เซนติเมตร และด้านขาออกมีระยะห่างลดลงเหลือ 1 เซนติเมตร ทำให้ได้ความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.6 เมตรต่อวินาที นอกจากนั้นยังพบว่ามีการกระจายของอากาศออกไปทางด้านข้างดีขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบ HF ซึ่งไม่มีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศ และในรูปแบบ HF+BF+TFP ซึ่งนอกจากภายในห้องทำแห้งมีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเอียงทำมุมเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือถาดวัสดุเช่นเดียวกับในรูปแบบ HF+BF แล้วยังทำให้ปากทางเข้าของอากาศมีลักษณะเป็นแบบสามเหลี่ยมมุมฉากอีกด้วย ทำให้อากาศไหลไปในช่องทางที่กำหนดดีขึ้นทำให้มีอากาศไหลเข้าถึงทุก ๆ ส่วนของห้องทำแห้งภายในปฏิกรณ์โดยมีความเร็วของอากาศผ่านวัสดุสูงถึง 8 เมตรต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศภายในปฏิกรณ์แบบ ก. VF ข. HF ค. HF+BF และ ง. HF+BF+TFP

4.2.2 ผลการประเมินความสม่ำเสมอของการทำแห้งภายในห้องทำแห้งด้วยโมเดลกายภาพ

โมเดลกายภาพที่สร้างขึ้นให้มีลักษณะและขนาดเหมือนกับรูปแบบโมเดลศึกษาทั้ง 4 แบบในการศึกษาความสม่ำเสมอของอัตราในการทำแห้งแสดงในรูปที่ 4.7 โดยที่ถาดวางวัสดุจะถูกแบ่งโซนในการทำแห้งออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน เพื่อวางแผ่นสำลี (แทนชีวมวล) กระจายบนถาดวางวัสดุแทนตำแหน่ง 4 โซน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทำให้แผ่นสำลีชุ่มน้ำมีความชื้นเท่ากับ 5 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลสำลี เพื่อการศึกษาความสม่ำเสมอของอัตราการทำแห้งของแผ่นสำลี ณ แต่ละโซนของแต่ละรูปแบบการไหลของอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าอัตราการทำแห้งในแต่ละชั่วโมงของมวลสำลีมีความสอดคล้องกับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุ โดยรูปแบบ VF มีอัตราการทำแห้งในแต่ละโซนใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.65 – 0.67 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลสำลีต่อชั่วโมง สอดคล้องกับความสมมาตรของอากาศที่ปะทะกับวัสดุ ในรูปแบบ HF พบว่าอัตราการทำแห้งในโซนที่ 1 และ 2 มีค่าสูงสุดใกล้เคียงกัน (ประมาณ 0.61 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลสำลีต่อชั่วโมง) เนื่องจากอยู่ใกล้กับทางขาเข้าของอากาศและมีค่าลดลงในโซนที่ 3 (0.53 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลสำลีต่อชั่วโมง) และโซนที่ 4 (0.52 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลสำลีต่อชั่วโมง) ซึ่งใกล้กับทางขาออกของอากาศสอดคล้อง

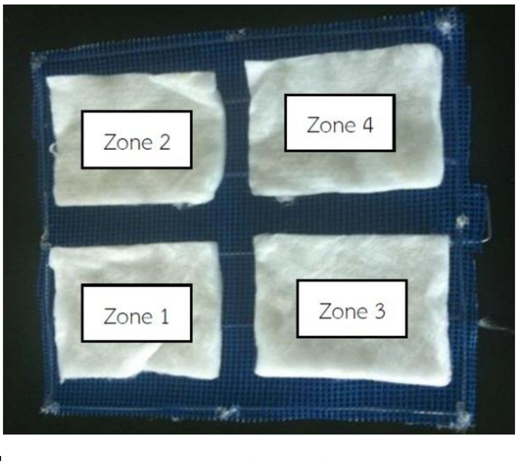
กับโพรไฟล์ความเร็วของอากาศซึ่งมีค่าสูงกว่าในโซนที่อยู่ใกล้กับทางขาเข้าและต่ำลงในโซนที่อยู่ใกล้กับทางขาออกของอากาศ (รูปที่ 4.6ข) ในรูปแบบ HF+BF พบว่าการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเอียงทำมุมเป็นแบบสามเหลี่ยมเหนือถาดวางวัสดุทำให้ได้อัตราการทำแห้งในแต่ละโซนสม่ำเสมอขึ้นเนื่องจากความเร็วของอากาศทางขาออกเพิ่มขึ้นจึงทำให้อัตราการทำแห้งในโซนที่ 3 และ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น และในรูปแบบ HF+BF+TFP ซึ่งมีโพรไฟล์ความเร็วของอากาศทางขาออกสูงกว่าทำให้ได้อัตราการทำแห้งในแต่ละโซนสม่ำเสมอขึ้น

งานวิจัยนี้จึงสร้างปฏิกรณ์เมมเบรนที่ให้รูปแบบการไหลของอากาศเป็นแบบ HF+BF+TFP เนื่องจากรูปแบบนี้ทำให้ได้การกระจายตัวของอากาศและอัตราการทำแห้งของชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่สม่ำเสมอในทุก ๆ ตำแหน่ง

(ก) (ข)

รูปที่ 4.7 โมเดลกายภาพที่ใช้ประเมินความสม่ำเสมอของอัตราในการทำแห้ง
(ก) โมเดล VF, HF และ HF+BF (ข) โมเดล HF+BF+TFP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



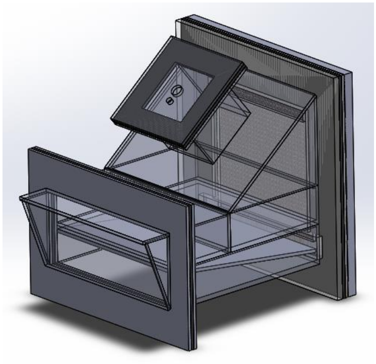
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งแผ่นสำลีในถาดใส่ชีวมวลของปฏิกรณ์

ตารางที่ 4.6 อัตราการทำแห้งของแผ่นสำลีในปฏิกรณ์

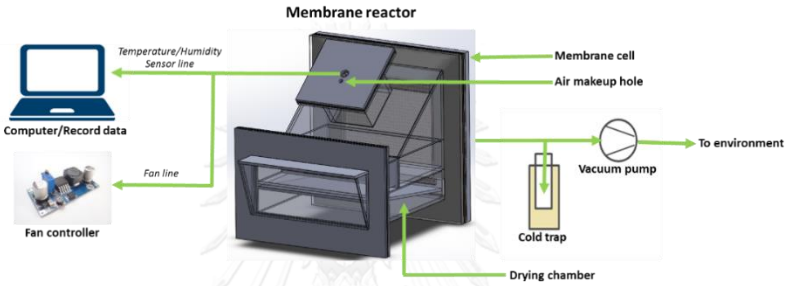
รูปแบบการไหล	อัตราการทำแห้งในแต่ละโซน (กก.น้ำ/กก.มวลสำลี/ชั่วโมง)			
	โซนที่ 1	โซนที่ 2	โซนที่ 3	โซนที่ 4
VF	0.6546 ± 0.0239	0.6372 ± 0.0760	0.6496 ± 0.1096	0.6682 ± 0.0772
HF 0^{o}	0.6065 ± 0.0814	0.6136 ± 0.0679	0.5271 ± 0.0280	0.5234 ± 0.0330
HF+BF	0.7262 ± 0.0186	0.7171 ± 0.1060	0.7028 ± 0.0387	0.6601 ± 0.0708
HF+BF+TFP	0.7379 ± 0.0729	0.6721 ± 0.0717	0.6681 ± 0.0314	0.6501 ± 0.0096

4.3 ลักษณะปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนของงานวิจัยนี้

ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนของห้องทำแห้ง (Drying chamber) ตามแบบโมเดลที่ให้รูปแบบการไหลของอากาศเป็นแบบ HF+BF+TFP และส่วนของเซลล์เมมเบรนที่ประกอบอยู่ทางด้านหลังของห้องทำแห้ง (ด้านขาออกของอากาศ) โดยทั้งสองส่วนยึดติดกันด้วยหน้าแปลน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่วนของเซลล์เมมเบรนประกอบด้วยแผ่นเมมเบรนวางบนแผ่นอะคริลิกเจาะรู หากเป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่นจะใช้ผ้าสปอนด์ปอนด์เป็นตัวรองรับ (Support) แผ่นเมมเบรนก่อนวางบนแผ่นอะคริลิกเจาะรู แต่หากเป็นเมมเบรนแบบคอมโพสิตสามารถวางบนแผ่นอะคริลิกเจาะรูได้โดยตรง ด้านขาออกจากเซลล์เมมเบรนต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็นที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากมีการสูญเสียอากาศบางส่วนที่แพร่ผ่านเมมเบรนออกไปจึงให้มีช่องเติมอากาศ (Makeup air) เหนือส่วนของห้องทำแห้ง และมีช่องเสียบตัวตรวจวัดความเร็วของอากาศเพื่อส่งสัญญาณไปควบคุมพัดลมด้วย



รูปที่ 4.9 ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนต้นแบบ



รูปที่ 4.10 ชุดปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน

ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในงานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบให้มีรูปแบบการไหลของอากาศเป็น 2 ลักษณะ คือแบบ TypeA และแบบ TypeB โดยในแบบ TypeA มีสมมติฐานของเส้นทางการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังนี้

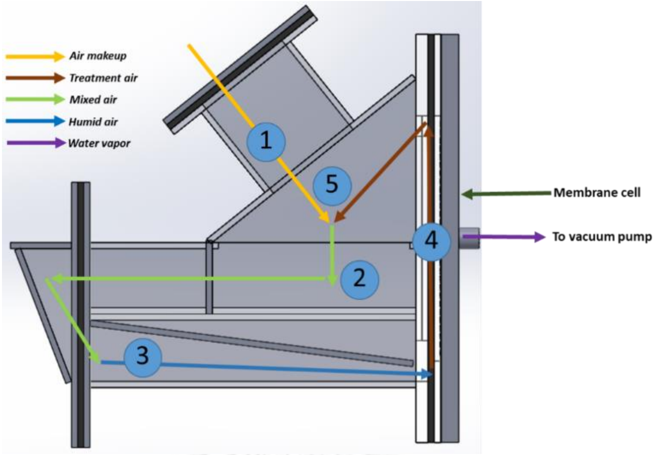
1) เมื่อเปิดพัดลม อากาศบางส่วนจะถูกดูดจากภายนอกผ่านทางช่องเติมอากาศเข้าสู่ภายในห้องทำแห้ง (เส้นสีเหลือง 1)

2) อากาศที่ถูกเติมผ่านทางช่องเติมอากาศจะเข้าผสมกับอากาศที่ผ่านผิวหน้าของเมมเบรนมาแล้วเป็นมวลอากาศที่จะถูกพัดลมผลักให้ไหลผ่านทางช่องทางเข้าแบบสามเหลี่ยม (เส้นสีเขียว 2) และไหลผ่านผิวหน้าของชีวมวลในถาด (เส้นสีน้ำเงิน 3) ซึ่งทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยออกมาเข้าไปในมวลอากาศ

3) อากาศชื้นที่ไหลผ่านผิวหน้าของมวลจำลองในถาดแล้วจะไหลผ่านผิวหน้าของเมมเบรน (เส้นสีน้ำตาล 4)

4) มวลอากาศชื้นจะแพร่ผ่านเมมเบรนเนื่องจากแรงขับดัน (Driving force) จากปั๊มสุญญากาศและไอน้ำในมวลอากาศชื้นจะถูกควบแน่นในอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็น

5) มวลอากาศที่ผ่านผิวหน้าของเมมเบรนแล้วจะเข้าผสมกับมวลอากาศที่ถูกเติมเสริมเข้ามาทางช่องเติมอากาศเป็นวัฏจักรรอบต่อไป



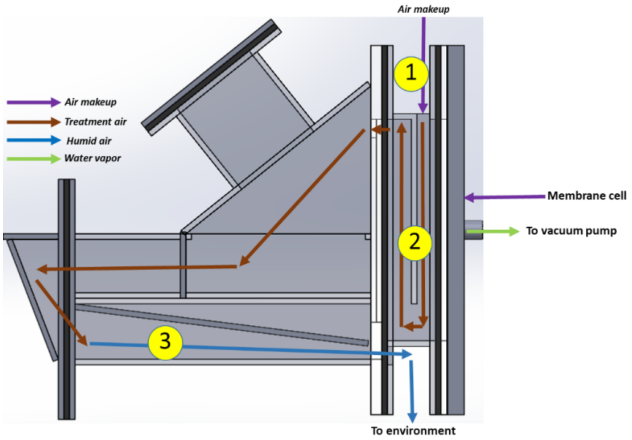
รูปที่ 4.11 การไหลเวียนของอากาศภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeA

เพื่อให้ไอน้ำในชีวมวลระเหยออกมามาก ๆ จึงมีสมมติฐานว่าไอน้ำในชีวมวลสามารถระเหยเข้าไปในมวลอากาศที่พัดผ่านได้มากขึ้นหากทำให้มวลอากาศนั้นมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ๆ จึงประกอบปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeB ขึ้นเพื่อพิสูจน์สมมติฐานนี้ โดยเปลี่ยนช่องทางขาเข้าของอากาศให้อยู่ใกล้กับหน้าแปลนของเมมเบรนเพื่อให้พัดผ่านผิวหน้าของเมมเบรนและเกิดการถ่ายโอนของมวลอากาศชื้นออกจากเมมเบรนไปก่อนเข้าสู่ห้องทำแห้งตามเส้นทางการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ดังนี้

1) เมื่อเปิดพัดลมมวลอากาศจากภายนอก (หมายเลข 1) จะถูกดูดผ่านผิวหน้าของเมมเบรน (เส้นสีน้ำตาล 2) เข้าสู่ห้องทำแห้ง

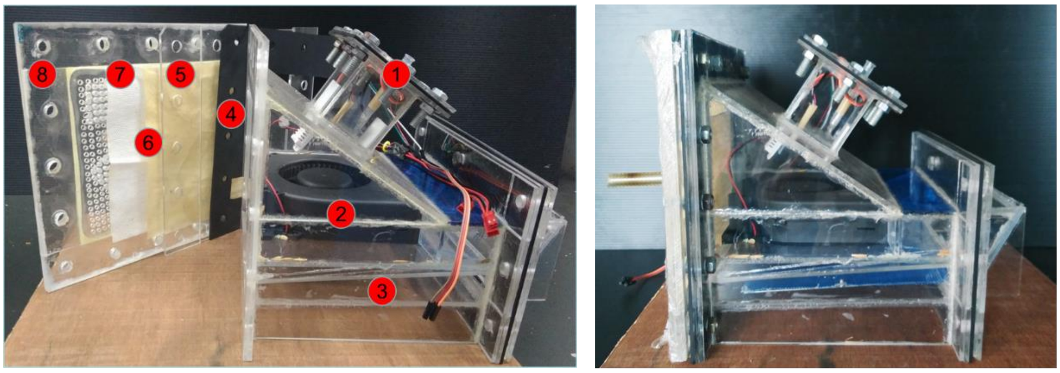
2) มวลอากาศชื้นจะแพร่ผ่านเมมเบรนเนื่องจากแรงขับดัน (Driving force) จากปั๊มสุญญากาศ และไอน้ำในมวลอากาศชื้นจะถูกควบแน่นในอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็น

3) อากาศแห้งไหลผ่านผิวหน้าของชีวมวลในถาด (เส้นสีน้ำเงิน 3) แล้วออกจากปฏิกรณ์ไปโดยไม่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 4.12 การไหลเวียนของอากาศภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeB

อย่างไรก็ตามปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนต้นแบบที่จะใช้ในการศึกษากระบวนการทำแห้งข้าวเปลือกในหัวข้อต่อจากนี้ได้ถูกสร้างขึ้นตามแบบ TypeA ซึ่งเป็นแบบที่ได้ออกแบบไว้แต่แรกด้วยโปรแกรม Solidworks และได้วิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศแล้วในหัวข้อ 4.2 ข้างต้น โดยใช้วัสดุแผ่นอะคริริคใส หนา 3 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ดังนี้ ช่องทางเข้าของอากาศเสริมและช่องสำหรับเสียบอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น (หมายเลข 1) พัดลมแบบเป่า (Centrifugal fan) เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในปฏิกรณ์ (หมายเลข 2) ห้องทำแห้ง (หมายเลข 3) ยางกันรั่วของอากาศ (หมายเลข 4) แผ่นประกบเมมเบรน (Membrane frame) (หมายเลข 5) เมมเบรนไคโตซาน (หมายเลข 6) ตัวรองรับเมมเบรน (Membrane support) (หมายเลข 7) และเซลล์หน้าแปลนเมมเบรน (Membrane plate) (หมายเลข 8)



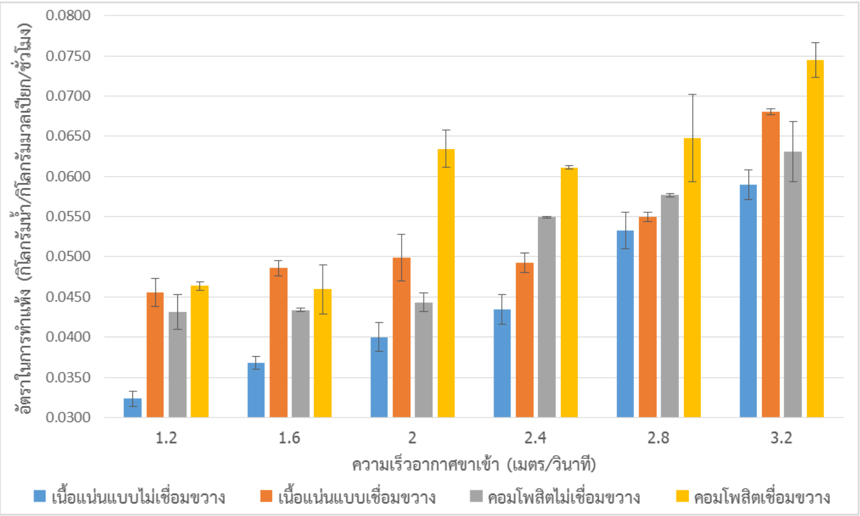
รูปที่ 4.13 ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน
(ซ้ายมือ) ส่วนประกอบของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน
(ขวามือ) ชุดปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนที่ประกอบเสร็จ

4.4 ผลการศึกษากระบวนการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeA

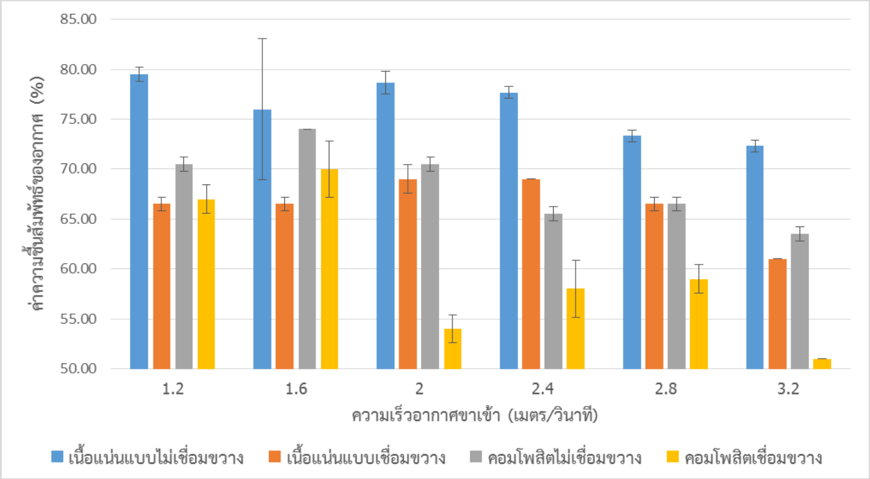
4.4.1 ผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณข้าวเปลือก

รูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศขาเข้ากับอัตราการทำแห้งข้าวเปลือกที่เวลาในการทำแห้ง 1 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศขาเข้าจะทำให้อัตราการทำแห้งข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเร็วเท่ากับ 3.2 เมตรต่อวินาที (ค่าความสามารถสูงสุดของพัดลม) จะให้อัตราการทำแห้งสูงสุดในทุก ๆ ชนิดของเมมเบรนที่ใช้ โดยปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนที่ใช้เมมเบรนแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวางจะให้อัตราการทำแห้งข้าวเปลือกสูงสุดเท่ากับ 0.0745±0.0022 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ซึ่งมากกว่าปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวางที่มีอัตราการทำแห้งเท่ากับ 0.0680±0.0004, 0.0631±0.0038 และ 0.0589±0.0018 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศขาเข้า เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของอากาศทำให้อัตราการระเหยของน้ำออกจากข้าวเปลือกสามารถเกิดได้มากขึ้น ทำให้มีเกรเดียนท์ของความเข้มข้นคร่อมเมมเบรนสูงขึ้นเป็นการเพิ่มแรงขับดันในการถ่ายโอนมวลผ่านเมมเบรน จึงส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์มีค่าลดลง จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าค่าความเร็วขาเข้าของอากาศที่ 3.2 เมตรต่อวินาที เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการศึกษาสมรรถนะของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในหัวข้อต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศขาเข้ากับอัตราการทำแห้งข้าวเปลือก



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศขาเข้ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์

4.4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน

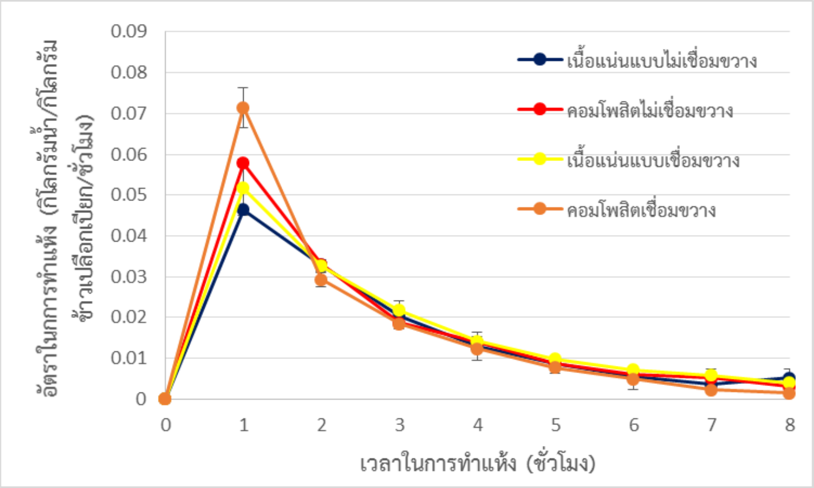
4.4.2.1 อัตราในการดึงน้ำออกจากข้าวเปลือก

ผลการศึกษาสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกปริมาณ 40 กรัมที่มีความชื้นเริ่มต้น 23-24% ของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนไคโตซานแบบ TypeA ที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 3.2 เมตรต่อวินาที ที่ภาวะอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าปฏิกรณ์เมมเบรนสามารถดึงน้ำออกได้สูงสุดภายในเวลา 1 ชั่วโมง โดยปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง สามารถดึงน้ำออกได้เท่ากับ 0.0464±0.0004, 0.0517±0.0067, 0.0578±0.0009 และ 0.0715±0.0049 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ตามลำดับ มีลำดับอัตราการทำแห้งสอดคล้องกับค่าการแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์ เรียงจากมากไปน้อยตามลำดับคือ เมมเบรนแบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง ทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกจากปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนดังแสดงในรูปที่ 4.18 ในเวลา 1 ชั่วโมง ลดลงจาก 22 – 23% เหลือ 17.6±0.0, 17.1±0.7, 16.7±0.5 และ 15.7±0.9% จากปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางตามลำดับ แต่อัตราการทำแห้งในปฏิกรณ์ไม่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับระยะเวลาในการทำแห้ง อธิบายได้ว่าในช่วงแรกของการทำแห้งปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกมีค่าสูงจึงทำให้มีไอน้ำระเหยออกจากข้าวเปลือกในปริมาณที่สูงเช่นกัน เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกมีค่าที่ลดลงทำให้ความชื้นที่อยู่ส่วนลึกลงไปในข้าวเปลือก

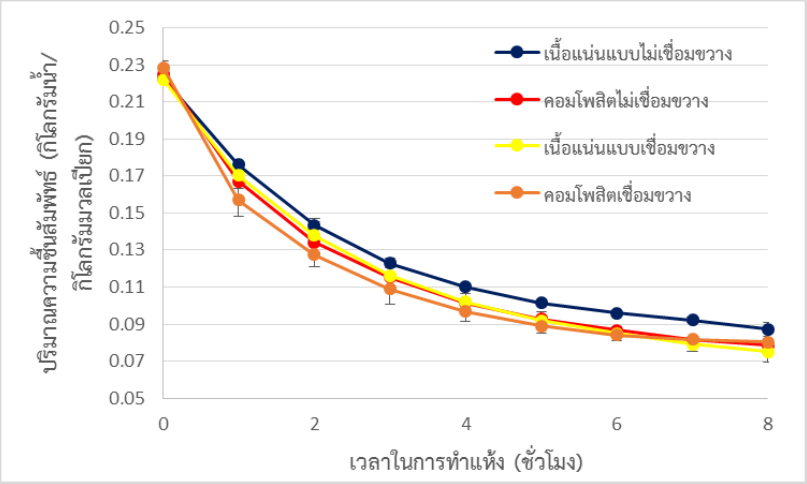
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นั้นต้องแพร่ออกมาที่ผิวของข้าวเปลือกซึ่งต้องผ่านชั้นต่าง ๆ ของข้าวเปลือกจึงทำให้ปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกมาจากข้าวเปลือกมีค่าที่ลดลง [19] เพื่อการลดความชื้นในข้าวเปลือกให้เหลือไม่เกิน 15% เพื่อจำหน่าย จึงต้องใช้ระยะเวลาในการทำแห้งในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานเท่ากับ 2 ชั่วโมง โดยการใช้ระยะเวลานี้สามารถความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกเหลือ 14.3±0.0, 13.8±0.0, 13.4±0.0 และ 12.8±0.0% จากปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง และแบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง ตามลำดับ

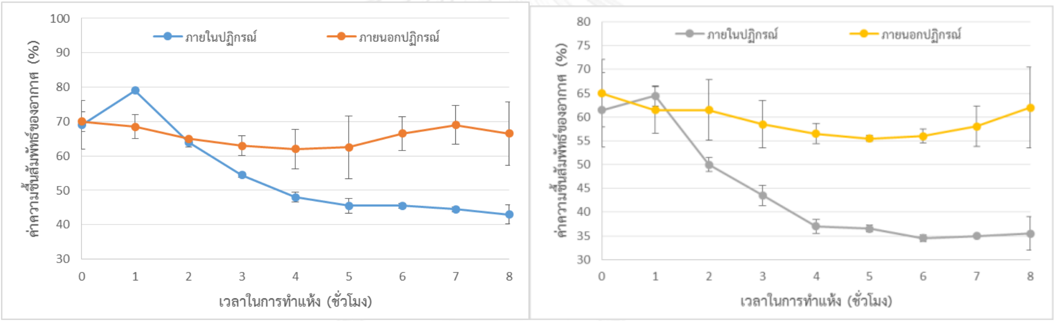
เมื่อพิจารณาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลเวียนอยู่ในปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์ในชั่วโมงที่ 1 จะสูงขึ้นกว่าค่าเมื่อเริ่มต้น (ชั่วโมงที่ 0) เนื่องจากการถ่ายโอนไอน้ำผ่านเมมเบรนเกิดขึ้นจากกลไกการละลาย-การแพร่ โดยการถ่ายโอนไอน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นกับแรงขับดันสุญญากาศที่ให้กับระบบ เกรเดียนท์ความเข้มข้นของปริมาณไอน้ำคร่อมเมมเบรน และความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของเมมเบรน หากระบบมีการถ่ายโอนไอน้ำมากดังเช่นในกรณีของปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบคอมโพสิตจะทำให้ค่าความชื้นของอากาศภายในปฏิกรณ์ในชั่วโมงที่ 1 สูงขึ้นกว่าเริ่มต้น (ชั่วโมงที่ 0) ไม่มากดังเช่นในเมมเบรนแบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวางหรือต่ำกว่าดังเช่นในเมมเบรนแบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง หรือในกรณีของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน เนื่องจากเมมเบรนที่มีการเชื่อมขวางทั้งแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิตมีการถ่ายโอนไอน้ำผ่านเมมเบรนได้มากกว่าเมมเบรนที่ไม่มีการเชื่อมขวาง โดยค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเวียนอยู่ในปฏิกรณ์เมมเบรนทั้ง 4 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงระยะเวลาการทำแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.19 แต่พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาของการทำแห้งในปฏิกรณ์ ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากความร้อนของการทำงานของพัดลมในการหมุนเวียนอากาศภายในปฏิกรณ์



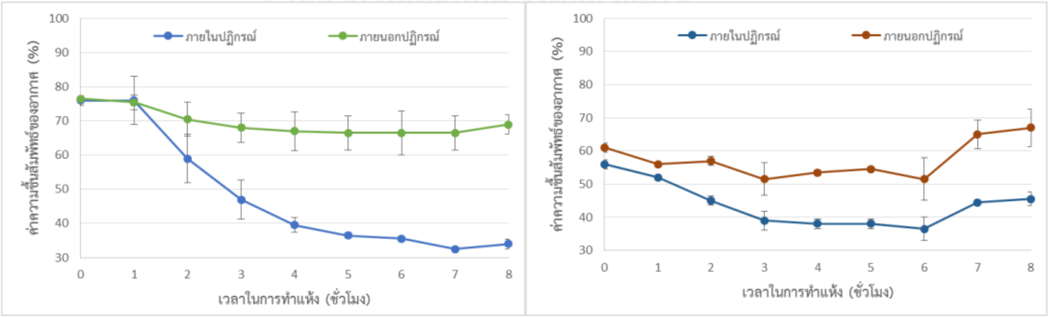
รูปที่ 4.16 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในเทอมของอัตราการทำแห้ง



รูปที่ 4.17 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก



(ก) (ข)

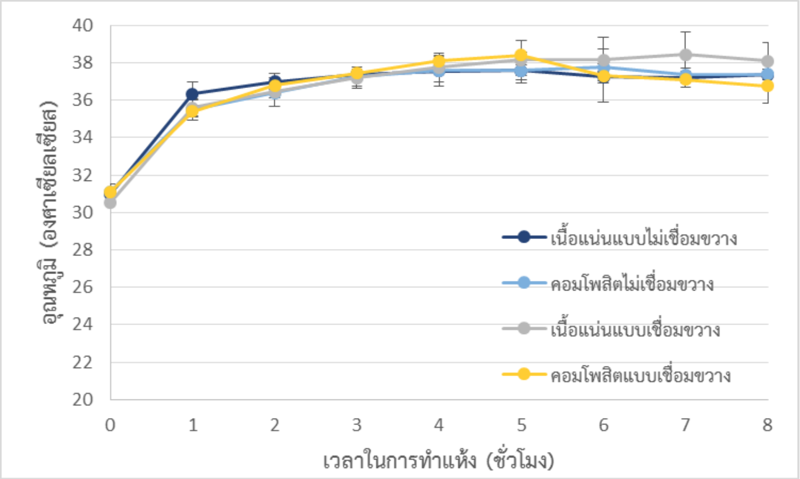


(ค) (ง)

รูปที่ 4.18 ผลของชนิดเมมเบรนต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์เทียบกับอากาศภายนอก

(ก) แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง (ข) แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง

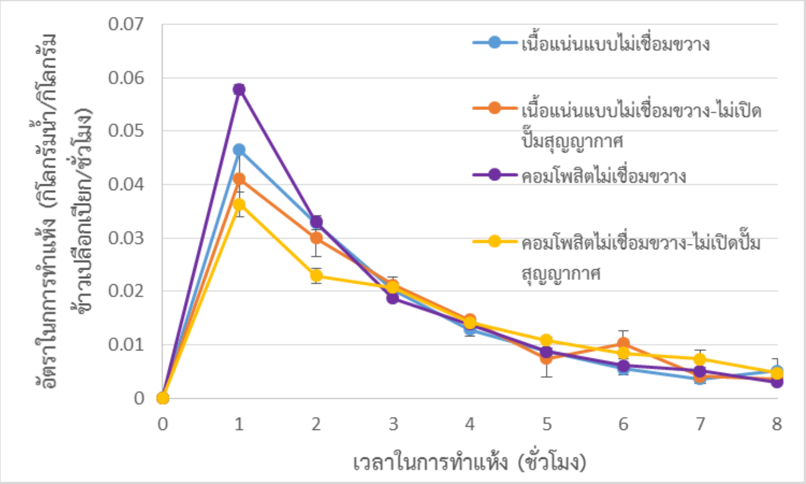
(ค) แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง (ง) แบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง



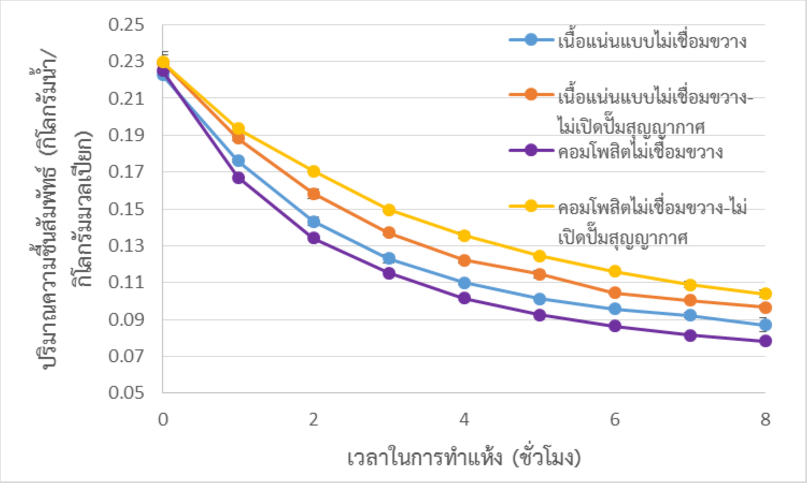
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

4.4.2.2 ผลของกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันต่ออัตราการทำแห้งข้าวเปลือก

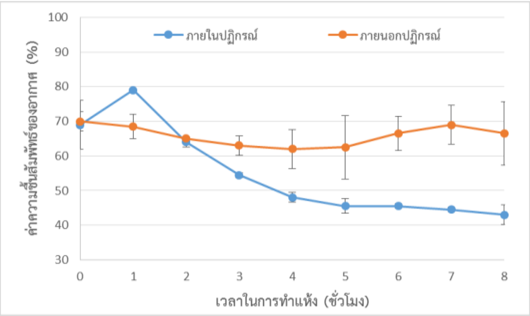
ในการศึกษาผลของกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันที่มีต่ออัตราในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeA โดยการเปิดหรือปิดปั๊มสุญญากาศแทนการดำเนินตามหลักการกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันหรือไม่ใช้กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันตามลำดับ ของเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวางทั้งแบบเนื้อแน่นและแบบคอมโพสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าการเปิดปั๊มสุญญากาศทำให้ได้อัตราในการทำแห้งข้าวเปลือกสูงกว่าการไม่เปิดปั๊มสุญญากาศโดยสามารถเห็นได้ชัดเจนในชั่วโมงที่ 1 จากปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง เนื่องจากสามารถถ่ายโอนไอน้ำออกจากปฏิกรณ์ได้มากกว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่น สอดคล้องกับค่าความชื้นในข้าวเปลือกดังแสดงในรูปที่ 4.21 และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์เทียบกับอากาศภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์ในชั่วโมงที่ 1 ในกรณีไม่เปิดปั๊มสุญญากาศสูงกว่ากรณีเปิดปั๊มสุญญากาศ และการลดลงของค่าความชื้นของอากาศภายในปฏิกรณ์ที่เปิดปั๊มสุญญากาศตามระยะเวลาในการทำแห้งมากกว่าปฏิกรณ์ที่ไม่เปิดปั๊มสุญญากาศอย่างเห็นได้ชัดจากเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด แสดงว่าการดำเนินตามหลักกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันมีผลต่อการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน การถ่ายโอนมวลไอน้ำผ่านเมมเบรนจากเกรเดียนท์ความเข้มข้นของปริมาณไอน้ำคร่อมเมมเบรนและความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของเมมเบรน ไม่เพียงพอต่อการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน หรือต้องใช้ระยะเวลาในการทำแห้งข้าวเปลือกนานขึ้นเพื่อให้ได้ค่าความชื้นในข้าวเปลือกไม่เกิน 15% เพื่อการจำหน่าย



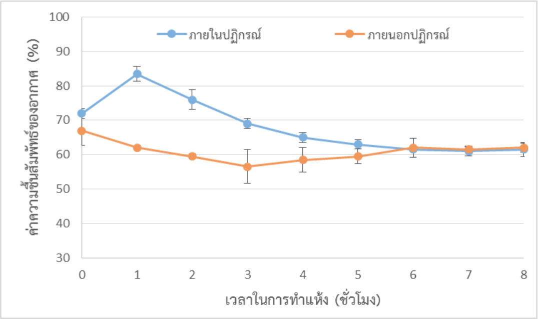
รูปที่ 4.20 ผลของการดำเนินกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันต่อสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ในเทอมของอัตราการทำแห้ง



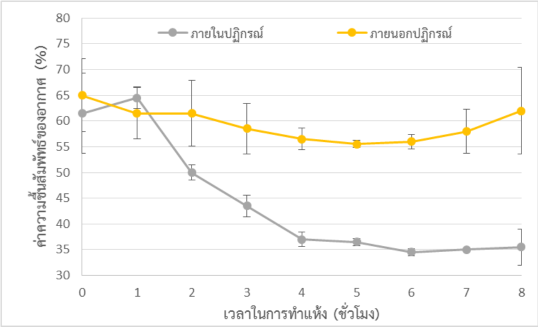
รูปที่ 4.21 ผลของการดำเนินกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันต่อสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก



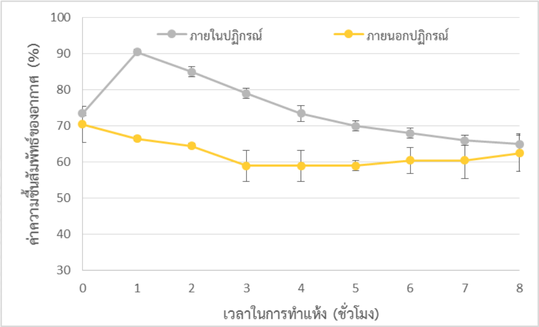
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.22 ผลของชนิดเมมเบรนต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์เทียบกับอากาศภายนอก

(ก) แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง (ข) แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางไม่มีการเปิดปั๊มสุญญากาศ

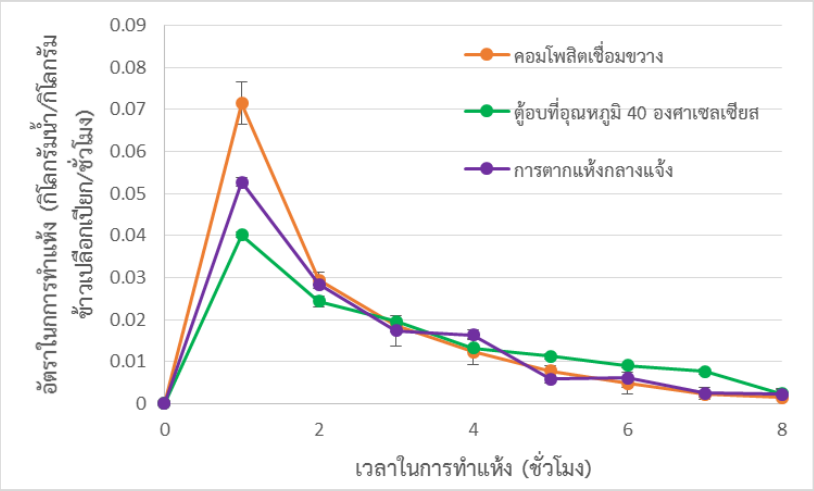
(ค) แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง (ง) แบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวางไม่มีการเปิดปั๊มสุญญากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

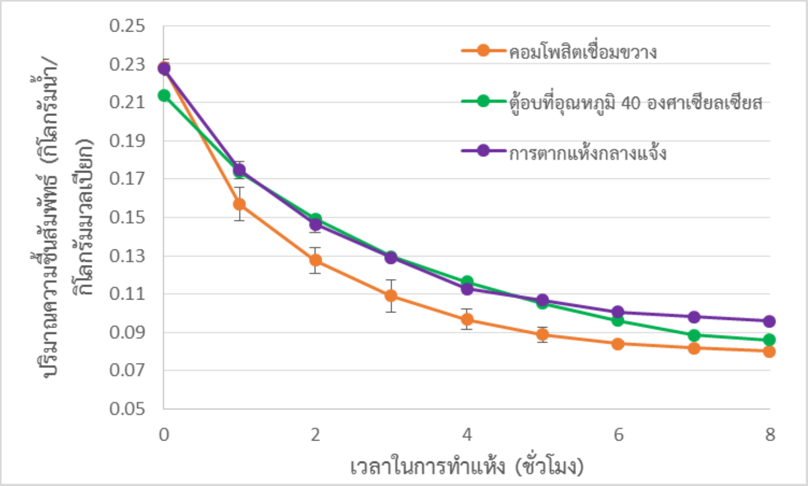
4.4.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่น

ในหัวข้อนี้แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนที่ใช้เมมเบรนแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางกับการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีดั้งเดิมอื่น ๆ ที่นิยมใช้กัน 2 วิธี คือ การอบด้วยตู้อบลมร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส และการตากแห้งกลางแจ้ง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งพบว่าในเวลา 1 ชั่วโมง ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนสามารถดึงน้ำออกได้สูงสุดท่ากับ 0.0715±0.0049 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง มากกว่าการทำแห้งข้าวเปลือกในตู้อบและการตากแห้งกลางแจ้ง ซึ่งได้เท่ากับ 0.0402±0.0007 และ 0.0527±0.0007 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ตามลำดับ หรือในเทอมของค่าความชื้นในข้าวเปลือกดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งสามารถลดความชื้นในข้าวเปลือกจาก 22.8±0.4% เหลือ 15.7±0.9% จาก 21.4±0.0%

เหลือ 17.4±0.1% และจาก 22.4±0.1% เหลือ 17.3±0.9% ในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง ตู้อบลมร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส และการตากแห้งกลางแจ้ง ตามลำดับ แสดงว่าสามารถใช้ปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำแห้งข้าวเปลือก โดยมีลำดับของสมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกจากมากไปน้อย คือ ปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน > การตากแห้งกลางแจ้ง > ตู้อบ เนื่องจากการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานและการตากแห้งข้าวเปลือกกลางแจ้ง มีการพามวลแบบบังคับ (Forced convection) ของไอน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกที่เกิดจากการไหลของอากาศจากพัดลมในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานและการพัดของลมในสภาพแวดล้อมของการตากแห้งกลางแจ้ง จึงส่งผลให้การทำแห้งในระบบดังกล่าวมีอัตราในการทำแห้งที่สูงกว่าการทำแห้งข้าวเปลือกในตู้อบซึ่งไอน้ำจากข้าวเปลือกเกิดขึ้นจากการระเหยเนื่องจากความร้อนภายในตู้อบเพียงอย่างเดียว



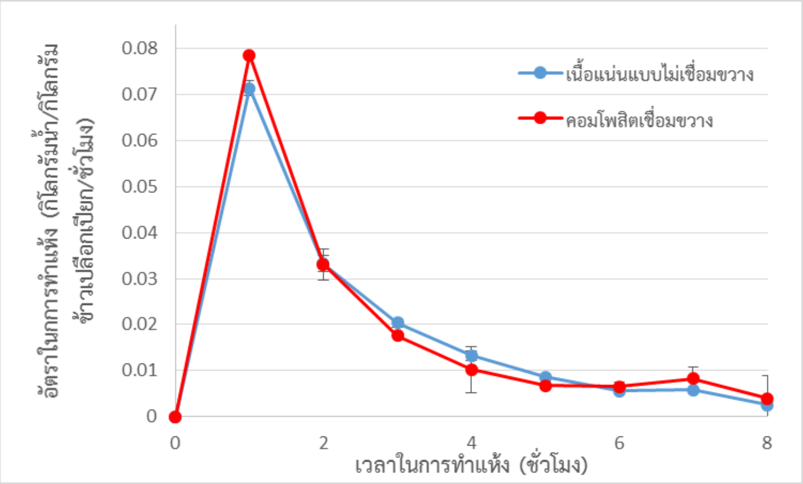
รูปที่ 4.23 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานที่ใช้เมมเบรนแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางเทียบกับตู้อบและการตากแห้งกลางแจ้ง



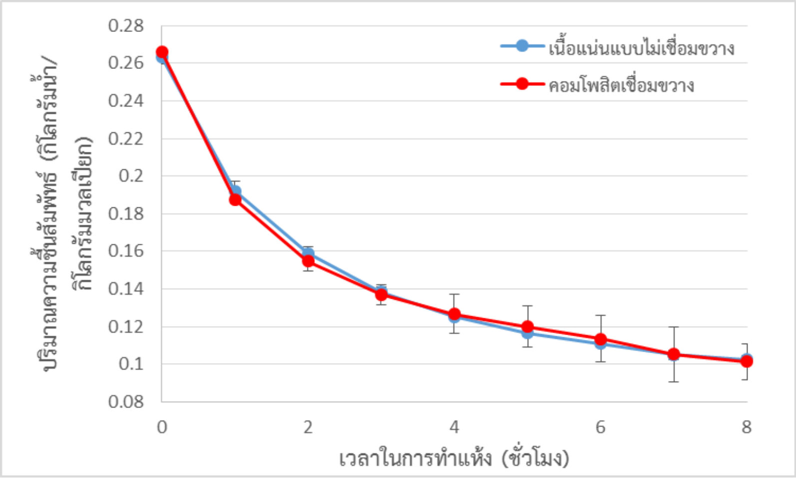
รูปที่ 4.24 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือกจากการทำแห้งในปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeA ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางเทียบกับตู้อบและการตากแห้งกลางแจ้ง

4.5 ผลการศึกษากระบวนการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeB

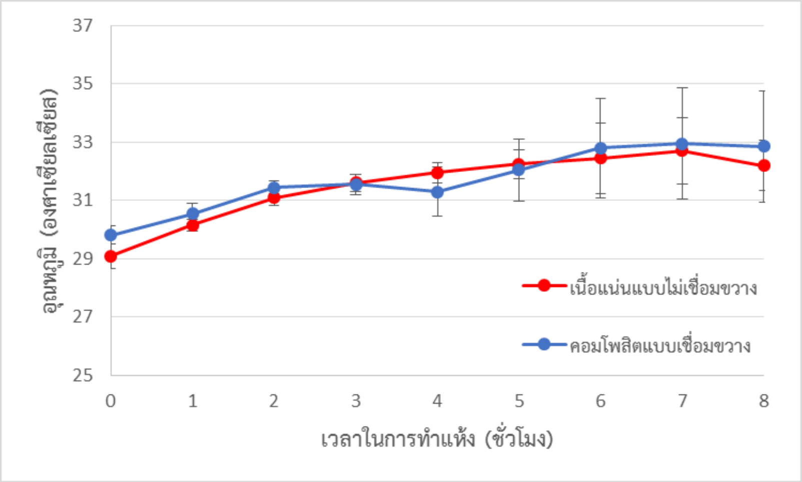
ในการศึกษาสมรรถนะของปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeB เลือกใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางและแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง เนื่องจากเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด ให้อัตราการดึงน้ำออกจากระบบต่ำที่สุดและสูงที่สุด ตามลำดับ จากรูปที่ 4.25 พบว่าปฏิกรณ์เมมเบรนจากเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด ให้อัตราในการทำแห้งใกล้เคียงกันตลอดช่วงระยะเวลาในการทำแห้ง โดยมีอัตราการทำแห้งสูงสุด ณ ชั่วโมงที่ 1 ในปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางและแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางเท่ากับ 0.0713±0.0016 และ 0.0786±0.0005 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความชื้นในข้าวเปลือก ดังแสดงในรูปที่ 4.26 โดยสามารถลดความชื้นในข้าวเปลือกจาก 26.3±0.4% เหลือ 19.2±0.5% และจาก 26.6±0.1% เหลือ 18.8±0.2% ตามลำดับ อธิบายได้ว่าเมมเบรนที่ใช้ในปฏิกรณ์แบบ TypeB ทำหน้าที่ดึงไอน้ำออกจากมวลอากาศที่ป้อนเข้ามาในปฏิกรณ์เท่านั้นซึ่งไม่สูงมากที่จะเห็นความแตกต่างของผลการถ่ายโอนมวลและอาจเนื่องจากมีเวลาสัมผัสกับเมมเบรนสั้น ๆ ทำให้มวลอากาศที่ไหลผ่านข้าวเปลือกหลังจากผ่านผิวหน้าของเมมเบรนมาแล้วมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเห็นได้จากค่าอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ระหว่างการทำแห้งของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงระยะเวลาในการทำแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ถึงแม้จะสูงขึ้นจากเมื่อเริ่มต้นเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในช่วงของอุณหภูมิห้องปกติ (29 – 33 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.25 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeB ในเทอมของอัตราในการทำแห้ง



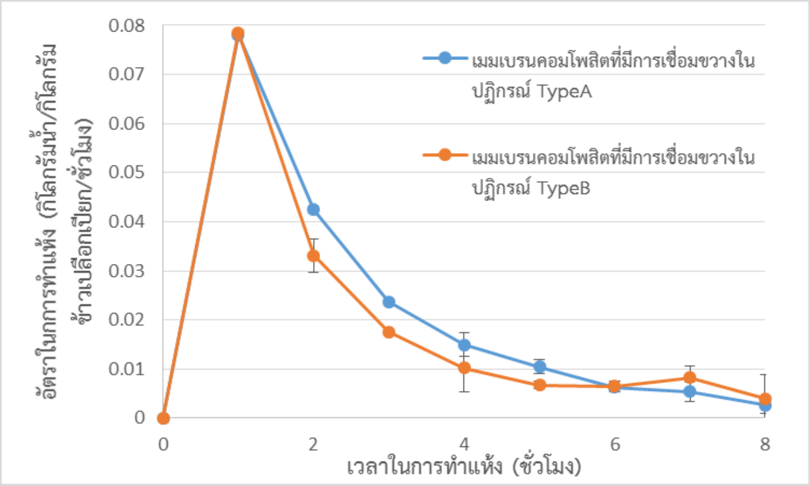
รูปที่ 4.26 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ TypeB ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก



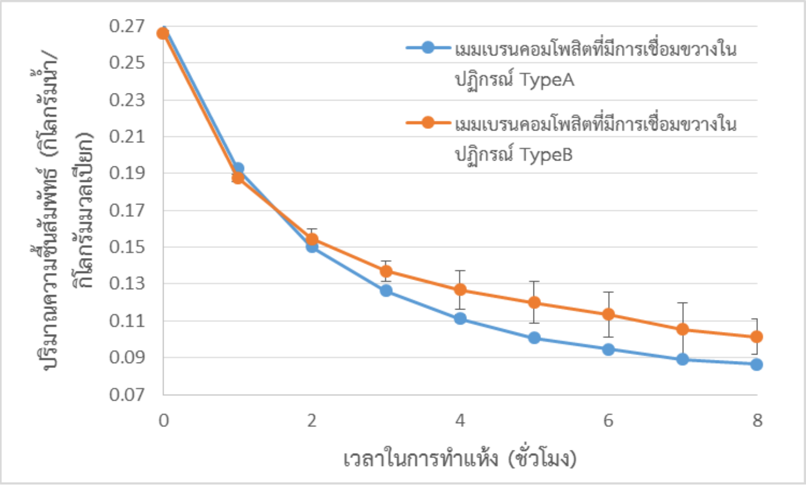
รูปที่ 4.27 อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ระหว่างการทำแห้งของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeB

4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนแบบ TypeA และ TypeB

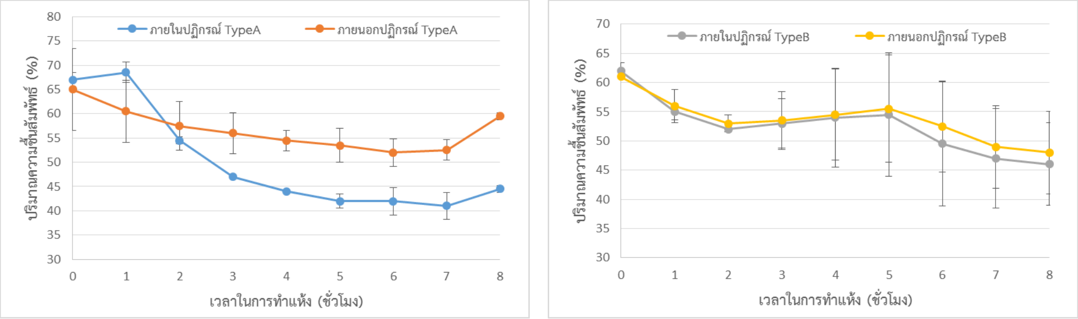
ในการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeA และแบบ TypeB เลือกใช้เมมเบรนชนิดเดียวกัน คือแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งพบว่าปฏิกรณ์เมมเบรนทั้ง 2 แบบ ให้อัตราการทำแห้งสูงสุดเท่ากัน ณ ชั่วโมงที่ 1 เท่ากับ 0.078±0.016 และ 0.079±0.052 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง ตามลำดับ แต่เมื่อดำเนินการทำแห้งในปฏิกรณ์นานขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 พบว่าปฏิกรณ์แบบ TypeA มีอัตราในการทำแห้งสูงกว่า TypeB เล็กน้อย ทำให้ค่าความชื้นในข้าวเปลือกจากปฏิกรณ์แบบ TypeB สูงกว่าจากปฏิกรณ์แบบ TypeA ดังแสดงในรูปที่ 4.29 อธิบายได้ว่ามวลอากาศที่หมุนเวียนอยู่ภายในปฏิกรณ์แบบ TypeA ส่วนใหญ่เป็นมวลอากาศเดิมซึ่งได้รับการดึงไอน้ำออกด้วยเมมเบรนตลอดเวลาที่ไหลวนอยู่ภายในปฏิกรณ์ ขณะที่ปฏิกรณ์แบบ TypeB ถึงแม้มีเมมเบรนทำหน้าที่ดึงไอน้ำออกจากมวลอากาศก่อนที่จะให้ไหลผ่านข้าวเปลือกและปล่อยมวลอากาศชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่การถ่ายโอนมวลไอน้ำโดยเมมเบรนนี้ทุกครั้งเกิดขึ้นกับมวลอากาศก้อนใหม่จากภายนอกที่ถูกป้อนเข้ามาในปฏิกรณ์ทำให้มวลอากาศที่หมุนเวียนอยู่ภายในปฏิกรณ์แบบ TypeA มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่ามวลอากาศที่หมุนเวียนอยู่ภายในปฏิกรณ์แบบ TypeB ดังแสดงในรูปที่ 4.30 แต่ข้อเสียของการใช้ปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeA คือ พัดลมหมุนเวียนอากาศต้องทำงานหนักกว่าที่ใช้ในปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeB ดังสามารถเห็นได้จากค่าอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeA ที่สูงกว่าปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeB ในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.28 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางแบบ TypeA เทียบกับแบบ TypeB ในเทอมของอัตราในการทำแห้ง

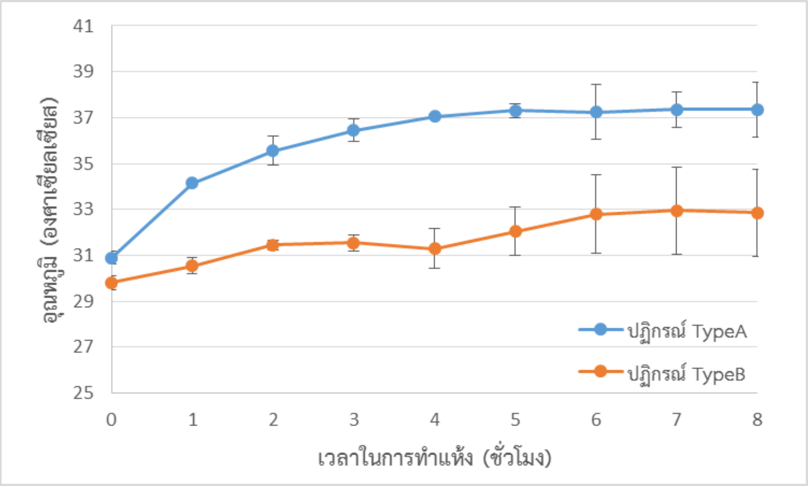


รูปที่ 4.29 สมรรถนะการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางแบบ TypeA เทียบกับแบบ TypeB ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก



(ก) (ข)

รูปที่ 4.30 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในปฏิกรณ์เทียบกับอากาศภายนอกปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวาง (ก) ปฏิกรณ์แบบ TypeA (ข) ปฏิกรณ์แบบ TypeB



รูปที่ 4.31 อุณหภูมิระหว่างการทำแห้งภายในปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตเชื่อมขวางแบบ TypeA เทียบกับแบบ TypeB

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

1. สมบัติของเมมเบรนไคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้

    1) เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวางและมีการเชื่อมขวางมีความหนาเท่ากับ 39.1±7.1 และ 49.6±5.2 ไมครอน ตามลำดับ และเมมเบรนแบบคอมโพสิตที่ไม่มีการเชื่อมขวางและที่มีการเชื่อมขวางมีความหนาเท่ากับ 168.4±17.0 และ 179.2±20.0 ไมครอน ตามลำดับ โดยผ้าสปันปอนด์มีความหนาเท่ากับ 136.8±11.4 ไมครอน

    2) เมมเบรนไคโตซานมีสมบัติความชอบน้ำในเทอมของค่าฟลักซ์การแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์เรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ เมมเบรนแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบคอมโพสิตไม่มีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง เท่ากับ 608.7±99.4, 364.6±22.2, 205.8±13.5 และ 120.6±18.4 กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

    3) ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นตามมาตรฐาน D882 ของแบบไม่มีการเชื่อมขวางและของแบบมีการเชื่อมขวางมีค่าเท่ากับ 55.8±2.4 และ 65.0±2.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และมีค่ามอดูลัสของยัง (Young’s modulus) เท่ากับ 1041.6±114.6 และ 1583.2±142.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

    4) ค่าความต้านทานแรงดึงของเมมเบรนแบบคอมโพสิตตามมาตรฐาน D638 ของแบบไม่มีการเชื่อมขวางและของแบบมีการเชื่อมขวางมีค่าเท่ากับ 159.9±20.6 และ 240.6±44.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และมีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 1041.6±114.6 และ 1583.2±142.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

2. ผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศด้วยโมเดล 3 มิติ และการประเมินความสม่ำเสมอของอัตราในการทำแห้งด้วยโมเดลทางกายภาพ พบว่ารูปแบบที่มีการไหลของอากาศจากทางด้านข้างที่มีการติดตั้งแผ่นบังคับการไหลของอากาศเหนือวัสดุเป็นแบบสามเหลี่ยมและมีการออกแบบช่องทางการไหลของอากาศขาเข้าเป็นแบบสามเหลี่ยม (Horizontal flow with baffle plate and triangle air flow path (HF+BF+TFP)) เป็นรูปแบบที่ให้การกระจายตัวของอากาศและอัตราการทำแห้งของชีวมวลภายในปฏิกรณ์ที่สม่ำเสมอในทุก ๆ ตำแหน่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนของห้องทำแห้ง (Drying chamber) ที่ให้รูปแบบการไหลของอากาศเป็นแบบ HF+BF+TFP และส่วนของเซลล์เมมเบรน (Membrane cell) ที่ประกอบอยู่ทางด้านหลังของห้องทำแห้ง (ด้านขาออกของอากาศ) โดยทั้งสองส่วนยึดติดกันด้วยหน้าแปลน
4. ปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนในงานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบให้มีรูปแบบการไหลของอากาศเป็น 2 ลักษณะ คือแบบ TypeA และแบบ TypeB โดย
   1) แบบ TypeA อากาศส่วนใหญ่ภายในปฏิกรณ์ยังคงไหลวนอยู่ภายในปฏิกรณ์ โดยที่เมมเบรนยังคงทำการดึงไอน้ำออกจากอากาศชื้นที่ไหลวนอยู่ภายในปฏิกรณ์ตลอดเวลา
   2) แบบ TypeB มีเมมเบรนทำหน้าที่ดึงไอน้ำออกจากมวลอากาศก้อนใหม่จากภายนอกที่ถูกป้อนเข้ามาในปฏิกรณ์ก่อนที่จะให้ไหลผ่านข้าวเปลือกและปล่อยมวลอากาศชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม
5. สมรรถนะในการทำแห้งของปฏิกรณ์เมมเบรนแบบ TypeA ในเทอมของอัตราในการทำแห้งและค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือกเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ เมมเบรนแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบคอมโพสิตไม่มีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง > เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง สอดคล้องกับสมบัติค่าฟลักซ์การแพร่ผ่านของไอน้ำ
6. สามารถใช้ปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตมีการเชื่อมขวางที่ดำเนินตามหลักกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชันเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำแห้งชีวมวล เช่น ข้าวเปลือก โดยสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกจาก 22.8±0.4% เหลือ 15.7±0.9% ภายใน 1 ชั่วโมง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การพัฒนาปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนควรจะพัฒนาในสองส่วนไปพร้อม ๆ กัน คือ ในส่วนของการพัฒนารูปแบบการไหลของอากาศภายในห้องทำแห้งและความเหมาะสมของขนาดพื้นที่ของเมมเบรน เพื่อให้มีความสอดคล้องกันระหว่างอัตราในการดึงน้ำออกจากวัสดุในส่วนของห้องทำแห้งและอัตราในการดึงไอน้ำออกจากอากาศในส่วนของเซลล์เมมเบรน
2. การพัฒนารูปแบบของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรนเพื่อให้ได้มวลอากาศแห้งไหลผ่านวัสดุโดยไม่มีการปล่อยมวลอากาศชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อมและใช้พลังงานในการหมุนเวียนอากาศต่ำ

รายการอ้างอิง

1. Galanakis, C.M., Processing Technologies and Industrial Technique. Food Waste Recovery, 2015: p. 203.
2. CLASSIIFIICATIION OF DRYERS. [Online]. Available from: www.unido.org/fileadmin/.../32148_34ClassificationofDryers.17.pdf [2016, Nov. 17]
3. Small Grains Production. Wheat and barley drying. [Online]. Available from: http://www.extension.umn.edu/agriculture/small-grains/harvest/wheat-and-barley-drying/ [2016, Nov. 17]
4. Keey, R.B., DRYERS. [Online]. Available from: http://www.thermopedia.com/content/710/ [2016, Nov. 17]
5. Conveyor Ovens. [Online]. Available from: http://www.sakav.com/conveyor-ovens.html [2016, Nov. 17]
6. Continuous Fluid Bed Drying System. [Online]. Available from: http://www.kurimoto.co.jp/worldwide/en/product/item/0_7_pw/3_3_0 . php [2016, Nov. 17]
7. Derers. Indirect Rotary Dryers. [Online]. Available from: http://mojjpune.com/dryers.html [2016, Nov. 17]
8. Centrifugal Spray Dryer. [Online]. Available from: http://ygspraydryer.en.ec2 1 . com/Centrifugal_Spray_Dryer--5425864_5425908.html [2016, Nov. 17]
9. Artificial drying. [Online]. Available from: http://collections.infocollections.org/ukedu/uk/d/Jh2383e/4.3.3.html [2016, Nov. 17]
10. Drum Dryer. [Online]. Available from: http://rfheating.com/drum_dryer.htm [2016, Nov. 17]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

11. Prof. Dr. Basavaraj K. Nanjwade, Drying. [Online]. Available from: http://rfheating.com/drum_dryer.htm [2016, Nov. 17]

12. วิบูลย์ เทเพนทร์. การวัดความชื้นเมล็ดพืช. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร จตุจักร.

13. ขันทอง สุนทราภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

14. Dr. Isaac Solomon Jebamani, V.G., and G. Senthilkumar, Brine Solution Recovery Using Nanofiltration. [Online]. 2009. Available from: http://www.eco-web.com/edi/090714.html [2016, Nov. 17]

15. K. Soontarapa and U. Intra. Chitosan-Based Fuel Cell Membranes. Chemical Engineering Communications 193(7) (2006) 855-868.

16. B Meemuk. Production of biodiesel from palm fatty acid distillate using chitosan membrane reactor (2011)

17. Pervaporation process. [Online]. Available from: http://www.sepratek.com/icons/app/cms/?html=/en/sub/int4_1_en.html&shell=/en/layout.shell:154 [2016, Nov. 17]

18. Z.F. Sun, C.G. Carrington, J. A. Anderson and Q. Sun. Air flow patterns in dehumidifier wood drying kilns. Chemical Engineering Research and Design 82 (2004) 1344 –1352.

19. 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 144 (2015) 148–155.

20. 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 19 (2013) 1092–1098.

21. 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 64 (2015) 67-73.

22. M. Pan, X. Shao and L. Liang. Analysis of velocity uniformity in a single microchannel plate with rectangular manifolds at different entrance velocities. Chemical Engineering Technology 36 (2013) 1067–1074.

23. E. Eren, A. Sarihan, B. Eren, H. Gumus and F. O. Kocak. Preparation, characterization and performance enhancement of polysulfone ultrafiltration membrane using PBI as hydrophilic modifier. Journal of Membrane Science 475 (2015) 1-8.

24. K. Cheunsakulpong Developement of spiral wound chitosan membrane module for treating biogas digester effulent. Master's Thesis, Science Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2013.

25. M. Pieróg, M.G.-D. and J. Ostrowska-Czubenko. EFFECT OF IONIC CROSSLINKING AGENTS ON SWELLING BEHAVIOUR OF CHITOSAN HYDROGEL MEMBRANES. Progress on Chemistry and Application of Chitin and Its XIV (2009) 75-82.

26. C. Phuchaiyanan. Rolling configuration of chitosan membrane as spiral wound module for dye wastewater treatment. Master's Thesis, Science Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2014.

27. P.-Z. Hong, S.-D. Li, C.-Y. Ou, C.-P. Li, L. Yang and C.-H. Zhang. Thermogravimetric analysis of chitosan. Journal of Applied Polymer Science 105(2) (2007) 547-551.

28. N.L.G.D. Souza, T.F. Sallers, H.M. Brandão, H.G.M. Edwards and L.F.C. de Oliveira. Synthesis, Vibrational Spectroscopic and Thermal Properties of Oxocarbon Cross-Linked Chitosan. Journal of the Brazilian Chemical Society (2015) 1247-1256.

29. Y. Zhao, L. Ma, L. Zeng, M. Tu and J. Zhao. Preparation, characterization and protein sorption of photo-crosslinked cell membrane-mimicking chitosan-based hydrogels. Carbohydrate Polymers 151 (2016) 237–244.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณค่าฟลักซ์ไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

1. วิธีการวิเคราะห์ฟลักซ์ไอน้ำบริสุทธิ์ตามกระบวนการเพอร์แวปเพอเรชัน (Pervaporation)

ฟลักซ์ไอน้ำคือปริมาณเพอร์มิเอตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมมเบรนอธิบายได้ด้วยสมการ (ก-1)

$$J = Q/A\Delta t \qquad \text{(ก-1)}$$

โดยที่ J คือ ค่าฟลักซ์การแพร่ผ่านไอน้ำบริสุทธิ์ (กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

Q คือ ปริมาณไอน้ำที่ผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่ (กรัม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน (ตารางเมตร)

Δt คือ เวลาในการวัดปริมาณไอน้ำที่ผ่านเมมเบรน (ชั่วโมง)

2. การคำนวณค่าฟลักซ์ไอน้ำบริสุทธ์

วิธีการคำนวณค่าฟลักซ์ไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นที่ไม่มีการเชื่อมขวาง

ค่าที่ได้จากการทดลอง

ปริมาณเพอร์มิเอตที่ได้ (Q) = 0.13 กรัม

พื้นที่ผิวของเมมเบรน (A) = 1.1335×10^{-3} ตารางเมตร

เวลาที่ใช้เก็บเพอร์มิเอต (Δt) = 1 ชั่วโมง

จากสูตร $J = Q/A\Delta t$

$= 0.13/(1.1335 \times 10^{-3} \times 1)$

= 114.68 กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรนไคโตซาน

1. การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรน

ปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรนจะกล่าวถึงปริมาณน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึบในเนื้อของเมมเบรนต่อน้ำหนักของเมมเบรนแห้งอธิบายได้ด้วยสมการ (ข-1)

% Water uptake = $((W_w - W_d)/W_d) \times 100$ (ข-1)

โดยที่ W_w คือ น้ำหนักเมมเบรนหลังการดูดซับน้ำ

W_d คือ น้ำหนักเมมเบรนแห้งก่อนการดูดซับน้ำ

2. การคำนวณค่าการดูดซับน้ำของเมมเบรน

วิธีการการคำนวณค่าการดูดซับน้ำของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นที่ไม่มีการเชื่อมขวาง

ค่าที่ได้จากการทดลอง

น้ำหนักเมมเบรนแห้งก่อนการดูดซับน้ำ (W_d) = 0.011 กรัม

น้ำหนักเมมเบรนหลังการดูดซับน้ำ (W_w) = 0.026 กรัม

จากสูตร % Water uptake = $((W_w - W_d)/W_d) \times 100$

$= ((0.026-0.011)/0.011) \times 100$

$= 136.36\%$

Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณอัตราในการทำแห้งและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือก

1. ความชื้นสัมพัทธ์

โดยทั่วไปแล้วค่าความชื้นจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในชีวมวลกับน้ำหนักของชีวมวลนั้นๆซึ่งสามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ

1.1 การคำนวณจากพื้นฐานมวลชื้น (Wet basis)

%MC (Based on wet basis) = $((W_w - W_d)/W_w) \times 100$ (ค-1)

โดยที่ W_w คือ น้ำหนักของมวลเปียกทั้งหมด

W_d คือ น้ำหนักมวลแห้ง

1.2 การคำนวณจากพื้นฐานมวลแห้ง (Dry basis)

%MC (Based on dry basis) = $((W_w - W_d)/W_d) \times 100$ (ค-2)

โดยที่ W_w คือ น้ำหนักของมวลเปียกทั้งหมด

W_d คือ น้ำหนักมวลแห้ง

ในการระบุค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือกจะบอกในพื้นฐานมวลชื้นซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ใช้ในทางการค้าและเป็นค่าความชื้นที่ใช้บ่งชี้ทั่วไปในปัจจุบัน

2. การคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือกก่อนและหลังการทำแห้งในงานวิจัยนี้

2.1 วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งข้าวเปลือกในปริมาณ 40 กรัม
2. นำไปทำแห้งในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน
3. นำข้าวเปลือกออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆชั่วโมงเป็นเวลา 8 ชั่วโมง
4. เมื่อครบ 8 ชั่วโมงแล้วนำข้าวเปลือกมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
5. ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกหลังจากที่อบในตู้อบที่ 100 องศาเซลเซียสที่เวลา 24 ชั่วโมง

6. นำค่าน้ำหนักของข้าวเปลือกที่ได้จากขั้นตอนต่างๆจากการทดลองมาทำการคำนวณหาปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก

2.2 การคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์

ค่าที่ได้จากการทดลองการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นที่ไม่มีการเชื่อมขวาง

น้ำหนักข้าวเปลือกก่อนทำการทดลอง (W_{w0}) = 40.05 กรัม

น้ำหนักข้าวเปลือกหลังการทำแห้งชั่วโมงที่ 1 (W_{w1}) = 38.18 กรัม

น้ำหนักข้าวเปลือกหลังการทำแห้งด้วยตู้อบ (W_d) = 31.15 กรัม

จากสูตร %MC (W_{w0}) = $((W_{w0}-W_d)/W_{w0}) \times 100$

= $((40.05-31.15)/40.05) \times 100$

= 22.22 %

และ %MC (W_{w1}) = %MC (W_{w0}) - %MC (W_{w1})

จากสูตร %MC (W_{w1}) = $((W_{w1}-W_d)/W_{w0}) \times 100$

= $((40.05-38.18)/40.05) \times 100$

= 4.67 %

เพราะฉะนั้น %MC (W_{w1}) = 22.22 – 4.67 %

= 17.55 %

3. อัตราในการทำแห้ง

อัตราในการทำแห้งคือค่าที่บอกถึงปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมวลต่อน้ำหนักของมวลเปียกต่อชั่วโมงซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกซึ่งหาได้จากผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกก่อนและหลังการทำแห้งในทุกๆ 1 ชั่วโมง อธิบายได้ดังสมการ

$$R = (MC_0-MC_1)/\Delta t \qquad (ค\text{-}3)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ R คือ อัตราในการทำแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง)

MC_0 คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ก่อนการทำแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก)

MC_1 คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์หลังการทำแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก)

Δt คือ ผลต่างของเวลาก่อนและหลังทำแห้ง (ชั่วโมง)

3.1 การคำนวณอัตราในการทำแห้ง

ค่าที่ได้จากการทดลองการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA ที่ใช้เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นที่ไม่มีการเชื่อมขวาง

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ก่อนการทำแห้งที่ชั่วโมงที่ 0 (MC_0) = 0.2222 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ก่อนการทำแห้งที่ชั่วโมงที่ 1 (MC_1) = 0.1755 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียก

ผลต่างของเวลาก่อนและหลังทำแห้ง (Δt) = 1 ชั่วโมง

จากสูตร $R = (MC_0 - MC_1)/\Delta t$

$= (0.2222 - 0.1755)/1$

= 0.0467 กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมข้าวเปลือกเปียกต่อชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง
ค่าที่ได้จากการทดลอง

1. ค่าความหนาของแผ่นเมมเบรนและตัวรองรับเมมเบรน

ตาราง ง-1 ความหนาของเมมเบรนและตัวรองรับเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ความหนา (µm)
เนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง	39.1±7.13
เนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง	49.6±5.23
คอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง	168.4±16.98
คอมโพสิตเชื่อมขวาง	179.2±20.04
ผ้าสปันปอนด์	136.8±11.43

2. ฟลักซ์ไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ตาราง ง-2 ฟลักซ์ไอน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ฟลักซ์การแพร่ผ่านของไอน้ำบริสุทธิ์ (กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	120.57±18.36
แบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง	205.84±13.48
แบบคอมโพสิตที่ไม่มีการเชื่อมขวาง	364.64±22.20
แบบคอมโพสิตที่มีการเชื่อมขวาง	608.71±99.42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ตาราง ง-3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์)
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	135.68±7.33
แบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง	102.42±11.77
แบบคอมโพสิตที่ไม่มีการเชื่อมขวาง	82.69±0.11
แบบคอมโพสิตที่มีการเชื่อมขวาง	73.30±2.60

4. ค่าจากการทดสอบความสามารถในการทนแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน

ตาราง ง-4 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นตามมาตรฐาน D882

ชนิดเมมเบรน	ความหนา (μm)	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)	มอดูลัสของยัง (MPa)	% การยืดออก
เนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง	23.33±1.05	55.79±2.45	1041.57±114.58	5.40±0.50
เนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง	38.26±4.31	65.03±2.62	1583.21±142.52	4.14±0.42

ตาราง ง-5 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตตามมาตรฐาน D638

ชนิดเมมเบรน	**ความหนา (μm)**	**ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)**	**มอดูลัสของยัง (MPa)**	**% การยืดออก**
คอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง	160.13±13.91	20.48±3.16	159.92±20.57	12.87±1.17
คอมโพสิตเชื่อมขวาง	177.07±17.89	19.49±4.32	240.59±44.95	8.09±0.78
ผ้าสปันปอนด์	132.87±18.13	10.72±0.74	43.94±5.34	24.58±1.95

5. การประเมินความสม่ำเสมอของอัตราในการทำแห้งของสำลีในห้องทำแห้งของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน

ตาราง ง-6 อัตราในการทำแห้งสำลีของโมเดลในรูปแบบการไหลต่างๆ

รูปแบบการไหล	**อัตราในการทำแห้งในแต่ละโซน (กิโลกรัมของน้ำ/กิโลกรัมมวลสำลี/ชั่วโมง)**			
	โซนที่ 1	**โซนที่ 2**	**โซนที่ 3**	**โซนที่ 4**
VF	0.6546±0.0239	0.6372±0.0760	0.6496±0.1096	0.6682±0.0772
HF 0^{o}	0.6065±0.0814	0.6136±0.0679	0.5271±0.0280	0.5234±0.0330
HF+BF	0.7262±0.0186	0.7171±0.1060	0.7028±0.0387	0.6601±0.0708
HF+BF+TFP	0.7379±0.0729	0.6721±0.0717	0.6681±0.0314	0.6501±0.0096

6. อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีต่ออัตราในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA

หมายเหตุ สัญลักษณ์ย่อที่ใช้

UCD	หมายถึง เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง
UCD-NV	หมายถึง เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางที่ไม่มีการเปิดการทำงานของปั๊มสุญญากาศ
CD	หมายถึง เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง
UCC	หมายถึง เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวาง
UCC-NV	หมายถึง เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตไม่เชื่อมขวางที่ไม่มีการเปิดการทำงานของปั๊มสุญญากาศ
CC	หมายถึง เมมเบรนไคโตซานแบบคอมโพสิตที่มีการเชื่อมขวาง
SB	หมายถึง ผ้าสปันปอนด์
NO	หมายถึง ตู้อบที่ 40 องศาเซลเซียส
NC	หมายถึง การตากแห้งกลางแจ้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง-7 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA ในเทอมของอัตราในการทำแห้ง (กิโลกรัมของน้ำ/กิโลกรัมมวลข้าวเปลือก/ชั่วโมง) ที่ความเร็วของอากาศขาเข้าต่างๆที่เวลาในการทำแห้ง 1 ชั่วโมง

เมมเบรน	**ความเร็วอากาศขาเข้า (เมตร/วินาที)**					
	1.2	**1.6**	**2.0**	**2.4**	**2.8**	**3.2**
UCD	0.0323 ±0.0009	0.0368 ±0.0008	0.04 ±0.0018	0.0434 ±0.0018	0.0532 ±0.0023	0.0589 ±0.0018
CD	0.0456 ±0.0017	0.0486 ±0.0009	0.0499 ±0.0029	0.0493 ±0.0012	0.0549 ±0.0006	0.0680 ±0.0004
UCC	0.0431 ±0.0022	0.0434 ±0.0002	0.0443 ±0.0012	0.0549 ±0.0001	0.0577 ±0.0002	0.0631 ±0.0038
CC	0.0464 ±0.0005	0.0460 ±0.0031	0.0635 ±0.0023	0.0611 ±0.0002	0.0648 ±0.0054	0.0745 ±0.0022

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง-8 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก (กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลเปียก) ที่ความเร็วของอากาศขาเข้าต่างๆ ที่เวลาในการทำแห้ง 1 ชั่วโมง

เมมเบรน	**ความเร็วอากาศขาเข้า (เมตร/วินาที)**					
	1.2	**1.6**	**2.0**	**2.4**	**2.8**	**3.2**
UCD	79.50 ±0.71	76.00 ±7.07	78.67 ±1.15	77.67 ±0.58	73.33 ±0.58	72.33 ±0.58
CD	66.50 ±0.71	66.50 ±0.71	69.00 ±1.41	69.00 ±0.00	66.50 ±0.71	61.00 ±0.00
UCC	70.50 ±0.71	74.00 ±0.00	70.50 ±0.71	65.50 ±0.71	66.50 ±0.71	63.50 ±0.71
CC	67.00 ±1.41	70.00 ±2.83	54.00 ±1.41	58.00 ±2.83	59.00 ±1.41	51.00 ±0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7. สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA

ตาราง ง-9 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA ในเทอมของอัตราในการทำแห้ง (กิโลกรัมของน้ำ/กิโลกรัมมวลข้าวเปลือก/ชั่วโมง) ที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 3.2 เมตร/วินาที

เมมเบรน	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
UCD	0	0.0464 ± 0.0004	0.0328 ± 0.0012	0.0203 ± 0.0002	0.0129 ± 0.0012	0.0087 ± 0.0007	0.0055 ± 0.0011	0.0036 ± 0.0009	0.0051 ± 0.0023
UCD-NV	0	0.0401 ± 0.0048	0.030 ± 0.0035	0.0212 ± 0.0014	0.0147 ± 0.0004	0.0075 ± 0.0035	0.0102 ± 0.0025	0.0041 ± 0.0009	0.0036 ± 0.0008
CD	0	0.0517 ± 0.0067	0.0326 ± 0.0016	0.0217 ± 0.0025	0.0142 ± 0.0021	0.0099 ± 0.0002	0.0071 ± 0.0009	0.0059 ± 0.0002	0.0040 ± 0.0014
UCC	0	0.0578 ± 0.0009	0.0330 ± 0.0007	0.0187 ± 0.0004	0.0139 ± 0.0002	0.0087 ± 0.0007	0.0061 ± 0.0002	0.0051 ± 0.0023	0.0030 ± 0.0004
UCC-NV	0	0.0363 ± 0.0023	0.0230 ± 0.0014	0.0207 ± 0.0011	0.0142 ± 0.0007	0.0109 ± 0.0005	0.0085 ± 0.0011	0.0073 ± 0.0016	0.0047 ± 0.0003
CC	0	0.0715 ± 0.0049	0.0294 ± 0.0019	0.0185 ± 0.0014	0.0124 ± 0.0030	0.0077 ± 0.0014	0.0049 ± 0.0027	0.0022 ± 0.0007	0.0015 ± 0.0021
SB	0	0.0511 ± 0.0087	0.0239 ± 0.0009	0.0128 ± 0.0014	0.0081 ± 0.0009	0.0084 ± 0.0023	0.0064 ± 0.0009	0.0043 ± 0.0007	0.0030 ± 0.0018

ตาราง ง-10 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก (กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลเปียก) ที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 3.2 เมตร/วินาที

เมมเบรน	**เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)**								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
UCD	0.2227 ± 0.0006	0.1762 ± 0.0010	0.1434 ± 0.0022	0.1230 ± 0.0024	0.1102 ± 0.0011	0.1014 ± 0.0004	0.0959 ± 0.0006	0.0923 ± 0.0015	0.0872 ± 0.0038
UCD-NV	0.2292 ± 0.0058	0.1881 ± 0.0010	0.1582 ± 0.0026	0.1370 ± 0.0012	0.1222 ± 0.0015	0.1147 ± 0.0020	0.1045 ± 0.0005	0.1003 ± 0.0004	0.0968 ± 0.0013
CD	0.2222 ± 0.0007	0.1705 ± 0.0074	0.1379 ± 0.0090	0.1162 ± 0.0066	0.1020 ± 0.0044	0.0921 ± 0.0046	0.0850 ± 0.0037	0.0791 ± 0.0039	0.0751 ± 0.0053
UCC	0.2249 ± 0.0054	0.1671 ± 0.0045	0.1341 ± 0.0038	0.1154 ± 0.0035	0.1015 ± 0.0033	0.0928 ± 0.0026	0.0866 ± 0.0028	0.0815 ± 0.0005	0.0785 ± 0.0008
UCC-NV	0.2297 ± 0.0037	0.1934 ± 0.0014	0.1705 ± 0.0000	0.1498 ± 0.0010	0.1355 ± 0.0017	0.1247 ± 0.0012	0.1161 ± 0.0002	0.1088 ± 0.0018	0.1041 ± 0.0021
CC	0.2284 ± 0.0039	0.1570 ± 0.0088	0.1276 ± 0.0069	0.1091 ± 0.0083	0.0967 ± 0.0053	0.0890 ± 0.0039	0.0841 ± 0.0012	0.0819 ± 0.0005	0.0804 ± 0.0016
SB	0.2237 ± 0.0006	0.1726 ± 0.0093	0.1487 ± 0.0084	0.1359 ± 0.0098	0.1278 ± 0.0107	0.1194 ± 0.0084	0.1131 ± 0.0093	0.1088 ± 0.0086	0.1058 ± 0.0068

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง-11 อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA

เมมเบรน	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
UCD	31.00 ±0.14	36.35 ±0.64	37.00 ±0.42	37.40 ±0.00	37.55 ±0.78	37.60 ±0.71	37.25 ±0.21	37.20 ±0.28	37.35 ±0.64
UCD-NV	29.70 ±0.42	34.30 ±0.57	34.90 ±0.57	36.25 ±0.64	36.60 ±0.71	36.95 ±0.49	36.40 ±0.42	36.40 ±0.57	36.25 ±0.35
CD	30.55 ±0.07	35.60 ±0.42	36.45 ±0.78	37.20 ±0.57	37.75 ±0.78	38.15 ±1.06	38.15 ±1.20	38.45 ±1.20	38.10 ±0.99
UCC	31.10 ±0.42	35.50 ±0.57	36.40 ±0.28	37.25 ±0.49	37.60 ±0.00	37.60 ±0.28	37.75 ±0.21	37.35 ±0.35	37.40 ±0.28
UCC-NV	29.15 ±0.21	34.05 ±0.21	34.45 ±0.21	35.65 ±0.07	35.75 ±0.35	36.10 ±0.28	36.10 ±0.57	36.15 ±1.06	36.20 ±1.14
CC	31.10 ±0.42	35.40 ±0.28	36.80 ±0.00	37.45 ±0.21	38.10 ±0.28	38.40 ±0.14	37.30 ±1.41	37.10 ±0.42	36.75 ±0.92
SB	30.15 ±0.07	32.80 ±0.85	32.05 ±0.35	32.55 ±1.91	33.10 ±1.84	33.15 ±1.48	34.00 ±0.57	33.90 ±0.28	33.70 ±0.14

ตาราง ง-12 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกและภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeA

เมมเบรน		เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
UCD	In	69.00 ±7.07	79.00 ±0.00	64.00 ± 1.41	54.50 ± 0.71	48.00 ±1.41	45.50 ±2.12	45.50 ±0.71	44.50 ±0.71	43.00 ±2.83
	Out	70.00 ±2.83	68.50 ±3.54	65.00 ±0.00	63.00 ±2.83	62.00 ±5.66	62.50 ±9.19	66.50 ±4.95	69.00 ±5.66	66.50 ±9.19
UCD-NV	In	72.00 ±1.41	83.50 ±2.12	76.00 ±2.83	69.00 ±1.41	65.00 ±1.41	63.00 ±1.41	61.50 ±0.71	61.00 ±1.41	61.50 ±2.12
	Out	67.00 ±4.24	62.00 ±0.00	59.50 ±0.71	56.50 ±4.95	58.50 ±3.54	59.50 ±2.12	62.00 ±2.83	61.50 ±0.71	62.00 ±1.41
CD	In	76.00 ±1.41	76.00 ±7.07	59.00 ±7.07	47.00 ±5.66	39.50 ±2.12	36.50 ±0.71	35.50 ±0.71	32.50 ±0.71	34.00 ±1.41
	Out	76.50 ±0.71	75.50 ±2.12	70.50 ±4.95	68.00 ±4.24	67.00 ±5.66	66.50 ±4.95	66.50 ±6.36	66.50 ±4.95	69.00 ±2.83
UCC	In	61.50 ±7.78	64.50 ±2.12	50.00 ±1.41	43.50 ±2.12	37.00 ±1.41	36.50 ±0.71	34.50 ±0.71	35.00 ±0.00	35.50 ±3.54
	Out	65.00 ±7.07	61.50 ±4.95	61.50 ±6.36	58.50 ±4.95	56.50 ±2.12	55.50 ±0.71	56.00 ±1.41	58.00 ±4.24	62.00 ±8.49
UCC-NV	In	73.50 ±0.71	90.50 ±0.71	85.00 ±1.41	79.00 ±1.41	73.50 ±2.12	70.00 ±1.41	68.00 ±1.41	66.00 ±1.41	65.00 ±2.83
	Out	70.50 ±4.95	66.50 ±0.71	64.5 0±0.71	59.00 ±4.24	59.00 ±4.24	59.00 ±1.41	60.50 ±3.54	60.50 ±4.95	62.50 ±4.95
CC	In	56.00 ±1.41	52.00 ±0.00	45.00 ±1.41	39.00 ±2.83	38.00 ±1.41	38.00 ±1.41	36.50 ±3.54	44.50 ±0.71	45.50 ±2.12
	Out	61.00 ±1.41	56.00 ±0.00	57.00 ±1.41	51.50 ± 4.95	53.50 ±0.71	54.50 ±0.71	51.50 ±6.36	65.00 ±4.24	67.00 ±5.66
SB	In	75.00 ±4.24	71.00 ±5.66	69.50 ±6.36	69.00 ±5.66	67.50 ±6.36	64.00 ±2.83	64.00 ±4.24	64.00 ±2.83	64.50 ±2.12
	Out	74.50 ±7.78	72.00 ±8.49	72.00 ±11.31	74.00 ±11.31	71.50 ±9.19	67.00 ±4.24	68.50 ±6.36	68.50 ±4.95	68.50 ±2.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

8. สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกของปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeB

ตาราง ง-13 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeB ในเทอมของอัตราในการทำแห้ง (กิโลกรัมของน้ำ/กิโลกรัมมวลข้าวเปลือก/ชั่วโมง) ที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 3.2 เมตร/วินาที

เมมเบรน	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
UCD	0	0.0713 ± 0.0016	0.0332 ± 0.0018	0.0204 ± 0.0009	0.0132 ± 0.0011	0.0086 ± 0.0005	0.0056 ± 0.0001	0.0059 ± 0.0005	0.0026 ± 0.0002
UCD-NV	0	0.0781 ± 0.0002	0.0330 ± 0.0032	0.0213 ± 0.0028	0.0114 ± 0.0023	0.0084 ± 0.0005	0.0054 ± 0.0023	0.0031 ± 0.0005	0.0006 ± 0.0012
UCC	0	0.0735 ± 0.0021	0.0344 ± 0.0005	0.0202 ± 0.0014	0.0110 ± 0.0021	0.0074 ± 0.0030	0.0050 ± 0.0007	0.0025 ± 0.0000	0.0042 ± 0.0004
CC	0	0.0786 ± 0.0005	0.0331 ± 0.0034	0.0176 ± 0.0002	0.0102 ± 0.0049	0.0067 ± 0.0007	0.0065 ± 0.0011	0.0082 ± 0.0025	0.0040 ± 0.0050

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง-14 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeB ในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก (กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลเปียก) ที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 3.2 เมตร/วินาที

เมมเบรน	**เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)**								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
UCD	0.2634 ± 0.0040	0.1921 ± 0.0054	0.1589 ± 0.0036	0.1385 ± 0.0027	0.1253 ± 0.0016	0.1167 ± 0.0022	0.1110 ± 0.0020	0.1052 ± 0.0025	0.1025 ± 0.0002
UCD-NV	0.2682 ± 0.0053	0.1901 ± 0.0054	0.1571 ± 0.0023	0.1359 ± 0.0051	0.1245 ± 0.0074	0.1161 ± 0.0079	0.1107 ± 0.0056	0.1076 ± 0.0051	0.1070 ± 0.0012
UCC	0.2642 ± 0.0035	0.1908 ± 0.0013	0.1564 ± 0.0018	0.1361 ± 0.0004	0.1252 ± 0.0025	0.1178 ± 0.0005	0.1128 ± 0.0012	0.1103 ± 0.0012	0.1061 ± 0.0016
CC	0.2663 ± 0.0015	0.1877 ± 0.0020	0.1546 ± 0.0053	0.1370 ± 0.0055	0.1268 ± 0.0104	0.1200 ± 0.0111	0.1135 ± 0.0122	0.1053 ± 0.0147	0.1013 ± 0.0097

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง-15 อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeB

เมมเบรน	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
UCD	29.00 ±0.57	29.75 ±0.21	30.85 ±0.35	31.40 ±0.28	31.55 ±0.35	32.00 ±0.57	32.30 ±1.27	32.45 ±1.20	31.95 ±0.92
UCD-NV	29.30 ±0.99	30.00 ±0.42	30.75 ±0.92	31.05 ±0.07	31.40 ±0.28	31.85 ±0.07	31.55 ±0.64	31.15 ±0.35	30.45 ±0.07
UCC	29.50 ±0.28	30.70 ±0.28	31.30 ±0.28	31.60 ±0.42	31.4 ±0.85	31.65 ±1.06	30.95 ±2.05	30.85 ±1.77	30.85 ±1.48
CC	29.80 ±0.14	30.55 ±0.35	31.45 ±0.21	31.55 ±0.35	31.30 ±0.85	32.05 ±1.06	32.80 ±1.70	32.95 ±1.91	32.85 ±1.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง-16 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกและภายในปฏิกรณ์ทำแห้งด้วยเมมเบรน TypeB

เมมเบรน		เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
UCD	In	64.00 ±2.83	59.50 ±0.71	55.50 ±2.12	52.00 ±1.41	51.50 ±0.71	50.50 ±0.71	51.00 ±2.83	50.00 ±2.83	57.50 ±2.12
	Out	66.00 ±0.00	62.50 ±2.12	60.00 ±1.41	56.50 ±2.12	55.50 ±3.54	55.00 ±2.82	55.50 ±0.71	53.50 ±0.71	60.00 ±0.00
UCV-NV	In	58.50 ±2.12	57.50 ±3.53	52.00 ±0.00	51.00 ±2.83	50.50 ±4.95	48.50 ±4.95	52.00 ±4.24	54.50 ±2.12	57.50 ±3.54
	Out	63.00 ±0.00	61.00 ±0.00	58.50 ±0.71	57.50 ±3.53	56.50 ±4.95	55.50 ±3.54	58.00 ±4.24	60.50 ±2.12	63.00 ±2.83
UCC	In	66.50 ±0.71	60.50 ±0.71	59.50 ±2.12	57.00 ±4.24	59.50 ±0.71	61.00 ±4.24	60.00 ±1.41	62.00 ±0.00	61.50 ±2.12
	Out	68.00 ±1.41	61.50 ±0.00	59.00 ±1.41	57.00 ±2.82	60.00 ±0.71	59.50 ±3.54	57.50 ±2.12	59.50 ±0.71	58.50 ±0.71
CC	In	62.00 ±1.41	55.00 ±1.41	52.00 ±0.00	53.00 ±4.24	54.00 ±8.49	54.50 ±10.61	49.50 ±10.61	47.00 ±8.49	46.00 ±7.07
	Out	61.00 ±0.00	56.00 ±2.83	53.00 ±1.41	53.50 ±4.95	54.50 ±7.78	55.50 ±9.19	52.50 ±7.78	49.00 ±7.07	48.00 ±7.07

9. สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในระบบอื่นๆ

ตาราง ง-17 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในเทอมของอัตราในการทำแห้ง (กิโลกรัมของน้ำ/กิโลกรัมมวลข้าวเปลือก/ชั่วโมง)

	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
NO	0	0.0402 ± 0.0007	0.0243 ± 0.0012	0.0196 ± 0.0002	0.0132 ± 0.0004	0.0112 ± 0.0007	0.0091 ± 0.0002	0.0076 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0002
NC	0	0.0527 ± 0.0007	0.0283 ± 0.0012	0.0174 ± 0.0002	0.0164 ± 0.0004	0.0059 ± 0.0007	0.0061 ± 0.0002	0.0025 ± 0.0005	0.0022 ± 0.0002

ตาราง ง-18 สมรรถนะในการทำแห้งข้าวเปลือกในเทอมของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือก (กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลเปียก)

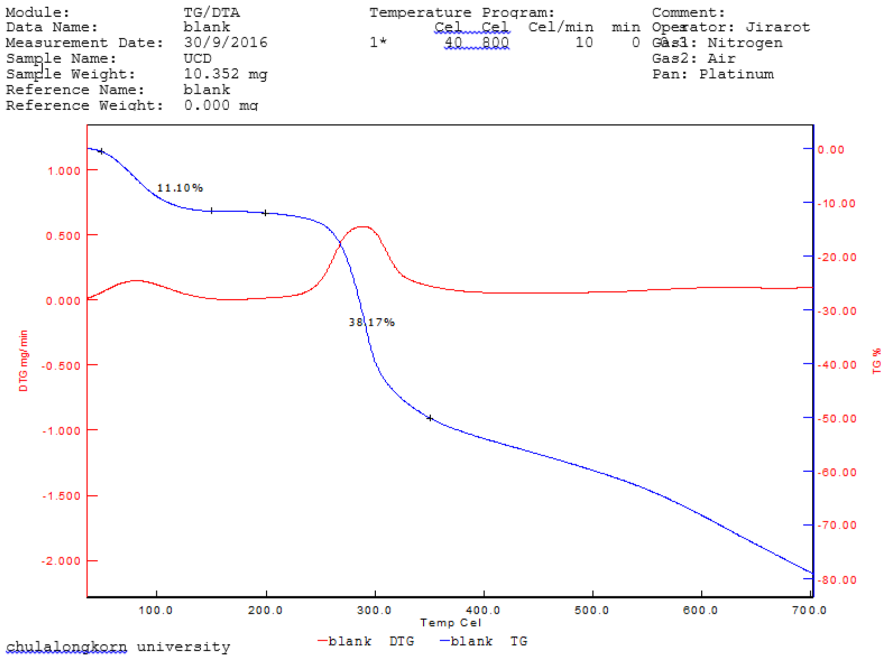
	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
NO	0.2138 ± 0.0001	0.1736 ± 0.0006	0.1493 ± 0.0007	0.1297 ± 0.0008	0.1165 ± 0.0005	0.1052 ± 0.0012	0.0961 ± 0.0010	0.0085 ± 0.0005	0.0861 ± 0.0007
NC	0.2276 ± 0.0034	0.1749 ± 0.0044	0.1466 ± 0.0046	0.1292 ± 0.0009	0.1128 ± 0.0003	0.1070 ± 0.0012	0.1009 ± 0.0011	0.0984 ± 0.0003	0.0961 ± 0.0014

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

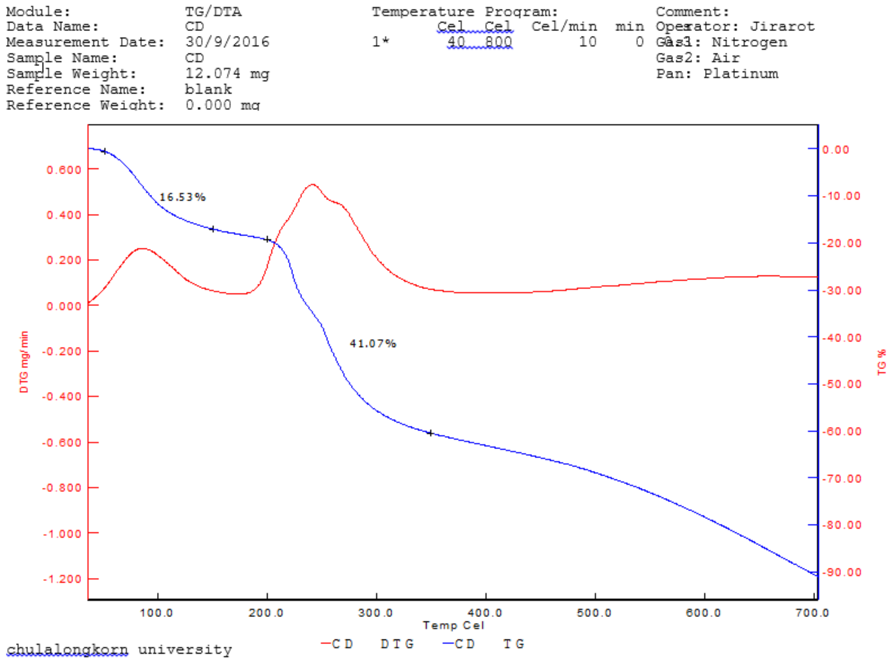
ตาราง ง-19 อุณหภูมิในระหว่างการทำแห้ง

	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
NO	40	40	40	40	40	40	40	40	40
NC	34.2	36.3	36.58	37.25	37.60	37.60	38.88	38.68	38.70

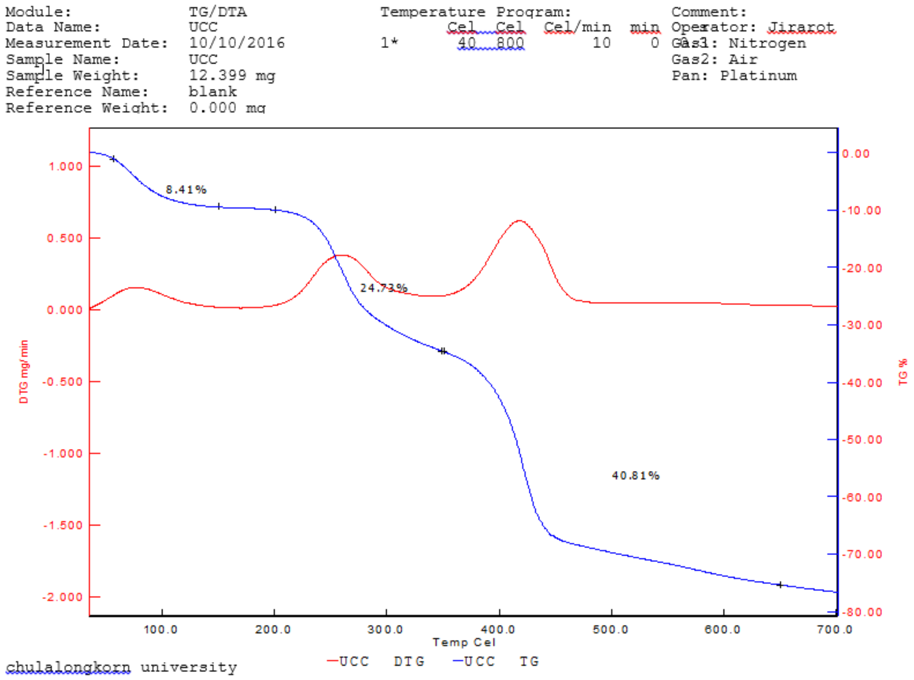
10. ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนด้วยเทคนิค TGA



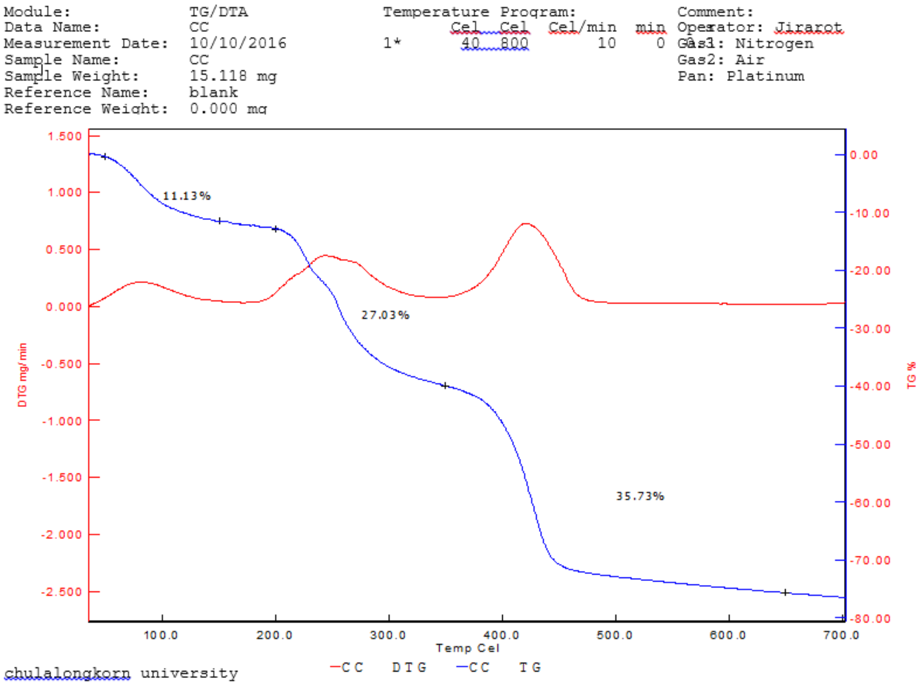
รูป ง- 1 TGA thermogram ของเมมเบรนเนื้อแน่นที่ไม่มีการเชื่อมขวาง



รูป ง-2 TGA thermogram ของเมมเบรนเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง



รูป ง-3 TGA thermogram ของเมมเบรนคอมโพสิตที่ไม่มีการเชื่อมขวาง



รูป ง-4 TGA thermogram ของเมมเบรนคอมโพสิตที่มีการเชื่อมขวาง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรโรจน์ อานุสาร เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557 จนสำเร็จปีการศึกษา 2559 และเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 26 (The 26th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (TICHE2016)) ณ ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University