

การดึงนำออกจากเปลือกกล้วยด้วยปฏิกรณ์เอนไซม์โคโคซานเวเพอเพอร์มิเอเตอร์



นางสาวดารารัตน์ ปากวิเศษ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEWATERING OF BANANA PEEL BY CHITOSAN MEMBRANE VAPOR PERMEATOR

Miss Dararat Pakwiset



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยด้วยปฏิกรณ์เมมเบรนไคโต

ซานเวเพอเพอร์มิเอเตอร์

โดย

นางสาวดารารัตน์ ปากวิเศษ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)



# # 5671963023 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: DEWATERING / BANANA PEEL / CHITOSAN / MEMBRANE / HEATING VALUE

DARARAT PAKWISSET: DEWATERING OF BANANA PEEL BY CHITOSAN MEMBRANE  
VAPOR PERMEATOR. ADVISOR: ASSOC. PROF. KHANTONG SOONTARAPA, Ph.D.,  
63 pp.

A reactor equipped with chitosan membrane and operating according to vapor permeation principle was used for dewatering the banana peels. The water vapor evaporated from banana peels by air flow was permeated through the membrane by the driving force from a vacuum pump at the permeate side. The dewatering of cultivate and Cavendish banana peels were studied. The commercial crosslinked dense and crosslinked composite- on- spunbond chitosan membranes were used. Their contact angles were  $89.3 \pm 1.1$  and  $70.2 \pm 3.5$  degree, respectively. The dewatering of banana peels at room temperature were finished within 2 hrs with 25 l/min circulating air. The moisture content of cultivate and Cavendish banana peels were reduced from 80% to  $16.08 \pm 0.003$  and  $20.06 \pm 0.00\%$ , respectively. Their heating values were increased by 34.4 and 31.2%, respectively.



Department: Chemical Technology      Student's Signature .....

Field of Study: Fuel Technology      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูง จาก ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรามา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำการวิจัย ตรวจสอบและแก้ไขแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย การติดตามความก้าวหน้ามาโดยตลอด ผู้ทำวิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาท่านรองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรามา เป็นอย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือวิเคราะห์ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส เอส เมมเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเมมเบอร์ไดโอดานเพื่อใช้ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และดร. ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต กรรมการภายนอก ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการคุมสอบตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยและผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่บุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวก สำหรับการใช้เครื่องมือและการทดสอบวิเคราะห์ต่างๆและการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อนๆและน้องๆ นิสิตภาควิชาเคมีเทคนิคที่ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจและ ข้อคิด ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษา การสนับสนุนในทุกๆด้านและเป็นกำลังใจให้ผู้ทำวิจัยเสมอมาตลอดการทำงานวิจัยจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป .....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 กล้วย (Banana).....	3
2.1.1 ชนิดของกล้วย .....	3
2.1.1.1 กล้วยน้ำว้า (Cultivated banana).....	3
2.1.1.2 กล้วยหอม (Cavendish banana).....	3
2.2 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน.....	5
2.3 รูปแบบของการกรองด้วยเมมเบรน (filtration processes of membrane).....	5
2.3.1 การกรองแบบ (Dead-end filtration).....	5
2.3.2 การกรองแบบไหลขวาง (cross-flow filtration).....	5
2.4 การผลิตเมมเบรน (Production of membrane).....	6

2.4.1 แบบเปียก (Wet process).....	6
2.4.2 แบบแห้ง (Dry process).....	6
2.5 ลักษณะทางโครงสร้างของเมมเบรน.....	7
2.5.1 โครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric structure).....	7
2.5.2 โครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric structure).....	7
2.6 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน.....	8
2.6.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF).....	8
2.6.2 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF).....	9
2.6.3 นาโนฟิลเตรชัน Nanofiltration, NF).....	9
2.6.4 ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO).....	9
2.6.5 เพอร์แวพอเรชัน (Pervaporation).....	9
2.6.6 การแยกแก๊สด้วยเมมเบรน (Gas separation membrane).....	9
2.7 กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation).....	11
2.8 มอดูลแบบกรอบและกรอบ (Plate and frame module).....	12
2.9 ไคติน (chitin).....	12
2.10 ไคโตซาน (Chitosan).....	13
2.11 กระบวนการผลิตไคตินและไคโตซาน.....	15
2.11.1 กระบวนการกำจัดโปรตีน (Deproteinization).....	15
2.11.2 กระบวนการกำจัดเกลือแร่ (Deminerlization).....	15
2.11.3 กระบวนการกำจัดสี (Decoloration).....	15
2.11.4 กระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซิทิล (Deacetylation).....	15
2.12 การดึงน้ำออก (Dewatering).....	17
2.13 ปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane reactor).....	17



2.14 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่3 เครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัตถุประสงค์.....	20
3.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	20
3.3 อุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.4 ปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ (Vapor Permeator).....	21
3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน.....	21
3.5.1.1 ความชอบน้ำของเมมเบรน.....	21
3.5.1.2 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเมมเบรน.....	22
3.5.1.3 ค่าปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรน (Membrane water uptake).....	24
3.5.1.4 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรน.....	25
3.5.2 ขั้นตอนการดำเนินงานในเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์.....	26
3.5.3 ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการดึงน้ำออกด้วยเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอ เตอร์.....	27
3.5.3.1 ศึกษาผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย.....	27
3.5.3.2 ศึกษาผลของเมมเบรนและผลของการหมุนเวียนอากาศต่ออัตราการดึงน้ำ ออก.....	27
3.5.3.3 ศึกษาผลของอัตราการไหลเวียนอากาศในการดึงน้ำออก.....	28
3.5.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกของปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์.....	28
3.5.4.1 อัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย.....	28
3.5.4.2 ค่าความร้อนสูงสุด (High heating value).....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	30
4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติเมมเบรนไคโตซาน.....	30

4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของเมมเบรน .....	31
4.1.2 ผลการศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซาน .....	32
4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรน .....	33
4.2 ผลการศึกษาตัวแปรในกระบวนการดัดน้ำออกด้วยเครื่องปฏิกรณ์เวพอเปอร์มิเตอร์.....	34
4.2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์เวพอเปอร์มิเตอร์ .....	34
4.2.2 ผลของการมีเมมเบรนและผลของการหมุนเวียนอากาศต่ออัตราการดัดน้ำออก .....	35
4.2.3 ผลของอัตราการไหลเวียนอากาศต่ออัตราการดัดน้ำออก .....	37
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดัดน้ำออกของปฏิกรณ์เวพอเปอร์มิเตอร์.....	38
4.3.1 ผลของอัตราการดัดน้ำออกจากเปลือกกล้วย .....	38
4.3.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดัดน้ำออกจากเปลือกกล้วยในปฏิกรณ์เวพอเปอร์มิเตอร์.....	41
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสุด (High heating value).....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	46
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	47
รายการอ้างอิง .....	48
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน..	53
1. การคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน .....	53
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณอัตราการดัดน้ำออกและปริมาณความชื้นเปลือกกล้วย.....	54
1. ความชื้น (moisture content).....	54
1.1 การคำนวณจากพื้นฐานมวลชื้น (Wet basis).....	54
1.2 การคำนวณจากพื้นฐานมวลแห้ง (Dry basis) .....	54

2. การคำนวณค่าความชื้นในเปลือกกล้วยในงานวิจัยนี้ .....	54
2.1 วิธีการวิเคราะห์ .....	54
3. การคำนวณอัตราการดิ่งน้ำออกจากเปลือกกล้วยในงานวิจัยนี้ .....	55
4. การหาค่าความร้อนสูงสุดของเปลือกกล้วยหลังผ่านกระบวนการดิ่งน้ำออก .....	56
ภาคผนวก ค ค่าที่ได้จากการทดลอง .....	58
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	63



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงชนิดของกล้วย (ก) กล้วยน้ำว้า (ข) กล้วยหอม ..... 4
รูปที่ 2.2	หลักการเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน ..... 5
รูปที่ 2.3	กระบวนการกรองแบบไหลขวาง (ภาพด้านซ้าย) และแบบปิดตาย (ภาพด้านขวา) ..... 6
รูปที่ 2.4	ลักษณะโครงสร้างเมมเบรนแบบสมมาตร ..... 7
รูปที่ 2.5	ลักษณะโครงสร้างเมมเบรนแบบไม่สมมาตร ..... 8
รูปที่ 2.6	ไดอะแกรมเกี่ยวกับกระบวนการแยกเมมเบรนที่มีขนาดของสารละลายต่าง ..... 10
รูปที่ 2.7	กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) ..... 11
รูปที่ 2.8	ลักษณะมอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module) ..... 12
รูปที่ 2.9	โครงสร้างทางเคมีของไคติน ..... 13
รูปที่ 2.10	โครงสร้างของไคติน (บน) และไคโตซาน (ล่าง) ..... 14
รูปที่ 2.11	โครงสร้างทางเคมีของไคโตซานที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก ..... 14
รูปที่ 2.12	แผนภาพกระบวนการผลิตไคตินและไคโตซาน ..... 16
รูปที่ 2.13	ผลิตภัณฑ์ไคตินบริสุทธิ์ ..... 16
รูปที่ 2.14	ชุดทดสอบการดึงความชื้นออกจากเปลือกกล้วย ..... 18
รูปที่ 3.1	ลักษณะเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ ..... 21
รูปที่ 3.2	เครื่องวัดมุมสัมผัส (Standard contact angle goniometer) Ramehart Instrument รุ่น 200F1 ..... 22
รูปที่ 3.3	การเตรียมขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 ..... 23
รูปที่ 3.4	การเตรียมขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ..... 23
รูปที่ 3.5	เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ..... 24
รูปที่ 3.6	การแช่เมมเบรนตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด ในน้ำบริสุทธิ์ที่เป็นภาชนะปิด ..... 25
รูปที่ 3.7	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน TG/DTA analyzer ..... 25

รูปที่ 3.8	ลักษณะของชั้นเมมเบรนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงความร้อน.....	26
รูปที่ 3.9	ตัวอย่างเปลือกกล้วย (Banana peel) ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร.....	27
รูปที่ 3.10	ไดอะแกรมชุดการทดลองศึกษาผลของเมมเบรนและการหมุนเวียนอากาศ .....	28
รูปที่ 3.11	เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb calorimeter) .....	29
รูปที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน .....	30
รูปที่ 4.2	ภาพ SEM ตามแนวภาคตัดขวางของเมมเบรนไคโตซาน .....	32
รูปที่ 4.3	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก ..	32
รูปที่ 4.4	กราฟการสลายตัวทางความร้อนของเมมเบรนไคโตซาน (TGA thermogram).....	34
รูปที่ 4.5	ผลของระยะเวลาต่ออัตราการดื่งน้ำออก ที่อัตราการไหลเวียนของอากาศ 25 ลิตร ต่อนาที .....	35
รูปที่ 4.6	ผลของลักษณะรูปแบบการดำเนินปฏิกิริยเวเพอเพอร์มิเอเตอร์ต่ออัตราการดื่งน้ำ ออก .....	37
รูปที่ 4.7	ผลของอัตราการไหลเวียนอากาศต่ออัตราการดื่งน้ำออก .....	38
รูปที่ 4.8	ประสิทธิภาพการดื่งน้ำออกจากเปลือกกล้วยในปฏิกิริยเวเพอเพอร์มิเอเตอร์ .....	39
รูปที่ 4.9	อัตราการดื่งน้ำออกจากเปลือกกล้วยในปฏิกิริยเวเพอเพอร์มิเอเตอร์ .....	40
รูปที่ 4.10	ค่าความชื้นของเปลือกกล้วย ณ เวลาต่าง ๆ ในปฏิกิริยเวเพอเพอร์มิเอเตอร์ .....	41
รูปที่ 4.11	ผลของอุณหภูมิต่อการดื่งน้ำออก .....	43

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่ใช้ความดันหรือความดันย่อยเป็นแรงขับเคลื่อน..... 10
ตารางที่ 4.1	ความหนาของเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ..... 30
ตารางที่ 4.2	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยืด ..... 31
ตารางที่ 4.3	ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน ..... 33
ตารางที่ 4.4	ค่ามัมสัมผัสของเมมเบรนไคโตซาน..... 33
ตารางที่ 4.5	ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดึงน้ำออก ..... 43
ตารางที่ 4.6	ค่าความร้อนของเปลือกกล้วยหลังจากการทำแห้งในปฏิกรณ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง... 45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญในการตอบสนองความต้องการของประชาชน และเป็นปัจจัยพื้นฐานของการผลิตในภาคธุรกิจ อุตสาหกรรม และอื่น ๆ อีกมากมาย ทำให้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (Non-renewable energy resource) มีปริมาณลดน้อยลง จึงมีความสนใจพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลกันอย่างมากขึ้น โดยขยะชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ แต่ขยะชีวมวลโดยทั่วไปมีความชื้นสูง ทำให้ต้องมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่ง เพื่อไล่ความชื้นออกจากขยะชีวมวลก่อนที่จะถูกตีไฟให้พลังงานความร้อน งานวิจัยนี้สนใจการใช้เปลือกกล้วยเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกจากขยะชีวมวล เนื่องจากพบและปลูกในทุกภูมิภาคของประเทศไทย มีการนำมาบริโภคโดยตรงและบริโภคในรูปของผลิตภัณฑ์แปรรูปมากมายหลากหลายรูปแบบ ทำให้มีเปลือกเหลือทิ้งเป็นปริมาณมาก การนำเปลือกกล้วยมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกจึงช่วยลดปริมาณขยะและยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับขยะทางการเกษตร แต่เนื่องจากเปลือกกล้วยมีองค์ประกอบน้ำในเซลล์สูง ซึ่งวิธีการไล่ความชื้นมีหลายวิธี เช่น การตากแดด แต่มีข้อจำกัดขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ทำให้ไม่สามารถควบคุมสภาวะการทำแห้งได้แน่นอนและต้องใช้เวลาที่มาก เทคโนโลยีเมมเบรนเป็นทางเลือกหนึ่งที่สนใจในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้เป็นกระบวนการขั้นต้นในการดึงน้ำออกจากเซลล์เปลือกกล้วยก่อนที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เพราะสามารถดึงความชื้นออกจากวัสดุด้วยเมมเบรนโดยปฏิกรณ์เวพออร์มิเอเตอร์ ได้อย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลาที่กำหนดโดยไม่ต้องคำนึงถึงสภาพภูมิอากาศ และสามารถทำได้ในพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดอีกด้วย และเพื่อให้เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืน ลดการพึ่งพาวัสดุเมมเบรนนำเข้าจากต่างประเทศ งานวิจัยนี้สนใจใช้เมมเบรนไคโตซานที่ผลิตในประเทศ ตั้งแต่วัตถุดิบตั้งต้นคือไคตินในเปลือกกุ้งผ่านกระบวนการผลิตกลายเป็นไคโตซาน และนำมาขึ้นรูปต่อยอดเป็นแผ่นเมมเบรน

อุปกรณ์ทำแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำงานตามหลักกระบวนการเวพออร์มิเอชัน (Vapor permeation) จึงเรียกว่า “ปฏิกรณ์เวพออร์มิเอเตอร์” (Vapor permeator) โดยให้มีการป้อนอากาศไหลผ่านวัสดุเพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากวัสดุในรูปของไอน้ำมากขึ้น แล้วให้อากาศชื้นแพร่ผ่านเมมเบรนออกไป โดยแรงขับเคลื่อนในการแพร่ผ่านเมมเบรน (Permeation driving force) ของกระบวนการนี้คือความแตกต่างของความดันย่อย (Partial pressure) ทางด้านสารป้อนกับด้านเพอร์มิเอตของเมมเบรน จึงมีการต่อบัมสุญญากาศทางด้านเพอร์มิเอตเพื่อสร้างแรงขับเคลื่อนให้เกิดการถ่ายโอนมวลมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

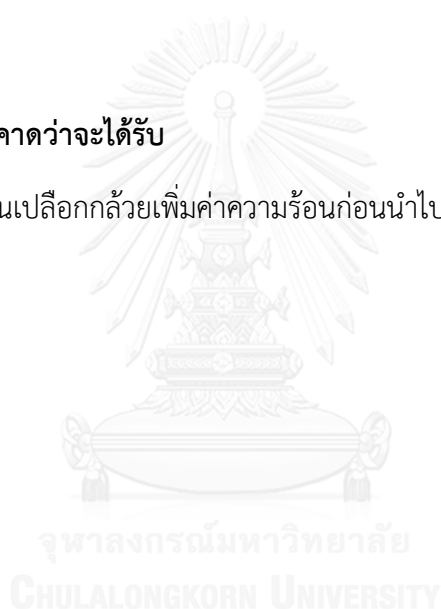
ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เปลือกกล้วยหอมและเปลือกกล้วยน้ำว้าแห้งเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกด้วยปฏิกรณ์เมมเบรนโคไตซานที่ทำงานตามหลักการเวพอเพอร์มิเอชัน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการดึงน้ำออกจากชีวมวล (เปลือกกล้วยหอมกับเปลือกกล้วยน้ำว้า) ด้วยปฏิกรณ์เมมเบรนโคไตซานที่ทำงานตามหลักการกระบวนการเวพอเพอร์มิเอชัน (ปฏิกรณ์เวพอเพอร์มิเอเตอร์; Vapor permeator) จากค่าความชื้นที่ลดลงและค่าความร้อนที่สูงขึ้นของเปลือกกล้วย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถลดความชื้นเปลือกกล้วยเพิ่มค่าความร้อนก่อนนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิง





## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล้วย (Banana)

เป็นพันธุ์ไม้ล้มลุกขนาดใหญ่จัดอยู่ในสกุล Musaceae มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นไม้ผลที่สำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย กล้วยมักชอบสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและอบอู่ อุณหภูมิในช่วง 15-35 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่างของดินที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 4.5-7 ระยะเวลาการปลูกถึงเก็บเกี่ยวผลใช้เวลาประมาณ 1 ปี กล้วยในวงศ์ Musaceae เป็นกล้วยที่ได้รับความนิยมในการปลูกมีอยู่ 2 สกุล (genus) คือ Ensete และ Musa กล้วยในสกุล Ensete มีลักษณะที่สำคัญ คือ ลำต้นไม่มีการแตกหน่อผล บริโภคไม่ได้ ส่วนกล้วยในสกุล Musa แบ่งออกเป็น 5 Section คือ Australimusa, Callimusa, Ingentimusa, Rhodochlamys และ Eumusa กล้วยส่วนใหญ่ที่สามารถบริโภคได้จัดอยู่ใน Section Eumusa ซึ่งถือกำเนิดมาจากกล้วยป่า 2 สปีชีส์ (species) คือ *M. acuminata* Colla และ *M. balbisiana* Colla [1] ซึ่งในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดเฉพาะกล้วย 2 ชนิดที่ได้ทำการศึกษาด้วยงานวิจัยนี้เท่านั้น

#### 2.1.1 ชนิดของกล้วย

##### 2.1.1.1 กล้วยน้ำว้า (Cultivated banana)

กล้วยน้ำว้า มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า (*Musa sapientum* Linn (ABB Group)) เป็นกล้วยลูกผสมที่พัฒนามาจากกล้วยป่ากับกล้วยตานี มีถิ่นกำเนิดแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ นิยมบริโภคกันแพร่หลาย ปลูกง่าย รสชาติดี กล้วยน้ำว้าแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามสีของเนื้อ คือ น้ำว้าแดง น้ำว้าขาว และน้ำว้าเหลือง [1, 2] ซึ่งกล้วยน้ำว้า แสดงดังรูปที่ 2.1 (ก)

##### 2.1.1.2. กล้วยหอม (Cavendish banana)

กล้วยหอม มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ (*Musa acuminata* (AAA Group)) เป็นกล้วยที่มีกำเนิดมาจากกล้วยป่า ซึ่งอาจเกิดจากการผสมภายในชนิดย่อยเดียวกัน (subspecies) หรือระหว่างชนิดย่อยที่ต่างกัน ลักษณะรูปร่างยาว เมื่อสุกเปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง เนื้อมีสีครีม-ส้มอ่อนๆ รสหวาน และมีกลิ่นหอม ไม่มีเมล็ด [3] โดยกล้วยหอม แสดงดังรูปที่ 2.1 (ข)

เนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่ปลูกง่ายในทุกภาคของประเทศเติบโตเร็ว ให้ผลตลอดปี ผลกล้วยเหมาะสำหรับ การบริโภคทุกเพศทุกวัย ตั้งแต่ทารกจนถึงวัยชรา เพราะเป็นผลไม้ที่อุดมด้วย

คุณค่าทางอาหารทั้งการบริโภคสด หรือ การแปรรูปเป็นอาหารทั้งคาวและหวาน ส่วนอื่น ๆ ของกล้วยยังสามารถนำไปใช้ทำประโยชน์ได้หลากหลาย

การใช้ประโยชน์จากกล้วย โดยแปรรูปกล้วยเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตัวอย่างเช่น กล้วยตาก กล้วยฉาบ กล้วยกวน กล้วยอบกรอบ และผลิตภัณฑ์กล้วยอื่นๆ เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการแปรรูปกล้วยดังกล่าว ทำให้เปลือกกล้วยเหลือทิ้ง กลายเป็นขยะของเสีย ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ส่งกลิ่นเหม็น เป็นแหล่งเพาะพันธุ์แมลงวัน และแพร่กระจายของเชื้อโรค หากมีฝนตกและน้ำท่วมขัง ดังนั้นเพื่อใช้ประโยชน์ของเปลือกกล้วยเหลือทิ้ง ที่เป็นแนวทางในการลดปัญหาของขยะจากเปลือกกล้วย ด้วยการนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นสูงมากจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรง อาจจะต้องมีการลดความชื้นก่อนการนำไปผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยงานวิจัยนี้สนใจนำเปลือกกล้วยมาผ่านกระบวนการดึงน้ำออก (Dewatering) เพื่อลดความชื้น ก่อนนำไปเผาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเชื้อเพลิง ซึ่งโดยส่วนใหญ่เปลือกกล้วยมีความชื้นประมาณ 70-80% (ฐานมวลชื้น) ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งงานวิจัยนี้อาจเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางเกษตรและเป็นการสร้างข้อมูลเพื่อนำไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ให้แก่ผู้สนใจ และนักธุรกิจ หรืออุตสาหกรรม

(ก)



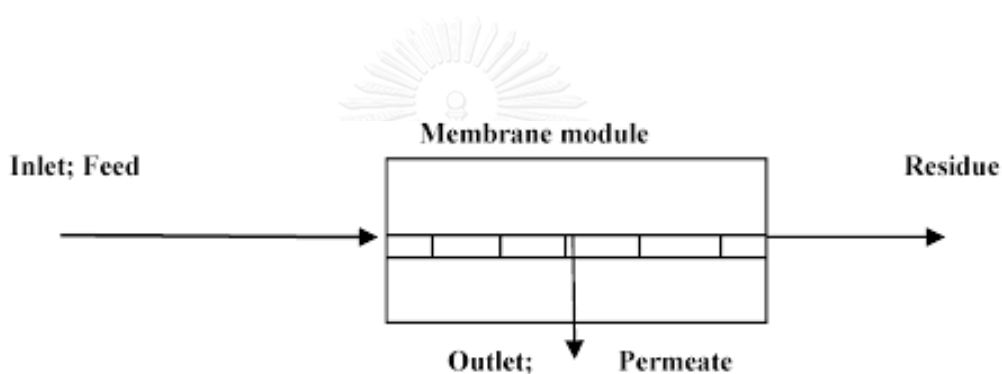
(ข)



รูปที่ 2.1 แสดงชนิดของกล้วย (ก) กล้วยน้ำว้า (ข) กล้วยหอม [4]

## 2.2 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน

เมมเบรน (Membrane) เยื่อเลือกผ่านที่ยอมให้สารบางชนิดผ่านไปได้ โดยจะเป็นตัวกลางขวางกั้นของไหลสองเฟส เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน แสดงดังรูปที่ 2.2 มีสารละลายป้อน (Feed) สารที่แพร่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) และสารที่เหลืออยู่ไม่สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) โดยอาศัยแรงขับเคลื่อน (Driving force) เป็นตัวช่วยที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล แรงขับเคลื่อนมีหลายรูปแบบ ตัวอย่างของแรงขับเคลื่อน ได้แก่ ผลต่างของความดัน อุณหภูมิ ผลต่างความเข้มข้น หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นต้น โดยกระบวนการแยกจะเกิดขึ้นทางด้านความหนาของเมมเบรน โดยเมมเบรนส่วนใหญ่จะมีด้านความหนาน้อยกว่าด้านความกว้าง เพื่อช่วยลดความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้น [5]



รูปที่ 2.2 หลักการเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน [5]

## 2.3 รูปแบบของการกรองด้วยเมมเบรน (filtration processes of membrane)

รูปแบบของการกรองด้วยเมมเบรน แบ่งออกเป็น 2 ระบบ จะแสดงดังรูปที่ 2.3

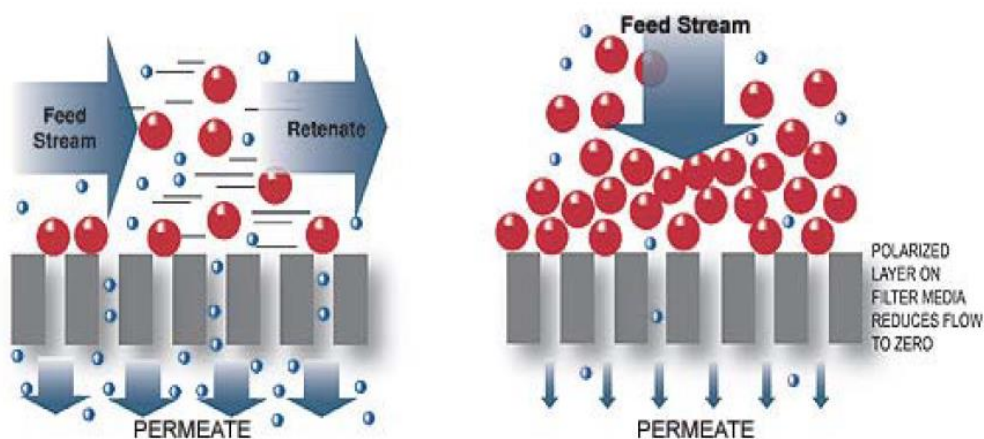
### 2.3.1 การกรองแบบ (Dead-end filtration)

สารละลายถูกป้อนในแนวตั้งฉากกับแผ่นเมมเบรน ซึ่งในทิศทางการป้อนรูปแบบนี้ อาจมีผลให้เกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนเป็นชั้นๆ เรียกว่า ชั้นเค้ก (Cake layer) เนื่องจากการสะสมของชั้นเค้ก มีผลทำให้ต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดเค้ก ทำให้ฟลักซ์ (Flux) ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการกรองแบบนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็กมาก และมีความเข้มข้นต่ำ

### 2.3.2 การกรองแบบไหลขวาง (cross-flow filtration)

สารละลายถูกป้อนในแนวขนานกับแผ่นเมมเบรน ซึ่งการไหลรูปแบบนี้จะช่วยลดการสะสมอนุภาคบนแผ่นเมมเบรน เนื่องจากแรงเฉือนมีความสามารถกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าเมมเบรน

ลดอัตราการเกิดฟาว์ลิง (Fouling) ของอนุภาคบนผิวหน้าเมมเบรนได้ และฟลักซ์ไม่ลดลง เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงๆ [6]



รูปที่ 2.3 กระบวนการกรองแบบไหลขวาง (ภาพด้านซ้าย) และแบบปิดตาย (ภาพด้านขวา) [6]

## 2.4 การผลิตเมมเบรน (Production of membrane)

โดยส่วนใหญ่เมมเบรนที่นำมาใช้ ผลิตด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion method) การเปลี่ยนเฟส คือการทำให้สารละลายพอลิเมอร์ เปลี่ยนจากสารละลายเนื้อเดียวเป็นสารละลายเนื้อผสม เกิดการแยกเป็น 2 เฟส เฟสที่มีปริมาณพอลิเมอร์มาก และเฟสที่มีปริมาณพอลิเมอร์น้อย ซึ่งเฟสที่มีปริมาณพอลิเมอร์มากก็จะแข็งตัวกลายเป็นส่วนเนื้อ ส่วนเฟสที่มีปริมาณพอลิเมอร์น้อย จะกลายเป็นช่องว่างซึ่ง รูพรุนนี้จะเกิดจากการระเหยของตัวทำละลายออกจากสารละลายพอลิเมอร์ โดยวิธีการเปลี่ยนเฟส มี 2 แบบ คือ แบบเปียกและแบบแห้ง

### 2.4.1 แบบเปียก (Wet process)

กระบวนการแบบเปียก จะมีการระเหยของตัวทำละลายบางส่วน แล้วตัวที่ไม่ละลายก็จะแข็งตัว เมมเบรนที่ได้ คือ เมมเบรนแบบไม่สมมาตร (Asymmetric)

### 2.4.2 แบบแห้ง (Dry process)

กระบวนการแบบแห้งจะมีการระเหยของตัวทำละลายทั้งหมด เมมเบรนที่ได้จะเป็นเมมเบรนแบบสมมาตร (Symmetric) มีโครงสร้างแบบเนื้อแน่นและ โครงสร้างแบบรูพรุน [7]

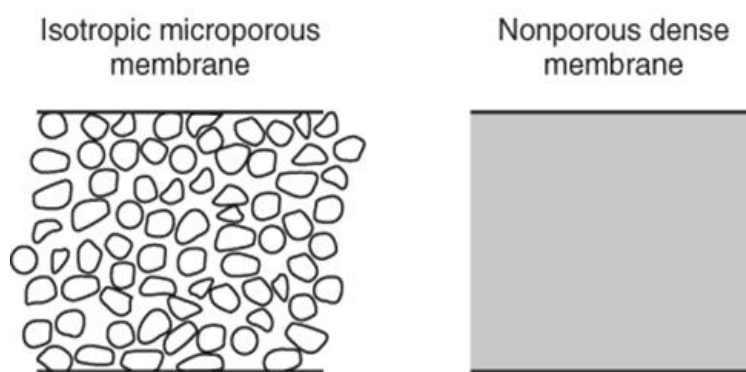
## 2.5 ลักษณะทางโครงสร้างของเมมเบรน

ลักษณะโครงสร้างของเมมเบรนในภาคตัดขวางแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

### 2.5.1 โครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric structure)

เมมเบรนแบบสมมาตรเป็นเมมเบรนที่มีลักษณะเหมือนกันตลอดภาคตัดขวาง (ด้านความหนา) มีความหนา 10–200 ไมโครเมตร แบ่งได้เป็น 2 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2.4

1. เมมเบรนแบบรูพรุน (Porous membrane) เมมเบรนชนิดนี้มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเท่ากันตลอดความหนา ทำให้สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนออกได้และยอมให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนผ่านเมมเบรนไปได้
2. เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (Dense membrane) เมมเบรนชนิดนี้จะมีความหนาแน่นของเนื้อเมมเบรน โดยเมื่อส่องดูด้วยเครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) อาจจะไม่เห็นรูพรุนขนาดใกล้เคียงหรือไม่เห็น รูพรุนสม่ำเสมอตลอดภาคตัดขวางของเมมเบรน [7, 8]



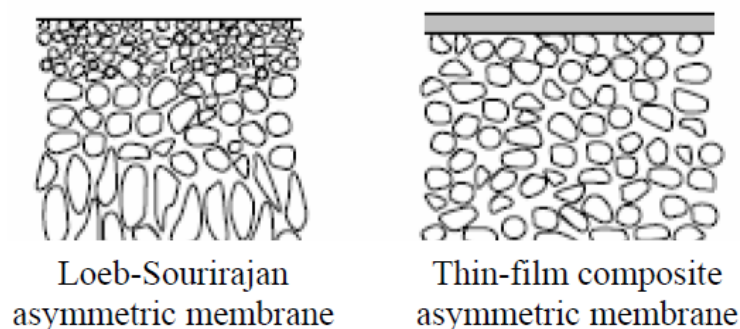
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างเมมเบรนแบบสมมาตร [8]

### 2.5.2 โครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric structure)

เมมเบรนโครงสร้างแบบไม่สมมาตร มีโครงสร้างขนาดรูพรุนไม่เท่ากันโดยผิวหน้าด้านหนึ่งเป็นชั้นหนาแน่น หรือมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าผิวหน้าอีกด้าน การแยกจะเกิดในชั้นนี้ (Selective layer) ในส่วนของรูพรุนขนาดใหญ่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้ชั้นการแยก (Support layer) แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งโครงสร้างเมมเบรนชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน

1. Loeb-Sourirajan asymmetric membrane เป็นเมมเบรนที่ไม่สมมาตรที่เตรียมจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน โดยมีชั้นผิวอาจมีรูหรือไม่มีรู (dense top layer) ซึ่งจะหนา 0.1-0.5 ไมครอน ชั้นรองรับ (porous sublayer) รูพรุนจะหนา 50-150 ไมครอน

2. Composite asymmetric membrane แบบไม่สมมาตรเชิงประกอบ ได้จากการเตรียมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ผิวชั้นบนกับชั้นล่างเป็นพอลิเมอร์คนละชนิดกัน โดยชั้นล่างเป็นชั้นรองรับ (support layer) การสร้างชั้นผิว (active layer) บนชั้นรองรับมีความหนา 50 นาโนเมตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสูงขึ้น โดยชั้นผิว จะมีรูพรุนขนาดเล็ก และมีความสามารถในการแยกสูงกว่าชั้นรองรับ [7, 8]



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างเมมเบรนแบบไม่สมมาตร [8]

## 2.6 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

สามารถจำแนกได้หลายประเภท ตามขนาดของอนุภาค รูพรุน ลักษณะแรงขับเคลื่อนและเฟสของสารป้อนและเพอร์มิเอต ซึ่งจะแบ่งได้ดังต่อไปนี้ ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO) เพอร์แวพอเรชัน (Pervaporation) เวพอร์เพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) การแยกแก๊สด้วยเมมเบรน (Gas separation membrane) กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนสามารถจำแนก ตามขนาดของอนุภาคที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ดังรูปที่ 2.6 และประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่ใช้ความดันหรือความดันย่อย เป็นแรงขับเคลื่อนแสดง ดังตารางที่ 2.1

### 2.6.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)

กระบวนการเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารละลายพวก สารแขวนลอย คอลลอยด์ และอิมัลชัน ผ่านรูพรุนที่มีขนาดในช่วง 0.05-20 ไมโครเมตร ใช้ผลต่างของความดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกสารละลายผ่านเมมเบรน สำหรับแยกสารละลายแขวนลอยนำไปใช้ในด้านการบำบัดน้ำทิ้ง

### 2.6.2 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

กระบวนการที่ใช้แยกโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คอลลอยด์ จุลินทรีย์ และสารอื่นๆออกจากโมเลกุลขนาดเล็ก ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 300-5,000 ดาลตัน ตัวอย่างที่แยกหรือเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการนี้คือ นํ้านม นํ้าผลไม้ สารละลายเอ็นไซม์ สารปฏิชีวนะ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ความดันในการป้อนสารละลาย ความดันในช่วง 2-10 บาร์ เมมเบรนที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเมมเบรนแบบไม่สมมาตร และเป็นเมมเบรนที่มีรูพรุนหรือ molecular weight cut off (MWCO) 1-300 กิโลดาลตัน (kDa)

### 2.6.3 นาโนฟิลเตรชัน Nanofiltration, NF)

เป็นกระบวนการที่ใกล้เคียงกับออสโมซิสผ่นกลับ ใช้ผลต่างความดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 1000 จากสารละลาย

### 2.6.4 ออสโมซิสผ่นกลับ (Reverse osmosis, RO)

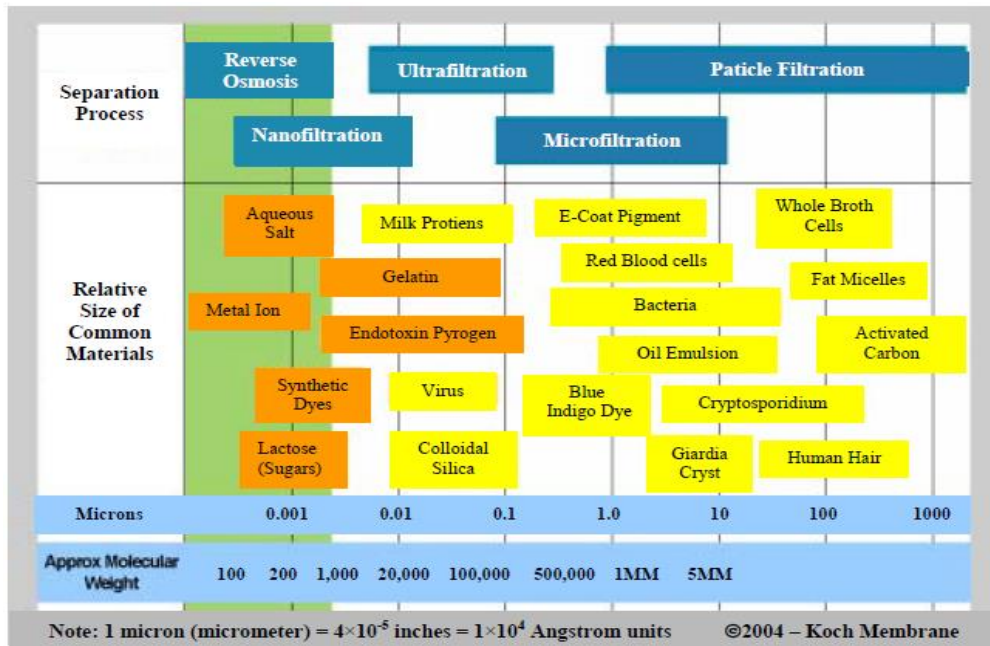
เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่มีรูพรุนใช้ผลต่างความดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 เช่น เกลือ น้ำตาลออกจากสารละลายที่ยอมให้น้ำผ่านเมมเบรน

### 2.6.5 เพอร์แวกพอเรชัน (Pervaporation)

เป็นกระบวนการแยกเมมเบรน ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ ใช้ผลต่างความดัน ผลต่างอุณหภูมิ เป็นแรงขับเคลื่อน เช่นการใช้เมมเบรนแยกน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งน้ำจะผ่านมากกว่าสารอินทรีย์เมื่อผ่านเมมเบรนในรูปแบบไอ (ด้านเพอร์มิเอต) และลดอุณหภูมิเพื่อให้ไอกลายเป็นของเหลว นำไปใช้ในการแยกน้ำ (Dehydration) เช่น การผลิตแอลกอฮอล์ และนอกจากเพอร์แวกพอเรชันยังมีกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน ใช้หลักการทํางานคล้ายกับเพอร์แวกพอเรชัน แต่จะต่างกันที่สารที่ป้อนจะอยู่ในรูปแบบของไอ จะมีคำอธิบายในหัวข้อที่ 2.7 เพราะเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### 2.6.6 การแยกแก๊สด้วยเมมเบรน (Gas separation membrane)

เป็นกระบวนการในการแยกแก๊สผสม แบ่งเป็น 2ชนิด คือ กลไกการแก๊สเพอเมชัน (Gas permeation, GP) ซึ่งแก๊สจะผ่านเมมเบรนเนื้อแน่น ไม่มีรูพรุน ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ ใช้แรงดันในการแยก 100 กิโลปาสคาล ถึง 10 เมกะปาสคาล และกลไกการแก๊สดิฟฟิวชัน (Gas diffusion, GD) เป็นการแยกแก๊สผ่านเมมเบรนรูพรุนขนาดเล็ก แรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างความเข้มข้นหรือความดัน [7, 9]



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมเกี่ยวกับกระบวนการแยกเมมเบรนที่มีขนาดของสารละลายต่างๆ [9]

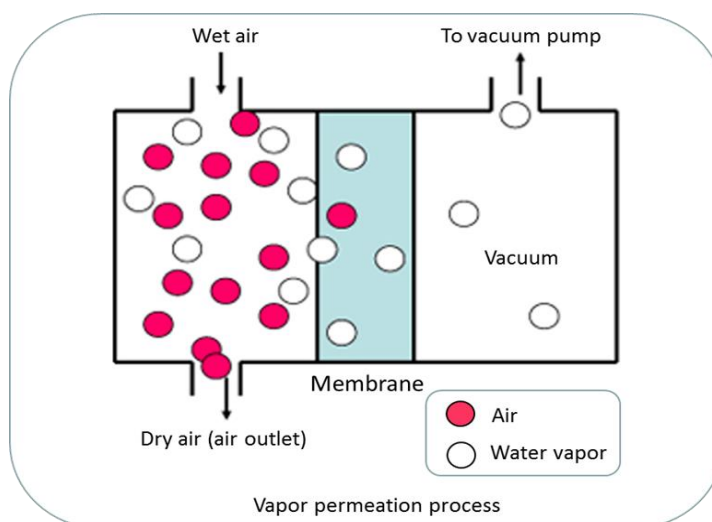
ตารางที่ 2 1 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่ใช้ความดันหรือความดันน้อยเป็นแรงขับเคลื่อน [9]

ระดับของรู	กระบวนการ	ขนาดรู (อังสโตม)	กลไกการแยก	
Macropores(>50nm)	ไมโครฟิลเตชัน	500 - 20,000	การคัดขนาด	
Mesopores(2-50nm)	อัลตราฟิลเตชัน	30 - 1,000	การคัดขนาด	
Micropores(<2nm)	นาโนฟิลเตชัน	10 - 50	การคัดขนาด	
Dense	เพอร์แวกพอเรชัน	<5	การละลาย-การแพร่	
	แยกแก๊สด้วยเมมเบรน	<5	การละลาย-การแพร่	
	ออสโมซิสผันกลับ		5-20	การคัดขนาด
			<5	การละลาย-การแพร่



## 2.7 กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation)

เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน ในงานวิจัยนี้ดำเนินการตามหลักการของกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) ดังรูปที่ 2.7 ในที่นี้จึงมีการอธิบายรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้ กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน เป็นกระบวนการแยกสารผสมโดยทำให้ไอแพร่ผ่านเมมเบรนออกไปด้วยความแตกต่างของความดันย่อยคร่อมเมมเบรน โดยการควบคุมความดันด้านเพอร์มิเอต (Permeate) ให้ต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบที่ต้องการจะแยก โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพอร์มิเอต ในรูปแบบไอแพร่ผ่านเมมเบรน จะถูกควบแน่นสะสมในที่ดักเก็บความเย็น (Cold trap)



รูปที่ 2.7 กระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (Vapor permeation) [10]

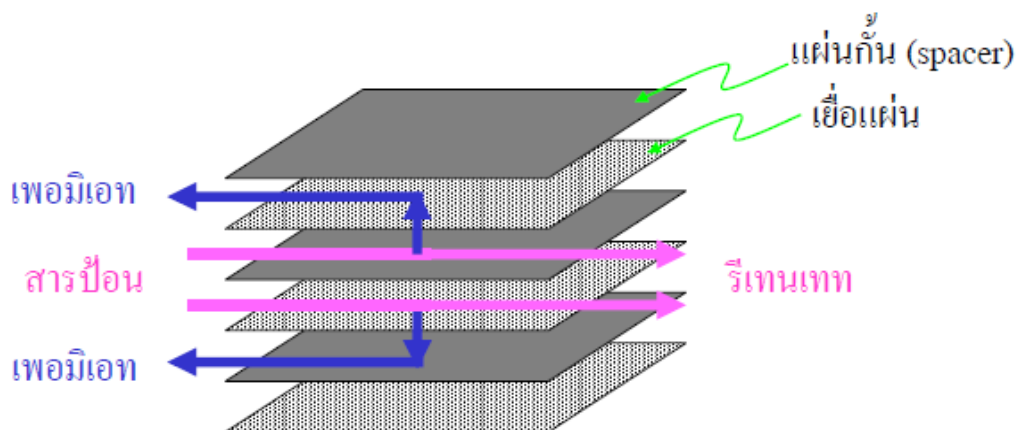
โดยส่วนใหญ่การที่จะนำเมมเบรนมาใช้งาน จะต้องมีการนำเมมเบรนมาติดตั้งในอุปกรณ์ที่เรียกว่า มอดูล (Module) เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่างๆซึ่งมอดูลมีหลายแบบดังต่อไปนี้

- 1 มอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module)
- 2 มอดูลแบบท่อ (Tubular module)
- 3 มอดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)
- 4 มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module)

ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกศึกษารูปแบบมอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module) จึงขออธิบายเฉพาะเพียงรูปแบบนี้เท่านั้น

## 2.8 มอดูลแบบกรอบและกรอบ (Plate and frame module)

อุปกรณ์เมมเบรนชนิดนี้จะมีลักษณะแบบแผ่นและกรอบ แสดงดังรูปที่ 2.8 มีภาคตัดขวาง เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือวงกลม จะมีแผ่นกั้นที่ใช้เพื่อประกบแผ่นเมมเบรน ซึ่งจะมีช่องว่างที่เกิดขึ้น ตรงกลางของกรอบ เป็นส่วนที่เพอร์มิเอตไหลผ่าน [11]

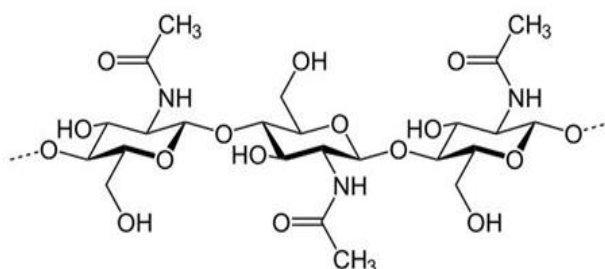


รูปที่ 2.8 ลักษณะมอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module) [12]

เมมเบรนที่มาใช้ จะต้องมีการพิจารณาสมบัติ และลักษณะทางกายภาพเพื่อให้ประสิทธิภาพ เหมาะกับการนำไปใช้งาน ได้แก่ สมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) หรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) , ลักษณะทางโครงสร้างของเมมเบรน, สมบัติเชิงความร้อน, สมบัติเชิงกลของเมมเบรน, ความสามารถในการกักกันสาร, ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเมมเบรน

## 2.9 ไคติน (chitin)

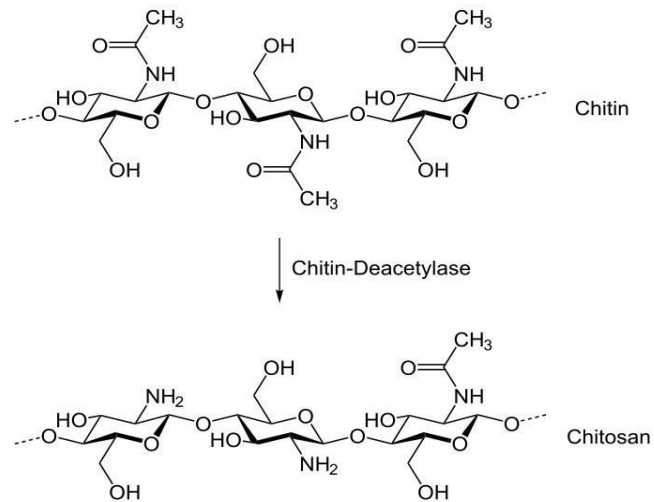
เป็นสารพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ลักษณะทางโครงสร้างคล้ายกับพวกแป้งและ เซลลูโลส ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง ไคติน จะพบมากในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น เปลือกของกุ้ง กระดองปู ปลาหมึก และเปลือกของแมลง หรือผนังเซลล์ของสาหร่าย เป็นต้น ไคติน มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาล คือ N-Acetylglucosamine ต่อกันเป็นโซ่ยาวไว้ ประจุ เกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำหรือสลายละลายทั่วไป แต่สามารถละลายได้ในกรด อนินทรีย์บางชนิด [13] ดังภาพที่ 2.9



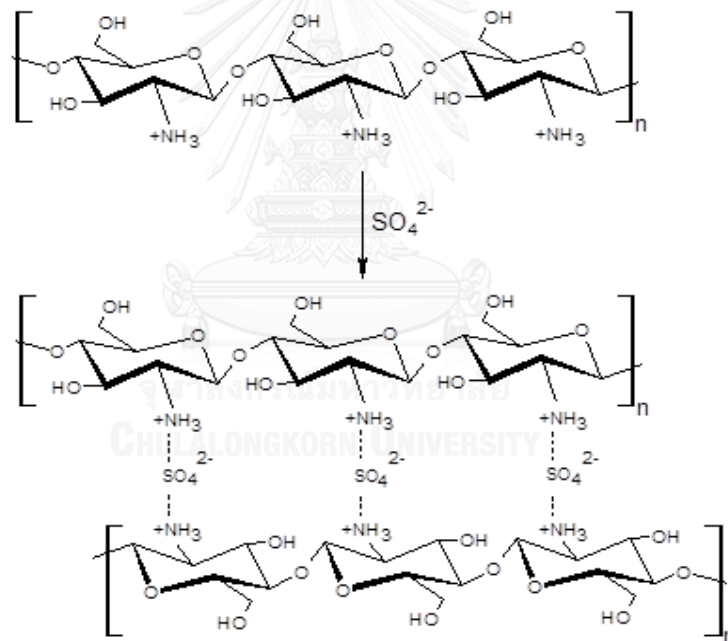
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [14]

## 2.10 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซานเกิดจากอนุพันธ์ของไคติน มีชื่อทางเคมีว่า poly [ $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose] ซึ่งไคโตซาน เกิดจากปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทิล (Deacetylation) ที่อยู่ในไคติน ออกด้วยต่างเข้มข้น โดยมี ตัววัดค่าไคตินที่ถูกหมู่อะซิทิลกำจัดออกไป (Degree of acetylation) ประมาณร้อยละ 60 ขึ้นไป โครงสร้างของไคตินบางส่วนจะเปลี่ยนแปลงไป โดยที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองของโครงสร้าง หมู่ฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วยธาตุไนโตรเจนอยู่ในรูปของหมู่อะเซตาไมด์ (NH-CO-CH<sub>3</sub>) เปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน (-NH<sub>2</sub>) แสดงดังรูป 2.10 ไคโตซานมีสมบัติในการชอบน้ำ (Hydrophilic properties) เนื่องด้วยโครงสร้างของไคโตซานมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่เอมิโน(-NH<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นโปรตีนมีขั้วชนิดกลูตามีน ซึ่งมีผลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ดังนั้น เมมเบรนที่ถูกผลิตจากไคโตซานจึงมี ผลในการชอบน้ำตามไปด้วย นอกจากนี้การนำเมมเบรนมาทำการการเชื่อมขวางเพื่อตัดแปลงคุณสมบัติ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของ สมบัติทางกล การเพิ่มความแข็งแรง และสมบัติทางกายภาพ โดยงานวิจัยนี้มีความสนใจใช้เมมเบรนไคโตซานทั้งเนื้อแน่นและเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์ชนิดที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก[15, 16] จะแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของไคติน (บน) และไคโตซาน (ล่าง) [14]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซานที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก [16]

## 2.11 กระบวนการผลิตโคตินและโคโตซาน

ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงดังรูปที่ 2.12

### 2.11.1 กระบวนการกำจัดโปรตีน (Deproteination)

นำวัตถุดิบ (เปลือกกุ้ง เปลือกปู) ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 3-5% ที่อุณหภูมิประมาณ 65-100 องศาเซลเซียส ในกระบวนการนี้โปรตีนจะถูกกำจัดไปจากวัตถุดิบ รวมถึงไขมันบางส่วนออกไปด้วย

### 2.11.2 กระบวนการกำจัดเกลือแร่ (Demineralization)

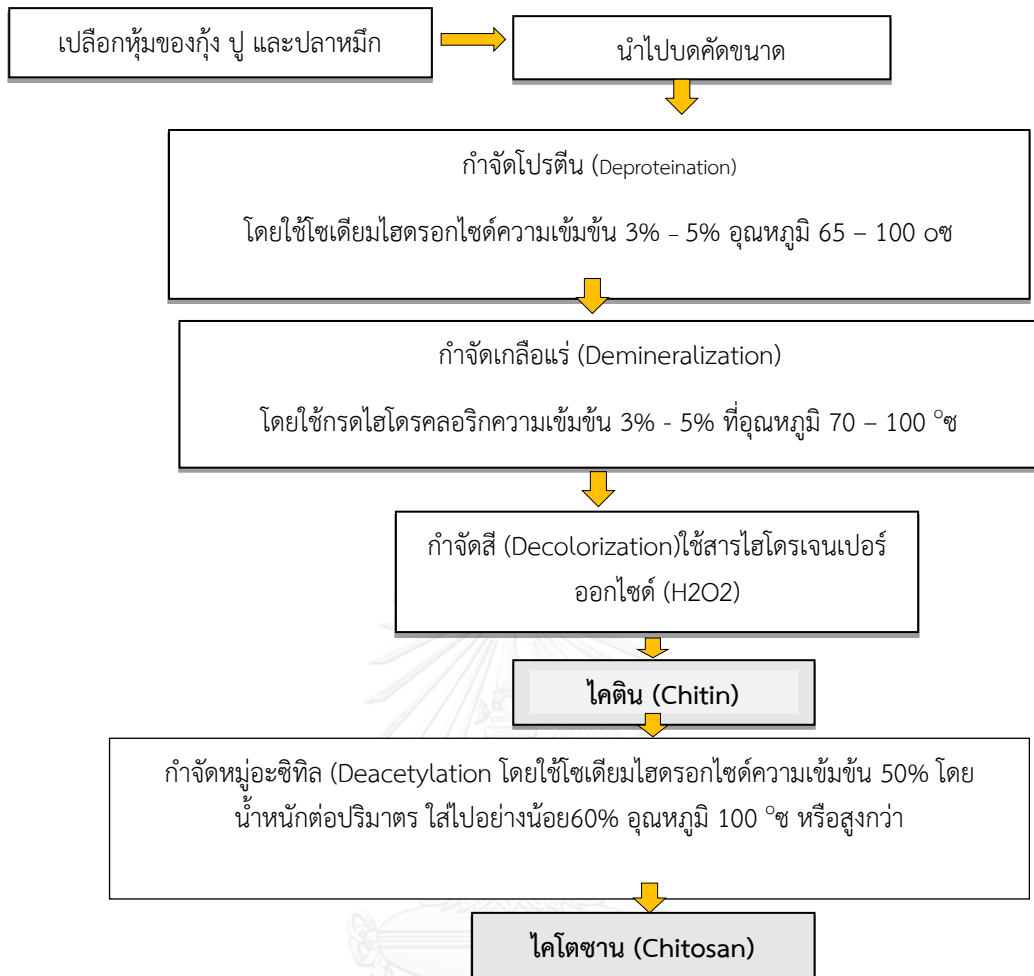
หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนจากวัตถุดิบแล้ว ใช้กรดไฮโดรคลอริกเจือจาง ที่อุณหภูมิห้อง ในการกำจัดเกลือแร่

### 2.11.3 กระบวนการกำจัดสี (Decoloration)

เป็นขั้นตอนการกำจัดตรงควัตถุหรือสีออกให้หมด การกำจัดสีทำโดยจะใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) หรือโซเดียมเปอร์คลอเรต (NaOCl<sub>4</sub>) เหมือนกับกระบวนการฟอกสีในสิ่งทอ สารเหล่านี้มีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของโคโตซานแตกสั้นลง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์โคติน โคตินบริสุทธิ์มีสีขาว คล้ายเยื่อกระดาษ แสดงดังรูปที่ 2.13 ไม่ละลายน้ำ กรดอ่อน ต่างอ่อน ต่างแก่ และตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งหมด จึงนิยมทำในขั้นตอนต้นของกระบวนการผลิต หลังการกำจัดจะเข้าสู่การล้างน้ำให้สะอาดก่อนส่งเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

### 2.11.4 กระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซิทิล (Deacetylation)

เป็นกระบวนการที่นำโคตินมาทำการกำจัดหมู่อะซิทิล สิ่งที่ได้คือ โคโตซานซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของหมู่อะมิโนบนโคติน โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 50% ขึ้นไป [13, 16] กระบวนการจะแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพกระบวนการผลิตไคตินและไคโตซาน [16]



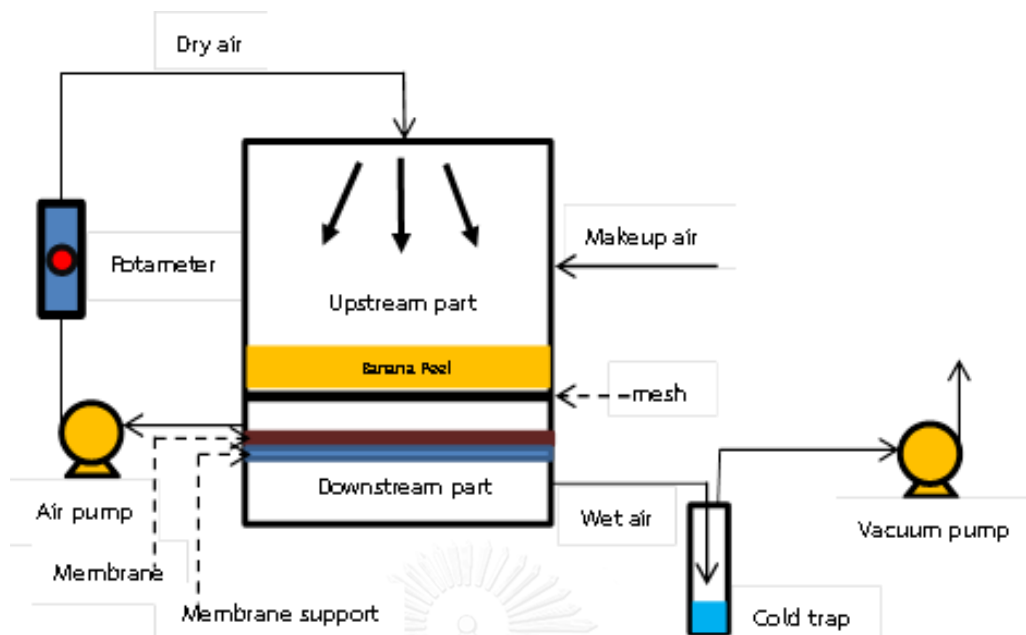
รูปที่ 2.13 ผลิตภัณฑ์ไคตินบริสุทธิ์ [17]

## 2.12 การดึงน้ำออก (Dewatering)

การดึงน้ำออก คือ กระบวนการทางกายภาพในการลดความชื้นจากวัสดุ ซึ่งการลดลงของความชื้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้นๆ ซึ่งการดึงน้ำออกจากวัสดุ โดยวิธีนี้จะลดความชื้นทำให้มีวัสดุที่เหลือความเข้มข้นประมาณ 4-20% หรือ 1 ใน 5 ของความเข้มข้นของวัสดุเริ่มต้น เป็นผลให้วัสดุไม่มีของไหลอยู่ภายใน กระบวนการดึงน้ำออกโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้ เช่น การหมุนเหวี่ยง (Centrifuges) การรีดตะกอน (Belt filter presses) การอัดตะกอน (Pressure filter presses) และกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การทำแห้ง (Drying) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิควิธีนี้ หลักการของกระบวนการดึงน้ำออกจะขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของวัสดุเริ่มต้น อัตราการไหลของกระแสที่ป้อน ปริมาณสารเคมีที่ต้องการ ความเข้มข้นของวัสดุที่เหลือจากการดึงน้ำออก กระบวนการแยกของอนุภาคจะถูกกำหนดด้วยชนิดของและปริมาณของวัสดุ และ ลักษณะความแห้งที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ (Product) [18]

## 2.13 ปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane reactor)

ปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบการดึงความชื้นออกจากชีวมวลในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2.14 ประกอบด้วย ห้องทำแห้ง (Drying chamber) สำหรับวางชีวมวลบนตะแกรงเป็นส่วนเหนือเซลล์เมมเบรน เซลล์เมมเบรน และส่วนใต้เซลล์เมมเบรน ทั้งสามส่วนยึดติดกันเป็นหน่วยปฏิกรณ์ด้วยหน้าแปลน มวลอากาศในรูปแบบไอน้ำที่ถูกเป่าออกจากชีวมวลแพร่ผ่าน เมมเบรนและผ่านเข้าไปในส่วนใต้เซลล์เมมเบรนโดยในส่วนนี้จะถูกต่อกับปั๊มสุญญากาศดูให้ผ่านที่หน่วยควบคุมความเย็น (Cold trap) เกิดการควบแน่น เหลืออากาศแห้งหมุนเวียนกลับเข้าไปในปฏิกรณ์ ให้ผ่านปั๊มอากาศ (Air pump) เพื่อสร้างอัตราการไหลตามที่กำหนดก่อนกลับเข้าไปในห้องทำแห้ง ระบบนี้โดยปกติจะทำงานในรูปแบบระบบปิดหากไม่มีอากาศที่ถูกเพิ่มเข้าไปยังในปฏิกรณ์ และยังมีหน่วยปรับความชื้นเพื่อช่วยควบคุมความชื้นของอากาศ ให้มีอากาศหมุนเวียนกลับ (Recycled air) และอากาศเสริม (Makeup air) ในปฏิกรณ์



รูปที่ 2.14 ชุดทดสอบการดึงความชื้นออกจากเปลือกกล้วย

## 2.14 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Colomer-Mendoza และคณะ [19] ศึกษาการใช้กระบวนการ Biodrying กับซัสเตรทพวกเศษหญ้า ใบไม้ กิ่งไม้ ในปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร จำนวน 10 หน่วย ที่มีการหมุนเวียนของอากาศในช่วง 0.88 ถึง 6.42 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง จากการทดลองนาน 20 วัน น้ำหนักของซัสเตรทลดลง 40–57% และปริมาณน้ำลดลง 4–60% การเติมซัสเตรทขนาดใหญ่ (Bulking agent) เข้าไปปริมาณเล็กน้อย (15%) ทำให้น้ำหนักของซัสเตรทลดลง มากกว่าปฏิกรณ์ที่ใช้อัตราการไหลต่ำ เพราะ ซัสเตรทขนาดใหญ่ช่วยทำให้มีการกระจายของอากาศใน Waste matrix ดีขึ้น โดยปฏิกรณ์ที่ใช้อัตราการหมุนเวียนของอากาศ เท่ากับ 4 ลิตร/นาที ให้ผลดีที่สุด

Sugni และคณะ [20] ศึกษาผลของทิศทางการป้อนอากาศผ่านกองขยะมูลฝอยในการทำให้ขยะมูลฝอยแห้งเพื่อนำไปใช้เป็น เชื้อเพลิง พบว่าการสลับทิศทางการป้อนของอากาศทุกวันทำให้เกรเดียนท์อุณหภูมิและเกรเดียนท์ความชื้นของกองขยะลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แห้งสม่ำเสมอมากกว่า

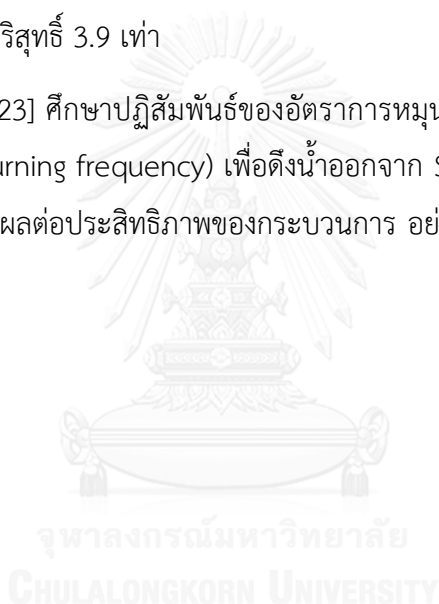
Cai และคณะ [21] ศึกษาผลของอัตราการป้อนอากาศต่อการระเหยน้ำออกจากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) พบว่า ความเร็วลมสูงสุดและการระเหยน้ำสูงสุดเกิดขึ้นในช่วง Thermophilic phase และ Second temperature-increasing phase มีค่า เท่ากับ  $0.063 \pm 0.027$  เมตรต่อวินาที และ 28.9 กิโลกรัมต่อตันเมตริกซ์ต่อวัน ตามลำดับ ในวันที่ 4 ของการทดลอง มีลำดับของ การระเหย



น้ำออกในแต่ละช่วง ดังนี้ thermophilic phase > second temperature-increasing phase > temperature-increasing phase > cooling phase

Han และคณะ [22] ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำออกจากสารละลายไอโซโพรพานอลของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน (Pervaporation) ด้วยเมมเบรนพอลิเบนโซอิมิดาโซล (Polybenzimidazole) ที่ถูกปรับปรุงให้เกิดสายโซ่โคโตนานที่ผิวหน้า (PBI-CS) พบว่าเมมเบรน PBI-CS มีความชอบน้ำที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น และมีสมรรถนะการกำจัดน้ำออกจากสารละลายไอโซโพรพานอล ในช่วงความเข้มข้น 30 – 90% เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นของสายโซ่โคโตนานทำให้อัตราการดูดซับน้ำเข้าไปใน เมมเบรน PBI-CS มากขึ้น เป็นผลให้การแพร่ผ่านน้ำ (Water permeability) และค่าการคัดเลือก (Selectivity) ของเมมเบรนเพิ่มขึ้น พบว่าเมมเบรน PBI-CS ให้ค่าดัชนีการแยกเพอร์แวกพอเรชันสูงกว่าเมมเบรน PBI บริสุทธิ์ 3.9 เท่า

Zhao และคณะ [23] ศึกษาปฏิสัมพันธ์ของอัตราการหมุนเวียนของอากาศ (Air flow rate) กับความถี่ในการพลิก (Turning frequency) เพื่อดึงน้ำออกจาก Sludge ในกระบวนการ Biodrying พบว่าความถี่ในการพลิกมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ อย่างมาก



### บทที่ 3

## เครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วัสดุดิบ

1. เปลือกกล้วย (Banana Peel) 2 ชนิด คือ เปลือกกล้วยน้ำว้า (Cultivated banana peel) และเปลือกกล้วยหอม (Cavendish banana peel) มีค่าความชื้นในมวลเริ่มต้นประมาณ 80%
2. เมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid crosslinked type) 2 ชนิด คือ เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่น (Dense chitosan membrane) และเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์ (Spunbond composite chitosan membrane) จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

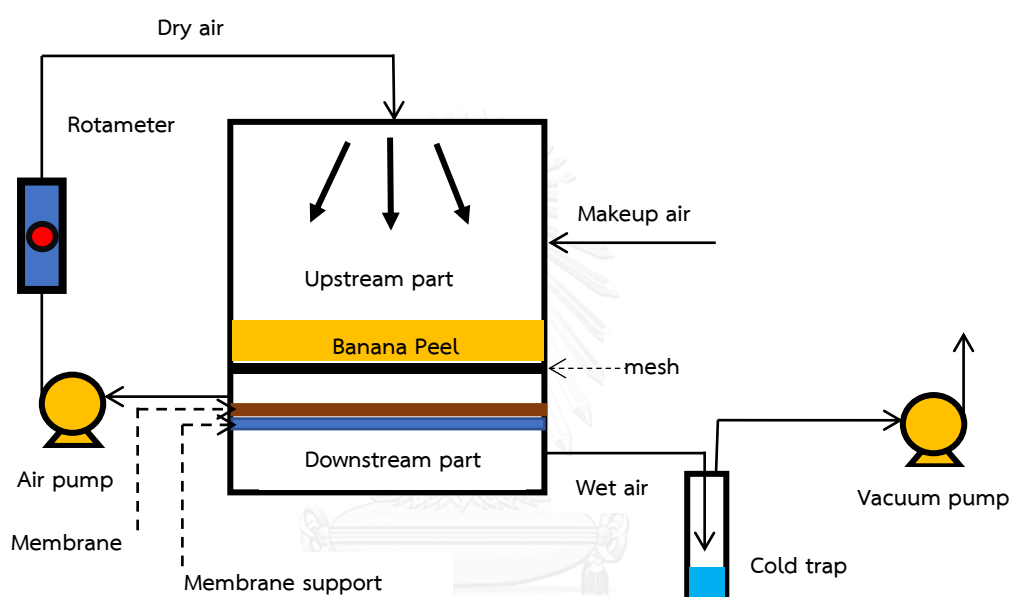
1. Universal Testing: LLOYD Instruments LR 5K (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. Contact angle: Rame-hart 200F1 (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. Oxygen Bomb Calorimeter Model 1341EE (ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. Thermal analysis: TG/DTA PerkinElmer PYRIS DIAMOND (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

### 3.3 อุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

1. ฟิล์มเมมเบรนไคโตซานที่ทำงานตามหลักการกระบวนการเวเพอเพอร์มิเอชัน (ฟิล์มเมมเบรนเวเพอเพอร์มิเอเตอร์; Vapor permeator)
2. โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module)
3. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital Balance)

### 3.4 ปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ (Vapor Permeator)

ปฏิกรณ์มีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แบ่งเป็น 3 ส่วน ยึดติดกันเป็นหน่วยเดียวกันด้วยหน้าแปลน คือส่วนเหนือเซลล์เมมเบรน (Upstream part) ทำหน้าที่เป็นห้องทำแห้ง (Drying chamber) มีชั้นตะแกรง (Mesh) สำหรับวางชีวมวล ส่วนเซลล์เมมเบรน (Membrane cell) เป็นส่วนที่บรรจุเมมเบรน มีขนาด 12×12 ตารางเซนติเมตร และส่วนใต้เซลล์เมมเบรน (Downstream part) ต่อกับปั๊มสุญญากาศเพื่อสร้างแรงขับเคลื่อนคร่อมเมมเบรน โดยไอน้ำที่แพร่ผ่านเมมเบรนออกมาถูกควบแน่นในที่ดักเย็น (Cold trap)



รูปที่ 3.1 ลักษณะเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์

### 3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน

##### 3.5.1.1 ความชอบน้ำของเมมเบรน

วิเคราะห์ความชอบน้ำของเมมเบรนจากวัดค่ามุมสัมผัส โดยวัดค่ามุมสัมผัสแบบ Static Contact Angle ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส Ramehart 200F1 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยการตัดตัวอย่างเมมเบรน ตรึงแผ่นเมมเบรนตัวอย่างลงบนแผ่นกระจกใส ใช้เข็มฉีดยาขนาดเล็กบรรจุน้ำกลั่น ปริมาณ 10 ไมโครลิตร ในการทดสอบหนึ่งครั้ง หยดลงบนผิวของเมมเบรนตัวอย่าง มุมสัมผัสที่ได้จะเกิดจากฉากวัดมุมและฉากรับภาพที่อยู่ทางด้านหลัง ปรากฏค่ามุมสัมผัสที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมของเครื่องวิเคราะห์ โดยเมมเบรนที่มีความชอบน้ำจะให้มุมสัมผัส (Contact angle)

ระหว่างผิวเมมเบรนกับหยดน้ำ 0–90 องศา ส่วนเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำจะมีความมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Standard contact angle goniometer) Ramehart Instrument รุ่น 200F1 [24]

### 3.5.1.2 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเมมเบรน

วัดความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืด (%Elongation) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D882 กับเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง เนื่องจากมีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 กับเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตแบบเชื่อมขวางที่มีความหนาอยู่ในช่วงมากกว่า 1 มิลลิเมตร จนถึง 14 มิลลิเมตร โดยมีการเตรียมชิ้นงานและวิธีการทดสอบสมบัติ ดังนี้

#### 1) ตามมาตรฐาน ASTM D882

ก. เลือกตัวอย่างเมมเบรนที่มีลักษณะพื้นผิวหน้าเรียบและความหนาสม่ำเสมอ ไม่มีรูหรือรอยขาด รอยย่นและรอยพับของชิ้นงานเมมเบรน

ข. ตัดเมมเบรนเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5×150 มิลลิเมตร (ความกว้าง×ความยาว) แสดงในรูป 3.3

ค. วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์ โดยมีค่าความยาวเกจ (Gauge length) จากจุดกึ่งกลางช่วงละ 50 มิลลิเมตร และวัดระยะสำหรับจับยึดชิ้นงาน (Initial grip) ช่วงละ 25 มิลลิเมตร

ง. ทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยใช้ภาวะในการทดสอบ ดังนี้

- i ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับข้างละ 50 มิลลิเมตร
- ii ใช้ค่าโหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 10 กิโลนิวตัน
- iii ใช้ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

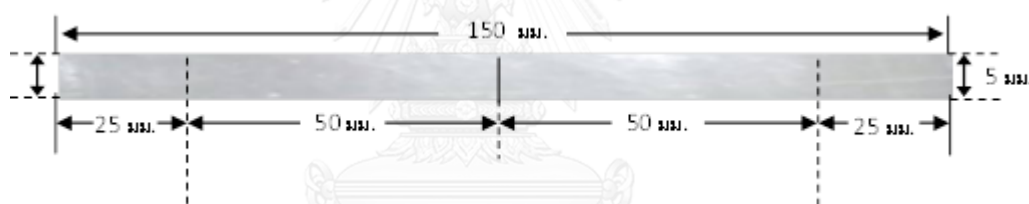
2) ตามมาตรฐาน ASTM D638

ก. ตัดเมมเบรนแบบคอมพอสิตเป็นรูปรีมเบลมีขนาดแสดงดังรูป 3.4

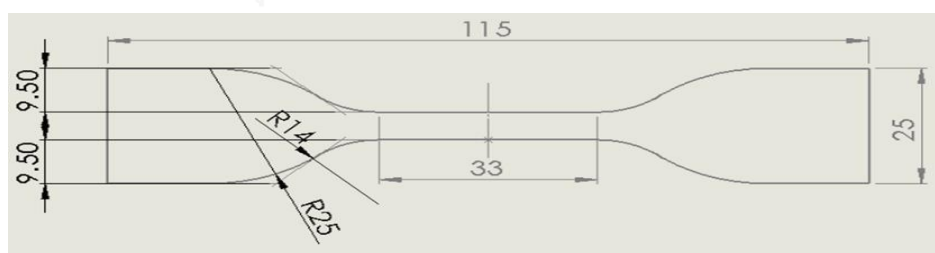
ข. วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์โดยมีระยะจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 33 มิลลิเมตร

ค. ทำการทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine แสดงในรูปที่ 3.5

ง. ทดสอบตามมาตรฐาน D638 โดยใช้ภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับมาตรฐาน D882



รูปที่ 3.3 การเตรียมขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 [16]



รูปที่ 3.4 การเตรียมขนาดและลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 [25]



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine [16]

### 3.5.1.3 ค่าปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรน (Membrane water uptake)

ศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของเมมเบรนเชื่อมขวาง 2 ชนิดทั้งแบบเนื้อแน่นและแบบคอมพอสิต มีวิธีดังต่อไปนี้

1. ตัดเมมเบรนขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร
2. นำเมมเบรนตัวอย่างไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
3. ชั่งเมมเบรนก่อนแช่ในน้ำบริสุทธิ์เป็นค่าน้ำหนักเมมเบรนแห้ง
4. แช่ตัวอย่างเมมเบรนในน้ำบริสุทธิ์ที่เป็นภาชนะปิดแสดงดังรูป 3.6 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน
5. นำเมมเบรนไปชั่งทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นน้ำหนักเมมเบรนเปียก โดยให้ชั้นน้ำที่ผิวหน้าของเมมเบรน
6. เมื่อน้ำหนักเมมเบรนเริ่มคงที่เป็นน้ำหนักเมมเบรนเปียก คำนวณปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรน

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับน้ำของเมมเบรน ตามสมการที่ 3.1

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักเมมเบรนเปียก} - \text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}}{\text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}} \times 100 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.6 การแช่เมมเบรนตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด ในน้ำบริสุทธิ์ที่เป็นภาวะปิด

### 3.5.1.4 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรน

วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนทั้งสองชนิด คือ เมมเบรนเชื่อมขวางแบบเนื้อแน่นและแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์ ด้วยเครื่อง TG/DTA PerkinElmer รุ่น PYRIS DIAMOND แสดงดังรูปที่ 3.7 ดังนี้

1) ตัดเมมเบรนเชื่อมขวางทั้งแบบคอมพอสิต (ก) และแบบเนื้อแน่น (ข) ให้มีขนาดเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

2) ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนที่ภาวะดังนี้

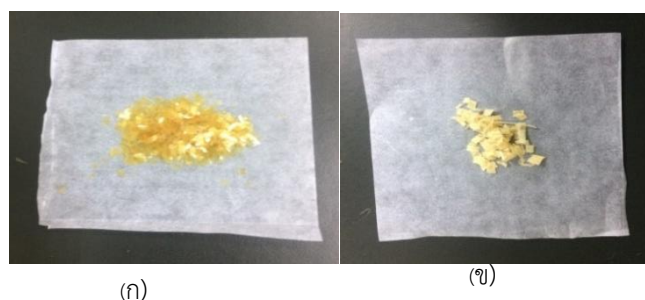
ก. ใช้ปริมาณเมมเบรนประมาณ 10–20 มิลลิกรัม ทดสอบด้วยก๊าซไนโตรเจน

ข. ใช้อุณหภูมิทดสอบในช่วง 40-700 องศาเซลเซียส

ค. ใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน TG/DTA analyzer



**รูปที่ 3.8** ลักษณะของชิ้นเมมเบรนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงความร้อน  
(ก) แบบเนื้อแน่น (ข) แบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์

### 3.5.2 ขั้นตอนการดำเนินงานในเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเตอร์

- 1) ตัดเมมเบรนขนาด 12×12 เซนติเมตร วางลงบนผิวหน้าแปลนของเซลล์เมมเบรน (Membrane cell) ในรูปที่ 3.1
- 2) หั่นชิ้นส่วนของเปลือกกล้วย (Banana peel) ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9
- 3) ชั่งเปลือกกล้วยจำนวน 20 กรัม วางลงบนตะแกรงภายในเครื่องปฏิกรณ์ ผนึกส่วนเหนือเซลล์เมมเบรน (Upstream part) เซลล์เมมเบรน (Membrane cell) และส่วนใต้เซลล์เมมเบรน (Downstream part) เข้าด้วยกันเป็นหน่วยเดียวกัน
- 4) เปิดปั๊มอากาศ (Air pump) ให้มีอัตราการไหลของอากาศตามที่กำหนด โดยดูจากโรตاميเตอร์ (Rotameter)
- 5) เปิดสวิตช์ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 6) เก็บตัวอย่างมาชั่ง เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดและบันทึกผล





รูปที่ 3.9 ตัวอย่างเปลือกกล้วย (Banana peel) ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร

### 3.5.3 ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการดึงน้ำออกด้วยเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์

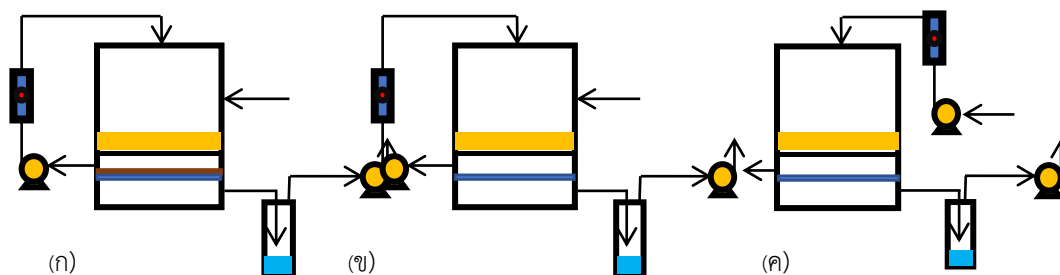
#### 3.5.3.1 ศึกษาผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย

โดยใช้เปลือกกล้วยจำนวน 20 กรัม ทำการทดลองในระยะเวลา 1 ถึง 8 ชั่วโมง ชั่งเก็บผลทุกหนึ่งชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25–40 องศาเซลเซียส) ใช้เมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวาง และมีอัตราการไหลเวียนของอากาศที่ 25 ลิตรต่อนาที

#### 3.5.3.2 ศึกษาผลของเมมเบรนและผลของการหมุนเวียนอากาศต่ออัตราการดึงน้ำออก

ใช้เมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวาง ปริมาณเปลือกกล้วย 20 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง (25–40 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลเวียนอากาศที่ 25 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชั่วโมง แบ่งชุดการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.10 ดังนี้

- 1) แบบมีเมมเบรนและมีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ (ก)
- 2) แบบไม่มีเมมเบรนแต่ให้มีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ (ข)
- 3) แบบไม่มีเมมเบรนและไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ (ปล่อยอากาศทิ้ง) (ค)



รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมชุดการทดลองศึกษาผลของเมมเบรน  
3.5.3.3 ศึกษาผลของอัตราการไหลเวียนอากาศในการดึงน้ำออก

ทำการทดลองโดยใช้เมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวาง ปริมาณเปลือกกล้วย 20 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง (25–40 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชั่วโมง โดยมีการศึกษาช่วงอัตราการไหลเวียนแบ่งเป็น 2 ช่วง ดังนี้

- 1) ช่วง 1 ถึง 10 ลิตรต่อนาที
- 2) ช่วง 5, 10, 15, 20, 25 ลิตรต่อนาที

### 3.5.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกของปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์

#### 3.5.4.1 อัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย

ศึกษาประสิทธิภาพการดึงน้ำออกของปฏิกรณ์ในเทอมของอัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย 2 ชนิด คือ เปลือกกล้วยน้ำว้า และเปลือกกล้วยหอม ด้วยเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง 2 ชนิด คือ แบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์และแบบเนื้อแน่น โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

- 1) ชั่งเปลือกกล้วยปริมาณ 20 กรัม ด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 2) ดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง (25–40 องศาเซลเซียส)
- 3) ป้อนอัตราการไหลเวียนอากาศในช่วง 5, 10, 15, 20, 25 ลิตรต่อนาที
- 4) ชั่งน้ำหนักเปลือกกล้วยหลังจากทำแห้งในปฏิกรณ์เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- 5) คำนวณอัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย
- 6) ดำเนินการซ้ำขั้นตอน 1) ถึง 5) แต่เปลี่ยนภาวะอุณหภูมิเป็น 55 องศาเซลเซียส

### 3.5.4.2 ค่าความร้อนสูงสุด (High heating value)

วิเคราะห์ค่าความร้อนของเปลือกกล้วยหลังจากกระบวนการดองน้ำออกด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.11 เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนสูงสุดของเปลือกกล้วยเนื่องจากปริมาณความชื้นที่ลดลง



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb calorimeter) [26]

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติเมมเบรนไคโตซาน

งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซานเชิงพาณิชย์ชนิดที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกที่ได้รับ ความอนุเคราะห์จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด 2 ชนิด ได้แก่ แบบเนื้อแน่น และแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์ โดยการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกได้จากการนำเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อม ขวางทั้ง 2 ชนิดแช่ลงในสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นระยะเวลาหนึ่งคืน จากนั้นล้างน้ำและทำให้แห้ง และได้เป็นเมมเบรนที่มีการเชื่อมขวางซึ่งมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่น แบบคอมพอสิต และผ้าสปันบอนด์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ  $43.4 \pm 3.3$ ,  $195.6 \pm 14.6$  และ  $135.5 \pm 11.8$  ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1



(ก) (ข)

#### รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน

(ก) เมมเบรนแบบคอมพอสิตที่มีการเชื่อมขวาง (ข) เมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง

#### ตารางที่ 4 1 ความหนาของเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชนิดของเมมเบรนไคโตซาน	ความหนา (ไมครอน)
แบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง	$43.4 \pm 3.3$
แบบคอมพอสิตที่มีการเชื่อมขวาง	$195.6 \pm 14.6$
ผ้าสปันบอนด์	$135.5 \pm 11.8$

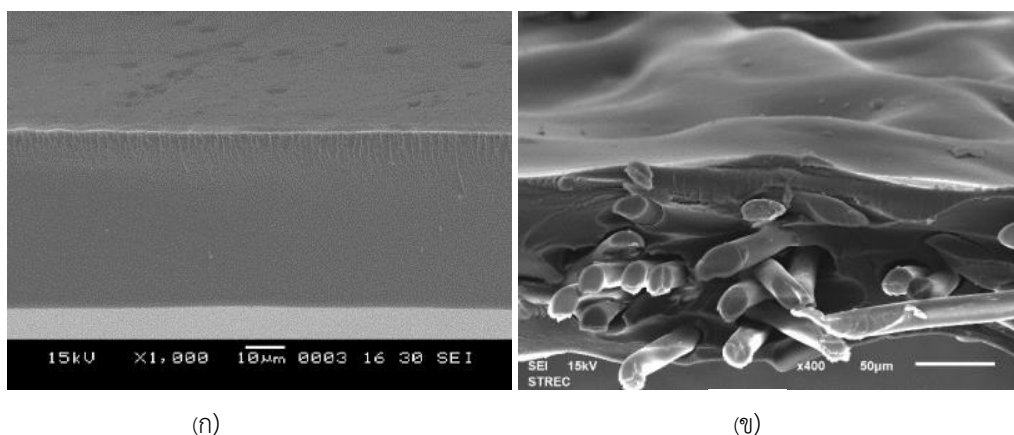
#### 4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของเมมเบรน

ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืด (% Elongation) ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นตามมาตรฐาน ASTM D882 และของเมมเบรนแบบคอมพอสิตและผ้าสปันปอนด์ตามมาตรฐาน D638 แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น เมมเบรนแบบคอมพอสิต และผ้าสปันปอนด์ มีค่าเท่ากับ  $59.8 \pm 1.1$ ,  $18.6 \pm 2.1$  และ  $7.2 \pm 0.8$  เมกะพาสคัล ตามลำดับ และค่าร้อยละการยืดมีค่าเท่ากับ  $4.1 \pm 0.8$ ,  $8.1 \pm 1.2$  และ  $23.0 \pm 2.7$  ตามลำดับ ผ้าสปันปอนด์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำมาก แต่การมีเนื้อพอลิเมอร์ไคโตซานบาง ๆ เคลือบอยู่บนผ้าสปันปอนด์ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงในเมมเบรนแบบคอมพอสิตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามยังมีค่าต่ำกว่าของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมาก ด้วยวิธีการเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ ที่แตกต่างกันและด้วยความหนาของเนื้อพอลิเมอร์ไคโตซานในเมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มากกว่า ดังภาพ SEM [28] ในรูปที่ 4.2 แต่ในเมมเบรนแบบคอมพอสิตจะมีการสูญเสียเนื้อพอลิเมอร์ไคโตซานบางส่วนสอดแทรกไปตามช่องว่างเส้นใยของผ้าสปันปอนด์เพื่อรวมเป็นเนื้อเดียวกันเหลือเป็นชั้นเนื้อเมมเบรนบาง ๆ บนผ้าสปันปอนด์ เมมเบรนไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางมีค่าร้อยละการยืดต่ำ คาดว่าเนื่องจากผลของการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์คนละสายโซ่ของหมู่ซัลเฟตที่หมู่เอมีน ดังรูป 4.3 ไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้มีการยืดตัวลดลง

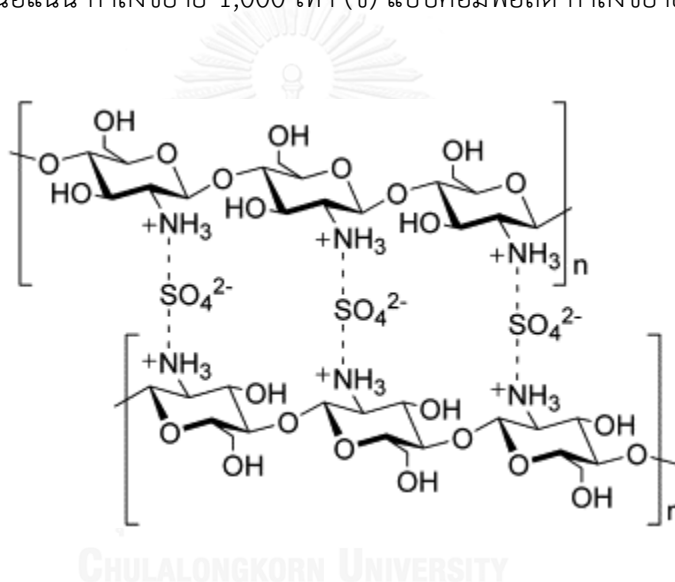
ตารางที่ 4 2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยืด

วัสดุ	ความหนา (ไมครอน)	ค่าความทนต่อแรงดึง (เมกะพาสคัล)	ร้อยละการยืด
เมมเบรนแบบเนื้อแน่น <sup>(1)</sup>	$43.4 \pm 3.3$	$59.8 \pm 1.1$	$4.1 \pm 0.8$
เมมเบรนแบบคอมพอสิต <sup>(2)</sup>	$195.6 \pm 14.6$	$18.6 \pm 2.1$	$8.1 \pm 1.2$
ผ้าสปันปอนด์	$135.5 \pm 11.8$	$7.2 \pm 0.8$	$23.0 \pm 2.7$

หมายเหตุ (1) ตามมาตรฐาน ASTM D882 และ (2) ตามมาตรฐาน D638



รูปที่ 4.2 ภาพ SEM ตามแนวภาคตัดขวางของเมมเบรนไคโตซาน [27]  
 (ก) แบบเนื้อแน่น กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) แบบคอมพอสิต กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก [16]

#### 4.1.2 ผลการศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซาน

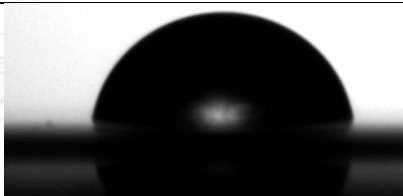
ผลการศึกษาสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนในงานวิจัยนี้จากค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ (Pure water uptake) ดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่าการดูดซับน้ำอิมตัวของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีค่ามากกว่าแบบคอมพอสิตซึ่งมีค่าเท่ากับ  $100.9 \pm 19.3$  และ  $81.2 \pm 4.8$  ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเนื่องจากเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีชั้นเนื้อพอลิเมอร์ที่เป็นตัวดูดซับน้ำหนามากกว่าเมมเบรนแบบคอมพอสิตที่เป็นเพียงชั้นผิว (Active layer) บาง ๆ จากค่าการดูดซับน้ำของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มีค่าสูงกว่าเมมเบรนแบบคอมพอสิต แสดงว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีสมบัติความชอบน้ำมากกว่าเมมเบรนแบบคอมพอสิต แต่ผลที่ได้นี้ต่างจาก ผลการทดสอบค่ามัมสัมพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่าเมมเบร

นแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางและเมมเบรนแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวางมีค่ามอดูลัสเท่ากับ  $89.3 \pm 1.1$  และ  $70.2 \pm 3.5$  ตามลำดับ โดยวัสดุที่มีค่ามอดูลัสที่ต่ำกว่าแสดงถึงความชอบน้ำที่สูงกว่า อธิบายได้ว่าเนื่องจากช่องว่างระหว่างเส้นใยของผ้าสปันบอนด์ในเมมเบรนแบบคอมพอสิตช่วยให้หยดน้ำซึมผ่านออกได้อย่างสะดวก ดังนั้นจึงคาดว่า การใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตในปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์น่าจะทำให้การดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยให้ผลดีกว่าการใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่น

**ตารางที่ 4 3** ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ชนิดของเมมเบรน	ค่าร้อยละการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ (กรัมน้ำ/กรัมเมมเบรน×100)
เมมเบรนคอมพอสิต แบบเชื่อมขวาง	81.2±4.8
เมมเบรนเนื้อแน่น แบบเชื่อมขวาง	100.9±19.3

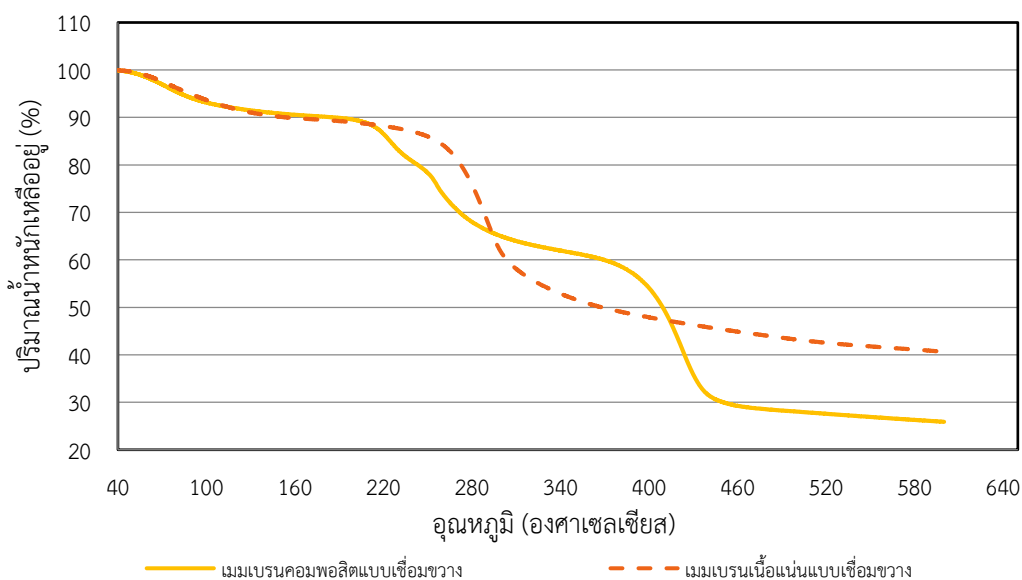
**ตารางที่ 4 4** ค่ามอดูลัสของเมมเบรนไคโตซาน

ชนิด	ค่ามอดูลัส	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวเมมเบรน
เมมเบรนเนื้อแน่น เชื่อมขวาง	89.3±1.1	
เมมเบรนคอมพอสิต เชื่อมขวาง	70.2±3.5	

#### 4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรน

ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนไคโตซานด้วยเครื่อง Thermal analyzer: TG/DTA แสดงดังกราฟรูปที่ 4.4 จากกราฟจะพบเมมเบรนทั้งสองชนิดเริ่มมีการสูญเสียมวลประมาณ 10% พร้อม ๆ กัน ตั้งแต่อุณหภูมิ 40 ถึง 160 องศาเซลเซียส คาดว่าเกิดจากการสูญเสียน้ำในเมมเบรน การสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วในช่วง 220 ถึง 280 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของสายโซ่ไคโตซาน (Chain degradation) โดยเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการสูญเสียน้ำหนักรวดเร็วและ

มากกว่าเมมเบรนแบบคอมพอสิต คาดว่าเนื่องจากเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีแต่เฉพาะพอลิเมอร์ไคโตซาน โดยมีการสลายตัวของไคโตซานต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 640 องศาเซลเซียสโดยมีน้ำหนักคงเหลือประมาณ 40% แต่ในเมมเบรนแบบคอมพอสิตจะพบการสูญเสียน้ำหนักจากการสลายตัวของสายโซ่ไคโตซานเพียง 30% ในช่วงอุณหภูมิ 220 ถึง 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากการมีชั้นผิวบาง ๆ ของเนื้อเมมเบรนไคโตซานบนผ้าสปันบอนด์ แล้วจึงเกิดการสูญเสียน้ำหนักจากการสลายตัวของผ้าสปันบอนด์ที่ทำด้วยพอลิเอสเตอร์ซึ่งอยู่รวมกับเนื้อไคโตซานในช่วงอุณหภูมิ 370 ถึง 430 องศาเซลเซียส ก่อนเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 640 องศาเซลเซียส เช่นกัน โดยมีน้ำหนักคงเหลือประมาณ 25%



รูปที่ 4.4 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของเมมเบรนไคโตซาน (TGA thermogram)

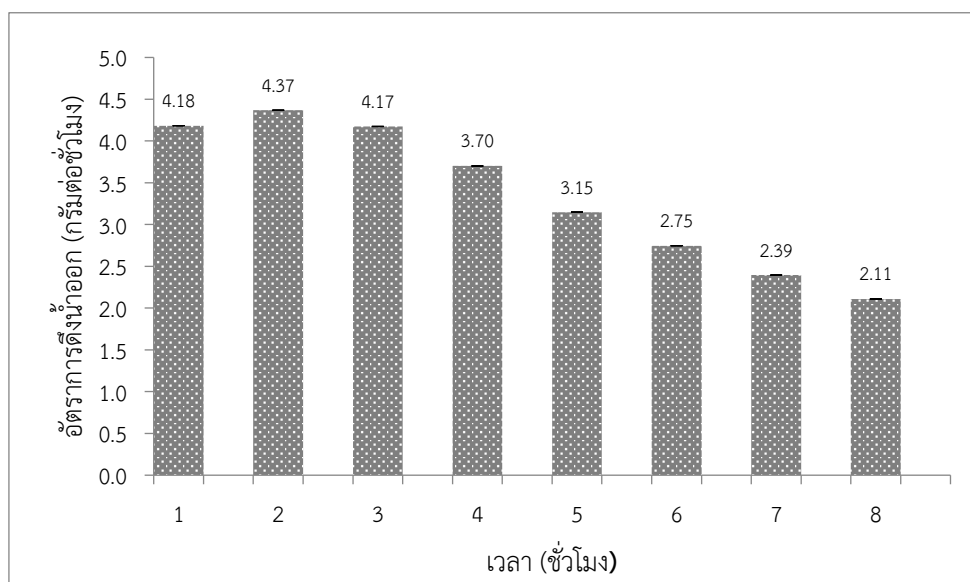
## 4.2 ผลการศึกษาตัวแปรในกระบวนการดึงน้ำออกด้วยเครื่องปฏิกรณ์เวฟเพอร์มิเอเตอร์

### 4.2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์เวฟเพอร์มิเอเตอร์

ในการศึกษาส่วนนี้ใช้เปลือกกล้วยจำนวน 20 กรัม บันทึกน้ำหนักที่เหลืออยู่ทุกหนึ่งชั่วโมง เป็นระยะเวลา 1 ถึง 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส) และจากผลการศึกษาสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซาน ในหัวข้อ 4.1.2 จึงเลือกใช้เมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวาง เนื่องจากความชอบน้ำที่มากกว่าของเมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวางเป็นที่คาดหวังจะทำให้ความสามารถในการดึงความชื้นออกจากเปลือกกล้วยสูงกว่าเมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง โดยกำหนดอัตราการไหลเวียนของอากาศที่ 25 ลิตรต่อนาที (ความสามารถสูงสุดของปั๊มอากาศใน



งานวิจัยนี้) ได้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าระยะเวลา 2 ชั่วโมง ให้อัตราการดิ่งน้ำสูงสุด อธิบายได้ว่าในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมงแรกของการดำเนินการ ความชื้นในเปลือกกล้วยเริ่มต้นมีค่าสูง ทำให้มีการระเหยออกจากเปลือกกล้วยได้มาก เมมเบรนสามารถทำหน้าที่แยกไอน้ำออกจากอากาศได้เต็มความสามารถ ทำให้ได้อัตราการดิ่งน้ำออกสูงสุดที่ชั่วโมงที่สอง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป ความชื้นในเปลือกกล้วยจะลดน้อยลงทำให้ความชื้นในอากาศลดน้อยลงด้วย ผลของเมมเบรนในการแยกไอน้ำออกจากอากาศจึงลดลงด้วย ดังนั้นระยะเวลาการดิ่งน้ำออกด้วยปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเตอร์ 2 ชั่วโมง จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม

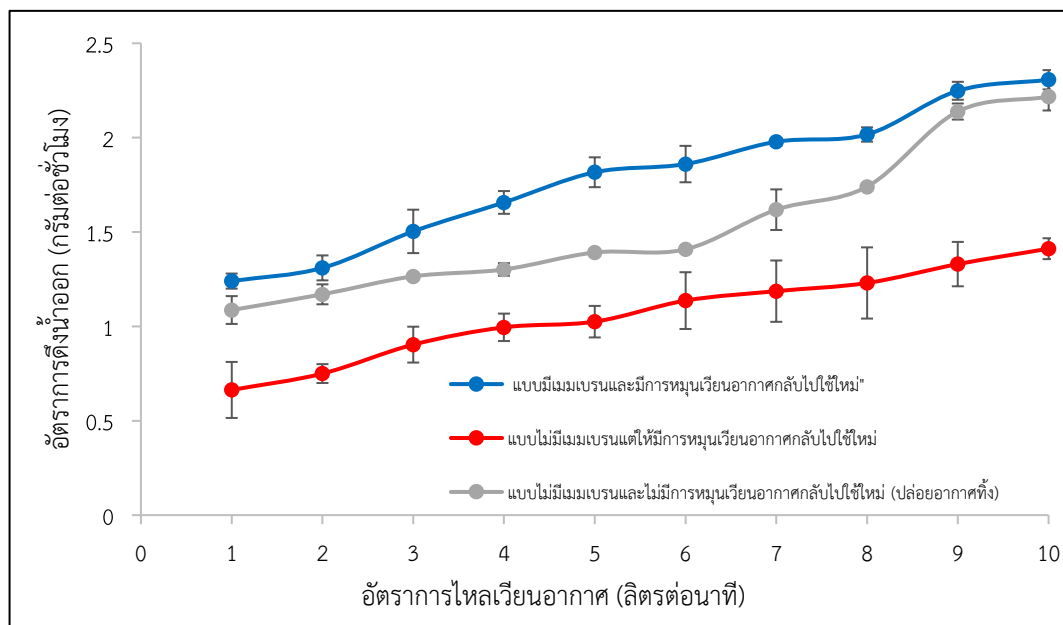


รูปที่ 4.5 ผลของระยะเวลาต่ออัตราการดิ่งน้ำออก ที่อัตราการไหลเวียนของอากาศ 25 ลิตรต่อนาที ด้วยเมมเบรนคอมพอสิตเชื่อมขวาง

#### 4.2.2 ผลของการมีเมมเบรนและผลของการหมุนเวียนอากาศต่ออัตราการดิ่งน้ำออก

ลักษณะรูปแบบชุดการทดลองแบ่งเป็น 3 แบบ ได้แก่ 1) แบบมีเมมเบรนและมีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ 2) แบบไม่มีเมมเบรนแต่ให้มีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ 3) แบบไม่มีเมมเบรนและไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ (ปล่อยอากาศทิ้ง) โดยใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตเชื่อมขวาง ใช้เปลือกกล้วยจำนวน 20 กรัม ศึกษาอัตราการไหลเวียนของอากาศระหว่าง 1 ถึง 10 ลิตรต่อนาที ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2.1 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าอัตราการดิ่งน้ำออกเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเวียนของอากาศในทุก ๆ รูปแบบ โดยมีลำดับของอัตราการดิ่งน้ำออกจากมากไปน้อยของรูปแบบ

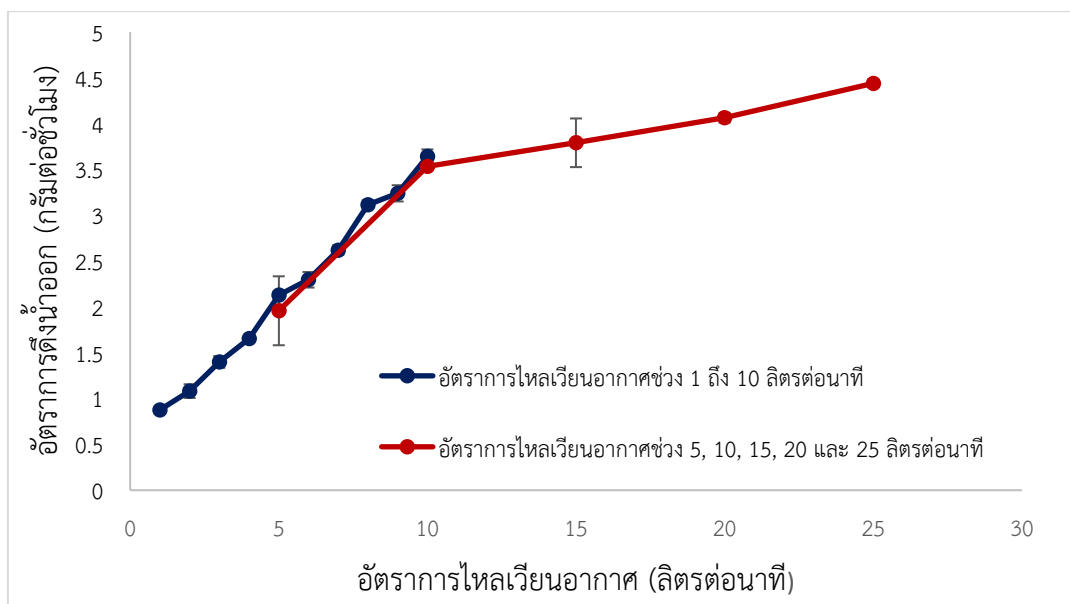
ชุดการทดลอง 3 แบบ ดังกล่าวข้างต้นดังนี้ แบบมีเมมเบรนและมีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ > แบบไม่มีเมมเบรนและไม่มี การหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ (ปล่อยอากาศทิ้ง) > แบบไม่มีเมมเบรนแต่ให้มีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ อธิบายได้ว่าการมีเมมเบรนไคโตซานช่วยในการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยได้ดีกว่าแบบไม่มีเมมเบรน เพราะไคโตซานมีหมู่ขบวนการไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่เอมีน (-NH<sub>2</sub>) ในโครงสร้าง ทำให้ไอน้ำในอากาศที่คายออกจากเปลือกกล้วยชอบที่จะไปสะสมบนผิวหน้าของเมมเบรนและแพร่ผ่านเมมเบรนออกไป ส่งผลให้อากาศที่สัมผัสกับเปลือกกล้วยในปฏิกรณ์มีความชื้นต่ำ ความชื้นในเปลือกกล้วยจึงสามารถระเหยออกมาได้มากขึ้น แต่ในกรณีที่ปฏิกรณ์ไม่มีเมมเบรนประกอบอยู่ด้วย ไม่ควรมีการหมุนเวียนอากาศกลับไปใช้ใหม่ (ปล่อยอากาศทิ้ง) เนื่องจากไม่มีเมมเบรนเป็นตัวช่วยในการดึงไอน้ำออกจากมวลอากาศ ทำให้มวลอากาศที่หมุนเวียนอยู่ในปฏิกรณ์มีความชื้นสะสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้การคายไอน้ำออกจากเปลือกกล้วยเกิดขึ้นได้น้อย จึงควรใช้มวลอากาศใหม่จากภายนอกในการทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลไอน้ำออกจากเปลือกกล้วย ผลการศึกษาในส่วนนี้จึงช่วยยืนยันบทบาทของเมมเบรนไคโตซานในการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย



รูปที่ 4.6 ผลของลักษณะรูปแบบการดำเนินปฏิกรณ์เวฟเอเพอร์มิเอเตอร์ต่ออัตราการดึงน้ำออก

#### 4.2.3 ผลของอัตราการไหลเวียนอากาศต่ออัตราการดึงน้ำออก

ได้ศึกษาอัตราการไหลเวียนอากาศที่ป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ 2 ช่วง คือ อัตราการไหลเวียนอากาศช่วง 1 ถึง 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลเวียนอากาศช่วง 5, 10, 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที โดยใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิต เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราการดึงน้ำออกเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วของอากาศที่สูงขึ้น เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ไหลเวียนช่วยให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลสูงขึ้น เมื่อพลังงานจลน์สูงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำ ทำให้เกิดการระเหยของโมเลกุลน้ำได้มากกว่าปกติเพื่อทำให้เกิดความสมดุล โดยมีค่าอัตราการดึงน้ำออกสูงสุดเท่ากับ  $4.44 \pm 0.04$  กรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการไหลเวียนของอากาศ 25 ลิตรต่อนาที (ความสามารถสูงสุดของปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้) แต่ในช่วงอัตราการไหลเวียนของอากาศที่ 1 ถึง 10 ลิตรต่อนาที มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการดึงน้ำออกใกล้เคียงกันมากทำให้ยากต่อการพิจารณาผล งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่วงอัตราการไหลเวียนของอากาศที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ในการศึกษาส่วนต่อไป

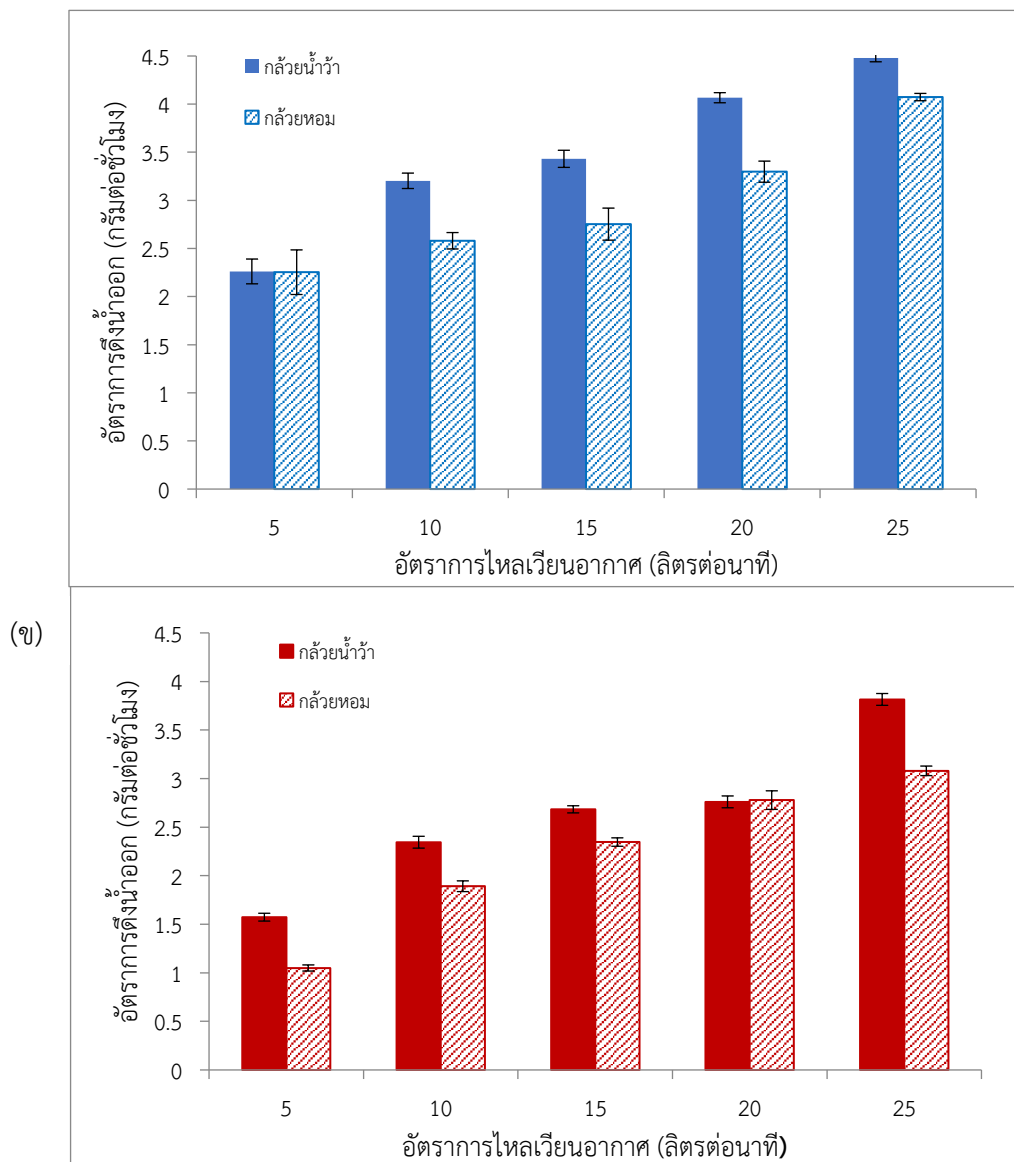


รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลเวียนอากาศต่ออัตราการดึงน้ำออก

### 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกของปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์

#### 4.3.1 ผลของอัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วย

ในส่วนนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดึงน้ำออกของเปลือกกล้วย 2 ชนิด คือเปลือกกล้วยน้ำว้าและ เปลือกกล้วยหอม ปริมาณ 20 กรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 70-80% ใช้อัตราการไหลเวียนของอากาศช่วงระหว่าง 5, 10, 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ที่ภาวะอุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอชันด้วยเมมเบรน 2 ชนิด คือเมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวางและเมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวาง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าอัตราการดึงน้ำออกเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเวียนของอากาศ โดยที่อัตราการไหลเวียนของอากาศเท่ากับ 25 ลิตรต่อนาที ปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตให้อัตราการดึงน้ำออกสูงสุดของเปลือกกล้วยน้ำว้าและเปลือกกล้วยหอมเท่ากับ  $4.48 \pm 0.04$  และ  $4.07 \pm 0.03$  กรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นให้อัตราการดึงน้ำออกสูงสุดของเปลือกกล้วยน้ำว้าและเปลือกกล้วยหอมเท่ากับ  $3.81 \pm 0.06$  และ  $3.08 \pm 0.04$  กรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และพบว่าความชื้นในเปลือกกล้วยน้ำว้าสามารถถูกกำจัดออกได้ง่ายกว่าเปลือกกล้วยหอม เนื่องจากโดยปกติแล้วเปลือกกล้วยหอมมีความหนามากกว่า ทำให้โมเลกุลน้ำที่แทรกอยู่ในเปลือกถูกดึงออกมาได้ยากกว่าเปลือกกล้วยน้ำว้าที่บางกว่า

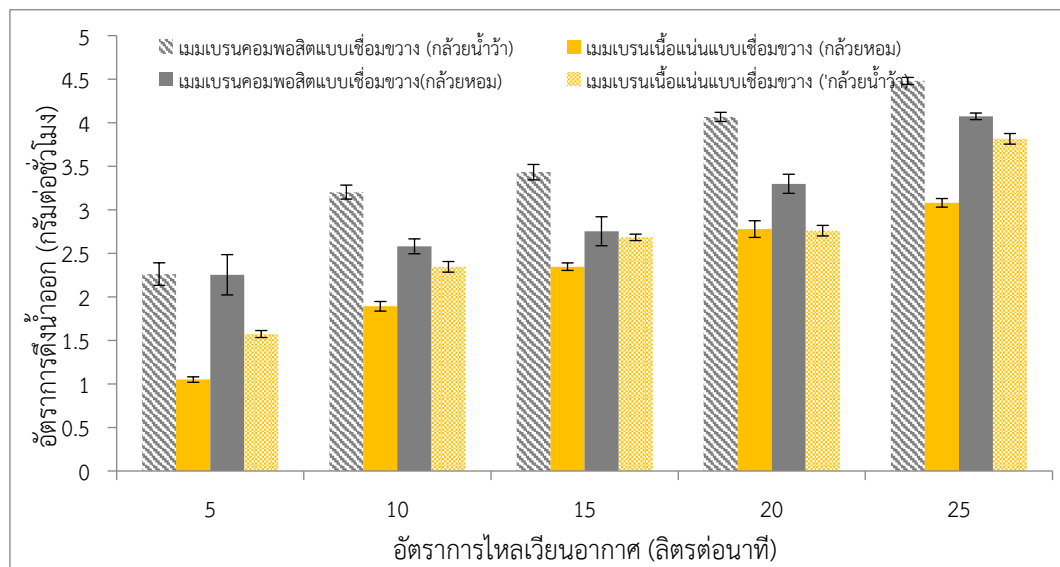


รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยในปฏิกรณ์เวพออร์มิเอเตอร์

(ก) เมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวาง (ข) เมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง

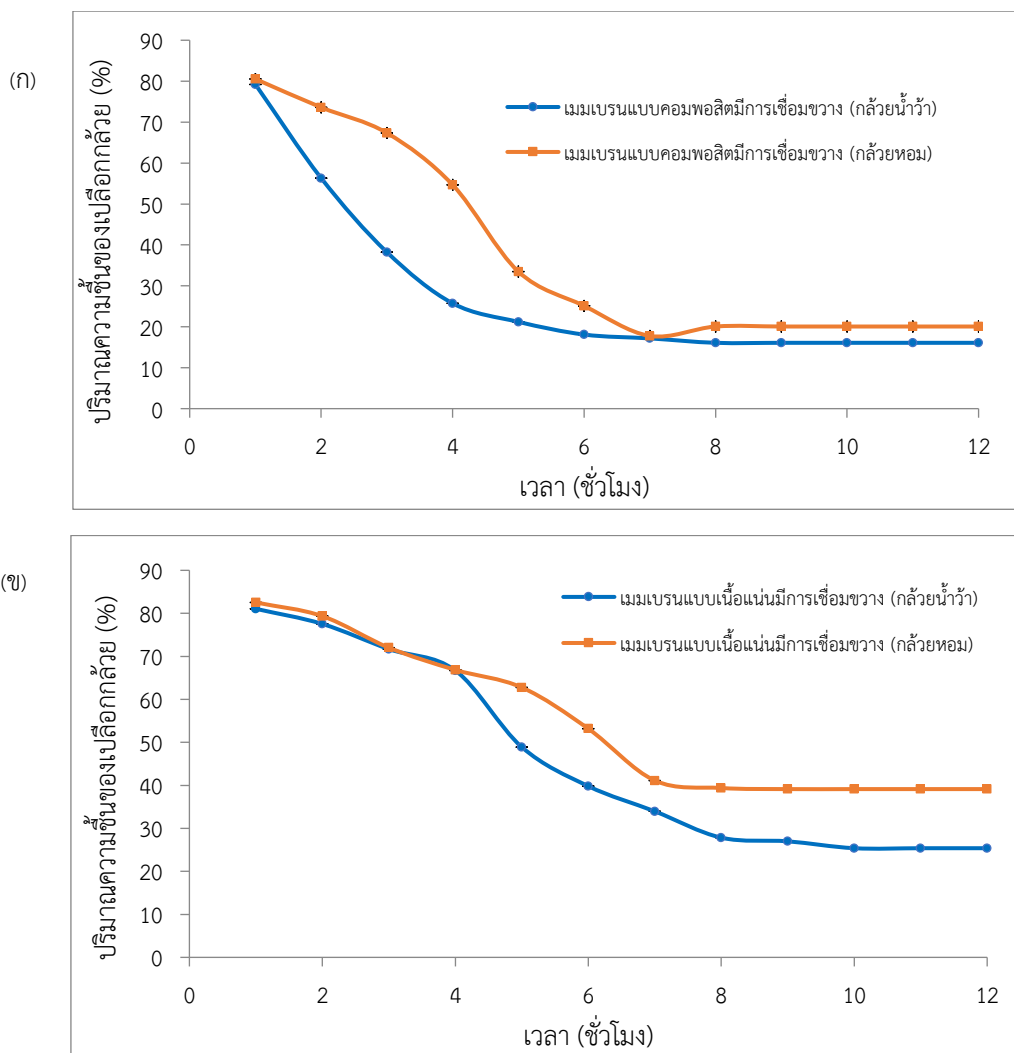
เพื่อแสดงผลเปรียบเทียบกัน จึงได้รวมผลของชนิดเปลือกกล้วย ชนิดเมมเบรน และอัตราการไหลเวียนอากาศต่ออัตราการดึงน้ำออกในรูปที่ 4.8 เป็นรูปที่ 4.9 พบว่าสามารถจัดลำดับความสามารถของปฏิกรณ์เรียงจากสูงไปต่ำได้ดังนี้ ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตกับเปลือกกล้วยน้ำจืด > ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตกับเปลือกกล้วยหอม > ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นกับเปลือกกล้วยน้ำจืด > ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นกับเปลือกกล้วยหอม โดยพบว่าประสิทธิภาพการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยของปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรนมากกว่าชนิดของ

เปลือกกล้วย โดยปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตมีประสิทธิภาพการทำแห้งสูงกว่าปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่น



รูปที่ 4.9 อัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยในปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเตอร์

รูปที่ 4.10 แสดงค่าความชื้นของเปลือกกล้วยจากการทำแห้ง ที่อัตราการไหลเวียนอากาศ 25 ลิตรต่อนาที ในช่วงระยะเวลา 1-12 ชั่วโมง พบว่าค่าความชื้นของเปลือกกล้วย ณ แต่ละชั่วโมง ลดลงตามเกรเดียนท์ ความเข้มข้นของปริมาณไอน้ำและความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของเมมเบรน โดยเปลือกกล้วยจากปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตมีความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรก อย่างไรก็ตามความชื้นของเปลือกกล้วยจากปฏิกรณ์ทุกแบบมีค่าคงที่เมื่อใช้เวลาในการทำแห้งมากกว่า 8 ชั่วโมง โดยได้เปลือกกล้วยมีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ  $16.08 \pm 0.003$ ,  $20.06 \pm 0.00$ ,  $25.38 \pm 0.024$  และ  $39.13 \pm 0.009$  จากปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตกับเปลือกกล้วยน้ำว้า ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตกับเปลือกกล้วยหอม ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นกับเปลือกกล้วยน้ำว้า และปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นกับเปลือกกล้วยหอม ตามลำดับ



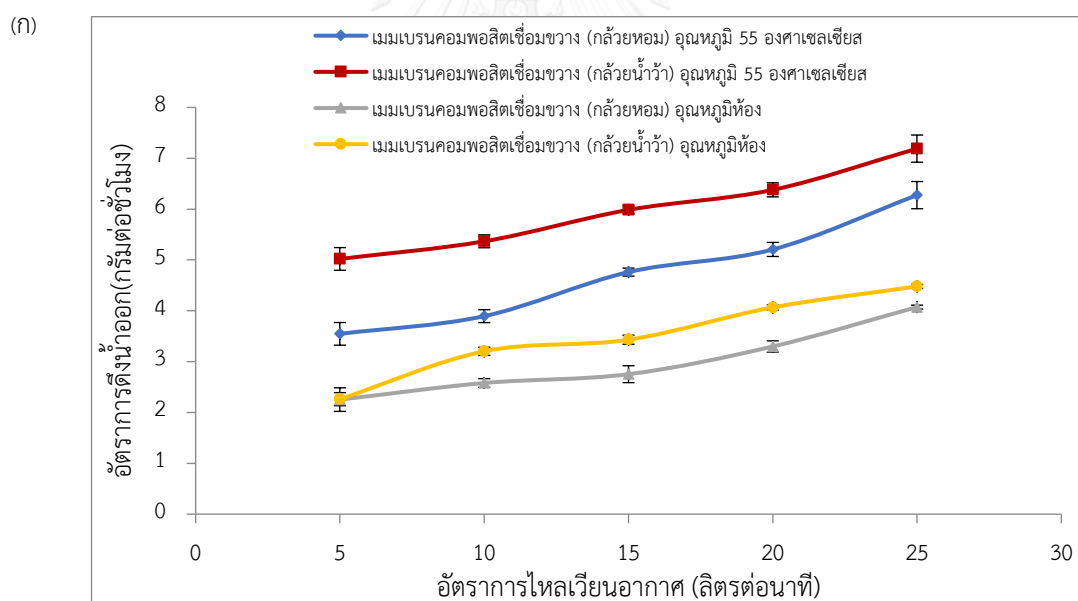
รูปที่ 4.10 ค่าความขึ้นของเปลือกกล้วย ณ เวลาต่าง ๆ ในปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์

(ก) เมมเบรนคอมพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (ข) เมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง

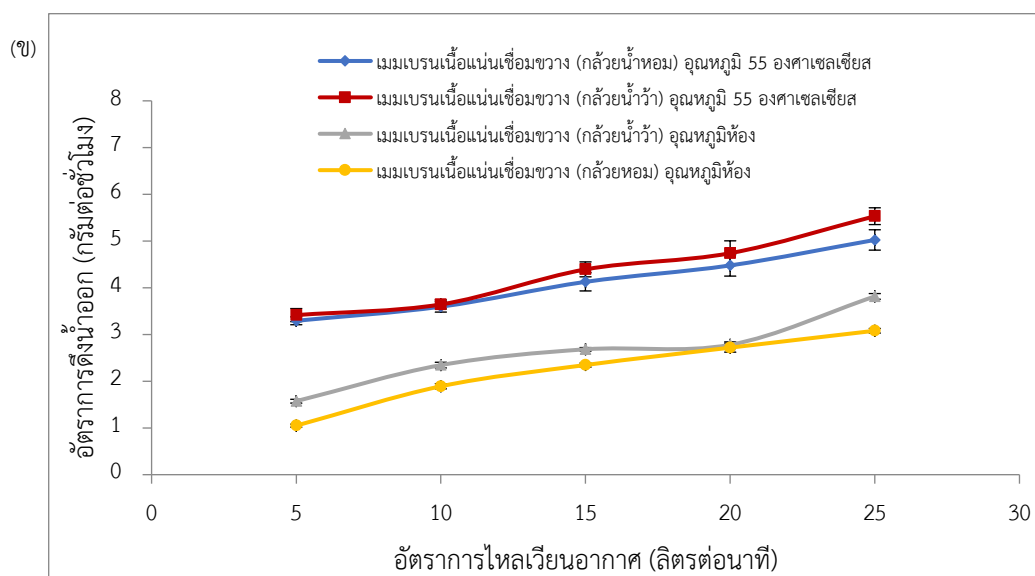
#### 4.3.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยในปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์

ในส่วนนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยที่สภาวะอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยใช้เปลือกกล้วย 2 ชนิด คือ เปลือกกล้วยน้ำว้าและเปลือกกล้วยหอม ปริมาณ 20 กรัม และใช้เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางสองชนิด คือ เมมเบรนคอมพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง และ เมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง ดำเนินการปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอชันเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลเวียนของอากาศในช่วง 5, 10, 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศหมุนเวียนเป็น 55 องศาเซลเซียส ทำให้ได้อัตราการ

ดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยสูงกว่าปฏิกรณ์ที่ดำเนินการที่ภาวะอุณหภูมิห้อง โดยที่อัตราการไหลเวียนอากาศ 25 ลิตรต่อนาที ให้อัตราการดึงน้ำออกมีค่าเท่ากับ  $7.19 \pm 0.26$ ,  $6.27 \pm 0.18$ ,  $5.53 \pm 0.17$  และ  $4.47 \pm 0.22$  กรัมต่อชั่วโมง จากปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตกับเปลือกกล้วยน้ำว่า ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตกับเปลือกกล้วยหอม ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นกับเปลือกกล้วยน้ำว่า และปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นกับเปลือกกล้วยหอม ตามลำดับ สูงกว่าอัตราการดึงน้ำออกจากปฏิกรณ์ที่ดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส)  $4.48 \pm 0.04$ ,  $4.07 \pm 0.03$ ,  $3.81 \pm 0.06$  และ  $3.08 \pm 0.04$  กรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ อธิบายได้ว่า อุณหภูมิของอากาศที่ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของเปลือกกล้วย ทำให้เซลล์ผิวของเปลือกกล้วยขยายตัว เกิดการระเหยของไอน้ำผ่านทางรูพรุนของเปลือกกล้วยได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลของไคโตซานมีความยืดหยุ่นมากขึ้นทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้างมากขึ้น จึงทำให้ไอน้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานซึ่งไม่เป็นที่ปรารถนาของการทำแห้งด้วยปฏิกรณ์ที่ใช้เมมเบรนในงานวิจัยนี้







รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อการดึงน้ำออก

(ก) เมมเบรนแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง (ข) เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 4 5 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดึงน้ำออก

ปฏิกรณ์	อัตราการไหลเวียนอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการดึงน้ำออก (กรัมต่อชั่วโมง)	
		อุณหภูมิ (55 องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส)
เมมเบรนแบบ คอมพอสิต (เปลือกกลัวยน้ำว่า)	5	5.22±0.22	2.26±0.12
	10	5.36±0.12	3.20±0.08
	15	5.98±0.12	3.48±0.08
	20	6.37±0.07	4.06±0.05
	25	7.19±0.26	4.43±0.04
เมมเบรนแบบ คอมพอสิต (เปลือกกลัวยหอม)	5	3.41±0.14	2.25±0.23
	10	3.89±0.08	2.58±0.08
	15	4.76±0.16	2.75±0.16

	20	5.20±0.13	3.29±0.10
	25	6.27±0.18	4.07±0.03
เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (เปลือกกล้วยน้ำว้า)	5	3.41±0.14	1.57±0.04
	10	3.64±0.09	2.34±0.06
	15	4.39±0.15	2.68±0.03
	20	4.74±0.26	2.76±0.06
	25	5.53±0.17	3.81±0.06
เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (เปลือกกล้วยหอม)	5	3.29±0.08	1.05±0.03
	10	3.59±0.11	1.89±0.05
	15	4.12±0.19	2.34±0.04
	20	4.47±0.22	2.77±0.09
	25	5.02±0.21	3.08±0.04

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสุด (High heating value)

ค่าความร้อนของเปลือกกล้วยหลังจากการทำแห้งในปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องบอมป์แคลอริมิเตอร์ แสดงในตารางที่ 4.6 โดยค่าความร้อนสูงสุดของเปลือกกล้วยน้ำว้าและเปลือกกล้วยหอมเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 14.32 และ 14.22 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ พบว่าความชื้นในเปลือกกล้วยที่ลดลงทำให้ได้ค่าความร้อนสูงขึ้นตามที่คาดหวังไว้ โดยเปลือกกล้วยน้ำว้าและเปลือกกล้วยหอมหลังการทำแห้งที่อัตราการไหลเวียนอากาศ 25 ลิตรต่อนาที จากปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิต มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.4 และ 31.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 6 ค่าความร้อนของเปลือกกล้วยหลังจากการทำแห้งในปฏิกรณ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง  
หน่วย : เมกะจูล/กิโลกรัม

อัตราการ ไหลเวียนอากาศ (ลิตรต่อนาที)	เปลือกกล้วยน้ำว้า		เปลือกกล้วยหอม	
	เมมเบรนคอมพอสิต	เมมเบรนเนื้อแน่น	เมมเบรนคอมพอสิต	เมมเบรนเนื้อแน่น
5	17.78	16.10	17.34	15.46
10	18.73	16.13	18.40	15.85
15	18.74	16.49	18.44	15.89
20	18.93	16.51	18.53	15.97
25	19.24	17.04	18.66	16.60



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 1) สมบัติของเมมเบรนไคโตซาน

ก. ความหนาของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นและเมมเบรนแบบคอมพอสิต มีค่าเท่ากับ  $43.4 \pm 3.3$  และ  $195.6 \pm 14.6$  ไมครอน ตามลำดับ โดยผ้าสปันปอนด์มีความหนาเท่ากับ  $135.5 \pm 11.8$  ไมครอน

ข. มุมสัมผัสของเมมเบรนแบบคอมพอสิตและเมมเบรนแบบเนื้อแน่น มีค่าเท่ากับ  $70.2 \pm 3.5$  และ  $89.3 \pm 1.1$  องศา ตามลำดับ แสดงว่าเมมเบรนแบบคอมพอสิตมีความชอบน้ำมากกว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่น

ค. ร้อยละการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ (Pure water uptake) เมมเบรนแบบเนื้อแน่น และเมมเบรนแบบคอมพอสิต มีค่าเท่ากับ  $100.9 \pm 19.3$  และ  $81.2 \pm 4.76$  ตามลำดับ

ง. ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นตามมาตรฐาน ASTM D882 มีค่าเท่ากับ  $59.8 \pm 1.1$  เมกะพาสคัล ของเมมเบรนแบบคอมพอสิตและผ้าสปันปอนด์ตามมาตรฐาน D638 มีค่าเท่ากับ  $18.6 \pm 2.1$  และ  $7.2 \pm 0.8$  เมกะพาสคัล ตามลำดับ

จ. ร้อยละการยืดตัว (%Elongation) ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น เมมเบรนแบบคอมพอสิตและผ้าสปันปอนด์ มีค่าเท่ากับ  $4.1 \pm 0.8$ ,  $8.1 \pm 1.2$  และ  $23.0 \pm 2.7$  ตามลำดับ

2) สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งเปลือกกล้วยด้วยเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ในงานวิจัยนี้ คือ ใช้ระยะเวลาการทำแห้ง 2 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลเวียนอากาศ 25 ลิตรต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง

3) เครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ในงานวิจัยนี้มีความสามารถเรียงจากสูงไปต่ำได้ ดังนี้ ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยน้ำว่า > ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยหอม > ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยน้ำว่า > ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยหอม โดยมีค่าอัตราการดึงน้ำออกสูงสุด เท่ากับ  $4.48 \pm 0.04$ ,  $4.07 \pm 0.03$ ,  $3.81 \pm 0.06$  และ  $3.08 \pm 0.04$  กรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

4) ความชื้นของเปลือกกล้วยที่เหลืออยู่หลังจากการทำแห้งใน ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยน้ำว้า ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยหอม ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยน้ำว้า และ ปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางกับเปลือกกล้วยหอม มีค่าเท่ากับร้อยละ  $16.08 \pm 0.003$ ,  $20.06 \pm 0.00$ ,  $25.38 \pm 0.024$  และ  $39.13 \pm 0.009$  ตามลำดับ

5) เปลือกกล้วยน้ำว้าและเปลือกกล้วยหอมหลังการทำแห้งที่อัตราการไหลเวียนอากาศ 25 ลิตรต่อนาที จากปฏิกรณ์ใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิต มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.4 และ 31.2 ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มความจุ และเพิ่มอัตราการไหลเวียนอากาศให้สูงขึ้น



## รายการอ้างอิง

- [1] Banana. [Online]. Available from:  
[http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/231889/daf4f9f7ad6489370b97ea9847b19b5d?Resolve\\_DOI=10.14457/KMUTT.res.2015.13](http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/231889/daf4f9f7ad6489370b97ea9847b19b5d?Resolve_DOI=10.14457/KMUTT.res.2015.13). [2017, June. 8]
- [2] Cultivated banana. [Online]. Available from:  
<https://mewpoon.wordpress.com/category/uncategorized/>[2017, June. 8]
- [3] Cavendish banana. [Online]. Available from:  
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=30&chap=6&page=30-6-infodetail05.html>[2017, June. 8]
- [4] Cultivated banana and Cavendish banana. [ Online] . Available from:  
<http://bananaesy.blogspot.com/2015/06/blog-post.html>[2017, June. 8]
- [5] ชันทอง สุนทรภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [6] Membrane separation. [Online]. Available from:  
<https://www.intechopen.com/books/desalination-updates/phase-diagram-and-membrane-desalination>[2017, June. 8]
- [7] Filtration processes of membrane. [Online]. Available from:  
[http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2941/8/270056\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2941/8/270056_ch1.pdf)[2017, June. 8]
- [8] Membrane production. [Online]. Available from:  
[http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2084/8/238194\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2084/8/238194_ch1.pdf)[2017, June. 12]
- [9] Membrane separation process. [Online]. Available from:  
[http://doc.clib.psu.ac.th/public7/thesis7/full/261941/261941\\_ch1.pdf](http://doc.clib.psu.ac.th/public7/thesis7/full/261941/261941_ch1.pdf)[2017, June. 12]

- [10] Pervaporation process. [Online]. Available from:  
[http://www.sepratek.com/icons/app/cms/?html=/en/sub/int4\\_1\\_en.html&shell=/en/layout.shell:154](http://www.sepratek.com/icons/app/cms/?html=/en/sub/int4_1_en.html&shell=/en/layout.shell:154) [2017, June. 12]
- [11] Plate and frame module. [Online]. Available from:  
[http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2588/7/296259\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2588/7/296259_ch1.pdf)
- [12] Picture of Plate and frame module. [Online]. Available from:  
<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/CHE512/Synthetic%20membrane.pdf>[2017, June. 12]
- [13] Chitin. [Online]. Available from:  
<http://ejournals.swu.ac.th/index.php/jindedu/article/download/1965/>[2017, June. 12]
- [14] Chemical structure of chitin. [Online]. Available from:  
<http://iat.sut.ac.th/2013/biotech/research/detail/53>[2017, June. 12]
- [15] Chitosan. [Online]. Available from:  
[http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2084/8/238194\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2084/8/238194_ch1.pdf)[2017, June. 12]
- [16] R. Ampairojanawong. Pervaporation assisted esterification and transesterification of palm fatty acid distillate in chitosan membrane reactor. Master's Thesis, Science Program in Fuel technology Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2014.
- [17] Pure chitin. [Online]. Available from:  
<http://www.siamchemi.com/%E0%B9%84%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%95%E0%B8%8B%E0%B8%B2%E0%B8%99> [2017, June. 12]
- [18] Turovskiy, I. S., and Mathai, P. K., (2006). Dewatering. Wastewater sludge processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. pp. 106–135. ISBN 0-471-70054-1. OCLC 61821712. Retrieved 15 May 2009.

- [19] F. J. Colomer-Mendoza, L. Herrera-Prats, F. Robles-Martinez, A. Gallardo-Izquierdo, A. B. Pina-Guzmán, Effect of airflow on biodrying of gardening wastes in reactors. *Journal of Environmental Sciences* 25 (2013) 865 – 872.
- [20] M. Sugni, E. Calcaterra, F. Adani, Biostabilization–biodrying of municipal solid waste by inverting air flow. *Bioresource Technology* 96 (2005) 1331 – 1337.
- [21] L. Cai, Tong-Bin Chen, D. Gao, Guo-Di Zheng, Hong-Tao Liu, Tian-Hao Pan, Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying. *Water Research* 47 (2013) 4767 – 4773.
- [22] Yi-Jen Han, Ke-Hsuan Wang, Juin-Yih Lai, Ying-Ling Liu, Hydrophilic chitosan-modified polybenzimidazole membranes for pervaporation dehydration of isopropanol aqueous solutions. *Journal of Membrane Science* 463 (2014) 17 – 23.
- [23] L. Zhao, Wei-Mei Gu, Pin-Jing He, Li-Ming Shao, Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. *Water Research* 44 (2010) 6144 – 6152.
- [24] Standard contact angle goniometer RamehartInstrument200F1. [ Online] . Available from: <http://www.ramehart.com/200.htm> [2017, June. 20]
- [25] J. Arnusa. Paddy drying in chitosan membrane reactor. Master’s Thesis, Science Program in chemical technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2016.
- [26] Bomb calorimeter. [ Online] . Available from: [http://qc-line.com/p\\_1652\\_10719\\_55007-6200-EF-Isoperibol-Calorimeter.htm](http://qc-line.com/p_1652_10719_55007-6200-EF-Isoperibol-Calorimeter.htm) [2017, June. 20]
- [27] 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.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ภาคผนวก ก

## วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

### 1. การคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรนคือปริมาณน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับในเนื้อของเมมเบรนต่อน้ำหนักของเมมเบรนแห้ง อธิบายดังสมการ (ก-1)

$$\text{ค่าการดูดซับน้ำ (\%)} = ((\text{น.นเมมเบรนเปียก} - \text{น.นเมมเบรนแห้ง}) / \text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}) \times 100 \quad (\text{ก-1})$$

#### ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณค่าการดูดซับน้ำของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตเชื่อมขวาง

ค่าที่ได้จากการทดลอง

$$\text{น้ำหนักเมมเบรนเปียก} = 0.094 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง} = 0.164 \text{ กรัม}$$

จากสูตร

$$\text{ค่าการดูดซับน้ำ (\%)} = ((\text{น้ำหนักเมมเบรนเปียก} - \text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}) / \text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}) \times 100$$

$$= ((0.164 - 0.094) / 0.094) \times 100$$

$$= 74.4\%$$

## ภาคผนวก ข

### วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณอัตราการดิ่งน้ำออกและปริมาณความชื้นเปลือกกล้วย

#### 1. ความชื้น (moisture content)

โดยส่วนใหญ่แล้วค่าความชื้นจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในชีวมวลกับน้ำหนักของชีวมวลนั้นๆซึ่งสามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ

##### 1.1 การคำนวณจากพื้นฐานมวลชื้น (Wet basis)

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

โดยที่  $W_w$  คือ น้ำหนักของมวลเปียก (กรัม)

$W_d$  คือ น้ำหนักมวลแห้ง (กรัม)

##### 1.2 การคำนวณจากพื้นฐานมวลแห้ง (Dry basis)

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

โดยที่  $W_w$  คือ น้ำหนักของมวลเปียก (กรัม)

$W_d$  คือ น้ำหนักมวลแห้ง (กรัม)

ในการระบุค่าความชื้นของเปลือกกล้วยจะบอกในเทอมของพื้นฐานมวลชื้น

#### 2. การคำนวณค่าความชื้นในเปลือกกล้วยในงานวิจัยนี้

หลักการคำนวณค่าความชื้น

นำตัวอย่างเปลือกกล้วย ปริมาณ 20 กรัม หั่นชิ้นส่วนของเปลือกกล้วย ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตรใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ ที่อุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลเวียนของอากาศระหว่างช่วง 5,10,15,20,25 ลิตรต่อนาที เวลาในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชั่วโมง เพื่อทำการดิ่งน้ำออกจากเปลือกกล้วย ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของเปลือกกล้วยที่หายไป

##### 2.1 วิธีการวิเคราะห์

1. หั่นส่วนของเปลือกกล้วย (Banana peel) ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร จำนวน 20 กรัม โดยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งอย่างละเอียด

2. วางเปลือกกล้วยที่ซึ่งจำนวน 20 กรัม ลงบนตะแกรงภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้เรียบร้อย เงื่อนไขที่สภาวะที่อุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลเวียนของอากาศระหว่างช่วง 5, 10, 15, 20, 25 ลิตรต่อนาที เวลาในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชั่วโมง
3. เปิดปั๊มอากาศ (Air pump) โดยมีการกำหนดอัตราการไหลเวียนอากาศที่ทำการศึกษาด้วยเครื่องปรับระดับความเร็วลม (Rotameter)
4. เปิดสวิตช์ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
5. เก็บตัวอย่างมาชั่ง เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดและบันทึกผล

### ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าที่ได้จากการทดลองการดึงน้ำจากเปลือกกล้วยในเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ ที่ใช้เมมเบรนไคโดซานคอมพอสิตเชื่อมขวาง ที่อัตราการไหลเวียนของอากาศ 25 ลิตรต่อนาที โดยใช้เปลือกกล้วยน้ำว่า

$$\%MC \text{ (Based on wet basis)} = ((W_w - W_d) / W_w) \times 100$$

$$\text{น้ำหนักเปลือกกล้วยก่อนทำการดึงน้ำออก (} W_w \text{)} = 20.00 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักเปลือกกล้วยหลังการดึงน้ำออก (} W_d \text{)} = 11.04 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } \%MC (W_w0) &= ((W_w - W_d) / W_w) \times 100 \\ &= ((20.00 - 11.04) / 20.00) \times 100 \\ &= 48.8\% \end{aligned}$$

### 3. การคำนวณอัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยในงานวิจัยนี้

อัตราในการดึงน้ำออกคือค่าที่บอกถึงปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมวลต่อน้ำหนักของมวลเปียกต่อชั่วโมง ดังสมการ

$$R = (W_w - W_d) / \Delta t \quad (\text{ค-3})$$

โดยที่ R คือ อัตราในการดิ่งน้ำออก (กรัมต่อชั่วโมง)

$W_w$  คือ ค่าน้ำหนักของมวลเปียกก่อนการดิ่งน้ำออก (กรัม)

$W_d$  คือ ค่าน้ำหนักของมวลแห้งหลังการดิ่งน้ำออก (กรัม)

$\Delta t$  คือ ผลต่างของเวลาก่อนและหลังดิ่งน้ำออก (ชั่วโมง)

### ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าที่ได้จากการทดลองการดิ่งน้ำจากเปลือกกล้วยในเครื่องปฏิกรณ์เวเพอเพอร์มิเอเตอร์ ที่ใช้เมมเบรนโคโตะซานคอมพอสิตเชื่อมขวาง ที่อัตราการไหลเวียนของอากาศ 25 ลิตรต่อนาที โดยใช้เปลือกกล้วยน้ำว่า เวลาในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชั่วโมง

น้ำหนักเปลือกกล้วยก่อนทำดิ่งน้ำออก ( $W_w$ ) = 20.00 กรัม

น้ำหนักเปลือกกล้วยหลังการดิ่งน้ำออก ( $W_d$ ) = 11.04 กรัม

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad R &= (W_w - W_d) / \Delta t \\ &= ((W_w - W_d) / \Delta t) \\ &= ((20.00 - 11.04) / 2) \\ &= 4.48 \text{ กรัมต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

### 4. การหาค่าความร้อนสูงสุดของเปลือกกล้วยหลังผ่านกระบวนการดิ่งน้ำออก

#### หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ภายใต้บอมบ์จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบๆ และก็จะได้ค่าความจุความร้อนของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ที่ได้จากการเผาเปลือกกล้วยหลังผ่านกระบวนการดิ่งน้ำออก

#### เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

## วัตถุดิบ

1. เปลือกกล้วย
2. น้ำกลั่น
3. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
4. น้ำล้างบอมบ์

## การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

1. ชั่งเปลือกกล้วยหลังกระบวนการตึงน้ำออกประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของจุดระเบิดให้ลวดแตะผิวตัวอย่างถ่านหินในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นและเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาแน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ปริมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาทีให้อุณหภูมิคงที่
8. เมื่ออุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่องค่อยๆ ลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเฝ้าไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้

**ภาคผนวก ค**  
**ค่าที่ได้จากการทดลอง**

**1. ค่าความหนาของแผ่นเมมเบรนและตัวรองรับเมมเบรน**

ตาราง ค-1 ความหนาของเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชนิดเมมเบรนไคโตซาน	ความหนา(ไมครอน)
เมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มีการเชื่อมขวาง	43.4±3.3
เมมเบรนแบบคอมพอสิตที่มีการเชื่อมขวาง	195.6±14.6
ผ้าสปันปอนด์	135.5±11.8

**2. ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานตาราง**

ตาราง ค-2 ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการดูดซับน้ำบริสุทธิ์
เมมเบรนคอมพอสิตแบบเชื่อมขวาง	81.2± 4.76
เมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง	100.9±19.3



### 3.ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

ตาราง ค-3 ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรน

ชนิด	ค่ามุมสัมผัส	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวเมมเบรน
เมมเบรนเนื้อแน่นเชื่อมขวาง	$89.3 \pm 1.1$	
เมมเบรนคอมพอสิตเชื่อมขวาง	$70.2 \pm 3.5$	

### 4.ค่าจากการทดสอบความสามารถในการทนแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน

ตาราง ค-4 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยืด

วัสดุ	ความหนา (ไมครอน)	ค่าความทนต่อแรงดึง (เมกะพาสคัล)	ร้อยละการยืด
เมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง	$43.4 \pm 3.3$	$59.8 \pm 1.1$	$4.1 \pm 0.8$
เมมเบรนแบบคอมพอสิตเชื่อมขวาง	$195.6 \pm 14.6$	$18.6 \pm 2.1$	$8.1 \pm 1.2$
ผ้าสปันปอนด์	$198.2 \pm 8.8$	$7.2 \pm 0.8$	$23.0 \pm 2.7$

### 5.ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดึงน้ำออก

ตาราง ค-5 ค่าอัตราการดึงน้ำออกจากเปลือกกล้วยที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (25-40 องศาเซลเซียส) และที่สภาวะ 55 องศาเซลเซียส

ปฏิกรณ์	อัตราการไหลเวียน อากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการดึงน้ำออก (กรัมต่อชั่วโมง)	
		ณ อุณหภูมิ 55 (องศาเซลเซียส)	ณ อุณหภูมิห้อง (25-40) (องศาเซลเซียส)
เมมเบรนคอมพอสิต แบบเชื่อมขวาง (เปลือกกล้วยน้ำว้า)	5	5.22 $\pm$ 0.22	2.26 $\pm$ 0.12
	10	5.36 $\pm$ 0.12	3.20 $\pm$ 0.08
	15	5.98 $\pm$ 0.12	3.48 $\pm$ 0.08
	20	6.37 $\pm$ 0.07	4.06 $\pm$ 0.05
	25	7.19 $\pm$ 0.26	4.43 $\pm$ 0.04
เมมเบรนคอมพอสิต แบบเชื่อมขวาง (เปลือกกล้วยหอม)	5	3.41 $\pm$ 0.14	2.25 $\pm$ 0.23
	10	3.89 $\pm$ 0.08	2.58 $\pm$ 0.08
	15	4.76 $\pm$ 0.16	2.75 $\pm$ 0.16
	20	5.20 $\pm$ 0.13	3.29 $\pm$ 0.10
	25	6.27 $\pm$ 0.18	4.07 $\pm$ 0.03
เมมเบรนเนื้อแน่น แบบเชื่อมขวาง (เปลือกกล้วยน้ำว้า)	5	3.41 $\pm$ 0.14	1.57 $\pm$ 0.04
	10	3.64 $\pm$ 0.09	2.34 $\pm$ 0.06
	15	4.39 $\pm$ 0.15	2.68 $\pm$ 0.03
	20	4.74 $\pm$ 0.26	2.76 $\pm$ 0.06
	25	5.53 $\pm$ 0.17	3.81 $\pm$ 0.06
	5	3.29 $\pm$ 0.08	1.05 $\pm$ 0.03

เมมเบรนเนื้อแน่น	10	3.59 $\pm$ 0.11	1.89 $\pm$ 0.05
แบบเชื่อมขวาง (เปลือกกล้วยหอม)	15	4.12 $\pm$ 0.19	2.34 $\pm$ 0.04
	20	4.47 $\pm$ 0.22	2.77 $\pm$ 0.09
	25	5.02 $\pm$ 0.21	3.08 $\pm$ 0.04

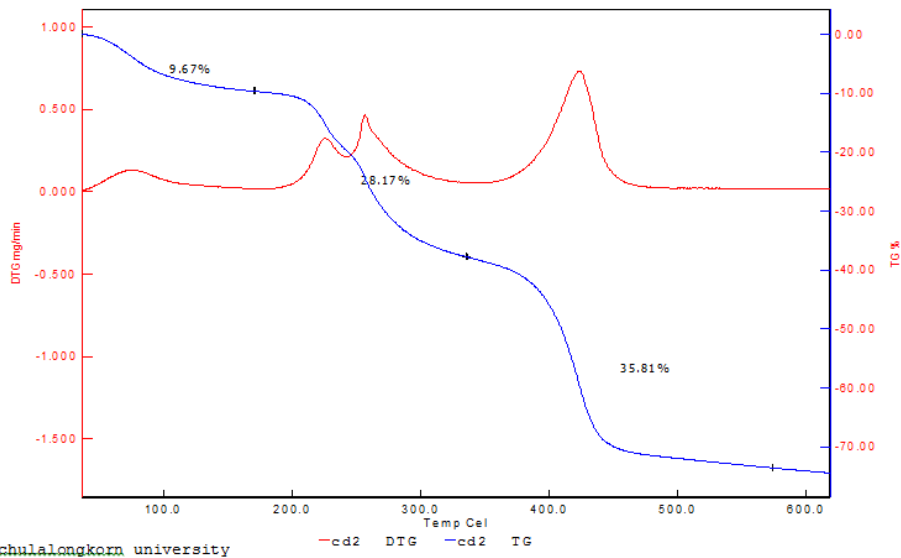
### 6.ค่าความร้อนสูงสุด (High heating value)

ตาราง ค-6 ค่าความร้อนของเปลือกกล้วยหลังจากกระบวนการดึ่งน้ำออก

อัตราการไหลเวียน อากาศ (ลิตรต่อนาที)	เปลือกกล้วยน้ำว้า		เปลือกกล้วยหอม	
	เมมเบรน คอมพอสิต	เมมเบรน เนื้อแน่น	เมมเบรน คอมพอสิต	เมมเบรน เนื้อแน่น
5	17.78	16.10	17.34	15.46
10	18.73	16.13	18.40	15.85
15	18.74	16.49	18.44	15.89
20	18.93	16.51	18.53	15.97
25	19.24	17.04	18.66	16.60

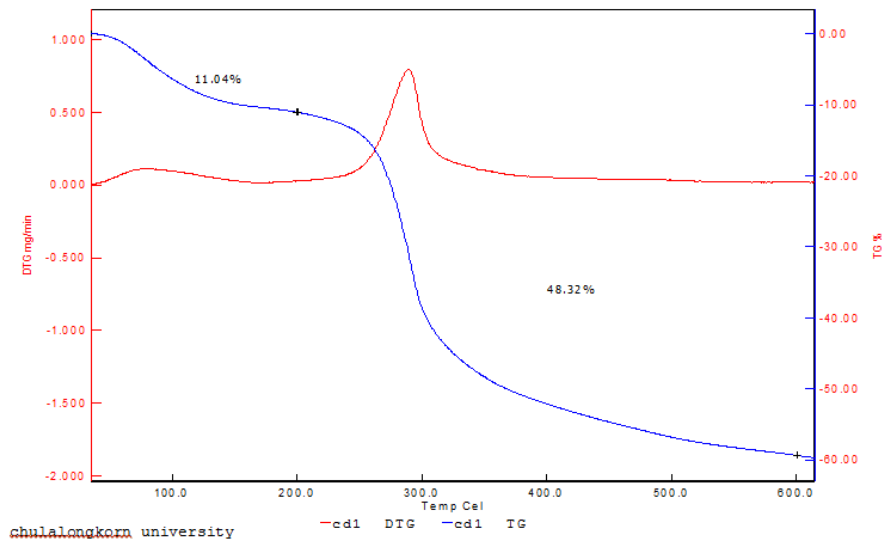
## 7. ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของเมมเบรนด้วยเทคนิค TGA

Module: TG/DTA Temperature Program: Comment:  
 Data Name: cc Cel...Cel Cel/min min Operator: Chanisara  
 Measurement Date: 25/5/2017 1\* 40...700 10 0 Gas1: Nitrogen  
 Sample Name: cc Gas2: Air  
 Sample Weight: 10.319 mg Pan: Platinum  
 Reference Name: blank  
 Reference Weight: 0.000 mg



รูป ค - 1 TGA thermogram ของเมมเบรนแบบคอมพอลิเมอร์เชื่อมขวาง

Module: TG/DTA Temperature Program: Comment:  
 Data Name: cd1 Cel...Cel Cel/min min Operator: Chanisara  
 Measurement Date: 25/5/2017 1\* 40...700 10 0 Gas1: Nitrogen  
 Sample Name: cd Gas2: Air  
 Sample Weight: 10.043 mg Pan: Platinum  
 Reference Name: blank  
 Reference Weight: 0.000 mg



รูป ค - 2 TGA thermogram ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวดารารัตน์ ปากวิเศษ เกิดเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พุทธศักราช 2533 สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556 จนสำเร็จปีการศึกษา 2560 และเข้าร่วมการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ 2560 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (The National and International Graduate Research Conference 2017) วันที่ 10 มีนาคม 2560 ณ อาคาร พจน์ สารสิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

