

การแยกโปรตีนออกจากผนังในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้



นายกิตติพงษ์ รัตนภรณ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1301-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROTEIN SEPARATION FROM TAMARIND KERNEL POWDER
USING ROTATING FILTER

Mr.Kittipong Rattanaporn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1301-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกโปรตีนออกจากผนังในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้
โดย	นายกิตติพงษ์ รัตนภรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก วานิชศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก วานิชศรี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

กิติพงษ์ รัตนภรณ์ : การแยกโปรตีนจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้
(PROTEIN SEPARATION FROM TAMARIND KERNEL POWDER USING ROTATING FILTER)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.จिरกานต์ เมืองนาโพธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.หทัยชนก วานิชศรี, 190 หน้า.
ISBN 974-03-1301-9

การศึกษาการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรก
ศึกษาองค์ประกอบ และขนาดอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม พบว่า มีปริมาณพอลิแซคคาไรด์ ร้อยละ 63.42-73.57 ปริมาณ
โปรตีนร้อยละ 15.36-16.54 ปริมาณไขมันร้อยละ 4.91-5.10 และองค์ประกอบอื่นๆอีก 16.31-4.79 โดยน้ำหนัก มีขนาดของ
อนุภาคเมื่อกระจายตัวในน้ำประมาณ 22-23 ไมโครเมตร และความหนืดของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสาร
แขวนลอยที่สูงขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ค่าความหนืดและความหนาแน่นของสารแขวนลอยที่ความเข้มข้น
20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 2.42 6.12 และ 17.706 เซนติพอยส์ และ 1004.82 1011.18 และ 1014.52 กิโลกรัมต่อ
ลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

ส่วนที่ 2 ศึกษาการเลือกชนิดของตัวกรองโดยใช้ชนิดของตัวกรอง 4 ชนิด คือ ผ้ากรองที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ 3 ชนิด และ
ตะแกรงสแตนเลสขนาด 33 ไมโครเมตร กรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรที่ผ่านคลื่นเหนือ
เสียง 5 นาที ด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด และทำการชะล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์จำนวน
4 ครั้ง พบว่า ผ้ากรองชนิดที่ 2 เป็นผ้ากรองที่มีความเหมาะสมที่สุด คือ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนเท่ากับ 95.07 ค่าร้อยละการสูญเสีย
พอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 56.30 และมีขนาดของรูพรุนประมาณ 12.34 ไมโครเมตร

ส่วนที่ 3 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกโปรตีนจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ โดยมีขอบเขต
ของตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความดันคร่อมตัวกรอง ความเร็วรอบในการ
หมุนตัวกรอง ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก ที่อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตร
ต่อชั่วโมง พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำ ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง และ ความดันคร่อมตัวกรอง มีอิทธิพลต่อ
การกรองมาก เมื่อความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองเพิ่มขึ้น ความดันคร่อมตัวกรองที่เหมาะสมจะมีค่าสูงตามขึ้นไปด้วย ส่งผลให้ค่า
ฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าสูงขึ้น และที่ความเข้มข้นของสาร
แขวนลอยสูง ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองจะมีอิทธิพลต่อการกรองเพียงอย่างเดียว ผลของระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัว
กรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกต่อการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม พบว่า ที่ระยะห่างเพิ่มขึ้น หรือลดลง
กว่า 0.008 เมตร จะทำให้แรงเฉือนที่เกิดจากการหมุนวนของเทย์เลอร์มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัด
โปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าลดลง นอกจากนี้การกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ สามารถคัดขนาดของ
อนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยดูจากการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น ในสายป้อน และในสาย
ฟิลเตรต พบว่าที่ภาวะการกรองที่เหมาะสม การกระจายตัวของอนุภาคในสายป้อนจะแยกออกจากการกระจายตัวของอนุภาคเริ่ม
ต้น โดยมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 22-23 ไมโครเมตร ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคในสายฟิลเตรตจะมีลักษณะเป็นโค้ง
แคบ มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ย 7-9 ไมโครเมตร

ภาวะการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นสารแขวนลอย
20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ และระยะห่างระหว่างผิว
หน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกเท่ากับ 0.008 เมตร (ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์เท่ากับ 7596 ค่าอัตราการเฉือน
เท่ากับ 10704 ต่อวินาที และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกนเท่ากับ 50) ได้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์เท่ากับ 9354 ลิตรต่อตารางเมตรชั่วโมง
ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 74.36 และ 40.31 ตามลำดับ ผลผลิตที่ที่ได้มี
ปริมาณโปรตีน ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ และปริมาณไขมันเท่ากับร้อยละ 9.70 66.41 และ 5.10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีผล
ได้ของการผลิตผลิตภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 29.03 โดยน้ำหนัก

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิติ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170231321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : TAMARIND KERNEL POWDER / PROTEIN SEPARATION / ROTATING FILTER

KITTIPONG RATTANAPORN : PROTEIN SEPARATION FROM TAMARIND KERNEL POWDER USING ROTATING FILTER. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr.Eng., THESIS COADVISOR : ASSIST. PROF. HATHAICHANOK VANISRI, Ph.D. 190 pp. ISBN 974-03-1301-9

The study of protein separation from tamarind kernel powder (TKP) using the rotating filter can be categorized into three sections. As for the first section, the composition and particle size of TKP were studied. It was found that TKP was composed of polysaccharide, protein, fat, and others with the contents of 63.42-73.57, 15.36-16.54, 4.91-5.10, and 16.31-4.79 % by weight, respectively. When dispersed in water, the particle size of TKP was approximately 22-23 micrometers. With the increasing of the concentration of the suspension, the viscosity of the suspension increased while the density was insignificantly changed. The corresponding viscosities and densities of the suspension at the suspension concentration of 20, 40, and 60 gram per litre were 2.42, 6.12, and 17.706 centipoises, respectively, and 1004.82, 1011.18, and 1014.52 kilogram per cubic meter, respectively.

Concerning the second section, four types of the filters were studied in the filtration with wiper at the concentration of 10 gram per litre; three made of synthetic fiber and the other made of stainless steel. The procedure was started by the ultrasonic treatment for 5 minutes and then washing with pure water for four times. It was found that the second type of the filter gave the best results; 95.07% protein removal, 56.30% polysaccharide loss, and 12.34 micrometers of pore size.

Regarding the third section, various factors affecting protein separation from TKP by using the rotating filter were investigated at the feed flow rate of 38 litre per hour. Those factors were the concentration of the suspension, the pressure across the filter, rotating speed, and the distance between the filter surface and the internal surface of the outer cylinder. It was found that rotating speed and pressure across the filter had a great influence on the separation at the low concentration of the suspension. With the increasing of the rotating speed, the optimal value of pressure across the filter was increasing likewise. In response to the optimal value, the filtrate flux, percentage protein removal, percentage polysaccharide loss were higher. On the other hand, at the high concentration of the suspension, the rotating speed was the only one that had an effect on the separation. As for the effects of the distance between the filter surface and the internal surface of the outer cylinder, it was found that the shear force occurring from Taylor's vortice was decreased with the higher and lower distance than 0.008 meters. That made the filtrate flux, percentage protein removal, and percentage polysaccharide loss decrease. In addition, The rotating filter can separate small particles by considering the particle size distributions of TKP in raw material, feed stream, and filtrate stream. At the optimal conditions for the filtration, the particle size distribution curve of TKP in raw material and that of TKP in feed stream separated, but shared the same average particle size of 22-23 micrometers. While the narrow curve particle size distribution of TKP in filtrate stream could be observed with the average particle size of 7-9 micrometers

The optimal conditions for the filtration of the TKP suspension by using the rotating filter were as follows; the suspension concentration of 20 gram per litre, the filter rotating speed of 1700 round per minute, the pressure across the filter of 0.16 bar, and the distance between the filter surface and the internal surface of the outer cylinder of 0.008 meters. (the Taylor number was 7596, the shear rate was 10704 per sec, and the axial Reynold number was 50). Consequently, the following results were obtained; the filtrate flux of 9354.41 litre per square meter per hour, protein removal of 74.36%, and polysaccharide loss of 40.31%, protein, polysaccharide and fat content in the product of 9.70%, 66.41% and 5.10% by weight, respectively and product yield of 29.03% by weight.

Department.....Chemical Engineering..... Student's signature.....

Field of study.....Chemical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year.....2001..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลือที่ดียิ่งจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก วานิชศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำวิธีการทำงานวิจัยตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวสันต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ และ แก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท จี เอ็ม อีซีฮารา จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.ชฎา พิศาลพงศ์ สถาบันวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องกลึง และเครื่องเจาะในการทำตัวกรอง

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ทบวงมหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี และห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา และขอบคุณทุกๆคน ในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการศึกษาตลอดมาจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
สัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	6
ขอบเขตการศึกษา.....	6
2. ตรวจสอบเอกสาร.....	7
2.1 มะขาม.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม.....	21
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	31
3. ทฤษฎี.....	36
3.1 การกรอง.....	36
3.2 การกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	46
4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	57
4.1 อุปกรณ์.....	57
4.2 เคมีภัณฑ์.....	57
4.3 วิธีการทดลอง.....	58
4.4 สภาวะการทดลอง.....	63
4.5 การวิเคราะห์.....	64
4.6 ความหมายของค่าต่างๆ ที่ใช้ในการแปรผลการทดลอง.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. ผลการทดลอง วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง.....	66
5.1 ผลของการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ ปริมาณไขมัน และ ขนาดของอนุภาค ของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง.....	66
5.2 ผลการทดลองเพื่อเลือกชนิดของตัวกรอง.....	68
5.3 ผลการทดลองการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อใน เมล็ดมะขามโดยการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	69
5.3.1 ผลของความดันคร่อมตัวกรองและความเข้มข้นของสารแขวนลอย ผงเนื้อในเมล็ดมะขามในสายป้อนต่อการกรองที่ความเร็วรอบคงที่.....	69
5.3.2 ผลของความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองต่อการกรองผงเนื้อในเมล็ด มะขาม.....	90
5.3.3 ผลของระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของ ทรงกระบอกชั้นนอกต่อการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขาม.....	94
5.4 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามด้วยวิธี ต่างๆ.....	102
6. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	103
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก.....	111
ภาคผนวก ข.....	118
ภาคผนวก ค.....	156
ภาคผนวก ง.....	169
ภาคผนวก จ.....	179
ภาคผนวก ฉ.....	182
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	190

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดมะขาม, เนื้อในเมล็ดมะขาม และเปลือกของเมล็ดมะขาม (Shankarachaya, 1998).....	8
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารเคมีต่างๆ (เกลือซัลเฟต, เอทานอล) ที่ใช้ในการสกัดเจลโลส กับปริมาณเจลโลสที่สกัดได้.....	22
4.1 ภาวะการทดลองในการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเพื่อแยกอนุภาคของโปรตีนด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	44
5.1 องค์ประกอบของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง.....	66
5.2 ค่าความหนืดและความหนาแน่นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามในน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆ	67
5.3 ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ ขนาดของอนุภาคในฟิลเตรต ในการชะเค้ครั้งที่ 1 และปริมาณโปรตีนในเค้ต่อปริมาณเค้ จากการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาดโดยใช้ตัวกรองชนิดต่างๆ.....	68
5.4 ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ ค่าอัตราการเฉือน และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกนของภาวะการกรองต่างๆ.....	70
5.5 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของภาวะการกรองต่างๆ ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที.....	88
5.6 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของภาวะการกรองต่างๆ ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700รอบต่อนาที.....	89
5.7 แสดงค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์, ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกน และอัตราการเฉือนของการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองและผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก เท่ากับ 0.003 0.008 และ 0.013 เมตร ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม 20 กรัมต่อลิตร.....	94
5.8 แสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของโพลีแซคคาไรด์ของเมล็ดมะขาม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ที่ภาวะการกรองที่เหมาะสมที่สุด และโพลีแซคคาไรด์ของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ได้จากการกรองหลังจากการกวนด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวล.....	101
5.9 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตโพลีแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามด้วยวิธีต่างๆ.....	102

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม (Kooiman, 1961).....	19
2.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม (Savur, 1956, Srivastava และ Singh, 1967)	20
2.3 แสดงกระบวนการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เกลือซัลเฟต.....	23
2.4 แสดงกระบวนการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้แอลกอฮอล์.....	24
2.5 แสดงกระบวนการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามในปริมาณมาก.....	25
2.6 แสดงกระบวนการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เอนไซม์และแอลกอฮอล์..	27
3.1 ระบบการกรอง (Svarovsky, 1990)	36
3.2 การกรองชนิดที่มีเค้กติดอยู่บนผิวหน้าของตัวกรอง (Surface filtration)	37
3.3 การกรองชนิดที่มีอนุภาคติดค้างอยู่ในตัวกรอง (Deep bed filtration)	38
3.4 ประเภทของการกรองตามทิศทางการไหลของสารแขวนลอย.....	40
3.5 แสดงทิศทางการไหลของของไหลในกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Belfort et.al., 1993)	47
3.6 แสดงการเกิดการหมุนวนแบบเทย์เลอร์ (Taylor vortice) (Hermert van, P.A., 1987).....	48
3.7 แสดงกลไกการไหลของระบบการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Bird R.B. Stewart W.E. และ Lightfoot E.N., 1960, Belfort et.al., 1993).....	49
3.8 แสดงรูปแบบการหมุนวนของเทย์เลอร์ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกน (Kataoka และคณะ, 1977).....	53
4.1 แผนภาพอุปกรณ์ชนิดไหลผ่านตัวกรองในถังกวนโดยกวาดผิวหน้าของตัวกรองด้วยใบกวาด และมีการชะเค้ด้วยน้ำบริสุทธิ์ (วารี, 2544).....	60
4.2 ตัวกรองที่ใช้ในการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	61
4.3 ชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขนานตัวกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	61
4.4 แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขนานตัวกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	62
5.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงเนื้อในของเมล็ดมะขามเริ่มต้น.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลเตรตฟลักซ์ที่ภาวะการกรองคงที่กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที.....	81
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อ ลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที.....	82
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อ ลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที.....	82
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อ ลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที.....	83
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที.....	83
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที.....	84
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที.....	84
5.20 ภาพตัดขวางแค้มที่ได้จากการกรองเมื่อรูพรุนของตัวกรองมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของพอลิสไตรีน (Tanaka และคณะ, 2000)	85
5.21 ตัวอย่างการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น ในสายป้อน และสายฟิลเตรตของภาวะการกรองที่เหมาะสม ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.07 บาร์)	86
5.22 ตัวอย่างการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น ในสายป้อน และสายฟิลเตรตของภาวะการกรองที่เหมาะสม ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.14 บาร์).....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

5.23 ตัวอย่างการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น ในสายป้อน และสายฟิลเตรตของภาวะการกรองที่ไม่เหมาะสม (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.06 บาร์ ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที)	87
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิลเตรตพลาซึคกับความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	91
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	92
5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	93
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลเตรตพลาซึคกับเวลา ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ที่ระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกต่าง ๆ.....	97
5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลเตรตพลาซึคกับระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับผนังของทรงกระบอกชั้นนอกต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ที่ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที.....	97
5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนกับระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับผนังของทรงกระบอกชั้นนอกต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ที่ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที.....	98
5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับผนังของทรงกระบอกชั้นนอกต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ที่ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที.....	98
5.31 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก 0.003 เมตร ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

- 5.32 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น
20 กรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก 0.008 เมตร ความเร็ว
รอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์..... 99
- 5.33 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น
20 กรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก 0.013 เมตร ความเร็ว
รอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์..... 99



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

A	พื้นที่การกรอง (ตารางเมตร)
C	ความเข้มข้นของของแข็งในสารแขวนลอย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
d_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (เมตร)
d	ระยะห่างระหว่างของผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก (เมตร)
J	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)
K	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (เมตรต่อวินาที)
N	จำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ (รอบต่อวินาที)
R_c	ความต้านทานการกรองของเค้ก (ต่อเมตร)
R_m	ความต้านทานการกรองของตัวกรอง (ต่อเมตร)
R_t	ความต้านทานรวม (ต่อเมตร)
R_1	รัศมีของตัวกรอง (เมตร)
R_2	รัศมีภายในของท่อทรงกระบอก (เมตร)
Re_a	ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ตามแนวแกน (-)
Re_t	ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ที่ผิวของเยื่อแผ่น (-)
T_a	ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (-)
$T_{a,crit}$	ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์วิกฤต (-)
v	ปริมาตรของฟิลเตรต (ลูกบาศก์เมตร)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

w	มวลของเค้กที่สะสมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)
ΔP	ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)
α	ความต้านทานจำเพาะของเค้ก (เมตรต่อกิโลกรัม)
ρ	ความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
v	ความเร็วของสารละลาย (เมตรต่อวินาที)
μ	ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)
τ	แรงเฉือนที่ผิวเยื่อแผ่น (ต่อวินาที)
ω	ความเร็วเชิงมุม (ต่อนาที)
v	ความหนืดคิเนมาติก (ตารางเมตรต่อวินาที)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

มะขาม (Tamarind) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Tamarindus indica* Linn. เป็นไม้ยืนต้นที่ปลูกกันมากในเขตร้อนชื้น สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย ผลมีลักษณะเป็นฝัก ขนาดของฝักขึ้นอยู่กับพันธุ์ของเมล็ดมะขาม มะขามจะให้ฝักมากในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน ในประเทศไทยมีการปลูกมะขามเป็นการค้าทั้งที่อยู่ในรูปของมะขามเปียกที่แกะเมล็ด และไม่แกะเมล็ดบรรจุอยู่ในถุงพลาสติก และในรูปของมะขามหวานบรรจุกล่อง ซึ่งความต้องการของตลาดมีทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ จากสถิติการส่งออกของมะขามแห้ง กรมศุลกากร ระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนกันยายน 2544 คิดเป็นมูลค่า 923.80 ล้านบาท (กรมศุลกากร, 2544) นอกจากนั้นยังมีการนำมะขามมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ ซอส มะขามแก้ว ลูกอมมะขาม ไวน์มะขาม น้ำมะขามเข้มข้น เป็นต้น ซึ่งผลพลอยได้จากการผลิตผลิตภัณฑ์จากมะขามที่มากที่สุด คือ เมล็ดมะขาม เนื่องจากฝักมะขามมีเมล็ดมะขามเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 34 ของทั้งหมด ดังนั้นในแต่ละปีจะมีเมล็ดมะขามซึ่งเป็นผลพลอยได้ประมาณ 3 หมื่นตันต่อปี ปัจจุบันได้มีการนำเมล็ดมะขามมาใช้ประโยชน์โดยใช้ควมผสมกาแฟหรือรับประทานเป็นของขบเคี้ยว รวมทั้งการใช้เป็นอาหารสัตว์ (ทนาง, 2534)

เมล็ดมะขามประกอบด้วยส่วนที่เป็นเปลือกของเมล็ดร้อยละ 25 และส่วนเนื้อในเมล็ดมะขามร้อยละ 75 ของเมล็ดมะขาม โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ในเนื้อเมล็ดมะขามเป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีมากถึงร้อยละ 59 ถึง 65 ของเนื้อในเมล็ดทั้งหมด (ศิริรัตน์, 2539) คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดมะขามเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติเฉพาะ เรียกว่า เจลโลส (Jellose) โดยเมื่อนำไปละลายน้ำจะให้สารที่มีสมบัติเป็นเจล และมีความคงตัวในช่วงความเป็นกรด-ด่างกว้าง เนื่องจากเจลโลสมีสมบัติเป็นสารให้ความหนืด (Thickener) เป็นสารช่วยให้น้ำและน้ำมันรวมตัวกันได้ดี (Emulsifier) สารรักษาความคงตัว (Stabilizer) จึงมีการนำเจลโลสมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทได้แก่ อุตสาหกรรมเส้นใย อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เภสัชกรรม อุตสาหกรรมอาหาร และอื่นๆ (พวงเพ็ชร, 2521)

บริษัท จีเอ็ม อิชิตาร่า จำกัด (GM Ichihara Company Limited) เป็นบริษัทหนึ่งในประเทศไทยที่มีการนำเมล็ดมะขามมาใช้ประโยชน์ โดยผลิตเป็นผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (Tamarind Kernel Powder, TKP) มีการรับซื้อเมล็ดมะขามจากที่ต่างๆ ในประเทศไทย นำมาผ่านกระบวนการแยก

เปลือกเมล็ดออก แล้วบดเนื้อในเมล็ดมะขามจนได้ขนาดที่ต้องการ ได้เป็นผงเนื้อในเมล็ดมะขาม มีชื่อทางการค้าว่า MAKAM 200 ซึ่งมีองค์ประกอบ คือ พอลิแซคคาไรด์ร้อยละ 65.1 ถึง 72.2 โปรตีนร้อยละ 15 ถึง 20.9 ไขมันร้อยละ 3.9 ถึง 8 เส้นใยร้อยละ 2.5 ถึง 8.2 แล้วส่งไปยังประเทศญี่ปุ่นเพื่อทำการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามที่มีความบริสุทธิ์สูง (มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า เจลโลส) โดยผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจนได้พอลิแซคคาไรด์ของเมล็ดมะขาม ที่มีชื่อทางการค้าว่า SOABIGUM หรือ TG 200 ซึ่งมีราคาสูง (ข้อมูลเบื้องต้นจากบริษัท จีเอ็ม อีซีอารา จำกัด, 2542)

จากองค์ประกอบของผงเนื้อในเมล็ดมะขามข้างต้น พบว่ามีองค์ประกอบที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 28 ถึง 35 ส่วนประกอบเหล่านี้จะมีผลต่อคุณสมบัติของเจลโลส โดยไขมันทำให้เจลโลสมีกลิ่นหืน และมีสีเปลี่ยนไป เส้นใยทำให้เจลโลสไม่ละลายน้ำ และอาจเป็ดิดขัดในอุปกรณ์ในกระบวนการ โปรตีนทำให้เจลโลสมีสีเปลี่ยนไป และทำให้เกิดฟองขึ้นในระหว่างกระจายตัวในน้ำ (Shankaracharya, 1998) ดังนั้นในการผลิตเจลโลสจึงต้องอาศัยวิธีการต่างๆ เพื่อแยกสิ่งเจือปนอื่นๆ ออก โดยเฉพาะโปรตีนซึ่งเป็นสิ่งเจือปนที่มีปริมาณสูงสุด โปรตีนในเมล็ดมะขามส่วนใหญ่ เป็นโปรตีนจำพวกอัลบูมิน (Albumin) และโกลบูลิน (Globulin) โปรตีนเหล่านี้มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นก้อนกลม จึงมีสมบัติไม่ละลายน้ำ และยึดติดกับอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ (Sila และคณะ, 1994) จึงทำให้ในการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขาม จะต้องประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1) ทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ และอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์เพื่อให้ได้อนุภาคของโปรตีนหรืออนุภาคของสิ่งเจือปนอื่นๆ และอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์อยู่แยกกันเป็นอนุภาคอิสระ 2) แยกอนุภาคอิสระของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากอนุภาคอิสระของพอลิแซคคาไรด์

ในขั้นตอนการแยกอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ โดยการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ และอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ สามารถทำได้หลายวิธีโดยใช้หลักในการแยกต่างๆ กัน เช่น การใช้ความสามารถในการละลายของอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ในตัวทำละลายอินทรีย์ การใช้คลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic) เพื่อแยกอนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ออกจากกันเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ (วารี, 2543) และการใช้เอ็นไซม์ในการย่อยอนุภาคของสิ่งเจือปนหรืออนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ เช่น การใช้เอนไซม์ในกลุ่มโปรติโอไลติก (Proteolytic enzyme) เพื่อย่อยโปรตีนในผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (พวงเพชร, 2521) เป็นต้น

ส่วนขั้นตอนในการแยกอนุภาคอิสระของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่ได้จากขั้นตอนแรก ออกจากอนุภาคอิสระของพอลิแซคคาไรด์ จะใช้หลักการแยกโดยอาศัยแตกต่างของความหนาแน่นและขนาดของอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ และอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ของเมล็ดมะขาม ได้แก่ การกรอง และการแยกด้วยแรงหมุนเหวี่ยง

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่รวมทั้งสองขั้นตอนในการแยกอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ แอร์ คลาสซิฟิเคชัน (Air classification) ดำเนินการในสถานะก๊าซ เช่นตริฟิว ไฮโดรไซโคลน ดำเนินการในสถานะของเหลว กระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงในการทำให้อนุภาคของโปรตีนหรืออนุภาคของสิ่งเจือปนอื่นๆ และอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์หลุดออกจากกัน เนื่องจากเกิดการชนกันและมีการเสียดสีกันระหว่างอนุภาค ในขณะที่เดียวกันแรงหมุนเหวี่ยงยังสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดหรือความหนาแน่นที่ต่างกันออกจากกันได้อีกด้วย นอกจากนี้การดำเนินการในสถานะของเหลวยังสามารถใช้ความสามารถในการละลายของอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ในตัวทำละลายอินทรีย์ ในการแยกอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์

จากงานวิจัยที่ศึกษาการแยกอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามโดยใช้หลักการแยกต่างๆ มีข้อดีและข้อเสียต่างกัน เช่น ในกระบวนการแยกโดยใช้ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้ง่าย แต่ในปัจจุบันยังไม่พบตัวทำละลายที่สามารถเลือกละลายเฉพาะโปรตีนหรือพอลิแซคคาไรด์ในผงเนื้อในเมล็ดมะขามออกจากกันอย่างสมบูรณ์ และต้องมีกระบวนการแยกอีกหลายขั้นตอน เพื่อแยกสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ไขมัน และเส้นใย เป็นต้น นอกจากนี้เจลโลสมีสมบัติให้ความเหนียวเมื่อละลายในน้ำ ดังนั้นกระบวนการแยกจะต้องดำเนินการที่ความเข้มข้นต่ำประมาณร้อยละ 1 ของผงเนื้อในเมล็ดมะขามในสารละลายทั้งหมด ทำให้การดำเนินการเป็นไปได้ยากและมีต้นทุนสูง เนื่องจากต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก และใช้พื้นที่ในการดำเนินการมาก

ในกระบวนการใช้คลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic) เพื่อแยกอนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ เป็นกระบวนการที่สามารถแยกอนุภาคของโปรตีนหรือสิ่งเจือปนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ได้อย่างสมบูรณ์ แต่การใช้คลื่นเหนือเสียงจะทำให้อนุภาคของพอลิแซคคาไรด์มีขนาดเล็กลง จนมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคของโปรตีน ทำให้แยกออกจากกันได้ยากขึ้น และเกิดการ

สูญเสียพอลิแซคคาไรด์จำนวนมาก ในการแยกอนุภาคอิสระของโปรตีนออกจากอนุภาคอิสระของพอลิแซคคาไรด์โดยใช้กระบวนการกรองแบบไหลผ่านตัวกรองที่มีตัวกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด จะมีเค้กเกิดขึ้นสะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรองทำให้ประสิทธิภาพของการกรองลดลง และเป็นกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง (วาริ, 2543)

ในการแยกอนุภาคของโปรตีนด้วยเอนไซม์ในกลุ่มโปรติโอไลติก (Proteolytic enzyme) เป็นวิธีที่สามารถแยกโปรตีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เอนไซม์ทำการย่อยโมเลกุลของโปรตีนให้เป็นกรดอะมิโน และพอลิเปปไทด์สายสั้นๆ โดยอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ยังคงมีขนาดเท่าเดิม เป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการดำเนินการ และสูญเสียพลังงานน้อย ข้อเสียของวิธีนี้ คือ เอนไซม์มีราคาสูง นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์เจือปนอยู่ในสารละลายแขวนลอย จึงต้องมีกระบวนการแยกเอนไซม์อีก (พวงเพ็ชร, 2521)

ในกระบวนการแยกด้วยแรงหมุนเหวี่ยง เช่น แอร์ คลาสซิฟิเคชัน (Air classification) ดำเนินการในสถานะก๊าซ เซนตริฟิว ไฮโดรไซโคลอน ดำเนินการในสถานะของเหลว กระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการไม่ซับซ้อนอาศัยแรงหมุนเหวี่ยงในการทำให้อนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์หลุดออกจากกัน เนื่องจากเกิดการชนกันและมีการเสียดสีกันระหว่างอนุภาค ในขณะเดียวกันแรงหมุนเหวี่ยงยังสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดหรือความหนาแน่นที่ต่างกันออกจากกันได้อีกด้วย ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ แรงหมุนเหวี่ยงอาจทำให้อนุภาคของพอลิแซคคาไรด์มีขนาดเล็กลงใกล้เคียงกับอนุภาคของโปรตีน ทำให้ยากต่อการแยกในขั้นตอนต่อไป นอกจากนี้อนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ที่มีขนาดเล็กจะทำความหนืดของเจลโลสมีค่าลดลงด้วย โดยทั่วไปไฮโดรไซโคลอนจะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กต่ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะต้องใช้ไฮโดรไซโคลอนจำนวนมากถึง 36 ตัว จึงจะสามารถแยกได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ทำให้ต้องใช้พื้นที่มากและสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้กระบวนการเหล่านี้มีการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่สามารถติดไฟได้ จึงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ดำเนินการ รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการและพื้นที่ดำเนินการต้องสามารถป้องกันการระเบิดได้ (Jones และ Jodan, 1978)

จากข้อดีและข้อเสียของการแยกอนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์จากมาขามในงานวิจัยต่างๆ จึงเกิดแนวความคิดในการแยกอนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์โดยใช้การกรองแบบไหลขนานตัวกรองชนิดหมุนได้ และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เนื่องจาก

น้ำเป็นตัวทำละลายที่หาได้ง่าย มีราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถละลายโปรตีนได้บางส่วนและสามารถแยกน้ำออกจากอนุภาคของพอลิแซ็กคาไรด์จากมะขามได้ง่าย เช่น การอบแห้ง ส่วนการเลือกใช้กระบวนการกรองแบบไหลขนานตัวกรองชนิดหมุนได้ในการแยกอนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซ็กคาไรด์จากมะขาม เนื่องจากในเครื่องกรองชนิดหมุนได้จะมีการไหลแบบหมุนวน มีลักษณะเป็นวงแหวนรอบๆผิวหน้าของตัวกรอง เรียกว่าการหมุนวนของเทย์เลอร์ (Taylor vortice) ทำให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของเยื่อแผ่น ทำให้อนุภาคที่เกาะบริเวณผิวตัวกรองลดลง ดังนั้นจึงสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง และแรงหมุนเหวี่ยงที่เกิดจากการหมุนตัวกรองจะทำให้อนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซ็กคาไรด์หลุดออกจากกัน เนื่องจากเกิดการชนกันและมีการเสียดสีกันระหว่างอนุภาค ในขณะที่เดียวกันการกรองด้วยผ้ากรองสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดที่ต่างกันออกจากกันได้อีกด้วย จึงเป็นกระบวนการแยกอนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซ็กคาไรด์จากเมล็ดมะขามที่รวมขั้นตอนการแยกทั้งสองขั้นตอนอยู่ในกระบวนการเดียวกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการแยกอนุภาคโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยการกรองชนิดไหลขนานตัวกรองแบบหมุนได้โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการแยกโปรตีนออกจากผนังในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกโปรตีนออกจากผนังในเมล็ดมะขามโดยการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ
 - 1.1 ความเข้มข้นของผนังในเมล็ดมะขามในสายปั่น (20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร)
 - 1.2 ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง (500 1100 และ 1700 รอบต่อนาที)
 - 1.3 ความดันคร่อมตัวกรอง
 - 1.4 ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองและผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก (0.003 0.008 และ 0.013 เมตร)
2. ทำการแปรผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการแยกโดยศึกษาในรูปของร้อยละการกำจัดโปรตีน, ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม ขนาดของอนุภาคของสารในระบบ และผลของแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของตัวกรองที่เกิดจากการหมุนตัวกรอง
3. ในสารแขวนลอยผนังในเมล็ดมะขามจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และไม่คำนึงถึงผลของไขมันที่เป็นองค์ประกอบในผนังในเมล็ดมะขาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1. มะขาม

มะขาม (Tamarind) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Tamarindus indica* Linn. เป็นไม้ยืนต้นในสกุล *Leguminosae* หรือ *Caesalpinaceae* มะขามเป็นพืชพื้นเมืองของแอฟริกาเขตร้อน และอินเดีย พบทั่วไปในป่าเขตร้อนชื้น มีอายุยืนประมาณ 80-120 ปี มีความสูงประมาณ 80 ฟุต ทรงพุ่มกว้างประมาณ 20-35 ฟุต ใบมีสีเขียวอ่อน มีลักษณะการเรียงตัวของใบคล้ายขนนก ผลมีลักษณะเป็นฝัก มีสีน้ำตาล เป็นรูปทรงกระบอกตรงหรือโค้ง ยาวประมาณ 5-18 เซนติเมตร และกว้างประมาณ 1.25-2.50 เซนติเมตร ขึ้นกับพันธุ์มะขาม เปลือกของฝักมะขามมีสีน้ำตาล มีลักษณะเป็นเปลือกบางๆ เพราะแตกง่าย ภายในประกอบด้วยเนื้อมะขามมีลักษณะอ่อนนุ่ม สีน้ำตาลหรือสีแดง ภายในฝักมะขามมีเมล็ดประมาณ 3-12 เมล็ด เมล็ดมีผิวนอกสีน้ำตาลแดง มีผิวเรียบเป็นมัน มีขนาดประมาณ 1.5 x 0.8 เซนติเมตร โดยทั่วไปต้นมะขามจะออกฝักเมื่ออายุ 8-12 ปี และสามารถเก็บเกี่ยวผลได้ทุกปี โดยมะขามจะออกดอกในระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน และฝักจะสุกบนต้นในฤดูหนาว ในระหว่างเดือนธันวาคมถึงมกราคม ฝักที่สุกจะมีเปลือกภายนอกแห้ง สามารถแยกออกจากเนื้อได้ง่าย (Morton J., 1987) ในประเทศไทยมีการปลูกมะขามโดยทั่วไปทุกจังหวัด แต่จังหวัดที่มีการปลูกกันมากได้แก่ จังหวัดเพชรบูรณ์ เชียงใหม่ กาญจนบุรี อ่างทอง สุพรรณบุรี ประจวบคีรีขันธ์ และนครราชสีมา (พวงเพชร, 2521)

มะขามสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิดเช่น ซอส แยม เยลลี่ ไวน์มะขาม, มะขามแก้ว ลูกอมรสมะขาม น้ำมะขาม และน้ำมะขามเข้มข้น เป็นต้น ซึ่งผลพลอยได้จากการผลิตผลิตภัณฑ์แปรรูปมะขามคือ เมล็ดมะขาม โดยในฝักของมะขามจะประกอบด้วยเปลือกของมะขามร้อยละ 15-25 เนื้อมะขามร้อยละ 45-55 เมล็ดมะขามร้อยละ 25-35 และเส้นใยร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก และในเมล็ดมะขามจะมีส่วนประกอบที่เป็นเปลือกของเมล็ดร้อยละ 25-30 และส่วนที่เป็นเนื้อสีขาวร้อยละ 70-75 โดยน้ำหนัก ซึ่งในส่วนนี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ศิริรัตน์, 2539)

เมล็ดมะขาม (Tamarind seed)

เมล็ดมะขามสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผงเนื้อในเมล็ดมะขาม พอลิแซคคาไรด์ หรือเจลโลส กาว และแทนนิน นอกจากนี้เมล็ดมะขามยังเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญและเป็นที่น่าสนใจของนักโภชนาการ เนื่องจากเป็นแหล่งของกรดอะมิโนที่จำเป็น ผักมะขามจะมีเมล็ดเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 30 ของผักมะขาม โดยเมล็ดมะขามจะประกอบด้วยเปลือกของเมล็ด ร้อยละ 30 และเนื้อในเมล็ดหรือ เอนโดสเปิร์ม (Kernel or Endosperm) ร้อยละ 70 ซึ่งมีดีเอ็นเอขององค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดมะขามดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากตารางพบว่าเมล็ดมะขามทั้งเมล็ดมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 13.3-26.9 และในเปลือกของเมล็ดมะขามจะมีเส้นใยเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 21.6 และแทนนินประมาณร้อยละ 20.2 (Shankarachaya, 1998)

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดมะขาม เนื้อในเมล็ดมะขาม และเปลือกของเมล็ดมะขาม (Shankarachaya, 1998)

องค์ประกอบ	เมล็ดมะขามทั้งเมล็ด	เนื้อในเมล็ดมะขาม	เปลือกของเมล็ดมะขาม
ความชื้น (%)	9.4-11.3	11.4-22.7	11.0
โปรตีน (%)	13.3-26.9	15.0-20.9	-
ไขมัน/น้ำมัน (%)	4.5-16.2	3.9-8.0	-
เส้นใย (%)	7.4-8.8	2.5-8.2	21.6
คาร์โบไฮเดรต (%)	50.0-57.0	65.1-72.2	-
เถ้า (%)	1.60-4.2	2.4-4.2	7.4
ไนโตรเจนอิสระ (%)	59.0	-	-
ผลได้ของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (%)	50.0-60.0	-	-
พลังงาน (แคลอรี/100กรัม)	340.3	-	-
น้ำตาลทั้งหมด (%)	11.3-25.3	-	-
น้ำตาลรีดิวิง (%)	7.43	-	-
แป้ง (%)	33.1	-	-
แทนนิน (%)	-	-	20.2

ส่วนประกอบของเมล็ดมะขามส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีถึงร้อยละ 50.0-57.0 และคาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่เป็นสารที่มีสมบัติทำให้สารละลายมีความหนืด หรือเป็นสารให้ความเหนียว (Mucilaginous material) และนอกจากนี้ยังมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 13.3-26.9 ซึ่งโปรตีนจำพวกอัลบูมิน และไกลบูลิน ส่วนไขมันที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในเมล็ดมะขามเป็นกรดไขมันอิ่มตัวประมาณร้อยละ 65-75 ของไขมันทั้งหมด เป็นกรดไขมันที่มีลักษณะโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาวได้แก่ กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) และกรดโอเลอิก (Oleic acid)

ผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (Tamarind kernel powder, TKP)

ผงเนื้อในเมล็ดมะขามมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวนวล นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเส้นใยและอุตสาหกรรมสิ่งทอ และสามารถใช้แทนเพ็กตินในอุตสาหกรรมอาหาร ในการผลิตผงเนื้อในเมล็ดมะขามจะประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ การแยกเปลือกเมล็ดมะขามและการบดเนื้อในเมล็ดมะขาม ผงเนื้อเมล็ดมะขามสามารถเก็บในภาชนะที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น หรืออาจผสมด้วยไซเดียมไบซัลไฟด์ร้อยละ 0.5 ก่อนทำการบรรจุเพื่อป้องกันการย่อยสลายของเอนไซม์ ในการแยกไขมันออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามจะทำให้ความคงตัวของผงเนื้อเมล็ดมะขามในการเก็บรักษาดีขึ้น (Shankarachaya, 1998)

Johansson และ Kashemsanta, 1969 ศึกษาการผลิตผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดย นำเอาเปลือกเมล็ดมะขามออกโดยการนำเมล็ดมะขามมาขัดสีเบาๆ โดยอาจใช้การขัดกับพื้นที่หยาบๆ หรือถ้าทำในปริมาณมากอาจใช้บอลมิลล์ช่วย จากนั้นนำเมล็ดมะขามที่ผ่านการขัดสีไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วแช่เมล็ดมะขามที่ร้อนลงในสารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางทันที เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่สารละลายซัลไฟซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 แช่ทิ้งไว้จนเปลือกกรอบนอกพองออก นำมาล้างน้ำและใช้มือถูให้เปลือกหลุดออก ในอุตสาหกรรมอาจใช้เครื่องมือถูเปลือกที่คล้ายที่ปอกมันฝรั่ง นำเนื้อเมล็ดมะขามที่ได้ไปตากแดดให้แห้งหรือนำไปอบด้วยเตาอบ นำไปบดจะได้ผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

ผงเนื้อในเมล็ดมะขามสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนตามสมบัติการละลายน้ำและการเกิดเจล คือ (พวงเพ็ชร, 2521)

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่สามารถละลายน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และไม่มีคุณสมบัติในการเกิดเจล ส่วนนี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีนมีปริมาณร้อยละ 2-4

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่สามารถละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้องแต่ค่อนข้างช้า (ประมาณ 35 นาที) และไม่มีคุณสมบัติในการเกิดเจลได้ดี ในส่วนนี้จะมีส่วนประกอบเป็นพอลิแซคคาไรด์ประมาณร้อยละ 20-22

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่ไม่ละลายในน้ำเย็นแต่ละลายในน้ำเดือด มีคุณสมบัติในการเกิดเจล ส่วนนี้มีองค์ประกอบเป็นพอลิแซคคาไรด์ประมาณร้อยละ 30-34

ผงเนื้อในเมล็ดมะขามประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 16.95-20.12 ไขมันร้อยละ 6.03-7.39 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 46.82-48.39 เส้นใยร้อยละ 0.73-4.32 และเถ้าร้อยละ 2.45-3.28 โดยองค์ประกอบต่างๆจะมีปริมาณต่างกันในแต่ละการทดลอง เนื่องจากขึ้นอยู่กับฤดูกาล ดินฟ้าอากาศ และสภาพดินที่ปลูก (Somsiri, 1997) คาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบในผงเนื้อในเมล็ดมะขามเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ชนิดไม่มีประจุ ประกอบด้วย กลูโคส (D-Glucose) ไชโลส (D-Xylose), กาแลกโทส (D-Galactose) และ อราบิโนส (L-Arabinose) มีชื่อเฉพาะเรียกว่าเจลโลส (Jellose) มีสมบัติในการเกิดเจลและการทำให้สารละลายมีความเหนียวหนืด สามารถคงตัวในสารละลายที่มีพีเอชเป็นกรดและกลางได้ดี และมีสมบัติใกล้เคียงกับเพกติน (พวงเพ็ชร, 2521)

โปรตีนในผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเมล็ดมะขาม ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็น โดยสามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามความสามารถในการละลายในสารละลายต่างๆ โดย อัลบูมิน (Albumin) สามารถละลายในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7.0 โกลบูลิน (Globulin) สามารถละลายในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5 ที่พีเอช 7.0, โปรลามีน (Prolamine) สามารถละลายในสารละลายเอทานอลร้อยละ 70 ที่พีเอช 7.0 และกลูทีลีน (Glutelins) สามารถละลายในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.25 ที่พีเอช 10.0

โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเมล็ดมะขาม เป็นโปรตีนที่มีการจัดเรียงตัวของพันธะเปปไทด์มีลักษณะเป็นทรงกลม (Globular protein) ประกอบด้วยโปรตีน 4 ชนิด ได้แก่ อัลบูมิน เป็นโปรตีนที่ละลายน้ำและสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตไม่อิ่มตัว แต่ไม่ละลายในสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตอิ่มตัว โกลบูลิน เป็นโปรตีนที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม ที่ไม่ละลายน้ำ มีหลายชนิด โดยแบ่งตามขนาดของโมเลกุล แต่สามารถละลายในสารละลายเกลือเจือจาง การแยกโปรตีนชนิดนี้สามารถทำได้โดยการตกตะกอนด้วยเกลือแอมโมเนียมซัลเฟต โดยวิธีอิเล็กโตรโฟเรซิส และการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องอัลตราเซนตริฟิวเกชัน (Ultracentrifugation) ไพรลามีน เป็นโปรตีนที่พบมากในเมล็ดของธัญพืช มีองค์ประกอบของกรดอะมิโนไพรลามีนเป็นส่วนใหญ่ ไม่ละลายในน้ำ, สารละลายเกลือที่เป็นกลาง และเอทานอลบริสุทธิ์ แต่สามารถละลายในสารละลายกรดหรือด่างเจือจาง และสารละลายเอทานอลร้อยละ 70-80 กลูทีลิน เป็นโปรตีนที่พบมากในเมล็ดของธัญพืช เป็นโปรตีนที่ไม่สามารถละลายในน้ำ สารละลายเกลือเจือจาง และเอทานอล แต่ละลายได้ในสารละลายกรดและด่างเจือจาง (Smith A.D., 1997)

กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลักในโปรตีนในผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ได้แก่ ไลซีน (lysine) กรดกลูตามิก (Glutamic acid) กรดแอสพาทิก (Aspartic) ไกลซีน (Glycine) และลิวซีน (Leucine) แต่มีปริมาณกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่น้อยมาก (Sila และคณะ, 1994)

โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารชีวโมเลกุลที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ภายในโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน, ออกซิเจน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน และธาตุชนิดอื่นในปริมาณน้อยๆ เช่น ซัลเฟอร์ มีมวลโมเลกุลสัมพัทธ์ (Relative molecular mass) ประมาณตั้งแต่ 2,000-3,000 ถึง หลายล้าน โครงสร้างของโปรตีนประกอบด้วยหน่วยของกรดอะมิโนต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ และมีการจัดเรียงตัวตามรูปแบบต่างๆ โปรตีนสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามคุณสมบัติต่างๆ (มนตรี และคณะ, 2542) เช่น

1. คุณสมบัติในการละลาย ซึ่งเป็นวิธีการแยกโปรตีนที่ใช้กันดั้งเดิม โดยชื่อบางชื่อของโปรตีนที่แยกตามคุณสมบัติการละลายบางชนิดได้กลายเป็นชื่อที่ใช้เรียกโปรตีนกันทั่วไปเช่น โกลบูลิน เป็นโปรตีนที่ตกตะกอนในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นกึ่งอิ่มตัว และอัลบูมิน เป็นโปรตีนที่ตกตะกอนในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นอิ่มตัวเต็มที่

2. องค์ประกอบทางเคมี สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ โปรตีนพื้นฐาน (Simple protein) ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนเพียงอย่างเดียว และ คอนจูเกตโปรตีน (Conjugated protein) ซึ่งมีสารชนิดอื่นเป็นองค์ประกอบนอกเหนือจากกรดอะมิโน ได้แก่ ไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ไลโปโปรตีน (Lipoprotein) นิวคลีโอโปรตีน (Nucleoprotein) ฟอสโฟโปรตีน (Phosphoprotein) เมทัลโลโปรตีน (Metalloprotein) และโครโมโปรตีน (Chromoprotein) ซึ่งประกอบด้วย กรดอะมิโนรวมกับคาร์โบไฮเดรต ไขมัน กรดนิวคลีอิก ฟอสเฟต ไอออนของโลหะ และรงควัตถุ ตามลำดับ

3. หน้าที่ทางชีวภาพ สามารถจำแนกได้หลายชนิด เช่น เอ็นไซม์ (Enzyme) โปรตีนขนส่ง (Transport protein) โปรตีนสะสม (Storage Protein) โปรตีนโครงสร้าง (Structural protein) และโปรตีนควบคุม (Control protein) เป็นต้น

4. โครงสร้างของโปรตีน สามารถแบ่งโปรตีนออกเป็น 2 ชนิด คือ โปรตีนชนิดเส้นใย (Fibrous protein) จะมีโครงสร้างของสายเปปไทด์ที่เป็นเส้นยาว ไม่สามารถละลายน้ำ มักจะมีหน้าที่เป็นโปรตีนโครงสร้าง เพราะมีความแข็งแรง และความยืดหยุ่นสูง และโปรตีนชนิดก้อนกลม (Globular protein) จะมีโครงสร้างของสายเปปไทด์ที่พันกัน และอัดกันแน่น มักจะละลายน้ำได้ดี ส่วนมากทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินกระบวนการต่างๆ ของเซลล์

การแยกโปรตีน

การแยกโปรตีนจะอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของโปรตีนเป็นหลัก ซึ่งมีวิธีการแยกโปรตีนตามคุณสมบัติต่างๆคือ

1. คุณสมบัติทางประจุ โปรตีนจัดเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) คือ เป็นสารที่มีประจุเป็นจำนวนมาก คุณสมบัติของประจุของโปรตีนจะขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของกรดอะมิโนที่มีหมู่แตกตัวได้ โดยประจุสุทธิของโปรตีนต่างชนิดกันจะมีค่าต่างกัน ซึ่งสามารถแยกโดยอาศัยเทคนิค 2 ประเภทคือ อิเล็กโทรโฟเรซิส (Electrophoresis) และ โครมาโตกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange chromatography)

2. คุณสมบัติในการละลาย ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การละลายของโปรตีน ได้แก่ พีเอช โดยโปรตีนจะสามารถละลายได้น้อยที่สุดที่ค่าพีเอชของสารละลาย เท่ากับประจุสุทธิของโปรตีน สารละลายเกลือที่เป็นกลาง โดยเฉพาะเกลือที่มีไดวาเลนต์ ไอออน โดยการเกิดปรากฏ-

การถนอม Salting in โปรตีนจะสามารถละลายได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ การตกตะกอนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ การตกตะกอนโปรตีนด้วยแอนไอออนขนาดใหญ่ และการตกตะกอนโปรตีนด้วยแคปไอออนของโลหะหนัก

3. ขนาดของโมเลกุล ขนาดโมเลกุลของโปรตีนขึ้นกับน้ำหนักของโมเลกุล และรูปร่างของโปรตีน ความแตกต่างในขนาดของโมเลกุลของโปรตีนสามารถแยกโปรตีนชนิดต่างๆ ออกจากกันโดยเทคนิคของเจล ฟิเลเทรชัน เอสดีเอส-พอลิอะคริลาไมด์ เจล อิเล็กโตรโฟรีซิส (SDS-Polyacrylamide gel electrophoresis) และอัลตราเซนตริฟิวเกชัน (Ultracentrifugation)

Teraoka และคณะ, 1990 ศึกษากระบวนการแยกพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามพบว่าเมื่อแยกเปลือกเมล็ดมะขามออก จะได้เนื้อในเมล็ดมะขามมีสีขาวนวล ซึ่งประกอบด้วยอัลบูเมน (Albumen) โดยพอลิแซคคาไรด์หรือเจลโลสจะอยู่ในอัลบูเมนซึ่งอยู่ในเซลล์ และมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน แต่ละเซลล์จะมีขนาดประมาณ 40-80 ไมครอน ภายในเซลล์ประกอบด้วยอนุภาคของโปรตีนที่มีขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-2 ไมครอน คิดเป็นปริมาณร้อยละ 15-24 ของน้ำหนักเซลล์ทั้งหมด ในกระบวนการแยกพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามจะต้องทำการบดเมล็ดมะขามให้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งจะทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย และทำให้สามารถแยกอนุภาคของโปรตีนที่มีขนาดเล็กออกจากเซลล์ จากการศึกษาพบว่าอนุภาคของโปรตีนจะสามารถแยกออกได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเมล็ดมะขามถูกบดให้มีขนาดเล็กกว่า 80 ไมครอน และมีวิธีการแยกอนุภาคของโปรตีนอย่างเหมาะสม

ไขมันในผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

จากการศึกษาไขมันที่เป็นองค์ประกอบในผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีแก๊ส-ของเหลว (Gas-Liquid Chromatography) พบว่าไขมันในผงเนื้อในเมล็ดมะขามประกอบด้วยกรดไขมัน 15 ตัว โดยกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) ร้อยละ 14-20 กรดสเตียริก (Stearic acid) ร้อยละ 6-7, กรดโอเลอิก (Oleic acid) ร้อยละ 15-27 กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) ร้อยละ 36-49 กรดอะราซิดิก (Arachidic acid) ร้อยละ 2-4 กรดเบเฮนิก (Behenic acid) ร้อยละ 3-5 กรดลิกโนเซอริก (Lignoceric acid) ร้อยละ 3-8 และมีสเตอรอล (Sterol) เป็นองค์ประกอบ 7 ชนิด สเตอรอลที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ บีตา-ไซโตสเตอรอล (β -Sitosterol) ร้อยละ 66-72 คอมเพสเตอรอล (Compesterol) ร้อยละ 16-19 และสติกมาสเตอรอล (Stigmasterol) ร้อยละ 11-14 การสกัดไขมันออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามจะ

ทำให้สมบัติของผงเนื้อในเมล็ดมะขามดีขึ้นโดยจะทำให้มีพอลิแซคคาไรด์ปริมาณสูงขึ้น ลักษณะของผงเนื้อในเมล็ดมะขามจะมีสีขาว ไม่มีกลิ่นหืนและสามารถยืดอายุการเก็บรักษา

นอกจากนี้ในผงเนื้อในเมล็ดมะขามยังประกอบด้วยสารต้านทานสารอาหาร (Antinutrition factor) ซึ่งได้แก่ แทนนิน (Tannin) กรดไฟติก (Phytic acid) ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogencyanide) ตัวยับยั้งกิจกรรมของทริปซิน (Trypsin inhibitor activity) และ ไฟโตเฮแมกกลูทีเนตติง แอกติวิตี (Phytohemagglutinating activity) ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Shankarachaya, 1998)

พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม (Tamarind seed polysaccharide)

พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม หรือกัมจากเมล็ดมะขาม มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด เมื่อกระจายตัวในน้ำจะได้ของไหลที่มีความหนืดสูง และมีความโปร่งแสง จัดอยู่ในพอลิแซคคาไรด์จำพวกไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม มีสมบัติการเกิดเจลเหมือนกับเพกตินจากผลไม้ พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามไม่เป็นสารจำพวกสารให้ความหนืดจากพืชโดยทั่วไป (Mucilage) เนื่องจากสารให้ความหนืดจากพืชโดยทั่วไป เป็นสารจำพวกพอลิยูโรไนด์ (Polyuronide) คุณสมบัติความเป็นกรดของสารจำพวกนี้ขึ้นกับปริมาณของกรดยูโรนิกที่เป็นองค์ประกอบ โดยสารจำพวกนี้จะไม่มีไฮไลสเป็นองค์ประกอบ พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง มีไฮไลสเป็นองค์ประกอบ สามารถเกิดเจลในสารละลายน้ำตาลเข้มข้นในช่วงพีเอชกว้าง โดยมีสมบัติเฉพาะตัวคือมีความสามารถในการเกิดเจลและคงตัวได้ในช่วงพีเอชที่เป็นกลางและกรด พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เจลโลส (Jellose) และมีชื่อเรียกอีกชื่ออื่นๆว่า พอลิโอส (Polyose) ทิเคโนส (Tikernose) และ แทมมารินด์ส อะมิลอยด์ (Tamarindus amyloid) ในประเทศอินเดียมีการนำพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น การผลิตไหมเทียม การพิมพ์ผ้าฝ้าย และการผลิตเส้นใยต่างๆ เป็นต้น และมีการนำไปใช้แทนเพกตินในการผลิตแยม และเยลลี่ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเภสัชกรรมเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ และสารช่วยในการผสม (Shankarachaya, 1998)

พอลิแซคคาไรด์

พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) คือ สารชีวโมเลกุลจำพวกคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจำนวน 10 โมเลกุลหรือมากกว่า เรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) มีน้ำหนักโมเลกุลอย่างน้อยหนึ่งล้านดาลตัน (Gerald O., 1985)

พอลิแซคคาไรด์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้าง คือ

1. โฮโมพอลิแซคคาไรด์ (Homopolysaccharide) คือ พอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเพียงหนึ่งชนิดเรียงต่อกัน เช่น กลูแคน (Glucan) คือสารพอลิเมอร์ของกลูโคส, กาแลกแตน (Galactan) คือสารพอลิเมอร์ของแกแลกโตส เป็นต้น

2. เฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharide) คือพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอย่างน้อย 2 ชนิดมาเรียงต่อกัน เช่น ไชโลกลูแคน (Xyloglucan), กาแลกโตแมนแนน (Galactomannan) คาราจีแนน (Carageenan) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทพอลิแซคคาไรด์ตามรูปร่างของโมเลกุล หรือสภาพของประจุไฟฟ้าได้ด้วย

โครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์

พอลิแซคคาไรด์เกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก พันธะไกลโคซิดิกเป็นพันธะโคเวเลนต์ชนิดหนึ่ง เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ระหว่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุล โดยเกิดจากอะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนตำแหน่งใด ๆ ของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอีกโมเลกุลหนึ่ง ซึ่งผลจากการรวมตัวของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุลจะได้โมเลกุลของน้ำออกมา 1 โมเลกุล พันธะไกลโคซิดิกอาจเกิดได้หลายรูปแบบเช่น α (1 \rightarrow 4) β (1 \rightarrow 6) เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดวางโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวตัวที่ 1 (แอลฟา ไอโซเมอร์ หรือบีต้า ไอโซเมอร์) และตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวตัวที่ 2 ที่มาต่อกัน

ลักษณะของพันธะไกลโคซิดิกที่ต่างกันจะทำให้โครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์มีลักษณะต่างๆกัน โดยสามารถแบ่งโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์เป็น 3 ชนิด คือ

1. พอลิแซคคาไรด์เส้นตรงเส้นเดียว (Linear polysaccharide with single chain) พอลิแซคคาไรด์จำพวกนี้ได้แก่ คาราจีแนน (Carageenan) อัลจีเนท (Alginate) เป็นต้น

2. พอลิแซคคาไรด์เส้นตรงที่มีการแทนที่ (Substitute linear polysaccharide) พอลิแซคคาไรด์จำพวกนี้ได้แก่ กาแลกโตแมนแนน (Galactomannan) แซนแทน กัม (Xanthan gum) เป็นต้น

3. พอลิแซคคาไรด์โซ่กิ่ง (Branched polysaccharide) พอลิแซคคาไรด์จำพวกนี้ได้แก่ แป้ง (Starch) กัมอะราบิก (Gum arabic) เป็นต้น

กัม

กัม (Gum) หรือไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) คือ สารพอลิแซคคาไรด์ที่มีความสามารถกระจายตัวในน้ำร้อนหรือน้ำเย็น และทำให้สารละลายที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด กัมแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกันออกไปตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล และองค์ประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในโมเลกุล (ทนนง, 2534)

คุณสมบัติของกัม

กัมมีสมบัติเป็นสารให้ความหนืด (Thickener) เป็นสารรักษาความคงตัว (Stabilizer) เป็นสารช่วยให้น้ำกับน้ำมันเข้ากันได้ดี (Emulsifier) เป็นสารช่วยในการจับน้ำ (Water binder) และช่วยทำให้สารแขวนลอยได้ดีอีกด้วย

กัมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามแหล่งที่มา ได้แก่

1. กัมจากธรรมชาติ ได้แก่

1.1 กัมจากพืชชั้นสูง (Higher plant) แบ่งออกเป็น

1.1.1 กัมจากต้นไม้ (Tree excavate or extract) ได้แก่ กัมอะราบิก (Gum arabic) ได้จากยางของต้นไม้ เพคติน (Pectin) เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช และโครงสร้างที่แข็งแรงและเหนียวในพืช เช่นเปลือกของผล

1.1.2 กัมจากเมล็ดหรือรากต้นไม้ (Seed or roots gum) ได้แก่ โลคัส-บีน กัม (Locust bean gum) กัวกัม (Guar gum) กัมเมล็ดมะขาม (Tamarind seed gum) ได้จากเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) ในเมล็ดของพืช

1.2 กัมจากสาหร่ายทะเล (Seaweed extract) ได้แก่ วุ้น (Agar) อัลจีเนท (Algenate) และคาราจีแนน (Carageenan) เป็นต้น

1.3 กัมจากจุลินทรีย์ ได้แก่ แซนแทน กัม (Xanthan gum) เป็นสารเมตาโบไลต์ในเซลล์ของแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* ช่วยในการรักษาระดับความชื้นของเซลล์ และช่วยให้เซลล์ยึดติดกับตัวพองได้

2. กัมที่มีลักษณะกึ่งสังเคราะห์ ได้แก่ ไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl cellulose)

3. กัมจากการสังเคราะห์ ได้แก่ พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinyl pyrrolidone)

การใช้ประโยชน์ของกัมในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีการใช้กัมในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเส้นใย อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และด้านเภสัชกรรม เป็นต้น ตัวอย่างการใช้กัมในอุตสาหกรรม ได้แก่ Adhesive in icing Binding agent Bulking agent Clarifying agent Clouds Coating agent Crystallization inhibitor Emulsifier Encapsulating agent Film former Flocculating agent Foam stabilizer Gelling agent Mold releasing agent Stabilizers Thickening agent Whipping agent Adsorption agent Absorption agent Texturizers Block oil desorption Accelerator of water adsorption Gloss formation

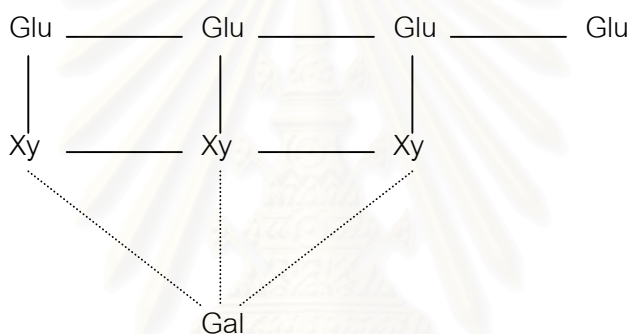
หลักในการเลือกใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ หรือกัม

1. ความสามารถในการละลาย การกระจายตัว และผลของอุณหภูมิ พีเอช ที่มีต่อสารละลาย
2. สภาวะการไหล เช่น การเพิ่มความหนืด การเกิดเจล ผลของอุณหภูมิ ความเข้มข้น พีเอช ระยะเวลาในการเกิดเจล และลักษณะของเจลที่เกิดขึ้น
3. สมบัติการเป็นสารอิมัลชันและการรักษาความคงตัวของผลิตภัณฑ์
4. ความสามารถในการเข้ากันได้กับสารประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน เกลือแร่ และ เกลือของสารต่างๆ
5. ความคงตัวต่อพีเอช อุณหภูมิ และแรงกระชากหรือแรงปั่นที่อาจเกิดขึ้น
6. ความสามารถในการใช้ร่วมกับกัมชนิดอื่นๆ
7. ต้องไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่น รส เปลี่ยนไป
8. ต้องไม่เสื่อมเสียง่ายโดยจุลินทรีย์
9. ต้องเป็นที่ยอมรับของทุกประเทศ
10. มีราคาถูก

องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม

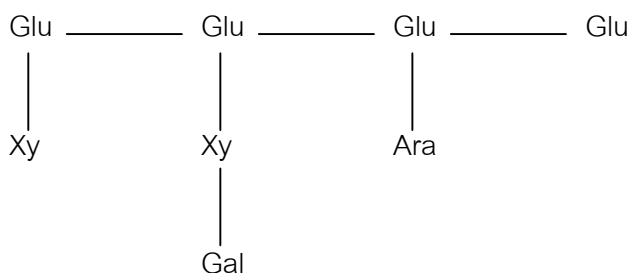
การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การย่อยด้วยเอนไซม์ (Enzyme hydrolysis) การย่อยด้วยกรด (Acid hydrolysis) อะเซโตไลซิส (Acetolysis) เมทิลเลชัน (Methylation) และเพอริออดेट ออกซิเดชัน (Periodate oxidation) (Somsiri, 1997)

Kooiman, 1961 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม พบว่ามีกลูโคส (D-glucose) กาแลกโทส (D-Galactose) และไซโลส (D-Xylose) เป็นองค์ประกอบ ในอัตราส่วน 4:2.99:1.33 โดยโมล และมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม
(Kooiman, 1961)

Savur, 1956, Srivastava และ Singh, 1967 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของพอลิแซคคาไรด์โดยการย่อยด้วยกรด เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริกพบว่า สารละลายที่ได้จากการย่อยประกอบด้วย กลูโคส ไซโลส กาแลกโทส และอะราบิโนส ในอัตราส่วน 8:2:4:1 โดยโมล โดยมีโครงสร้างโมเลกุลคือ



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม
(Savur, 1956, Srivastava และ Singh, 1967)

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม

ในการหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามจะใช้วิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ โดยวิธีทางเคมีจะใช้การทำปฏิกิริยากับกลุ่มรีดิวซ์ตัวสุดท้าย เช่น การเกิดปฏิกิริยามะทิลเลชัน การเกิดปฏิกิริยาเพอริออกเดท ออกซิเดชัน ส่วนวิธีทางกายภาพจะใช้การวัดความดันออสโมติก วัดความหนืด วัดการกระจายตัวของแสง และการตกตะกอน ตัวอย่างน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามที่วัดโดยวิธีต่างๆ ได้แก่ วัดโดยใช้วิธีการวัดความหนืดได้น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 52,350 (Das และคณะ, 1950) วัดโดยใช้การวัดความดันออสโมติกจะได้น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 54,600 (Deguchi และ Shiba, 1966) และเมื่อทำการวัดโดยการเกิดปฏิกิริยาไดโนโตรซาลิซิลิกจะได้น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 115,000 (Glickman, 1969)

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามเมื่อกระจายตัวในน้ำ
(Suttananta, 1986)

1. ความเข้มข้น

พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามจะมีสมบัติเป็นของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian fluid) ที่ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 1.75 เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนืดสัมพัทธ์ของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามกับกัมชนิดอื่นๆ พบว่า พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามจะมีความหนืดสูงกว่าไซเตียมอัลจิงเนท เพ็กติน (เกรด 150) และกัมอะคาเซีย (Acacia) ที่ความเข้มข้นเท่ากัน แต่จะมีความหนืดต่ำกว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose)

2. อุณหภูมิ

ความหนืดของพอลิแซคคาไรด์จะมีค่าลดลงเป็นฟังก์ชันเอกโปเนนเชียลกับอุณหภูมิ ซึ่ง
เป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) คือ

$$\mu = Ae^{E/RT} \quad 2.1$$

เมื่อ μ คือความหนืดของสารละลาย A คือค่าคงที่ของอาร์เรเนียส E คือค่าพลังงาน
กระตุ้น R คือค่าคงที่ของก๊าซ และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

3. ความเป็นกรด-ด่าง

ความหนืดของพอลิแซคคาไรด์จะสูงสุดที่ภาวะความเป็นกรด-ด่างในช่วง 3-3.2 และไม่
คงตัวในภาวะเป็นเบส โดยเฉพาะที่ค่าพีเอชมากกว่า 8

4. ผลของสารอื่น

จากการศึกษาความสามารถในการผสมผสานระหว่างพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม
กับตัวทำละลายที่ใช้ในงานเภสัชกรรม พบว่า พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามสามารถผสม
ผสานกับ ซอร์บิทอล (Sorbitol) ไชรัป ยูเอสบี (Syrup USB) ได้เป็นอย่างดี แต่ไม่สามารถผสม
ผสานกับ แอลกอฮอล์ กลีเซอรอล

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม

การผลิตเจลไลสจากผงมะขาม สามารถแบ่งกระบวนการผลิตเป็น 2 กระบวนการ คือ

1. กระบวนการสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous process)

กระบวนการสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นกระบวนการที่ใช้หลักการแยกเฉพาะ
โปรตีนหรือพอลิแซคคาไรด์ออกจากเนื้อในเมล็ดมะขาม โดยใช้น้ำ หรือน้ำร่วมกับตัวทำละลาย
อินทรีย์

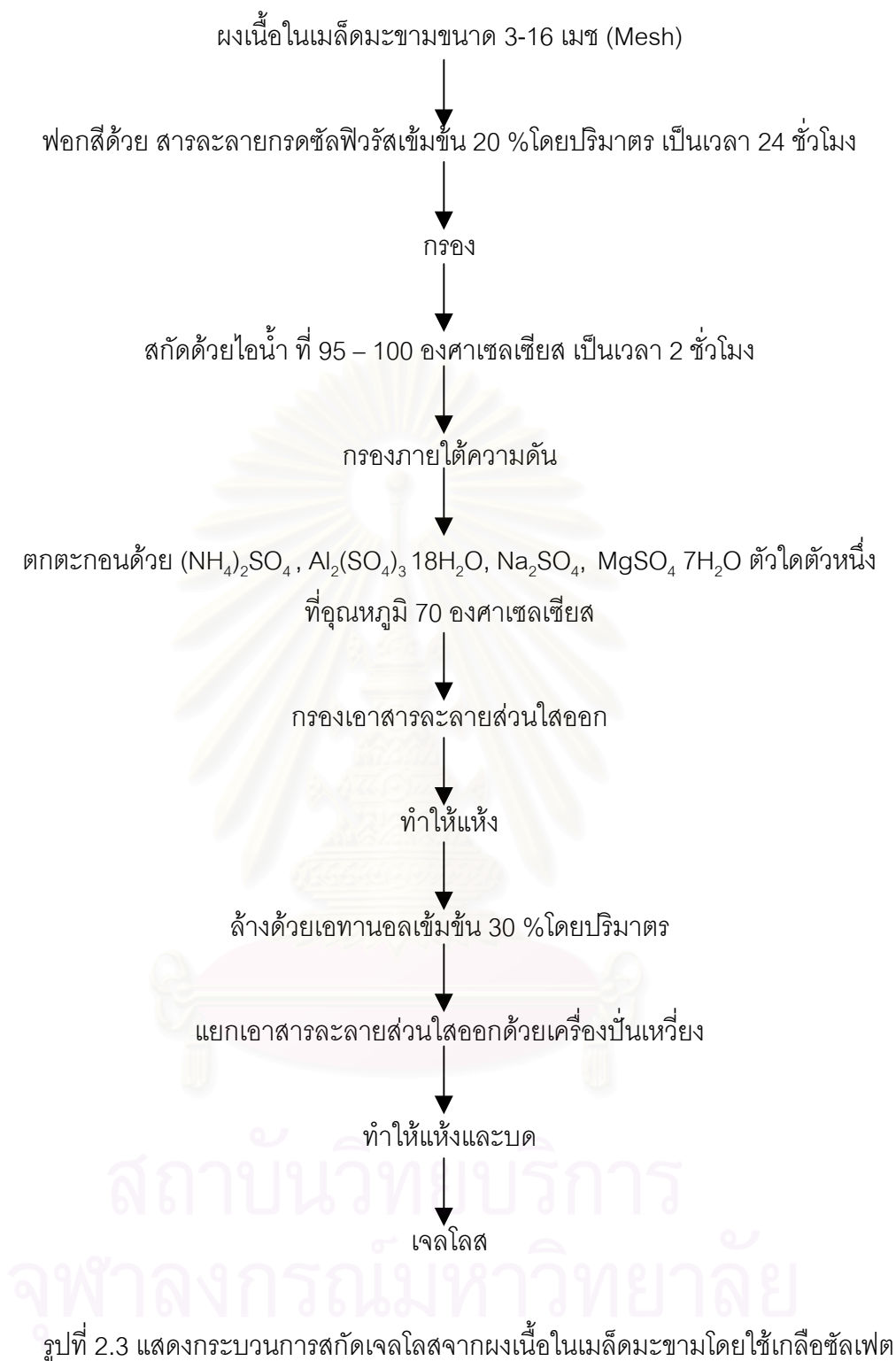
ตัวอย่างงานวิจัยของกระบวนการสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous process)

Deguchi และ Shiba, 1966 ศึกษากระบวนการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขาม โดยใช้เกลือซัลเฟต ใช้ผงเนื้อในเมล็ดมะขามปริมาณ 4.3 กิโลกรัม ละลายในสารละลายกรดซัลฟิวริก 20 ลิตร เพื่อทำการฟอกสี ใช้น้ำปริมาตร 100 ลิตร ทำการสกัดคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ต้องการออก เมื่อทำการกรองเอาสารที่ไม่ต้องการออกแล้วจะได้สารละลาย 100 กิโลกรัม จากนั้นใช้เกลือต่างๆ ตกตะกอนเจลโลส โดยอาศัยหลักการ Salting out หลังจากตกตะกอนแล้วทำการล้างเจลโลสที่ได้ด้วยเอทานอลเพื่อละลายเกลือซัลเฟตออก ดังกระบวนการผลิตในรูปที่ 2.3 ในการศึกษาการสกัดเจลโลสจะใช้สารเคมีในปริมาณที่ต่างกัน ทำให้ได้ปริมาณเจลโลสต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะได้เจลโลสประมาณร้อยละ 40

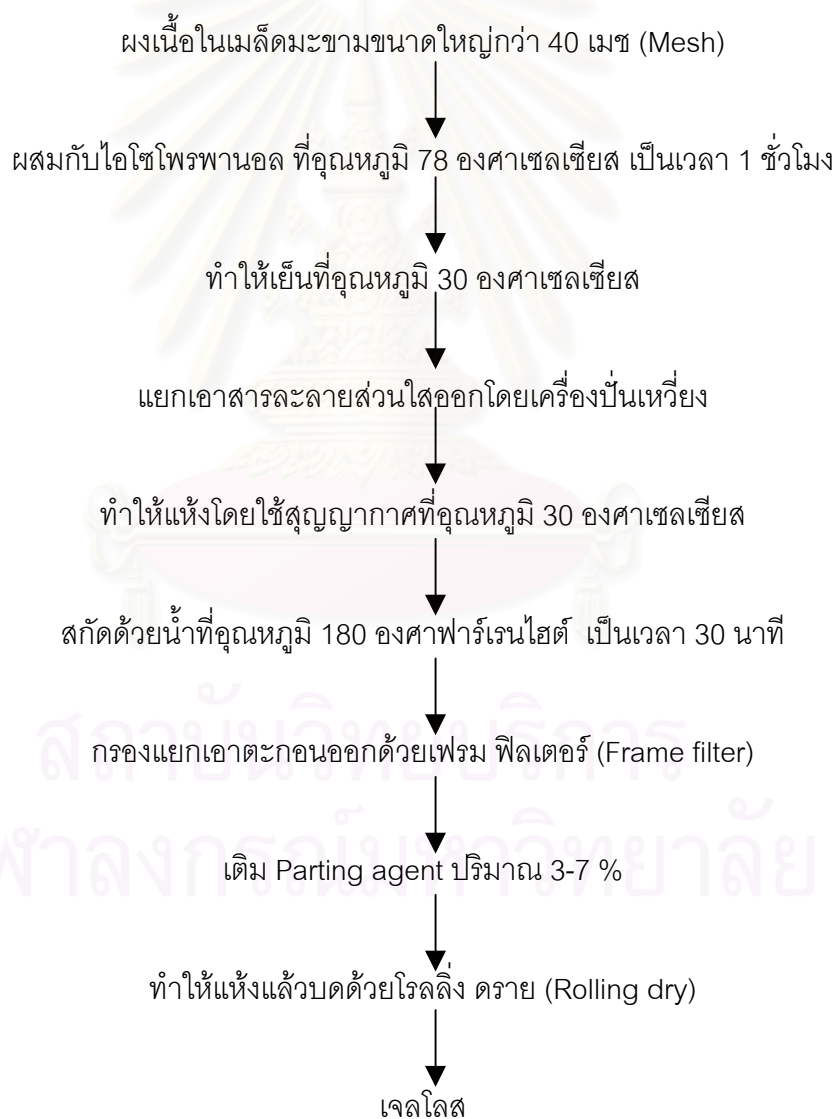
ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารเคมีต่างๆ (เกลือซัลเฟต, เอทานอล) ที่ใช้ในการสกัดเจลโลส กับปริมาณเจลโลสที่สกัดได้

ปริมาณเกลือที่ใช้ตกตะกอน	ปริมาตรเอทานอล (ลิตร)	ปริมาณเจลโลสที่สกัดได้ (กิโลกรัม)
(NH ₄) ₂ SO ₄ 50 กิโลกรัม	10	1.7
Al ₂ (SO ₄) ₃ 18H ₂ O 50 กิโลกรัม	20	1.6
Na ₂ SO ₄ 25 กิโลกรัม	28	1.7
MgSO ₄ 7H ₂ O 60 กิโลกรัม	20	1.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

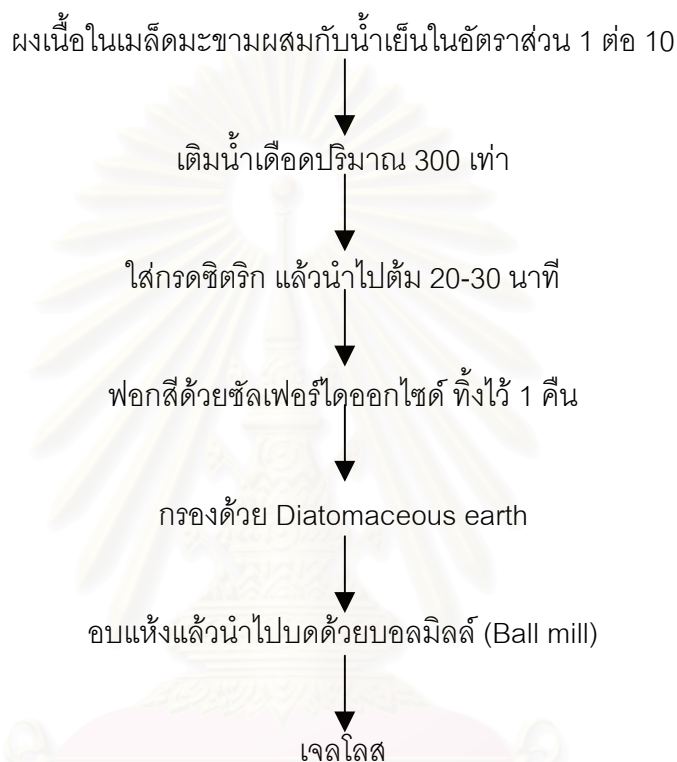


Gordon, 1968 ทำการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ โดยมีขั้นตอนการสกัด 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.4 คือ สกัดด้วยไอโซโพรพานอล และสกัดด้วยน้ำ โดยนำผงเนื้อในเมล็ดมะขามปริมาณ 500 ปอนด์ ผสมกับไอโซโพรพานอล 600 แกลลอน เพื่อแยกเอาโปรตีนและไขมันออก แยกสารละลายส่วนใสออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ทำให้แห้งแล้วนำไปสกัดด้วยน้ำเพื่อแยกคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ต้องการออก กรองแล้วนำสารละลายส่วนใสมาเติม Parting agent ทำให้แห้งนำไปอบ ได้เจลโลสปริมาณ 130 ปอนด์ คิดเป็นร้อยละ 26 ของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม สาร Parting agent คือ สารที่ช่วยให้ทำการอบได้ง่ายขึ้น โดยจะไปรวมกับเจลโลส ได้แก่ เลซิทีน (Lecitin) เลซิทีน ผสมกับ กลีเซอรอลโมโนสเตียเรท (Glycerol monostearate) หรือ พอลิซอร์บิแทน (Polysorbitan) อัตราส่วน 1 ต่อ 1 หรือ 1 ต่อ 5



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้แอลกอฮอล์

Rao, 1959 ศึกษาการสกัดเจลโลสในปริมาณมากโดยใช้สารเคมีปริมาณน้อย คือ ไส้กรดซिटริกลงไปเล็กน้อย เพื่อระงับการเกิดปฏิกิริยาของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่เติมในกระบวนการเพื่อทำการฟอกสี เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำให้สมบัติการเกิดเจลของเจลโลสเสียไป โดยในกระบวนการจะทำการแยกโปรตีนและเส้นใยออกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ดังในรูปที่ 2.5 วิธีนี้สามารถสกัดเจลโลสได้ประมาณร้อยละ 50 ของผงเนื้อในเมล็ดมะขามทั้งหมด



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามในปริมาณมาก

พวงเพ็ชร, 2521 ศึกษาการสกัดเจลโลสโดยการใช้เอนไซม์ในกลุ่มโปรติโอไลติก (Proteolytic enzyme) แยกโปรตีนในผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ซึ่งเป็นวิธีการสกัดที่ประยุกต์มาจากกระบวนการสกัดของ Deguchi และ Gordon ที่ใช้แอลกอฮอล์ในการตกตะกอนเจลโลส และการสกัดเจลโลสของ Lawrence ที่ใช้เอนไซม์ช่วยในการสกัดเจลโลส โดยมีกระบวนการสกัดดังรูปที่ 2.6

ทำการสกัดเจลโลสโดยใช้ผงเนื้อในเมล็ดมะขามขนาด 40 เมช ใช้เอนไซม์ไดแอสเทส (Diastase) ความเข้มข้น 0.3 % ซึ่งเอนไซม์ไดแอสเทสสามารถย่อยแป้งให้มีขนาดเล็กลง ทำให้เจลโลสซึ่งติดอยู่กับโมเลกุลแป้งหลุดออกมาได้ง่ายขึ้น แต่เจลโลสไม่สามารถถูกย่อยโดยเอนไซม์ไดแอสเทส ทำให้สามารถสกัดเจลโลสได้มากขึ้น และมีความบริสุทธิ์มากขึ้น จากนั้นเติมกรด

ไฮโดรคลอริกเข้มข้นเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ มีการทดลองใช้เอนไซม์ปาเปน เพื่อย่อยโปรตีนให้มีโมเลกุลเล็กลง พบว่าทำให้ได้ปริมาณเจลโลสที่สกัดได้สูง แต่มีความบริสุทธิ์ต่ำ เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่มากในผงเนื้อในเมล็ดมะขามไม่ถูกย่อยสลายเลย ทำให้สารละลายไม่สามารถเข้าไปตกตะกอนเจลโลสออกมาได้ ส่วนสารละลายแอลกอฮอล์ที่ใช้จะไปละลายคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่เจลโลส และตกตะกอนเจลโลส ในการตกตะกอนเจลโลสจะใช้เอทานอล 95% ในการตกตะกอนครั้งแรก ปริมาณที่เหมาะสมคือ 1.5 เท่าของสารละลายที่สกัดได้ ถ้าใช้ปริมาณ 1 เท่าจะสกัดได้น้อยกว่าเกือบครึ่งหนึ่ง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 2 เท่า ไม่สามารถสกัดเจลโลสได้เพิ่มขึ้นจากการใช้แอลกอฮอล์ 1.5 เท่า รวมทั้งมีการใช้แอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 70 ในการสกัดอีก 2 ครั้ง ทำให้ได้เจลโลสที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น วิธีนี้สามารถสกัดเจลโลสได้ประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

Shankaracharya, 1998 ทำการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขาม โดยใช้ น้ำปริมาตรเท่ากับ 30–40 เท่าของน้ำหนักของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ใช้ในการสกัด เติมกรดซิตริกหรือกรดทาร์ทาริกเข้มข้น 0.2 ลงในสารละลายผงเนื้อในเมล็ดมะขาม กวนอย่างสม่ำเสมอและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20–30 นาที วางทิ้งไว้เพื่อตกตะกอนเป็นเวลา 1 คืน แยกเอาสารละลายส่วนใสไปทำให้เข้มข้นด้วยสูญญากาศ กรองสารละลายเจลโลสเข้มข้นที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบกดอัด นำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดดรัม แล้วบดละเอียดด้วยบอลลมิลล์ เจลโลสที่ได้สามารถกระจายตัวได้ง่ายในน้ำเย็น มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดที่มีความเข้มข้นต่ำ

Veluraja และคณะ, 1997 ศึกษาการเตรียมกัมจากเมล็ดมะขาม และนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมวัสดุผสมร่วมกับเส้นใยไซซอล โดยละลายผงเนื้อในเมล็ดมะขามความเข้มข้นร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในน้ำกลั่น ซึ่งผงเนื้อในเมล็ดมะขามไม่สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นในระหว่างการผสมจึงให้ความร้อนอุณหภูมิ 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยระวังไม่ให้เกิดชั้นฟิล์มบริเวณผิวหน้าของสารละลาย กรองสารละลายขณะร้อนด้วยใยแก้วเพื่อแยกส่วนที่ไม่ละลายออก ซึ่งมีประมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักแห้ง วิธีนี้จะได้ปริมาณเจลโลสประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำกัมจากเมล็ดมะขามที่สกัดได้มาใช้ในการเตรียมวัสดุผสมร่วมกับเส้นใยไซซอล โดยนำเส้นใยไซซอลที่ได้จากใบของ *Agave sisalana* perr. ที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร ปริมาณ 10 กรัม กระจายบนถาดพลาสติก รูปสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร จากนั้นนำสารละลายเจลโลสที่สกัดได้ความเข้มข้นร้อยละ 3 เทลงในถาด ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกับเส้นใยไซซอล ทำให้แห้งโดยใช้

แสงอาทิตย์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้วัสดุผสมที่มีคุณสมบัติที่สามารถทนแรงดึงได้ มีค่าการนำความร้อนต่ำ และมีน้ำหนักเบา จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นหลังคา หรือเพดานในห้องที่ใช้เครื่องปรับอากาศ และแผ่นกันแบ่งห้อง



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการสกัดเจลโกลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เอนไซม์และแอลกอฮอล์

Niemann, 1997 ศึกษาอะราบินอสที่เป็นองค์ประกอบในโอลิโกแซคคาไรด์จากไซโลกลูแคนจากมะขาม โดยทำการสกัดเจลโลสจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ปราศจากไขมัน เริ่มต้นจากการกระจายผงเนื้อในเมล็ดมะขามในน้ำที่ปราศจากไอออนอย่างทั่วถึง จากนั้นตกตะกอน 3 ครั้ง เพื่อแยกสิ่งเจือปนออก นำสารละลายส่วนใสแยกโปรตีนออกโดยผ่านในคอลัมภ์แลกเปลี่ยนประจุชนิดกรดแก่ แล้วผ่านสารละลายที่ได้ต่อไปยังคอลัมภ์แลกเปลี่ยนประจุชนิดประจุบวกอ่อน ทำการชะสารละลายไซโลกลูแคนที่ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำให้แห้งด้วยเครื่องไลโอไฟไลซ์ วิธีนี้จะสามารถสกัดสารละลายไซโลกลูแคนได้ผลได้ร้อยละ 60 ของวัตถุดิบเริ่มต้น

Sanford, 1984 ศึกษาการทำผงเนื้อในเมล็ดมะขามให้บริสุทธิ์ โดยผสมผงเนื้อในเมล็ดมะขามกับสารละลายต่างแก่เข้มข้นร้อยละ 50 ที่พีเอช 13 กวนเพื่อให้ผงเนื้อในเมล็ดมะขามกระจายตัวอย่างสมบูรณ์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการเจือจางสารละลายด้วยน้ำปริมาตรเท่ากับ 5 เท่าของปริมาตรของสารละลาย และกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำสารละลายให้เป็นกลางโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ทำการตกตะกอนเจลโลสด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) ร้อยละ 99 ปริมาตรเท่ากับ 3 เท่าของสารละลาย นำตะกอนเจลโลสที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปบดละเอียด ได้พอลิแซคคาไรด์ของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่สามารถละลายน้ำได้ดี มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 2-10 และสารละลายมีความเข้มข้นร้อยละ 0.25 มีความโปร่งแสงประมาณร้อยละ 70-80 ที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร

2. กระบวนการที่ไม่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Non-aqueous process)

กระบวนการที่ไม่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเป็นกระบวนการที่ใช้ความแตกต่างของความหนาแน่นของสารที่เป็นองค์ประกอบในผงเนื้อในเมล็ดมะขามในการแยกองค์ประกอบแต่ละชนิดออกจากกันในตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ การกรอง การแยกด้วยแรงหมุนเหวี่ยง เช่น แอร์ คลาสซิฟิเคชัน (Air classification) ดำเนินการในสถานะก๊าซ เซนตริฟิว ไฮโดรไซโคลอน ดำเนินการในสถานะของเหลว

ตัวอย่างงานวิจัยของกระบวนการสารละลายที่ไม่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Non-aqueous process)

Jones และคณะ, 1978 ศึกษาการทำให้พอลิแซคคาไรด์จากผงเนื้อในเมล็ดมะขามให้บริสุทธิ์โดยใช้เครื่องแอร์ คลาสซิฟิเคชัน (Air classification) โดยแบ่งกระบวนการเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การสกัดไขมันออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ คือ เอทิลีนไดคลอไรด์ (Ethylene dichloride) เฮปเทน (Heptane) และโทลูอีน (Toluene) โดยนำผงเนื้อในเมล็ดมะขามละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ในเวลาที่เหมาะสม ทำการแยกผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ปราศจากไขมันออกโดยการกรองหรือการปั่นเหวี่ยง แล้วทำให้แห้ง จะได้ผงเนื้อในเมล็ดมะขามปราศจากไขมัน (Deoiled Tamarind seed powder)

2. การบดผงเนื้อในเมล็ดมะขามปราศจากไขมัน ในการบดจะใช้เครื่องแฮมเมอร์มิลล์ หรือพิน มิลล์ เพื่อให้มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 ไมครอน จะได้การกระจายขนาดของอนุภาคหลังบดคือ ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมครอนจะมีปริมาณ ร้อยละ 15-30 ขนาดอนุภาคระหว่าง 10-20 ไมครอนมีปริมาณร้อยละ 10-20 ขนาดอนุภาคระหว่าง 60-80 ไมครอนจะมีปริมาณร้อยละ 15-20

3. การแยกขนาดผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องแอร์ คลาสซิฟิเคชัน โดยเติมผงซิลิกาจำพวก Hisil หรือ Cab-o-sil ซึ่งสารจำพวกนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ทำให้การแยกองค์ประกอบด้วยแอร์ คลาสซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการแยกด้วยเครื่องแอร์ คลาสซิฟิเคชัน สามารถแยกองค์ประกอบของผงเนื้อในเมล็ดมะขามออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 คือ ส่วนที่มีขนาดเล็กละเอียด ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 10-20 อนุภาคส่วนนี้จะมียังมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีน ส่วนที่ 2 คือ ส่วนที่มีขนาดหยาบ ซึ่งจะถูกแยกออกมาโดยใช้ความเร็วของอากาศต่ำๆ ซึ่งส่วนนี้จะมีปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักทั้งหมด ถ้ามีปริมาณมากกว่าร้อยละ 20 จะทำการบดกลับเพื่อแยกอีกครั้ง โดยอนุภาคที่แยกได้ในส่วนนี้จะมียังมีองค์ประกอบเป็นโปรตีนและสิ่งเจือปนอื่นๆต่ำ ส่วนที่ 3 คือ ส่วนที่เป็นอนุภาคของสิ่งเจือปนขนาดใหญ่ พอลิแซคคาไรด์จากผงเนื้อในเมล็ดมะขามจะถูกแยกออกมาในส่วนที่ 2 ซึ่งมีพอลิแซคคาไรด์จากผงเนื้อในเมล็ดมะขามเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 60-80 ของอนุภาคที่สามารถแยกได้จากแอร์ คลาสซิฟิเคชัน

Teraoka และคณะ, 1990 ศึกษาการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามโดยใช้ไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกทำการบดเมล็ดมะขามให้มีขนาดที่เหมาะสมต่อการแยกสิ่งเจือปนต่างๆออก โดยทำการบดให้มีขนาดของอนุภาคให้อยู่ในช่วง 5-80 ไมโครเมตร ขั้นตอนที่สอง นำผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ได้จากการบดมากระจายตัวในตัวทำละลายอินทรีย์ที่สามารถเข้ากันได้ดีกับน้ำเช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล ไอโซโพรพานอล และอะซิโตน ในปริมาณร้อยละ 5-60 โดยน้ำหนัก พบว่าถ้าใช้สารละลายตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อนุภาคพอลิแซคคาไรด์จะบวมทำให้ไขมันไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ และถ้าใช้สารละลายตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาณมากกว่าร้อยละ 60 จะทำให้องค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ และจะทำให้โมเลกุลของโปรตีนเหนียวติดกันหรือติดกับอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ ขั้นตอนที่สามจะทำการปั่นสารผสมเข้าไปในไฮโดรไซโคลนจำนวนทั้งหมด 36 ตัว พบว่าอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์จะถูกแยกออกมาในส่วนของไฮโดรไซโคลน ในขณะที่อนุภาคของสิ่งเจือปนอื่นๆจะถูกแยกออกไปทางส่วนบนของไฮโดรไซโคลน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณพอลิแซคคาไรด์ประมาณร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าร้อยละ 3 และไขมันน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

วารีย์, 2543 ศึกษาการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามโดยใช้สารละลายเอทานอล และกระบวนการกรองเพื่อกำจัดโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ทำการแยกโมเลกุลของโปรตีนออกจากอนุภาคพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามในสารละลายเอทานอล โดยใช้คลื่นเหนือเสียง ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคของโปรตีนออกจากพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม เวลาในการผ่านคลื่นเหนือเสียง และความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์จากผงเนื้อในเมล็ดมะขามคือ ความเข้มข้นของผงเนื้อในเมล็ดมะขามเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร เวลาในการผ่านคลื่นเหนือเสียงเท่ากับ 60 วินาที และความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเท่ากับร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะให้ร้อยละการกำจัดโปรตีนเท่ากับ 92.203 และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 68.512 จากนั้นนำภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์มาใช้ในการศึกษาการกรองเพื่อกำจัดอนุภาคของโปรตีนออกจากอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ในถังกวน ทำการศึกษาการกวน 4 ชนิด คือ ไม่ทำการกวน กวนด้วยใบกวน กวนด้วยใบกวาด และกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด พบว่าการใช้การกวาดผิวหน้าของตัวกรองด้วยใบกวาดจะให้ฟลักซ์สูง มีร้อยละการกำจัดโปรตีนเท่ากับ 52.611 และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 28.697 เมื่อนำภาวะดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคโปรตีนออกจากอนุภาคพอลิแซคคาไรด์มาใช้กับการกรองโดย

กวาดผิวหน้าของตัวกรองด้วยใบกวาด พบว่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 81.216 และ 70.995 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณพอลิแซคคาไรด์ร้อยละ 93.616 ปริมาณของโปรตีนและปริมาณของไขมันร้อยละ 4.884 และ 1.540 ตามลำดับ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้

ในงานวิจัยที่ศึกษาการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการกรองในระดับไมโครฟิลเตรชัน ได้แก่ การกรองโมเลกุลของโปรตีน, เศษเซลล์ที่ได้จากการแตกเซลล์ และเซลล์ของจุลินทรีย์เป็นต้น ซึ่งยังไม่พบบางงานวิจัยที่ศึกษาการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้กับการกรองในระดับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ ได้แก่

Murase และคณะ, 1991 ศึกษาการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันตัวกรองเซรามิกชนิดหมุนด้วยความเร็วสูงพบว่า เมื่อหมุนตัวกรองด้วยความเร็วสูง (300-1500 รอบต่อนาที) ชั้นเค้กที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าตัวกรองจะถูกกวาดออกไปจากผิวหน้าของตัวกรองอย่างต่อเนื่อง ทำให้อัตราการกรองมีค่าสูงกว่าการกรองด้วยตัวกรองเซรามิกที่ไม่หมุน ทำการทดลองโดยใช้สารแขวนลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmetacrylate) ที่กระจายตัวในน้ำ มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.41 ไมโครเมตร ตัวกรองมีพื้นที่การกรองเท่ากับ 471 ตารางเซนติเมตร กำหนดให้แฟกเตอร์อัตราการกรองแบบหมุน (Rate factor for rotating filtration) คืออัตราส่วนระหว่างความต้านทานของเค้กสถิตย์ (Static cake resistance) กับความต้านทานของเค้กไดนามิก (Dynamic cake resistance) โดยค่าความต้านทานไดนามิกจะขึ้นกับความเค้นเฉือน (Shear stress) ที่กระทำบนผิวตัวกรอง และสามารถหาได้จากสมการอัตราการกรองของรัท (Rate equation of Ruth for filtration) ในการทดลองถ้ากำหนดให้ตัวแปรในการปฏิบัติการมีค่าคงที่ ค่าแฟกเตอร์อัตราการกรองชนิดหมุนได้สามารถหาได้จากค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของแกนหมุนและอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างทรงกระบอกชั้นในและชั้นนอกกับรัศมีของแกนหมุน การเปลี่ยนแปลงของอัตราการกรองตามเวลาสามารถทำนายได้จากลักษณะการกรองเค้กโดยทั่วไป และยังพบว่าผลของการกรองชนิดหมุนจะมีอิทธิพลสูงเมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยมีค่าสูงและความดันลดของระบบมีค่าต่ำ และเมื่อการกรองเข้าสู่ภาวะสมดุล อัตราการกรองจะมีค่าคงที่ เมื่อขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของตัวกรองมีค่าต่าง ๆ กัน

Ulrich และคณะ, 1991 ศึกษาความสัมพันธ์ของผลของตัวแปรต่างๆในกระบวนการกรองชนิดหมุนได้ เพื่ออธิบายเชิงปริมาณของฟลักซ์ของเครื่องกรองชนิดหมุนได้ด้วยความเร็วสูง โดยจำนวนค่าพารามิเตอร์น้อยที่สุด จากการทดลองพบว่าแบบจำลองคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration polarization model) สามารถใช้อธิบายผลของการกรองด้วยเครื่องกรองอัลตราฟิลเตรชันชนิดหมุน ได้อย่างถูกต้อง และมีการปรับปรุงแบบจำลองคอนเซนเตรชันโพลาริเซชันโดยรวมผลของความเข้มข้นของของแข็งที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งวิธีนี้จะให้ผลสอดคล้องกับผลของค่าพีเอชที่มีต่อเพอเมชันฟลักซ์ นอกจากนี้การหาค่าความเข้มข้นของโปรตีนในชั้นโพลาริเซชันที่อยู่บริเวณผิวหน้าของตัวกรองได้ถูกปรับปรุงให้สามารถคำนวณได้ค่าที่ถูกต้องมาก

Kazunori และคณะ, 1993 ศึกษาการประยุกต์ใช้การกรองด้วยตัวกรองเซรามิกชนิดหมุนในการทำให้เซลล์เข้มข้น พบว่าเพอเมชันฟลักซ์ของการกรองเซลล์ยีสต์ในภาวะที่มีการให้อากาศจะมีค่าสูงกว่าในภาวะที่ไม่มีการให้อากาศ เนื่องจากในขณะการกรองในภาวะที่มีการให้อากาศจะมีฟองอากาศขนาดเล็กบริเวณรอบๆผิวหน้าตัวกรอง ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดชั้นเค้กบริเวณผิวหน้าของตัวกรองได้ จึงทำให้ความต้านทานการกรองลดลง และในการศึกษาความเป็นไปได้ในการดำเนินการกรองด้วยตัวกรองเซรามิกชนิดหมุนได้เพื่อทำให้เซลล์เข้มข้นในระยะยาวพบว่า เมื่อทำการทดลองโดยเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ *Corynebacterium glutamicum* และ *Propionibacterium freudenreichii* ในถังหมักที่ต่อกับเครื่องกรองเซรามิก ชนิดหมุนได้พบว่า ในระหว่างการกรองไม่พบปัญหาการอุดตันของตัวกรอง และได้ความเข้มข้นของเซลล์ *C. glutamicum* และ *P. Freudenreichii* สูงเท่ากับ 120 และ 53 กรัมเซลล์แห้งต่อลิตรตามลำดับ

Charles และคณะ, 1995 ศึกษาการเก็บเกี่ยวโปรตีนจากสารละลายที่ได้จากการแตกเซลล์แบคทีเรีย โดยตัวกรองไมโครฟิลเตรชันชนิดแผ่น (Flat filter) และไมโครฟิลเตรชันชนิดทรงกระบอกหมุนได้ (Rotary filter) ในการแก้ปัญหาการอุดตันของตัวกรองที่ทำให้เพอเมชันฟลักซ์มีค่าต่ำประมาณ 10^{-4} - 10^{-3} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที (1 ตารางเซนติเมตรเท่ากับ 3.64×10^4 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) ทำการทดลองโดยทำให้เซลล์ของ *E. coli* แตกด้วยคลื่นเหนือเสียงแบบไหลวนเซลล์ต่อเนื่อง 3 รอบ ทำการเปรียบเทียบผลของการกรองจากไมโครฟิลเตรชันชนิดหมุนและชนิดแผ่น โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ผลของความเข้มข้นของของแข็งในสายป้อน แรงเฉือนที่ใช้ในการทดลอง โดยแรงเฉือนในเครื่องกรองแบบแผ่นสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$\gamma = \frac{6Q}{h^2 w} \quad 2.2$$

เมื่อ h คือ ความสูงของโมดูลแบบแผ่น w คือ ความกว้างของโมดูลแบบแผ่น และ Q คือ อัตราการไหลของสายป้อน ค่าแรงเฉือนที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 600 ถึง 800 ต่อวินาที ส่วนแรงเฉือนในเครื่องกรองชนิดทรงกระบอกหมุนได้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\gamma = \frac{2\pi\Omega a}{d} \quad 2.3$$

เมื่อ Ω คือ ความเร็วรอบในการหมุน a คือ รัศมีของทรงกระบอกชั้นใน และ d คือ ระยะห่างระหว่างทรงกระบอกชั้นในกับชั้นนอก ค่าแรงเฉือนที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 280 ถึง 4000 ต่อวินาที และนอกจากนี้ยังศึกษาผลของความดันคร่อมตัวกรองซึ่งมีค่าระหว่าง 0.069 ถึง 0.586 บาร์ จากผลการทดลองพบว่าเพอมีเอทฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงเฉือนที่สูงขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของของแข็งในสายป้อนมีค่าสูงขึ้น แต่ไม่ขึ้นกับค่าความดันคร่อมตัวกรอง โดยฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงเฉือน โดยมีค่าเท่ากับยกกำลัง 1/3 ในไมโครฟิลเตรชันชนิดแผ่น และมีค่าเท่ากับยกกำลัง 1/2 ในไมโครฟิลเตรชันชนิดทรงกระบอกหมุนได้ แรงเฉือนจะมีอิทธิพลต่อฟลักซ์สูงในการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดทรงกระบอกหมุนได้ เนื่องจากผลของการเกิดการหมุนวนของเทอร์เลอร์ ทำให้เศษเซลล์ที่อยู่บริเวณผิวตัวกรองเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของตัวกรองสวนทางกับการไหลของเพอมีเอท ค่าการส่งผ่านโปรตีนเฉลี่ย (Average protein transmission) ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าประมาณ 0.6 ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อแรงเฉือนมีค่ามากและความเข้มข้นของของแข็งมีค่าน้อย นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าไมโครฟิลเตรชันชนิดทรงกระบอกหมุนได้จะให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงกว่าไมโครฟิลเตรชันชนิดแผ่นในภาวะที่ความเข้มข้นของของแข็งมีค่าต่ำ และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของของแข็งมีค่าสูง

Mateus และ Cabral, 1995 ศึกษาแบบจำลองของการกรองสารละลายโปรตีนและสารแขวนลอยเซลล์ด้วยตัวกรองชนิดหมุนได้ที่มีการไหลแบบหมุนวน ทำการทดลองโดยใช้ภาวะการกรองในขอบเขตที่ฟลักซ์ขึ้นกับความดันและขอบเขตที่การถ่ายโอนมวลเป็นตัวกำหนด สำหรับการกรองสารละลายโปรตีนโบวันซีรัมอัลบูมิน (Bovine serum albumin) จะอธิบายโดยใช้หลักการแพร่ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะการไหลของของไหล (Hydrodynamic) และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งทรงกลม ส่วนการอธิบายพฤติกรรมการแพร่ของสารแขวนลอยเซลล์ จะตั้งสมมติฐานให้ความเข้มข้นของเซลล์มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear induce diffusion) การปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟลักซ์ของการกรองสารละลายโปรตีนอยู่ในขอบเขตที่ขึ้นกับความดัน จะทำนาย

โดยใช้พฤติกรรมของเพอมีเอทฟลักซ์ของสารแขวนลอยเซลล์ และในกรณีที่เพอมีเอทฟลักซ์ที่ทำการทดลองในขอบเขตที่ถูกควบคุมโดยการถ่ายโอนมวล พบว่า สัดส่วนปริมาตรของเซลล์ที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวกรองจะมีค่าระหว่าง 0.16 ถึง 0.35 ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายรวมและลักษณะการไหลของของไหล

Tanja และคณะ, 1999 ได้ปรับปรุงอัตราการโอนถ่ายโปรตีนและปริมาตรของของไหลในกระบวนการกรองยีสต์ด้วยไมโครฟิลเตรชัน โดยปรับปรุงการไหลของของไหลให้เกิดการหมุนวนของของไหลที่ไม่คงที่เรียกว่า การหมุนวนแบบดีน (Dean vortice) ทำการทดลองภายใต้ภาวะเพอมีเอทฟลักซ์คงที่ ทำการกรองเซลล์ยีสต์โดยใช้รูปแบบของตัวกรองต่างกันพบว่า การกรองโดยใช้ตัวกรองที่มีการจัดเรียงตัวเป็นเกลียว (Helical module) จะมีความสามารถในการกรองสูงกว่าการกรองด้วยตัวกรองที่มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง (Linear module) ถึง 19 เท่า ในกระบวนการกรองที่ในสายป้อนประกอบด้วยโบวีนซีรัมอัลบูมินและเซลล์ยีสต์ ภายใต้ภาวะความดันคร่อมตัวกรองคงที่ร่วมกับการทำไดอะฟิลเตรชัน ด้วยเครื่องกรองที่มีการจัดเรียงตัวของตัวกรองเป็นเกลียวพบว่า สามารถแยกโบวีนซีรัมอัลบูมินและโปรตีนอื่น ๆ ที่ได้จากการแตกเซลล์ออกจากสายป้อนได้มากถึง 2 เท่าของการแยกด้วยตัวกรองที่มีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรง ค่าเพอมีเอทฟลักซ์มีค่าสูงกว่าการกรองด้วยตัวกรองที่มีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงถึงร้อยละ 18-43 และความเข้มข้นของยีสต์ที่ได้จากการกรองจะมีค่าเท่ากับ 45 กรัมของน้ำหนักแห้ง

ปราณี, 2543 ศึกษาการแยกเศษออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์เพื่อกำจัดความขมโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุน โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนแรกคือ การทำให้เซลล์แตกโดยใช้โฮโมจีไนเซอร์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ความดัน 500 บาร์ และผ่านการโฮโมจีไนส์ 2 รอบ ที่ความเข้มข้นสเปนท์บริเวณรียีสต์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร จะได้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 0.223 กรัมต่อกรัมเซลล์แห้ง และความขมเท่ากับ 0.443 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอลคิตต่อกรัมเซลล์แห้ง

ขั้นตอนที่สองคือ การกรองแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ โดยเปรียบเทียบการกรองยีสต์โฮโมจีเนท และยีสต์ออกโตไลเซท ใช้ตัวกรองเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความดัน 0.3 บาร์ อัตราการไหลของสายป้อน 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 600 รอบต่อนาที พบว่า อัตราการผลิตโปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออกโตไลเซทมีค่าสูงกว่าการกรองยีสต์โฮโมจีเนทประมาณ 8 เท่า ร้อยละการกำจัดความขมที่ได้เท่ากับ 80 ทำการ

ศึกษาการเพิ่มอัตราการผลิตโปรตีนจากการกรองยีสต์ออกโตไลเซส โดยศึกษาผลของอัตราการไหลของสายป้อน และผลของความเร็วในการหมุนของตัวกรอง โดยใช้ความเข้มข้นของยีสต์เท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร และความดัน 0.3 บาร์ พบว่าอัตราการผลิตโปรตีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนตัวกรอง และลดอัตราการไหลของสายป้อน โดยที่อัตราการไหลของสายป้อนเท่ากับ 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1000 รอบต่อนาทีจะให้อัตราการผลิตโปรตีนสูงสุดเท่ากับ 379 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ความขม 644 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอลลิตต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ผลได้ของของแข็ง 37.79 เปอร์เซ็นต์ การเก็บเกี่ยวโปรตีนร้อยละ 59.66 ปริมาณโปรตีน 0.354 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ความขม 0.6 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอลลิตต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ร้อยละการกำจัดความขมเท่ากับ 68.14



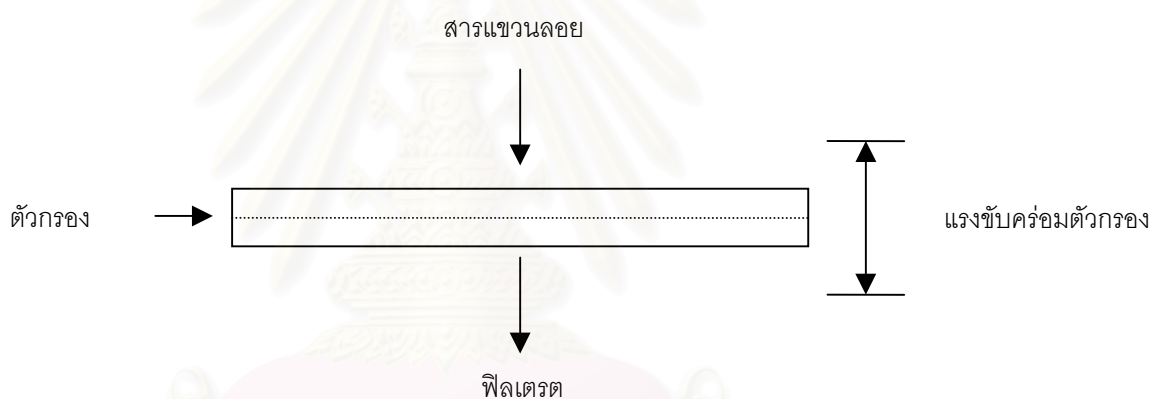
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 การกรอง (Filtration)

การกรอง คือ การแยกอนุภาคของของแข็งซึ่งแขวนลอยอยู่ในของเหลวออกจากของเหลว โดยการป้อนสารแขวนลอยผ่านตัวกรอง (Filtration medium) อนุภาคของแข็งจะถูกกักไว้บนแผ่นกรอง และของเหลวสามารถไหลผ่านตัวกรองได้ด้วยแรงขับ (Driving force) อนุภาคของแข็งที่ถูกกักบนตัวกรอง เรียกว่า เค้ก (Cake) ของเหลวที่ไหลผ่านตัวกรอง เรียกว่า ฟิลเตรต (Filtrate) (Svarovsky, 1990)



รูปที่ 3.1 ระบบการกรอง (Svarovsky, 1990)

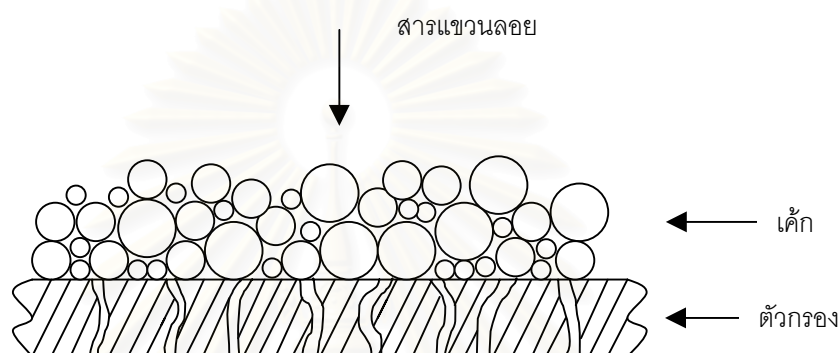
ประเภทของการกรอง

การกรองมีหลายแบบตามหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ได้แก่

- การกรองที่พิจารณาตามกลไกของการกรอง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1 การกรองแบบที่มีเค้กติดอยู่บนผิวหน้าของตัวกรอง (Surface filtration)

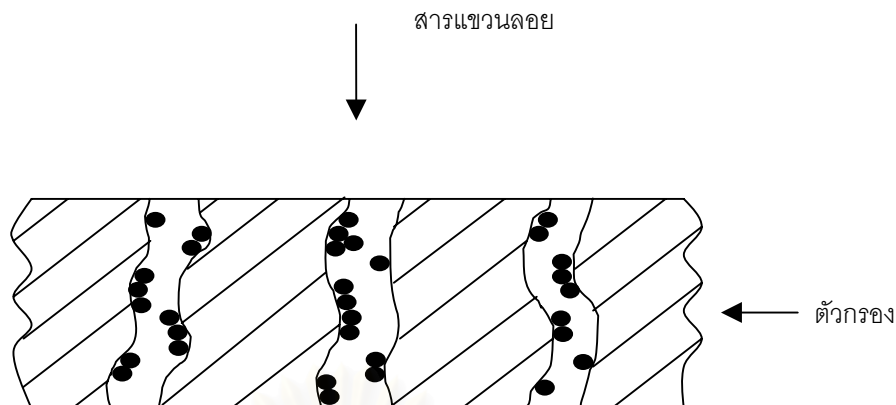
การกรองชนิดนี้ตัวกรองจะมีความดันลด (Pressure drop) ค่อนข้างต่ำ อนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดของรูพรุน (Pore) ของตัวกรองจะถูกกักอยู่บนผิวหน้าของตัวกรอง และสะสมเป็นเค้กดังรูปที่ 3.2 โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวกรองจะถูกแยกออกมาพร้อมกับของเหลว การกรองชนิดนี้นิยมใช้แยกสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของของแข็งมากกว่าร้อยละ 1 โดยปริมาตร



รูปที่ 3.2 การกรองชนิดที่มีเค้กติดอยู่บนผิวหน้าของตัวกรอง (Surface filtration)

2 การกรองแบบที่อนุภาคติดค้างอยู่ในตัวกรอง (Deep bed filtration)

การกรองชนิดนี้จะมีรูพรุนลักษณะเป็นช่องเปิด และมีความคดเคี้ยว อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวกรองจะไหลผ่านรูพรุนของตัวกรอง และถูกกักอยู่ในตัวกรองด้วยกลไกต่างๆ เช่น แรงโน้มถ่วง การแพร่ และแรงเฉื่อย โดยอนุภาคที่ถูกกักในตัวกรองจะยึดติดกับอนุภาคของตัวกรองด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) ดังรูปที่ 3.3 ตัวกรองของการกรองชนิดนี้จะมีมีความดันลดเริ่มต้นสูงกว่าตัวกรองของการกรองแบบแรก การกรองชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการทำให้ใส (Clarification) เช่น การแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ออกจากสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งความเข้มข้นของของแข็งในสารแขวนลอยมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยปริมาตร



รูปที่ 3.3 การกรองชนิดที่มีอนุภาคติดค้างอยู่ในตัวกรอง (Deep bed filtration)

- การกรองที่พิจารณาตามทิศทางการไหลของสารแขวนลอย (รูปที่ 3.4) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1 การกรองแบบไหลผ่านตัวกรอง (Dead-end filtration)

สารแขวนลอยจะถูกป้อนในทิศตั้งฉากกับตัวกรอง อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุน และของเหลวจะไหลผ่านตัวกรองโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงเป็นแรงขับในการกรอง กรณีที่ต้องการให้การกรองเกิดเร็วขึ้นอาจใช้ความดันเป็นแรงขับร่วมกับแรงโน้มถ่วง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวกรองจะถูกกักไว้บริเวณผิวของตัวกรอง เกิดสะสมเป็นเค้ก ทำให้ความต้านทานการกรองมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ฟิลเตรตพลั๊กมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว การกรองชนิดนี้เป็นกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch operation) เนื่องจากต้องหยุดกระบวนการเพื่อกำจัดชั้นเค้กที่เกิดขึ้น สามารถดำเนินการในระบบเปิด และเหมาะสำหรับการกรองสารแขวนลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และมีความเข้มข้นของของแข็งในสารแขวนลอยต่ำ

2 การกรองแบบไหลขนานตัวกรอง (Cross flow filtration)

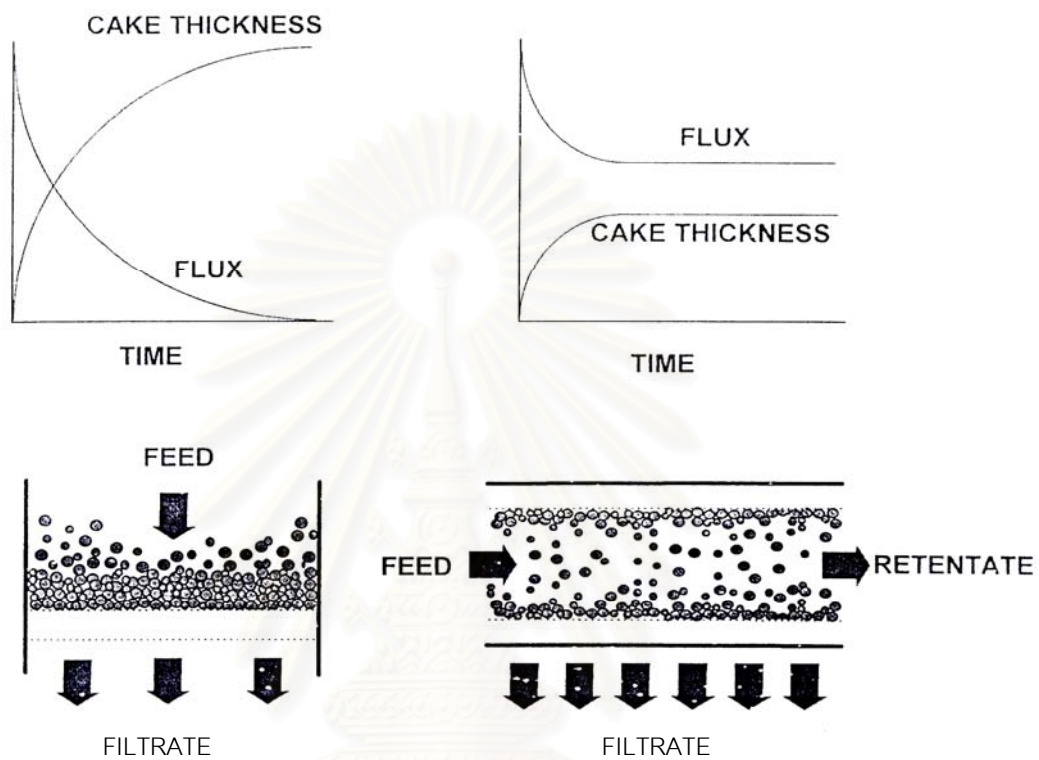
สารแขวนลอยจะถูกป้อนในทิศขนานกับผิวหน้าของตัวกรอง อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนและของเหลวจะไหลผ่านตัวกรองในทิศตั้งฉากกับผิวหน้าของตัวกรอง โดยอาศัยความดันเป็นแรงขับในการกรอง มีการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของตัวกรองเป็นชั้นบางๆ และมีความหนาแน่นที่ ทำให้ฟิลเตรตพลั๊กมีค่าลดลงในช่วงแรก และมีค่าคงที่ในช่วงต่อมา เนื่องจากการ

ป้อนสารแขวนลอยในทิศไหลขนานกับผิวหน้าของตัวกรองมีผลของแรงเฉือน ทำให้สารแขวนลอยกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าของตัวกรองอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทของการกรองโดยใช้หลักเกณฑ์ต่างๆ เช่น

- แบ่งตามประเภทของแรงขับ แรงขับที่ใช้ในการกรองได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงสุญญากาศ ความดัน แรงปั่นเหวี่ยง
- แบ่งตามประเภทของลักษณะการทำงาน ได้แก่ การปฏิบัติการแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch operation) และการปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง (Continuous operation)
- แบ่งตามประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ได้แก่ เค้ก และ/หรือ ฟิลเตรต
- แบ่งตามประเภทของลักษณะของเค้ก ได้แก่ เค้กที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible cake) และเค้กที่อัดตัวได้ (Compressible cake)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. การกรองแบบไหลผ่านตัวกรอง

ข. การกรองแบบไหลขนานตัวกรอง

รูปที่ 3.4 ประเภทของการกรองตามทิศทางการไหลของสารแขวนลอย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อดีของกระบวนการกรอง

กระบวนการกรองมีข้อได้เปรียบกระบวนการแยกอื่นๆ คือ

1. เป็นการแยกตามขนาดของอนุภาค (หรือรูปร่าง หรือชนิดของประจุ) ซึ่งทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติ จึงเหมาะสมสำหรับการแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้
2. กระบวนการกรองส่วนใหญ่ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เนื่องจากสามารถแยกได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนสถานะ
3. สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย
4. สามารถดำเนินการแบบไม่ต่อเนื่อง หรือแบบต่อเนื่อง ตลอดจนถึงติดตั้งระบบควบคุมการปฏิบัติการไม่ยาก
5. เป็นกระบวนการที่มีขนาดกระทัดรัดไม่เปลืองพื้นที่ เพราะอุปกรณ์การกรองมีการออกแบบให้มีพื้นที่ในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของการกรองสูง

สมการที่ใช้ในการกรอง (Svarovsky, 1990)

ในกระบวนการกรอง การไหลของของเหลวผ่านรูพรุนของตัวกรองและชั้นเค้กที่มีขนาดเล็ก จะมีอัตราการไหลต่ำ และมีลักษณะการไหลเหมือนการไหลผ่านแพคเบด (Packed bed) เป็นการไหลแบบลามินาร์ (Laminar flow) ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการการไหลของดาร์ซี (Darcy's law) อธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการไหล (Q) ของของไหลที่มีความหนืด (μ) ผ่านเบดที่มีความหนา (L) และมีพื้นที่การกรอง (A) โดยมีความดันคร่อมตัวกรอง (Δp) คือ

$$Q = k \frac{A \Delta p}{\mu L} \quad 3.1$$

โดย k คือ ค่าคงที่ในการซึมผ่านของเบด และกำหนดให้ R_t คือความต้านทานรวมของการกรอง มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความหนาของตัวกรอง (L) และ ค่าคงที่ในการซึมผ่านของเบด (k) จากสมการที่ 3.1 จัดรูปใหม่เป็น

$$Q = \frac{A\Delta p}{\mu R_t} \quad 3.2$$

เนื่องจากความต้านทานการกรองประกอบด้วยความต้านทาน 2 ชนิด คือ ความต้านทานของตัวกรอง (R_m) ซึ่งสมมติให้มีค่าคงที่ และความต้านทานของเค้ก (R_c) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา สมการที่ 3.2 จัดรูปได้เป็น

$$Q = \frac{A\Delta p}{\mu(R_m + R_c)} \quad 3.3$$

ในกรณีที่เป็นการเค้กอัดตัวไม่ได้ ความต้านทานของเค้กอาจสมมติให้มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเค้กที่สะสม ดังนั้น

$$R_c = \alpha w \quad 3.4$$

โดย w คือ มวลของเค้กที่สะสมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร) ซึ่งมีค่าเป็นฟังก์ชันกับเวลาในกระบวนการกรองแบบไม่ต่อเนื่อง และมีความสัมพันธ์กับปริมาตรสะสมของฟิลเตรตซึ่งขึ้นกับเวลาโดย

$$wA = cV \quad 3.5$$

เมื่อ c คือความเข้มข้นของของแข็งในสารแขวนลอย (มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของฟิลเตรต, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

α คือ ความต้านทานจำเพาะของเค้ก (เมตรต่อกิโลกรัม)

V คือ ปริมาตรของฟิลเตรต (ลูกบาศก์เมตร)

แทนค่า R_c ในสมการ 3.3 จะได้

$$Q = \frac{A\Delta p}{\alpha\mu_w + \mu R_m} \quad 3.6$$

จากสมการการกรองพื้นฐาน 3.6 แทนค่า w จากสมการ 3.5 จะได้

$$Q = \frac{\Delta p A}{\alpha\mu_c \left(\frac{V}{A}\right) + \mu R_m} \quad 3.7$$

จากความสัมพันธ์

$$Q = \frac{dv}{dt} \quad 3.8$$

ดังนั้นจากสมการ 3.7 และ 3.8 จัดอยู่ในรูปส่วนกลับได้เป็น

$$\frac{dt}{dv} = \alpha\mu_c \frac{V}{A^2\Delta p} + \frac{\mu R_m}{A\Delta p} \quad 3.9$$

กำหนดให้ a_1 และ b_1 เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$a_1 = \alpha\mu_c \quad 3.10$$

a_1 คือ ค่าคงที่แสดงสมบัติของสารแขวนลอยในสายป้อนและสมบัติอนุภาคของของแข็ง

$$b_1 = \mu R_m \quad 3.11$$

b_1 คือ ค่าคงที่ cloth-filtrate ดังนั้นสมการ 3.9 จะได้เป็น

$$\frac{dt}{dv} = a_1 \frac{V}{A^2\Delta p} + b_1 \frac{1}{A\Delta p} \quad 3.12$$

การกรองที่ความดันคงที่

ในการกรองที่ภาวะความดันคงที่ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของไหลกับเวลาโดยการอินทิเกรตสมการ 3.12 จะได้

$$\int_0^t dt = \frac{a_1}{A^2 \Delta p_0} \int_0^V v dv + \frac{b_1}{A \Delta p_0} \int_0^V dV \quad 3.13$$

$$t = a_1 \frac{V^2}{2A^2 \Delta p} + b_1 \frac{V}{A \Delta p} \quad 3.14$$

สามารถหาค่า α และ R_m โดยการจัดรูปสมการ 3.14 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง แล้วนำข้อมูลจากการทดลองมาเขียนกราฟระหว่าง $\frac{t}{V}$ กับ V จะได้

$$\frac{t}{V} = xV + y \quad 3.15$$

เมื่อ $x = \frac{a_1}{2A^2 \Delta p}$ และ $y = \frac{b_1}{A \Delta p}$

โดยที่ ความชันของกราฟ (Slope) = $x = \frac{a_1}{2A^2 \Delta p}$
จุดตัดแกน y (Y-intercept) = $y = \frac{b_1}{A \Delta p}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกรองที่ปริมาตรคงที่

การกรองที่ปริมาตรคงที่จะมีอัตราการไหล (Q) คงที่ และความดันลด (Δp) มีค่าเปลี่ยนไป

เนื่องจากอัตราการไหลคงที่ ดังนั้น

$$V = Qt \quad 3.16$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.7 และ สมการที่ 3.17 จะได้เป็น

$$\Delta p = \alpha \mu c \frac{Q^2}{A^2} t + \mu R_m \frac{Q}{A} \quad 3.17$$

จากค่าคงที่ที่กำหนดในสมการ 3.10 และ 3.11 จัดรูปสมการได้เป็น

$$\Delta p = a_1 v^2 t + b_1 v \quad 3.18$$

โดย v คือ ความเร็วของฟิลเตรต

$$v = \frac{Q}{A} \quad 3.19$$

ในการทดลองจะเก็บข้อมูลความดันลดและปริมาตรของฟิลเตรต ทำการเขียนกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันคร่อมตัวกรอง (Δp) กับเวลา (t) จะได้กราฟเส้นตรง

โดยที่

ความชันของกราฟ (Slope)	=	$a_1 v^2$
จุดตัดแกน Y (Y-intercept)	=	$b_1 v$

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกรอง

1. ความหนืดของของไหล

เมื่อความหนืดของของไหลมีค่าสูง จะทำให้อัตราการกรองลดลง ดังนั้นในการกรองของไหลที่มีความหนืดสูง อาจทำการเจือจางของไหลนั้นด้วยสารละลายที่มีความหนืดต่ำ เพื่อให้อัตราการกรองสูงขึ้น

2. ความหนาของเค้ก

เมื่อความหนาของเค้กมากขึ้น จะทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลง

3. ชนิดของตัวกรอง

ชนิดของตัวกรองมีผลต่อความต้านทานของตัวกรอง ตัวกรองมีขนาดรูพรุนเล็กเกินไปจะทำให้ความต้านทานของตัวกรองมีค่าสูง ทำให้อัตราการกรองมีค่าต่ำ ส่วนตัวกรองที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ จะมีความต้านทานของตัวกรองต่ำ แต่อาจทำให้อนุภาคหลุดลอดออกมาได้

4. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิมีผลต่อความหนืดของของไหล โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของของไหลลดลง ทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิของการกรองอาจทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นด้วย และอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมสภาพ

5. ขนาดอนุภาคของเค้ก

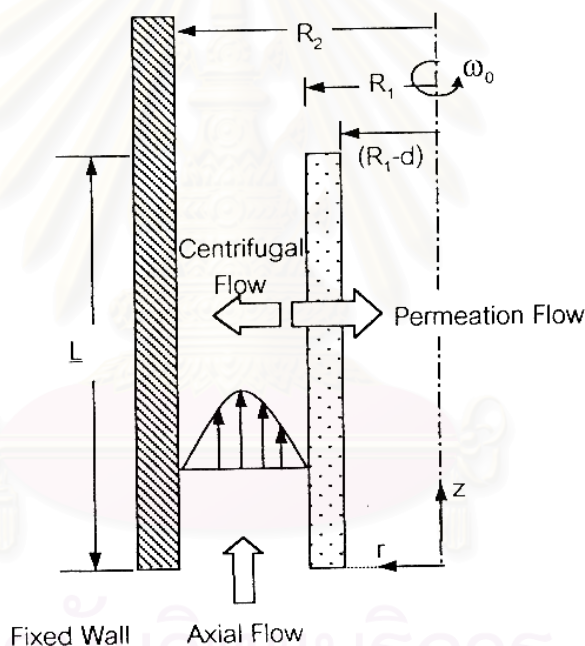
เมื่ออนุภาคของเค้กมีขนาดเล็กลง จะทำให้อัตราการกรองลดลง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถอุดตันบนผิวของตัวกรอง และอาจเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของตัวกรอง

3.2 การกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Rotating filtration)

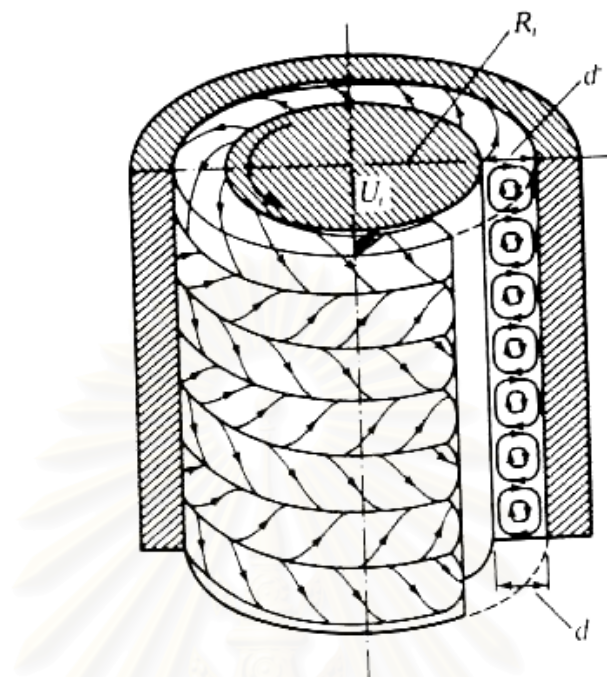
กลไกการไหลของของไหลในกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้

เมื่อของไหลไหลเข้าสู่ปริมาตรวงแหวนระหว่างทรงกระบอกสองชั้น ทรงกระบอกชั้นในมีการหมุนและทรงกระบอกชั้นนอกหยุดนิ่งกับที่ โดยทรงกระบอกชั้นในมีตัวกรองห่อหุ้มอยู่ เมื่อทรงกระบอกชั้นในมีการหมุนจะเกิดการไหลของของไหล 3 ทิศทาง ดังรูปที่ 3.5 การไหลในแนวแกน

(Axial flow) การไหลในทิศทางการหมุนเหวี่ยง (Centrifugal flow) และการไหลผ่านตัวกรองในแนวรัศมี (Permeation flow) ดังรูปที่ 3.6 ลักษณะการไหลของของไหลระหว่างทรงกระบอกชั้นในและชั้นนอกเป็นลักษณะการไหลแบบไม่คงที่ เนื่องจากมีแรงหมุนเหวี่ยงที่เกิดจากการหมุนของทรงกระบอกชั้นในทำให้ของไหลบริเวณที่อยู่ใกล้ผนังของทรงกระบอกชั้นในมีแรงหมุนเหวี่ยงสูง จึงเคลื่อนที่ออกจากผนังของทรงกระบอกชั้นในไปยังทรงกระบอกชั้นนอกที่หยุดนิ่ง เกิดเป็นการไหลลักษณะไม่คงที่เป็นวงแหวนรอบๆผนังของทรงกระบอกชั้นใน เรียกการไหลในลักษณะนี้ว่า การหมุนวนของเทย์เลอร์ (Taylor vortice) การกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ จะเกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์บริเวณผิวหน้าของตัวกรอง ทำให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของตัวกรอง ทำให้อณูภาคที่เกาะบริเวณผิวตัวกรองลดลง ดังนั้นฟิลเตรตฟลักซ์จึงมีค่าสูงขึ้น



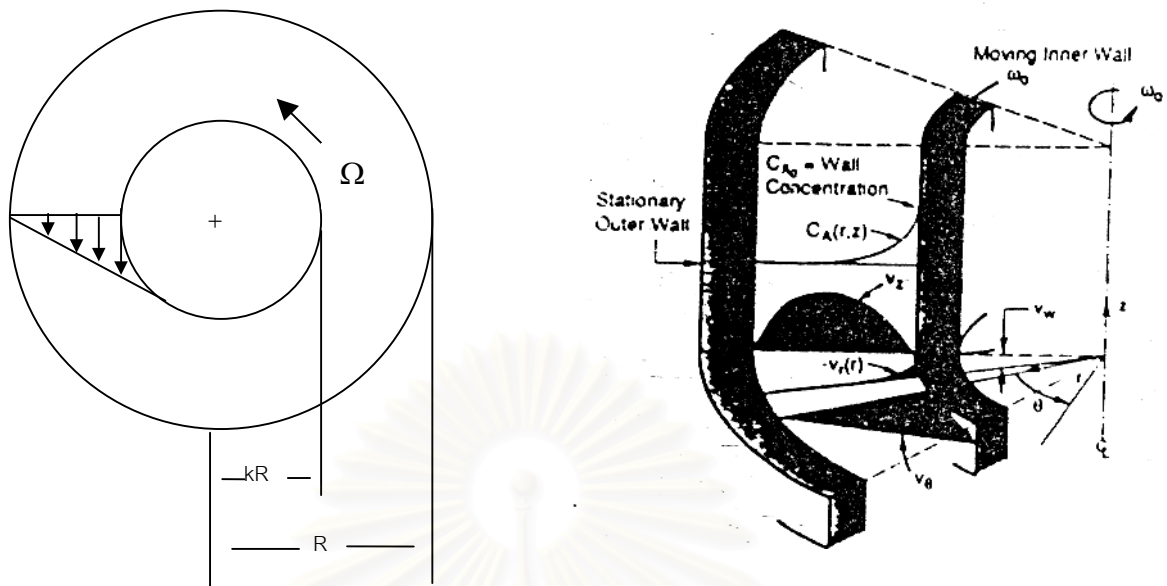
รูปที่ 3.5 แสดงทิศทางการไหลของของไหลในระบบการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Belfort et.al., 1993)



รูปที่ 3.6 แสดงการเกิดการหมุนวนแบบเทย์เลอร์ (Taylor vortice) (Hermert van, P.A., 1987)

แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรอง

การหาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรอง สามารถหาได้จากเกรเดียนของความเร็วของของไหลในแนวแกน θ ตามระยะรัศมีของทรงกระบอก โดยกำหนดให้ ของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ไหลผ่านปริมาตรวงแหวนของทรงกระบอก 2 ชั้น ทรงกระบอกชั้นในมีรัศมีภายนอกเท่ากับ kR หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม Ω และทรงกระบอกภายนอกมีรัศมีภายในเท่ากับ R ความยาวของทรงกระบอกชั้นในและชั้นนอกเท่ากับ L ลักษณะการไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ดังรูปที่ 3.7 (Bird R.B. Stewart W.E. และ Lightfoot E.N., 1960)



รูปที่ 3.7 แสดงกลไกการไหลของระบบการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Bird R.B. Stewart W.E. และ Lightfoot E.N., 1960, Belfort et.al., 1993)

สมการความต่อเนื่องของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะได้

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad 3.20$$

สมการการเคลื่อนที่ คือ

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} = -[\nabla \cdot \rho \mathbf{v} \mathbf{v}] - \nabla \cdot \mathbf{p} - [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \rho \mathbf{g} \quad 3.21$$

จากลักษณะการไหลของของไหลที่เคลื่อนที่หมุนวนระหว่างทรงกระบอกชั้นในและชั้นนอก พิจารณาความเร็วของของไหลและความดันในแนวแกนต่างๆ ในระบบพิกัดทรงกระบอก จะได้ $v_\theta = v_\theta(r)$ $v_r = 0, v_z = 0$ และ $p = p(r, z)$ ซึ่งความดันจะเปลี่ยนแปลงในแนวแกน z เนื่องจากแรงโน้มถ่วง และเปลี่ยนแปลงในแนวแกน r เนื่องจากแรงหมุนเหวี่ยง ดังนั้นจากสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกนต่างๆ จะได้

$$\text{ในแนวแกน } r \quad -\rho \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad 3.22$$

$$\text{ในแนวแกน } \theta \quad 0 = \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rv_\theta)}{dr} \right) \quad 3.23$$

$$\text{ในแนวแกน } z \quad 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \quad 3.24$$

สมการ 3.22 แสดงผลของแรงหมุนเหวี่ยงที่มีต่อความดัน, สมการ 3.23 แสดงลักษณะความเร็วของของไหล และสมการ 3.24 แสดงผลแรงโน้มถ่วงที่มีต่อความดันในระบบ ดังนั้นการหาความเร็วในแนวแกน θ ตามระยะรัศมีของระบบ จึงได้จากการแก้เชิงอนุพันธ์ของสมการ 3.23 จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{d(rv_\theta)}{dr} = C_1 \quad 3.25$$

$$\frac{d(rv_\theta)}{dr} = C_1 r \quad 3.26$$

$$rv_\theta = \frac{1}{2} C_1 r^2 + C_2 \quad 3.27$$

$$v_\theta = \frac{1}{2} C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad 3.28$$

ที่ภาวะขอบเขต

1. ที่ $r = kR, v_\theta = \Omega kR$

2. ที่ $r = R, v_\theta = 0$

แก้สมการหาค่าคงที่ของการอินทิเกรต C_1 และ C_2 จะได้ความเร็วของของไหลในแนวแกน θ ตามระยะรัศมีของระบบ ดังสมการ

$$v_{\theta} = \Omega k R \frac{\left(\frac{R-r}{r-R}\right)}{\left(\frac{1}{k}-1\right)} \quad 3.29$$

จากสมการ 3.29 สามารถหาโมเมนต์ตัมพลิกซ์จาก

$$\tau_{r,\theta} = -\mu r \frac{d\left(\frac{v_{\theta}}{r}\right)}{dr} = 2\mu\Omega \frac{k^2}{(1-k^2)} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad 3.30$$

แรงบิด (Torque) ที่กระทำต่อพื้นที่ผิวภายในทรงกระบอกหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ตัมพลิกซ์ พื้นที่ผิวของทรงกระบอก และแขนของแรง จะได้

$$T = (-\tau_{r,\theta}) \Big|_{r=kR} \cdot 2\pi k R L \cdot k R \quad 3.31$$

$$\therefore T = \frac{4\pi\mu\Omega(kR)^2 L}{(k^2-1)} \quad 3.32$$

การหมุนวนของเทย์เลอร์จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลที่อยู่ใกล้ผนังด้านนอกของทรงกระบอกชั้นในหรือบริเวณผิวหน้าของตัวกรองที่มีการหมุน ถูกพาออกไปจากผิวหน้าของตัวกรองโดยการเหวี่ยงโดยแรงหมุนเหวี่ยงที่เกิดขึ้นจากการหมุนของทรงกระบอกชั้นใน ซึ่งรูปแบบการหมุนวนเทย์เลอร์จะกำหนดโดยใช้ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor number) โดย

$$Ta = \frac{2\pi n R_1 d}{\nu} \left(\frac{2d}{R_1 + R_2} \right)^{0.5} \quad 3.33$$

- โดยที่ Ta = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (-)
- n = ความเร็วรอบในการหมุนของตัวกรอง (ทรงกระบอกชั้นใน) (รอบต่อนาที)
- R_1 = รัศมีภายนอกของตัวกรอง (เมตร)
- R_2 = รัศมีภายในของทรงกระบอกชั้นนอก (เมตร)
- d = ระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก (เมตร)
- ν = ความหนืดคิเนมาติกของของไหล (Kinematic viscosity) (ตารางเมตรต่อชั่วโมง)

รูปแบบของการหมุนวนของเทย์เลอร์ สามารถแบ่งโดยใช้ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์เป็นตัวกำหนดได้ 5 ช่วง ดังนี้

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)	$Ta \leq Ta_{crit}$
การหมุนวนแบบราบเรียบ (Laminar vortex flow)	$Ta_{crit} < Ta < 800$
ช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition flow)	$800 < Ta < 2000$
การหมุนวนแบบปั่นป่วน (Turbulent vortex flow)	$2000 < Ta < 10,000 - 15,000$
การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)	$Ta > 15,000$

กำหนดให้
$$Ta_{crit} = 41.3 + \frac{13.1d}{R_1} \quad 3.34$$

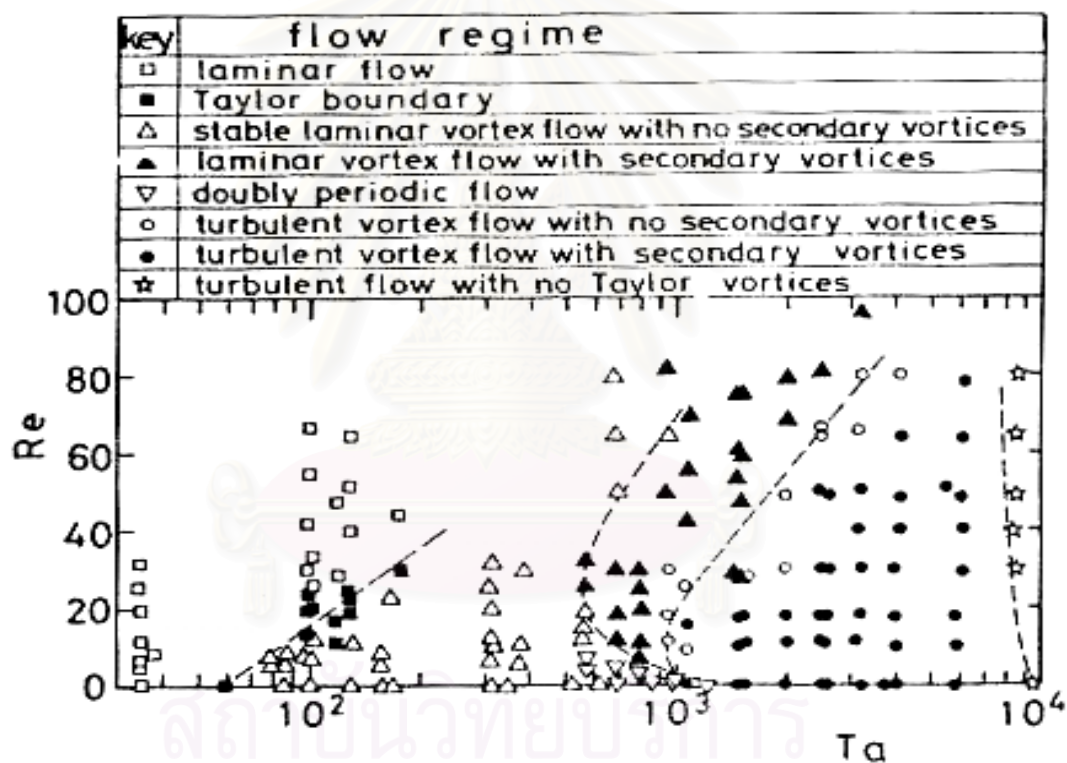
เนื่องจากการไหลของของไหลระหว่างทรงกระบอกชั้นในที่มีการหมุนและทรงกระบอกชั้นนอกที่หยุดนิ่ง มีการไหลทั้งในแนวแกน และการไหลที่เกิดจากการหมุนของทรงกระบอกชั้นใน ดังนั้นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งเป็นค่าที่บอกลักษณะการไหลของของไหลจึงมี 2 ค่าคือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกน (Axial Reynold number) และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของตัวกรอง (Tangential Reynold number) ดังสมการ

$$Re_a = \frac{vd_H}{\nu} \quad 3.35$$

$$Re_t = \frac{\Omega R_1 d_H}{\nu} \quad 3.36$$

โดย	Re_a	= ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในแนวแกน	(-)
	Re_t	= ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุน	(-)
	v	= ความเร็วของของไหลตามแนวแกน	(เมตรต่อชั่วโมง)
	Ω	= ความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$	(เรเดียนต่อชั่วโมง)
	n	= ความเร็วรอบในการหมุนของตัวกรอง	(รอบต่อชั่วโมง)
	d_H	= เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก = $2d$	(เมตร)

รูปแบบของการเกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ มีความสัมพันธ์กับค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในแนวแกน ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงรูปแบบการหมุนวนของเทย์เลอร์ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในแนวแกน (Kataoka และคณะ, 1977)

ดังนั้นการหมุนวนแบบราบเรียบจนถึงการหมุนวนแบบปั่นป่วนจะเกิดที่ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์วิกฤตจนถึงค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ไม่เกิน 10000 และค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในแนวแกนไม่เกิน 100 จึงจะทำให้สามารถกวาดอนุภาคบริเวณผิวหน้าของตัวกรองได้ดี

ในกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ ของไหลที่ไหลระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอกเป็นลักษณะการไหลแบบไม่คงที่หรือการไหลแบบปั่นป่วน และเกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ อัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวของตัวกรอง (Effective shear rate) จึงมีค่ามากกว่าอัตราการเฉือนนอมินัล ซึ่งสามารถหาค่าอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวของตัวกรองจากสมการ (Charles et.al., 1995)

$$\gamma_{eff} \equiv \frac{T}{\mu AR_1} \quad 3.37$$

โดย T = แรงบิดที่กระทำต่อผิวของตัวกรอง
 A = พื้นที่ผิวของตัวกรอง (ตารางเมตร)
 μ = ความหนืดของของไหล (กรัมต่อเมตร ژیวิน)

ค่าอัตราการเฉือนนอมินัล (Nominal shear rate, γ_{nom}) สำหรับการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ สามารถหาได้จากสมการ

$$\gamma_{nom} = \frac{2\pi n R_1}{d} \quad 3.38$$

โดยที่ n = ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง หรือทรงกระบอกชั้นใน (รอบต่อนาที)
 d = ระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก (เมตร)

กำหนดให้ระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกมีค่าน้อยกว่ารัศมีภายนอกของตัวกรองหรือ ทรงกระบอกชั้นในมากๆ ($d \ll kR$) และอัตราการเฉือนบริเวณผิวหน้าของตัวกรองที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าเท่ากับอัตราการเฉือนนอมินัล ก็ต่อเมื่อการไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ และมีการหมุนวนของเทย์เลอร์เกิดขึ้น (Charles et.al., 1995)

Beaudoin และ Jaffrin, 1989 ทำการศึกษาอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรองในกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้จากการทดลอง ใช้ความสัมพันธ์ในสมการ 3.39 โดยทำการวัดค่าอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวหน้าของตัวกรอง ที่ภาวะการกรองต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ของอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวของตัวกรอง ดังสมการ

$$\gamma_{eff} = 0.23\sqrt{Ta} \frac{2\pi n R_1}{d} = 0.23 \frac{d(\gamma_{nom})_2^3}{(V)_2^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{R_1}\right)^4} \quad 3.39$$

- โดย γ_{eff} = อัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวของตัวกรอง (Effective shear rate)
(ต่อชั่วโมง)
- γ_{nom} = อัตราการเฉือนนอมินัล (ต่อวินาที)
- T_a = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (-)
- n = ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง (รอบต่อวินาที)
- R_1 = รัศมีภายนอกของตัวกรอง (เมตร)
- d = ระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก (เมตร)
- V = ความหนืดคิเนมาติกของของไหล (Kinematic viscosity)
(ตารางเมตรต่อชั่วโมง)

จากความสัมพันธ์ของอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวของตัวกรอง ในสมการที่ 3.39 พบว่า ปัจจัยที่มีต่ออัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวของตัวกรอง ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนของตัวกรอง รัศมีภายนอกของตัวกรอง และระยะห่างระหว่างผิวของตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก ซึ่งอยู่ในรูปของค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ เมื่ออัตราการเฉือนมีค่าสูงขึ้น จะทำให้มวลของเค้กที่สะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่การกรอง (w) มีค่าลดลง จึงส่งผลให้ความต้านทานของเค้ก (R_c) มีค่าลดลงด้วย เนื่องจากความต้านทานของเค้กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเค้กที่สะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรอง (w) ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.4 โดยสมมติให้ค่าความต้านทานจำเพาะของเค้ก (α) มีค่าคงที่ และจากสมการที่ 3.3 เมื่อความต้านทานของเค้กมีค่าลดลง จะทำให้อัตราการไหลของฟิลเตรต (Q) มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ความเข้มข้นของของแข็งในสารแขวนลอย (c) จะมีผลต่อมวลของเค้กที่สะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (w) ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.5 โดยเมื่อความเข้มข้นของของแข็งในสารแขวนลอยมีค่าสูงขึ้น จะทำให้มวลของเค้กที่สะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่การกรอง (w) มีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลของฟิลเตรต (Q) มีค่าลดลงตามความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น

ความดันคร่อมตัวกรอง (Δp) จะมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลของฟิลเตรต (Q) ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.1 เนื่องจากความดันคร่อมตัวกรองเป็นแรงขับให้ของไหลไหลผ่านตัวกรอง ดังนั้นเมื่อความดันคร่อมตัวกรองมีค่าสูงขึ้น จะทำให้อัตราการไหลของฟิลเตรตมีค่าสูงขึ้นด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ชุดกรองแบบไหลขนานตัวกรอง ชนิดหมุนได้
2. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer/hot plate) รุ่น RCT basic ของบริษัท Ika labortechnik, Germany
3. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น KUBOTA 5100 ของบริษัท Kubota corporation, Japan
4. เครื่องกวน (Stirrer) รุ่น RW 20 ZM.n. ของบริษัท Ika labortechnik, Germany
5. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) รุ่น Spectronic 20 Genesys ของบริษัท Spectronic Instruments, USA
6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (4-digits balance) ของบริษัท Mettler Toledo, Switzerland
7. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle analyzer) รุ่น Coulter LS 230
8. เครื่องล้างอุปกรณ์ด้วยคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic bath) รุ่น TRANSSONIC T460 ของบริษัท Elma, West Germany

4.2 เคมีภัณฑ์

1. ผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (Tamarind Kernel Powder) จากบริษัท จีเอ็ม อิชิตฮาระ จำกัด (GM Ichihara Co., Ltd)
2. พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม (Tamarind Seed Polysaccharide)
3. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) ของบริษัท Merck, Germany
4. ฟีนอล (Phenol) ของบริษัท Merck, Germany
5. คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate) ของบริษัท Carloerba, Italy
6. โซเดียมโปแตสเซียมทาร์เตรต (Sodium potassium tartrate) ของบริษัท AJAX CHEMICAL, Australia
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ของบริษัท Merck, Germany
8. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) ของบริษัท AJAX CHEMICAL, Australia

9. โฟลินรีเอเจนท์ (Folin-Ciocalteu reagent) ของบริษัท Merck, Germany
10. โบวีนซีรัมอัลบูมิน (Bovine serum albumin: BSA) ของบริษัท Fluka, Switzerland
11. ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) จุดเดือด 40-60 องศาเซลเซียส ของบริษัท LAB-SCAN, Ireland

4.3 วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบ ขนาดของอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ด ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

เตรียมสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามในน้ำโดยนำผงเนื้อในเมล็ดมะขามซึ่งเป็นวัตถุดิบในการทดลองโดยได้รับจากบริษัท จี เอ็ม อีซีฮารา จำกัด ปริมาณ 2 กรัมละลายในน้ำปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร (ความเข้มข้นของสารแขวนลอยเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร) ทำการกวนเพื่อให้ผงเนื้อในเมล็ดมะขามกระจายตัวในน้ำอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณต่างๆดังนี้

1. วิเคราะห์ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ ด้วยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric method) โดยใช้พอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท จี เอ็ม อีซีฮารา จำกัด และมีชื่อทางการค้าว่า SOABIGUM หรือ TG 200 เป็นสารมาตรฐานในการคำนวณปริมาณพอลิแซคคาไรด์ในผงเนื้อในเมล็ดมะขาม โดยนำสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามมาทำการเจือจางด้วยน้ำ 400 เท่า แล้วนำไปวิเคราะห์ตามวิธีใน ภาคผนวก ก

2. วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม โดยนำสารแขวนลอยมาเจือจางด้วยน้ำให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม นำไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธีลาวรี

3. วัดขนาดอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องวัดอนุภาค (Particle analyzer) รุ่น Coulter LS 230 โดยใช้ Small Volume Module

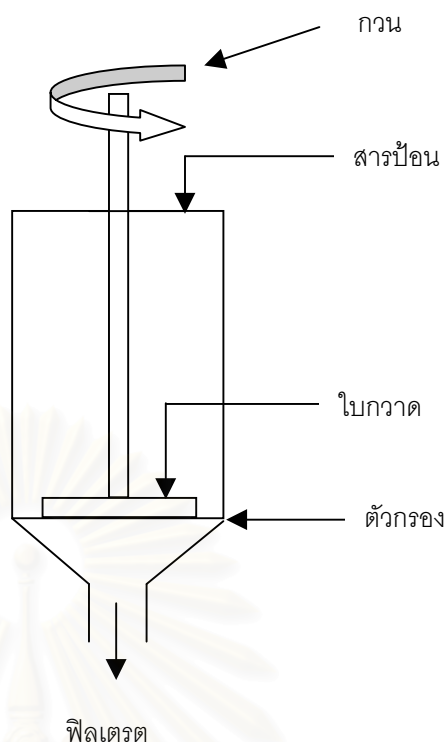
4. วิเคราะห์ปริมาณไขมันของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม วิเคราะห์ปริมาณไขมันตามวิธี AOAC.920.39 โดยใช้วิธี Soxhlet extraction ใช้ปริมาณของผงเนื้อในเมล็ดมะขามจำนวน 2 กรัม

5. วัดความหนืดของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้หลอดแก้วออสวาล์ด โดยการเตรียมสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ความเข้มข้น 20, 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำสารแขวนลอยเทลงในหลอดแก้วออสวาล์ดให้ได้ตามปริมาตรตามต้องการ แล้วปล่อยให้สารแขวนลอยไหลลงมาตามหลอดแก้ว จับเวลาการไหลของสารแขวนลอยตั้งแต่สารแขวนลอยเริ่มไหลจนถึงตำแหน่งที่กำหนดในหน่วยวินาที นำค่าเวลาที่บันทึกได้มาคำนวณค่าความหนืดของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ความเข้มข้น 20, 40 และ 60 กรัมต่อลิตร

6. วัดความหนาแน่นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม โดยใช้การเปรียบเทียบ ปริมาตรของสารแขวนลอยกับน้ำหนักของสารแขวนลอย นำสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่มีความเข้มข้น 20, 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาชั่งน้ำหนักของสารแขวนลอย นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ความเข้มข้นต่างๆ

การทดลองเพื่อเลือกชนิดของตัวกรอง

ทำการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาดดังรูปที่ 4.1 (วาริ, 2544) ใช้ผงเนื้อในเมล็ดมะขามปริมาณ 3 กรัม ละลายในน้ำปริมาตร 300 มิลลิลิตร (ความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร) กวนให้เข้ากันและเก็บตัวอย่างก่อนการผ่านคลื่นเหนือเสียง จากนั้นนำไปผ่านคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 5 นาที มาทำการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด ทำการแปรผันชนิดของตัวกรอง 4 ชนิดที่มีขนาดของรูพรุนต่างกัน คือ ฝากรองที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ 3 ชนิด และ ตะแกรงสแตนเลสขนาด 33 ไมโครเมตร ทำการชะเค็ดด้วยน้ำบริสุทธิ์จำนวน 4 ครั้ง เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรของฟิลเตรตที่ได้ นำเค็ดที่ได้ไปละลายในน้ำบริสุทธิ์ปริมาตร 300 มิลลิลิตร นำสารตัวอย่างทั้งหมดไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน, ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ และขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอย นำผลการทดลองที่ได้ไปเลือกใช้ฝากรองที่เหมาะสมในการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้

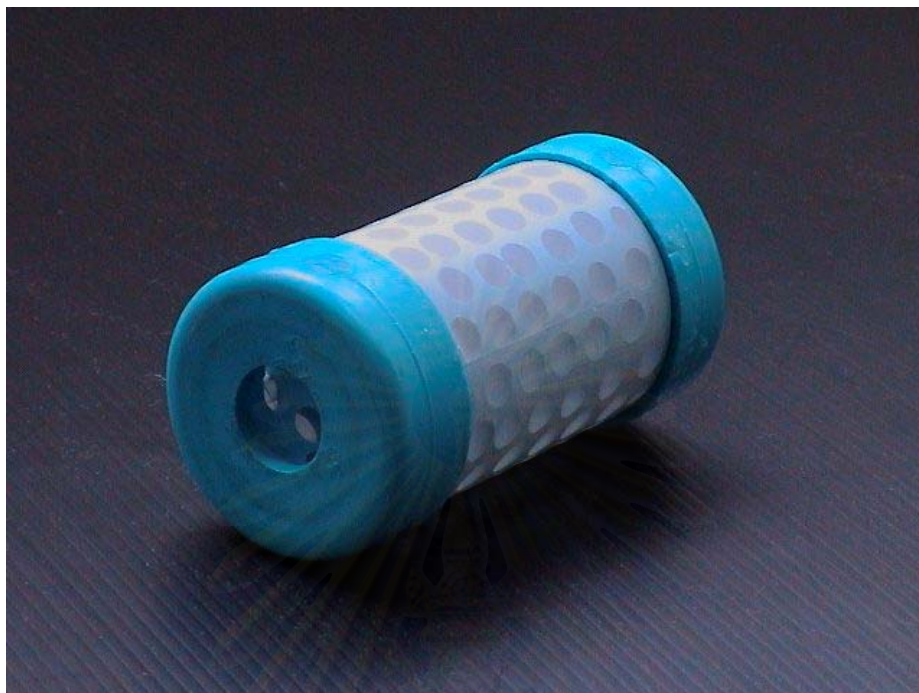


รูปที่ 4.1 แผนภาพอุปกรณ์ชนิดไหลผ่านตัวกรองในถังกวนโดยกวาดผิวหน้าของตัวกรองด้วยใบกวาด และมีการชะเคঁกด้วยน้ำบริสุทธิ์ (วารี, 2544)

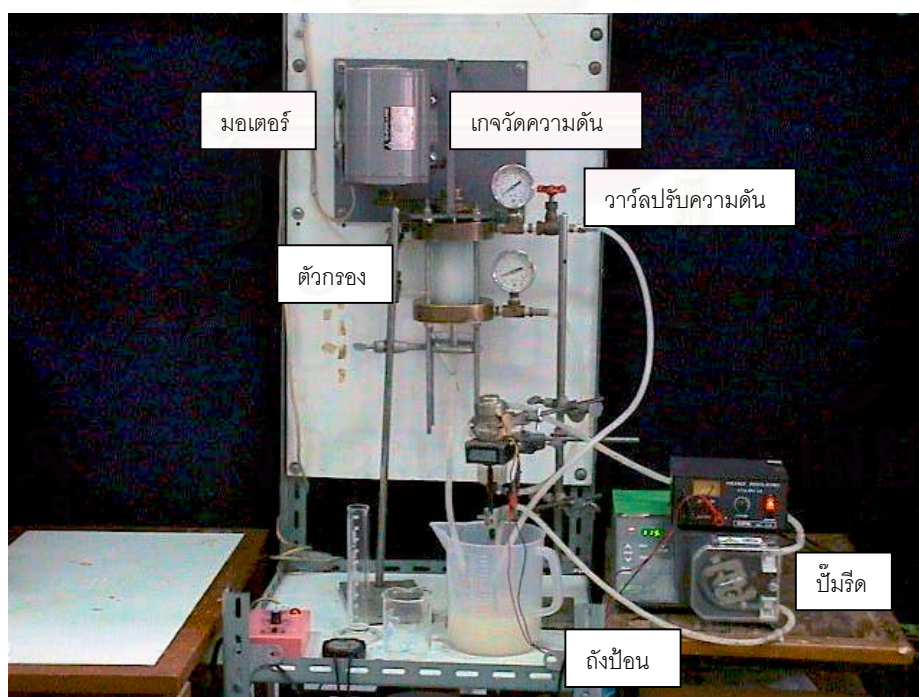
การหาภาวะที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคโปรตีนออกจากอนุภาคผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้

กระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้

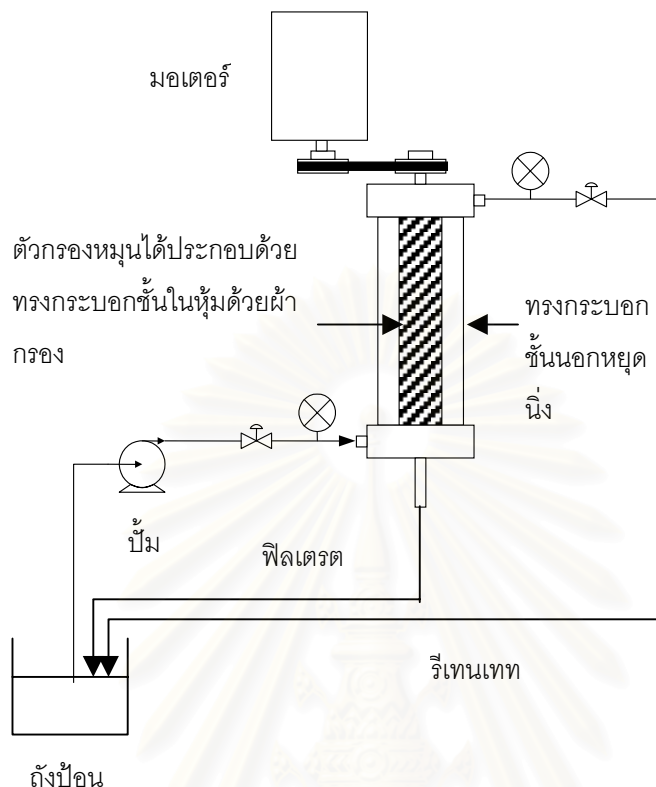
เครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Rotary filter) ใช้มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าของบริษัทชูบิชิ ในการหมุนตัวกรอง ตัวกรองประกอบด้วยทรงกระบอกชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.8 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร ทำด้วยท่อพีวีซีเจาะรูขนาด 8 มิลลิเมตร จำนวน 83 รู อย่างสม่ำเสมอทั่วทรงกระบอก หุ้มด้วยผ้ากรองที่ทำจากใยสังเคราะห์มีขนาดรูพรุนประมาณ 12.34 ไมโครเมตร (ดังรูปที่ 4.2) ตัวกรองมีพื้นที่การกรองเท่ากับ 0.319 ตารางเมตร ทรงกระบอกชั้นนอกทำด้วยท่ออะคริลิกใส มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5.4, 6.4 และ 7.4 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างผนังตัวกรองกับผนังชั้นในของทรงกระบอกชั้นนอกมีค่าเท่ากับ 0.003, 0.008 และ 0.013 เมตร ดังแผนภาพของเครื่องกรองในรูปที่ 4.3 และ 4.4 (ภาพแบบเครื่องกรองในภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 4.2 ตัวกรองที่ใช้ในการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้



รูปที่ 4.3 ชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขนานตัวกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้



รูปที่ 4.4 แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบไฮดรอนานตัวกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุ่นได้

การทดลองกระบวนการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุ่นได้แบบต่อเนื่อง

ทำการทดสอบตัวกรองทุกครั้งของการทดลองโดยทำการวัดฟิวเตอร์ฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ ป้อนน้ำบริสุทธิ์เข้าสู่เครื่องกรองจนเต็มเครื่องกรองโดยใช้ปั๊มรีดผ่านสายยางซิลิโคน อัตราการไหลเท่ากับ 38 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการปรับความดันคร่อมตัวกรองโดยหมุนวาล์วของสายรีเทนเททจนปิดสนิท เนื่องจากตัวกรองมีลักษณะเป็นผ้าใยสังเคราะห์บาง และมีรูพรุนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีความต้านทานการกรองของตัวกรองต่ำ ทำการวัดค่าฟิวเตอร์ฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์โดยวัดปริมาตรของฟิวเตอร์ ภายในเวลา 1 นาที

จากนั้นเตรียมสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามตามความเข้มข้นที่กำหนด (20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร) โดยค่อยๆ ละลายผงเนื้อในเมล็ดมะขามในน้ำอย่างสม่ำเสมอ กวนสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง เป็นเวลา 10 นาที ทำการเก็บตัว

อย่างของสารแขวนลอยเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ โปรตีน และขนาดของอนุภาค จากนั้นหมุนตัวกรองให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการแล้วป้อนสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเข้าสู่เครื่องกรองจนเต็มเครื่องกรอง โดยใช้ปั๊มรีดผ่านสายยางซิลิโคน มีอัตราการไหลเท่ากับ 38 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการปรับภาวะการกรองให้ได้ความดันตามต้องการ ทำการวัดฟیلเตรตฟลักซ์เริ่มต้น และเก็บตัวอย่างของเหลวที่ผ่านตัวกรองและสารแขวนลอยในถังป้อน ทำการวัดฟیلเตรตฟลักซ์ ทุกๆ 5 นาที และเก็บตัวอย่างของเหลวที่ผ่านตัวกรองและสารแขวนลอยในถังป้อนเมื่อกระบวนการกรองเข้าสู่ภาวะคงที่ เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณพอลิแซคคาไรด์, โปรตีน และขนาดของอนุภาค ในระหว่างกระบวนการกรองนำของเหลวจากสายฟیلเตรต และสายรีเทนเททมารวมกับสารแขวนลอยในสายป้อนเพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารแขวนลอยในสายป้อนให้คงที่ตลอดการทดลอง และมีการควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิห้อง

4.4 สภาวะการทดลอง

ในการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อเมล็ดมะขามเพื่อแยกอนุภาคของโปรตีนด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ ทำการทดลองโดยแปรผันความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม, ความดันคร่อมตัวกรอง, ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง และระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก โดยกำหนดให้อัตราการไหลของสายป้อนมีค่าคงที่เท่ากับ 38 ลิตรต่อชั่วโมง มีภาวะการทดลองดังตารางที่ 4.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ภาวะการทดลองในการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเพื่อแยกอนุภาคของโปรตีนด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความดันคร่อมตัวกรองที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่างๆ (บาร์)		
	20 กรัมต่อลิตร	40 กรัมต่อลิตร	60 กรัมต่อลิตร
500	0.06	0.06	0.06
	0.07	0.07	0.08
	0.08	0.08	0.09
	0.1	0.1	0.1
1100	0.06	0.06	0.08
	0.07	0.07	0.09
	0.08	0.08	0.1
	0.1	0.1	-
1700	0.12	0.12	0.16
	0.14	0.14	0.18
	0.16	0.16	0.20
	0.2	0.18	0.22

และทำการทดลองแปรผันระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรอง โดยนำภาวะการทดลองที่ดีที่สุดจากตารางที่ 4.1 มาแปรผันระยะห่างระหว่างผนังตัวกรองกับผนังชั้นในของทรงกระบอกชั้นนอกมีค่าเท่ากับ 0.003, 0.008 และ 0.013 เมตร

4.5 การวิเคราะห์ (ภาคผนวก ก)

การวิเคราะห์ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

วิเคราะห์ปริมาณพอลิแซคคาไรด์โดยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก (Phenol-sulfuric method) (Dubois et.al., 1956)

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธีลาวรี (Lowry method) (Dunn M.J., 1992)

การวัดขนาดอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

วัดขนาดอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Coulter LS 230

การวิเคราะห์ปริมาณไขมันของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

วิเคราะห์ปริมาณไขมันตามวิธี AOAC.920.39 โดยใช้วิธี Soxhlet extraction

4.6 ความหมายของค่าต่างๆ ที่ใช้ในการแปรผลการทดลอง

ร้อยละการกำจัดโปรตีน

$$\text{ร้อยละการกำจัดโปรตีน} = \frac{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในสายฟิลเตรตที่ภาวะคงที่} \times \text{อัตราการไหลของฟิลเตรตที่ภาวะคงที่}}{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในถังปั่น} \times \text{อัตราการไหลของสายปั่น}} \times 100$$

ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

$$\text{ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์} = \frac{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในสายฟิลเตรตที่ภาวะคงที่} \times \text{อัตราการไหลของฟิลเตรตที่ภาวะคงที่}}{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในถังปั่น} \times \text{อัตราการไหลของสายปั่น}} \times 100$$

บทที่ 5

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

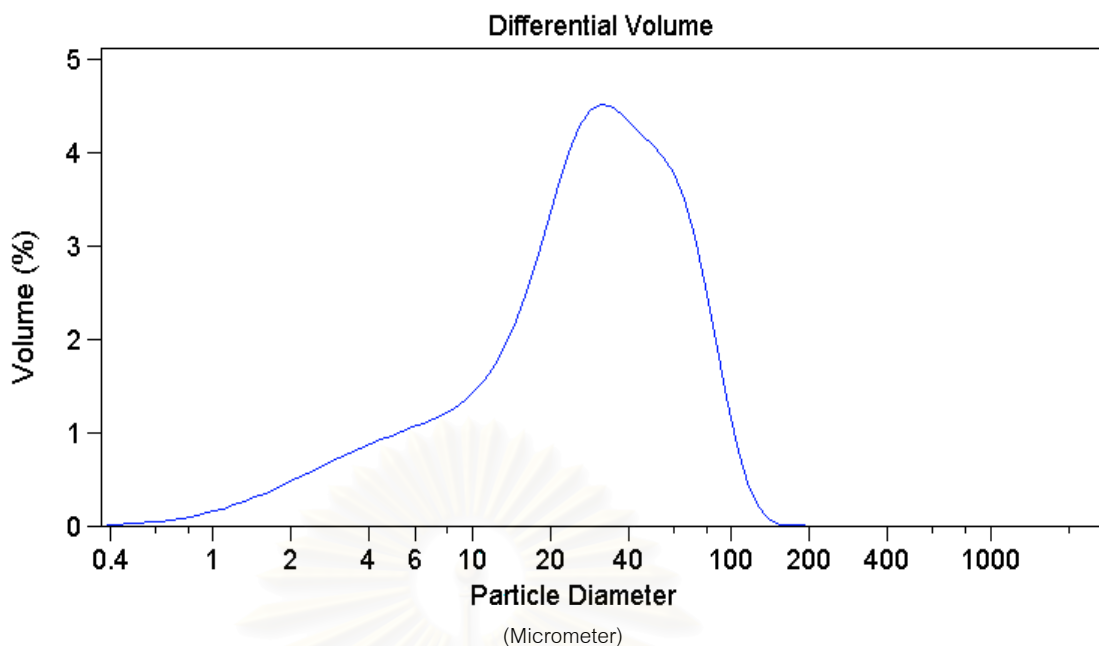
5.1 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ ปริมาณไขมัน และขนาดของอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

ผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองได้รับจาก บริษัท จี เอ็ม อีชีฮารา จำกัด มีปริมาณมากเพียงพอสำหรับการทดลองทั้งหมด และมีการผสมผสานกันอย่างทั่วถึง เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อนำผงเนื้อในเมล็ดมะขามมาวิเคราะห์ปริมาณต่างๆ ตามหัวข้อ 4.3.1 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
พอลิแซคคาไรด์	63.42-73.57
โปรตีน	15.36-16.54
ไขมัน	4.91-5.10
อื่นๆ	16.31-4.79

และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อกระจายตัวในน้ำประมาณ 22-23 ไมโครเมตร ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงเนื้อในของเมล็ดมะขามเริ่มต้น

ในการทดลองนี้ปัจจัยหนึ่งที่ต้องการศึกษา คือ ผลของความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามในสายบ่อนต่อการกรอง ดังนั้นจึงต้องทำการวัดความหนืด และความหนาแน่นของสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นที่ทำการศึกษา คือ 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าความหนืดและความหนาแน่นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามในน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (กรัมต่อลิตร)	ความหนืด (เซนติพอยส์)	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
20	2.41	1005
40	6.12	1011
60	17.70	1015

จากตารางที่ 5.2 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามในน้ำ จะทำให้ความหนืดของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้น และความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลของความหนืดต่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม มีสาเหตุมาจากในผงเนื้อในเมล็ดมะขามมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นสารจำพวกไฮโดรคอลลอยด์ หรือกัม มีสมบัติเป็นสารให้ความหนืด ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ปริมาณของพอลิแซคคาไรด์มีค่าสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ความหนืดของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

5.2 ผลการทดลองเพื่อเลือกชนิดของตัวกรอง

กรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ผ่านคลื่นเหนือเสียง ด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด เพื่อใช้ในการเลือกชนิดของตัวกรอง โดยแปรผันชนิดของตัวกรอง 4 ชนิด ที่มีขนาดของรูพรุนต่างกัน คือ ผ้ากรองที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ 3 ชนิด และ ตะแกรงสแตนเลสขนาด 33 ไมโครเมตร ที่ภาวะการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.3 (ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 5.3 ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ ขนาดของอนุภาคในฟิลเตรต ในการชะเค้ครั้งที่ 1 และปริมาณโปรตีนในเค้ต่อปริมาณเค้ จากการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาดโดยใช้ตัวกรองชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวกรอง	ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน	ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์	ขนาดของอนุภาคในฟิลเตรต (ไมโครเมตร)	ปริมาณโปรตีนในเค้ต่อปริมาณเค้
ผ้ากรองชนิดที่ 1	93.98	38.36	10.98	1.05×10^{-3}
ผ้ากรองชนิดที่ 2	95.07	56.30	12.34	8.77×10^{-4}
ผ้ากรองชนิดที่ 3	89.90	44.08	12.98	7.29×10^{-4}
ตะแกรงสแตนเลส ขนาด 33 ไมโครเมตร	94.38	61.68	13.12	4.39×10^{-4}

ในการเลือกชนิดของตัวกรองสำหรับเครื่องกรองชนิดหมุนได้ จะใช้ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนสูงสุดมาเป็นเกณฑ์ในการเลือกตัวกรอง จากตารางที่ 5.3 พบว่า ผ้ากรองชนิดที่ 2 เป็นผ้ากรองที่มีค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนสูงสุด แต่ก็สูญเสียพอลิแซคคาไรด์มาก ในขณะที่ผ้ากรองชนิดที่ 1 เป็นตัวกรองที่มีการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ต่ำกว่า จึงเป็นตัวกรองที่น่าสนใจเช่นกัน แต่ผ้ากรองชนิดที่ 1 มีค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนต่ำกว่าผ้ากรองชนิดที่ 2 และยังคงมีปริมาณโปรตีนตกค้างอยู่บนเค้กมาก (จากค่าปริมาณโปรตีนในเค้กต่อปริมาณเค้กในตารางที่ 5.3) ดังนั้นจึงเลือกผ้ากรองชนิดที่ 2 ในการทำตัวกรองในเครื่องกรองชนิดหมุนได้

5.3 ผลการทดลองการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้

ในการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ ก่อนทำการทดลองทุกครั้ง จะต้องทำการทดสอบตัวกรองโดยการกรองน้ำบริสุทธิ์ ให้ได้ค่าฟิลเตรตพลักซ์เท่ากับ 13,150 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง เพื่อแสดงว่าตัวกรองมีความสะอาดเท่ากันทุกครั้ง

5.3.1 ผลของความดันคร่อมตัวกรองและความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามในสายป้อนต่อการกรองที่ความเร็วรอบคงที่

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาผลของความดันคร่อมตัวกรอง ซึ่งขึ้นกับความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรอง และความเข้มข้นของสารแขวนลอยเท่ากับ 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร มีอัตราการไหลของสายป้อนเท่ากับ 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองคงที่ที่ 500 1100 และ 1700 รอบต่อนาที และโดยมีระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองและผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก เท่ากับ 0.008 เมตร

จากการที่ความหนืดและความหนาแน่นของสารแขวนลอยเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้น ดังนั้นในการคำนวณหาค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (จากสมการที่ 3.33) ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกน (จากสมการที่ 3.35) และอัตราการเฉือน (จากสมการที่ 3.39) จะต้องใช้ค่าความหนืดและความหนาแน่นจากตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.4

จากตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่า ในแต่ละความเข้มข้นของสารแขวนลอย เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง จะทำให้ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์และอัตราการเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนตัวกรอง จะทำให้การหมุนวนของสารแขวนลอยเกิดการปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรองมีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองคงที่ ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ และอัตราการเฉือนจะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของสารแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ค่าความหนาแน่นมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (ดังตารางที่ 5.2) ทำให้ค่าความหนืดคินามาติกมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ และอัตราการเฉือนมีค่าลดลง

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการกรองสารแขวนลอยด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดการหมุนวนและเกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของตัวกรองคือความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองและความเข้มข้นของสารแขวนลอย โดยต้องควบคุมให้อัตราการไหลของสายป้อนให้อยู่ในช่วงของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกนต่ำๆ (น้อยกว่า 100) (Kataoka และคณะ, 1977) ในงานวิจัยนี้ได้ควบคุมอัตราการไหลของสายป้อนที่ 38 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคำนวณได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกนที่ความเข้มข้นต่างๆอยู่ในช่วง 7 ถึง 50

ดังนั้นจากการพิจารณาค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกนที่ภาวะการกรองต่างๆ ในตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบกับรูปที่ 3.8 พบว่า มีรูปแบบการหมุนวนของเทย์เลอร์ในช่วงต่างๆ ดังนี้

ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร จะมีลักษณะการหมุนวนแบบราบเรียบ

ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร และที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร จะมีลักษณะการหมุนวนในช่วงการเปลี่ยนแปลง

ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร และที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 และ 40 กรัมต่อลิตร จะมีลักษณะการหมุนวนแบบปั่นป่วน

จากรูปที่ 5.2 ถึง 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์กับเวลาที่ใช้ในการกรองที่ความดันต่างๆ พบว่า ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 500 และ 1100 รอบต่อนาที ทุกๆ ความเข้มข้น ค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์ลดลงตามเวลา โดยลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และฟิลเตรตพลั๊กซ์จะมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที จะเข้าสู่ภาวะคงที่เร็วกว่า 500 รอบต่อนาที คือเมื่อทำการกรองไปได้ 20 นาที โดยที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที จะเข้าสู่ภาวะคงที่เมื่อทำการกรองไปได้ 35 นาที และที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 และ 40 กรัมต่อลิตร ค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์จะคงที่ตั้งแต่ในช่วงแรกของการกรอง ในขณะที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์มีค่าลดลงตามเวลา และมีค่าคงที่หลังจากทำการกรองไปได้ประมาณ 10 นาที ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกมีการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของตัวกรองในปริมาณน้อย แรงเฉือนยังสามารถเฉือนเค้กออกไปได้ ทำให้ฟิลเตรตพลั๊กซ์ที่ได้มีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการสะสมอนุภาคบนผิวหน้าตัวกรองมีมากกว่าแรงเฉือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ภาวะความดันคร่อมตัวกรองสูง และความเข้มข้นสูง ทำให้อนุภาคมีการสะสมบริเวณผิวหน้าตัวกรองมากขึ้น และอนุภาคมีการอัดตัวกันมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมของชั้นเค้กบริเวณผิวตัวกรองมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์มีค่าลดลงจนถึงค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์มีค่าคงที่

และรูปที่ 5.11 ถึง 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์ที่ภาวะการกรองคงที่กับความดันคร่อมตัวกรอง พบว่า ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที จะมีค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์สูงสุด รองลงมา คือ 1100 และ 500 รอบต่อนาทีตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนตัวกรอง จะทำให้การหมุนวนของสารแขวนลอยเกิดการปั่นป่วนมากขึ้น ค่าอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรองจึงมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ความต้านทานการกรองของชั้นเค้กมีค่าลดลง ทำให้ฟิลเตรตพลั๊กซ์มีค่าสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ภาวะการกรองคงที่ของแต่ละความเข้มข้น

ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรอง ค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์จะมีค่าลดลง โดยที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์จะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ 40 และ 60 ตามลำดับ

ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ที่ความเข้มข้น 20 และ 40 กรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรอง (0.06-0.08 บาร์) ค่าฟิลเตรตพลั๊กซ์จะมีสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ความดันคร่อม

ตัวกรองเท่ากับ 0.08 บาร์ และเมื่อเพิ่มความดันให้มีค่าสูงขึ้นอีก (0.1 บาร์) ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรอง ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีค่าต่ำลงและค่าต่ำที่สุด

ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที แต่มีความดันคร่อมตัวกรองสูงกว่า เนื่องจากที่ความเร็วรอบสูง จะมีการไหลของสารแขวนลอยในแนวรัศมีมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความดันคร่อมตัวกรองให้สูงขึ้น เพื่อให้สารแขวนลอยมีการไหลผ่านตัวกรองได้ โดยที่ความเข้มข้น 20 และ 40 กรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรอง (0.12-0.16 บาร์ ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร และ 0.12-0.14 บาร์ ที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร) ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดของแต่ละความเข้มข้น และเมื่อเพิ่มความดันให้มีค่าสูงขึ้นอีก (ความดันคร่อมตัวกรอง 0.2 บาร์ ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร และ 0.16-0.18 บาร์ ที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร) ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรอง (0.16-0.22 บาร์) ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีค่าต่ำลง และมีค่าต่ำที่สุด

ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำและความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองเพิ่มขึ้น (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบ 500 และ 1100 รอบต่อนาที และ ความเข้มข้น 20 และ 40 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที) ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ที่คำนวณได้จะมีค่าสูง (ตารางที่ 5.4) ทำให้การหมุนวนของสารแขวนลอยอยู่ในช่วงการหมุนวนแบบปั่นป่วน ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของตัวกรองมาก นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นต่ำจะมีการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวของตัวกรองน้อย ดังนั้นแรงเฉือนจึงสามารถเฉือนเคঁกออกไปได้ จึงทำให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์มีค่าสูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูงและความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองต่ำลง (ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที และ ความเข้มข้น 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบ 1100 และ 500 รอบต่อนาที) ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ที่คำนวณได้จะมีค่าต่ำ (ตารางที่ 5.4) ทำให้การหมุนวนของสารแขวนลอยอยู่ในช่วงการหมุนวนในช่วงการเปลี่ยนแปลง และแบบราบเรียบ ซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรองมีค่าน้อย และที่ความเข้มข้นสูงจะมีการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของตัวกรองมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ จึงทำให้ความต้านทานการกรองเนื่องจากชั้นเคঁกสูง ส่งผลให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์มีค่าต่ำ

จากผลการทดลองทั้งหมดจะได้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์สูงสุดเท่ากับ 9354 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของสารแขวนลอย 20 กรัมต่อลิตร และความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ จากรูปที่ 5.14 ถึง 5.16 แสดงค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความดันคร่อมตัวกรอง และรูปที่ 5.17 ถึง 5.19 แสดงค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความดันคร่อมตัวกรอง พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ที่ภาวะการกรองต่างๆ มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของค่าฟิลเตรตฟลักซ์ที่ภาวะการกรองคงที่ คือ ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตรจะมีค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์สูงสุด รองลงมาคือ ความเข้มข้น 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองพบว่า ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที จะมีค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์สูงสุด รองลงมา คือ 1100 และ 500 รอบต่อนาทีตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนตัวกรอง ค่าเพย์เลอร์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของตัวกรองมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการกรองของชั้นเค้กมีค่าลดลง อนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ที่มีขนาดเล็กผ่านตัวกรองออกมาในสายฟิลเตรตได้มากขึ้น ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนจึงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน

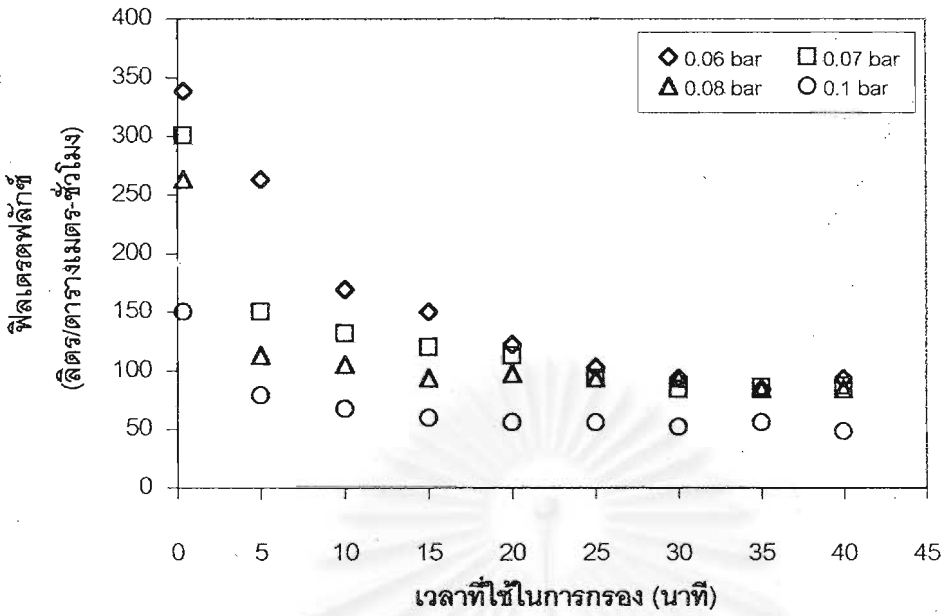
ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที มีค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ต่ำ โดยที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร เมื่อความดันคร่อมตัวกรองมีค่าสูงขึ้น (0.06 ถึง 0.08 บาร์) ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่ภาวะนี้เค้กบนผิวหน้าตัวกรองมีปริมาณน้อย เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรองทำให้อนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ที่มีขนาดเล็กที่สะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรองสามารถผ่านออกมาในสายฟิลเตรตได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanaka และคณะ, 2000 ศึกษาการเกิดเค้กระหว่างการกรองเซลล์ยีสต์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กของพอลิสไตรีน (Polystyrene) ปนอยู่ ด้วยไมโครฟิลเตรตชั้นแบบไหลขนานตัวกรอง พบว่า เมื่อรูพรุนของตัวกรองมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของพอลิสไตรีน เซลล์ยีสต์ (ขนาด 5 ไมโครเมตร) และอนุภาคพอลิสไตรีน (ขนาด 0.5 ไมโครเมตร) จะเกิดเป็นเค้กบนผิวหน้าของตัวกรองตั้งแต่ช่วงแรกของการกรอง และอนุภาคของพอลิสไตรีนจะผ่านชั้นของเซลล์ยีสต์และสะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรองดังแสดงในรูปที่ 5.20 ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า ภาวะการกรองที่เกิดเค้กบนผิวหน้าของ

ตัวกรองปริมาณน้อย อนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ที่มีขนาดเล็กจะผ่านชั้นของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าและสะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรอง เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรองจะเกิดแรงขับบริเวณผิวหน้าของตัวกรองทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กดังกล่าวผ่านออกมาในสายฟิลเตรตมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรองจนมีค่าเท่ากับ 0.1 บาร์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าลดลง และที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร และ 60 กรัมต่อลิตร ในสารแขวนลอยจะมีปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากชั้นเค้กมีค่าสูงขึ้น ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์จึงมีค่าต่ำลงมาก

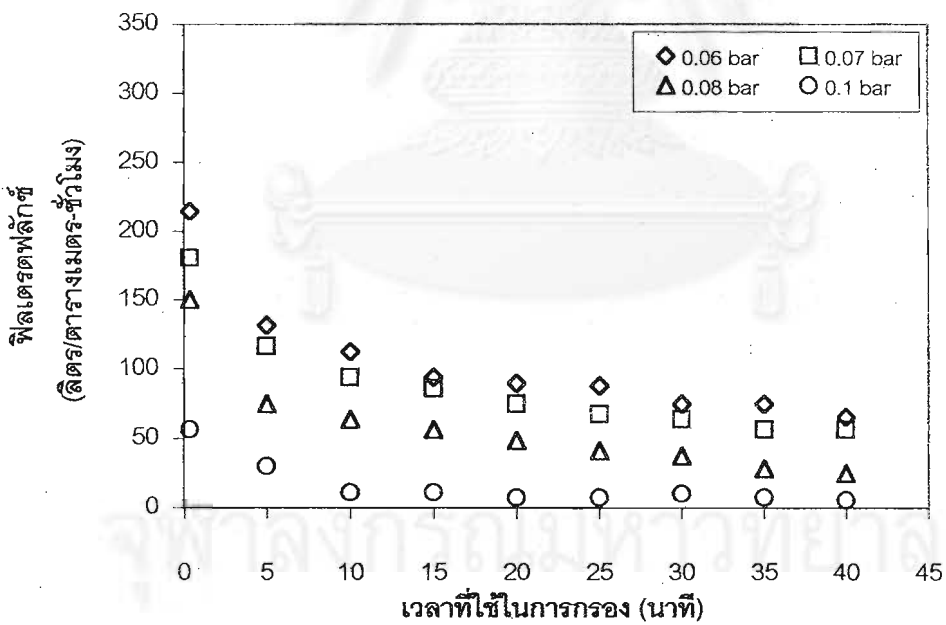
ที่ความเร็วรอบ 1100 และ 1700 รอบต่อนาที มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์เหมือนกัน คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารแขวนลอย ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์จะมีค่าลดลง และที่ความเข้มข้น 20 และ 40 กรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรองในช่วงแรก ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุด ที่ความดันคร่อมตัวกรองค่าหนึ่ง และเมื่อเพิ่มความดันให้มีค่าสูงขึ้นอีก ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรอง ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์จะมีค่าต่ำลง

จากผลการทดลองทั้งหมดจะได้ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์สูงสุดเท่ากับ 74.36 และ 40.31 ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของสารแขวนลอย 20 กรัมต่อลิตร และความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์

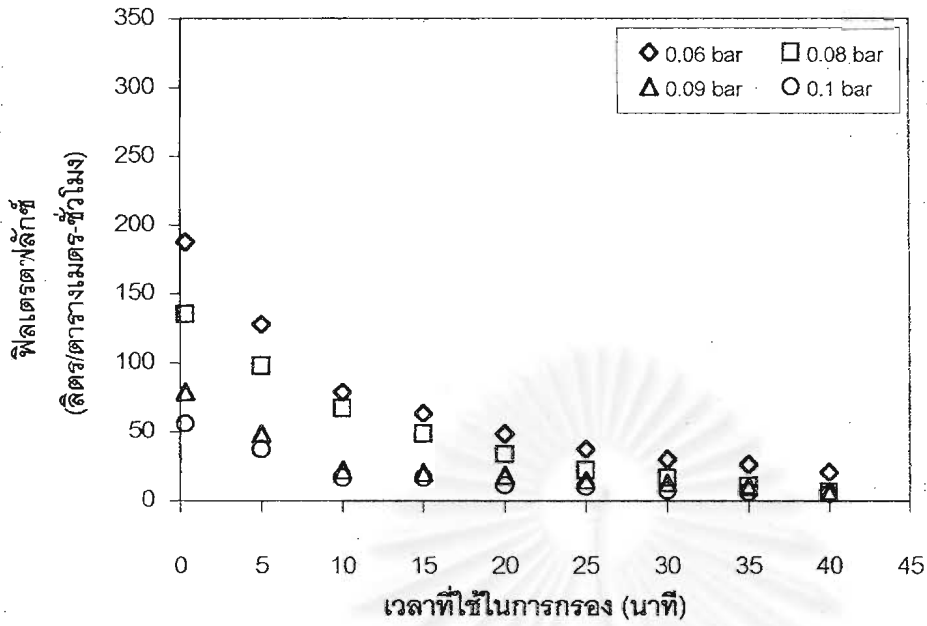
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



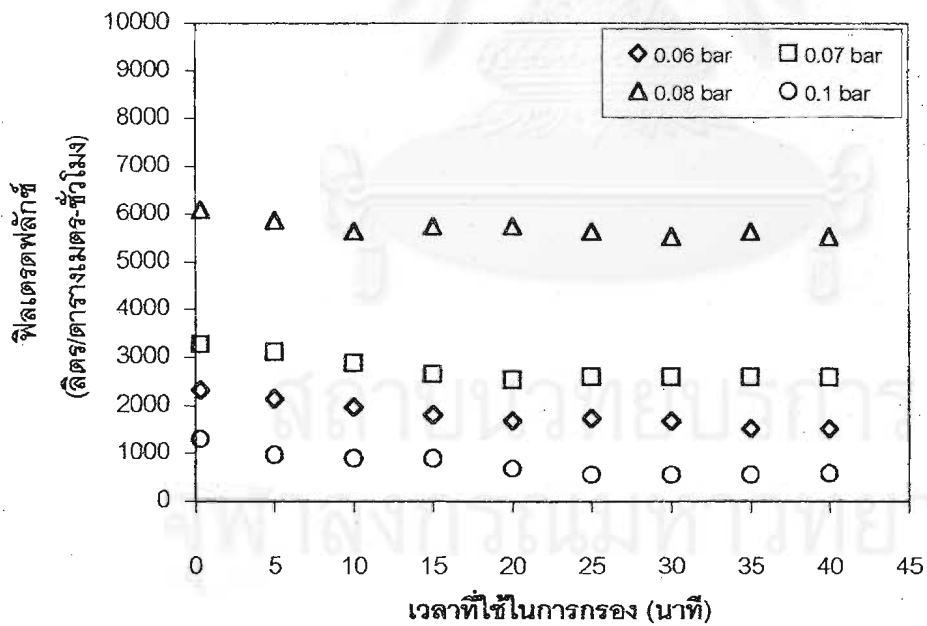
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างฟีดเตรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



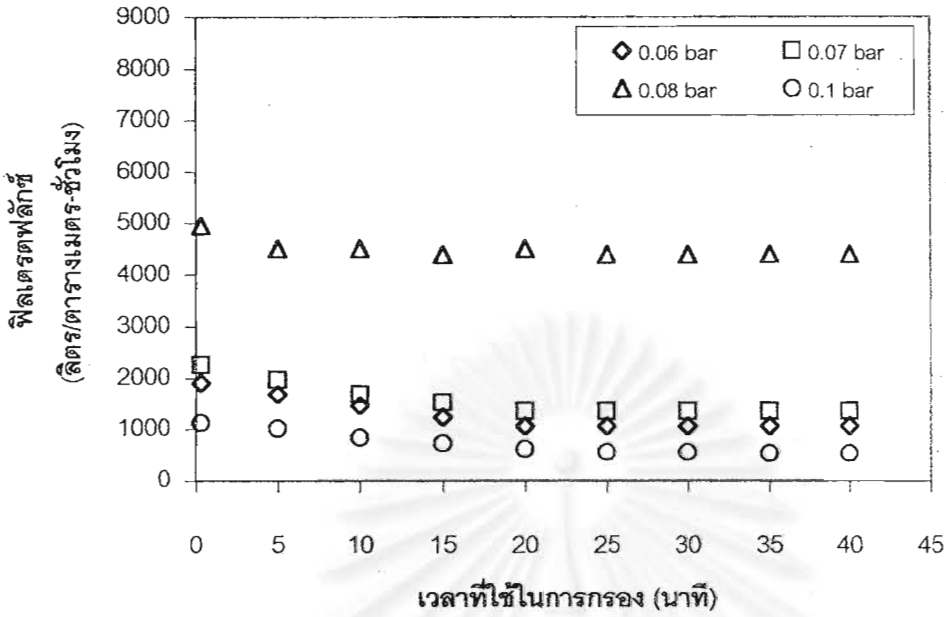
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟีดเตรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



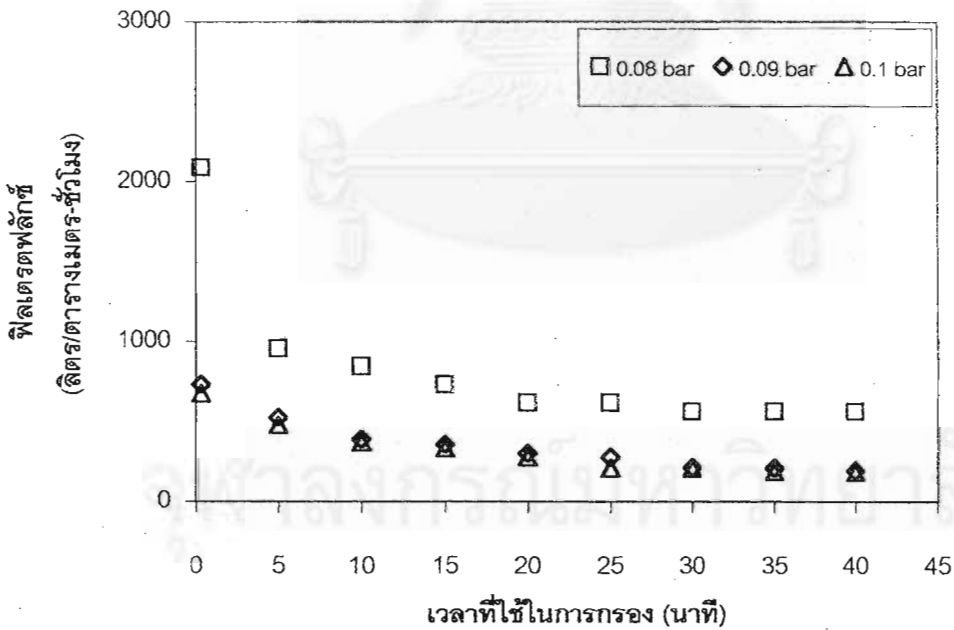
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างฟیلเตรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



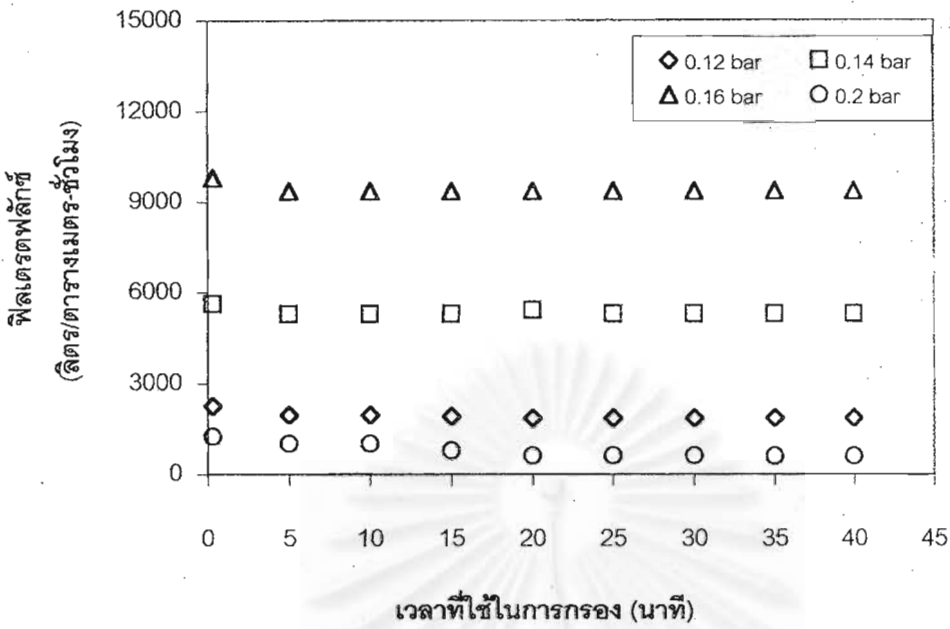
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟیلเตรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



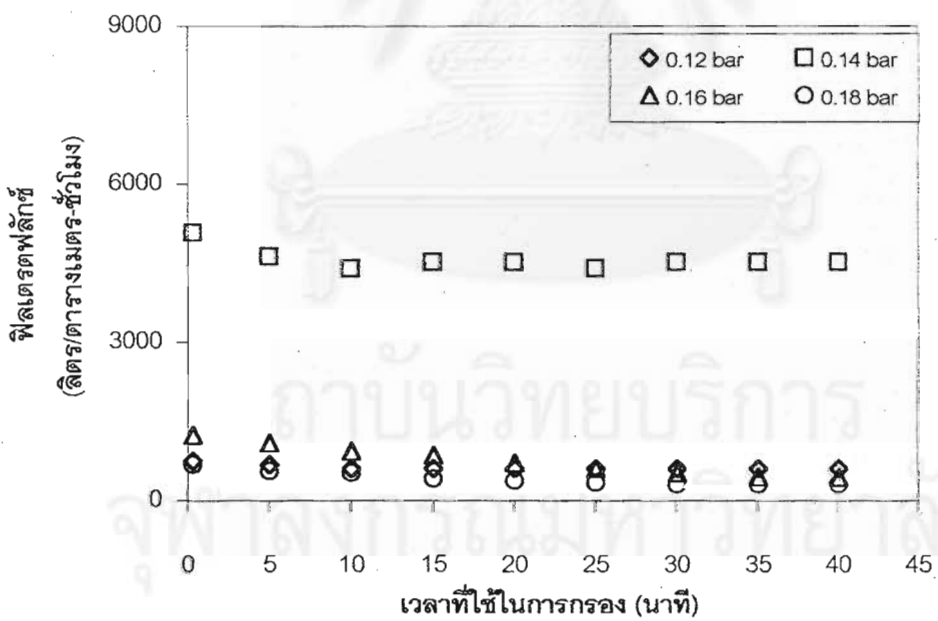
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟیلเตรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



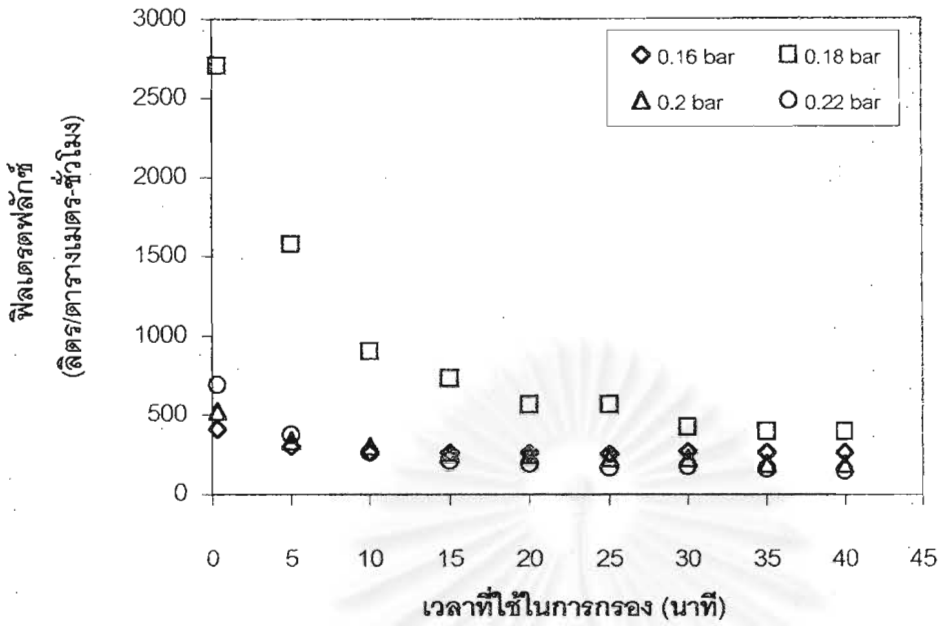
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟیلเตรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



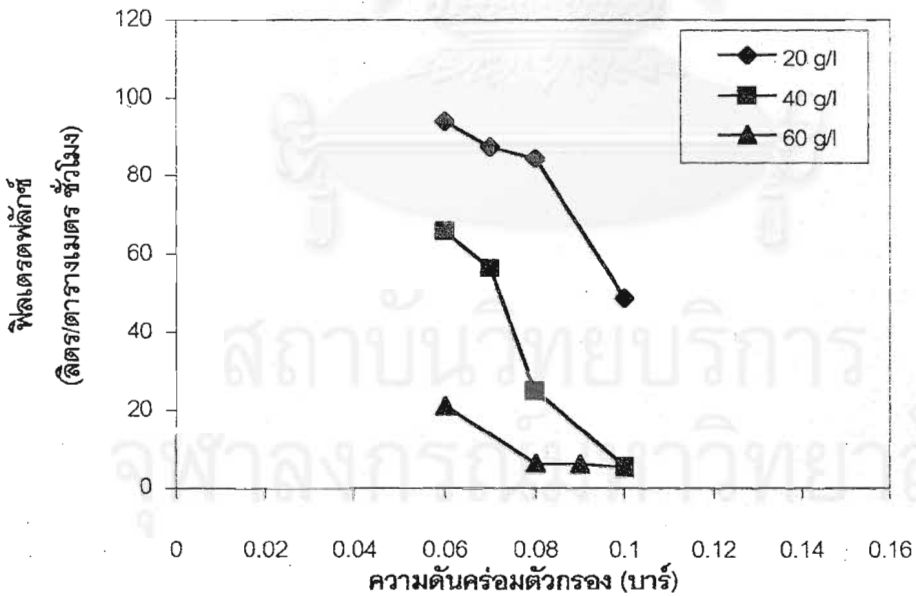
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลิตเรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



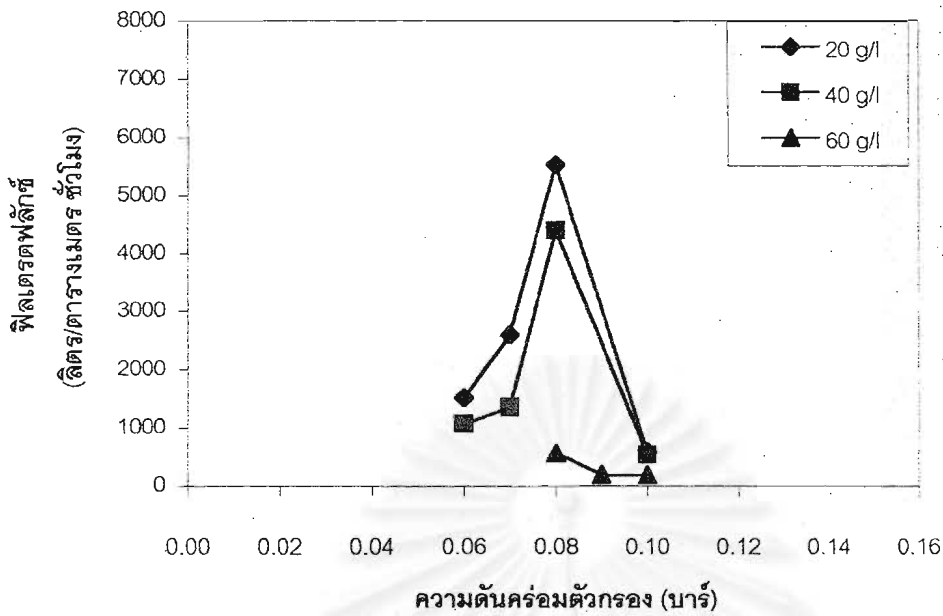
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลิตเรตฟลักซ์กับเวลา ที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



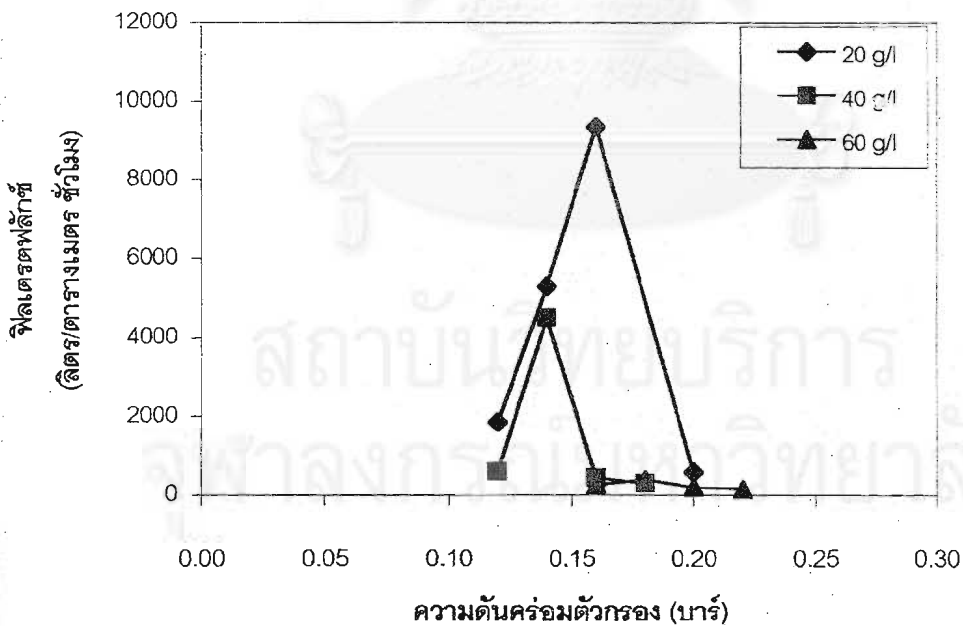
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ฟีดเพอร์เมตกับเวลา ที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที ที่ความดันคร่อมตัวกรองต่างๆ



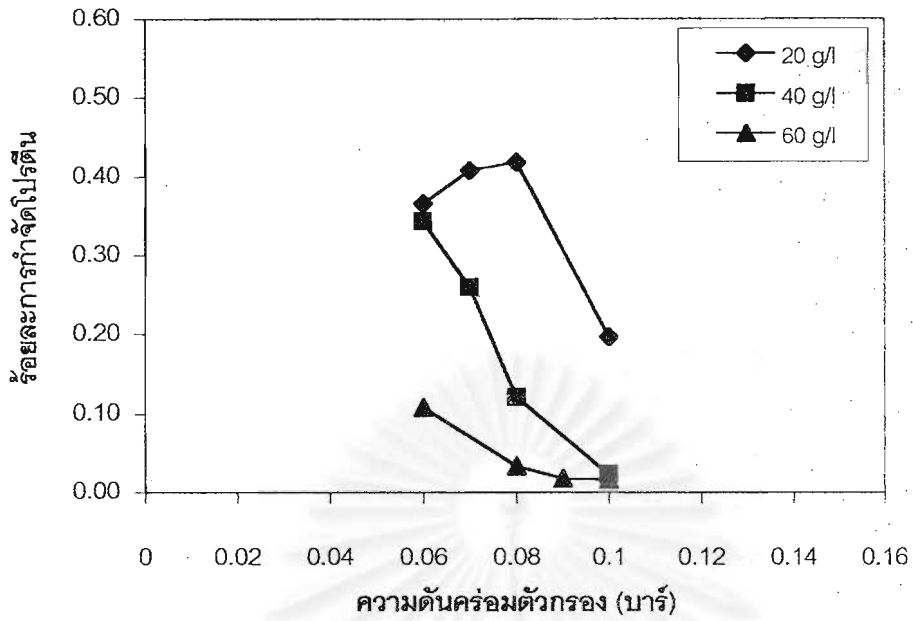
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ฟีดเพอร์เมตที่ภาวะการกรองคงที่กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที



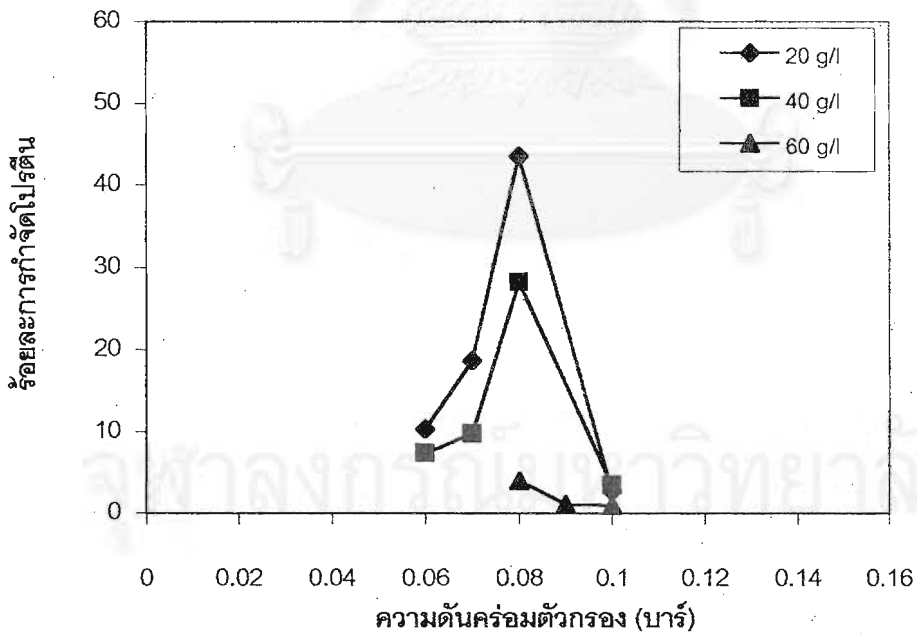
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพิลเดรตพลักซ์ที่ภาวะการกรองคงที่กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที



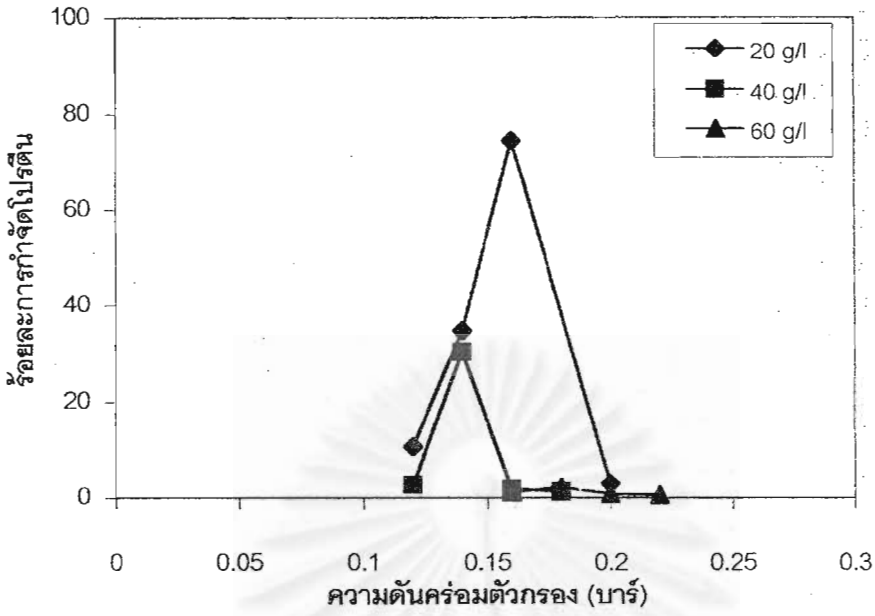
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพิลเดรตพลักซ์ที่ภาวะการกรองคงที่กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที



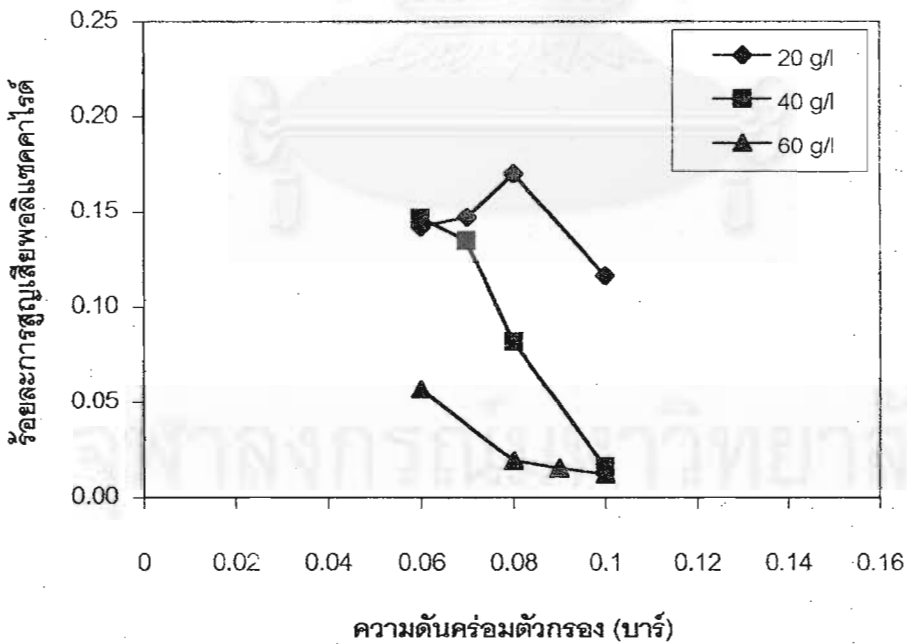
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความดันक्रमตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที



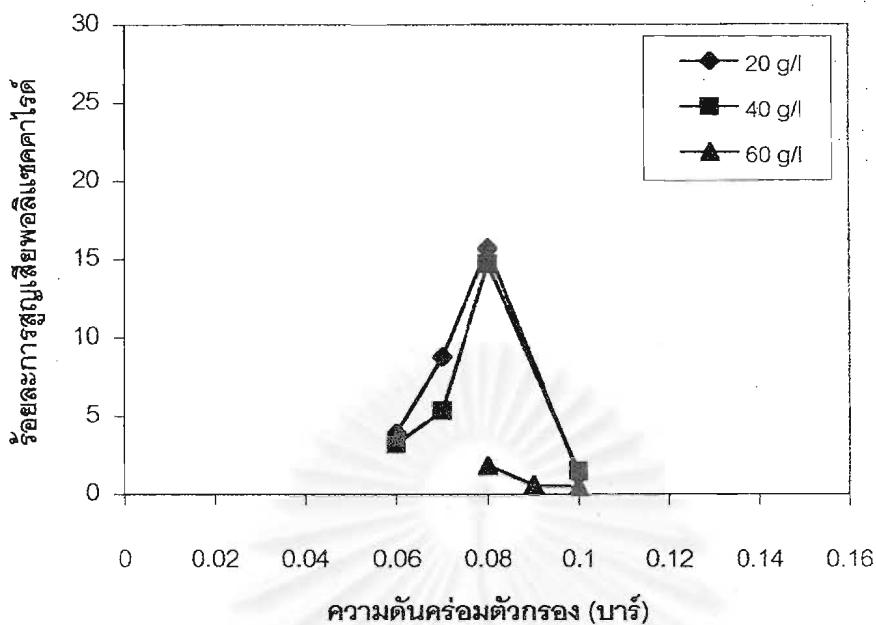
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความดันक्रमตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที



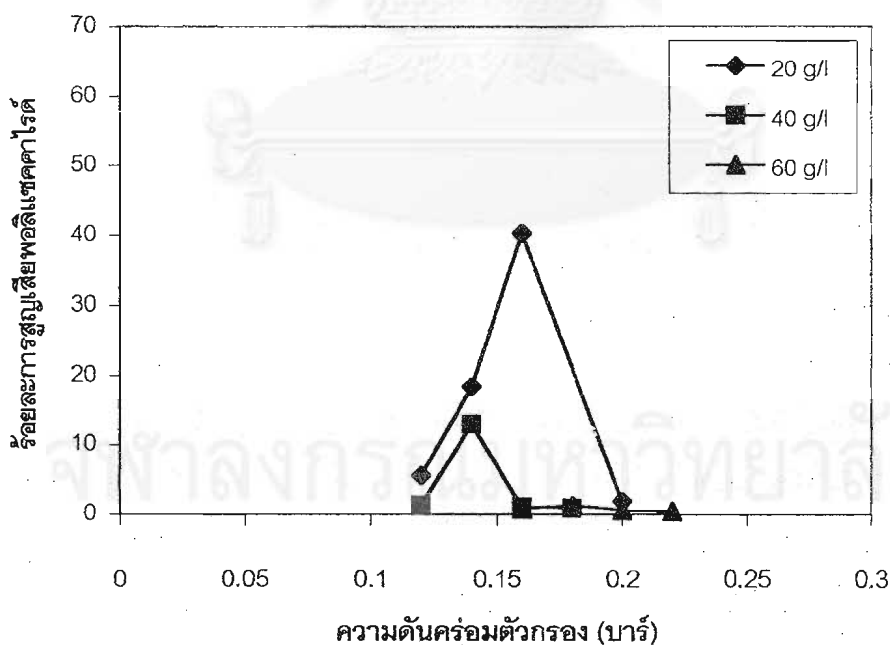
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที



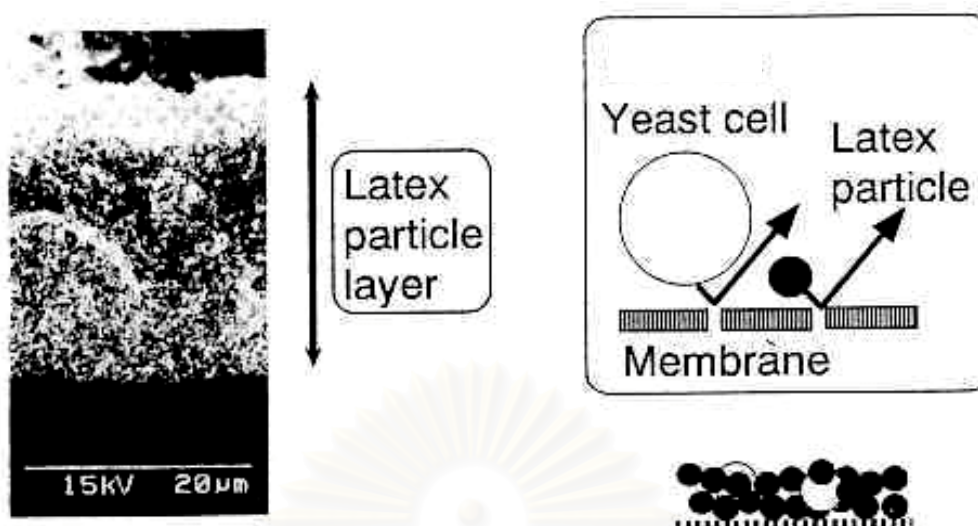
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 500 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1100 รอบต่อนาที



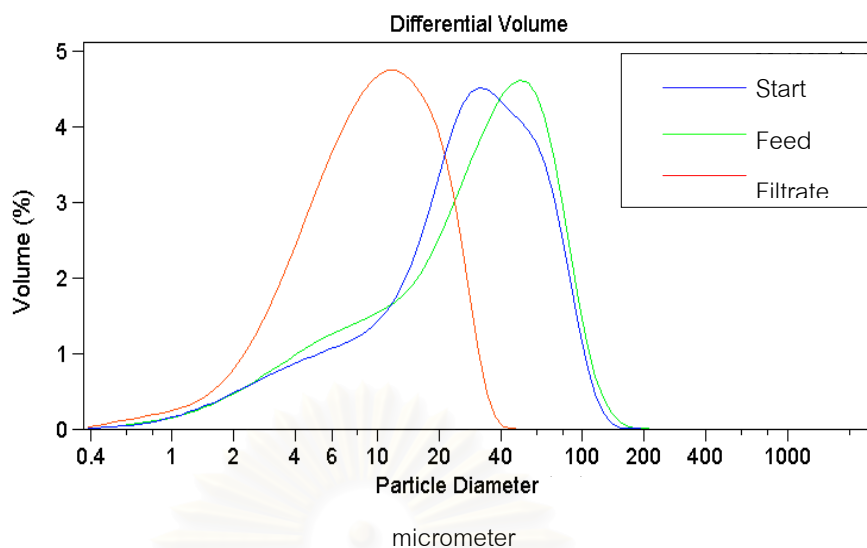
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความดันคร่อมตัวกรอง ความเข้มข้นของสายป้อน 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที



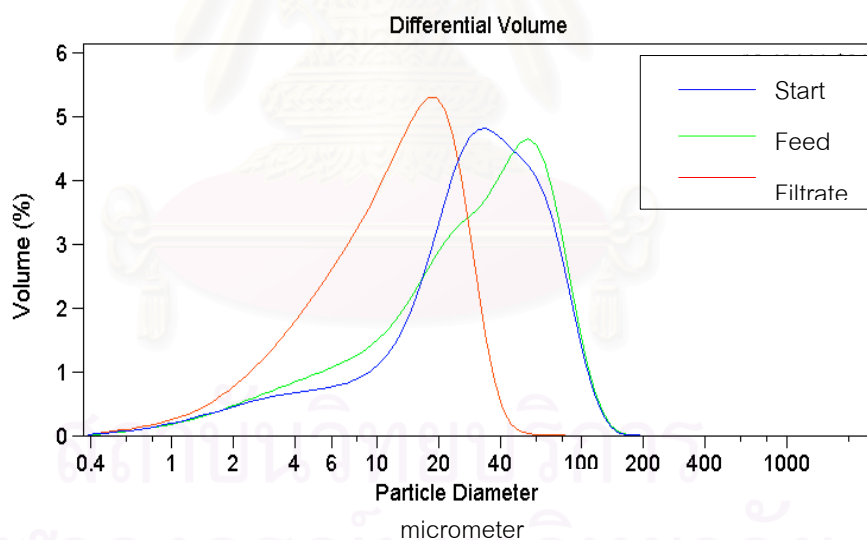
รูปที่ 5.20 ภาพตัดขวางแค้มที่ได้จากการกรองเมื่อรูปทรงของตัวกรองมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของพอลิไธรีน (Tanaka และคณะ, 2000)

เมื่อวัดขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามก่อนเริ่มต้น สารแขวนลอยในสายฟิลเตรต และในถังป้อนของทุก ๆ ภาวะการกรอง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำ พบว่า การกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามก่อนเริ่มต้น ในสายป้อน และในสายฟิลเตรตมีลักษณะต่างกัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1. ภาวะการกรองที่เหมาะสม คือ ภาวะการกรองที่ให้ค่าฟิลเตรตพลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์สูง ดังแสดงในรูปที่ 5.21 และ 5.22 อนุภาคเริ่มต้นจะมีการกระจายตัวของอนุภาคกว้างและมีขนาดใหญ่ แต่ในสายป้อนจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคแคบกว่า และเส้นกราฟการกระจายตัวของอนุภาคในสายป้อนและอนุภาคเริ่มต้น เริ่มแยกออกจากกัน แสดงให้เห็นว่าสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กออกไปได้ แต่เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กที่ถูกแยกออกไปมีปริมาณน้อย ดังนั้นอนุภาคส่วนใหญ่ของสายป้อนจึงยังคงมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของอนุภาคเริ่มต้น คือมีขนาดประมาณ 22-23 ไมโครเมตร ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยในสายฟิลเตรตจะมีการกระจายตัวแคบ อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 7-9 ไมโครเมตร ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ อนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ขนาดเล็ก (ภาคผนวก ข)

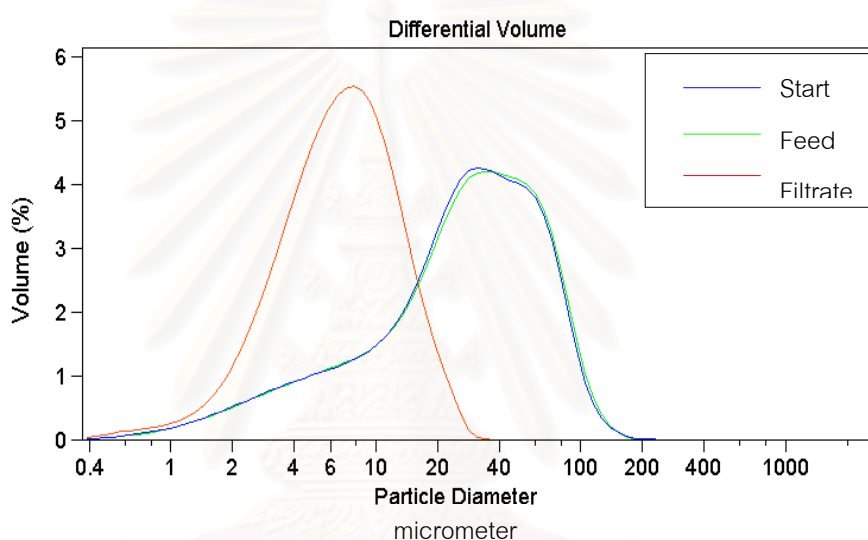


รูปที่ 5.21 ตัวอย่างการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น ในสายป้อน และสายฟิลเตรตของภาวะการกรองที่เหมาะสม ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.07 บาร์)



รูปที่ 5.22 ตัวอย่างการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น ในสายป้อน และสายฟิลเตรตของภาวะการกรองที่เหมาะสม ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.14 บาร์)

แบบที่ 2 ภาวะการกรองที่ไม่เหมาะสม คือ ภาวะการกรองที่ให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.23 การกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น และในสายป้อนมีลักษณะซ้อนทับกัน อนุภาคส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 22-23 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กออกได้น้อยกว่าภาวะข้างต้น ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยในสายฟิลเตรตจะมีการกระจายตัวเป็นโค้งแคบ อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 7-9 ไมโครเมตร และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ อนุภาคของโปรตีนและอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ขนาดเล็ก (ภาคผนวก ข)



รูปที่ 5.23 ตัวอย่างการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น ในสายป้อน และสายฟิลเตรตของภาวะการกรองที่ไม่เหมาะสม (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.06 บาร์ ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที)

ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองเท่ากับ 500 รอบต่อนาที ทุก ๆ ภาวะการกรองจะมีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบที่ 2

ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1100 และ 1700 รอบต่อนาที ที่ภาวะการกรองต่างๆ จะมีการกระจายตัวของอนุภาคทั้ง 2 แบบ โดยที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที การกระจายตัวของอนุภาคแบบที่ 1 เส้นกราฟการกระจายตัวของอนุภาคในสายป้อนและอนุภาคเริ่มต้น จะแยกออกจากกันชัดเจนกว่าที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที (รูปที่ 5.21 และ 5.22) ซึ่งมีลักษณะการกระจายตัวที่ภาวะการกรองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.5 และ 5.6

ตารางที่ 5.5 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของภาวะการกรองต่างๆ ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที

ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค	ภาวะการกรอง	
	ความเข้มข้นของสารแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)	ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)
แบบที่ 1 ภาวะการกรองที่ให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละสูญเสียพอลิแซคคาไรด์สูง	20	0.06
	20	0.07
	20	0.08
	40	0.07
	40	0.08
แบบที่ 2 ภาวะการกรองที่ให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ต่ำ	20	0.1
	40	0.06
	60	0.06
	60	0.08
	60	0.09
	60	0.1

หมายเหตุ รูปลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ภาวะการกรองต่างๆ แสดงในภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของภาวะการกรองต่างๆ ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที

ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค	ภาวะการกรอง	
	ความเข้มข้นของสารแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)	ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)
แบบที่ 1 ภาวะการกรองที่ให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละสูญเสียพอลิแซคคาไรด์สูง	20	0.12
	20	0.14
	20	0.16
	40	0.12
	40	0.14
แบบที่ 2 ภาวะการกรองที่ให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ต่ำ	20	0.2
	40	0.12
	40	0.18
	60	0.16
	60	0.18
	60	0.20
	60	0.22

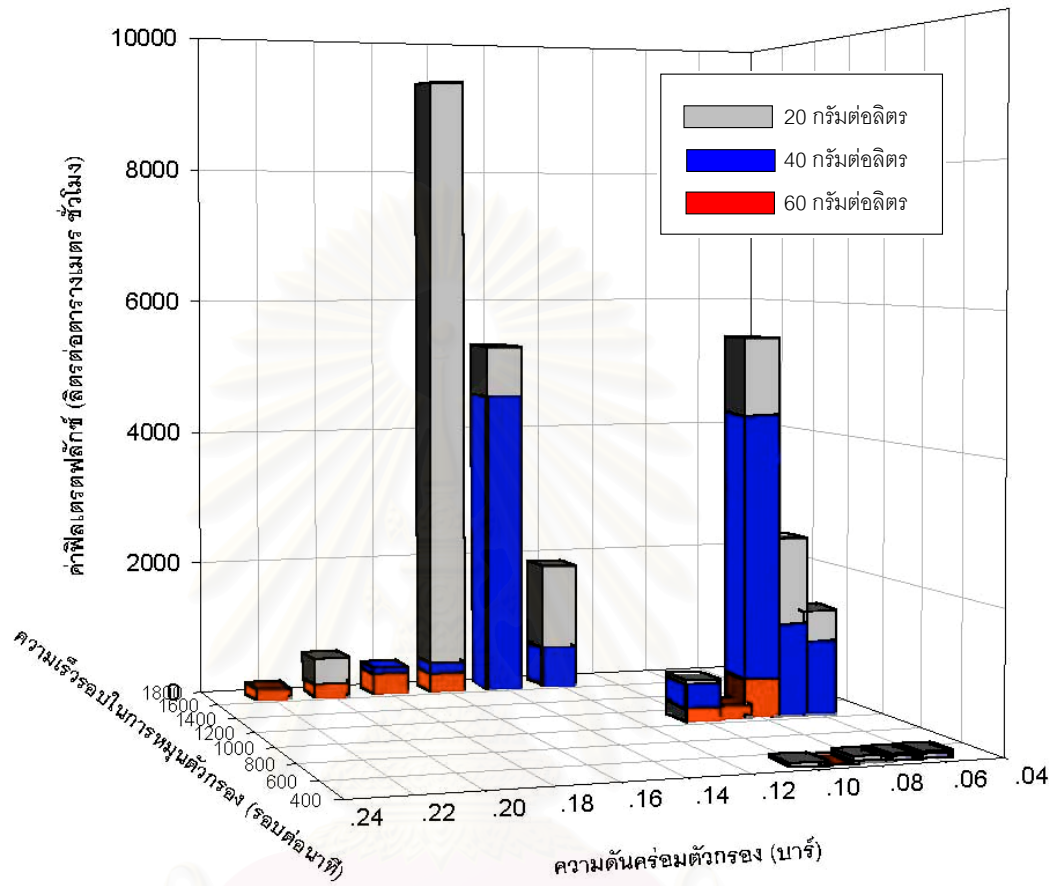
หมายเหตุ รูปลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ภาวะการกรองต่างๆ แสดงในภาคผนวก ค

5.3.2 ผลของความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองต่อการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

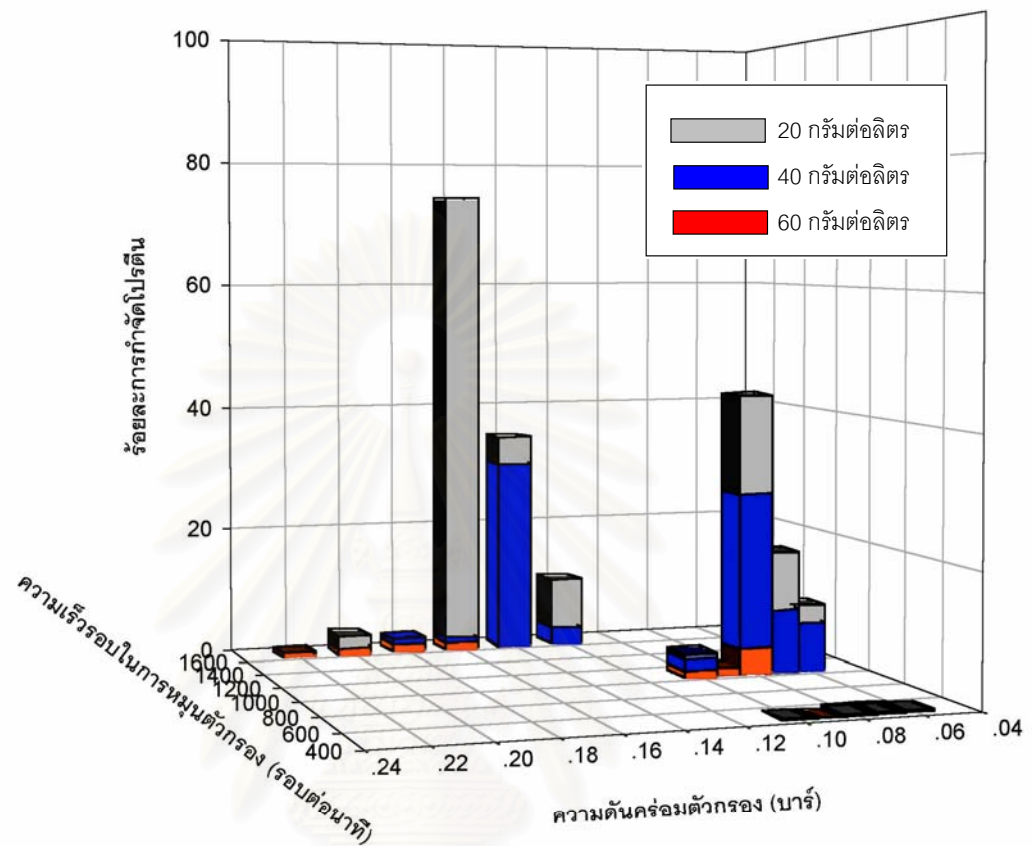
ทำการเปรียบเทียบผลของความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองที่ 500, 1100 และ 1700 รอบต่อนาที รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์คงที่กับความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรอง รูปที่ 5.25 และรูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ กับความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรอง ตามลำดับ แสดงให้เห็นผลของความเข้มข้นของสารแขวนลอย ความดันคร่อมตัวกรอง และความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองต่อการกรองในภาพรวม พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำ ความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรอง และ ความดันคร่อมตัวกรอง มีอิทธิพลต่อการกรองมาก กล่าวคือ เมื่อความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองเพิ่มขึ้น ความดันคร่อมตัวกรองที่เหมาะสมจะมีค่าสูงตามขึ้นไปด้วย ส่งผลให้ค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มความดันคร่อมตัวกรองให้มีค่าสูงขึ้นอีก จะส่งผลในทางตรงกันข้าม

ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง ความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองจะมีอิทธิพลต่อการกรองเพียงอย่างเดียว จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองจะทำให้ค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความดันคร่อมตัวกรองจะทำให้ค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าต่ำใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ภาวะการกรองที่มีความเหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนสูงสุด คือ ความเข้มข้นสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วยรอบ 1700 รอบต่อนาที ความคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ และ ที่ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกเท่ากับ 0.008 เมตร มีค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์เท่ากับ 9,354 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 74.36 และ 40.31 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกภาวะการกรองดังกล่าวไปทำการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองจากผนังด้านในของทรงกระบอกด้านนอกต่อการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

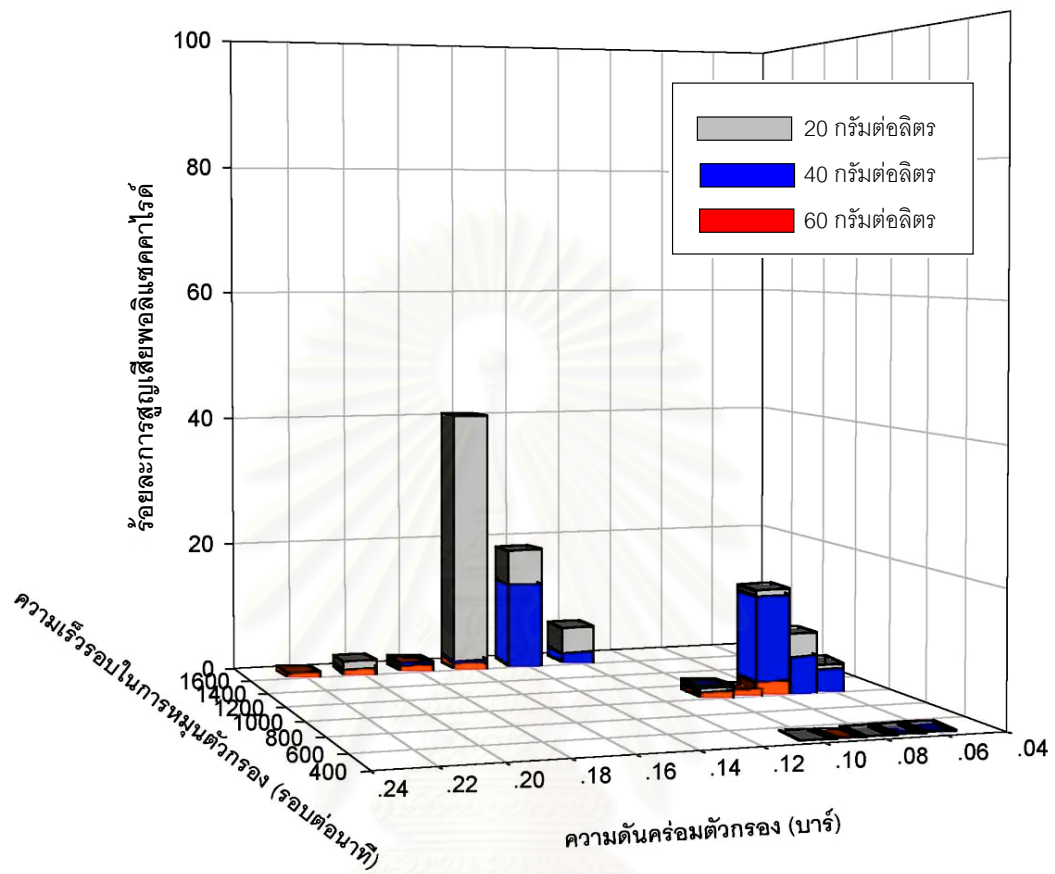


รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟีดเดอเรตฟลักซ์คงที่กับความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนกับความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับความเร็วยรอบในการหมุนตัวกรองและความดันคร่อมตัวกรองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

5.3.3 ผลของระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกต่อการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

ทำการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกต่อการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยทำการแปรผันระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกอีก 2 ค่า คือ 0.003 และ 0.013 เมตร ซึ่งสามารถคำนวณค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ ค่าเรย์โนลด์์ในแนวแกน และอัตราการเฉือน เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 5.3.1 ผลการทดลองดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์, ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในแนวแกน และอัตราการเฉือนของการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที, อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองและผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก เท่ากับ 0.003 0.008 และ 0.013 เมตร ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม 20 กรัมต่อลิตร

ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองและผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก (เมตร)	ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (-)	ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ในแนวแกน (-)	อัตราการเฉือน (ต่อวินาที)
0.003	1828	55	14003
0.008	7596	50	10704
0.013	15076	46	9280

จากตารางที่ 5.7 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการเฉือนจะมีค่าลดลง แต่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในแนวแกนยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ พบว่า ที่ทุกๆ ภาวะการทดลองจะเกิดการหมุนวนแบบปั่นป่วน (รูปที่ 3.8, Kataoka และคณะ, 1977)

จากรูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิวดเรตพลักซ์กับเวลาที่ใช้ในการกรอง และรูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิวดเรตพลักซ์ที่ภาวะการกรองคงที่กับระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของ

ตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก 0.003 เมตร ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีค่าลดลงตามเวลา โดยลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะคงที่หลังจากทำการกรองไปได้ประมาณ 10 นาที แต่ที่ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก 0.008 เมตรค่าฟิลเตรตฟลักซ์มีค่าคงที่ และที่ระยะห่าง 0.003 เมตรจะมีค่าฟิลเตรตฟลักซ์คงที่ต่ำกว่าที่ระยะห่าง 0.008 เมตร เนื่องจากเมื่อระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกมีค่าน้อย (0.003 เมตร) แค้กที่ถูกเขือนออกมาจากผิวหน้าของตัวกรอง จะเกิดการชนกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกที่หยุดนิ่งและอยู่ใกล้กับผิวของตัวกรอง ทำให้อุณหภูมิเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็วสูง อุณหภูมิจึงเคลื่อนที่กลับไปสะสมบริเวณผิวหน้าของตัวกรองอีกครั้ง และเกิดการอัดตัวกันมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการกรองเนื่องจากชั้นแค้กมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าลดลง (จากรูปที่ 5.29 และ 5.30)

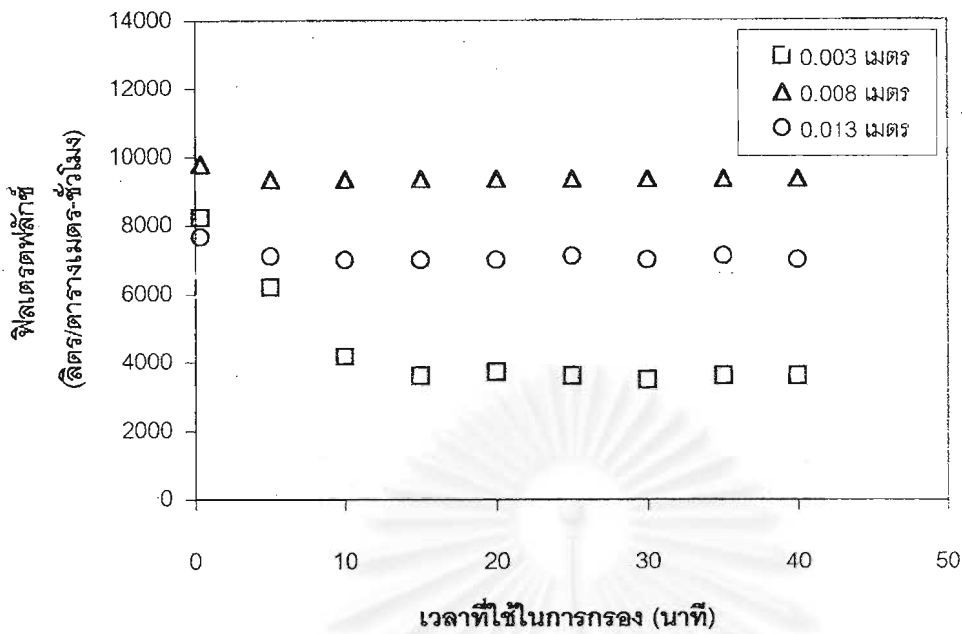
เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกจาก 0.008 เมตร เป็น 0.013 เมตร ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีค่าลดลง แต่ค่าฟิลเตรตฟลักซ์จะมีค่าคงที่เช่นเดียวกันกับ ที่ระยะห่าง 0.008 เมตร เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกกับอัตราการเขือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรอง ในสมการที่ 3.39 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกมีค่าสูงขึ้น อัตราการเขือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวกรองจะมีค่าลดลงทำให้ความต้านทานการกรองเนื่องจากชั้นแค้กมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าลดลงเช่นกัน (จากรูปที่ 5.29 และ 5.30)

การกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น ในสายป้อนและในฟิลเตรต ที่ระยะห่าง 0.003 เมตร (รูปที่ 5.31) การกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น และในสายป้อนมีลักษณะซ้อนทับกัน และมีขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกัน คือ 22-23 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้น้อยกว่าภาวะข้างต้น ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคในสายฟิลเตรตจะมีลักษณะเป็นโค้งแคบ อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของโปรตีนและพอลิแซคคาไรด์ที่มีขนาดเล็ก (ภาคผนวก ข)

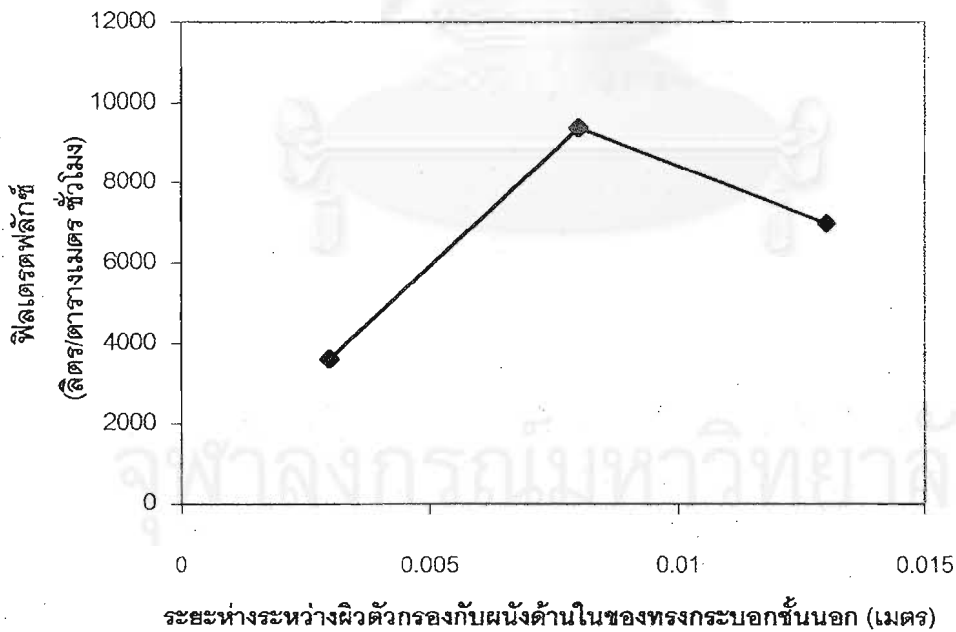
ที่ระยะห่างเท่ากับ 0.008 และ 0.013 เมตร ในรูปที่ 5.32 และ 5.33 พบว่า การกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้นมีการกระจายตัวกว้างและมีขนาดใหญ่ แต่ในสายป้อนจะมีการกระจายตัวแคบกว่า และเส้นกราฟการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น และในสายป้อน มีลักษณะแยกออกจากกัน แสดงให้เห็นว่าสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กออกไปได้ แต่เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กที่ถูกแยกออกไปมีปริมาณน้อย ดังนั้นอนุภาคส่วนใหญ่ของสายป้อนจึงยังคงมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคเริ่มต้น คือ มีขนาดประมาณ 22-23 ไมโครเมตร ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคในสายฟิลเตรตจะมีลักษณะเป็นคั้งแคบ อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 9-10 ไมโครเมตร และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของโปรตีนและพอลิแซคคาไรด์ที่มีขนาดเล็ก (ภาคผนวก ข)



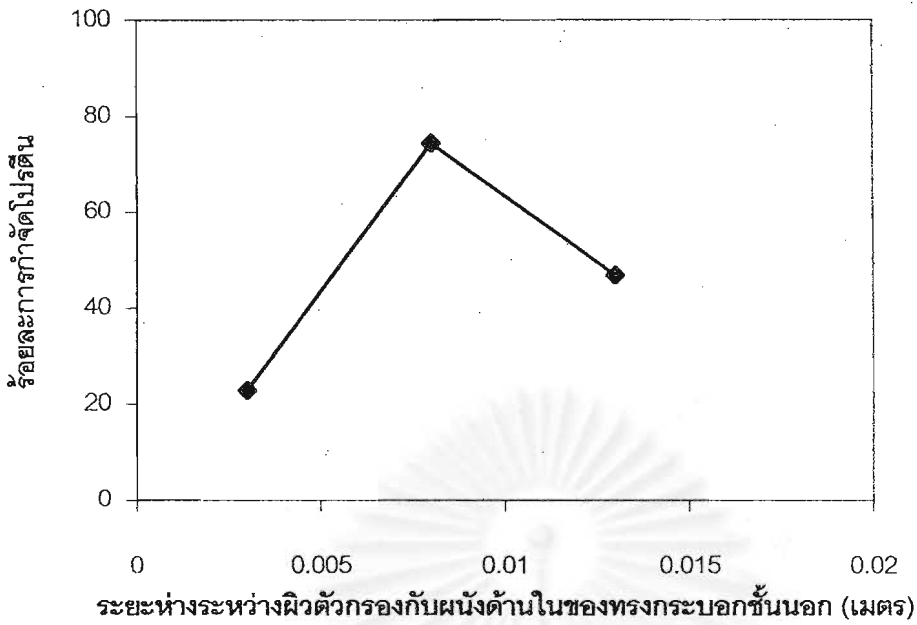
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



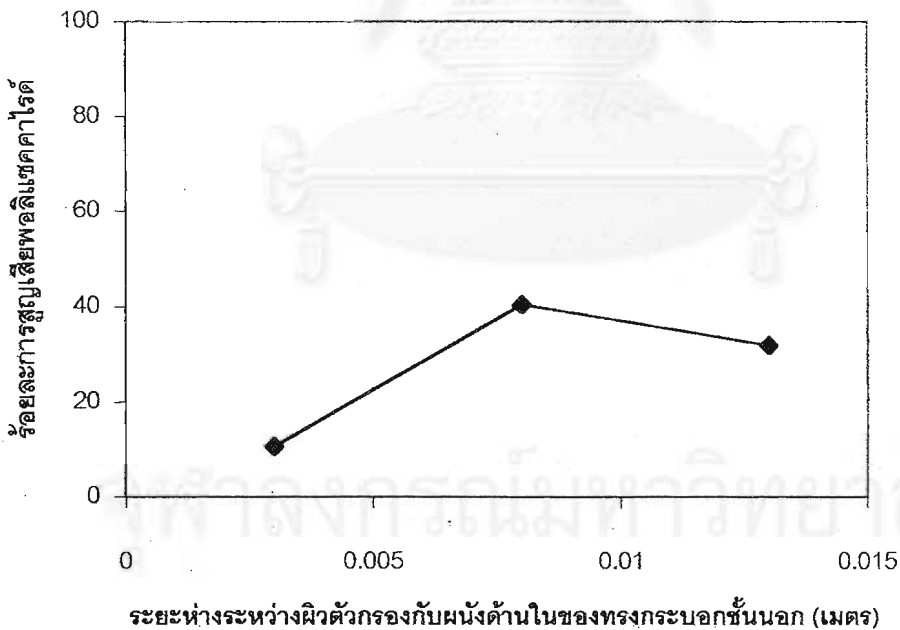
รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างฟیلเตรตฟลักซ์กับเวลาที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ที่ระยะห่างระหว่างผิวตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกต่างๆ



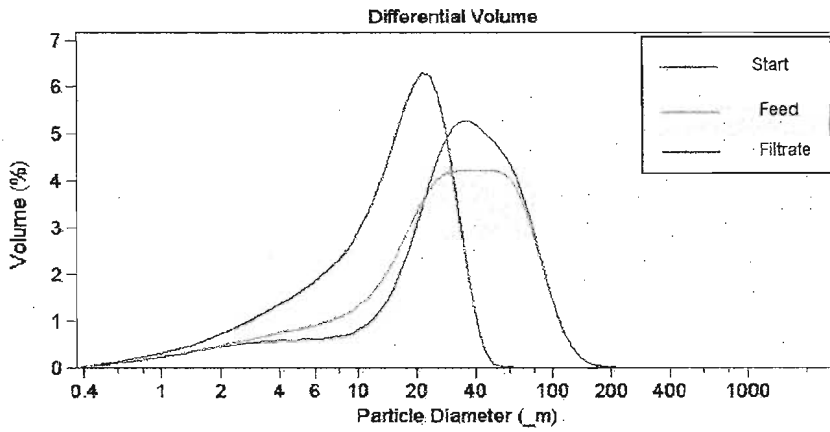
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างฟیلเตรตฟลักซ์กับระยะห่างระหว่างตัวกรองกับผนังของทรงกระบอกชั้นนอก ความเข้มข้นของสายป้อน 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที



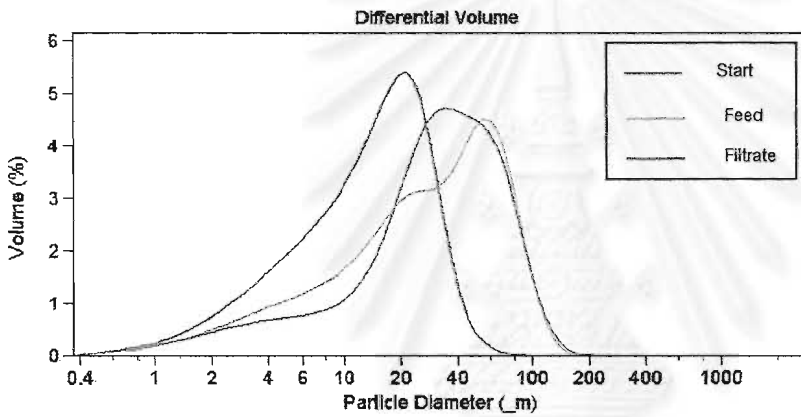
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีนกับระยะห่างระหว่างตัวกรองกับผนังของทรงกระบอกชั้นนอกต่างๆ ความเข้มข้นของสายป้อน 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที



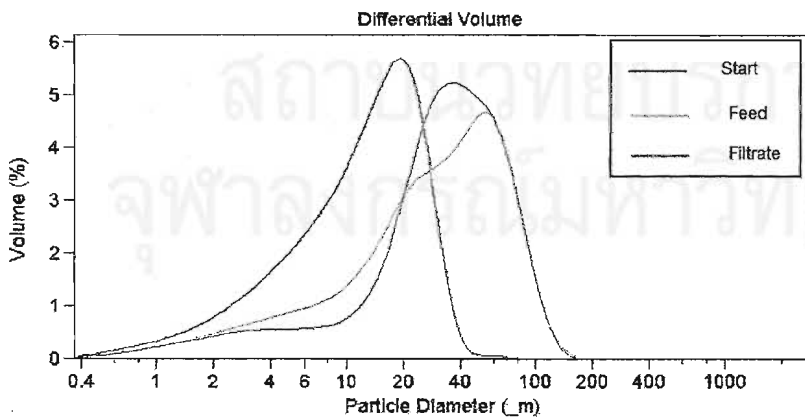
รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์กับระยะห่างระหว่างตัวกรองกับผนังของทรงกระบอกชั้นนอกต่างๆ ความเข้มข้นของสายป้อน 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน 1700 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.31 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก 0.003 เมตร ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์



รูปที่ 5.32 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก 0.008 เมตร ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์



รูปที่ 5.33 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างตัวกรองกับทรงกระบอกชั้นนอก 0.0013 เมตร ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์

จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่า ภาวะการกรองที่เหมาะสมที่สุดในการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ คือ ความเข้มข้นสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ และ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกเท่ากับ 0.008 เมตร

นำภาวะการกรองดังกล่าว มาทำการผลิตผลิตภัณฑ์ โดยนำสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูงในสายรีเทนเทท นำไปปั่นแยกอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ออกด้วยเครื่องเซนตริฟิว ความเร็วรอบในการหมุน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเทของเหลวด้านบนออก แบ่งเค้กที่ได้เป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำไปกระจายบนกระดาษฟิวส์ และอบที่อุณหภูมิน้อยกว่า 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเค้กที่ได้ไปบดด้วยครกบดจนเป็นผงละเอียด จะได้ผลิตภัณฑ์จากเครื่องกรองชนิดหมุนได้ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ และปริมาณไขมัน

ส่วนที่สอง นำเค้กที่ได้ไปละลายในสารละลายแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวล เพื่อศึกษาการสกัดไขมันด้วยสารละลายเอทานอล ทำการกวนเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นแยกสารละลายแอลกอฮอล์ออกด้วยเครื่องกรองด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด โดยใช้ผ้ากรองชนิดที่ 2 นำเค้กที่ได้บนกระจายในกระดาษฟิวส์ และอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเค้กที่ได้ไปบดด้วยครกบดจนเป็นผงละเอียด จะได้พอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากเครื่องกรองชนิดหมุนได้ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ และปริมาณไขมัน ผลการทดลองดังแสดงตารางที่ 5.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ของเมล็ดมะขาม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ที่ภาวะการกรองที่เหมาะสมที่สุด และพอลิแซ็กคาไรด์ของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ได้จากการกรองหลังจากการกวนด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวล

สารตัวอย่าง	ปริมาณโปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ผงเนื้อในเมล็ด มะขามเริ่มต้น	15.36	63.42	4.93	-
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก การกรองด้วยเครื่อง กรองชนิดหมุนได้	9.70	66.41	5.10	29.03
ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสาร ละลายเอทานอล	8.90	66.58	4.15	23.84

จากตารางที่ 5.8 พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องกรองชนิดหมุนได้ มีปริมาณโปรตีนลดลงคิดเป็นร้อยละ 36.85 ต่อการกรอง 1 รอบการกรอง ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสารละลายเอทานอลเป็นเวลา 20 นาที จะมีปริมาณโปรตีนลดลงอีกเพียงเล็กน้อย และมีปริมาณไขมันลดลงเล็กน้อยเช่นกัน (ร้อยละ 1) นอกจากนี้ยังพบว่า ผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเครื่องกรองชนิดหมุนได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.03 โดยน้ำหนัก และเมื่อผ่านสารละลายเอทานอล ผลได้ของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับร้อยละ 23.84 โดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามด้วยวิธีต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องกรองชนิดหมุนได้พบว่า ในผลิตภัณฑ์ยังมีปริมาณโปรตีนเหลืออยู่มาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ ผ่านการกรองเพียง 1 รอบ แต่มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าวิธีการสกัดโดยใช้เอนไซม์ไดแอสเทสและปาเปนร่วมกับสารละลายเอทานอล ในกรณีของพอลิแซคคาไรด์ การแยกด้วยวิธีนี้จะได้ปริมาณของพอลิแซคคาไรด์สูงกว่าวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมกับน้ำ แต่ไม่ดีกว่าวิธีการสกัดอื่น ๆ ในตารางที่ 5.9 อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มีข้อดีคือ สามารถกำจัดโปรตีนออกได้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสิ่งเจือปนน้อยลง เป็นกระบวนการต่อเนื่อง ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จึงไม่มีสารเคมีที่เป็นพิษในกระบวนการสกัด ลงทุนต่ำ และมีขั้นตอนการผลิตไม่ยุ่งยาก นอกจากนี้ยังสามารถขยายขนาดได้ง่ายอีกด้วย จึงเป็นแนวทางที่ดี ในการศึกษาการแยกอนุภาคของโปรตีนออกมจากเนื้อในเมล็ดมะขาม เพื่อผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามต่อไป

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการผลิต	ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ปริมาณไขมัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	แหล่งที่มา
1. แอร์ คลาสสิฟิเคชัน	6.7	79.7	2.6	10.2	Deguchi และ Shiba, 1966
2. ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ร่วมกับน้ำ	ไม่มีข้อมูล	26	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	Gordon, 1968
3. ใช้เอนไซม์ไดแอสเทส ร่วมกับ กับเอนไซม์ปาเปน และสกัด ด้วยสารละลายเอทานอล	13.43	80	1.42	80	พวงเพชร, 2521
4. ไฮโดรไซโคลนจำนวน 36 ตัว	<3	94	<1	25	Teraoka และ คณะ, 1990
5. ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับ การกรองด้วยเครื่องกรอง กรองชนิดไหลผ่านตัวกรอง โดยกวาดผิวหน้าตัวกรอง ด้วยใบกวาดและชะเค้ก 4 ครั้ง	4.844	93.62	1.54	29	วารีย์, 2544
6. ใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้	9.70	66.41	5.10	29.03	งานวิจัยนี้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น มีปริมาณพอลิแซคคาไรด์ร้อยละ 63.42-73.57 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 15.36-16.54 และปริมาณไขมันร้อยละ 4.91-5.10 องค์ประกอบอื่นๆ อีกร้อยละ 16.31-4.98 และมีอนุภาคเฉลี่ยเมื่อกระจายตัวในน้ำเท่ากับ 22-23 ไมโครเมตร

2. สมบัติการเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ (กัม) ของพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขาม ทำให้ความหนืดของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามในน้ำเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่สูงขึ้นในขณะที่ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อวัดความหนืดและความหนาแน่นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ความเข้มข้น 20 40 และ 60 กรัมต่อลิตร พบว่า มีความหนืดเท่ากับ 2.42 6.12 และ 17.70 เซนติพอยส์ และมีความหนาแน่นเท่ากับ 1005 1011 และ 1015 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

3. การทดลองเพื่อเลือกชนิดของตัวกรอง โดยใช้ชนิดของตัวกรอง 4 ชนิด คือ ผ้ากรองที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ 3 ชนิด และ ตะแกรงสแตนเลสขนาด 33 ไมโครเมตร กรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ผ่านคลื่นเหนือเสียง 5 นาทีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด และทำการชะล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์จำนวน 4 ครั้ง พบว่า ผ้ากรองชนิดที่ 2 เป็นผ้ากรองที่มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถกำจัดโปรตีนได้สูงสุด คือ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนเท่ากับ 95.07 ค่าร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 56.30 และมีขนาดของรูพรุนประมาณ 12.34 ไมโครเมตร

4. การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำ ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง และ ความดันคร่อมตัวกรอง มีอิทธิพลต่อการกรองมาก กล่าวคือ เมื่อความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองเพิ่มขึ้น ความดันคร่อมตัวกรองที่เหมาะสมจะมีค่าสูงตามขึ้นไปด้วย ส่งผลให้ค่าฟิลเตรตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าสูงขึ้น และที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองจะมีอิทธิพลต่อการ

กรองเพียงอย่างเดียว จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนตัวกรองจะทำให้ค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย

5. ผลของระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกต่อการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกที่เพิ่มขึ้นและลดลงกว่า 0.008 เมตร จะทำให้แรงเฉือนที่เกิดจากการหมุนวนของเทย์เลอร์มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์ ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์มีค่าลดลง

6. การกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ สามารถคัดขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยดูจากการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น ในสายป้อน และในสายฟิเตอร์ต โดยภาวะการกรองที่เหมาะสม การกระจายตัวของอนุภาคในสายป้อนจะแยกออกจากการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มต้น โดยมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 22-23 ไมโครเมตร ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคในสายฟิเตอร์ตจะมีลักษณะเป็นโค้งแคบ มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ย 7-9 ไมโครเมตร

7. ภาวะการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นสารแขวนลอย 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ และ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอกเท่ากับ 0.008 เมตร (ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์เท่ากับ 7596 ค่าอัตรา การเฉือนเท่ากับ 10704 และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกนเท่ากับ 50) ได้ค่าฟิเตอร์ตฟลักซ์เท่ากับ 9354 ลิตรต่อตารางเมตรชั่วโมง ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 74.36 และ 40.31 ตามลำดับ และผลผลิตภัณฑืที่ได้มีปริมาณโปรตีน ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ และปริมาณไขมันเท่ากับร้อยละ 9.70 66.41 และ 5.10 โดยน้ำหนักตามลำดับ และมีผลได้ของการผลิตภัณฑืเท่ากับร้อยละ 29.03 โดยน้ำหนัก

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ร่วมกับการใช้เอนไซม์ในกลุ่มโปรตีโอไลติก

2. ทำการศึกษาการแยกโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้โดยประยุกต์ใช้เทคนิคไดอะฟิลเตรชัน คอนเซนเตรชัน เนื่องจากวิจัยนี้พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการแยกโปรตีนจากเครื่องกรองชนิดหมุนได้ คือ ความเข้มข้นของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามต่ำ ซึ่งจะทำให้อัตราการผลิตพอลิแซคคาไรด์มีค่าต่ำ โดยที่ความเข้มข้นสูงจะมีประสิทธิภาพในการกรองต่ำ ดังนั้นจึงควรแยกทำการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ การอนุภาคของโปรตีนที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง (โดยใช้เอนไซม์) และทำการกรองอนุภาคของพอลิแซคคาไรด์ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามให้สูงขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมศุลกากร. ข้อมูลการนำเข้า-ส่งออกสินค้าประจำปี 2544

ข้อมูลเบื้องต้นของผงเนื้อในเมล็ดมะขามจากบริษัท จีเอ็ม อีชีฮารา. 2542

ทง กักรัชพันธุ์. เมล็ดมะขาม และกัม. วารสารอุตสาหกรรมเกษตร. 2(2534):29-34

ปราณี กิตติอนงค์. **การประยุกต์ใช้ไมโครฟิลเตรชันในกระบวนการกำจัดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอรี่ส์** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

พวงเพ็ชร นิธยานนท์. **การผลิตและการใช้ประโยชน์ของกัมจากเมล็ดมะขาม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2521
มนตรี จุฬาวัดมนพ และคณะ. **ชีวเคมี**. ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2542

วารี จารุวัฒนายนต์. **การผลิตโพลีแซคคาไรด์ของเมล็ดมะขามจากผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยการกรอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

ศิริรัตน์ วรรณะศิริ. **การผลิตกัมจากเมล็ดมะขาม**. รายงานสัมมนา ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2539

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Beaudoin, G., Jaffrin, M.Y. Plasma filtration in Couette flow membrane device. **Artif. Org.** 13 (1989) 43-51
- Belfort G., Joseph M. Pimbley, Anthony Greiner and Kun Yong Chung. Diagnosis of membrane fouling using a rotating annular filter 1. **J. memb. Sci.** 77 (1993): 1-22
- Bird R.B., Stewart W.E. and Lightfoot E.N. **Transport Phenomena.** New York: John Wiley and Son Inc. 1960
- Charles S., Parnham III and Robert H. Davis. Protein Recovery from Cell Debris Using Rotary and Tangential Crossflow Microfiltration. **Biotech. Bioeng.** 47 (1989): 155-164
- Das, D.B. and Basak, KK. A Study of the Viscosity of Decorticated Tamarind Seed Powder. **J. Ind. Chem. Soc.** 27 (1950): 115-122
- Deguchi Y and Shiba T. Process for Obtaining Tamarind Seed Jellose. **U.S. Patent** 3287350, 1966
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. and Smith F. Colorimetric method for Determination of Sugars and Related substances. **Analytical Chemistry.** 1956: 28 (3); 350-356
- Dunn, M.J. Protein determination of total protein concentration. Harris, E.L.V., Angal, S., (Eds), **Protein purification methods**, Oxford: IRL Press.
- Gerald O. **The Polysaccharides.** Academic Press, Inc. 1985. Vol 1-3
- Glickman M. **Gum technology in the Food Industry.** New York: Academic Press, 1969
- Gordon AL. Tamarind Seed Polysaccharides Recovery. **U.S. Patent.** 3399189, 1968
- Johansson, L. and S. Kashemsanta. **Industrial uses of Tamarind "Separation of tamarind seed testae".** ASRCT. pp. 1969
- Jones et. al. Purification of Tamarind Gum. **U.S. Patent.** 4074043, 1978
- Kataoka et.al. Heat/Mass Transfer in Taylor Vortex Flow with Constant Axial Flow Rate. **Int. J. Heat Mass Transfer.** (1977); 20: 57-63
- Kazunori N. et.al. Application of a Rotating Ceramic Membrane to Dense Cell Culture. **J. Ferment. Bioeng.** 76 (1993): 49-54

- Kooiman P. The Constitution of Tamarindus Amyloid. **Rec.Trav.Chem.** 80 (1961): 849-865
- Morton J. 1987. Available from : www.hort.purdue.edu/newcrop/morton/tamarind.html
- Murase et.al. High-speed microfiltration using a rotating, cylindrical, ceramic membrane. **Int. Chem. Eng.** 31 (1991): 370-378
- Muteus M. and Cabral J.M.S. Modeling Membrane Filtration of Protein and Cell Suspension in a vortex Flow Filtration System. **AIChE J.** 41 (1995): 764-772
- Niemann C. et.al. Arabinose-Containing Oligosaccharides from Tamarind Xyloglucan. **Starch/Starke.** 49 (1997): 154-159
- Savur GR. Characteristic of Tamarind Seed Polysaccharide. **J. Ind Chem. Soc.** 19 (1959): 67-70
- Shankaracharya N.B. Tamarind-Chemistry, Technology and Uses-A Critical Appraisal. **J. Food. Sci. Technol.** 35 (1998): 193-208
- Sila B. et. al. Functional and nutritional properties of Tamarind (Tamarindus indica) kernel protein. **Food. Chem.** 49 (1994): 1-9
- Smith A.D. et.al. **Oxford Dictionary of Biochemistry and Molecular Biology.** New York: Oxford University Press, Inc., 1997
- Somsiri A. **Pilot Scale Production of Tamarind Seed Polysaccharide.** M.Sc Thesis in Pharmacy, Faculty of Graduate Studies, Mahidol University, 1997
- Srivastava HC and Singh PP. Structure of Polysaccharide from Tamarind Kernel Powder. **Carb.Res.** 4 (1967): 326-342
- Standford. Clarified Tamarind Kernel Powder. **U.S. Patent.** 4429121, 1984
- Suttananta W. **Reology Studies on Tamarind Seed Polysaccharide from Tamarind Kernel Powder.** M.Sc Thesis in Pharmacy, Faculty of Graduate Studies, Mahidol University, 1991
- Tanja et.al. Protein Transmission During Dean Vortex Microfiltration of Yeast Suspension. **Biotech. Bioeng.** 65 (1999): 649-658
- Teraoka et.al. Process for Separating Polysaccharides from Tamarind seeds. **U.S. Patent.** 4895938, 1990
- Ulrich B.H. and Charles L.C. Quantitative Description of Ultrafiltration in a rotating Filtration Device. **AIChE J.** 37 (1991): 1219-1226

Veluraja K. et. al. Preparation of gum from Tamarind seed-and its application in the preparation of composite material with sisal fibre. *Carb. Polymers.* 34 (1997): 377-379

Zeman, Leo J. *Microfiltration and Ultrafiltration: Principle and Applications.* Marcell Derkker inc. (1996): 341-343



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์

1 การวิเคราะห์ปริมาณพอลิแซคคาไรด์

วิเคราะห์ปริมาณพอลิแซคคาไรด์โดยวิธีฟินอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric method) (Dubois et.al., 1956)

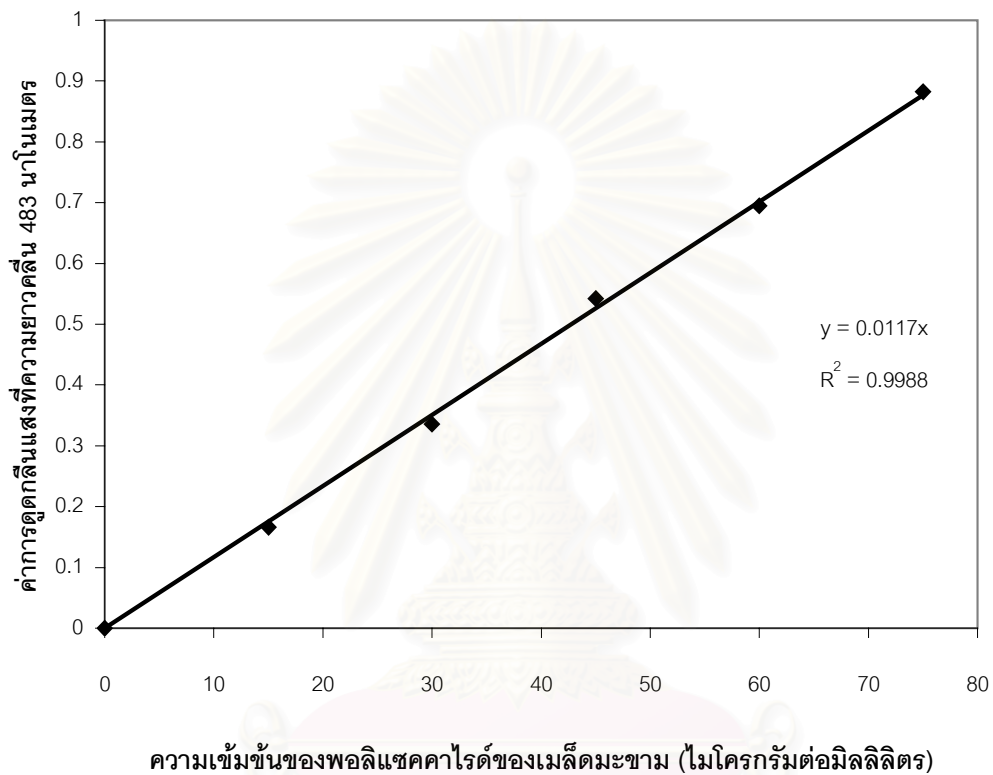
สารเคมี

1. สารละลายฟินอล ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น

วิธีการวิเคราะห์

1. นำสารตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณพอลิแซคคาไรด์จำนวน 1 มิลลิลิตร (โดยมีปริมาณพอลิแซคคาไรด์อยู่ระหว่าง 10-70 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เติมสารละลายฟินอลเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จำนวน 1 มิลลิลิตร และเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นจำนวน 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา
 2. แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-20 นาที
 3. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 483 นาโนเมตร แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาปริมาณพอลิแซคคาไรด์ โดยนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน
 4. การเตรียมกราฟมาตรฐาน ใช้พอลิแซคคาไรด์ของเมล็ดมะขามความเข้มข้นระหว่าง 10-70 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก 1 เส้นกราฟมาตรฐานของพอลิแซคคาไรด์ของเมล็ต้มะขาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

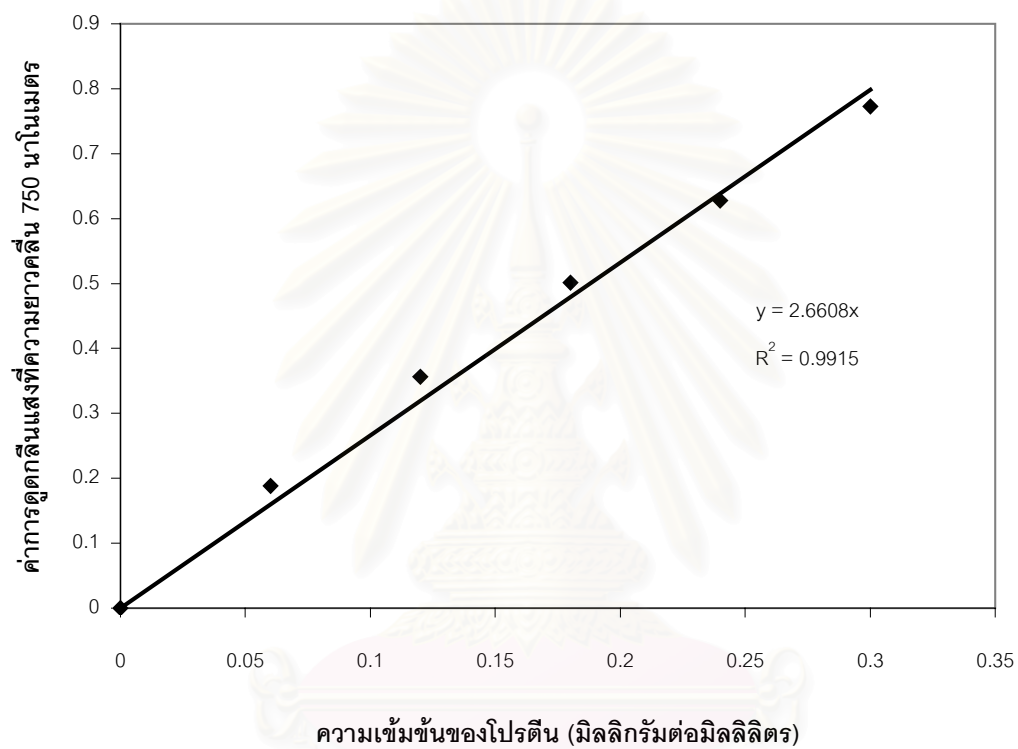
วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธีลาวรี (Lowry method) (Dunn M.J., 1992)

สารเคมี

1. สารละลาย A คือ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulphate) เข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
2. สารละลาย B คือ สารละลายโซเดียมโปแตสเซียมทาร์เตรต (sodium potassium tartrate) เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
3. สารละลาย C คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร
4. สารละลาย D คือ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) เข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
5. Folin-Ciocalteu reagent

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลาย E โดยผสมสาร C จำนวน 49 มิลลิลิตร และสารละลาย D จำนวน 49 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย A จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลาย B จำนวน 1 มิลลิลิตร โดยสารละลาย E จะต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง
2. เตรียมสารละลาย F โดยเจือจาง Folin-Ciocalteu reagent ด้วยน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:1
3. นำสารตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณโปรตีนจำนวน 0.5 มิลลิลิตร (โดยมีปริมาณโปรตีนไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม) เติมสารละลาย E จำนวน 2.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
4. เติมสารละลาย F จำนวน 0.25 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที
5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาปริมาณโปรตีน โดยนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน
6. การเตรียมกราฟมาตรฐาน ใช้โบวีนซีรัมอัลบูมินความเข้มข้นระหว่าง 0.05-0.3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ ก 2 เส้นกราฟมาตรฐานของโปรตีน

สถาบันนวัตยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

วิเคราะห์ปริมาณไขมันตามวิธี AOAC.920.39 โดยใช้วิธี Soxhlet extraction

สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์ จุดเดือด 40-60 องศาเซลเซียส

วิธีการวิเคราะห์

1. อบขวดสกัดที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วนำไปชั่งน้ำหนักของขวดสกัด
2. นำสารตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณไขมันปริมาณ 2 กรัม มาห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
3. นำสารตัวอย่างที่ห่อแล้วใส่ลงใน thimble ซึ่งบรรจุอยู่ในชุด Soxhlet
4. เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ซึ่งใช้เป็นตัวสกัดไขมันลงในขวดสกัดจำนวน 80 มิลลิลิตร และเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในชุด Soxhlet จำนวน 70 มิลลิลิตร
5. ให้ความร้อนแก่ปิโตรเลียมอีเทอร์ด้วยเพลทให้ความร้อน ทำการสกัดไขมันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
6. นำสารที่ได้ในขวดสกัดมากลั่นปิโตรเลียมอีเทอร์ออกจากส่วนไขมันที่สกัดได้
7. นำขวดสกัดไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น แล้วนำขวดสกัดมาชั่ง
8. นำน้ำหนักของขวดสกัดไปคำนวณหาปริมาณไขมัน โดยปริมาณไขมันที่สกัดได้คือ ผลต่างของน้ำหนักของขวดสกัดก่อนและหลังการสกัดไขมัน

4. การวัดขนาดอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม

วัดขนาดอนุภาคของผงเนื้อในเมล็ดมะขามโดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดอนุภาค (Particle analyzer) รุ่น Coulter LS 230

วิธีการใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค

1. เปิดโปรแกรม Coulter ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องวัดขนาดอนุภาค
2. เปิดเครื่องวัดขนาดอนุภาคทิ้งไว้ 30 นาที
3. ล้างเซลล์สำหรับวัดอนุภาคด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนเต็มเซลล์ แล้วทำการไล่ฟองอากาศในเซลล์
4. กดเลือกคำสั่ง run cycle ในโปรแกรม coulter เพื่อทำการวัด offset และวัด background ของเซลล์ จนโปรแกรมแสดงข้อความให้ใส่สารตัวอย่าง
5. ทำการใส่สารตัวอย่างลงในเซลล์วัดขนาดอนุภาคจนกระทั่ง ค่า obscuration อยู่ใน ช่วง 8-12 %
6. ใส่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่างที่ทำกรวัดอนุภาค และเลือกชนิดของตัวทำละลายเป็นน้ำ
7. กดคำสั่ง Done เพื่อให้เครื่องทำการวัดขนาดอนุภาค
8. เครื่องวัดขนาดอนุภาคจะใช้สมการ Fraunhofer model ในการคำนวณขนาดของอนุภาค



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข 1 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.06 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.06	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	338.11
5.00	262.98
10.00	169.06
15.00	150.27
20.00	122.10
25.00	103.31
30.00	93.92
35.00	84.53
40.00	93.92

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	3.12	14.41
สายป้อน	2.95	12.99
ฟิลเตรต	1.37	2.33

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.3	112.25	0.41	0.37

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.3	493.6752137	0.7	0.141793629

ตารางที่ ข 2 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.07 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.07	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	300.54
5.00	150.27
10.00	131.49
15.00	120.22
20.00	112.70
25.00	93.92
30.00	84.53
35.00	86.41
40.00	87.35

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	2.616	14.838
สายป้อน	2.721	13.812
ฟิลเตรต	1511	2.761

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.28	103.397	0.422	0.41

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.28	524.855	0.77	0.15

ตารางที่ 3 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.08 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.08	

เวลา (นาที)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	262.98
5.00	112.70
10.00	105.19
15.00	93.92
20.00	97.68
25.00	93.92
30.00	93.92
35.00	84.53
40.00	84.53

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	3.168	14.359
สายป้อน	3.086	12.598
ฟิลเตรต	1.815	3.009

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.27	117.25	0.49	0.42

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.27	478.74	0.81	0.17

ตารางที่ ข 4 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.1 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อนอก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.1	

เวลา (นาที)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	150.27			
5.00	78.89	อนุภาคเริ่มต้น	3.352	14.342
10.00	67.62	สายป้อน	3.352	14.171
15.00	60.11	ฟิลเตรต	1.609	4.017
20.00	56.35			
25.00	56.35			
30.00	52.60			
35.00	56.35			
40.00	48.84			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.16	127.39	0.251	0.20

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	0.16	538.496	0.627	0.12

ตารางที่ 5 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.06 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.06	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	214.14			
5.00	131.49	อนุภาคเริ่มต้น	6.848	28.342
10.00	112.70	สายป้อน	6.615	31.59
15.00	93.92	ฟิลเตรต	4.104	8.376
20.00	90.16			
25.00	88.28			
30.00	75.14			
35.00	75.14			
40.00	65.74			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.21	251.353	0.862	0.34

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.21	37.79	1200.410	0.15

ตารางที่ 6 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.07 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.07	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	180.33			
5.00	116.46	อนุภาคเริ่มต้น	6.742	31.385
10.00	93.92	สายป้อน	6.134	30.872
15.00	86.41	ฟิลเตรต	3.458	8.752
20.00	75.14			
25.00	67.62			
30.00	63.87			
35.00	56.35			
40.00	56.35			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.18	239.928	0.622	0.26

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.18	1173.128	1.575	0.13

ตารางที่ 7 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.08 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.08	

เวลา (นาที)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	150.27			
5.00	75.14	อนุภาคเริ่มต้น	6.494	31.145
10.00	63.87	สายป้อน	6.705	28.034
15.00	56.35	ฟิลเตรต	3.848	10.872
20.00	48.84			
25.00	41.32			
30.00	37.57			
35.00	28.18			
40.00	25.05			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.08	254.781	0.308	0.12

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.08	1065.29	0.87	0.08

ตารางที่ 8 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.1 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.1	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	56.35			
5.00	30.05	อนุภาคเริ่มต้น	6.772	29.333
10.00	11.27	สายป้อน	6.652	29.538
15.00	11.27	ฟิลเตรต	3.187	9.915
20.00	7.51			
25.00	7.51			
30.00	10.02			
35.00	7.51			
40.00	5.64			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.02	252.781	0.057	0.02

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.02	1122.462	0.178	1122.283

ตารางที่ ข 9 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.06 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.06	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	187.84			
5.00	127.73	อนุภาคเริ่มต้น	11.688	54.957
10.00	78.89	สายป้อน	12.872	44.786
15.00	63.87	ฟิลเตรต	7.874	14.402
20.00	48.84			
25.00	37.57			
30.00	30.05			
35.00	26.30			
40.00	21.04			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.07	489.139	0.529	0.108

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.07	1701.88	0.968	0.057

ตารางที่ 10 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.08 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.08	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	135.24			
5.00	97.68	อนุภาคเริ่มต้น	11.82	51.368
10.00	67.62	สายป้อน	12.158	45.043
15.00	48.84	ฟิลเตรต	7.61	15.983
20.00	33.81			
25.00	22.54			
30.00	16.91			
35.00	11.27			
40.00	6.39			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.02	462.004	0.155	0.03

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.02	1711.624	0.326	0.02

ตารางที่ ข 11 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.09 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.09	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	78.89
5.00	48.84
10.00	22.54
15.00	20.66
20.00	18.78
25.00	15.03
30.00	13.15
35.00	10.02
40.00	6.26

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	13.135	55.427
สายป้อน	13.436	51.111
ฟิลเตรต	4.51	14.53

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.02	510.561	0.09	0.02

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.02	1942.22	0.291	0.015

ตารางที่ ข 12 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.1 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	500	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.1	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	56.35
5.00	37.57
10.00	16.91
15.00	16.91
20.00	11.27
25.00	10.02
30.00	7.51
35.00	6.57
40.00	5.32

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	12.026	55.171
สายป้อน	13.192	48.974
ฟิลเตรต	4.811	13.12

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.02	501.278	0.082	0.016

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.02	1861.026	0.223	0.012

ตารางที่ ข 13 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.06 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.06	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	2310.43			
5.00	2141.37	อนุภาคเริ่มต้น	3.525	16.838
10.00	1972.32	สายป้อน	3.044	13.744
15.00	1803.26	ฟิลเตรต	2.45	4.171
20.00	1690.56			
25.00	1746.91			
30.00	1690.56			
35.00	1521.50			
40.00	1521.50			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	4.86	115.679	11.909	10.30

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	4.86	522.526	20.271	3.88

ตารางที่ ข 14 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.07 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.07	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	3268.41
5.00	3099.35
10.00	2873.95
15.00	2648.54
20.00	2535.83
25.00	2592.19
30.00	2592.19
35.00	2592.19
40.00	2592.19

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	3.153	11.59
สายป้อน	2.969	10.256
ฟิลเตรต	2.541	4.12

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	8.28	112.823	21.036	18.64

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	8.28	389.744	34.111	8.75

ตารางที่ ข 15 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.08 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.08	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	6086.00
5.00	5860.60
10.00	5635.19
15.00	5747.89
20.00	5747.89
25.00	5635.19
30.00	5522.48
35.00	5635.19
40.00	5522.48

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	3.349	14.00
สายป้อน	3.191	13.709
ฟิลเตรต	2.992	3.752

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	17.64	121.249	52.771	43.523

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	17.64	422.872	66.188	15.65

ตารางที่ ข 16 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.1 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.1	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	1296.09			
5.00	957.98	อนุภาคเริ่มต้น	3.296	11.675
10.00	901.63	สายป้อน	3.037	11.880
15.00	901.63	ฟิลเตรต	1.687	3.017
20.00	676.22			
25.00	563.52			
30.00	563.52			
35.00	563.52			
40.00	591.69			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	1.89	115.394	3.189	2.76

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	1.89	36.11	451.453	1.26

ตารางที่ ข 17 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.06 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.06	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	1915.96			
5.00	1690.56	อนุภาคเริ่มต้น	6.592	25.026
10.00	1465.15	สายป้อน	6.351	24.547
15.00	1239.74	ฟิลเตรต	5.201	7.718
20.00	1070.69			
25.00	1070.69			
30.00	1070.69			
35.00	1070.69			
40.00	1070.69			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	3.42	241.356	17.789	7.37

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	3.42	932.786	29.815	3.196

ตารางที่ ข 18 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.07 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.07	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	2254.08
5.00	1972.32
10.00	1690.56
15.00	1521.50
20.00	1352.45
25.00	1352.45
30.00	1352.45
35.00	1352.45
40.00	1352.45

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	6.547	24.889
สายป้อน	6.351	23.863
ฟิลเตรต	5.427	11.145

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	4.32	241.356	23.444	9.714

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	4.32	906.803	48.148	5.31

ตารางที่ ข 19 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.08 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.08	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	4958.97
5.00	4508.15
10.00	4508.15
15.00	4395.45
20.00	4508.15
25.00	4395.45
30.00	4395.45
35.00	4395.45
40.00	4395.45

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	6.848	26.735
สายป้อน	7.614	27.282
ฟิลเตรต	5.81	10.838

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	14.04	289.342	81.576	28.19

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	14.04	1036.718	152.16	14.68

ตารางที่ ข 20 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.1 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.1	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	1127.04
5.00	1014.33
10.00	845.28
15.00	732.57
20.00	619.87
25.00	563.52
30.00	563.52
35.00	535.34
40.00	535.34

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	6.675	27.145
สายป้อน	6.502	27.282
ฟิลเตรต	4.946	8.957

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	1.71	247.069	8.457	3.423

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	1.71	1036.718	15.317	1.48

ตารางที่ ข 21 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.08 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.08	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	2085.02
5.00	957.98
10.00	845.28
15.00	732.57
20.00	619.87
25.00	619.87
30.00	563.52
35.00	563.52
40.00	563.52

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	10.316	34.496
สายป้อน	11.218	34.231
ฟิลเตรต	9.414	13.162

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	1.8	426.30	16.946	3.975

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	1.8	1300.769	23.692	1.821

ตารางที่ ข 22 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.09 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.09	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	732.57			
5.00	529.71	อนุภาคเริ่มต้น	10.316	34.359
10.00	394.46	สายป้อน	11.331	33.547
15.00	360.65	ฟิลเตรต	7.704	11.795
20.00	304.30			
25.00	281.76			
30.00	217.89			
35.00	210.38			
40.00	197.23			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.63	430.585	4.854	1.127

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.63	1274.786	7.431	0.583

ตารางที่ ข 23 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.1 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อนอก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1100	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.1	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	676.22
5.00	478.99
10.00	371.92
15.00	338.11
20.00	281.76
25.00	210.38
30.00	210.38
35.00	187.84
40.00	185.96

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	10.110	35.385
สายป้อน	12.44	36.795
ฟิลเตรต	7.366	11.325

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.59	472.715	4.376	0.92

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.59	1398.205	6.727	0.48

ตารางที่ ข 24 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.12 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.12	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	2254.08			
5.00	1972.32	อนุภาคเริ่มต้น	3.198	12.308
10.00	1972.32	สายป้อน	2.853	10.735
15.00	1915.96	ฟิลเตรต	1.943	3.863
20.00	1859.61			
25.00	1859.61			
30.00	1859.61			
35.00	1859.61			
40.00	1859.61			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	5.94	108.396	11.542	10.65

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	5.94	407.932	22.948	5.63

ตารางที่ ข 25 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.14 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.14	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	5635.19			
5.00	5297.08	อนุภาคเริ่มต้น	3.300	14.376
10.00	5297.08	สายป้อน	2.886	12.376
15.00	5297.08	ฟิลเตรต	2.262	5.111
20.00	5409.78			
25.00	5297.08			
30.00	5297.08			
35.00	5297.08			
40.00	5297.08			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	16.92	109.681	38.281	34.90

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	16.92	470.291	86.48	18.39

ตารางที่ ข 26 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.16 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.16	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	9805.23
5.00	9354.41
10.00	9354.41
15.00	9354.41
20.00	9354.41
25.00	9354.41
30.00	9354.41
35.00	9354.41
40.00	9354.41

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	3.187	10.855
สายป้อน	3.044	10.171
ฟิลเตรต	2.879	5.214

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	29.88	115.679	86.0220	74.36

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	29.88	386.496	155.785	40.31

ตารางที่ ข 27 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.2 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อนอก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.2	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	1239.74			
5.00	1014.33	อนุภาคเริ่มต้น	2.943	11.744
10.00	1014.33	สายป้อน	2.721	10.188
15.00	788.93	ฟิลเตรต	1.601	3.701
20.00	619.87			
25.00	619.87			
30.00	619.87			
35.00	591.69			
40.00	591.69			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	1.89	103.397	3.026	2.927

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	1.89	387.145	6.995	1.807

ตารางที่ ข 28 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.12 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.12	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	751.36			
5.00	676.22	อนุภาคเริ่มต้น	6.592	32.239
10.00	601.09	สายป้อน	5.607	27.932
15.00	601.09	ฟิลเตรต	2931	7.761
20.00	601.09			
25.00	601.09			
30.00	601.09			
35.00	601.09			
40.00	601.09			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	1.92	213.079	5.628	2.641

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	1.92	1061.402	14.901	1.404

ตารางที่ ข 29 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.14 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.14	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	5071.67
5.00	4620.85
10.00	4395.45
15.00	4508.15
20.00	4508.15
25.00	4395.45
30.00	4508.15
35.00	4508.15
40.00	4508.15

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	6.359	30.598
สายป้อน	6.043	27.316
ฟิลเตรต	4.856	9.316

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	14.40	229.645	69.922	30.45

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	14.40	1038.017	134.54	19.924

ตารางที่ ข 30 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.16 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.16	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	1239.74
5.00	1089.47
10.00	939.20
15.00	864.06
20.00	713.79
25.00	601.09
30.00	525.95
35.00	450.82
40.00	432.03

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	6.103	26.496
สายป้อน	6.126	22.735
ฟิลเตรต	3.134	6.598

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	1.38	232.787	4.325	1.86

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	1.38	863.932	9.106	1.054

ตารางที่ ข 31 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.18 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	40	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.18	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	676.22
5.00	563.52
10.00	525.95
15.00	413.25
20.00	375.68
25.00	338.11
30.00	300.54
35.00	300.54
40.00	300.54

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	6.149	31.350
สายป้อน	6.164	29.607
ฟิลเตรต	2.879	9.607

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.96	234.215	2.764	1.180

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.96	1125.060	9.223	0.820

ตารางที่ ข 32 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.16 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.16	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	413.25
5.00	300.54
10.00	262.98
15.00	262.98
20.00	262.98
25.00	255.46
30.00	270.49
35.00	262.98
40.00	262.98

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	11.275	41.111
สายป้อน	11.688	37.35
ฟิลเตรต	6.013	12.274

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.84	444.152	5.051	1.137

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	0.84	1419.316	10.310	0.726

ตารางที่ ข 33 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.18 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.18	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	2704.89
5.00	1577.85
10.00	901.63
15.00	732.57
20.00	563.52
25.00	563.52
30.00	422.64
35.00	394.46
40.00	394.46

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	10.335	38.462
สายป้อน	10.053	36.197
ฟิลเตรต	6.351	12.615

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	1.26	382.028	8.003	2.095

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	1.26	1375.47	15.895	1.156

ตารางที่ ข 34 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.2 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อนอก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.2	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)	ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
0.33	525.95			
5.00	338.11	อนุภาคเริ่มต้น	10.861	31.923
10.00	300.54	สายป้อน	9.997	33.974
15.00	262.98	ฟิลเตรต	5.262	12.205
20.00	244.19			
25.00	225.41			
30.00	225.41			
35.00	187.84			
40.00	187.84			

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.6	379.886	3.157	0.831

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.6	1291.026	7.323	0.567

ตารางที่ ข 35 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.22 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.008 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	60	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.22	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	695.01
5.00	375.68
10.00	262.98
15.00	210.38
20.00	187.84
25.00	165.30
30.00	172.81
35.00	157.79
40.00	146.51

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	10.11	42.479
สายป้อน	9.828	36.752
ฟิลเตรต	4.341	11.863

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของโปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	0.47	373.459	2.031	0.54

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในสายป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิแซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดพอลิแซคคาไรด์
40	38	0.47	1396.581	5.552	0.40

ตารางที่ ข 36 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.16 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.003 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.16	

เวลา (นาทีก)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	8227.38
5.00	6198.71
10.00	4170.04
15.00	3606.52
20.00	3719.22
25.00	3606.52
30.00	3493.82
35.00	3606.52
40.00	3606.52

ตัวอย่างที่ 40 นาที	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	3.352	13.692
สายป้อน	2.713	12.684
ฟิลเตรต	2.041	4.436

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาทีก)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	11.52	103.112	23.509	22.80

ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาทีก)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	11.52	481.983	51.102	10.602

ตารางที่ ข 37 แสดงค่าผลการทดลองที่ภาวะการกรอง ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.16 บาร์ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของท่อออก 0.013 เมตร

ภาวะการกรอง

ความเข้มข้นสารแขวนลอย	20	กรัมต่อลิตร
อัตราการป้อน(ลิตรต่อชั่วโมง)	38	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	1700	
ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	0.16	

เวลา (นาที่)	ฟิลเตรตฟลักซ์ (ลิตร/เมตร ² -ชั่วโมง)
0.33	7663.86
5.00	7100.34
10.00	6987.63
15.00	6987.63
20.00	6987.63
25.00	7100.34
30.00	6987.63
35.00	7100.34
40.00	6987.63

ตัวอย่างที่ 40 นาที่	ความเข้มข้น ของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของ พอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
อนุภาคเริ่มต้น	2.890	13.111
สายป้อน	2.668	9.538
ฟิลเตรต	2.123	5.162

ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของ โปรตีนในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดโปรตีน
40	38	22.32	101.398	47.395	46.741

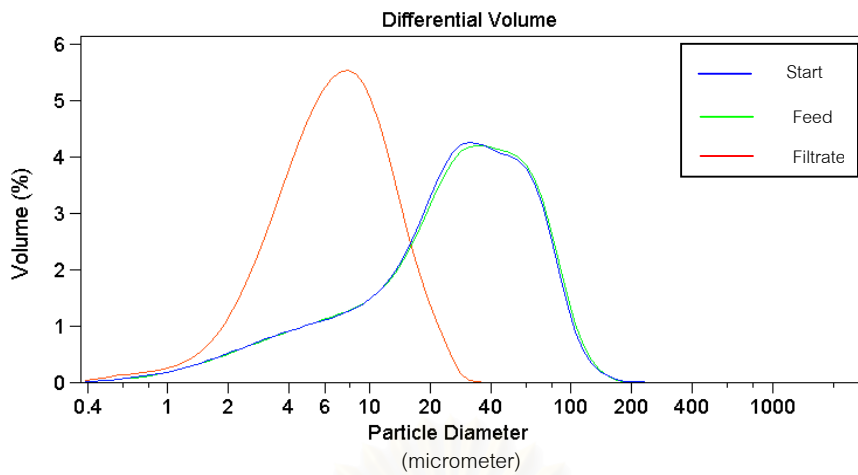
ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

เวลา (นาที่)	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของ ฟิลเตรต (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในสาย ป้อน(กรัม/ชั่วโมง)	อัตราการไหลของพอลิ แซคคาไรด์ในฟิลเตรต (กรัม/ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัด พอลิแซคคาไรด์
40	38	22.32	362.462	115.225	31.789

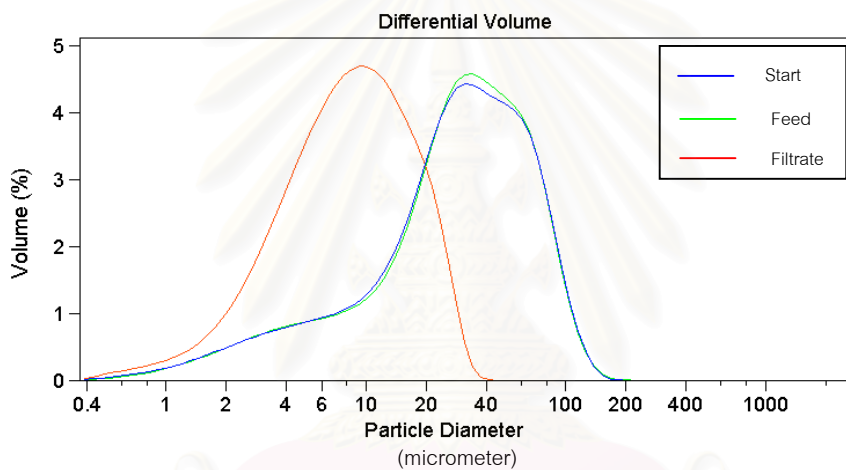


ภาคผนวก ค

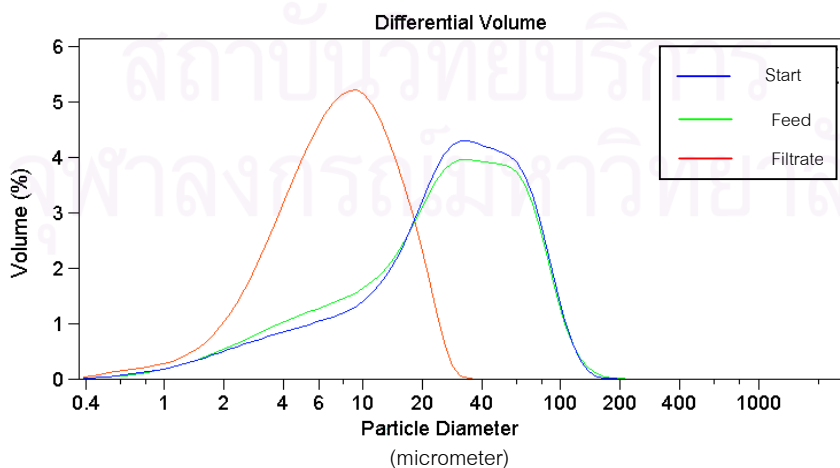
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



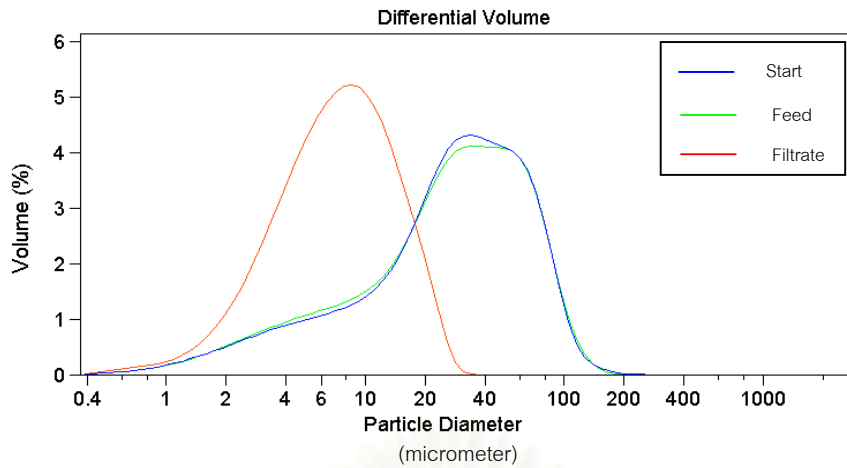
รูปที่ ค 1 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.06 บาร์



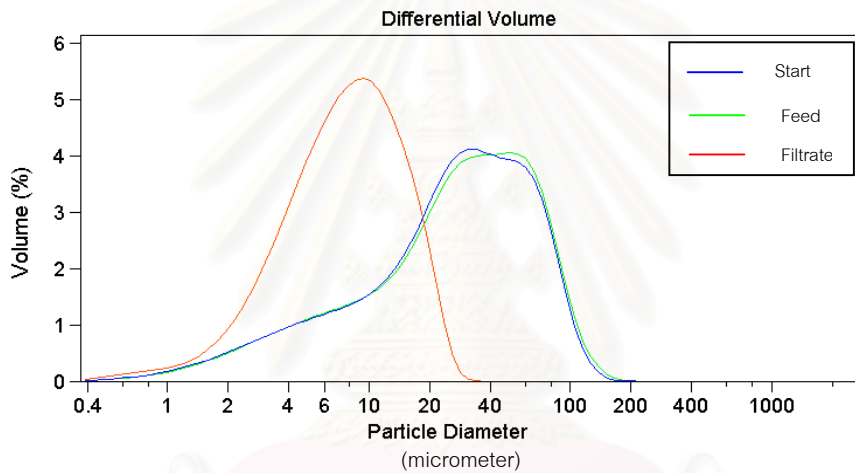
รูปที่ ค 2 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.07 บาร์



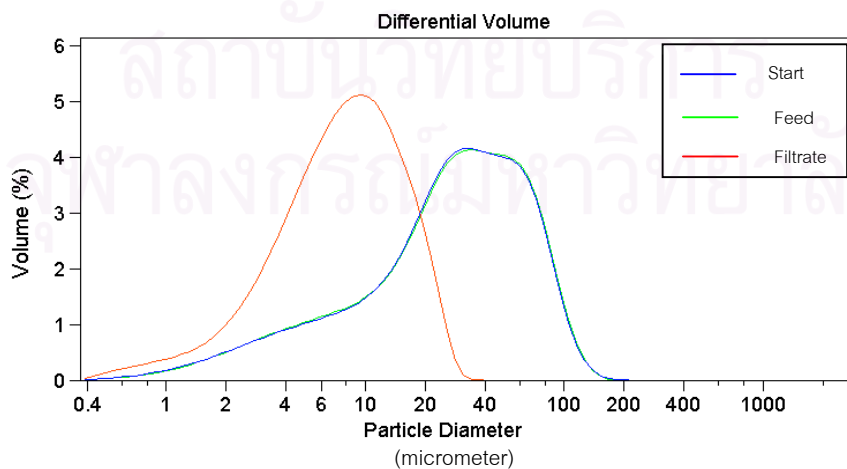
รูปที่ ค 3 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.08 บาร์



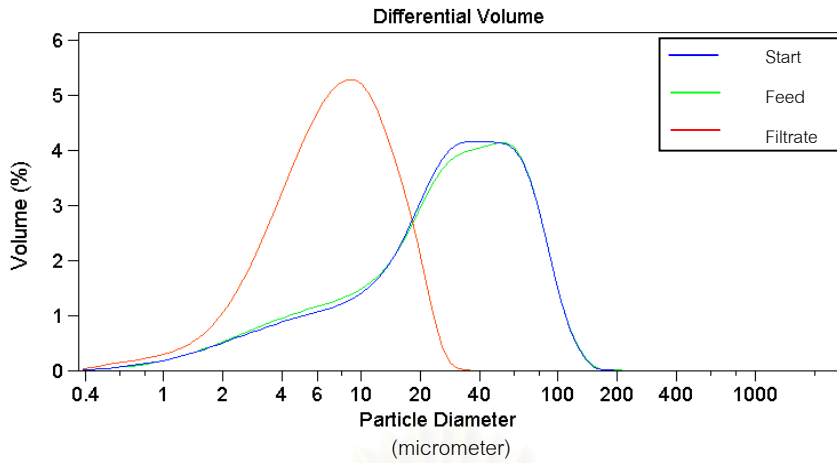
รูปที่ ค 4 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.1 บาร์



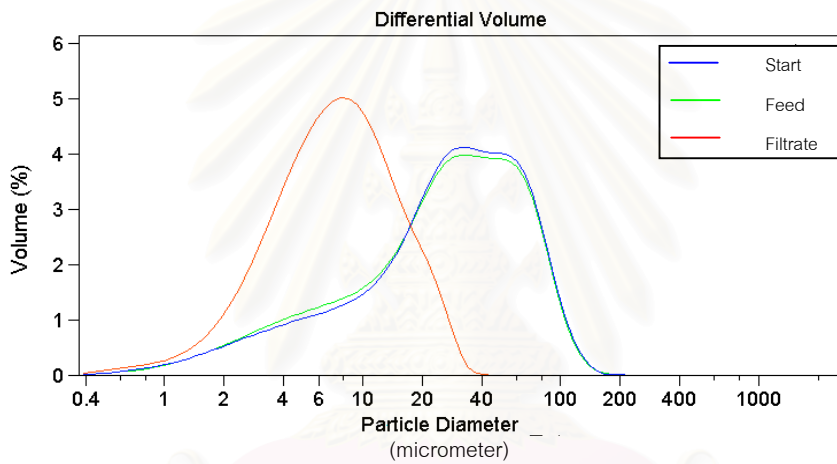
รูปที่ ค 5 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.06 บาร์



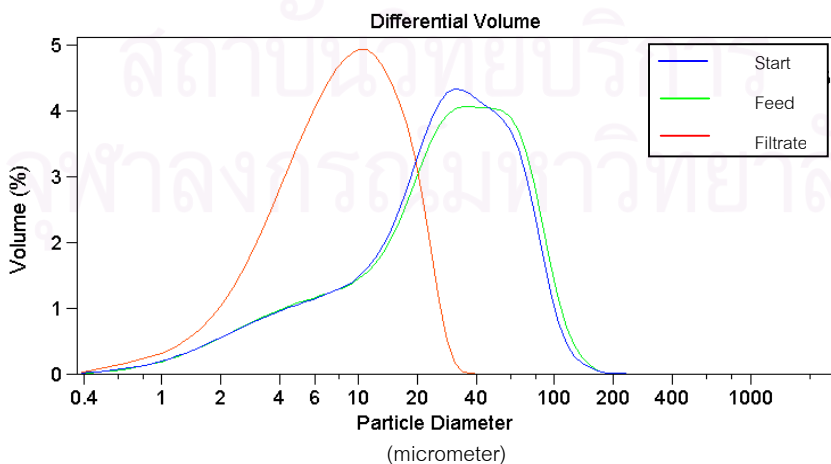
รูปที่ ค 6 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.07 บาร์



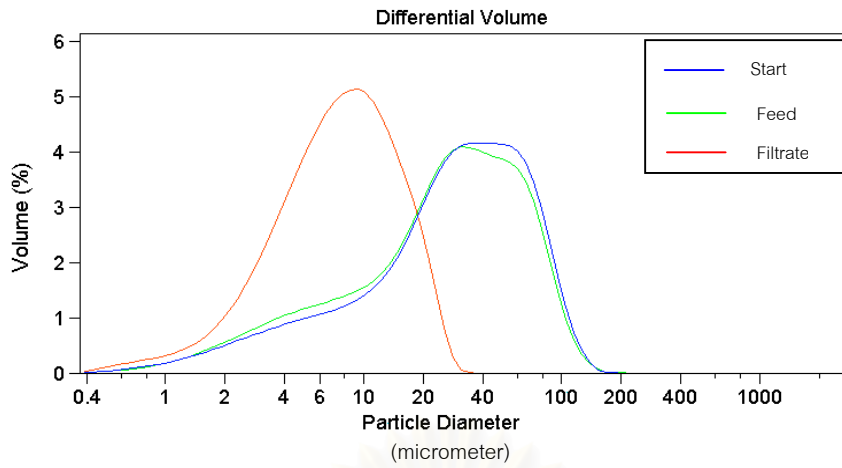
รูปที่ ค 7 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.08 บาร์



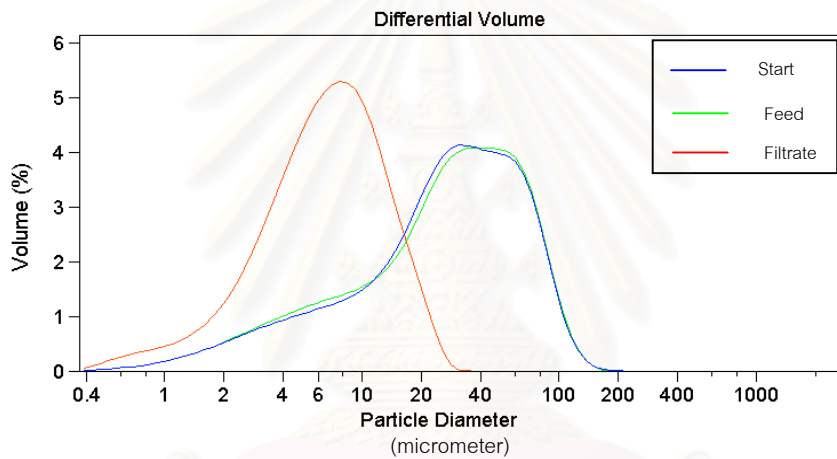
รูปที่ ค 8 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.1 บาร์



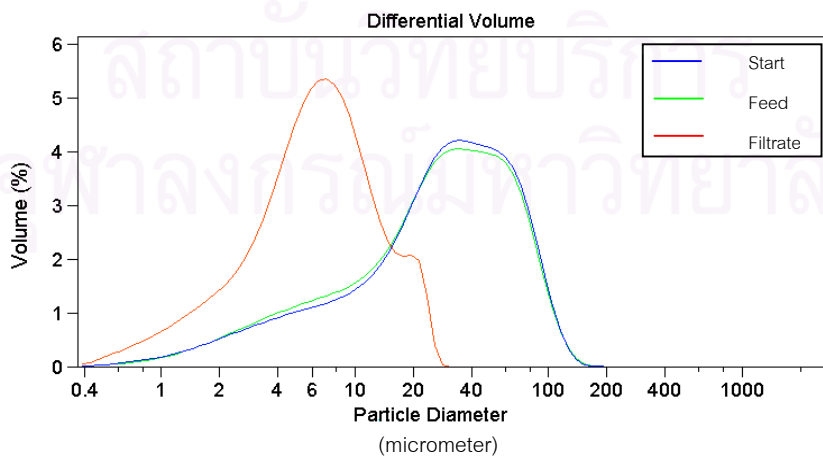
รูปที่ ค 9 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.06 บาร์



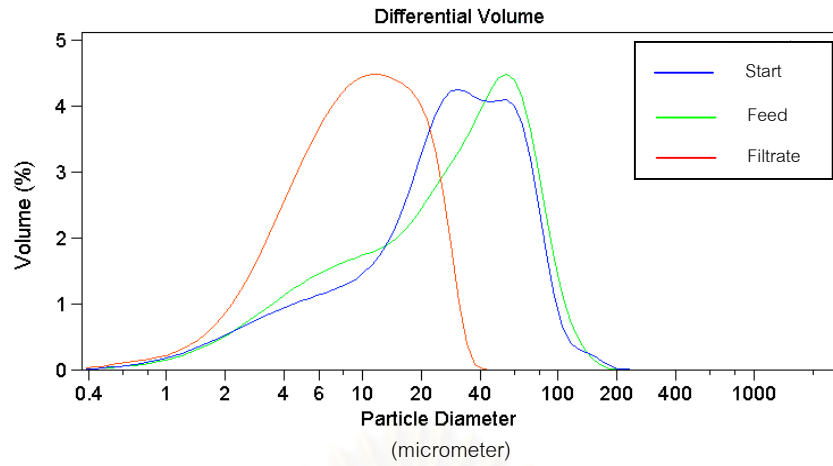
รูปที่ ค 10 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.08 บาร์



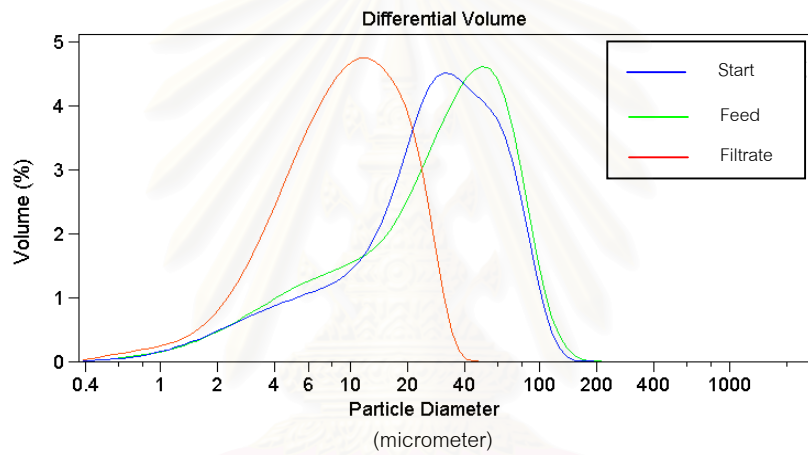
รูปที่ ค 11 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.09 บาร์



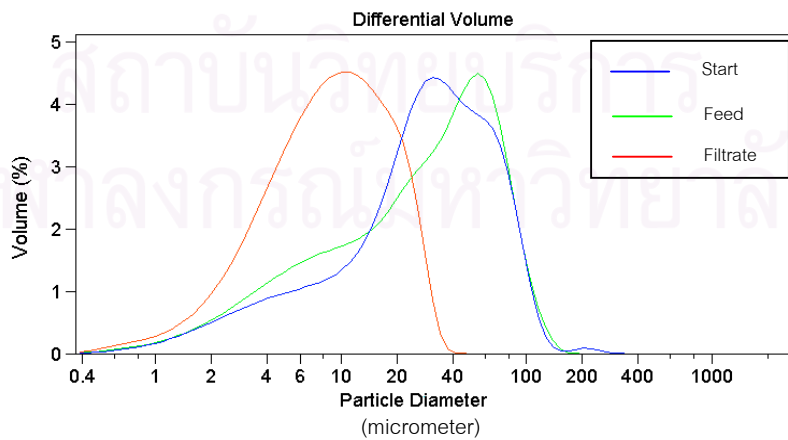
รูปที่ ค 12 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 500 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.1 บาร์



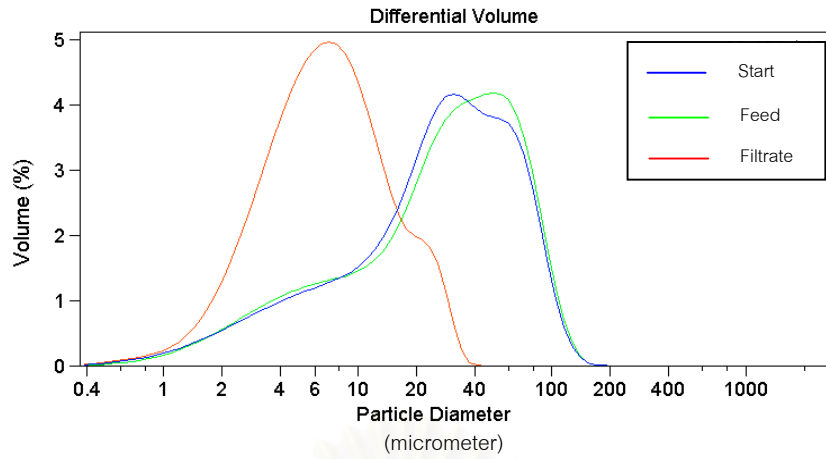
รูปที่ ค 13 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.06 บาร์



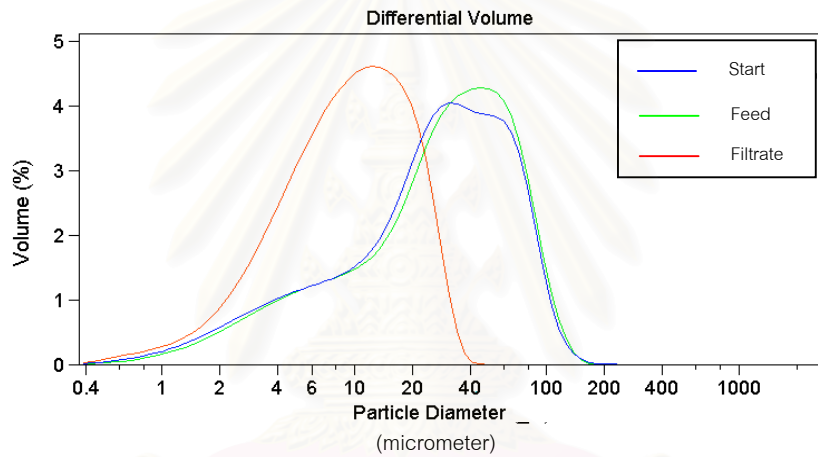
รูปที่ ค 14 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.07 บาร์



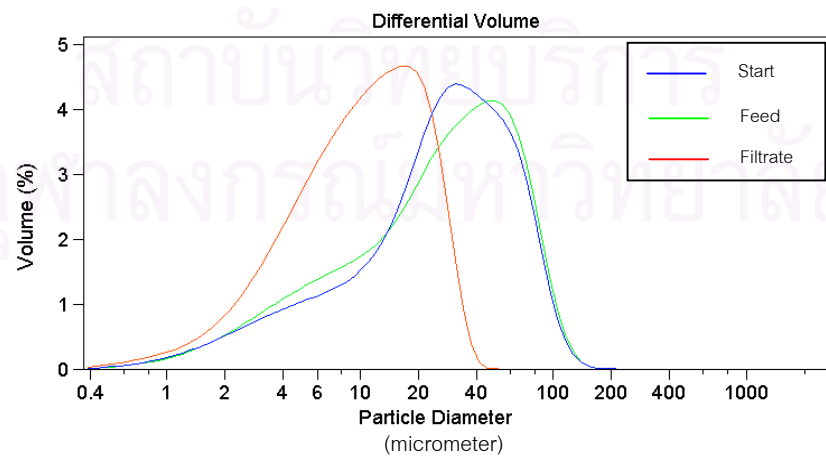
รูปที่ ค 15 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.08 บาร์



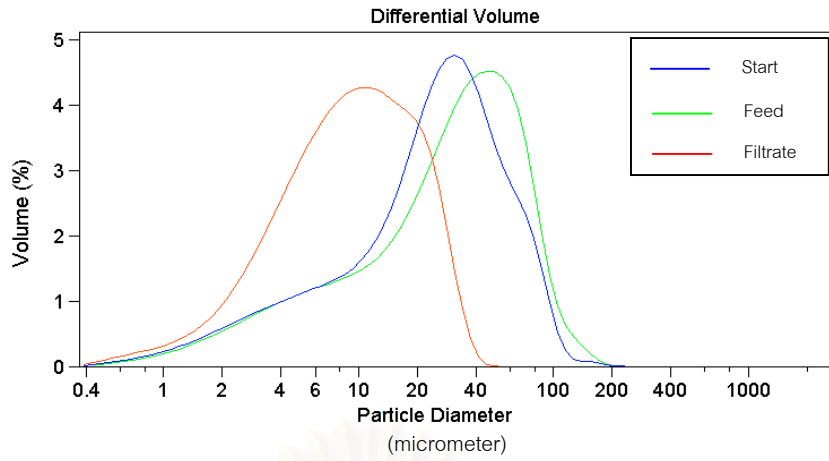
รูปที่ ค 16 กราฟการกระจายของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.1 บาร์



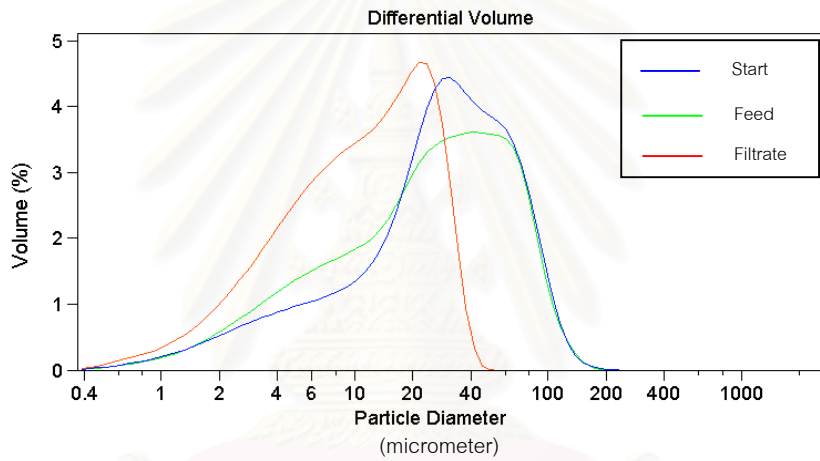
รูปที่ ค 17 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.06 บาร์



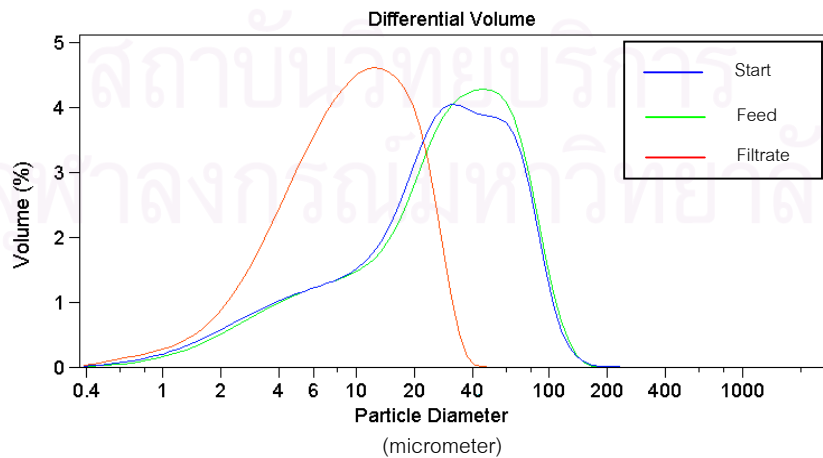
รูปที่ ค 18 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.07 บาร์



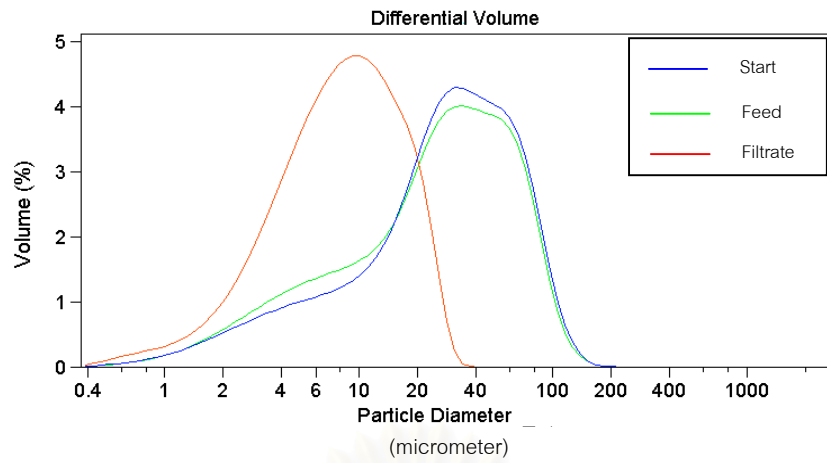
รูปที่ ค 19 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.08 บาร์



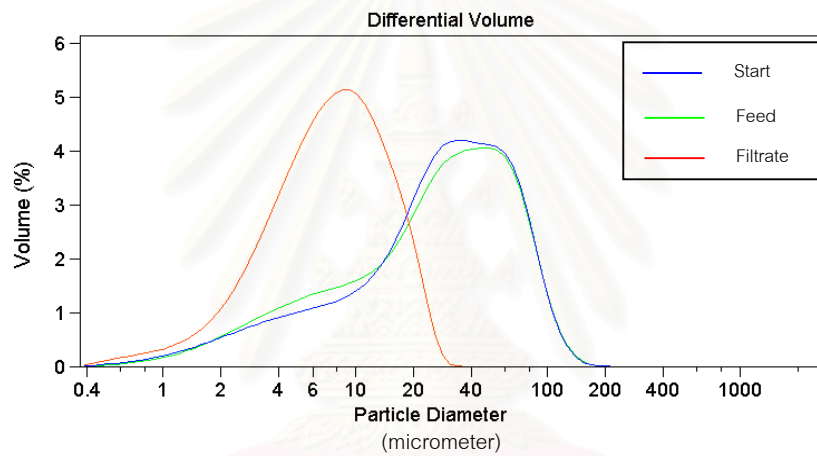
รูปที่ ค 20 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.1 บาร์



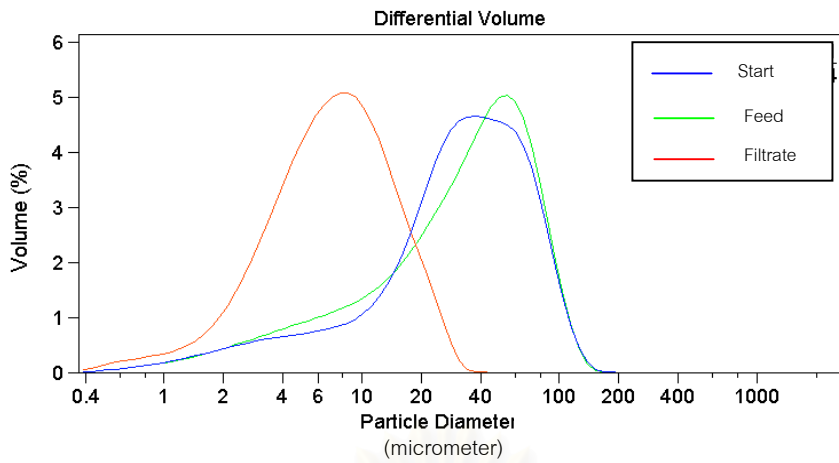
รูปที่ ค 21 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.08 บาร์



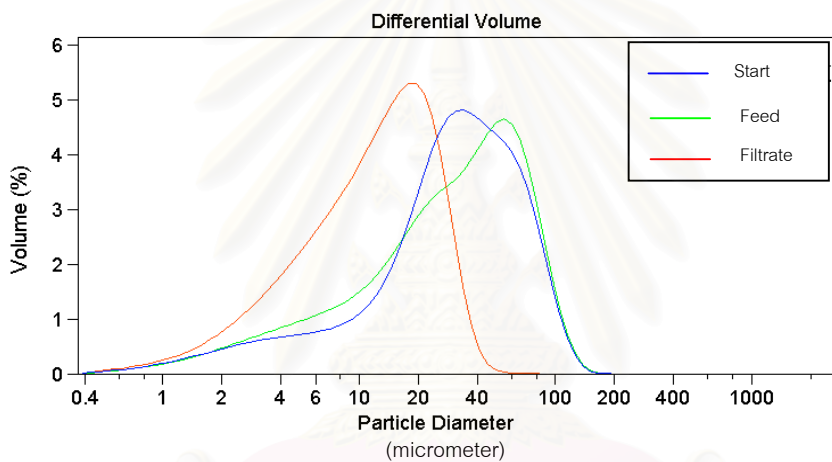
รูปที่ ค 22 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.09 บาร์



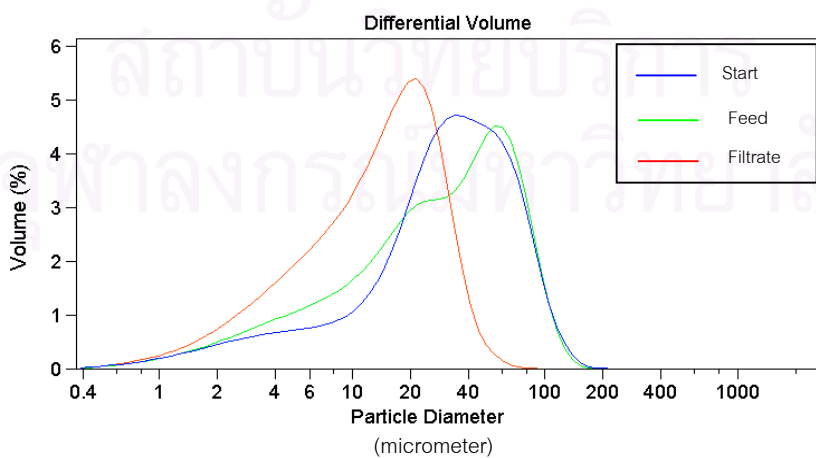
รูปที่ ค 23 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1100 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.1 บาร์



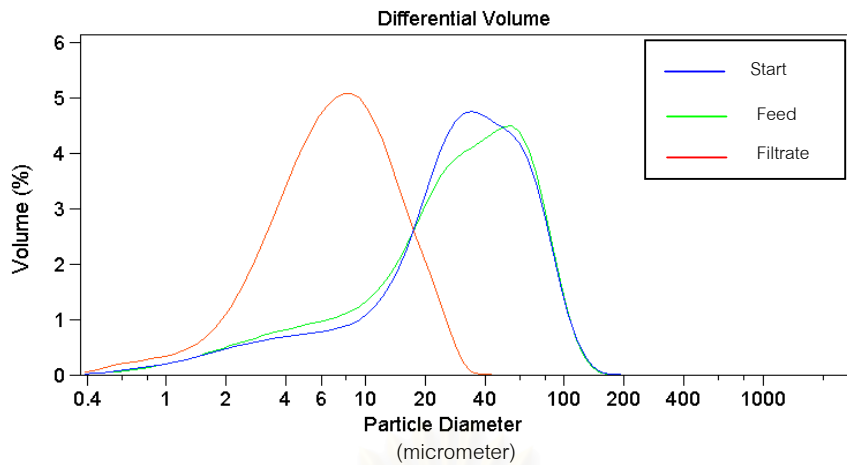
รูปที่ ค 24 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.12 บาร์



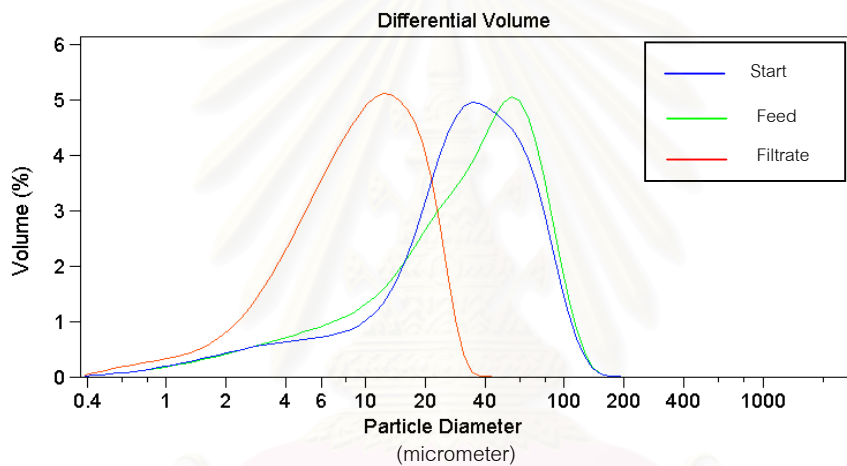
รูปที่ ค 25 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.14 บาร์



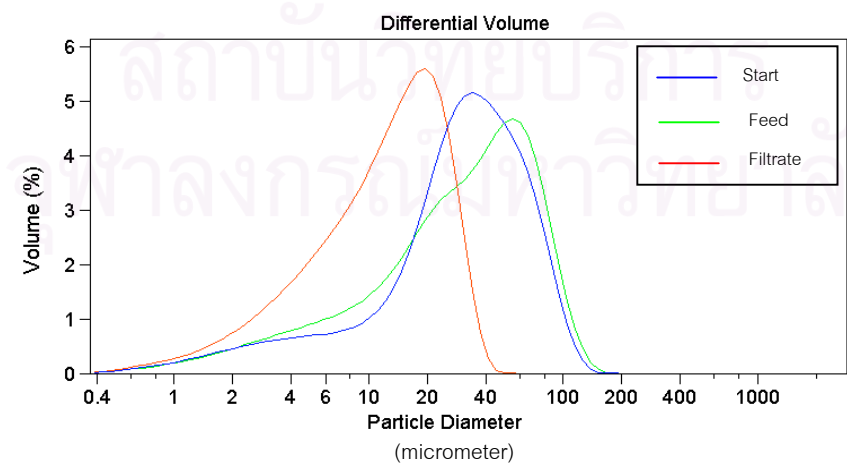
รูปที่ ค 26 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์



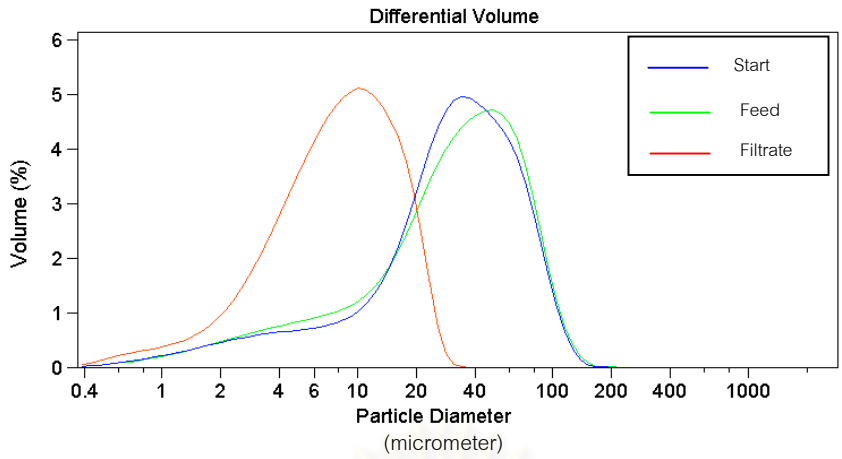
รูปที่ ค 27 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.2 บาร์



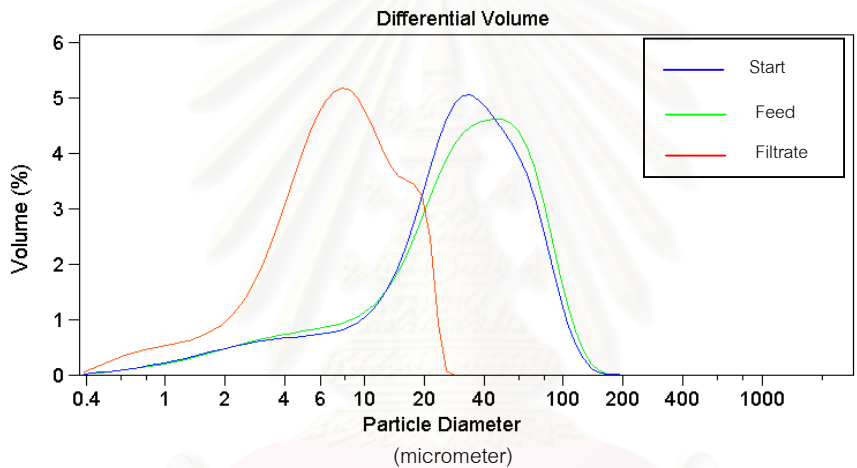
รูปที่ ค 28 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.12 บาร์



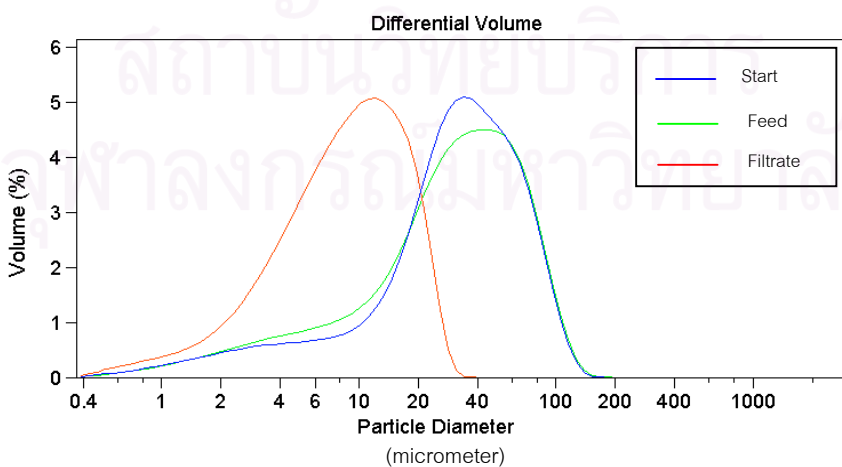
รูปที่ ค 29 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.14 บาร์



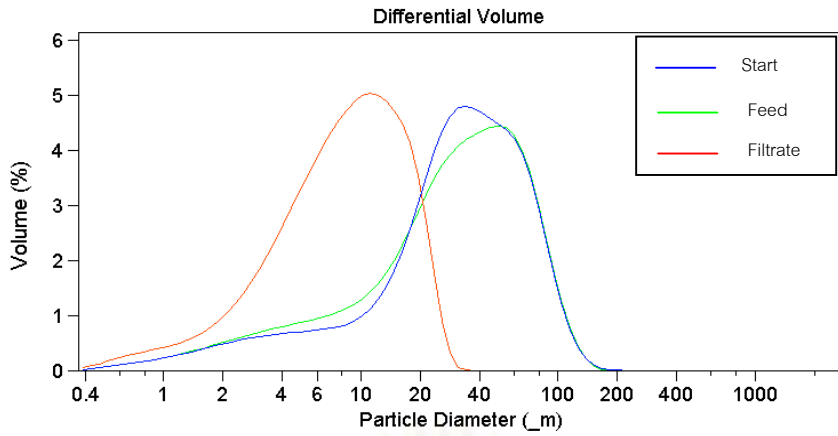
รูปที่ ค 30 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์



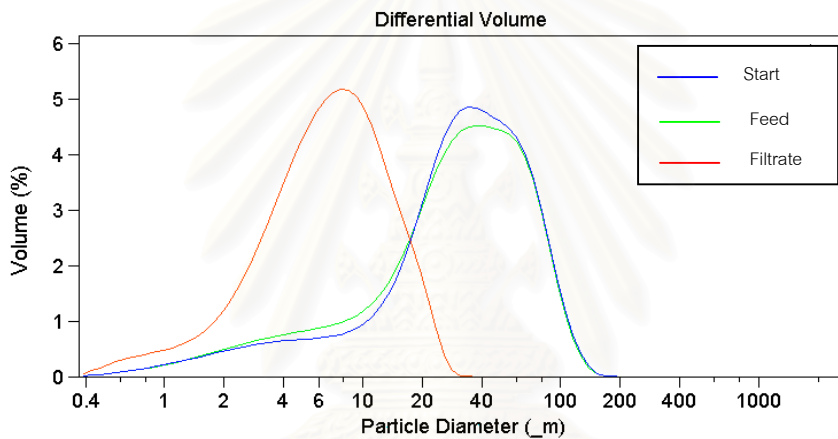
รูปที่ ค 31 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.18 บาร์



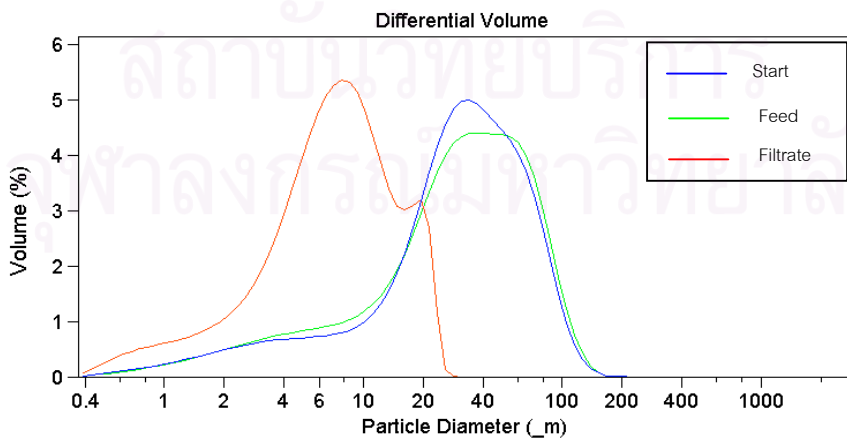
รูปที่ ค 32 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์



รูปที่ ค 33 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม
ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง
ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.18 บาร์



รูปที่ ค 34 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม
ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง
ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.2 บาร์



รูปที่ ค 35 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขาม
ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ภาวะการกรอง คือ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง
ความเร็วรอบการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.22 บาร์



ภาคผนวก ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การทดลองเพื่อเลือกชนิดของตัวกรอง

ทำการกรองผงเนื้อในเมล็ดมะขามด้วยเครื่องกรองชนิดไหลผ่านตัวกรองโดยกวาดผิวหน้าตัวกรองด้วยใบกวาด ใช้ผงเนื้อในเมล็ดมะขามปริมาณ 3 กรัม ละลายในน้ำปริมาตร 300 มิลลิลิตร (ความเข้มข้นของสารแขวนลอยเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร) กวนให้เข้ากัน และเก็บตัวอย่างก่อนการผ่านคลีนเหนือเสียง จากนั้นนำไปผ่านคลีนเหนือเสียงเป็นเวลา 5 นาที ทำการกรองโดยใช้ตัวกรอง 4 ชนิด คือ ผ้ากรองที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ 3 ชนิด และตะแกรงสแตนเลสขนาด 33 ไมโครเมตร ทำการชะล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 4 ครั้ง เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรของฟิลเตรตที่ได้ นำแค๊กที่ได้ไปละลายน้ำปริมาตร 300 มิลลิลิตร นำสารตัวอย่างทั้งหมดไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ปริมาณพอลิแซคคาไรด์ และขนาดอนุภาคในสารแขวนลอย ได้ผลการทดลอง คือ

1. ผ้ากรองชนิดที่ 1

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	1.731	6.863
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คลีนเหนือเสียง	1.749	6.624
ฟิลเตรตจากการกรอง	1.644	2.632
ชะล้างครั้งที่ 1	0.140	0.427
ชะล้างครั้งที่ 2	0.017	0.178
ชะล้างครั้งที่ 3	0.009	0.123
ชะล้างครั้งที่ 4	0.008	0.107
แค๊ก	0.092	3.090

- ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

สารตัวอย่าง	ร้อยละการกำจัดโปรตีน	ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์
ฟิลเตรตจากการกรอง	93.98	38.36
ตะกั่วครั้งที่ 1	8.01	44.58
ตะกั่วครั้งที่ 2	0.96	47.18
ตะกั่วครั้งที่ 3	0.50	48.97
ตะกั่วครั้งที่ 4	0.43	50.53

- ขนาดของอนุภาค

สารตัวอย่าง	ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	38.12
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คั่นเนื้อเสียง	33.56
ฟิลเตรตจากการกรอง	10.98
ตะกั่วครั้งที่ 1	15.95
ตะกั่วครั้งที่ 2	19.22
ตะกั่วครั้งที่ 3	23.51
ตะกั่วครั้งที่ 4	24.00
คั่ว	50.63

2. ผ่ากรองชนิดที่ 2

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	1.385	7.376
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คลื่นเหนือเสียง	1.409	8.145
ฟิลเตรตจากการกรอง	1.34	4.585
ตะกั่วครั้งที่ 1	0.076	0.536
ตะกั่วครั้งที่ 2	0.016	0.124
ตะกั่วครั้งที่ 3	0.003	0.076
ตะกั่วครั้งที่ 4	0.000	0.086
ตะกั่ว	0.072	2.51

- ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

สารตัวอย่าง	ร้อยละการกำจัดโปรตีน	ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์
ฟิลเตรตจากการกรอง	95.07	56.30
ตะกั่วครั้งที่ 1	5.37	6.58
ตะกั่วครั้งที่ 2	1.11	1.52
ตะกั่วครั้งที่ 3	0.24	1.06
ตะกั่วครั้งที่ 4	0.03	0.93

- ขนาดของอนุภาค

สารตัวอย่าง	ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	26.82
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คลื่นเหนือเสียง	18.79
ฟิลเตรตจากการกรอง	12.43
ตะกั่วครั้งที่ 1	25.07
ตะกั่วครั้งที่ 2	30.51
ตะกั่วครั้งที่ 3	32.50
ตะกั่วครั้งที่ 4	33.95
เค้ก	55.34

3. ผ่ากรองชนิดที่ 3

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	1.55	7.658
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คลื่นเหนือเสียง	1.637	7.063
ฟิลเตรตจากการกรอง	1.471	3.376
ตะกั่วครั้งที่ 1	0.131	1.618
ตะกั่วครั้งที่ 2	0.021	0.118
ตะกั่วครั้งที่ 3	0.009	0.125
ตะกั่วครั้งที่ 4	0.007	0.085
เค้ก	0.062	2.340

- ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

สารตัวอย่าง	ร้อยละการกำจัดโปรตีน	ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์
ฟิลเตรตจากการกรอง	89.90	44.08
ตะกั่วครั้งที่ 1	8.00	21.12
ตะกั่วครั้งที่ 2	1.30	1.55
ตะกั่วครั้งที่ 3	0.54	1.64
ตะกั่วครั้งที่ 4	0.42	1.11

- ขนาดของอนุภาค

สารตัวอย่าง	ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	27.51
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คั่นเหนือเสียง	22.6
ฟิลเตรตจากการกรอง	12.92
ตะกั่วครั้งที่ 1	18.9
ตะกั่วครั้งที่ 2	24.15
ตะกั่วครั้งที่ 3	25.90
ตะกั่วครั้งที่ 4	26.75
คั่ว	55.59

4. ตะแกรงสแตนเลสขนาด 33 ไมโครเมตร

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโปรตีน (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	1.370	7.718
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คลื่นเหนือเสียง	1.471	7.427
ฟิลเตรตจากการกรอง	1.389	4.581
ตะกั่วครั้งที่ 1	0.078	0.596
ตะกั่วครั้งที่ 2	0.01	0.402
ตะกั่วครั้งที่ 3	0.002	0.172
ตะกั่วครั้งที่ 4	0.001	0.141
ตะกั่ว	0.036	0.786

- ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน และร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์

สารตัวอย่าง	ร้อยละการกำจัดโปรตีน	ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์
ฟิลเตรตจากการกรอง	94.38	64.68
ตะกั่วครั้งที่ 1	5.29	8.03
ตะกั่วครั้งที่ 2	0.69	5.41
ตะกั่วครั้งที่ 3	0.1	2.32
ตะกั่วครั้งที่ 4	0.06	1.89

- ขนาดของอนุภาค

สารตัวอย่าง	ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร)
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามเริ่มต้น	32.47
ผงเนื้อในเมล็ดมะขามหลังผ่าน คลื่นเหนือเสียง	23.89
ฟิลเตรตจากการกรอง	13.12
ตะกั่วครั้งที่ 1	26.32
ตะกั่วครั้งที่ 2	34.43
ตะกั่วครั้งที่ 3	34.95
ตะกั่วครั้งที่ 4	40.31
เค้ก	69.07

จากผลการทดลองพบว่า ผ่ากรองชนิดที่ 2 มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนสูงสุด

2. การทดลองเพื่อวัดปริมาณของเค้กหลังจากการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ที่ภาวะความดันคร่อมตัวกรองต่างกัน

ทำการกรองสารแขวนลอยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก 0.008 เมตร อัตราการไหลของสายป้อนเท่ากับ 38 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันคร่อมตัวกรองเท่ากับ 0.16 และ 0.2 บาร์ หลังจากการกรองเข้าสู่ภาวะคงที่ หยุดทำการกรองและถอดตัวกรองออกมา ชะตัวกรองด้วยน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อหาน้ำหนักแห้งของเค้กที่สะสมบนตัวกรอง

จากการทดลองนำสารแขวนลอยเค้กจากภาวะการกรองที่ใช้ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400-750 นาโนเมตร โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็น blank ได้ผลดังตารางที่ ค 1

ตาราง ค. 1 แสดงค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารแขวนลอยเค้กที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง
400	0.710
450	0.664
500	0.650
550	0.624
600	0.608
650	0.603
700	0.590
750	0.583

จากตารางพบว่าที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด จากนั้นนำสารแขวนลอยเค้กที่ได้จากภาวะการกรองที่ใช้ความดันคร่อมตัวกรองเท่ากับ 0.2 บาร์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.955 ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าที่ภาวะการกรอง ที่ใช้ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ที่ภาวะการกรองที่ความดันคร่อมตัวกรอง 0.2 บาร์ มีปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยเค้กมากกว่า ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์

จากนั้นนำสารแขวนลอยเค้กปริมาตร 5 มิลลิลิตร ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำน้ำหนักแห้ง ได้ผลดังตารางที่ ค.2

ตาราง ค. 2 แสดงค่าน้ำหนักแห้งของสารแขวนลอยเค้กปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ภาวะการกรองที่ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ และ 0.2 บาร์

สารแขวนลอยเค้กที่ภาวะการกรองที่ความดันคร่อมตัวกรอง (บาร์)	น้ำหนักแห้งของเค้กในสารแขวนลอย ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (กรัม)
0.016	0.177
0.20	0.211

จากตารางที่ ค.2 พบว่า ที่ความดันคร่อมตัวกรอง 0.2 บาร์ มีน้ำหนักแห้งของเค้กสารแขวนลอยมากกว่าที่ความดัน 0.016 บาร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่

ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ความดันक्रमตัวกรอง 0.2 บาร์ที่
ภาวะการกรองคงที่จะมีการสะสมของเค้กบริเวณผิวตัวกรองมากกว่าที่ความดันक्रमตัวกรอง
0.016 บาร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ภาวะการกรอง ความเข้มข้นของสารแขวนลอย 20 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการหมุนตัวกรอง 1700 รอบต่อนาที ความดันคร่อมตัวกรอง 0.16 บาร์ อัตราการไหลของสายป้อน 38 ลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก 0.008 เมตร กำหนดให้

ความหนืดของสารแขวนลอย	2.4162 เซนติพอยส์	= 2.416×10^{-3}	กิโลกรัม/เมตร วินาที
ความหนาแน่นของสารแขวนลอย		= 1004.82	กิโลกรัม/เมตร ³
ความหนืดคินามาติก (V)		= 2.405×10^{-6}	เมตร ² /วินาที
รัศมีของตัวกรอง (R_1)		= 0.024	เมตร
รัศมีของทรงกระบอกชั้นนอก (R_2)		= 0.032	เมตร
ระยะห่างระหว่างผิวหน้าของตัวกรองกับผนังด้านในของทรงกระบอกชั้นนอก (d)	$d = R_2 - R_1$	= 0.008	เมตร
ความเร็วรอบในการหมุน (n)		= 1700	รอบต่อนาที
ความเร็วเชิงมุม (ω)	$= 2\pi n$	= 8.3	เรเดียน/วินาที
อัตราการไหลของสายป้อน (Q)		= 38	ลิตรต่อชั่วโมง

1. ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ จากความสัมพันธ์ตามสมการ 3.33

$$Ta = \frac{2\pi n R_1 d}{\nu} \left(\frac{2d}{R_1 + R_2} \right)^{0.5}$$

แทนค่าที่กำหนดไว้ในสมการ

$$Ta = \frac{2\pi \times 28.33 \times 0.024 \times 0.008}{2.405 \times 10^{-6}} \left(\frac{2 \times 0.008}{0.024 + 0.032} \right)^{0.5}$$

$$\therefore Ta = 7595.89$$

2. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแนวแกน จากความสัมพันธ์ตามสมการ 3.35

$$Re_a = \frac{vd_H}{\nu}$$

แทนค่าที่กำหนดในสมการ

$$Re_a = \frac{38 \times 2 \times 0.008}{1000 \times 1.407 \times 10^{-3} \times 2.405 \times 10^{-6} \times 3600}$$

$$\therefore Re_a = 49.91$$

3. ค่าอัตราการเฉือน จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.39

$$\gamma_{eff} = 0.23\sqrt{Ta} \frac{2\pi n R_1}{d}$$

แทนค่าที่กำหนดไว้ในสมการ

$$\gamma_{eff} = 0.23\sqrt{7595.89} \times \frac{2\pi \times 28.33 \times 0.024}{0.008}$$

$$\therefore \gamma_{eff} = 10704.46 \quad \text{ต่อวินาที}$$

4. ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน คำนวณจากความสัมพันธ์

$$\text{ร้อยละการกำจัดโปรตีน} = \frac{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในสายฟิลเตรตที่ภาวะคงที่} \times \text{อัตราการไหลของฟิลเตรตที่ภาวะคงที่}}{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในถังป้อน} \times \text{อัตราการไหลของสายป้อน}} \times 100$$

แทนค่าผลการทดลองจากตาราง ข 37 ในภาคผนวก ข

จะได้

$$\text{ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีน} = \frac{2.879 \times 29.88}{3.044 \times 38} \times 100 = 74.36$$

5. ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์ คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\text{ร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์} = \frac{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในสายฟิลเตรตที่ภาวะคงที่} \times \text{อัตราการไหลของฟิลเตรตที่ภาวะคงที่}}{\text{ความเข้มข้นของโปรตีนในถังป้อน} \times \text{อัตราการไหลของสายป้อน}} \times 100$$

แทนค่าผลการทดลองจากตาราง ข 37 ในภาคผนวก ข

จะได้

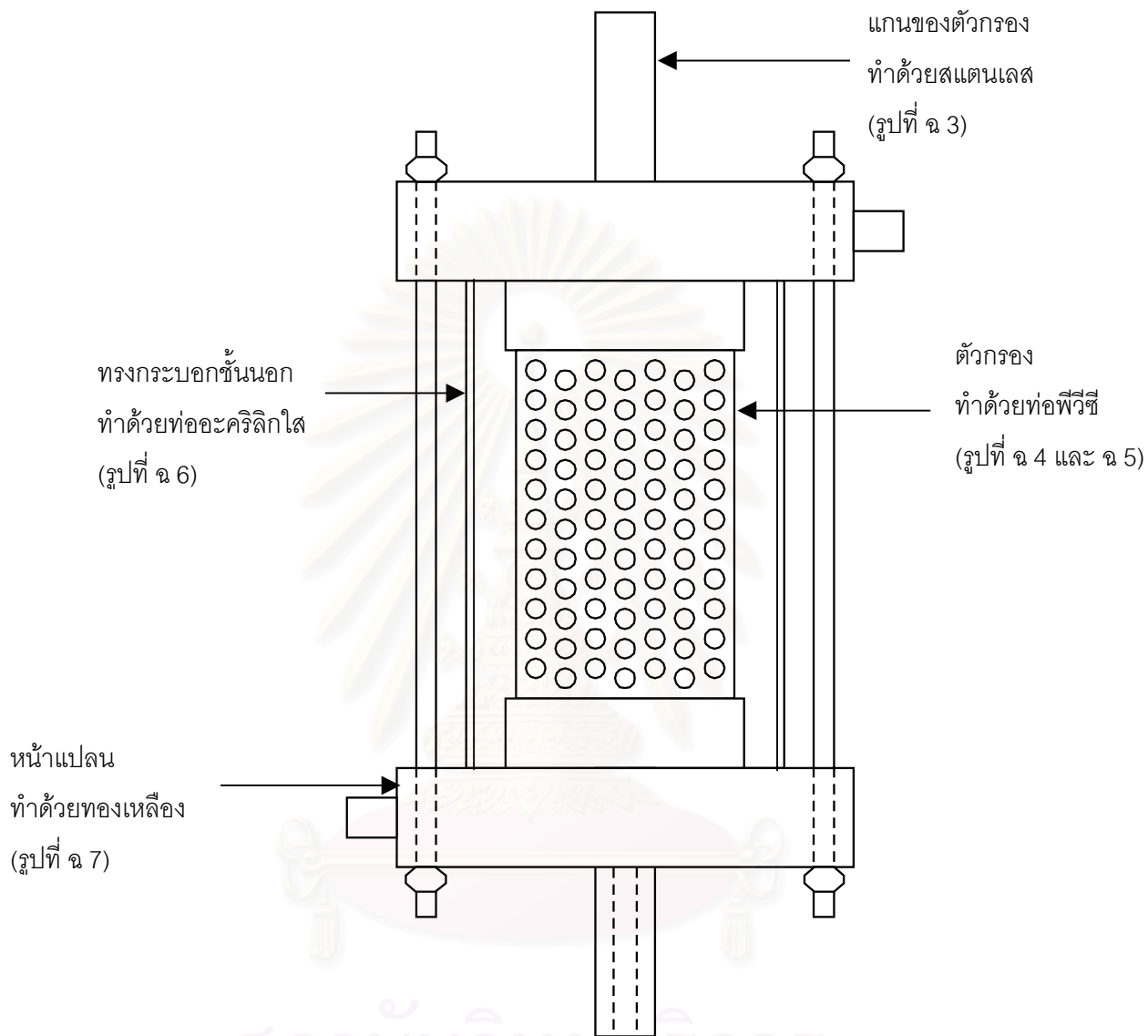
$$\text{ค่าร้อยละการสูญเสียพอลิแซคคาไรด์} = \frac{5.214 \times 29.88}{10.171 \times 38} \times 100 = 40.31$$



ภาคผนวก จ

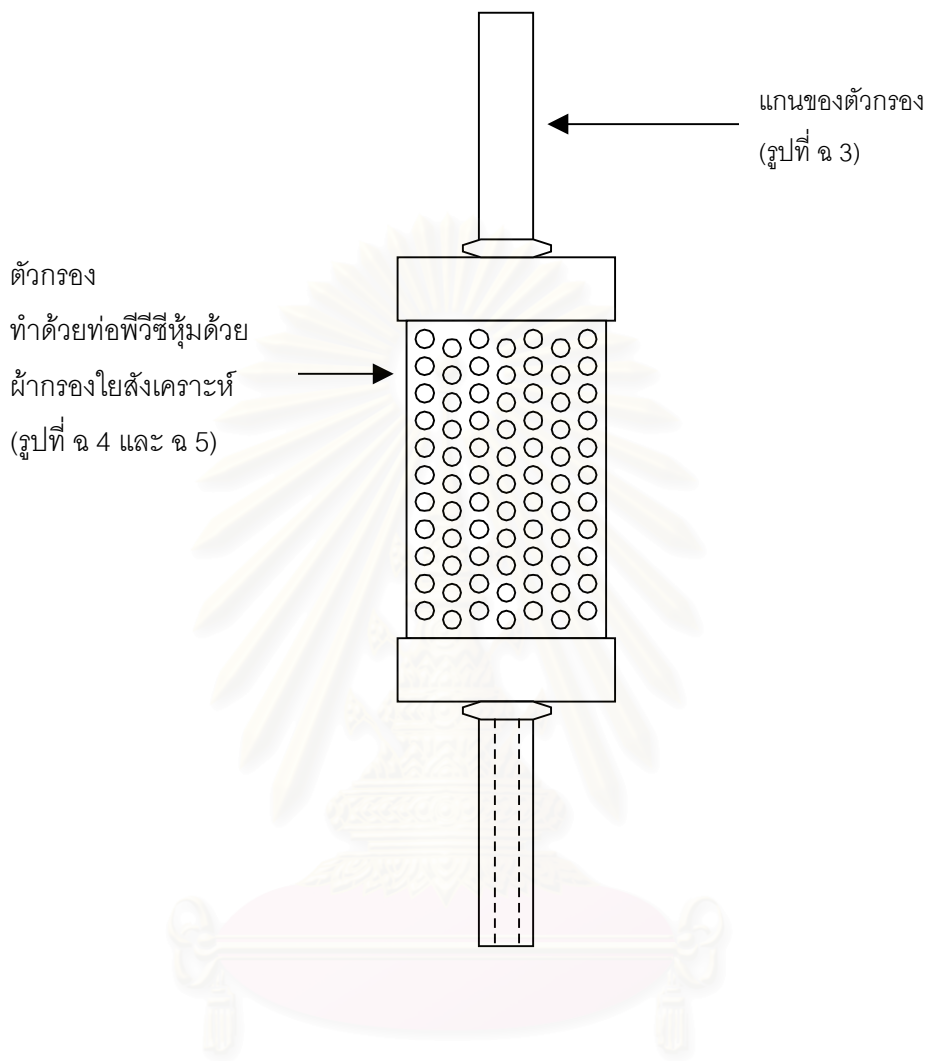
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบเครื่องกรอง (Drawings)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

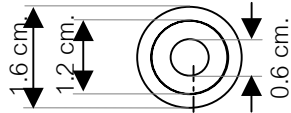
รูปที่ ๑ ภาพประกอบเครื่องกรองชนิดหมุนได้



รูปที่ ๒ ตัวกรอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

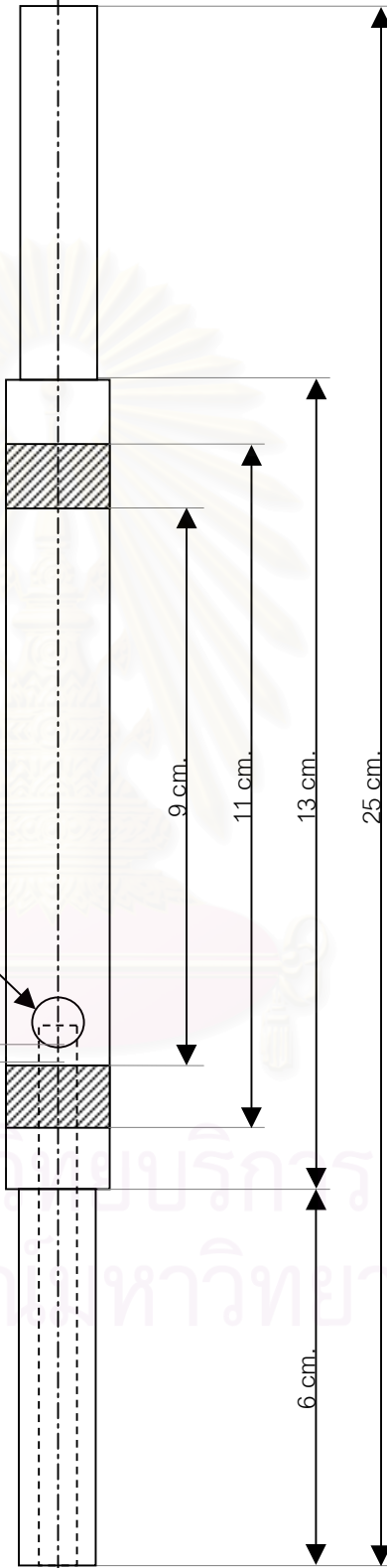
Top view



Front view

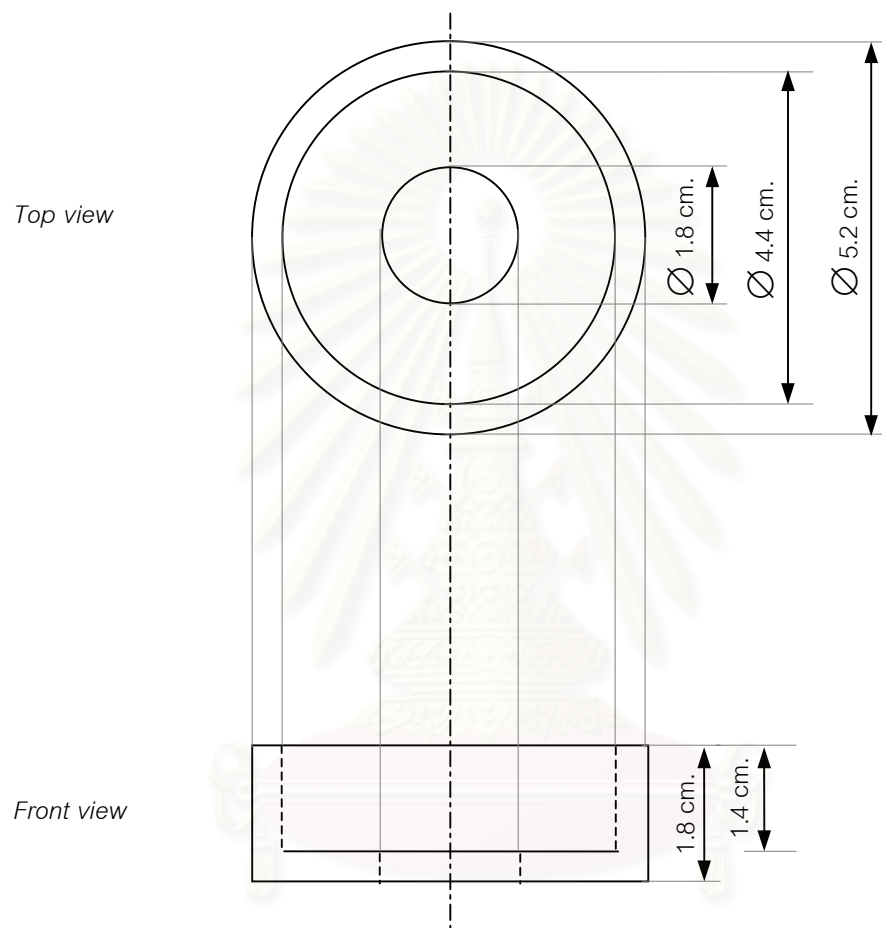
$\varnothing 0.8 \text{ cm}$

4 mm.



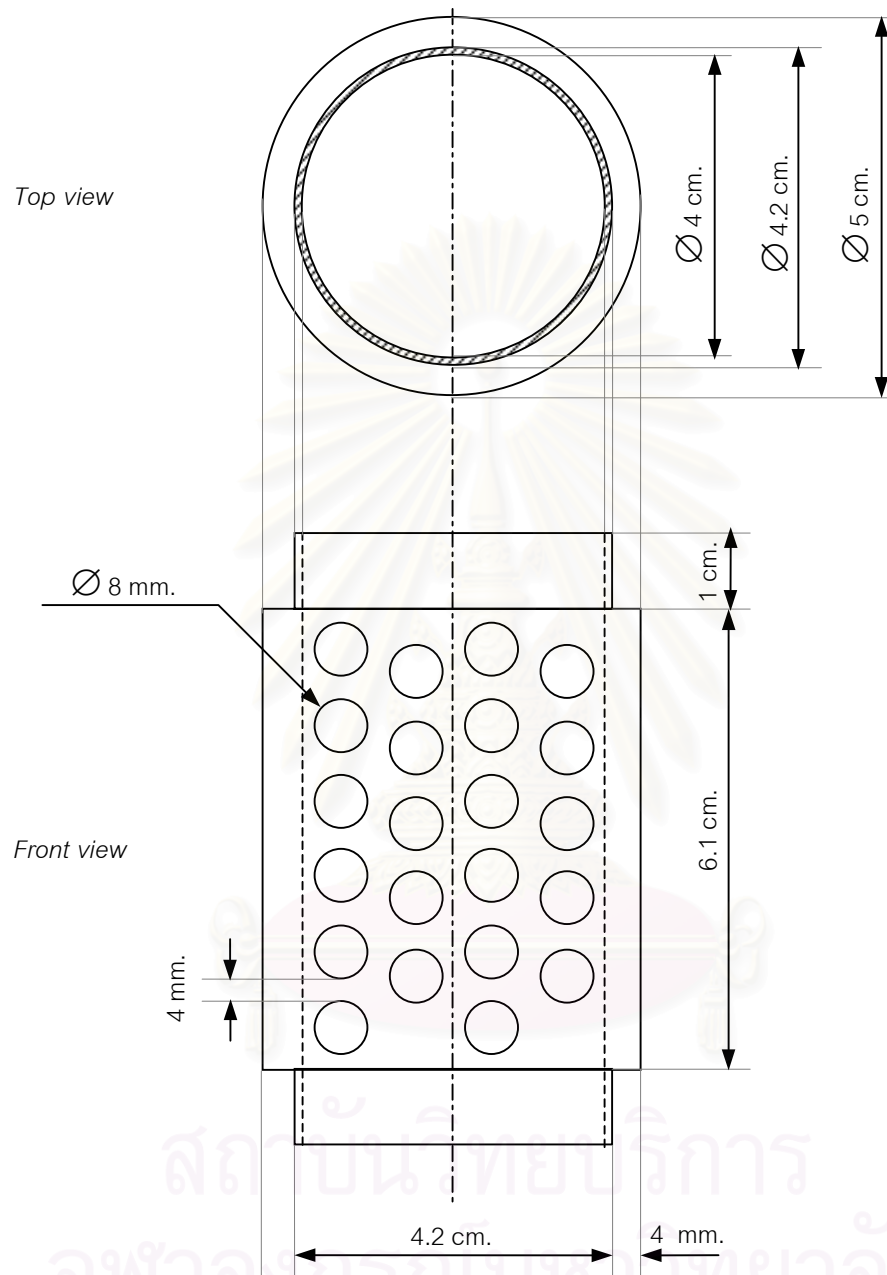
สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ๓ แกนของตัวกรอง

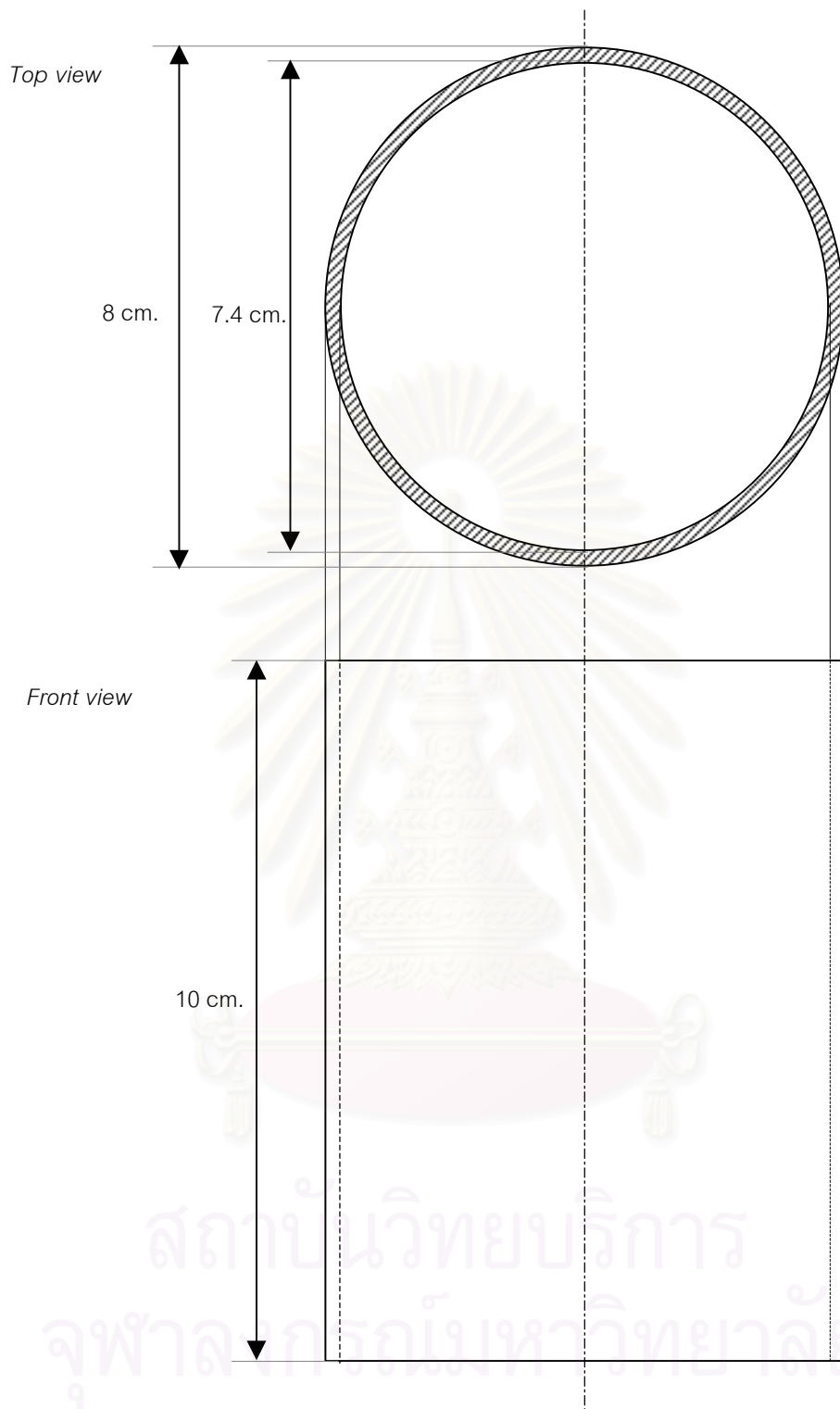


รูปที่ ๔ ตัวกรอง (1)

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

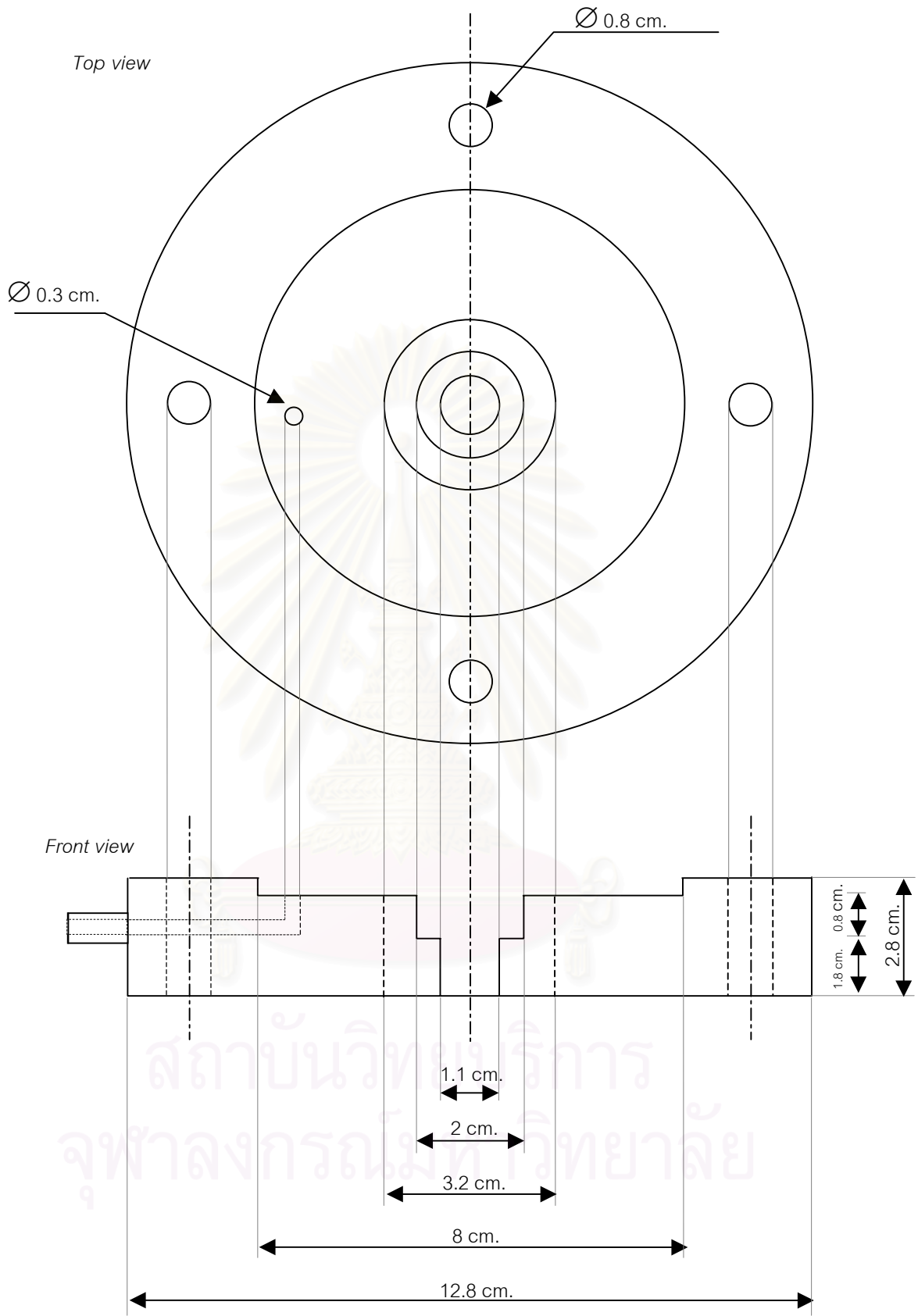


รูปที่ ๕ ตัวกรอง (2)



รูปที่ ๖ ทรงกระบอกชั้นนอก

หมายเหตุ ในการทดลองใช้ท่อทรงกระบอกชั้นนอก 3 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 7 และ 8 เซนติเมตร



รูปที่ ๗ หน้าแปลน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิติพงษ์ รัตนภรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่อำเภอเมือง จังหวัด
ตรัง เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย