โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยาของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำเข้มข้นโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับ

ชื่อนิสิต นางสาว มุกนภา วัธนอธิจิระ
นางสาว วัชรา วชิรปาณีกูล

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยาของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำเข้มข้นโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับ

โดย

นางสาวมุกนภา วัธนอธิจิระ

นางสาววัชรา วชิรปาณีกูล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประจำปีการศึกษา 2562

A study of physical, chemical and microbiological changes on concentrated coconut water treated by reverse osmosis

Muknapa Wattanaatijira
Watchara Wachirapaneekul

Project Advisor

Asst. Prof. Chidphong Pradistsuwana

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Science Program in Food Technology
Department of Food Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2019

หัวข้องานวิจัย การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยาของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำเข้มข้นโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับ
โดย นางสาว มุกนภา วัธนอธิจิระ
นางสาว วัชรา วชิรปาณีกูล
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ
ปีการศึกษา 2562

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อนุมัติให้รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
ประจำปีการศึกษา 2562

....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์)
หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้องานวิจัย	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยาของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำเข้มข้นโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับ
โดย	นางสาว มุกนภา วัธนอธิจิระ นางสาว วัชรา วชิรปาณีกูล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันน้ำมะพร้าวกำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะในกลุ่มของผู้ที่ออกกำลังกายหรือนักกีฬา เพราะช่วยชดเชยวิตามินและแร่ธาตุที่สูญเสียไปและให้พลังงานต่ำ น้ำมะพร้าวเป็นเครื่องดื่มที่อุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น วิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ รวมทั้งยังมีกลิ่นหอมและรสชาติที่ดี ผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าวในท้องตลาดมีความหลากหลายไม่มากนักและการแปรรูปน้ำมะพร้าวส่วนใหญ่จะใช้การแปรรูปด้วยความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำน้ำมะพร้าวเข้มข้นโดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การกรองด้วยเยื่อแบบออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) ร่วมกับการใช้การกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) ที่เป็นการทำให้ปลอดเชื้อแบบเย็น (Cold sterilization) ในการลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำมะพร้าว โดยคาดหวังว่ากระบวนการนี้จะสามารถรักษาคุณค่าทางโภชนาการและสารให้กลิ่นและกลิ่นรสต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าวไว้ได้ สามารถยืดอายุการเก็บรักษา และเป็นการเพิ่มทางเลือกในการบริโภคให้กับผู้บริโภค ในแผนงานที่เสนอไปได้วางวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับต่อสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและทางจุลชีววิทยาของน้ำมะพร้าวและเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของน้ำมะพร้าว แต่เนื่องจากมีสถานการณ์ของโรคโควิด-19 จึงไม่สามารถดำเนินการตามแผนที่วางไว้ได้อย่างครบถ้วน แต่สามารถดำเนินการในส่วนของการออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์กรองที่สามารถใช้ได้ทั้งการกรองแบบออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชันซึ่งภายในห้องกรองสามารถเปลี่ยนเมมเบรนระหว่างเมมเบรนแบบท่อกลวงประเภทออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชันได้ อุปกรณ์นี้สามารถรองรับความดันสูงที่จะใช้กับการกรองแบบออสโมซิสแบบผันกลับที่ต้องใช้ความดันไม่ต่ำกว่า 3 เมกะปาสคาลได้ พร้อมทั้งให้อัตราเร็วไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนได้ไม่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตรต่อวินาที และสามารถปรับความดันและอัตราเร็วไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนได้ด้วยอินเวอร์เตอร์มอเตอร์และวาล์วเข็ม (Needle valve) นอกจากนี้ได้ทำการทดลองเพิ่มในส่วนของการกรองน้ำมะพร้าวโดยใช้อุปกรณ์ที่บรรจุเมมเบรนประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ขนาดเล็กเพื่อศึกษารูปแบบการกรองและประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อ ซึ่งพบว่าสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ขั้นต่ำ 2 log CFU/ml และลดจำนวนยีสต์และราในน้ำมะพร้าวได้ขั้นต่ำ 5 log CFU/ml ตามลำดับ ไมโครฟิลเตรชันจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในวิธีการจัดการกับน้ำมะพร้าวเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชันในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

Project Title A study of physical, chemical and microbiological changes on concentrated coconut water treated by reverse osmosis
Student Muknapa Wattanaatijira
Watchara Wachirapaneekul
Study Program Bachelor of Science in Food Technology
Advisor Asst. Prof. Chidphong Pradistsuwana
Academic Year 2020

ABSTRACT

Nowadays, coconut water has gained popularity among athletes and fitness enthusiasts because it can compensate for vitamins and minerals loss and provides low calories. Coconut water is beverage that is rich of beneficial nutrients such as vitamins and minerals. It also has delicate aroma and taste, but few varieties of coconut water products are found in the recent industry. Most of coconut water processing are thermal processes. Thus, this research focused in producing concentrated coconut water by using reverse osmosis (RO) and cold sterilizing by using ultrafiltration, instead of using thermal process. This methodology could maintain nutritional value and volatile aroma compounds of coconut water products, prolong shelf life, and giving another option for the consumers. In proposed project, the research aimed to study about the effect of physical, chemical and microbiological changes on concentrated coconut water treated by reverse osmosis and shelf life of the product. Because of COVID-19 situation, the research could not be completed all steps according to the plan but part of designing and making filtration equipment which can use for both reverse osmosis and ultrafiltration membranes, i.e. the inner tubular type membrane for reverse osmosis and ultrafiltration can be changed, was done. Moreover, this equipment can tolerate to high pressure more than 3 MPa which is necessary for reverse osmosis, along with providing cross flow rate not lower than 40 cm/s. Pressure and flow rate can be adjusted by the invertor motor and needle valve. Besides, the experiment on coconut water filtration by using the small equipment containing microfiltration (MF) membrane was done in order to study filtration mechanism and the efficiency of the elimination of microorganisms by microfiltration. The result showed that it can reduce at least 2 log CFU/ml of total mesophilic microorganisms and 5 log CFU/ml of yeasts and molds. Hence, microfiltration is one of alternative methods to pre-treat coconut water before feeding to the filtration equipment which can use for both reverse osmosis and ultrafiltration.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยการสนับสนุนจากทุนโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ประจำปีการศึกษา 2562 และได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผศ.ดร.ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านต่างๆตลอดการวิจัย ตลอดจนแก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องด้วยความเอาใจมาโดยตลอด คณะผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ความเข้าใจแก่คณะผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถที่จะทำการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆประจำห้องปฏิบัติการ ได้แก่ คุณสราวุฒิ แถลงกิจ (หัวหน้าห้องปฏิบัติการและปฏิบัติการเฉพาะหน่วย) และคุณอำไพ เขตสาลี (หัวหน้าห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพทางอาหาร) ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ และได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจสำคัญ คอยช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนตลอดมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ

คณะผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย และหากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้วิจัยต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

มุกนภา วัธนอธิจิระ

วัชรา วชิรปาณีกูล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

กิตติกรรมประกาศ ฉ

สารบัญ ช

สารบัญตาราง ฏ

สารบัญรูปภาพ ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

- 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
- 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1
  - 1.2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัยที่วางแผนไว้ 1
  - 1.2.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ทำได้จริง 2
- 1.3 ขอบเขต/กรอบแนวคิดการวิจัย 2
  - 1.3.1 ขอบเขต/กรอบแนวคิดการวิจัยที่วางแผนไว้ 2
  - 1.3.2 ขอบเขต/กรอบแนวคิดการวิจัยที่ทำได้จริง 3
- 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4
  - 1.4.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยที่วางแผนไว้ 4
  - 1.4.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยที่ทำได้จริง 4

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์ 5

- 2.1 มะพร้าว 5

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 น้ำมะพร้าว 5
    2.2.1 คุณสมบัติของน้ำมะพร้าว 7
    2.2.2 กระบวนการแปรรูปน้ำมะพร้าว 8
2.3 การกรองด้วยเมมเบรน 8
    2.3.1 ประเภทของการกรองด้วยเมมเบรน 9
    2.3.2 โมดูลชนิดต่างๆของเมมเบรน 9
        2.3.2.1 โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and Frame module) 9
        2.3.2.2 โมดูลแบบท่อกลวง (Tubular module) 9
        2.3.2.3 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber module) 10
        2.3.2.4 โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module) 10
    2.3.3 รูปแบบการกรองสารด้วยเมมเบรน 10
        2.3.3.1 การกรองแบบปิดตาย (Dead-end Filtration) 10
        2.3.3.2 การกรองแบบไหลขวาง (Cross Flow Filtration) 10
    2.3.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ 11
2.4 การทำให้เข้มข้น 12
    2.4.1 การทำให้เข้มข้นโดยการระเหย (Evaporation) 12
    2.4.2 การทำให้เข้มข้นด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freeze concentration) 12
    2.4.3 การกรองด้วยเมมเบรน (Membrane filtration) 12
2.5 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำมะพร้าว 12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 ข้อกำหนดทางอาหารที่เกี่ยวข้องกับน้ำมะพร้าว 13

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย 16

3.1 วัตถุดิบ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 16

3.1.1 วัตถุดิบ 16

3.1.2 สารเคมี 16

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ .16

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย 20

3.2.1 การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน 20

3.2.1.1 ศึกษาข้อมูลและออกแบบเมมเบรนที่จะใช้ 20

3.2.1.2 การออกแบบเครื่องมือสำหรับการกรอง 22

3.2.2 การเตรียมน้ำมะพร้าว 23

3.2.3 การกรองน้ำมะพร้าวด้วยกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน 24

3.2.3.1 การทำเข้มข้นโดยการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส 24

3.2.3.2 การกรองกำจัดเชื้อโดยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน 24

3.2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีระหว่างน้ำมะพร้าวสดและน้ำมะพร้าวที่ได้หลังการกรอง 24

3.2.5 การตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา 25

3.2.6 ทดสอบประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อในน้ำมะพร้าวด้วยไมโครฟิลเตรชัน 25

3.2.6.1 การเตรียมน้ำมะพร้าวก่อนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.6.2 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเครื่องมือขนาดเล็ก 26

3.2.6.3 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 26

3.2.6.4 การตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 26

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 28

4.1 การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน 28

4.2 ทดสอบประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อในน้ำมะพร้าวด้วยไมโครฟิลเตรชัน 30

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 30

4.2.2 การตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 31

4.2.3 พฤติกรรมการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันที่มีการกวนโดยแท่งแม่เหล็กกวนสาร 32

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 33

5.1 สรุปผลการทดลอง 33

5.2 ข้อเสนอแนะ 33

ภาคผนวก 34

ภาคผนวก ก ผลการทดลองเพิ่มเติม 35

ภาคผนวก ข การเตรียมสารเคมี 38

ภาคผนวก ค วิธีวิเคราะห์ 39

บรรณานุกรม 41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ประวัติผู้เขียน	45

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมะพร้าวที่ได้จากมะพร้าวที่มีระดับความสุกแตกต่างกัน 6

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณคาร์โบไฮเดรตและแร่ธาตุต่างๆในน้ำมะพร้าวเปรียบเทียบกับเครื่องดื่มเกลือแร่ 7

ตารางที่ 3 ประเภทของเมมเบรนในกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน 9

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 30

ตารางที่ 5 ปริมาณจุลินทรีย์ของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 31

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 การกรองแบบปิดตายและแบบไหลขวาง 11

ภาพที่ 2 แบบจำลองเครื่องมือการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 18

ภาพที่ 3 เครื่องมือการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 19

ภาพที่ 4 รายละเอียดการออกแบบห้องกรองและเมมเบรนสำหรับทั้งการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส และแบบอัลตราฟิลเตรชัน 21

ภาพที่ 5 ไดอะแกรมของการไหลเวียนของระบบการกรองที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน 22

ภาพที่ 6 เครื่องกรองที่สามารถใช้ได้ทั้งการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน 28

ภาพที่ 7 ห้องกรองที่สามารถใช้ได้ทั้งการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน 29

ภาพที่ 8 เมมเบรนชนิดท่อกลวงสำหรับการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและรีเวิร์สออสโมซิส 29

ภาพที่ 9 น้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน 30

ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลต่อพื้นที่ (Flux) ต่อเวลา (t) ต่อเวลาโดยการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1.5 บาร์ โดยมีการกวนโดยแท่งแม่เหล็กกวนสาร 32

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

น้ำมะพร้าวเป็นเครื่องดื่มที่เป็นที่รู้จักของทั้งคนไทยและคนต่างประเทศ และมะพร้าวถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยชนิดหนึ่งที่มีการขยายตัวในด้านส่งออกอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากน้ำมะพร้าวอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น วิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ รวมทั้งยังมีกลิ่นหอม รสชาติดี และมีคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี (FAO, 2000) ปัจจุบันน้ำมะพร้าวกำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะในกลุ่มของผู้ที่ออกกำลังกายหรือนักกีฬา เพราะสามารถชดเชยวิตามินและแร่ธาตุที่สูญเสียจากการออกกำลังกายและให้พลังงานต่ำ

ผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าวในท้องตลาดมีความหลากหลายไม่มากนักและการแปรรูปน้ำมะพร้าวส่วนใหญ่จะใช้การแปรรูปด้วยความร้อน เช่น การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) และการสเตอริไลซ์ (Sterilization) แต่กระบวนการเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านคุณค่าทางอาหารรวมถึงกลิ่นและกลิ่นรสต่าง ๆ และอาจส่งผลทำให้สีของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการแปรรูปเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำน้ำมะพร้าวเข้มข้นโดยใช้การกรองด้วยเยื่อแบบออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) ร่วมกับการใช้การกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) ที่เป็นการทำให้ปลอดเชื้อแบบเย็น (Cold sterilization) ในการลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำมะพร้าว โดยคาดหวังว่าจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาขอผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ยังสามารถรักษาคุณค่าทางโภชนาการและสารให้กลิ่นและกลิ่นรสต่าง ๆ ไว้ได้ และเป็นการเพิ่มทางเลือกในการบริโภคให้กับผู้บริโภคอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัยที่วางแผนไว้

1. เพื่อศึกษาผลของกระบวนการกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับต่อสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและทางจุลชีววิทยาของน้ำมะพร้าว

2. เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของน้ำมะพร้าว

1.2.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ทำได้จริง (***เนื่องจากมีสถานการณ์ของโรคโควิด-19 จึงไม่สามารถดำเนินการตามแผนที่วางไว้ได้อย่างครบถ้วน จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนแผนใหม่)

1. สามารถออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์กรองที่สามารถใช้ได้ทั้งการกรองแบบออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชันได้

2. ศึกษาการกรองน้ำมะพร้าวโดยใช้อุปกรณ์ที่บรรจุเมมเบรนประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ขนาดเล็กเพื่อศึกษารูปแบบการกรองและประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อ

1.3 ขอบเขต/กรอบแนวคิดการวิจัย

1.3.1 ขอบเขต/กรอบแนวคิดการวิจัยที่วางแผนไว้

1. ศึกษาการกรองทำเข้มข้นน้ำมะพร้าวโดย
   1.1 ใช้การกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับในการทำให้น้ำมะพร้าวมีความเข้มข้นมากขึ้น จากการกรองน้ำออกไป ได้ผลิตภัณฑ์เข้มข้น คือ รีเทนเทท (retentate) หรือส่วนที่ถูกกักไว้บนเมมเบรนไม่สามารถผ่านไปได้

   1.2 นำน้ำมะพร้าวเข้มข้นมากรองโดยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันเพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าว ได้ผลิตภัณฑ์ คือ ส่วนฟิลเตรท (filtrate) หรือส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้

2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชันโดย
   2.1 ศึกษาการหาปริมาณความหนืดของน้ำมะพร้าวที่เปลี่ยนแปลงไป

   2.2 ศึกษาปริมาณความขุ่นโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร

   2.3 ศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยใช้รีแฟรกโทมิเตอร์แบบพกพา (Hand refractometer)

3. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน (ส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) โดย

3.1 ศึกษาปริมาณแร่ธาตุโพแทสเซียมที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 766.490 นาโนเมตร

3.2 ศึกษาปริมาณแร่ธาตุโซเดียมที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 589.592 นาโนเมตร

3.3 ศึกษาปริมาณแร่ธาตุแมกนีเซียมที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 279.533 นาโนเมตร

3.4 ศึกษาปริมาณแร่ธาตุแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 317.933 นาโนเมตร

3.5 ศึกษาปริมาณแร่ธาตุเหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 259.940 นาโนเมตร

4. ศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันโดย

4.1 ศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไป (Total Plate Count) โดยใช้เทคนิค pour plate

4.2 ศึกษาปริมาณยีสต์และรา (Yeast and Mold Counts) โดยใช้เทคนิค spread plate

5. ศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาน้ำมะพร้าวสด และน้ำมะพร้าวที่ผ่านกระบวนการกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน

1.3.2 ขอบเขต/กรอบแนวคิดการวิจัยที่ทำได้จริง

1. ศึกษาการจัดสร้างและออกแบบอุปกรณ์กรองทำเข้มข้นน้ำมะพร้าวโดย

1.1 ใช้การกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับในการทำให้น้ำมะพร้าวมีความเข้มข้นมากขึ้น จากการกรองน้ำออกไป ได้ผลิตภัณฑ์เข้มข้น คือ รีเทนเทท (retentate) หรือส่วนที่ถูกกักไว้บนเมมเบรนไม่สามารถผ่านไปได้

1.2 นำน้ำมะพร้าวเข้มข้นมากรองโดยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันเพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าว ได้ผลิตภัณฑ์ คือ ส่วนฟิลเตรท (filtrate) หรือส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้

2. ทดสอบประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อในน้ำมะพร้าวด้วยไมโครฟิลเตรชันโดยกรองน้ำมะพร้าวที่ผ่านการบ่มให้มีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สูงขึ้น

3. การวัดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันโดย

3.1 วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้รีแฟรกโทมิเตอร์แบบพกพา (Hand refractometer)

3.2 วัดค่าพีเอชโดยใช้พีเอชมิเตอร์ (pH meter)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยที่วางแผนไว้

1. ได้ทราบถึงหลักการและขั้นตอนของกระบวนการกรองโดยวิธีออสโมซิสแบบผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน

2. ได้ทราบคุณภาพ คุณลักษณะทางกายภาพ ทางเคมีและทางจุลชีววิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมะพร้าวหลังผ่านกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับและและอัลตราฟิลเตรชัน

3. ได้ทราบอายุการเก็บรักษาของน้ำมะพร้าวสด และน้ำมะพร้าวที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับและและอัลตราฟิลเตรชัน

1.4.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยที่ทำได้จริง

1. ได้ทราบถึงหลักการและขั้นตอนในการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน

2. ได้ศึกษารูปแบบและประสิทธิภาพการกรองน้ำมะพร้าวโดยการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันเพื่อที่จะได้เห็นเป็นแนวทางของการกรองโดยใช้เมมเบรน

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 มะพร้าว

มะพร้าว (Coconut) เป็นพืชยืนต้นใบเลี้ยงเดี่ยวชนิดหนึ่ง อยู่ในตระกูลปาล์ม (PALMAE) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Cocos nucifera* Linn. มีหลายสายพันธ์เนื่องจากเป็นพืชผสมข้ามพันธุ์ มะพร้าวสามารถเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณเขตร้อน และกึ่งร้อน สำหรับในประเทศไทยจะ มีการปลูกมะพร้าวในทุกภาคทั่วประเทศไทย แต่สวนขนาดใหญ่อยู่ในภาคใต้ และจังหวัดชายทะเลรอบอ่าวไทย

มะพร้าวนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ผลอ่อนใช้รับประทานสด (น้ำและเนื้อ) เนื้อมะพร้าวจากผลแก่นำไปปรุงอาหารและขนมหลายชนิด และใช้สกัดน้ำมัน กากที่เหลือใช้เลี้ยงสัตว์ น้ำมันมะพร้าวใช้ประกอบอาหาร เนยเทียม และสบู่ (ประสงค์ ทองยงค์, 2538)

การเก็บผลผลิตลูกมะพร้าวจะได้เฉลี่ยเดือนละ 1 ครั้ง มะพร้าวให้ผลผลิตน้อยระหว่างเดือนธันวาคมถึงมีนาคม ต่อจากนั้นจะเก็บมะพร้าวได้มากขึ้นเรื่อย ๆ ช่วงที่เก็บผลได้มากที่สุดช่วงเดือนสิงหาคมถึงกันยายน โดยผลมะพร้าวเริ่มแก่เมื่ออายุประมาณ 11-12 เดือน เกษตรกรนิยมสอยมะพร้าวทุก ๆ 45-60 วัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2554)

2.2 น้ำมะพร้าว

น้ำมะพร้าว คือ ของเหลวใสที่อยู่ภายในผลมะพร้าวซึ่งถือเป็นปริมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักมะพร้าว (Paixão *et al.*, 2019) และน้ำมะพร้าวมีองค์ประกอบเป็นน้ำประมาณร้อยละ 94 โดยมวลต่อปริมาตร น้ำตาล เช่น กลูโคส ฟรุคโตส และซูโครสประมาณร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร โปรตีนประมาณร้อยละ 0.02 โดยมวลต่อปริมาตรและมีไขมันเพียงประมาณร้อยละ 0.01 โดยมวลต่อปริมาตร นอกจากนั้นยังอุดมไปด้วยแร่ธาตุ เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และมีปริมาณโซเดียมต่ำ (Damar, 2006)

ตารางที่ 1: ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมะพร้าวที่ได้จากมะพร้าวที่มีระดับความสุกแตกต่างกัน

Physicochemical properties	Coconut maturity (months)		
	5-6	8-9	>12
Volume of water (mL)	684 ± 27.0^{a}	518 ± 14.2^{b}	332 ± 19.9^{c}
TSS (°Brix)	5.60 ± 0.14^{b}	6.51 ± 0.21^{a}	4.85 ± 0.17^{c}
TA[d] (%)	0.089 ± 0.004^{a}	0.076 ± 0.008^{b}	0.061 ± 0.003^{c}
pH	4.78 ± 0.13^{c}	5.34 ± 0.12^{b}	5.71 ± 0.10^{a}
Turbidity Sugar content	0.031 ± 0.013^{c}	0.337 ± 0.108^{b}	4.051 ± 0.323^{a}
Sugar content			
Fructose (mg/mL)	39.04 ± 0.824^{a}	32.52 ±0.227^{b}	21.48 ±0.21^{c}
Glucose (mg/mL)	35.43 ± 0.510^{a}	29.96 ± 0.243^{b}	19.06 ± 0.19^{c}
Sucrose (mg/mL)	0.85 ± 0.010^{c}	6.36 ± 0.06^{b}	14.37 ± 0.25^{a}
Minerals			
Potassium (mg/100 mL)	220.94 ±0.320^{c}	274.32 ± 0.139^{b}	35.11 ± 0.133^{a}
Sodium (mg/100 mL)	7.61 ± 0.041^{b}	5.60 ± 0.016^{b}	36.51 ± 0.020^{a}
Magnesium (mg/100 mL)	22.03 ± 0.069^{b}	20.87 ± 0.023^{b}	31.65 ± 0.038^{a}
Calcium (mg/100 mL)	8.75 ± 0.045^{c}	15.19 ± 0.028^{b}	23.98 ± 0.054^{a}
Iron (mg/mL)	0.294 ± 0.082^{b}	0.308 ± 0.011^{b}	0.322 ± 0.049^{a}
Protein (mg/mL)	0.041 ± 0.007^{b}	0.042 ± 0.002^{b}	0.217 ± 0.018^{a}
TPC[e] (mg/L)	54.00 ± 3.135^{a}	42.59 ± 0.834^{b}	25.70 ± 1.756^{c}

หมายเหตุ: แต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำโดยแสดงความคลาดเคลื่อนด้วย “ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน”และค่าที่มีตัวยก (Superscript) เป็นตัวอักษาเดียวกัน หมายความว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[d] ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้แสดงในรูปร้อยละของกรดมาลิก

[e] ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดแสดงในรูป mg GAE/L

ที่มา: Tan และคณะ (2014)

2.2.1 คุณสมบัติของน้ำมะพร้าว

น้ำมะพร้าวมีสภาพปลอดเชื้อขณะที่ยังอยู่ภายในผล อย่างไรก็ตามเมื่อปอกหรือเปิดผลออกในระหว่างที่ดำเนินกระบวนการต่าง ๆ จะทำให้เกิดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ได้ง่าย เนื่องจากน้ำมะพร้าวมีแหล่งอาหารหลัก คือ น้ำตาลและแร่ธาตุ ที่เหมาะกับการเจริญของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นกรดต่ำและมีแอคติวิตีของน้ำ (Water activity) ที่สูง (≈0.99)

น้ำมะพร้าวถือเป็นเครื่องดื่มธรรมชาติที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกาย (Functional drink) และจากแร่ธาตุและน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบทำให้เป็นเครื่องดื่มที่เหมาะแก่การดื่มหลังออกกำลังกาย เพื่อเพิ่มความสดชื่นและเรียกคืนน้ำ (Rehydrating) ให้กับร่างกาย (Walter *et al.*, 2014)

ตารางที่ 2: แสดงปริมาณคาร์โบไฮเดรตและแร่ธาตุต่าง ๆ ในน้ำมะพร้าวเปรียบเทียบกับเครื่องดื่มเกลือแร่

Parameter (mg/100ml)	Coconut water [a]	Sport drink [b]
Carbohydrates	4710	5800
Calcium	27	1
Phosphorus	5	9
Sodium	2	46
Potassium	204	8
Magnesium	6	3

[a] ได้จากผลมะพร้าวอ่อน (Yong, *et al.*) ส่วนประกอบต่าง ๆ จึงอาจมีผลกระทบมาจากดินและสภาวะในการปลูก

[b] ได้จาก FAO (2007) และส่วนประกอบอาจมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับผู้ผลิต

ที่มา: Walter และคณะ (2014)

2.2.2 กระบวนการแปรรูปน้ำมะพร้าว

การใช้กระบวนการทางความร้อนได้รับความนิยมสำหรับใช้ในการแปรรูปน้ำมะพร้าวเพราะสามารถทำลายเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) และเพอร์ออกซิเดส (POD) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนสีของน้ำมะพร้าว ได้แก่ กระบวนการพาสเจอร์ไรส์แบบวิธีใช้ความร้อนสูง - เวลาสั้น (High Temperature Short Time หรือ HTST) (Rolle, 2007) การสเตอริไลซ์ (Sterilization) การใช้ไมโครเวฟ เป็นต้น และอาจใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ เช่น การใส่วัตถุเจือปนอาหาร เพื่อที่จะยืดอายุการเก็บของน้ำมะพร้าว แต่กระบวนการเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีผลต่อรสชาติ คุณภาพทางประสาทสัมผัสและการยอมรับจากผู้บริโภค จึงมีผู้วิจัยส่วนมากให้ความสนใจกับการแปรรูปโดยไม่ใช้ความร้อน โดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations หรือ FAO) ได้กล่าวว่าการปั่นเหวี่ยงแรงสูง (high-speed centrifugation) ตามด้วยไมโครฟิวเตรชันร่วมกับการใช้บรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อทำให้สามารถเก็บน้ำมะพร้าวอ่อนได้เป็นอย่างต่ำ 6 เดือน แต่กระบวนการไมโครฟิวเตรชันไม่ได้ส่งผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและเพอร์ออกซิเดส โดยผลจากเอนไซม์ทั้งสองชนิดนี้คือ สามารถทำให้น้ำมะพร้าวเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล สีเหลือง หรือสีชมพูได้ในระหว่างการแปรรูปหรือในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาโดยทำการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันหลังจากกรองแบบไมโครฟิวเตรชันและพบว่าสามารถกักเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและเพอร์ออกซิเดสได้บางส่วน ดังนั้นการเปลี่ยนสีของน้ำมะพร้าว (discoloration) จึงอาจจะยังเกิดได้อยู่ (Prades, Dornier, Diop, and Pain, 2011; Rosa, 2007)

2.3 การกรองด้วยเมมเบรน

การกรองด้วยเมมเบรน คือ การกรองโดยใช้เยื่อเมมเบรนบาง เพื่อการแยกแยกสารหรือตัวถูกละลายออกจากสารละลาย โดยใช้แรงดันให้สารโมเลกุลเล็กเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรน ซึ่งอาศัยผลต่างของความดัน โดยส่วนที่ถูกกักด้วยเมมเบรน ไม่สามารถผ่านไปได้ เรียกว่า รีเทนเทท (retentate) และส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า เพอมิเอท (permeate) หรือฟิลเตรท (filtrate)

2.3.1 ประเภทของการกรองด้วยเมมเบรน

การกรองด้วยเมมเบรนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ๆ คือ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) และรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3: ประเภทของเมมเบรนในกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน

Membrane type	Pore size	Pressure	Smallest particles removed
Microfiltration (MF)	0.1 - 5 μm	0.01 MPa to 0.5 MPa	Colloid, Bacteria
Ultrafiltration (UF)	1 - 100 nm	0.1 MPa to 1 MPa	Large organic molecule, Virus
Nanofiltration (NF)	0.5 - 10 nm	0.8 to 4 MPa	Small organic molecule, Divalent ion
Reverse osmosis (RO)	<0.5 nm	3 to 8.5 MPa	All dissolved species

ที่มา: Cui and Muralidhara (2010)

2.3.2 โมดูลชนิดต่าง ๆ ของเมมเบรน

การนำเมมเบรนไปใช้งานจริงจำเป็นต้องบรรจุแผ่นเมมเบรนลงในวัสดุรองรับที่เรียกว่าโมดูล โดยโมดูลของเมมเบรนที่นิยมใช้กันในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ ได้แก่

2.3.2.1 โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and Frame module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุด โดยวางเมมเบรนบนแผ่นรองรับที่มีรูพรุน (Porous plate) สลับกัน สารที่ป้อนจะถูกบังคับให้ซึมผ่านแผ่นเมมเบรนแล้วไหลออกจากโมดูล

2.3.2.2 โมดูลแบบท่อกลวง (Tubular module)

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็กมามัดรวมกันเป็นมัด ๆ และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยสแตนเลสหรือไฟเบอร์กลาส สารที่ป้อนจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อ ด้วยความดันจะทำให้โมเลกุลของสารสามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับ เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย

เพราะมีการไหลตามขวาง (Cross flow) จึงนิยมใช้ในกรณีที่อาจมีการอุดตัน โมดูลชนิดนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุอนินทรีย์

2.3.2.3 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber module)

เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีผิวคล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน (ซึ่งมีความหนาเพียง 0.1 ไมครอน) ทำโดยการนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมามัดรวมกันเป็นมัด ๆ และงอพับเป็นรูปเกือกม้าหรือตัวยู สารที่ป้อนจะเข้าทางด้านนอกซึมผ่านเข้าไปภายในเส้นใย สิ่งที่สำคัญของโมดูลแบบเส้ยในกลวง คือ สารที่ป้อนเข้าไปนั้นควรสะอาด เพื่อป้องกันการเกิดการอุดตันที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดฟาวลิ่ง (Fouling) หรือการอุดตันของเมมเบรน

2.3.2.4 โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module)

ประกอบด้วยเมมเบรนแบบแผ่นวางซ้อนกันม้วนรอบแกนที่เป็นท่อเพอมิเอท แผ่นกั้นของสารที่ป้อนที่อยู่ระหว่างแผ่นเมมเบรนจะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดความกว้างของช่องป้อนสาร ซึ่งจะมีความหนา 0.1 มิลลิเมตร มีการไหลตามขวาง (Cross flow) แผ่นเมมเบรนสองชั้นหรือหลายชั้นต้องมีความเหมาะสมและสามารถรองรับความดันที่อยู่ในห้องบรรจุ (Housing) ที่มีการป้อนสารเข้าไปภายในและยอมให้รีเทนเทททออกมาได้

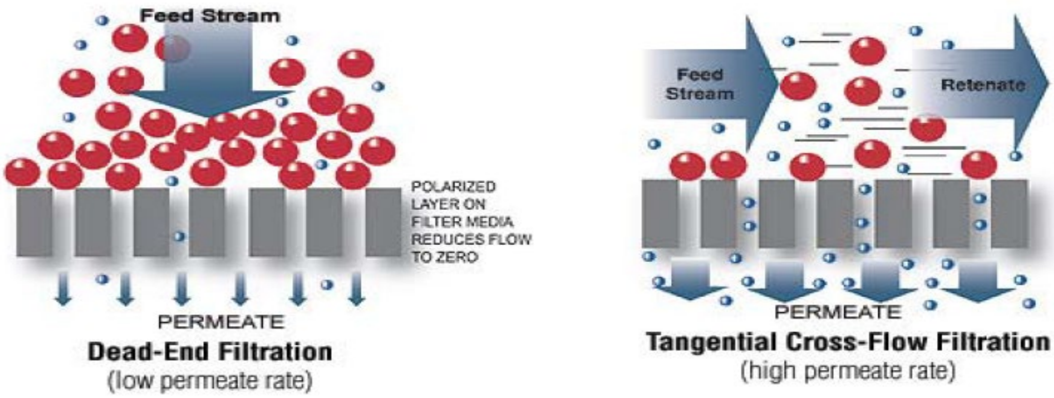
2.3.3 รูปแบบการกรองสารด้วยเมมเบรน

2.3.3.1 การกรองแบบปิดตาย (Dead-end Filtration)

เป็นการป้อนสารเข้าในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน ตัวถูกละลายหรือสารที่ไม่ผ่านเมมเบรนจะถูกสะสมบนผิวหน้าของเมมเบรนทั้งหมด มีเพียงส่วนเพอมิเอทที่ไหลออกจากระบบ จึงมีการสะสมของอนุภาคที่ถูกกักบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งจะเกิดเป็นชั้นเค้ก (Filter cake) หรือชั้นเจล (Gel layer) ที่หนา ทำให้ความต้านทานการไหลของเพอมิเอทเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลของเพอมิเอทลดลง

2.3.3.2 การกรองแบบไหลขวาง (Cross Flow Filtration)

การกรองแบบนี้สารที่ป้อนจะไหลในทิศทางที่ขนานกับแผ่นเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมิเอท ซึ่งจะทาให้อนุภาคที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้นั้นยังคงเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง ป้องกันการเกิดชั้นเค้กที่หนาบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน การกรองแบบไหลขวางจึงสามารถลดการอุดตัน


Feed Stream
POLARIZED LAYER ON FILTER MEDIA REDUCES FLOW TO ZERO
PERMEATE
Dead-End Filtration
(low permeate rate)
Feed Stream
Retenate
PERMEATE
Tangential Cross-Flow Filtration
(high permeate rate)

ภาพที่ 1: การกรองแบบปิดตายและแบบไหลขวาง (Ballew *et al*., 2002)

2.3.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้

การนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรม เริ่มมีมาตั้งแต่ ค.ศ.1970 โดยกระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิวเตรชันได้นำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันสามารถกรองโปรตีนของแข็ง แขวนลอย คอลลอยด์ สารประกอบโพลิฟีโนลิค แป้ง เพคติน และจุลินทรีย์ที่มีในผลไม้ ส่วนใสที่ได้จากการกรองจะมีความคงตัว แม้ในช่วงการเก็บรักษา ในยุคแรกของการเอากระบวนการเมมเบรนมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ เพื่อใช้แทนในขั้นตอนการแยกตะกอนของสารช่วยตกตะกอนและมีการใช้กระบวนการดังกล่าวทดแทนขั้นตอนต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เช่น ในขั้นตอนสเตอริไลส์ การแยกกากเป็นต้น ทำให้กระบวนการผลิตน้ำผลไม้ ได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก นอกจากนี้กระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันได้เริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความใสและมีคุณภาพมากกว่าการทำให้ใส โดยวิธีการอื่น ๆ อีกทั้งเป็นการลดปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำผลไม้โดยใช้ความร้อนต่ำ (Cold sterilization) (Girard and Fukumoto, 2000)

กระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสสามารถใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการทำเข้มข้นน้ำผลไม้ เนื่องจากไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของสารและสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้อง (25-27 องศาเซลเซียส) (จึงช่วยประหยัดพลังงาน) ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการที่ใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม เพราะความร้อนจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ (Álvarez *et al*., 2000) น้ำผลไม้ที่ถูกทำเข้มข้นมีข้อดีทางเศรษฐศาสตร์ในการเก็บ การขนส่ง การกระจายสินค้า ตลอดจนการเก็บรักษาเนื่องจากมีแอคทิวิตีของน้ำลดลง (Echavarría *et al*., 2012)

2.4 การทำให้เข้มข้น

เป็นการแยกน้ำออกทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้น ปริมาณน้ำลดลง การทำให้เข้มข้นจะทำให้ปริมาณค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity) ลดลงซึ่งเป็นการควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เกิดความสะดวกในการจัดเก็บรักษา ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

2.4.1 การทำให้เข้มข้นโดยการระเหย (Evaporation)

เป็นการระเหยตัวทำละลายออกไป จึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นให้กับตัวถูกละลาย โดยจะใช้เครื่องระเหยซึ่งประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับถังโดยมักใช้สภาพสุญญากาศควบคู่ไปกับการระเหยด้วย เพราะจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์เดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง จึงช่วยรักษาสารประกอบที่ระเหยง่ายอื่น ๆ ไว้ได้ โดยการสัมผัสกับความร้อนในเครื่องระเหยอาจส่งผลต่อกลิ่น รส และคุณค่าทางอาหารได้

2.4.2 การทำให้เข้มข้นด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freeze concentration)

เป็นการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งซึ่งทำให้ตัวทำละลายเปลี่ยนสถานะกลายเป็นผลึกน้ำแข็งกระจายอยู่รวมกับส่วนที่เป็นของเหลว แล้วแยกผลึกน้ำแข็งออกจากสารสะลาย มักใช้เครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพราะความหนาแน่นของผลึกน้ำแข็งต่ำกว่าความหนาแน่นของอาหารเหลวเข้มข้น

2.4.3 การกรองด้วยเมมเบรน (Membrane filtration)

เป็นการเคลื่อนที่ของสารละลายผ่านเมมเบรนจากที่โดยอาศัยแรงดันขับ แยกส่วนที่เป็นตัวทำละลายและตัวถูกละลายออกจากกันโดยสามารถแยกเป็นส่วนสารละลายเข้มข้นและส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ซึ่งเป็นพวกตัวทำละลายหรือตัวถูกละลายบางส่วน กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนไม่ต้องอาศัยความร้อน ประหยัดพลังงาน สามารถแยกได้โดยไม่เปลี่ยนเฟส

2.5 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำมะพร้าว

จุลินทรีย์กลุ่มหลักที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียของน้ำมะพร้าวบรรจุขวด คือ แบคทีเรียและยีสต์และรา (Wizzard *et al*., 2002; Barbara *et al*., 2000) เนื่องจากยีสต์สามารถเจริญได้ที่ค่าพีเอชต่ำ สภาวะแวดล้อมที่มีน้ำตาลสูง และอุณหภูมิแช่เย็น (Tribst *et al*., 2009) นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ได้มีการรายงานว่าแบคทีเรียที่ผลิตกรดแล็กติก (lactic acid bacteria หรือ LAB) เป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญในการเสื่อมเสียของน้ำผลไม้ (Dharmasena *et al*., 2015)

2.6 ข้อกำหนดทางอาหารที่เกี่ยวข้องกับน้ำมะพร้าว

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ซึ่งมีสาระที่เกี่ยวข้องกับน้ำมะพร้าวที่จะได้ทำการทดลองดังนี้

“ข้อ 2 ให้เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทเป็นอาหารที่กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐาน

ข้อ 3 เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทตามข้อ 2 แบ่งออกเป็น 5 ชนิด ดังต่อไปนี้

(1) น้ำที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือออกซิเจนผสมอยู่ด้วย

(2) เครื่องดื่มที่มีหรือทำจากผลไม้ พืชหรือผัก ไม่ว่าจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือออกซิเจนผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ตาม

(3) เครื่องดื่มที่มีหรือทำจากส่วนผสมที่ไม่ใช่ผลไม้ พืชหรือผัก ไม่ว่าจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือออกซิเจน ผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ตาม

(4) เครื่องดื่มตาม (2) หรือ (3) ชนิดเข้มข้นซึ่งต้องเจือจางก่อนบริโภค

(5) เครื่องดื่มตาม (2) หรือ (3) ชนิดแห้ง

ข้อ 4 เครื่องดื่มตามข้อ 2 ต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐาน ดังต่อไปนี้

(1) มีกลิ่นและรสตามลักษณะเฉพาะของเครื่องดื่มนั้น

(2) ไม่มีตะกอน เว้นแต่ตะกอนอันมีตามธรรมชาติของส่วนประกอบ

(3) น้ำที่ใช้ผลิตต้องเป็นน้ำที่มีคุณภาพหรือมาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วย เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท

(4) ตรวจพบแบคทีเรียชนิดโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2.2 ต่อเครื่องดื่ม 100 มิลลิลิตร โดยวิธีเอ็ม พี เอ็น (Most Probable Number)

(5) ตรวจไม่พบแบคทีเรียชนิด อี.โคไล (*Escherichia coli*)

(6) จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคให้เป็นไปตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยเรื่องมาตรฐานอาหารด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค

(7) ไม่มีสารเป็นพิษจากจุลินทรีย์หรือสารเป็นพิษอื่นในปริมาณที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

(8) ตรวจพบยีสต์และเชื้อราได้ ดังนี้

(8.1) น้อยกว่า 1 ในเครื่องดื่ม 1 มิลลิลิตร สำหรับเครื่องดื่มตามข้อ 3 (1)

(8.2) น้อยกว่า 1 ในเครื่องดื่ม 1 มิลลิลิตร สำหรับเครื่องดื่มตามข้อ 3 (2) และข้อ 3 (3) ที่ผ่านกรรมวิธีสเตอริไลส์ หรือ ยู เอช ที

(8.3) น้อยกว่า 100 ในเครื่องดื่ม 1 มิลลิลิตร สำหรับเครื่องดื่มตามข้อ 3 (2) และข้อ 3 (3) ที่ผ่านกรรมวิธีอื่นนอกเหนือจากวิธีสเตอริไลส์ หรือ ยู เอช ที

(8.4) น้อยกว่า 10 ในเครื่องดื่ม 1 กรัม สำหรับเครื่องดื่มตามข้อ 3 (4) ที่ผ่านกรรมวิธีสเตอริไลส์ หรือ ยู เอช ที

(8.5) น้อยกว่า 100 ในเครื่องดื่ม 1 กรัม สำหรับเครื่องดื่มตามข้อ 3 (4) ที่ผ่านกรรมวิธีอื่นนอกเหนือจากวิธีสเตอริไลส์ หรือ ยู เอช ที

(8.6) น้อยกว่า 100 ในเครื่องดื่ม 1 กรัม สำหรับเครื่องดื่มตามข้อ 3 (5)

การตรวจวิเคราะห์ยีสต์และเชื้อราดังกล่าวให้ใช้วิธี Bacteriological Analytical Manual (BAM) Online. U. S. Food and Drug Administration ที่เป็นปัจจุบัน (updated version) หรือวิธีที่มีความถูกต้องเทียบเท่า (or equivalent method)”

และตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ฉบับที่ 340 พ.ศ. 2554 เรื่อง น้ำมะพร้าว (มผช.340/2554) ได้กำหนดเกี่ยวกับความปลอดภัยทางจุลินทรีย์ของน้ำมะพร้าวซึ่งมีกำหนดในหัวข้อ 4.6 ดังนี้

“4.6 จุลินทรีย์

4.6.1 จุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1 × 10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร

4.6.2 *ซาลโมเนลลา* ต้องไม่พบในตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร

4.6.3 *สตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส* ต้องน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร

4.6.4 *บาซิลลัส ซีเรียส* ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร

4.6.5 *คลอสตริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์* ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร

4.6.6 *ลิสเทอเรีย มอนอไซโทจีเนส* ต้องไม่พบในตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร

4.6.7 โคลิฟอร์ม โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องน้อยกว่า 2.2 ต่อตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร

4.6.8 *เอสเชอริเชีย โคไล* ต้องไม่พบในตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร

4.6.9 ยีสต์และรา ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม AOAC หรือ BAM (U.S.FDA) หรือวิธีทดสอบอื่นที่เทียบเท่า”

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบ

1. มะพร้าวน้ำหอม (มะพร้าวอ่อน) จาก Golden Place

3.1.2 สารเคมี

1. Sodium Chloride (NaCl) (Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)
2. Tartaric acid
3. Plate Count Agar (PCA) (HiMedia Laboratories, India)
4. Potato Dextrose Agar (PDA) (HiMedia Laboratories, India)
5. น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ขวด Duran ขนาด 500 มิลลิลิตรและ 1000 มิลลิลิตร
2. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. ปิเปตทิป (Pipette Tip) ขนาด 200 ไมโครลิตร และ 1000 ไมโครลิตร
4. ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 10-200 ไมโครลิตร และ 100-1000 ไมโครลิตร
5. ปิเปต (Pipette) ขนาด 10 มิลลิลิตร
6. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
7. จานเพาะเชื้อพลาสติก (Petri Dish) ขนาด 90x15 มิลลิลิตร
8. หลอดทดลอง

8. แท่งแก้วรูปสามเหลี่ยม (Spreader)

9. ลูปเขี่ยเชื้อ (Loop)
9. ถุงร้อน Polypropylene
10. ช้อนตักสาร
11. แท่งแก้วคน
12. ลูกยาง
13. ตะเกียงแอลกอฮอล์
14. ไฟแช็ก
15. สำลี
16. รีแฟรกโทมิเตอร์แบบพกพา (Hand refractometer) (ATAGO รุ่น N-1E, Japan)
17. ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer)
18. ตู้บ่ม (Incubator)
19. ตู้เย็น
20. อะลูมิเนียมฟอยล์
21. ผ้าขาวบาง
22. กระบอกตวง (Cylinder)
23. ขวดแก้วสีชา ขนาด 30 มิลลิลิตร
24. เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)
25. ตู้ปลอดเชื้อ Biological Safety Cabinet - Telstar®
26. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (KERN รุ่น PLE, Germany)
27. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น PB3002S/FACT, Switzerland)

28. พีเอชมิเตอร์ (Mettler Toledo รุ่น SevenCompact S220, Switzerland)

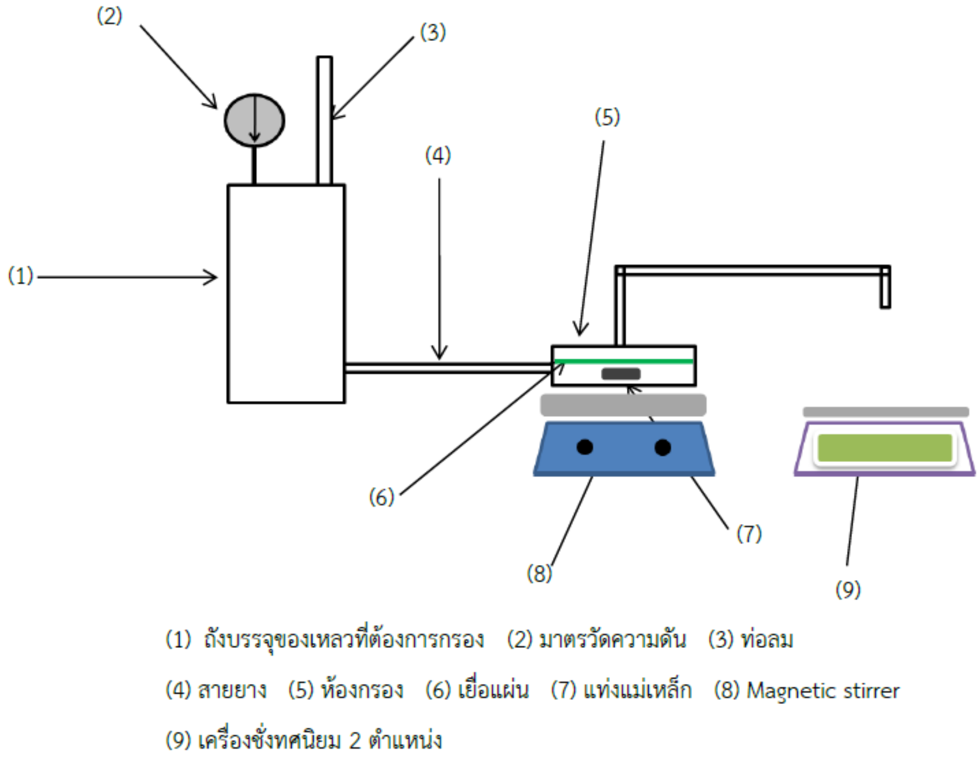
29. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

30. เตาสำหรับให้ความร้อนและกวนสาร (Hotplate and Magnetic Stirrer) (JSR รุ่น JSHS-180, Korea)

31. เครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer)

32. เครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน (เครื่องมือที่ต้องออกแบบและจัดสร้าง)

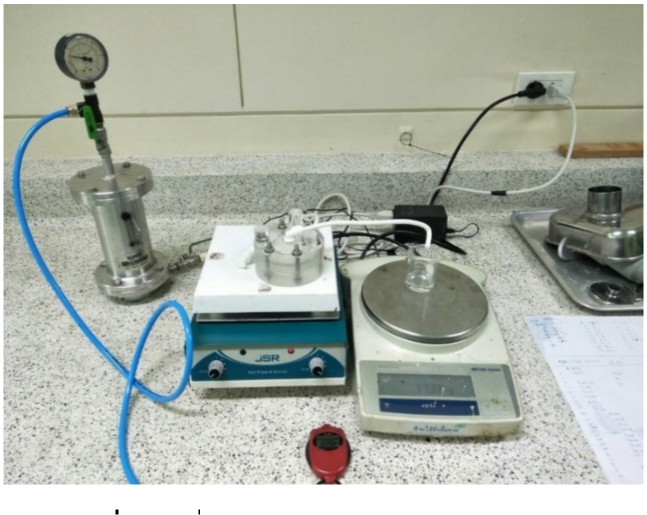
33. เครื่องมือการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน ซึ่งประกอบรวมด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2


(1)
(2)
(3)
(4)
(5)
(6)
(7)
(8)
(9)
(1) ถังบรรจุของเหลวที่ต้องการกรอง (2) มาตรวัดความดัน (3) ท่อลม
(4) สายยาง (5) ห้องกรอง (6) เยื่อแผ่น (7) แท่งแม่เหล็ก (8) Magnetic stirrer
(9) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง

ภาพที่ 2: แบบจำลองเครื่องมือการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน (อรรวี คำประสงค์, 2562)

สำหรับห้องกรอง (5) นั้นทำด้วยอะคริลิกเรซิน สามารถบรรจุเมมเบรนแบบแผ่นเรียบชนิดเซลลูโลสไนเตรท (Cellulose Nitrate) ที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร (Whatman, Germany) ซึ่งมีพื้นที่การกรองเป็น 4303 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งภายในบรรจุแท่งแม่เหล็ก (7) ที่ใช้กวนของเหลวที่ต้องการกรองที่อยู่ภายในห้องกรองเพื่อให้เกิดแรงเฉือนที่ทำให้การกรองเป็นแบบไหลขวาง โดยแท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Stirring Bar) จะหมุนในระดับความเร็ว 8 เมื่อใช้เตาสำหรับกวนสาร (Hotplate and Magnetic Stirrer) (JSR รุ่น JSHS-180, Korea) ดังแสดงรูปแบบของห้องกรองด้วยภาพที่ 2 การกรองจะเป็นการกรองที่ฟิลเตรทไหลขึ้นผ่านเยื่อกรองออกสู่ภายนอก ดังนั้นของเหลวที่ต้องการกรองจะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องจากถังบรรจุของเหลว (1) ที่ต้องการกรองผ่านสายยาง (4) เข้าสู่ห้องกรอง (5) ด้วยความดันที่ได้จากอากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ผ่านทางท่อลม ควบคุมความดันที่ใช้ในการกรองโดยอ่านมาตรวัดความดัน (2) ติดตั้งไว้ที่ถังบรรจุของเหลวที่ต้องการกรอง (1) และปรับความดันด้วยวาว์ลปรับความดันที่ติดตั้งไว้ที่ท่อลม (3) ก่อนเข้าถังบรรจุของเหลวที่ต้องการกรอง ติดตามน้ำหนักของฟิลเตรทที่กรองได้ต่อเวลาด้วยเครื่องชั่ง (9) ละเอียดระดับทศนิยม 2 ตำแหน่ง

ในการใช้งานอุปกรณ์การกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันนั้น ต้องมีการทำความสะอาดเพื่อเป็นการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยในส่วนของถังบรรจุของเหลว (1) และสายยาง (4) จะทำความสะอาดโดยการให้ความร้อนในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นห้องกรอง (5) และแท่งแม่เหล็ก (7) จะได้รับการกำจัดเชื้อโดยการแช่ในแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาแช่ในน้ากลั่นปลอดเชื้อที่ผ่านการให้ความร้อนภายใต้ความดันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที นาน 1 ชั่วโมง และนำไปฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวี เป็นเวลา 20 นาที



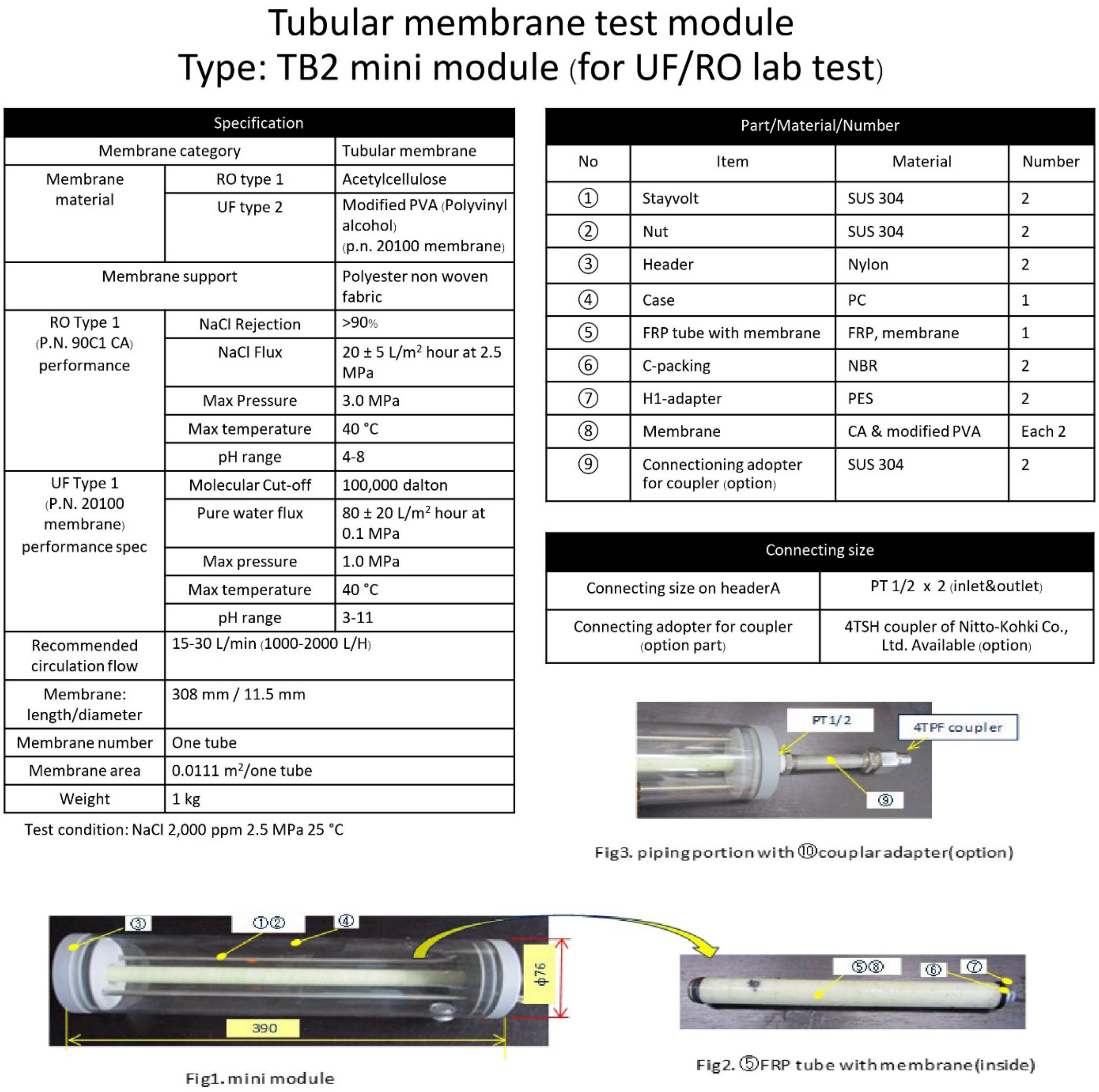
ภาพที่ 3: เครื่องมือการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน

3.2.1.1 ศึกษาข้อมูลและออกแบบเมมเบรนที่จะใช้

เลือกใช้โมดูลแบบท่อ (Tubular module) สำหรับทั้งการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน โดยเมมเบรนสำหรับรีเวิร์สออสโมซิสทำจากวัสดุที่เป็นแอซีทิลเซลลูโลส (Acetylcellulose) ต้องมีการให้ความดันขั้นต่ำ 3.0 เมกะปาสคาล ในการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส ส่วนเมมเบรนสำหรับอัลตราฟิลเตรชันทำจากวัสดุที่เป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ดัดแปร (Modified polyvinyl alcohol) ต้องมีการให้ความดันขั้นต่ำ 1.0 เมกะปาสคาล เมมเบรนทั้งสองชนิดนี้มีโพลีเอสเทอร์ชนิดไม่ถักทอ (polyester non-woven fabric) เป็นแผ่นรองเนื่องจากในระบบต้องมีการให้แรงดันที่สูงมาก ถ้าหากไม่มีแผ่นรองอาจทำให้เยื่อของเมมเบรนรั่วหรือฉีกขาดและจะทำให้ใช้งานไม่ได้ และเมมเบรนทั้งสองมีความยาว 308 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 11.5 มิลลิเมตร มีพื้นที่การกรอง 11,000 ตารางเมตร เมมเบรนจะบรรจุอยู่ในห้องกรอง (Housing) ที่ทำจากโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate หรือ PC) ซึ่งจะสามารถถอดเพื่อเปลี่ยนเมมเบรนระหว่างรีเวิร์สออสโมซิสกับอัลตราฟิลเตรชันทั้งระบบนี้สั่งทำจากบริษัท Daicen Membrane-Systems Ltd., Japan รายละเอียดต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4



Tubular membrane test module
Type: TB2 mini module (for UF/RO lab test)

Specification		
Membrane category		Tubular membrane
Membrane material	RO type 1	Acetylcellulose
	UF type 2	Modified PVA (Polyvinyl alcohol) (p.n. 20100 membrane)
Membrane support		Polyester non woven fabric
RO Type 1 (P.N. 90C1 CA) performance	NaCl Rejection	>90%
	NaCl Flux	20 ± 5 L/m^2 hour at 2.5 MPa
	Max Pressure	3.0 MPa
	Max temperature	40 °C
	pH range	4-8
UF Type 1 (P.N. 20100 membrane) performance spec	Molecular Cut-off	100,000 dalton
	Pure water flux	80 ± 20 L/m^2 hour at 0.1 MPa
	Max pressure	1.0 MPa
	Max temperature	40 °C
	pH range	3-11
Recommended circulation flow	15-30 L/min (1000-2000 L/H)	
Membrane: length/diameter	308 mm / 11.5 mm	
Membrane number	One tube	
Membrane area	0.0111 m^2/one tube	
Weight	1 kg	

Test condition: NaCl 2,000 ppm 2.5 MPa 25 °C

Part/Material/Number			
No	Item	Material	Number
①	Stayvolt	SUS 304	2
②	Nut	SUS 304	2
③	Header	Nylon	2
④	Case	PC	1
⑤	FRP tube with membrane	FRP, membrane	1
⑥	C-packing	NBR	2
⑦	H1-adapter	PES	2
⑧	Membrane	CA & modified PVA	Each 2
⑨	Connectioning adopter for coupler (option)	SUS 304	2

Connecting size	
Connecting size on headerA	PT 1/2 x 2 (inlet&outlet)
Connecting adopter for coupler (option part)	4TSH coupler of Nitto-Kohki Co., Ltd. Available (option)

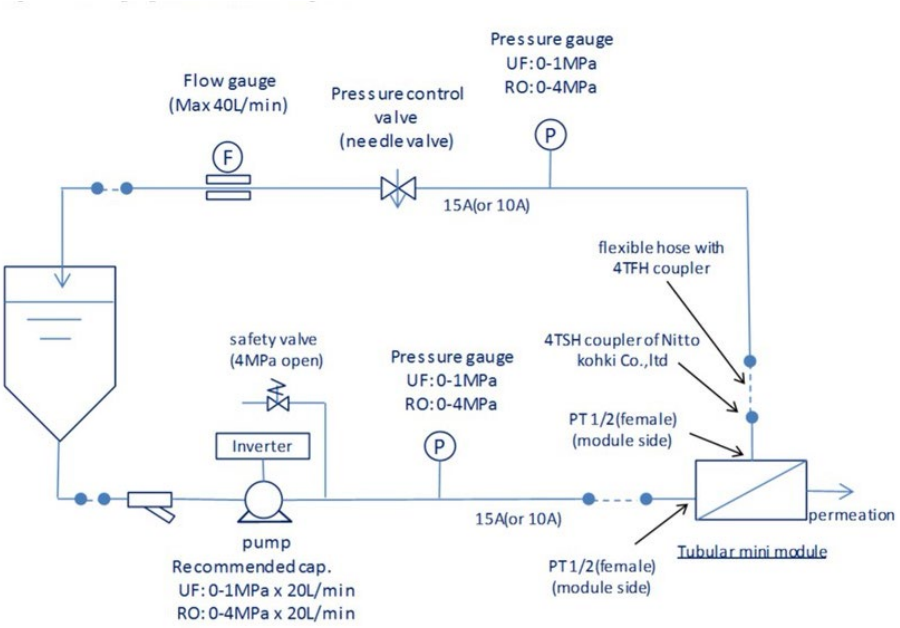
Fig3. piping portion with ⑩ couplar adapter (option)

Fig1. mini module

Fig2. ⑤FRP tube with membrane (inside)

ภาพที่ 4: รายละเอียดการออกแบบห้องกรองและเมมเบรนสำหรับทั้งการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและแบบอัลตราฟิลเตรชัน

3.2.1.2 การออกแบบเครื่องมือสำหรับการกรอง


Pressure gauge
UF:0-1MPa
RO:0-4MPa
Flow gauge
(Max 40L/min)
Pressure control
valve
(needle valve)
F
P
15A(or 10A)
flexible hose with
4TFH coupler
4TSH coupler of Nitto
kohki Co.,ltd
safety valve
(4MPa open)
Pressure gauge
UF:0-1MPa
RO:0-4MPa
Inverter
P
PT 1/2(female)
(module side)
pump
Recommended cap.
UF: 0-1MPa x 20L/min
RO: 0-4MPa x 20L/min
15A(or 10A)
permeation
Tubular mini module
PT 1/2(female)
(module side)

ภาพที่ 5: ไดอะแกรมของการไหลเวียนของระบบการกรองที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน

ในการออกแบบเครื่องกรองที่สามารถรองรับทั้งเมมเบรนสำหรับการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน ต้องมีปั๊มที่สามารถให้อัตราการไหลพอสมควรพร้อมทั้งให้ความดันไม่ต่ำกว่า 3 เมกะปาสคาล และมีตัวห้องบรรจุและระบบท่อที่รองรับความดันนี้ได้ โดยออกแบบระบบให้เป็นไปตามภาพที่ 5 มีส่วนประกอบที่ต่าง ๆ ดังนี้

1. ถังสแตนเลสสำหรับใส่สารที่ต้องการป้อนเข้าไปในระบบ (Feed) ซึ่งใช้จะบรรจุตัวอย่างที่ต้องการกรอง

2. อุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดของระบบ

3. อินเวอร์เตอร์ (Invertor) เพื่อปรับทดรอบของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนปั๊ม เพื่อช่วยในการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ของสารที่ป้อน

4. ปั๊ม ทำหน้าที่ให้ความดันแก่ระบบ ซึ่งต้องสามารถให้ความดันสูงได้มากกว่า 3 เมกะปาสคาล เพื่อให้ใช้ได้กับการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสที่ต้องการความดันสูงและต้องมีอัตราการไหลประมาณ 20 ลิตรต่อนาที เพื่อให้มีการไหลตามขวางที่เพียงพอแก่การขจัดชั้นเจลหรือชั้นเค้กที่ผิวหน้าของเมมเบรน โดยปั๊มที่ใช้ คือ ปั๊มของบริษัท MARUYAMA EXCELL Co., Ltd. รุ่น MW430H แบบ 3 stroke uniflow แนวนอน อัตราการไหลสูงสุด 15.1 ลิตรต่อนาที ความดันสูงสุด 5.6 เมกะปาสคาล

5. เกจวัดความดัน (Pressure gauge) สำหรับวัดความดันขาเข้า

6. ข้อต่อที่สามารถถอดเพื่อเปลี่ยนชนิดของเมมเบรนระหว่างรีเวิร์สออสโมซิสกับอัลตราฟิลเตรชัน และต้องสามารถทนความดันสูงได้

7. ห้องกรอง (Housing) เป็นส่วนที่มีเมมเบรนบรรจุอยู่ภายใน ซึ่งจะมีท่อสำหรับถ่ายเทเพอมิเอทออกจากห้องกรองได้

8. เกจวัดความดัน สำหรับวัดความดันในระบบ

9. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter) สำหรับวัดอัตราการไหลของสารละลาย โดยจะใช้เครื่องมือที่วัดโดยไม่สัมผัสกับของไหลเนื่องจากภายในระบบมีแรงดันสูงมาก จึงเลือกใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลที่เป็นเลเซอร์เซนเซอร์ รุ่น LR-ZB240CB ของบริษัท Keyence ประเทศญี่ปุ่น

สำหรับรูปแบบการไหลของสารป้อน (Feed) จะถูกปั๊มออกจากถังสแตนเลส ด้วยปั๊มที่สามารถปรับกำลังของปั๊มได้ด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมมอเตอร์ของปั๊มและวาล์วเข็ม (Needle valve) สารป้อนจะเข้าสู่ระบบท่อสแตนเลสผ่านเกจวัดความดันขาเข้าห้องกรอง และมาตรวัดอัตราการไหลไปสู่ห้องกรอง ซึ่งสามารถเปลี่ยนเมมเบรนระหว่างเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันหรือเมมเบรนแบบรีเวิร์สออสโมซิสได้ รีเทนเททจะถูกหมุนเวียนสู่ถังสแตนเลส และเพอมิเอทจะไหลผ่านเมมเบรนออกมาสู่แจคเก็ตที่ครอบเมมเบรนอยู่ แล้วไหลผ่านปากทางออกที่สามารถจะทำการวัดอัตราการกรองได้โดยชั่งน้ำหนักหรือตวงปริมาตรฟิลเตรททีได้ต่อเวลา ในกรณีที่เป็นเมมเบรนสำหรับอัลตราฟิลเตรชันจะได้เพอมิเอทเป็นผลิตภัณฑ์ และในกรณีที่ใช้เมมเบรนสำหรับออสโมซิสแบบผันกลับจะได้รีเทนเททเป็นผลิตภัณฑ์

3.2.2 การเตรียมน้ำมะพร้าว

ทำความสะอาดผลมะพร้าวก่อนที่จะทำการเฉาะโดยเช็ดภายนอกผลด้วยแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70 จากนั้นทำการเฉาะน้ำมะพร้าวด้วยมีดที่สะอาดผ่านการทำความสะอาดและฉีดฆ่าเชื้อด้วยแอลกอฮอล์และบรรจุน้ำมะพร้าวที่ได้ลงในภาชนะที่ผ่านการฆ่าเชื้อผ่านผ้าขาวบาง คนให้น้ำมะพร้าวมีความสม่ำเสมอ แยกน้ำมะพร้าวส่วนหนึ่งเก็บไว้ที่ -18 องศาเซลเซียสเพื่อใช้เป็นตัวอย่างน้ำมะพร้าวสด และอีกส่วนหนึ่งเพื่อนำไปกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน

3.2.3 การกรองน้ำมะพร้าวด้วยกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องมือการกรองที่ได้จัดสร้างขึ้นตามที่อธิบายในตอนที่ 3.2.1 โดยก่อนทดลองกรองจะกรองน้ำกลั่นปลอดเชื้อผ่านเมมเบรนที่ความดันต่าง ๆ ทุกครั้งก่อนเริ่มการกรองน้ำมะพร้าว เพื่อเป็นการตรวจสอบสภาพของเมมเบรนว่ามีการฉีกขาด รั่ว หรือมีการอุดตันอันเนื่องจากการทำความสะอาดที่ไม่เพียงพอหรือไม่ โดยพิจารณาเปรียบเทียบอัตราเร็วการกรองน้ำกลั่นในแต่ละครั้งของการทดลอง ซึ่งหากเมมเบรนยังคงสามารถใช้งานได้ ควรมีอัตราเร็วการกรองที่ของน้ำกลั่นที่ความดันในการกรองเท่ากันไม่แตกต่างกันมากนักโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลอัตราเร็วการกรองน้ำกลั่นของการทดลองก่อนหน้า

3.2.3.1 การทำเข้มข้นโดยการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส

ขั้นนี้จะใช้เมมเบรนสำหรับรีเวิร์สออสโมซิส โดยน้ำมะพร้าวถูกบรรจุลงในถังสแตนเลสแล้วจึงถูกกรองภายในเครื่องมือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ ส่วนรีเทนเทท ซึ่งจะไหลวนอยู่ภายในระบบและกลับลงสู่ถังสแตนเลสจึงสามารถวัดค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของน้ำมพร้าวในถังสแตนเลสเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

3.2.3.2 การกรองกำจัดเชื้อโดยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

ทำการล้างทำความสะอาดเครื่องมือกรองหลังจากการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส จากนั้นเปลี่ยนเมมเบรนในห้องกรองจากเมมเบรนสำหรับรีเวิร์สออสโมซิสเป็นเมมเบรนสำหรับอัลตราฟิลเทรชัน แล้วทำการกรองโดยจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ ส่วนฟิลเตรท ที่สามารถถ่ายออกมาจากห้องกรองได้

3.2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีระหว่างน้ำมะพร้าวสดและน้ำมะพร้าวที่ได้หลังการกรอง

นำตัวอย่างน้ำมะพร้าวสดที่เก็บไว้และมะพร้าวที่ได้หลังการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเทรชันมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้รีแฟรกโทมิเตอร์แบบพกพา (Hand refractometer) และวัดค่าพีเอชโดยใช้พีเอชมิเตอร์ และบรรจุตัวอย่างใส่ในขวดสีชาขนาดเล็กเพื่อส่งตรวจปริมาณแร่ธาตุโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กและโซเดียม โดยส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.5 การตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา

นำตัวอย่างน้ำมะพร้าวสดมาทำการเจือจางแบบอนุกรม (Serial dilution) โดยปิเปตน้ำมะพร้าว 1 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลองที่มีสารละลายนอร์มัลซาไลน์ (Normal Saline) 9 มิลลิลิตร ผสมตัวอย่างให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer) ขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง (Dilution) 10^{-1} แล้วจึงเตรียมตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^{-2} 10^{-3} และ 10^{-4} ตามลำดับ จากนั้นปิเปตตัวอย่างไม่ได้ทำการเจือจางและตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^{-2} และ 10^{-4} ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar สำหรับการตรวจยีสต์และราโดยทำซ้ำระดับการเจือจางละ 2 จาน แล้วใช้แท่งแก้วรูปสามเหลี่ยม (Spreader) เกลี่ยตัวอย่างให้กระจายทั่วบนผิวอาหาร ส่วนการตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดทำได้โดยปิเปตตัวอย่างไม่ได้ทำการเจือจางและตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^{-2} และ 10^{-4} ปริมาตร 1 มิลลิลิตรใส่ลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อเปล่าแล้วจึงเทอาหาร Plate Count Agar ลงไปโดยทำซ้ำระดับการเจือจางละ 2 จาน ทำให้ผสมกันจนทั่ว รอจนอาหารแข็งตัว จากนั้นบ่มเชื้อในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมงสำหรับการตรวจหายีสต์และรา และจุลินทรีย์ทั้งหมดตามลำดับ แล้วตรวจนับจำนวนโคโลนีทั้งหมด คำนวณและรายงานผลเป็นจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนยีสต์และราในหน่วย CFU/ml ตามลำดับ ทำเช่นเดียวกันกับตัวอย่างน้ำมะพร้าวที่ได้หลังจากการกรอง

แต่เนื่องจากเกิดสถานการณ์โควิด-19 จึงทำให้ไม่สามารถดำเนินการตามแผนการศึกษาได้สมบูรณ์ทั้งหมด สามารถดำเนินการในส่วนของการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชันได้สำเร็จ แต่ไม่สามารถเข้าไปดำเนินการในส่วนอื่นต่อได้ จึงปรับแผนมาทำการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเครื่องมือขนาดเล็กตามข้อ 3.2.6 เพื่อศึกษารูปแบบการกรองและศึกษาประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อในระหว่างช่วงสถานการณ์นี้

3.2.6 ทดสอบประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อในน้ำมะพร้าวด้วยไมโครฟิลเตรชัน

3.2.6.1 การเตรียมน้ำมะพร้าวก่อนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

เนื่องจากน้ำมะพร้าวที่อยู่ในลูกมะพร้าวจะไม่มีจุลินทรีย์อยู่เลยเพราะภายในลูกมะพร้าวเป็นสภาวะปลอดเชื้อ ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ภายในน้ำมะพร้าวเพื่อให้สามารถสังเกตผลของการกรองได้อย่างชัดเจน โดยการเฉาะมะพร้าวด้วยมีดที่ผ่านการทำความสะอาด แล้วเทน้ำมะพร้าวใส่ในขวดที่ผ่านการฉีดฆ่าเชื้อด้วยแอลกอฮอล์ วางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.2.6.2 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเครื่องมือขนาดเล็ก

ในการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์การกรองที่ได้อธิบายในตอนที่ 3.1.3 (ภาพที่ 2 และ 3) โดยก่อนจะทำการทดลองจริง จะทดลองกรองน้ำกลั่นปลอดเชื้อผ่านเมมเบรนเพื่อเป็นการตรวจสอบสภาพของเมมเบรนว่ามีการฉีกขาดหรือรั่วหรือไม่

แบ่งตัวอย่างน้ำมะพร้าวที่ผ่านการบ่มเป็น 2 ส่วน โดยส่วนหนึ่งจะใช้เป็นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการบ่มแต่ไม่ผ่านการกรองโดยนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและอีกส่วนจะนำมากรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเครื่องมือขนาดเล็กนี้ โดยมีการให้ความดันกับระบบที่ 0.15 เมกะปาสคาล น้ำมะพร้าวในถังบรรจุของเหลวจะไหลไปสู่ห้องกรองซึ่งมีแท่งแม่เหล็กกวนสารหมุนเพื่อให้เกิดการกรองแบบไหลขวาง จากนั้นน้ำมะพร้าวจะถูกกรองผ่านเมมเบรนชนิดเซลลูโลสไนเตรท (Cellulose Nitrate) ที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร (Whatman, Germany) แล้วผ่านท่อลงไปสู่บีกเกอร์ที่ตั้งอยู่บนเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งเพื่อทำการชั่งน้ำหนัก จดบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา 0 ถึง 5100 วินาที

3.2.6.3 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

นำตัวอย่างน้ำมะพร้าวก่อนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน (ตัวอย่างน้ำมะพร้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) และตัวอย่างน้ำมะพร้าวหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้รีแฟรกโทมิเตอร์แบบพกพา (Hand refractometer) และวัดค่าพีเอชโดยใช้พีเอชมิเตอร์

3.2.6.4 การตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

นำตัวอย่างน้ำมะพร้าวที่ได้จากการบ่ม (ก่อนกรอง) มาทำการเจือจางแบบอนุกรมโดยปิเปตน้ำมะพร้าว 1 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลองที่มีสารละลายนอร์มัลซาไลน์ (Normal Saline Solution) 0.85% 9 มิลลิลิตร ผสมตัวอย่างให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารละลาย ขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^{-1} แล้วจึงเตรียมตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^{-2} 10^{-3} และ 10^{-4} ตามลำดับ จากนั้นปิเปตตัวอย่างไม่ได้ทำการเจือจางและตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^{-2} และ 10^{-4} ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar สำหรับการตรวจยีสต์และราโดยทำซ้ำระดับการเจือจางละ 2 จาน แล้วใช้แท่งแก้วรูปสามเหลี่ยมเกลี่ยตัวอย่างให้กระจายทั่วบนผิวอาหาร ส่วนการตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดทำได้โดยปิเปตตัวอย่างไม่ได้ทำการเจือจางและตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^{-2} และ 10^{-4} ปริมาตร 1 มิลลิลิตรใส่ลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อเปล่าแล้วจึงเท

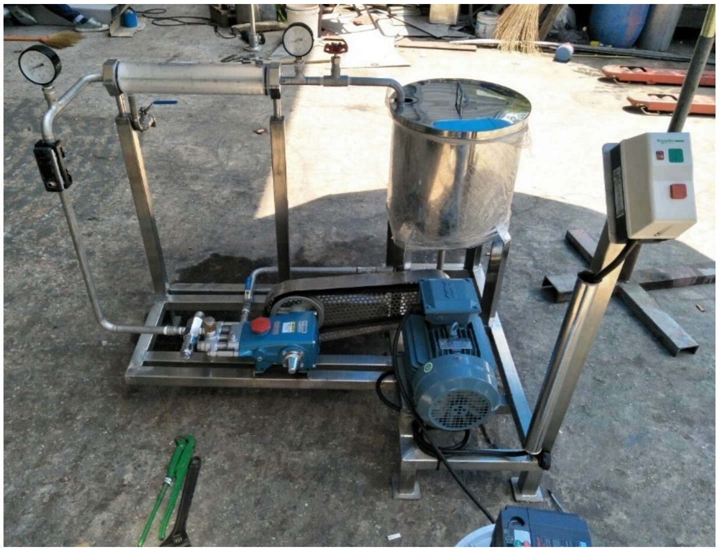
อาหาร Plate Count Agar ลงไปโดยทำซ้ำระดับการเจือจางละ 2 จาน ทำให้ผสมกันจนทั่ว รอจนอาหารแข็งตัว จากนั้นบ่มเชื้อในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมงสำหรับการตรวจหายีสต์และรา และจุลินทรีย์ทั้งหมดตามลำดับ แล้วตรวจนับจำนวนโคโลนีทั้งหมด คำนวณและรายงานผลเป็นจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนยีสต์และราในหน่วย CFU/ml ตามลำดับ ทำเช่นเดียวกันกับตัวอย่างน้ำมะพร้าวที่ได้หลังจากการกรอง

บทที่ 4

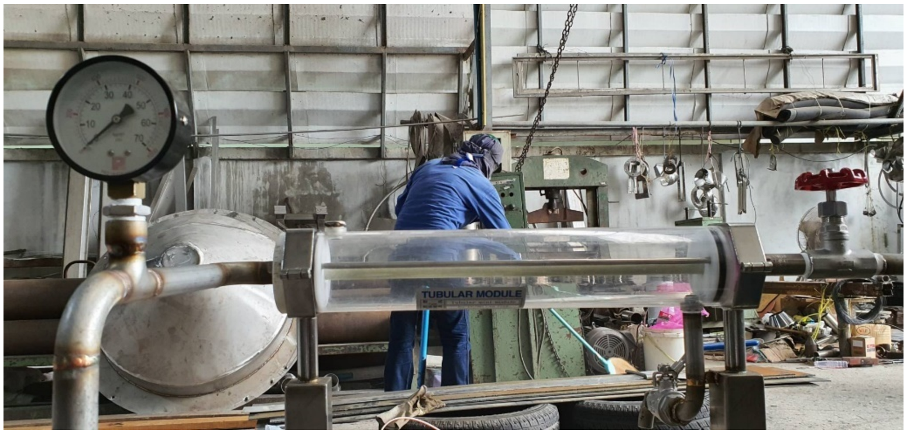
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน

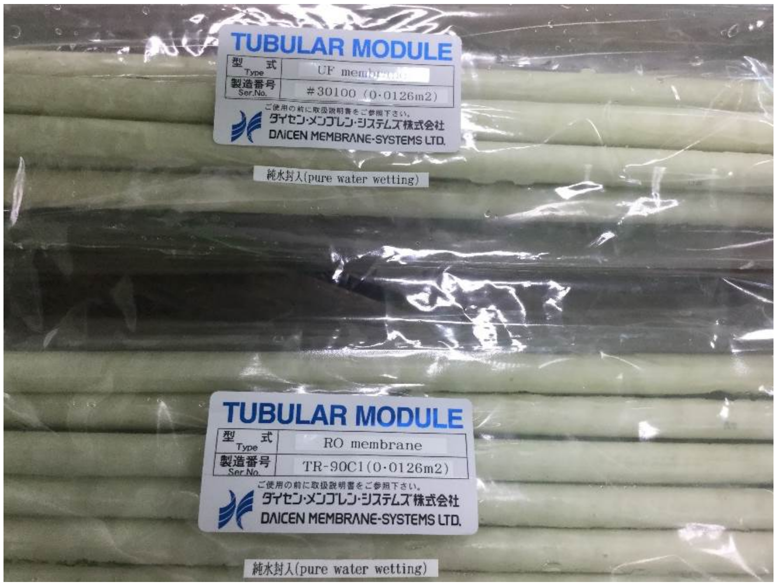
เครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชันชนิดโมดูลแบบท่อกลวงสามารถจัดสร้างได้เสร็จสมบูรณ์แสดงดังภาพที่ 6 โดยในส่วนของท่อและข้อต่อต่าง ๆ ทำจากสแตนเลส เนื่องจากต้องสามารถทนแรงดันสูงในระบบได้จึงได้ทดสอบการกรองน้ำเปล่าพบว่าเครื่องมือที่จัดสร้างขึ้นนี้สามารถให้และทนความดันได้ 3 ถึง 4 เมกะปาสคาล (30 ถึง 40 บาร์) และให้อัตราเร็วไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนได้ไม่ต่ำกว่า 10 ลิตรนาที และสามารถปรับความดันและอัตราเร็วไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนได้ด้วยอินเวอร์เตอร์มอเตอร์และวาล์วเข็ม (Needle valve) การปรับอุปกรณ์ทั้งสองร่วมกันจะทำให้สามารถปรับอัตราเร็วการไหลตามขวางที่เป็นปัจจัยในการป้องกันการสะสมของอนุภาคบนแผ่นเมมเบรนที่จะทำให้เกิดเป็นชั้นเจลและส่งผลให้อัตราการกรองลดลงและสามารถปรับความดันในการกรองที่จะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อแรงขับเคลื่อน (Driving force) ของฟิลเตรทซึ่งจะมีผลกระทบต่ออัตราเร็วการกรอง แต่เป็นที่น่าเสียดายว่ายังไม่สามารถเข้าไปดำเนินการในส่วนกรองน้ำมะพร้าวได้เนื่องจากสถานการณ์โควิด-19



ภาพที่ 6: เครื่องกรองที่สามารถใช้ได้ทั้งการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน


TUBULAR MODULE

ภาพที่ 7: ห้องกรองที่สามารถใช้ได้ทั้งการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน


TUBULAR MODULE
型 式 Type UF membrane
製造番号 Ser.No. #30100 (0·0126m2)
ご使用の前に取扱説明書をご参照下さい。
ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社
DAICEN MEMBRANE-SYSTEMS LTD.
純水封入(pure water wetting)
TUBULAR MODULE
型 式 Type RO membrane
製造番号 Ser.No. TR-90C1(0·0126m2)
ご使用の前に取扱説明書をご参照下さい。
ダイセン・メンブレン・システムズ株式会社
DAICEN MEMBRANE-SYSTEMS LTD.
純水封入(pure water wetting)

ภาพที่ 8: เมมเบรนชนิดท่อกลวงสำหรับการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (ด้านบน) และรีเวิร์สออสโมซิส (ด้านล่าง)

สำหรับเมมเบรนชนิดท่อกลวงสำหรับการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและรีเวิร์สออสโมซิสที่ออกแบบไว้สามารถจัดสร้างขึ้นได้ดังภาพที่ 8 โดยที่เมมเบรนสำหรับรีเวิร์สออสโมซิสทำจากวัสดุที่เป็นแอซีทิลเซลลูโลสซึ่งมีร้อยละการกักเกลือ (%NaCl Rejection) มากกว่าร้อยละ 90 และเมมเบรนสำหรับอัลตราฟิลเตรชันทำจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ดัดแปรและมีค่าการกักโมเลกุล (Molecular weight cut off หรือ MWCO) เท่ากับ 100 กิโลดาลตัน

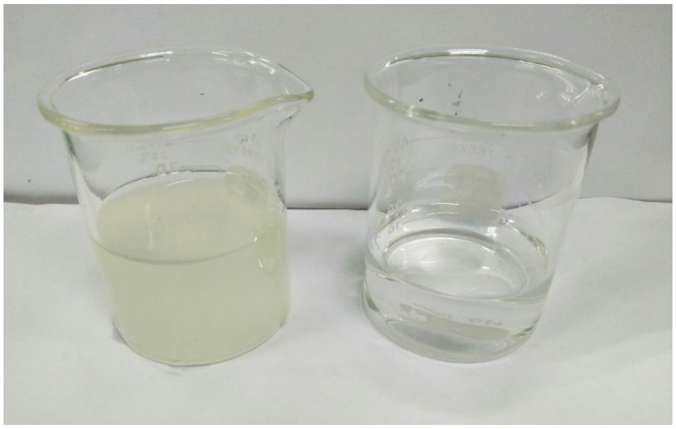
4.2 ทดสอบประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อในน้ำมะพร้าวด้วยไมโครฟิลเตรชัน

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

ตารางที่ 4: สมบัติทางกายภาพของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

สมบัติ	ก่อนกรอง	หลังกรอง
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์ หรือ °Brix)	4.50 ± 0.71	6.00 ± 0.00
ค่าพีเอช	5.05 ± 0.06	5.04 ± 0.01

จากตารางที่ 4 จะสังเกตได้ว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าพีเอชของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันไม่แตกต่างกันมากนัก และพบว่าน้ำมะพร้าวหลังจากการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมงที่มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวและมีความขุ่นตามแสดงในภาพที่ 9 (ด้านซ้าย) เมื่อผ่านการกรองแล้วจะได้น้ำมะพร้าวที่มีความใสขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนตามแสดงในภาพที่ 9 (ด้านขวา) และมีกลิ่นหอมของน้ำมะพร้าวตามธรรมชาติ



ภาพที่ 9: น้ำมะพร้าวก่อน (ด้านซ้าย) และหลังผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน (ด้านขวา)

4.2.2 การตรวจจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

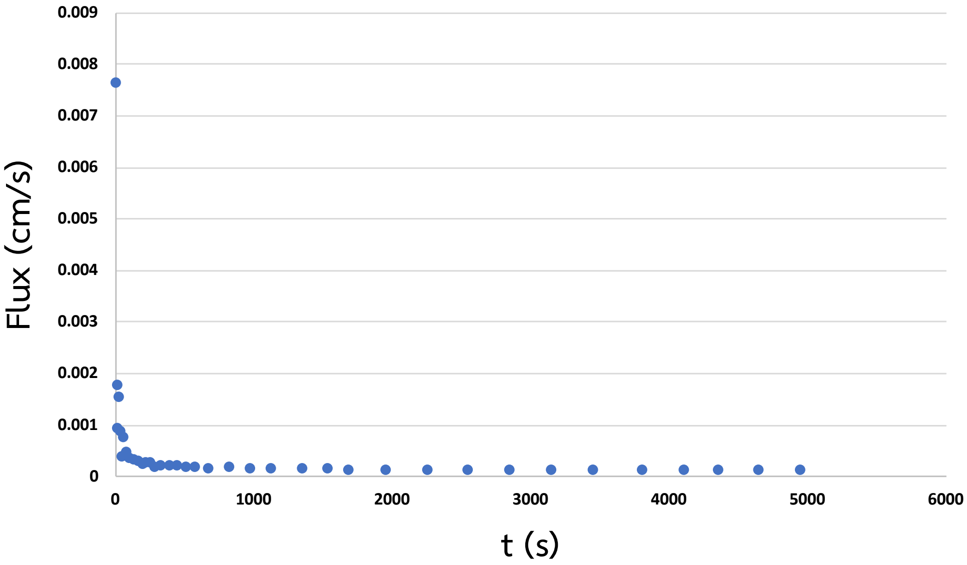
ตารางที่ 5: ปริมาณจุลินทรีย์ของน้ำมะพร้าวก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

ชนิดของจุลินทรีย์	ก่อนกรอง	หลังกรอง
จุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/ml)	$>10^5$	$1.17\text{x}10^3$
ยีสต์และรา (CFU/ml)	$5.50\ \text{x}10^5$	<10

เมื่อนำน้ำมะพร้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อเพิ่มจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ให้สามารถสังเกตผลของการกรองได้ชัดเจน พบว่าจากตารางที่ 5 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างน้ำมะพร้าวได้ขั้นต่ำ 2 log CFU/ml และลดจำนวนยีสต์และราในน้ำมะพร้าวได้ขั้นต่ำ 5 log CFU/ml ตามลำดับ สาเหตุที่สามารถลดจำนวนยีสต์และราได้มากกว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด เนื่องจากจุลินทรีย์ทั้งหมดจะรวมถึงจุลินทรีย์อื่น ๆ ที่มีขนาดเล็กกว่ายีสต์และรา จึงอาจสามารถผ่านเมมเบรนไปได้ และระบบตอนบรรจุใส่ในบีกเกอร์ไม่ได้เป็นระบบปลอดเชื้อ (Aseptic) เนื่องจากเป็นเพียงระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) รวมทั้งข้อจำกัดของเวลาในการเข้าไปใช้ห้องปฏิบัติการในช่วงสถานการณ์โควิด-19 จึงสามารถทำการฆ่าเชื้ออุปกรณ์การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันและอุปกรณ์เก็บตัวอย่างได้โดยการฉีดแอลกอฮอล์และ/หรือการต้มเพียงเท่านั้น ไม่สามารถนำเข้าตู้ปลอดเชื้อเพื่อฉายรังสียูวีหรือเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อได้ทัน จึงอาจจะเกิดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างทำการทดลองได้ แต่จากงานวิจัยของ Panigrahi และคณะ (2018) ได้ทำการกรองน้ำอ้อยด้วยไมโครฟิลเตรชันพบว่าสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ 5 log CFU/ml และลดจำนวนยีสต์และราได้ 4 log CFU/ml นอกจากนี้สามารถนำการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันไปใช้ในการจัดการเบื้องต้นกับน้ำมะพร้าวก่อนที่จะนำไปกรองด้วยเครื่องมือกรองแบบที่สามารถใช้ได้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชันที่ได้จัดสร้างขึ้น เพราะจะช่วยกรองพวกสารแขวนลอยและจุลินทรีย์บางส่วนออกไปได้จึงช่วยลดการอุดตันของเมมเบรนในเครื่องมือและจะทำให้มีประสิทธิภาพในการกรองดียิ่งขึ้น

4.2.3 พฤติกรรมการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันที่มีการกวนโดยแท่งแม่เหล็กกวนสาร

จากภาพที่ 10 จะเห็นว่าการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตรที่ความดัน 1.5 บาร์ ที่มีการกวนโดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร มีอัตราเร็วในการกรองลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะเริ่มคงที่ เนื่องจากเครื่องกรองเป็นระบบกรองแบบไหลขวาง (Cross flow) ที่มีแท่งแม่เหล็กกวนอยู่ภายในในช่วงแรก ๆ ของการกรองนั้นชั้นเจลยังมีชั้นเจลก่อตัวเพียงเล็กน้อยที่ผิวหน้าแผ่นกรองทำให้อัตราเร็วการกรองสูง แต่อัตราการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราเร็วในการกรองในช่วงนี้นั้นเกิดจากการที่อิทธิพลอัตราเร็วของกระแสพัดขวางที่เอาชั้นเจลออกไปมีน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับอิทธิพลอัตราเร็วการกรองที่สร้างเจลที่ผิวหน้าเมมเบรน แต่เมื่อเวลาผ่านไป อัตราเร็วการกรองเริ่มต่ำลง เนื่องจากอิทธิพลของอัตราเร็วการกรองที่จะสร้างชั้นเจลจะลดต่ำลงและอิทธิพลอัตราเร็วของกระแสพัดขวางเริ่มเห็นชัดขึ้น อัตราลดลงของอัตราเร็วการกรองจึงลดลง และเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด



ภาพที่ 10: การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลต่อพื้นที่ (Flux) ต่อเวลา (t) โดยการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1.5 บาร์ โดยมีการกวนโดยแท่งแม่เหล็กกวนสาร

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ได้จัดสร้างเครื่องมือกรองที่สามารถกรองได้ทั้งแบบรีเวิร์สออสโมซิสและแบบอัลตราฟิลเตรชันชนิดท่อกลวงได้สำเร็จ สามารถให้ความดันได้ 3 ถึง 4 เมกะปาสคาล พร้อมทั้งให้อัตราเร็วไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนได้ไม่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตรต่อวินาที และสามารถปรับความดันและอัตราเร็วไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนได้ด้วยอินเวอร์เตอร์มอเตอร์และวาล์วเข็ม นอกจากนี้ในการกรองน้ำมะพร้าวโดยใช้อุปกรณ์กรองขนาดเล็กที่บรรจุเมมเบรนประเภทไมโครฟิลเตรชันเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกรองและประสิทธิภาพของการกรองกำจัดเชื้อ พบว่าน้ำมะพร้าวที่กรองได้มีความใสและมีกลิ่นที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและลดจำนวนยีสต์และราในน้ำมะพร้าวได้ขั้นต่ำ 2 log CFU/ml และ 5 log CFU/ml ตามลำดับ จึงอาจใช้การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันในการจัดการกับน้ำมะพร้าวเบื้องต้นที่จะนำไปผ่านการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชันในเครื่องมือที่ออกแบบเพื่อทำให้การกรองในขั้นต่อไปมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเรื่องอายุการเก็บ และสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าวที่ได้จากการกรองด้วยเครื่องกรองที่ได้จัดสร้างต่อไป

ถ้าหากจะนำเครื่องมือกรองที่สามารถกรองได้ทั้งแบบรีเวิร์สออสโมซิสและแบบอัลตราฟิลเตรชันนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง ควรจะมีขั้นตอนการจัดการกับน้ำมะพร้าวเบื้องต้นก่อน เช่น การกรองด้วยผ้าขาวบางแล้วตามด้วยการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยอาจเมมเบรนที่ขนาดรูพรุนไม่เล็กมากนัก (ประมาณ 0.45 ไมโครเมตร) เพื่อกรองกำจัดสารที่โมเลกุลค่อนข้างใหญ่และจุลินทรีย์บางส่วนออกไป และควรมีการพัฒนาเครื่องมือกรองให้มีความปลอดเชื้อยิ่งขึ้น อาจใช้การควบคุมอุณหภูมิและสภาพปลอดเชื้อของสภาวะแวดล้อมภายในสถานที่ที่ทำการกรองร่วมด้วย นอกจากนี้ควรมีการทำความสะอาดแบบไม่ถอดชิ้นส่วน (Cleaning in place หรือ CIP) ก่อนเริ่มการกรอง ในระหว่างการกรอง (หากการกรองใช้ระยะเวลานานควรมีช่วงพักเพื่อทำความสะอาด) และหลังจากที่กรองเสร็จแล้ว เพื่อป้องกันการสะสมของจุลินทรีย์ตามพื้นผิวต่าง ๆ ของเครื่องมือกรอง ซึ่งจะทำให้เกิดไบโอฟิล์มและส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนในอาหาร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองเพิ่มเติม

ภาคผนวก ก.1 ตารางแสดงน้ำหนักและปริมาตรของน้ำมะพร้าวหลังกรอง ณ เวลาการกรองใด ๆ และอัตราการไหลในการกรองแบบไมโครฟิลเทรชันโดยใช้เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร ที่ใช้ความดัน 1.5 บาร์

พื้นที่การกรอง: 4303 ตารางมิลลิเมตร

เวลา (วินาที)	น้ำหนักฟิลเตรทสะสม (กรัม)	น้ำหนักฟิลเตรทสะสม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ผลต่างของฟิลเตรท (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	เวลา, t (วินาที)	อัตราการไหล, Q (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)	อัตราการไหลต่อพื้นที่, Flux (เซนติเมตร/วินาที)
0	0	0				
10	3.28	3.28	3.28	5	0.328000	0.007623
15	3.48	3.48	0.2	12.5	0.040000	0.00093
20	3.86	3.86	0.38	17.5	0.076000	0.001766
30	4.52	4.52	0.66	25	0.066000	0.001534
40	4.9	4.9	0.38	35	0.038000	0.000883
50	5.07	5.07	0.17	45	0.017000	0.000395
60	5.4	5.4	0.33	55	0.033000	0.000767
90	6.02	6.02	0.62	75	0.020667	0.00048
120	6.48	6.48	0.46	105	0.015333	0.000356
150	6.91	6.91	0.43	135	0.014333	0.000333
180	7.28	7.28	0.37	165	0.012333	0.000287

210	7.59	7.59	0.31	195	0.010333	0.00024
240	7.94	7.94	0.35	225	0.011667	0.000271
270	8.29	8.29	0.35	255	0.011667	0.000271
300	8.54	8.54	0.25	285	0.008333	0.000194
360	9.08	9.08	0.54	330	0.009000	0.000209
420	9.61	9.61	0.53	390	0.008833	0.000205
480	10.12	10.12	0.51	450	0.008500	0.000198
540	10.62	10.62	0.5	510	0.008333	0.000194
600	11.08	11.08	0.46	570	0.007667	0.000178
750	12.16	12.16	1.08	675	0.007200	0.000167
900	13.26	13.26	1.1	825	0.007333	0.00017
1050	14.18	14.18	0.92	975	0.006133	0.000143
1200	15.21	15.21	1.03	1125	0.006867	0.00016
1500	17.06	17.06	1.85	1350	0.006167	0.000143
1560	17.43	17.43	0.37	1530	0.006167	0.000143
1800	18.63	18.63	1.2	1680	0.005000	0.000116
2100	20.34	20.34	1.71	1950	0.005700	0.000132
2400	22.04	22.04	1.7	2250	0.005667	0.000132
2700	23.65	23.65	1.61	2550	0.005367	0.000125
3000	25.3	25.3	1.65	2850	0.005500	0.000128

3300	26.88	26.88	1.58	3150	0.005267	0.000122
3600	28.45	28.45	1.57	3450	0.005233	0.000122
4020	30.64	30.64	2.19	3810	0.005214	0.000121
4200	31.58	31.58	0.94	4110	0.005222	0.000121
4500	33.15	33.15	1.57	4350	0.005233	0.000122
4800	34.7	34.7	1.55	4650	0.005167	0.00012
5100	36.27	36.27	1.57	4950	0.005233	0.000122

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมี

ภาคผนวก ข.1 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการวิเคราะห์หาจำนวนเชื้อจุลินทรีย์

1. การเตรียมอาหาร Plate Count Agar (PCA) สำหรับวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด

ชั่งอาหาร Plate Count Agar 11.75 กรัมใส่ในขวด Duran แล้วละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึง 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที รอเย็นจนมีอุณหภูมิประมาณ 45-50 องศาเซลเซียสจึงนำมาเทใส่ในจานเพาะเชื้อพลาสติก (Petri Dish)

2. การเตรียมอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) สำหรับวิเคราะห์จำนวนยีสต์และรา

ชั่งอาหาร Potato Dextrose Agar 19.5 กรัมใส่ในขวด Duran แล้วละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึง 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที รอเย็นจนมีอุณหภูมิประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส ปรับกรดด้วยกรดทาร์ทาริกความเข้มข้น 10% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และนำมาเทใส่ในจานเพาะเชื้อพลาสติก (Petri Dish)

ภาคผนวก ข.2 การเตรียมสารละลายนอร์มัลซาไลน์ (Normal Saline Solution) 0.85%

ชั่งโซเดียมคลอไรด์ 85 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วละลายปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด

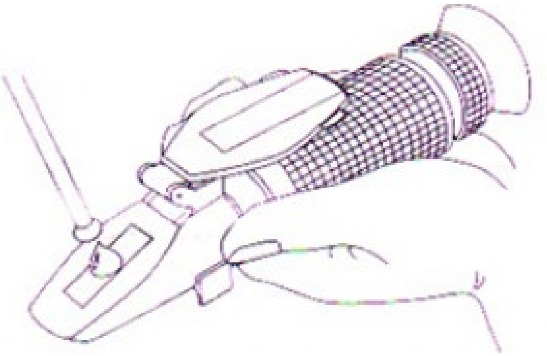
ภาคผนวก ค

วิธีวิเคราะห์

ภาคผนวก ค.1 วิธีใช้รีแฟรกโทมิเตอร์แบบพกพา (Hand Refractometer)

1. ก่อนจะเริ่มใช้งานทุกครั้งต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) โดยหยดน้ำกลั่นลงบนแผ่นปริซึม อ่านสเกลดูสีที่ตัดกันให้อยู่ในตำแหน่ง 0 ถ้าไม่ได้ให้ใช้ไขควงปรับให้ตรงอย่าหมุนไขควงแรงจนเกินไป เพราะอาจทำให้ตัวเครื่องเสียหายได้ จากนั้นซับน้ำกลั่นออกด้วยทิชชู่

2. เริ่มวัดโดยหยดสารตัวอย่าง 1 หรือ 2 หยด ลงบนแผ่นปริซึม



3. ปิดแผ่นกันแสงลงเบา ๆ โดยพยายามไม่ให้มีฟองอากาศ

4. อ่านสเกลที่ได้ผ่านทางเลนส์ตา (Eyepiece)

5. ทำความสะอาดแผ่นปริซึมด้วยกระดาษทิชชู่ชุบน้ำและซับให้แห้งอีกรอบหนึ่ง

ภาคผนวก ค.2 วิธีใช้พีเอชมิเตอร์

1. ก่อนนำอิเล็กโทรด (Electrode) มาใช้งานควรล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นแล้วซับให้แห้งด้วยทิชชู่เบา ๆ

2. เปิดเครื่องพีเอชมิเตอร์

3. ก่อนทำการใช้พีเอชมิเตอร์ควรทำการสอบด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ 2 จุดขึ้นไป ขึ้นอยู่กับช่วงที่เราทำการวัดและโปรแกรมในเครื่อง โดยปกติจะเลือกช่วงของสารละลายบัฟเฟอร์ให้ครอบคลุมค่าที่ทำการวัด เช่น ช่วงความเป็นกรดระหว่างพีเอช 4 ถึง 7 หรือช่วงพีเอช 7 ถึง 10 เป็นต้น

4. ทำการวัดค่าพีเอชของตัวอย่าง และจดบันทึกค่าที่ได้ หลังจากเปลี่ยนตัวอย่างให้ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นและซับอิเล็กโทรดให้แห้งก่อนที่จะทำการวัดตัวอย่างถัดไป

5. หลังจากใช้งานเสร็จ ให้ทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นแล้วปิดด้วยจุกที่มีสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

บรรณานุกรม

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2554). มะพร้าวผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปและรูปแบบโรงผลิต. กรมส่งเสริมการเกษตร. กรุงเทพมหานคร.

กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P356.pdf [7 เมษายน 2562]

ประสงค์ ทองยงค์. (2538). มะพร้าวน้ำหอม. ใน สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เล่ม 38. สืบค้นจาก http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=38&chap=5&page=t38-5-infodetail01.html [7 เมษายน 2562]

ปุณฑรีย์ เขียวภักดี. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำมะพร้าว. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps670_47.pdf [1 ตุลาคม 2562]

สิรินุช ก้องแสง. การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันในการแยกสารไอโซฟลาโวสนจากสารสกัดจากกากถั่วเหลือง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

สุกุลยา ทับอุไร. การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.

สุดใจ วงชารี. การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยระบบออสโมซิสย้อนกลับ. กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรธรณี, 2543.

อรรวี คำประสงค์. การทำใสและยืดอายุการเก็บรักษาของไวน์ข้าวหวานปรุงอาหารด้วยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.

Aguiar, I.B., Miranda, N.G.M., Gomes, F.S., Santos, M.C.S., Freitas, D.G.C., Tonon, R.V., Cabral, L.M.C. (2012). Physicochemical and sensory properties of apple juice concentrated by reverse osmosis and osmotic evaporation. Innovative Food Science and Emerging Technologies 16: 137–142.

Álvarez, S., Riera, F.A., Álvarez, R., Coca, J., Cuperus, F.P., Bouwer, S., Boswinkel, G., Van Gemert, R.W., Veldsink, J.W., Giornoc, L., Donato, L., Todisco, S. Drioli, E., Olsson, J., Trägårdh, G., Gaeta, S.N., and Panyor, L. (2000). A new integrated membrane process for producing clarified apple juice and apple juice aroma concentrate. Journal of Food Engineering. 46(2): 109-125.

Ballew, H.W., F. Jesus Martinez, F.J., Markee, C. and Eddleman, R.T. (2002). The ABC’s of filtration and bioprocessing for the third millennium. Spectum Laboratories, Inc; Rancho Dominguez: United States.

Cassano, A., Conidi, C., and Drioli, E. (2011). Clarification and concentration of pomegranate juice (*Punica granatum* L.) using membrane processes. Journal of Food Engineering 107: 366–373.

Cui, Z. F., Jiang, Y., and Field, R. W. (2010). Fundamentals of pressure driven membrane separation processes. In: Membrane Technology, Cui Z.F., Muralidhara H.S. (Ed.). Elsevier, New York.

Damar, S. (2006). Processing of coconut water with high pressure carbon dioxide technology. Doctoral thesis, University of Florida, American.

Dharmasena, M., Barron, F., Fraser, A., and Jiang, X. (2015). Refrigerated shelf life of a coconut water-oatmeal mix and the viability of *Lactobacillus plantarum* Lp 115-400B. Foods 4(3): 328-337.

Donsingha S., and Assatarakul K. (2018). Kinetics model of microbial degradation by UV radiation and shelf life of coconut water. Food Control 92: 162-168.

Echavarría, A.P., Falguera, V., Torras, C., Berdún, C., Pagán, J., and Ibarz, A. (2012). Ultrafiltration and reverse osmosis for clarification and concentration of fruit juices at pilot plant scale. LWT – Food Science and Technology 46: 189-195.

Gordon A., and Jackson J. (2017). Food Safety and quality Systems in Developing Countries Volume Two: Case Studies of Effective Implementation: Chapter 7 - Case study: application of appropriate technologies to improve the quality and safety of coconut water. pp. 185-216. Academic Press, United States.

Gunathilake, K.D.P.P., Yu, L.J., and Rupasinghe, H.P.V. (2014). Reverse osmosis as a potential technique to improve antioxidant properties of fruit juices used for functional beverages. Food Chemistry 148: 335–341.

Paixão, L.B., Brandão, G.C., Araujo, R.G.O., and Korn, M.G.A. (2019). Assessment of cadmium and lead in commercial coconut water and industrialized coconut milk employing HR-CS GF AAS. Food Chemistry. 284: 259-263.

Panigrahi, C., Karmakar, S., Mondal, M., Mishra, H.N., and De, S. (2018). Modeling of permeate flux decline and permeation of sucrose during microfiltration of sugarcane juice using a hollow-fiber membrane module. Innovative Food Science and Emerging Technologies 49: 92-105.

Prades, A., Dornier, M., DIOP, N., and Pain, J. (2012). Coconut water preservation and processing: a review. Fruits 67(3): 157-171.

Rolle, R. (2007). Good practice for the small-scale production of bottled coconut water. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS: Rome.

Tribst, A.A.L., Sant'Ana, A.S., and Massaguer, P.R. (2012). Review: Microbiological quality and safety of fruit juices - past, present and future perspectives. Critical Reviews in Microbiology 35(4): 310-339.

Walter, E.H.M., Kuaye, A.Y., and Hoorfar, J. (2014). Case study on the safety and sustainability of fresh bottled coconut water. In A Handbook of Best Practice, Innovative Commercial Solutions and Case Studies, pp. 367-382. Cambridge: Woodhead Publishing.

Wizzard, G., McCook, K., Jackson, J., and Gordon, A., (2002). Quality of bottled coconut water during storage; pH as a reliable indicator of coconut water spoilage pre-processing. Caribbean Academy of Science Annual Meeting, University of the West Indies, Mona, Jamaica.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาว วัชรา วชิรปาณีกูล
ตำแหน่ง	หัวหน้าโครงการ
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.)
ภาควิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2563
โทรศัพท์	083-6375559
Email	watchara_kankorn@hotmail.co.th

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาว มุกนภา วัธนอธิจิระ
ตำแหน่ง	ผู้ร่วมวิจัย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.)
ภาควิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2563
โทรศัพท์	061-9216254
Email	firsty1@hotmail.co.th