APPLICATION OF MICROFILTRATION IN DEBITTERING PROCESS OF SPENT BREWER'S YEAST

Miss Pranee Kittianong

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 2000
ISBN 974-13-0612-1

การประยุกต์ใช้ไมโครฟิลเตรชันในกระบวนการกำจัดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์

นางสาวปราณี กิตติอนงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0612-1

ลิขสิทธิของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ไมโครฟิลเตรชันในกระบวนการกำจัดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์

โดย นางสาวปราณี กิตติอนงค์

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. มานพ สุพรรณธริกา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุกาญจนัจที)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.มานพ สุพรรรณธริกา)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4070334221 MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : DEBITTER, MICROFILTRATION, SPENT YEAST

PRANEE KITTIANONG : APPLICATION OF MICROFILTRATION IN DEBITTERING PROCESS OF SPENT BREWER'S YEAST. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr.Ing., THESIS COADVISOR : ASSOC.RPOF.MANOP SUPHANTHARIKA, Ph.D. 134 pp. ISBN 974-13-0612-1.

In the study of separation cell debris from intracellular product for debittering spent brewer's yeast by rotating microfiltration was divided to 2 parts. Firstly, cell was disrupted by homogenizer. It was found that protein release varied directly with pressure and number of passes of operating homogenizer. The optimum condition was 12%(w/V) spent brewer 's yeast , 500 bar , 2 passes. The protein and bitterness content were found to be 0.223 g/gcdw. And 0.433 mg.IAA./gcdw. Secondly, the separation cell debris by microfiltration was used for the debittering process in pH range 5, 6 and 7.5 . It was indicated that the bitterness substances were adsorbed on cell debris at pH 5 –6 and was removed by the membrane. The pore size of ceramic membrane was 0.2 μm and 0.9 μm had 100% rejection. From this investigation, when the membrane pore size was larger, the cell debris plugged on it.

An experimental study of the permeation of yeast homogenate and yeast autolysate (autolysis after homogenized) was carried out at transmembrane pressure 0.3 bar, feed solution flow rate 35 l/h, rotating speed 600 rpm, ceramic pore size 0.2 μm.The production rate of protein from yeast autolysate (yeast extract) was 8-times higher than that obtain from yeast homogenate (yeast protein concentrate). %Debittering was 80%.

Then the study of production rate of yeast extract by separated cell debris from yeast autolysate was concucted at various conditions of flow rate (11,15 and 35 l/h) and rotating speed (600 and 1000 rpm). It was found that the protein productivity increased with increasing rotating speed and with lowering flow rate. Maximum producitivity of protein was 379 g/m2-h, bitterness 644 mg.IAA./m2-h, solid yield 37.79%, protein content 0.354 g/gdw, bitterness content 0.6 mg.IAA./gdw and 68.14% debittering efficiency at 20 g/l yeast autolysate, 0.3 bar transmembrane pressure and 1000 rpm rotating speed.

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

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

Academic year..2000……. Co-advisor's signature……

ปราณี กิตติอนงค์ : การประยุกต์ใช้ไมโครฟิลเตรชันในกระบวนการกำจัดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ (APPLICATION OF MICROFILTRATION IN DEBITTERING PROCESS OF SPENT BREWER'S YEAST) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.มานพ สุพรรณธริกา,134 หน้า. ISBN 974-13-0612-1.

การศึกษาการแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์เพื่อกำจัดความขมโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ การทำให้เซลล์แตกโดยใช้โฮโมจิไนเซอร์ พบว่าปริมาณโปรตีนที่ออกมานอกเซลล์จะเพิ่มขึ้นตามความดัน และจำนวนรอบที่ใช้ในการโฮโมจิไนเซอร์ ภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เซลล์แตก คือ ความดัน 500 บาร์ 2 รอบ ความเข้มข้นสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ 12 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้งต่อปริมาตร) จะได้ปริมาณโปรตีน และความขม เท่ากับ 0.223 กรัมต่อกรัมเซลล์แห้ง และ 0.433 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมเซลล์แห้ง ขั้นตอนที่ 2 คือ การกรองแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ โดยเริ่มจากการศึกษาผลของพีเอชในสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทในช่วง 5,6 และ 7.5 พบว่าพีเอชในช่วง 5-6 สารที่ให้ความขมยังคงติดอยู่ที่เศษเซลล์และถูกกักเก็บอยู่ในระบบ โดยประสิทธิภาพในการแยกเศษเซลล์ของเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.9 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาพบว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.9 ไมโครเมตร เศษเซลล์จะอุดตันหรือปิดกั้นรูพรุนมากกว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร

การศึกษาการกรองแยกเศษเซลล์ออกจากยีสต์โฮโมจิเนท และยีสต์ออโตไลเสท โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความดัน 0.3 บาร์ อัตราการไหลของสายป้อน 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการผลิตโปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทมีค่าสูงกว่าการกรองยีสต์โฮโมจิเนทประมาณ 8 เท่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่ได้ เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์

ภาวะในการศึกษาการเพิ่มอัตราการผลิตโปรตีนจากการกรองยีสต์ออโตไลเสท คือ ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท 20 กรัมต่อลิตร, ความดัน 0.3 บาร์ อัตราการไหล 11, 15 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการผลิตโปรตีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น และลดอัตราการไหลของสายป้อน โดยที่ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.3 บาร์ อัตราการไหลของสายป้อน 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที จะได้อัตราการผลิตโปรตีนสูงสุด เท่ากับ 379 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ความขม 644 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ผลได้ของของแข็ง 37.79 เปอร์เซ็นต์ การเก็บเกี่ยวโปรตีน 59.66 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโปรตีน 0.354 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ความขม 0.6 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขม เท่ากับ 68.14 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา..... 2543.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.มานพ สุพรรณธริกา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำวิธีการทำงานวิจัยตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัทบุญรอด บริวเวอร์รี จำกัด ที่สนับสนุนวัตถุดิบในการวิจัย คุณประเสริฐ และคุณออมศรี บริษัทบุญรอด บริวเวอร์รี จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพรชัย และ คุณสุบิน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการกลึงเยื่อแผ่น และแก้ไขอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่อนุเคราะห์ให้ยืมเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องกลึง ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ห้องปฏิบัติการ BT207 และ BT210 ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่สนับสนุนให้ทุนวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆ ห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา (ผู้ซึ่งล่วงลับไปแล้ว) และ มารดา และขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความสนับสนุนทางการศึกษาตลอดมาจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญรูป..... ญ

สัญลักษณ์..... ฐ

บทที่

1. บทนำ..... 1

วัตถุประสงค์..... 3

ขอบเขตการศึกษา..... 3

2. ตรวจเอกสาร..... 4

2.1 การกำจัดความขม..... 4

2.2 การทำให้เซลล์แตก..... 6

2.3 การทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์..... 10

3. ทฤษฎี..... 13

3.1 โครงสร้างวิทยาของยีสต์..... 13

3.2 ฮอพ..... 14

3.3 โฮโมจิไนเซอร์..... 16

3.4 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน..... 17

3.5 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเยื่อแผ่นชนิดหมุนได้..... 31

4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย..... 38

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 38

4.2 เคมีภัณฑ์..... 39

4.3 เชื้อจุลินทรีย์..... 39

4.4 วิธีการทดลอง..... 39

4.5 การวิเคราะห์..... 42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. ผลการทดลอง วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง..... 45

5.1 ศึกษาผลการล้างสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ด้วยน้ำ..... 45

5.2 ศึกษาหาปริมาณความขมที่มีอยู่ในเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์..... 46

5.3 ศึกษาการทำให้เซลล์แตกโดยใช้โฮโมจิไนเซอร์..... 49

5.4 ศึกษาผลการกรองยีสต์โฮโมจิเนทด้วยเยื่อแผ่นเซรามิก..... 55

5.5 ศึกษาผลการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์อโตไลเสท.. 62

5.6 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกรองยีสต์ออโตไลเสทเพื่อให้ได้อัตราการผลิตโปรตีนสูงสุด..... 77

5.7 เปรียบเทียบผลการกำจัดความขมที่ได้จากการกรองกับการใช้สารเคมี..... 82

5.8 แนวทางการพัฒนาในอนาคต..... 84

สรุปผลการทดลอง..... 87

ข้อเสนอแนะ..... 87

รายการอ้างอิง..... 88

ภาคผนวก..... 92

ภาคผนวก ก..... 93

ภาคผนวก ข..... 95

ภาคผนวก ค..... 105

ประวัติผู้แต่ง..... 134

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงลักษณะของแอลฟาแอซิดและเบต้าแอซิด…….……..	15
5.1	แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่อยู่ในน้ำล้างครีมยีสต์ แต่ละครั้ง……..	45
5.2	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่สถานะคงตัว อัตราการไหล 11, 15 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที…..……	80
5.3	เปรียบเทียบยีสต์สกัดที่ได้จากการกำจัดความขมด้วยวิธีต่างๆ…….……..	83
5.4	เปรียบเทียบความขมที่มีอยู่ในยีสต์ทั้งหมด (ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร) ที่ได้ในขั้นตอนต่างๆ……	85

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	แสดงลักษณะโครงสร้างของผนังเซลล์ยีสต์.....	13
3.2	แสดงโฮโมจิไนซิงวาวล์ในเครื่องโฮโมจิไนเซอร์.....	16
3.3	การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น.....	17
3.4	แสดงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน.....	18
3.5	แสดงการต้านทานต่อการไหลต่างๆ ตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน.....	20
3.6	แสดงการอุดตันตามแบบจำลอง Cake filtration model.....	24
3.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่.....	24
3.8	แสดงการอุดตันรูพรุนที่เสนอโดยแบบจำลองต่างๆ.....	25
3.9	ลักษณะการไหลของสารละลายระหว่างเยื่อแผ่นและท่อทรงกระบอก.....	32
3.10	ลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในและผนังของเยื่อแผ่นด้านนอก.....	32
3.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์.....	35
4.1	แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	41
5.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ที่ผ่านการล้างด้วยด่าง และโฮโมจิไนเซอร์....	48
5.2	แสดงปริมาณโปรตีน และความขมที่วิเคราะห์ได้จากส่วนต่างๆ ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์.....	48
5.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์เมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 3 รอบที่ความดันต่างๆ.....	50
5.4	แสดงปริมาณโปรตีนที่เปลี่ยนแปลงตามความดันเมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 3 รอบ	51
5.5	แสดงปริมาณความขมที่เปลี่ยนแปลงตามความดันเมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 3 รอบ...	51
5.6	แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 500 บาร์ที่รอบต่างๆ.....	53
5.7	แสดงปริมาณโปรตีนที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบในการโฮโมจิไนเซอร์ที่ความดัน 500 บาร์.....	54
5.8	แสดงปริมาณความขมที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบในการโฮโมจิไนเซอร์ที่ ความดัน 500 บาร์.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงเพอมิเอชันฟลักซ์ตามเวลาที่ใช้ในการกรองเมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5, 6 และ 7.5 แสดงปริมาณโปรตีนที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบในการโฮโมจิไนเซอร์ที่..... 58

5.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโปรตีน (A) และความขม (B) ในยีสต์โฮโมจิเนท และ ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง เมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5,6 และ 7.5..... 59

5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (A) และการกำจัดความขม (B) ตามเวลาที่ใช้ในการกรองเมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5,6 และ 7.5..... 59

5.12 แสดงลักษณะผิวหน้าของเยื่อแผ่นเซรามิก..... 61

5.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงเพอมิเอชันฟลักซ์ตามเวลาที่ใช้ในการกรองเมื่อยีสต์โฮโมจิเนท มีพีเอช 5, 6 และ 7.5..... 61

5.14 แสดงลักษณะสารละลายสายป้อน และสายเพอร์มิเอทจากการส่องกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า..... 61

5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์โฮโมจิเนทตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที..... 64

5.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโปรตีน (A) และความขม (B) ในสายรีเทนเทท และ เพอร์มิเอท ตามเวลาที่ใช้ในการกรองยีสต์โฮโมจิเนท..... 65

5.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (A) และการกำจัดความขม (B) ตามเวลาที่ใช้ในการกรองเมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5,6 และ7.5..... 65

5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์โฮโมจิเนทตามเวลาที่ใช้ในการกรองความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที..... 68

5.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโปรตีน (A) และความขม (B) ในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอท ตามเวลาที่ใช้ในการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท..... 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.20 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (A) และการกำจัดความขม (B) ที่ได้จากการกรอง ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท กับยีสต์โฮโมจิเนทตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที..... 69

5.21 ,แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์ออโตไลเสทตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที..... 72

5.22 ,แสดงผลการเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท, ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที..... 72

5.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโปรตีน (A) และความขม (B) ในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอท ตามเวลาที่ใช้ในการกรองยีสต์ออโตไลเสท..... 73

5.24 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (A) และการกำจัดความขม (B) ที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท กับยีสต์โฮโมจิเนทตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที..... 73

5.25 แสดงผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท ตามเวลาที่ใช้ ในการกรองที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที..... 74

5.26 แสดงผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท ตามเวลาที่ใช้ในการกรองที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที..... 74

5.27 แสดงผลการเปรียบเทียบการกรองยีสต์โฮโมจิเนท, ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสทตามเวลาที่ใช้ในการกรองที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที..... 75

5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์ออโตไลเสทกับเวลาที่ใช้ในการกรองแบบไม่ต่อเนื่อง..... 78

5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์กับความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสทที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการกรอง..... 78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.30 แสดงผลการเปรียบเทียบการกรองที่สถานะคงตัว อัตราการไหล 11, 15 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที..... 81

5.31 แสดงลักษณะของเซลล์ที่ผ่านกระบวนการต่างๆ จากการส่องกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า..... 86

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

A	=	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล และ molar volume ของสารแต่ละตัว (-)
C	=	ความเข้มข้นของสารละลาย (กรัมต่อลิตร)
C_b	=	ความเข้มข้นของสารละลายในระบบ (กรัมต่อลิตร)
C_g	=	ความเข้มข้นของเจล (กรัมต่อลิตร)
C_p	=	ความเข้มข้นของสารละลายในเพอมิเอท (กรัมต่อลิตร)
C_w	=	ความเข้มข้นของสารละลายในที่ผิวเยื่อแผ่น (กรัมต่อลิตร)
d	=	ความสูงของช่องว่างของของเหลวเหนือเยื่อแผ่น (เมตร)
d_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (เมตร)
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตรต่อชั่วโมง)
E	=	ค่าพลังงานกระตุ้น (จูลต่อเมตร-ชั่วโมง)
J_v	=	เพอมิเอชันฟลักซ์ (ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)
K	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (เมตรต่อชั่วโมง)
K_b	=	ค่าคงที่การกรองของ CBM (ต่อชั่วโมง)
K_c	=	ค่าคงที่การกรองของ CFM (ชั่วโมงต่อเมตร$^{-6}$)
K_i	=	ค่าคงที่การกรองของ IBM (ต่อลูกบาศก์เมตร)
K_s	=	ค่าคงที่การกรองของ SBM (ต่อชั่วโมง)
n	=	จำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ (รอบต่อชั่วโมง)
P_I	=	ความดันขาเข้าของสารละลาย (บาร์)
P_o	=	ความดันขาออกของสารละลาย(บาร์)
P_f	=	ความดันสารละลายเพอมิเอท (บาร์)
Q	=	อัตราการไหลของเพอร์มิเอทที่เวลาใดๆ (ลิตรต่อชั่วโมง)
Q_o	=	อัตราการไหลของเพอร์มิเอทเริ่มต้น (ลิตรต่อชั่วโมง)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (จูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)
R	=	ค่าการกักเก็บปรากฏ (เปอร์เซ็นต์)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

R_a = ความต้านทานเนื่องจากการดูดซับ (ต่อเมตร)

R_{cp} = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (ต่อเมตร)

R_f = ความต้านทานเนื่องจากการสเกล (ต่อเมตร)

R_g = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดเจลโพลาไรเซชัน (ต่อเมตร)

R_{int} = ค่าการกักเก็บจริง (เปอร์เซ็นต์)

R_m = ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (ต่อเมตร)

R_p = ความต้านทานการกรองเนื่องจากเกิดโพลาไรเซชัน (ต่อเมตร)

R_{pp} = ความต้านทานเนื่องการอุดตันรูพรุน (ต่อเมตร)

R_t = ความต้านทานรวม (ต่อเมตร)

R_1 = รัศมีของเยื่อแผ่นเซรามิก (เมตร)

R_2 = รัศมีภายในของท่อทรงกระบอก (เมตร)

Re = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (-)

Re_a = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกน (-)

Re_t = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ผิวของเยื่อแผ่น (-)

Sc = สมิทนัมเบอร์ (-)

Sh = เชอร์วูดนัมเบอร์ (-)

t = เวลา (ชั่วโมง)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

T_a = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (-)

$T_{a,crit}$ = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์วิกฤต (-)

V = ความเร็วของสารละลายตามแนวแกน (เมตรต่อชั่วโมง)

X = ระยะห่างจากชั้นขอบเขต (เมตร)

X_b = ความเข้มข้นโปรตีนในสายป้อน (กรัมต่อลิตร)

X_p = ความเข้มข้นโปรตีนในสายเพอร์มิเอท (กรัมต่อลิตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ (ต่อ)

Y_b = ความเข้มข้นความขมในสายป้อน (EBU)

Y_p = ความเข้มข้นความขมในสายเพอร์มิเอท (EBU)

Δ = ระยะห่างของผิวเยื่อแผ่นกับผนังท่อทรงกระบอกด้านใน (เมตร)

ΔP = ผลต่างของความดันขาเข้าและขาออกของสารละลาย (บาร์)

ΔP_{TM} = ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท (บาร์)

ρ = ความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

σ = สัมประสิทธิ์การกักเก็บของเยื่อแผ่น (-)

ν = ความเร็วของสารละลาย (เมตรต่อชั่วโมง)

μ = ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัมต่อเมตร-ชั่วโมง)

τ = แรงเฉือนที่ผิวเยื่อแผ่น (ต่อชั่วโมง)

ω = ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อชั่วโมง)

υ = ความหนืดคิเนมาติก (ตารางเมตรต่อชั่วโมง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์นั้นจะใช้ยีสต์ *Saccharomyces sp.* ในการหมักโดยจะมีการนำยีสต์ที่ผ่านการหมักแล้วมาใช้ใหม่ประมาณ 7- 8 ครั้ง จนกระทั่งความสามารถในการหมักของยีสต์ลดลง แต่ยังคงเป็นยีสต์ที่มีชีวิตและมีสารสำคัญโดยเฉพาะโปรตีนและวิตามินบีอยู่ภายในเซลล์ยีสต์อยู่มาก ยีสต์ที่ผ่านการหมักเบียร์แล้วจะเรียกว่า สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ (spent brewer's yeast)

ในปัจจุบันปริมาณสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์จากโรงงานเบียร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังการผลิตเนื่องจากความต้องการบริโภคเบียร์ของคนไทยมีมากขึ้น (จันทนีและชัชวาลย์,2529) ประกอบกับการนำสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเบียร์มาใช้เพื่อเป็นอาหารสัตว์ให้ผลตอบแทนไม่สูงนัก รวมทั้งการนำสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ไปถมที่เพื่อใช้เป็นปุ๋ยก็ยังก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นการผลิตโปรตีนคอนเซนเทรทและยีสต์สกัดจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและให้ผลตอบแทนที่สูงกว่า เป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และเป็นการนำกากของเสียกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

โดยทั่วไปสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ได้จากโรงงานเบียร์มักมีความขมเนื่องจากสารแอลฟาแอซิด (alpha-acid) ที่มีอยู่ในดอกฮอพที่ใช้เติมลงในน้ำเวิร์ต (wort) เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ไปเป็นไอโซ-แอลฟาแอซิด (iso-alpha acid) ซึ่งบางส่วนจะละลายอยู่ในเบียร์และบางส่วนจะถูกดูดซึม (adsorbed) อยู่ที่ผนังเซลล์ของยีสต์ ดังนั้นการที่จะนำสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ไปผลิตเป็นยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทและยีสต์สกัดจำเป็นที่จะต้องมีการลดความขมส่วนนี้ออกก่อน โดยพบว่าการใช้สารละลายด่างสามารถกำจัดความขมออกจากผนังเซลล์ยีสต์ได้เป็นอย่างดีแต่จำเป็นต้องใช้น้ำจำนวนมากในการล้างด่างออกก่อนที่จะนำยีสต์มาใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งส่งผลให้มีปัญหาทางด้านน้ำเสียตามมา นอกจากนี้การใช้ด่างยังทำให้เปอร์เซ็นต์ของของแข็งในยีสต์มีค่าลดลง (อัมพร, 1997 และ Simard และ Bouksaim, 1998) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการกำจัดความขมโดยวิธีอื่นๆ เช่น โครมาโตรกราฟฟีแบบแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange chromatography), โครมาโตรกราฟฟีแบบคัดขนาด (exclusion chromatography) (Godfrey และ Reichelt, 1983), โครมาโตรกราฟฟีแบบคอลัมน์ (column chromatrgraphy) (ชนิตโชตและคณะ, 2536) ซึ่งวิธีเหล่านี้ให้ผลในการกำจัดความขมไม่ดีเท่าการใช้สารละลายด่าง และมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง นอกจากนี้

ยังมีปัญหาขยายขนาดได้ยากอีกด้วย ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนากระบวนการในการกำจัดความขม โดยพิจารณาจากคุณสมบัติในการละลายน้ำของสารที่ให้ความขม คือ สารที่ให้ความขมจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้เมื่อพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง และจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและยังติดอยู่ที่ผนังเซลล์ของยีสต์ ไม่ละลายออกมาในสารละลายเมื่อพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกลางจนถึงกรด (Reed และ Nagodawithana, 1991) ดังนั้นหลังจากผ่านขั้นตอนการทำให้เซลล์แตกและแยกผนังเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ในภาวะที่เป็นกลางจนถึงกรดก็น่าจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความขมลดลงด้วยเช่นกัน

การแยกผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ออกจากเซลล์ ต้องผ่านขั้นตอนแรกคือ ทำให้เซลล์แตกก่อน วิธีที่ใช้ในการทำให้เซลล์แตกมี 2 วิธีหลัก คือ วิธีการใช้สารเคมี และวิธีทางกล โดยวิธีการใช้สารเคมีมีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ไม่รุนแรง ใช้พลังงานน้อย แต่มีข้อเสีย คือ ใช้เวลานาน และอาจเป็นพิษเนื่องจากมีสารเคมีที่ใช้เจือปน ส่วนวิธีทางกล มีข้อดี คือ ใช้เวลาน้อย สามารถขยายขนาดและทำให้ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ (Sterile) ได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ เป็นวิธีที่รุนแรง และใช้พลังงานสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีทำให้เซลล์แตกโดยวิธีทางกล คือ โฮโมจิไนเซอร์ เนื่องจากสามารถขยายขนาดได้ง่าย และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีการปนเปื้อนจากสารเจือปนใดๆ

หลังจากทำให้เซลล์แตกแล้วจะได้สารละลายที่ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ปนอยู่กับเศษเซลล์ที่เกิดขึ้นจากการทำให้เซลล์แตก การแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอน, การปั่นแยก (centrifuge) และการกรอง เป็นต้น

การแยกเศษเซลล์ที่มีขนาดเล็กที่เกิดจากการทำให้เซลล์แตกด้วยวิธีทางกลโดยการปั่นแยกจะต้องใช้พลังงานสูง ส่วนการตกตะกอนจะใช้เวลานาน และอุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดใหญ่ ในขณะที่การกรองมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีอื่นๆ คือ มีประสิทธิภาพในการแยกสูง, ใช้พลังงานน้อย และสามารถประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ เพื่อลดปัญหาการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น ทำให้การกรองมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น โดยทำการแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ ในภาวะที่พีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกลางหรือกรด ซึ่งความขมจะยังคงติดอยู่เศษเซลล์และถูกกักเก็บไว้ในระบบทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความขมลดลง โดยวิธีนี้จะเป็นการลดขั้นตอนในการกำจัดความขมและลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีอีกด้วย

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์จากอุตสาหกรรมเบียร์โดยการกรองระดับอนุภาค

ขอบเขตงานวิจัย

1. หาปริมาณความขมที่มีอยู่ในเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เซลล์แตก เพื่อให้ได้ปริมาณโปรตีนมากที่สุด ปัจจัยที่ศึกษา คือ
    2.1 ความดัน
    2.2 จำนวนรอบ
3. ศึกษาผลการกรองยีสต์โฮโมจิเนทด้วยเยื่อแผ่นเซรามิก
    3.1 ผลของพีเอช (ศึกษาในช่วงพีเอช 5 – 7.5)
    3.2 สมรรถนะของเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.9 ไมโครเมตร
4. ศึกษาการไหลผ่านของโปรตีนจากกรองยีสต์โฮโมจิเนท, ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท ด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร, อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมง, ความดัน 0.3 บาร์ ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ1000 รอบต่อนาที
5. หาภาวะที่เหมาะสมในการกรองยีสต์ออโตไลเสท เพื่อให้ได้อัตราการผลิตโปรตีนสูงที่สุด ปัจจัยที่ศึกษา คือ
    5.1 อัตราการไหล (11, 15 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง)
    5.2 ความเร็วรอบ (600 และ 1000 รอบต่อนาที)
6. เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนและความขมของยีสต์สกัดที่ผ่านการกรองกับยีสต์สกัดที่ได้จากเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการล้างด้วยด่างก่อนการทำออโตไลซิส
7. ศึกษาผลการดูดซับโปรตีนของเยื่อแผ่น
    7.1 กรองสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบต่างกัน (600 และ 1000 รอบต่อนาที)
    7.2 กรองสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีโปรตีนอุดตันแล้ว

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

ในอดีตที่ผ่านมาพบว่าการนำสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์มาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอาหาร โดยไม่ได้มีการกำจัดความขมออกก่อนนั้น จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรสขม ดังนั้นในการนำสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์มาผลิตเป็นยีสต์สกัดและยีสต์โปรตีนคอนเซนเตรทจึงควรที่จะมีการลดความขมออกจาก สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ออกก่อน ซึ่งสามารถแบ่งการผลิตออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การกำจัดความขม (debittering process) การทำให้เซลล์แตก (cell disruption) และการแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ (cell debris separation)

2.1 การกำจัดความขม (debittering process)

สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์เป็นยีสต์ที่ได้มาจากกระบวนการผลิตเบียร์ซึ่งผ่านการหมักมาหลายครั้ง โดยในขั้นตอนการผลิตเบียร์จะมีการเติมฮอพลงในน้ำเวิร์ต (wort) เพื่อให้ได้เบียร์ที่มีรสขม สารที่ให้ความขมในฮอพ คือ แอลฟาแอซิด (alpha acid) จะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ไปเป็นไอโซแอลฟาแอซิด (iso-alpha acid) ซึ่งมีรสขมโดยความขมบางส่วนจะอยู่ในน้ำเบียร์และบางส่วนจะถูกดูดซึม (adsorp) โดยยีสต์ ซึ่งพบว่าสารที่ให้ความขมส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผนังเซลล์ของยีสต์

ยีสต์จะดูดซึมสารที่ให้ความขมไว้ที่ผนังเซลล์ด้วยแรงดูดซึม (adsorptive force) ดังนั้นจึงสามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวนี้ได้โดยใช้สารละลายอินทรีย์ (organic solvent) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซค์ (sodium hydroxide), โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate), ยูเรีย (urea) และ โปแตสเซียมไทโอไซยาเนต (potassium thiocyanate) เป็นต้น

อัมพร, 1997 ได้ทำการศึกษาการผลิตสารสกัดจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์โดยทำการเปรียบเทียบการผลิตสารสกัดจากยีสต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดความขมเทียบกับการกำจัดความขมจากยีสต์สกัดโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) พบว่ายีสต์สกัดที่ได้จากการล้างสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซค์ และ โซเดียมคาร์บอเนตจะมีค่าผลได้ของของแข็ง (solid yield), การเก็บเกี่ยวโปรตีน (protein recovery) และค่าความขมน้อยกว่ายีสต์สกัดที่ผลิตจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ไม่ผ่านการล้างด้วยด่าง และเมื่อนำยีสต์สกัดที่

ได้จากยีสต์ที่ไม่ผ่านการล้างเซลล์ที่มีความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ไปลดความขมโดยใช้เฮกเซน (hexane) ในสัดส่วน 1:5 โดยปริมาตรเป็นเวลา 10 นาที จะทำให้ได้ค่าผลได้ของของแข็งและโปรตีนเพิ่มขึ้นจาก 21 เปอร์เซ็นต์ และ 25 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับในการผลิตระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) และ จาก 20 เปอร์เซ็นต์ และ 37 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ และ 53 เปอร์เซ็นต์ ในการผลิตระดับโรงงานต้นแบบ (pilot scale) นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีค่าความขมอยู่ในช่วง 10 – 17 EBUต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการล้างเซลล์ด้วยด่าง

Simard และ Bouksaim, 1998 ได้กำจัดความขมออกจากบริวเวอร์ยีสต์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซค์ (sodium hydroxide) 2 นอร์มัล ร่วมกับการใช้ทวีน 80 (tween 80) 20 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) ปรับพีเอชให้ได้ 10 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กวน 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 50 นาที พบว่าสามารถกำจัดความขมออกได้ 98 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวจะช่วยให้เซลล์มีชีวิตอยู่ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีผลกระทบต่อโปรตีนภายในเซลล์ยีสต์ด้วย และเมื่อนำไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมจะสามารถเจริญได้ภายใน 2-6 ชั่วโมง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเบเกอร์รี่ และเบียร์ต่อได้อีกด้วย และเมื่อทดลองใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซค์ (potassium hydroxide) ในการกำจัดความขมที่ความเข้มข้น และภาวะในการทดลองเดียวกันกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซค์ พบว่าสามารถลดความขมได้น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการใช้โซเดียมไฮดรอกไซค์ในการกำจัดความขมจึงมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซค์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากในภาวะที่เป็นด่าง โซเดียมไอออน (Na^+) มีความสามารถในการจับ (affinity) กับสารที่ให้ความขมและเกิดเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ดีกว่าโปแตสเซียมไอออน (K^+)

เนื่องจากว่าโซเดียมไฮดรอกไซค์เป็นสารที่มีราคาถูก และสามารถกำจัดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ได้ดี ดังนั้นจึงนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซค์ในการล้างยีสต์ก่อนที่จะนำยีสต์ไปใช้ต่อไป แต่เนื่องจากว่าต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากในการล้างด่างออกจึงทำให้มีปัญหาในด้านน้ำเสียตามมา นอกจากนี้การใช้ด่างยังทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของแข็งในยีสต์มีค่าน้อยลงอีกด้วย จึงได้มีการพัฒนาการกำจัดความขมโดยใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น โครมาโตรกราฟฟีแบบแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange chromatography), โครมาโตรกราฟฟีแบบคัดขนาด (exclusion chromatography)

(Godfrey และ Reichelt,1983), โครมาโตรกราฟฟีแบบคอลัมน์ (column chromatography) (ชนิตโชตและคณะ, 2536) เป็นต้น แต่พบว่าวิธีเหล่านี้จำเป็นต้องลงทุนสูงไม่คุ้มกับการผลิต และยังให้ผลในการกำจัดความขมได้ไม่ดีเท่าการใช้สารละลายด่าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแนวทางในการกำจัดความขมต่อไป

2.2 การทำให้เซลล์แตก (Cell disruption)

ในกระบวนการทำให้เซลล์แตกจะต้องพิจารณาถึงโครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์ โดยทั่วไปมักจะขึ้นอยู่กับพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์มีรูปร่างเป็นรูปไข่ มีขนาดประมาณ 6 – 7 ไมโครเมตร ผนังเซลล์ของยีสต์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยกลูแคน (glucan) แมนแนน (mannan) และโปรตีน ผนังเซลล์จะหนาประมาณ 1/7 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ โดยความหนาของผนังเซลล์จะเพิ่มมากขึ้นตามอายุ ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลล์จะแตกต่างกันออกไปตามสายพันธุ์และภาวะในการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์

วิธีการย่อยเซลล์สามารถแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการหลัก ดังนี้

2.2.1 <u>การย่อยด้วยกรด (hydrolysis)</u>

วิธีนี้จะเป็นวิธีที่ใช้กรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริกร่วมกับการให้ความร้อนโดยกรดจะทำปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสกับโปรตีนเกิดเป็นกรดอะมิโนอิสระ และ ย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ ๆ ในเซลล์ยีสต์ เช่น คาร์โบไฮเดรต และ กรดนิวคลีอิค ให้อยู่ในรูปสารโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ เวลาที่ใช้ในการย่อยเซลล์จะขึ้นกับความเข้มข้นของกรด โดยปกติจะทำการไฮโดรไลซ์จนกระทั่งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นแอลฟาอะมิโนไนโตรเจนประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ (Reed และNagodawithana, 1991) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ยีสต์ไฮโดรไลเสท (yeast hydrolysate) การย่อยสลายด้วยกรด และความร้อนนี้จะให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ (product yield) ในปริมาณที่สูง แต่ความรุนแรงของกรดจะทำให้กรดอะมิโน และวิตามินถูกทำลาย และยังอาจเกิดสารประกอบพวกคลอริเนต (3-chloro-propanediol) อีกด้วย

2.2.2 พลาสโมไลซิส (plasmolysis)

วิธีนี้จะทำให้เซลล์แตกโดยการเติมตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) เช่น เอทิลอะซีเตท, ไอโซโพรพานอล, คลอโรฟอร์ม, โทลูอีน หรือ ใช้เกลืออนินทรีย์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โดยใช้ที่ความเข้มข้นสูงๆ เมื่อเซลล์ยีสต์อยู่ในภาวะที่มีสารดังกล่าวความเข้มข้นสูงๆ จะทำให้ยีสต์สูญเสียน้ำในเซลล์เพื่อรักษาความดันออสโมติก (osmotic pressure) ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ไว้ เมื่อเซลล์สูญเสียน้ำมากขึ้นเยื่อหุ้มเมมเบรน (plasma membrane) จะแยกตัวออกจากผนังเซลล์ และแตกออก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เรียกว่า ยีสต์พลาสโมไลเสท (yeast plasmolysate) แต่สารสกัดที่ได้จะมีเกลือในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณการใช้ในสูตรอาหารที่เกี่ยวข้อง

Sugimoto, 1974 ได้ศึกษาผลการใช้เกลือแกง 2 - 5 เปอร์เซ็นต์ และเอธานอล 5 – 9 เปอร์เซ็นต์ในการย่อยเซลล์ยีสต์ (baker's yeast) พบว่ายีสต์พลาสโมไลเสทที่ได้จะมีปริมาณไนโตรเจน 6.81 เปอร์เซ็นต์, เกลือแกง 18.1 เปอร์เซ็นต์, ไขมัน 0.40 เปอร์เซ็นต์, แอมโมเนียไนโตรเจน 0.13 เปอร์เซ็นต์, คาร์โบไฮเดรต 7.20 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณเถ้าไม่รวมเกลือแกง 2.69 เปอร์เซ็นต์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่นรสที่ดี และไม่มีรสขม

2.2.3 การย่อยเซลล์ด้วยวิธีทางกล (mechanical disruption)

วิธีทางกลที่นิยมใช้ในการทำให้เซลล์แตกในระดับอุตสาหกรรม คือ การใช้ลูกแก้ว (glass bead mill) และ การใช้โฮโมจิไนเซอร์ (homogenizer) โดยจะทำให้เกิดแรงเฉือนที่ผนังเซลล์ส่งผลให้เซลล์แตกหรือฉีกขาด ดังนั้นสารต่างๆ ภายในเซลล์จะถูกปลดปล่อยออกมา แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการใช้ลูกแก้วในการทำให้เซลล์แตกจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ (agitator speed) , ปริมาตรและขนาดของลูกแก้ว, ความเข้มข้นของเซลล์, อุณหภูมิ, อัตราการไหล และลักษณะของ Bead mill disks ส่วนแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการใช้โฮโมจิไนเซอร์จะขึ้นอยู่กับความดัน และจำนวนรอบที่ใช้ในการทำให้เซลล์แตก, ความเข้มข้นของเซลล์, อุณหภูมิ และลักษณะของวาล์วที่มีอยู่ในเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นส่วนผสมของโปรตีน กรดนิวคลีอิค เอนไซม์ภายในเซลล์และชิ้นส่วนของผนังเซลล์ (cell debris) จะเรียกว่า ยีสต์โฮโมจิเนท (yeast homogenate) และถ้าแยกส่วนของผนังเซลล์ออกแล้วจะเรียกผลิตภัณฑ์นั้นว่า ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท (yeast protein concentrate)

Shamlou (Shamlou,1995 อ้างถึงใน Roberts และคณะ,1994) พบว่าการทำให้เซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์แตกจะต้องใช้แรงประมาณ 40 ไมโครนิวตัน (μN) สำหรับเซลล์ที่อยู่ในช่วงการเจริญเติบโต (exponential phase) และ 90 ไมโครนิวตัน สำหรับเซลล์ที่อยู่ในช่วงหยุดการเจริญเติบโต (stationary phase)

Marffy และ Kula,1974 ศึกษาการสกัดเอนไซม์ออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ โดยใช้ Dyno-Mill disintegrator พบว่าปริมาณโปรตีนจะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาในการทำให้เซลล์แตก ภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ ขนาดลูกแก้ว (bead) 0.25-0.5 มิลลิเมตร เวลา 800 วินาที (13.3 นาที) ความเร็ว 4500 รอบต่อนาที จะได้เปอร์เซ็นต์ในการทำให้เซลล์แตก 95 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 10.4 กรัมต่อลิตร

Whitworth, 1974 ได้ศึกษาการใช้โฮโมจิไนเซอร์ในการทำให้เอนไซม์และโปรตีนละลายออกมาจากเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์โดยใช้ Manton-Gaulin Laboratory Homogenizer ,Model 15M-8TA ในการทำให้เซลล์แตก พบว่าปริมาณโปรตีนที่ได้จะขึ้นกับความดันที่ใช้ในการทำให้เซลล์แตก โดยที่อุณหภูมิในช่วง 10 – 30 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อการละลายของเอนไซม์และ โปรตีน เมื่อใช้ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักเปียกต่อปริมาตร) จะได้โปรตีนสูงสุด 96.5 มิลลิกรัมต่อกรัมครีมยีสต์ คิดเป็นสัดส่วนของโปรตีนทั้งหมดที่ออกมาได้ 72 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถ (activity) ของเอนไซม์แอลกอฮอลล์ดีไฮโดรจิเนส (alcohol dehydrogenase) 84 ยูนิตต่อกรัมครีมยีสต์ ที่ความดัน 560 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 63.5 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทีมีอยู่จะละลายออกมาเมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์เพียงรอบเดียว และ 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์รอบที่สอง

การทำให้เซลล์แตกด้วยวิธีทางกลเป็นวิธีที่สามารถขยายขนาดได้ง่ายแต่จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงความรุนแรงในการทำให้เซลล์แตกซึ่งจะมีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น ความหนืด พีเอช และขนาดชิ้นส่วนของเศษเซลล์ที่อยู่ในสารละลาย เพราะว่าจะมีผลต่อขั้นตอนในการแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ต่อไป

2.2.4 การย่อยสลายตัวเองของยีสต์ (autolysis)

การย่อยสลายตัวเองของยีสต์เป็นการย่อยสลายตัวเองโดยเอนไซม์ภายในเซลล์ของยีสต์เองซึ่งจะได้สารสกัดจากยีสต์ที่มีคุณภาพที่ดีกว่า 3 กระบวนการแรก โดยวิธีนี้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิให้เซลล์ตายแต่ไม่ทำให้เอนไซม์ภายในเซลล์ (endogeneous enzyme) เช่น โปรติเอส กลูคาเนส และนิวคลีเอส เสื่อมสภาพ (Verduyn และคณะ, 1999) ดังนั้นเอนไซม์ภายในเซลล์จะย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน และกรดนิวคลีอิค ไปเป็นสารโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้ และปล่อยออกมานอกเซลล์เนื่องจากผนังเซลล์สูญเสียคุณสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่าน (semipermeable membrane) โดยทั่วไปภาวะที่เหมาะสมในการออโตไลซิส คือ ใช้ของแข็ง 15 เปอร์เซ็นต์ พีเอชประมาณ 5.5 นำมาให้ความร้อนที่ 45-50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 – 36 ชั่วโมง (Reed และ Nagodawithana, 1991) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถ้ายังไม่แยกผนังเซลล์ออกจะเรียกว่า ยีสต์ออโตไลเสท (yeast autolysate) และถ้าผลิตภัณฑ์นั้นแยกผนังเซลล์ออกแล้วจะเรียกว่า ยีสต์สกัด (yeast extract) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกรดอะมิโน โปรตีน นิวคลีโอไทด์ วิตามิน และสารที่ให้กลิ่นรส เป็นต้น

การย่อยสลายตัวเองโดยเอนไซม์ภายในเซลล์ยีสต์เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจมากกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโซเดียมต่ำนอกจากนี้ยังมีกลิ่นรสใกล้เคียงกับสารสกัดจากเนื้อสัตว์แต่เนื่องจากกระบวนการนี้ต้องใช้เวลานานจึงจำเป็นต้องเร่งการย่อยสลายเพื่อให้ผนังเซลล์สูญเสียสภาพและปล่อยให้องค์ประกอบในเซลล์ออกมานอกเซลล์ได้ เช่น การใช้เอนไซม์ สารเคมี และ การใช้วิธีทางกล (วิวัฒน์, 2535 ,Verduyn และคณะ, 1999)

การใช้เอนไซม์ (เช่น กลูคาเนส ปาเปน) ร่วมกับการออโตไลซิสจะทำให้ได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ในปริมาณสูง แต่ไม่คุ้มกับการลงทุนเนื่องจากทำให้ต้นทุนของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น ส่วนการใช้สารเคมี (เช่น โทลูอีน โซเดียมไฮดรอกไซค์) นั้นไม่ทำให้ได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงมากนัก และยังอาจเป็นพิษเนื่องจากสารเคมีที่ใช้อีกด้วย ดังนั้นการใช้แรงกล เช่น การใช้ลูกแก้ว หรือโฮโมจิไนเซอร์ ร่วมกับการออโตไลซิสจึงเป็นวิธีที่ได้รับความสนใจ

Verduyn และคณะ,1999 พบว่าการใช้โฮโมจิไนเซอร์ความดันสูง (600 และ 1000 บาร์) ก่อนทำการออโตไลซิสของเบเกอร์ยีสต์จะทำให้ได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุด เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากการใช้โฮโมจิไนเซอร์จะทำให้เอนไซม์โปรตีเอส และกลูคาเนสที่อยู่บริเวณผนังเซลล์หลุดออกมาช่วยเร่งปฏิกิริยาออโตไลซิส โดยจะได้ค่าผลได้ของไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) และของแข็ง คือ 81 เปอร์เซ็นต์ และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.3 การแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ (cell debris separation)

วิธีที่นิยมใช้ในการแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ คือ การปั่นแยกและการกรอง โดยการแยกผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการกรองจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าการปั่นแยก (Vak ,1984) Verduyn (Verduyn และคณะ, 1999) พบว่าการนำยีสต์โฮโมจิเนทเจือจาง 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ไปปั่นแยกที่ความเร็วรอบสูงยังไม่สามารถแยกเศษเซลล์ออกได้อย่างสมบูรณ์ และการใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนยังทำให้เปอร์เซ็นต์ของแข็งลดลงอีกด้วย ดังนั้นการใช้การกรองในการแยกเศษเซลล์จึงมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้การปั่นแยก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานต่ำ มีประสิทธิภาพในการแยกสูง และสามารถขยายขนาดได้ง่ายอีกด้วย

Tanaka , 1993 ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกรองสารละลายที่มี *Saccharomyces cerevisiae* แบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น โดยใช้โมดูลแบบบาง (thin-channel module) ที่มีพื้นที่การกรอง 7.32×10^{-3} ตารางเมตร ลึก 2.5 มิลลิเมตร รูพรุน 0.45 ไมโครเมตร พบว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัว (steady state) เร็วขึ้นถ้าใช้สารละลายที่มี *S.cerevisiae* ความเข้มข้นต่ำ และมีอัตราการป้อนกลับสูง นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของสารอาหารที่ใช้เลี้ยงเชื้อ (medium) ก็มีผลต่อการกรองด้วยเช่นกัน

Forman และคณะ ,1990 ได้ศึกษาการแยกอินคลูชั่น บอดี้ (inclusion bodies : โปรตีนที่รวมกลุ่มกัน และไม่ละลายน้ำ เช่น calf prochymosin , human myoglobin , bovine growth hormone , mouse epidermal growth factor (EGF) และ human inlusin) จากโปรตีนที่ละลายน้ำ (soluble protein) ใน recombinant *Escherichia coli* ที่ผ่านการทำให้เซลล์แตกโดยใช้ Manton-Gaulin high pressure homogenizer รุ่น 15M 8TBA ที่ความดัน 8500 psi (586 บาร์) 3 รอบ โดยการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น ด้วยเยื่อแผ่นที่มีรูพรุน 0.45

ไมโครเมตร พบว่าการเพิ่มความดันจะทำให้ฟลักซ์ และการกักเก็บโปรตีนที่ละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มอัตราการไหลไม่ทำให้การกักเก็บโปรตีนที่ละลายน้ำมีค่าลดลงตามที่คาดหวังไว้ การกักเก็บโปรตีนที่ละลายน้ำจะมีค่าลดลงต่อเมื่อทำการกรองในภาวะที่มีค่าความแข็งแรงเชิงประจุ (ionic strength) ต่ำ เนื่องจากโปรตีนจะรวมกลุ่มกันน้อยลง หรือทำการกรองแบบไดอะฟิลเตรชันโดยควบคุมปริมาตรให้คงที่ (constant volume diafiltration) พบว่าจะสามารถแยกโปรตีนที่ละลายน้ำได้ 87 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำไดอะฟิลเตรชัน 3 ครั้ง

Bailey และ Meagher ,1997 ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ (1-3 รอบ) ในการทำให้ recombinant *E.coli* แตกโดยใช้โฮโมจิไนเซอร์ความดัน 83 MPa (830 บาร์) กับการแยกอินคลูชั่น บอดี้ ออกจากสารละลายโดยใช้การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น พบว่าการทำให้เซลล์แตกโดยใช้การโฮโมจิไนเซอร์จะทำให้ความหนืดและขนาดของเศษเซลล์เปลี่ยนแปลง การเพิ่มจำนวนรอบในการโฮโมจิไนเซอร์ไม่มีผลต่อการกรอง และการเพิ่มความดันในการกรอง (0.28, 0.55 และ 0.83 บาร์) จะทำให้การส่งผ่านของโปรตีน (protein transmission) มีค่าลดลง ค่าฟลักซ์สูงสุดที่ได้ คือ มากกว่า 60 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง การส่งผ่านของโปรตีน 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เยื่อแผ่นเซลลูโลสอะซีเตท (cellulose acetate) และโพลีอีเธอร์ซัลโฟน (polyether sulfone) ที่มีรูพรุนขนาด 0.15 ไมโครเมตร และ 0.2 ไมโครเมตร

ในการแยกผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพออกจากเศษเซลล์โดยใช้เทคนิคการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นมักจะหลีกเลี่ยงการปฏิบัติการที่ความดันสูง เนื่องจากอัตราการกรองจะแปรผันตรงกับความดันในช่วงที่ความดันต่ำ และเมื่อเพิ่มความดันจนถึงจุดหนึ่งแล้วอัตราการกรองจะค่อนข้างคงที่แม้ว่าจะเพิ่มความดันขึ้นไปอีก เนื่องจากมีเศษเซลล์ไปสะสมที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น ทำให้ค่าการส่งผ่าน (transmission หรือ sieving coefficient) ของสารละลายภายในเซลล์ลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนารูปแบบการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ เพื่อลดการสะสมของเศษเซลล์ที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น Hamert และ Tiesjema (Hamert และ Tiesjema , 1987) พบว่าการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นทั่วไปต้องใช้อัตราการป้อนสารสูงมาก แต่ค่าฟลักซ์ที่ได้จะต่ำมาก และเซลล์ที่ใช้ทดลองเสียหายเนื่องจากการป้อนสารย้อนกลับตลอดเวลา แต่เมื่อใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้พบว่าเมื่อใช้อัตราการป้อนสารต่ำและเพิ่มความเร็วในการหมุนมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าฟลักซ์สูงขึ้นและไม่ทำให้เซลล์ที่ใช้เกิดความเสียหาย

Kroner และ Nissinem , 1988 ได้ทดลองเปรียบเทียบการกรองโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้และการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นแบบต่างๆ เยื่อแผ่นที่ใช้ คือ เทฟลอน (0.2 ไมโครเมตร) , พอลิคาร์บอเนต (0.2 ไมโครเมตร) และพอลิซัลโฟน (1000 กิโลดาลตัน) พบว่าการแยกสารแขวนลอยขนาดเล็ก เช่น ยีสต์ และการแยกเอนไซม์ออกจากเซลล์ *E.coli ,Brevibactetium ammoniagenes* และ *Bacillus sp.* ที่ผ่านการทำให้เซลล์แตกโดยใช้เครื่องบดลูกแก้ว หรือการใช้เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ความดันสูง โดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้จะให้ค่าฟลักซ์และเปอร์เซ็นต์การเก็บเกี่ยวเอนไซม์ที่สูงกว่าการกรองโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดเยื่อแผ่นอยู่กับที่ประมาณ 2-3 เท่า ภายใต้ภาวะการทดลองเดียวกัน

Parnham และ Davis , 1995 ได้ทำการเปรียบเทียบการกรองโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Rotary filter) กับเครื่องกรองแบบแผ่น (Flat filter) ในการแยกโปรตีนจากเศษเซลล์ *E.coli.* ที่ผ่านการทำให้เซลล์แตกด้วยคลื่นเสียงแบบไหลวนเซลล์ต่อเนื่อง (continous flow cell) 3 รอบ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้น (0.25 และ 25 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักเปียก)), แรงเฉือน (แรงเฉือนที่ใช้ทดลองสำหรับเครื่องกรองแบบหมุนได้ คือ 280, 780, 1300 และ 4000 ต่อวินาที ส่วนเครื่องกรองแบบแผ่น คือ 480,1560, 2620 และ 8000 ต่อวินาที) และความดัน (0.069, 0.345 และ 0.585 บาร์) ผลการทดลองที่ได้พบว่าในกรณีที่ความเข้มข้นเซลล์ต่ำการกรองแบบหมุนจะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าการกรองแบบไม่หมุน เนื่องจากเมื่อเยื่อแผ่นหมุนจะเกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ (taylor vortice) ทำให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของเยื่อแผ่นทำให้อนุภาคที่เกาะที่ผิวเยื่อแผ่นลดลง และพบว่าเพอมิเอชันฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของโปรตีนจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มแรงเฉือนและลดความเข้มข้นเซลล์ ส่วนการเพิ่มความดันช่วยให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย

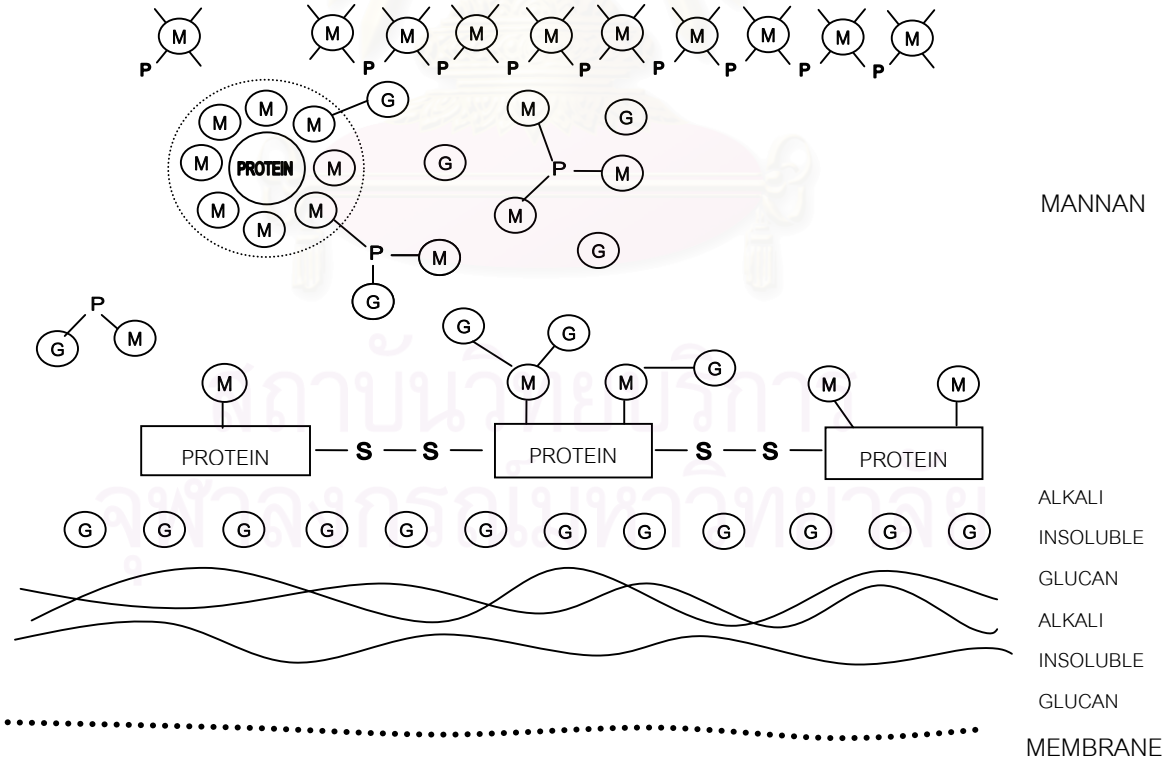
กล่าวโดยสรุปจะเห็นได้ว่าการแยกผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ด้วยเทคนิคการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นมีประสิทธิภาพดีกว่าการปั่นแยก และการใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นทั่วไป ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิคการกรองในการลดความขมในส่วนที่ติดอยู่ที่ผนังเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดความขมออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์แทนการใช้สารเคมีในการกำจัดความขม

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 โครงสร้างวิทยาของยีสต์

เซลล์ยีสต์มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นกับอายุและสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปมีความกว้างตั้งแต่ 1 - 5 ไมโครเมตร และมีความยาวตั้งแต่ 5 - 30 ไมโครเมตร (สุพจน์, 2529) ผนังเซลล์ของยีสต์จะบางเมื่อมีอายุน้อย และจะหนามากขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้นและจะสามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ดีกว่าปกติ ผนังเซลล์ของยีสต์จะมีความหนาประมาณ 1/7 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ โดยจะประกอบไปด้วยกลูแคน 30 – 40 เปอร์เซ็นต์, แมนแนน 30 เปอร์เซ็นต์, โปรตีน 6 - 8 เปอร์เซ็นต์ และ ไขมัน 8.5 - 13.5 เปอร์เซ็นต์ (สุพจน์, 2529)



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของผนังเซลล์ยีสต์ (Reed และNagodawithana, 1991)

3.2 ฮอพ (hop)

ฮอพ (*Humulus lupulus*) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเบียร์เป็นพืชในแฟมิลี่ Cannabinaceae สารที่ให้ความขมที่สำคัญในฮอพ คือ แอลฟาแอซิด ซึ่งประกอบไปด้วย ฮิวมูโลน, โคฮิวมูนโลน, แอดฮิวมูโลน และสารอื่นๆ แอลฟาแอซิดสามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไม่สามารถละลายน้ำได้ในภาวะที่พีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกลางจนถึงกรด และจะสามารถละลายน้ำได้ในภาวะที่พีเอชเป็นด่าง

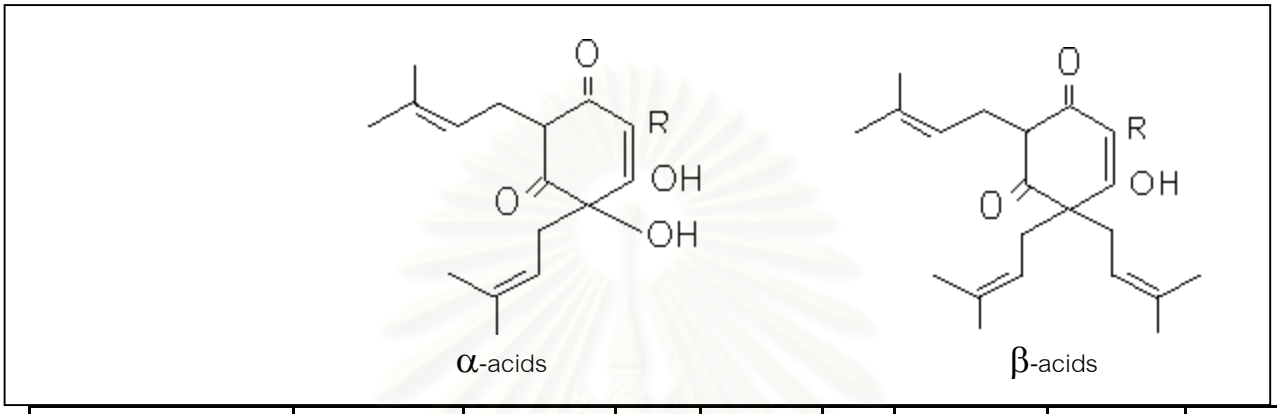
ในกระบวนการผลิตเบียร์จะเติมดอกฮอพลงในน้ำเวิร์ตและเมื่อต้มน้ำเวิร์ตแอลฟาแอซิดจะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันไปเป็นไอโซ-แอลฟาแอซิด (iso-alpha acid) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี และมีความขมมากกว่าแอลฟาแอซิด และเมื่อเติมยีสต์ลงในกระบวนการหมักไอโซ-แอลฟาแอซิดจะถูกดูดซึมที่ผนังเซลล์ของยีสต์ด้วยแรงดูดซึม ปริมาณการดูดซึมไอโซ-แอลฟาแอซิดที่ผนังเซลล์ของยีสต์จะขึ้นกับการเจริญเติบโตของยีสต์ และเวลาที่ยีสต์อยู่ในสารละลาย โดยปัจจัยหลักที่สำคัญ คือ เวลาที่ยีสต์อยู่ในสารละลาย

ปริมาณความขมที่วัดได้ในสารละลายจะหมายถึงปริมาณไอโซ-แอลฟาแอซิดที่มีอยู่ในสารละลาย โดยจะแสดงเป็นเลขจำนวนเต็มในหน่วยของ EBU.(European Bitterness Unit) เช่น เบียร์มีความขม 25 EBU. หมายความว่า ใน 1 ลิตรของเบียร์จะมีไอโซแอลฟา-แอซิดประมาณ 25 มิลลิกรัม
(Garetz, M., 1994)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงลักษณะของแอลฟาแอซิด และเบต้าแอซิด (Analogues of the α - β - acids)

(Hough,J.S., 1971)



Acyl side chain (R)	name	Formula	M.P.	$(\alpha)D^{26}$	pKa	Name	Formula	M.P.
$-CO\cdot CH_2(CH_3)_2$ isovaleryl	Humulone	$C_{21}H_{30}O_5$	64.5°	-211°	5.5	Lumulone	$C_{26}H_{38}O_4$	92°
$-CO\cdot CH(CH_3)_2$ isobutyryl	Cohumulone	$C_{20}H_{28}O_5$	Oil	-208.5°	4.7	Colupulone	$C_{25}H_{36}O_4$	93-94°
$-CO\cdot CH(CH_3)CH_2CH_3$ 2-methylbutyryl	Adhumulone	$C_{21}H_{30}O_5$	Oil	-187°	5.7	Adlupulone	$C_{26}H_{36}O_4$	828-3° (c)
$-CO\cdot CH_2CH_3$ propionyl	Posthumulone (a)	$C_{19}H_{26}O_5$	Oil	-	-	-	$C_{24}H_{34}O_4$	101° (c)
$-CO\cdot CH_2CH_2CH(CH_3)_2$ 4-methylpentanoyl	Prehumulone (b)	$C_{22}H_{32}O_5$	--	-	-	-	$C_{27}H_{40}O_4$	91° (c)
$-CO\cdot CH_2CH_2CH(CH_3)CH_2CH_3$ 4-methylhexanoyl	-	-		-	-	-	$C_{28}H_{43}O_4$	91° (c)

a) VERZELE, M.(1958). Bull.Soc.Chim.Belg.67,278

b) RILLAERS,G. and VERZELE, M. (1962). Ibid.71,438.

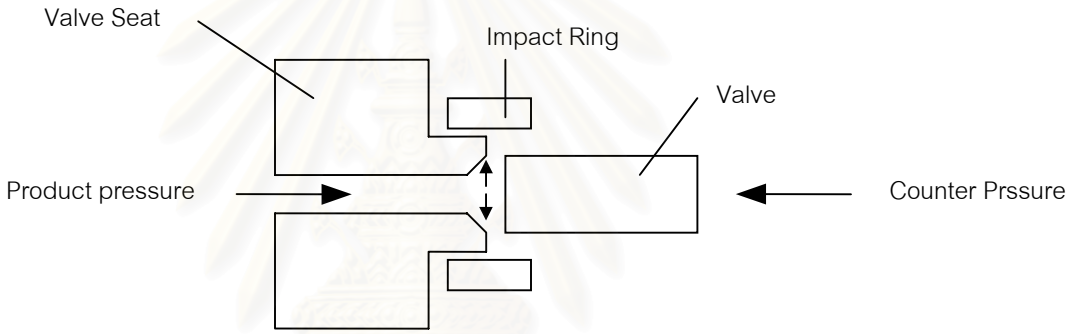
c) By synthesis (1).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 โฮโมจิไนเซอร์

การใช้โฮโมจิไนเซอร์ในการทำให้เซลล์แตก เซลล์จะถูกทำให้แตกด้วยแรงเฉือนระหว่าง สเตเตอร์ (stator) กับลูกสูบ (piston) ในโฮโมจิไนซิงวาล์ว (homogenizing valve) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เซลล์แตก คือ ความดัน, ลักษณะของวาล์ว, จำนวนรอบ, อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเซลล์ โดยปัจจัยหลักที่สำคัญในการทำให้เซลล์แตก คือ ความดัน และลักษณะของวาล์ว ส่วนปัจจัยที่มีผลน้อยที่สุด คือ ความเข้มข้นของเซลล์ (Goldberg,E., 1997)



รูปที่ 3.2 แสดงโฮโมจิไนซิงวาล์วในเครื่องโฮโมจิไนเซอร์

ภาวะในการทำให้เซลล์แตกด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ คือ ความดัน และจำนวนรอบที่ผ่านเครื่องโฮโมจิไนเซอร์จะมีผลต่อการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์ซึ่งเป็นไปตามสมการอันดับหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\ln\frac{R_m}{R_m - R} = kNP^a \qquad (3.1)$$

เมื่อ R_m = ปริมาณโปรตีนที่ปล่อยออกมามากที่สุด

R = ปริมาณโปรตีนที่ปล่อยออกมาหลังจากผ่านโฮโมจิไนเซอร์รอบที่ N

k = ค่าคงที่

N = จำนวนรอบที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์

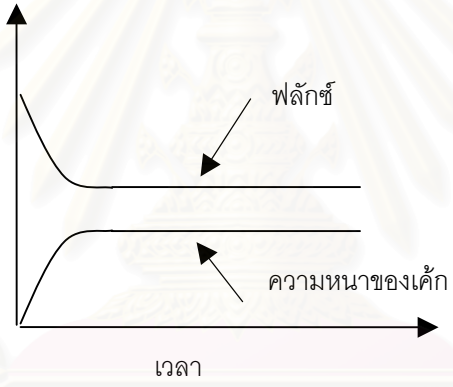
P = ความดัน

a = ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ โดย *S.cerevisiae* มีค่า a เท่ากับ 2.9

3.4 **การกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน** (Microfiltration)

กระบวนการไมโครฟิลเตรชันใช้สำหรับการกรองสารขนาด 0.1 ถึง 10 ไมโครเมตร โดยใช้หลักการแยกสารแบบคัดขนาดอนุภาค (sieving mechanism) เยื่อแผ่นที่ใช้ในการกรองมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 0.05 ถึง 10 ไมโครเมตร โดยใช้ความดัน 1-5 บาร์

ในการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันตัวทำละลายและอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้เรียกว่า เพอร์มิเอท (permeate) ส่วนของสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นที่ถูกกักเก็บไว้ในระบบเรียกว่า รีเทนเทท (retentate) หรือ คอนเซนเตรท (concentrate)



รูปที่ 3.3 การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น

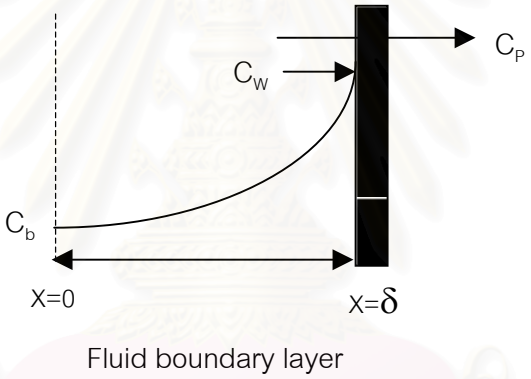
<u>ทฤษฎีการกรองของไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น</u> (รัตนา, 2541)

กระบวนการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอร์มิเอท ซึ่งเรียกว่า crossflow หรือ tangential flow ทิศทางการไหลของสายป้อนจะทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น ซึ่งจะช่วยลดปริมาณอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่น ดังนั้นการกรองแบบนี้จึงเหมาะกับการกรองสารละลายแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูงแต่ไม่เหมาะกับการกรองอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุนหรืออนุภาคที่แยกออกจากกันได้ยาก

การแยกสารโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะพบปัญหาค่าฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจากมีการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น และภายในรูพรุน โดยลักษณะการอุดตันของเยื่อแผ่นสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองต่างๆ ดังนี้

1. แบบจำลองแบบคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration polarization)

คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายหรืออนุภาคขนาดเล็กต่างถูกพาสู่เยื่อแผ่น ตัวถูกละลายหรืออนุภาคขนาดเล็กที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ จะถูกกักกันและสะสมอยู่ที่ผิวเยื่อแผ่น ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวเยื่อแผ่น (C_w) จะมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของอนุภาคที่แขวนลอยในสายป้อน (C_b)



รูปที่ 3.4 แสดงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

สมการการทำดุลมวลของตัวถูกละลายที่สภาวะของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเขียนได้ดังนี้

[อัตราการพาสู่เยื่อแผ่นของตัวถูกละลาย] - [อัตราการแพร่กลับของตัวถูกละลาย] = [อัตราการผ่านเยื่อแผ่นของตัวถูกละลาย]

$$J_v C - D\frac{dC}{dX} = J_v C_P \qquad (3.2)$$

อินทิเกรตโดยใช้สภาวะขอบเขตคือ ที่ X = 0, C = C_b และที่ X = δ, C = C_w จะได้

$$J_V = \frac{D}{\delta} \ln \frac{C_w - C_P}{C_b - C_P} \qquad (3.3)$$

หรือ

$$J_V = k \ln \frac{C_w - C_P}{C_b - C_P} \qquad (3.4)$$

ถ้า $C_p = 0$, ความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่น $C_w = C_b \exp(J_V/k)$ (3.5)

เมื่อ C, C_b, C_W, C_P = ความเข้มข้นของสารละลาย,ในสายป้อน, ที่ผิวเยื่อแผ่น และในเพอร์มิเอทตามลำดับ (กรัมต่อลิตร)

J_v = เพอมิเอชันฟลักซ์ (ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

X = ระยะห่างจากชั้นขอบเขต (เมตร)

k = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย (เมตรต่อชั่วโมง)

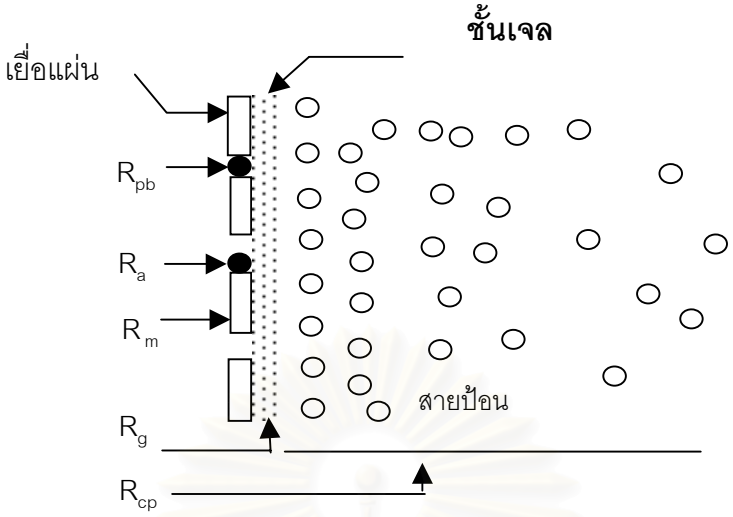
D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตรต่อชั่วโมง)

δ = ความหนาของชั้นขอบเขต (เมตร)

การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันทำให้ฟลักซ์ลดลง ค่าการกักกันตัวถูกละลายจะเปลี่ยนแปลงและส่งผลให้เกิดสเกล (fouling) ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองลดลง ซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้อธิบายฟลักซ์ที่สภาวะคงตัว

2. แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน

ในทางปฏิบัติสามารถแบ่งการลดลงของฟลักซ์ออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงต้นที่ฟลักซ์ลดลงเนื่องจากการสะสมของเค้ก และในช่วงยาวนานเพราะการเกิดสเกล การอธิบายการลดลงของฟลักซ์โดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทานเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก และช่วยให้เข้าใจคุณสมบัติขององค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายตลอดจนปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในสารละลายกับเยื่อแผ่นได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.5 แสดงความต้านทานต่อการไหลต่างๆ ตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน

สมการอัตราการไหลที่เสนอในแบบจำลองนี้คือ

$$J_V = \frac{\Delta PTM}{\mu R_T} \tag{3.6}$$

$$R_T = R_m+(R_{cp}+R_g)+(R_a+R_{pb}+\ldots) = R_m+R_p+R_f \tag{3.7}$$

เมื่อ J = เพอมิเอชันฟลักซ์ (ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

ΔPTM = ความแตกต่างระหว่างความดันก่อนและหลังผ่านเยื่อแผ่น (บาร์)

R_T = ความต้านทานรวม (เมตร$^{-1}$)

R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (เมตร$^{-1}$)

R_{cp} = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (เมตร$^{-1}$)

R_g = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดเจล (เมตร$^{-1}$)

R_a = ความต้านทานเนื่องจากการดูดซับ (เมตร$^{-1}$)

R_{pb} = ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย (เมตร$^{-1}$)

R_p = ความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลาไรซ์ (เมตร$^{-1}$)

R_f = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดสเกล (เมตร$^{-1}$

3. แบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่ (Constant Pressure Filtration Model)

Hermia ได้เสนอแบบจำลองการกรองสำหรับสารละลายที่ไม่ใช่ของไหลนิวโตเนียน (non-newtonian) เมื่อความดันคงที่ ซึ่งแต่ละแบบจำลองมีแนวคิดในเรื่องการอุดตันต่างกัน

1) Complete Blocking Filtration Model (CBM)

มีสมมติฐานว่าโมเลกุลหรืออนุภาคที่มาถึงเยื่อแผ่นจะเข้าไปอุดตันรูพรุนโดยทุกๆ โมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนในการอุดตันรูพรุนโดยไม่ซ้อนทับกัน สมการอัตราการไหลของเพอร์มิเอทที่เสนอในแบบจำลองนี้คือ

$$Q = Q_0 K_b V \qquad (3.8)$$

โดย Q = อัตราการไหลของเพอร์มิเอทที่เวลาใดๆ (ลิตร /ชั่วโมง)

Q_o = อัตราการไหลของเพอร์มิเอทเริ่มต้น (ก่อนเกิดการอุดตัน) (ลิตรต่อชั่วโมง)

K_b = ค่าคงที่การกรองของ CBM (ต่อชั่วโมง)

V = ปริมาตรของเพอร์มิเอท (ลิตร)

จากสมการที่ 3.1 เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ V จะได้กราฟเส้นตรงความชันเท่ากับ $-K_b$ และจุดตัดกราฟเท่ากับ Q_o ซึ่งนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอร์มิเอทกับเวลาคือ

$$V = Q_o / K_b(1 - \exp(-K_b t)) \qquad (3.9)$$

โดย t = เวลา (ชั่วโมง)

ดังนั้นถ้าการกรองมีการอุดตันที่เสนอใน CBM ปริมาตรของเพอร์มิเอทควรขึ้นกับเวลาตามสมการที่ 3.9 ทำให้สามารถทดสอบผลการทดลองได้ว่าเป็นไปตามแบบจำลองนี้หรือไม่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.) Intermediate Blocking Filtration Model (IBM)

IBM จะมีความคล้ายคลึงกับ CBM โดยแบบจำลอง IBM กล่าวว่าในการเกิดการอุดตันโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งจะสามารถซ้อนทับอยู่บนอีกโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งได้ สมการอัตราการไหลของเพอร์มิเอทที่เสนอในแบบจำลองนี้ คือ

$$1/Q = K_i t + 1/Q_o \qquad (3.10)$$

โดย K_i = ค่าคงที่การกรองของ IBM (ต่อลูกบาศก์เมตร)

จากสมการที่ 3.10 เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง 1/Q กับ t จะได้กราฟเส้นตรงความชันเท่ากับ K_i และจุดตัดเท่ากับ $1/Q_o$ ซึ่งจะนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอร์มิเอทกับเวลาคือ

$$V = \ln (1+K_i Q_o t)K_i \qquad (3.11)$$

3.) Standard Blocking Filtration Model (SBM)

เป็นแบบจำลองที่อธิบายในการกรองสารละลายขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นมากโดยอนุภาคบางส่วนถูกดูดซับอยู่ภายในรูพรุนทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเยื่อแผ่นเท่านั้นและไม่เกิดสะสมบนผิวหน้าของเยื่อแผ่น ดังนั้นรูพรุนของเยื่อแผ่นจึงมีปริมาตรลดลงเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของเพอร์มิเอท สมการอัตราการไหลของเพอร์มิเอทที่เสนอในแบบจำลองคือ

$$Q^{0.5} = Q_o^{0.5} - (K_s Q_o^{0.5} V / 2) \qquad (3.12)$$

โดย K_s = ค่าคงที่การกรองของ SBM (ต่อชั่วโมง)

เมื่อเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง $Q^{0.5}$ กับ V จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $K_s Q_o^{0.5} / 2$ และจุดตัดเท่ากับ $Q_o^{0.5}$ ซึ่งนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอร์มิเอทกับเวลาคือ

$$V = Q_o t / (1+K_s Q_o^{0.5} t) / 2 \qquad (3.13)$$

4.) Cake Filtration Model (CFM)

เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ กัน คือ

ก.) ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนอนุภาคจะถูกสะสมและเกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น

ข.) ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่และเล็กผสมกัน อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมอยู่ภายในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น จนในที่สุดเยื่อแผ่นสามารถกักโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นบางบนเยื่อแผ่น (กรณีถ้าเป็นโมเลกุลเรียกว่าเจล และถ้าเป็นอนุภาคเรียกว่าเค้ก)

สมการอัตราการไหลเป็นดังนี้

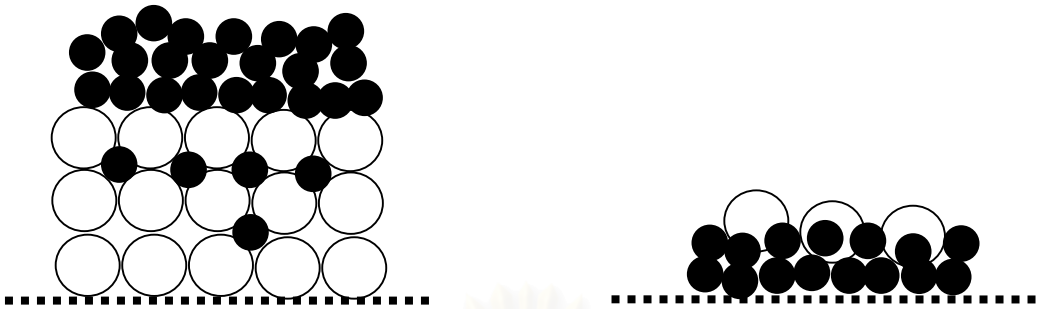
$$1/Q = 1/Q_o + K_c V \qquad (3.14)$$

โดย K_c = ค่าคงที่การกรองของ CFM (ชั่วโมงต่อเมตร$^{-6}$)

เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง 1/Q กับ V จะได้ความชันเท่ากับ K_c และจุดตัดเท่ากับ 1/ Q_o ซึ่งนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอร์มิเอทกับเวลาคือ

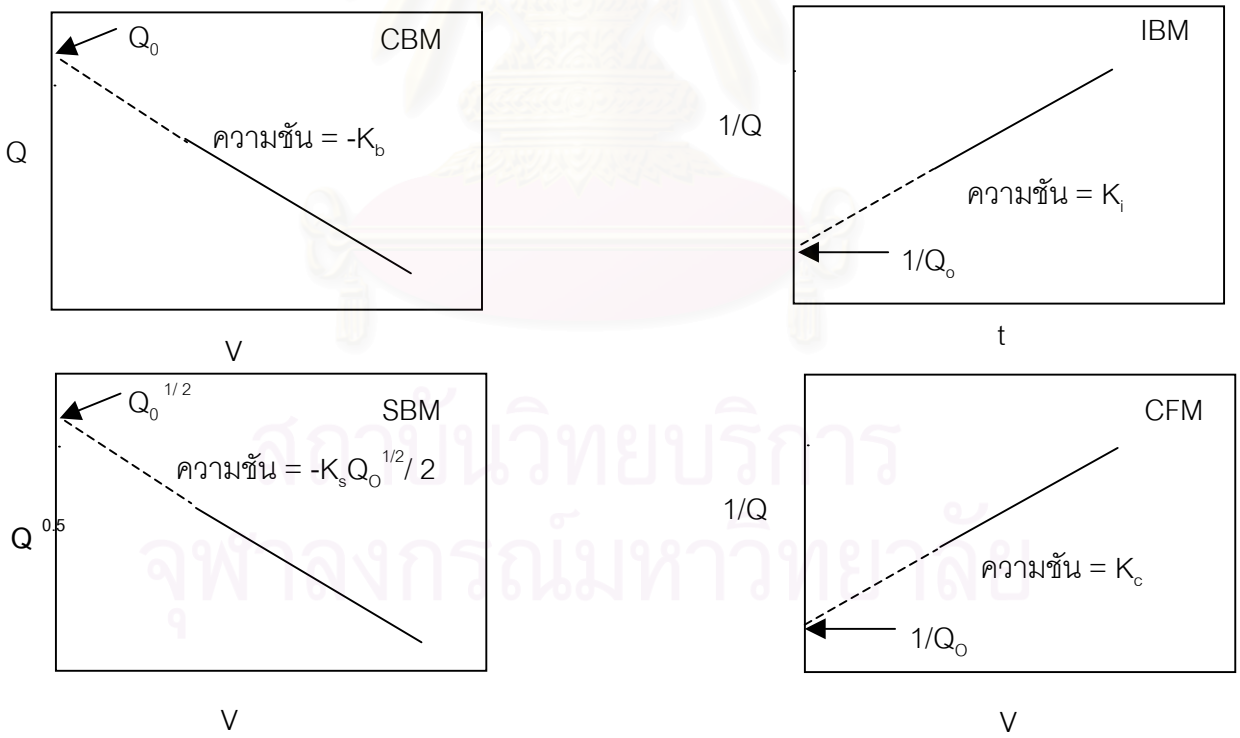
$$V = ((-1/Q_o) + (1/Q_o^2 + 2K_c t)^{1/2}) / K_c \qquad (3.15)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

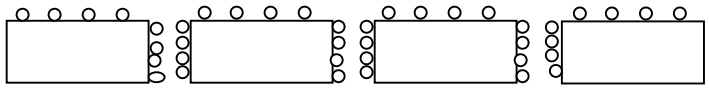


(ก) (ข)

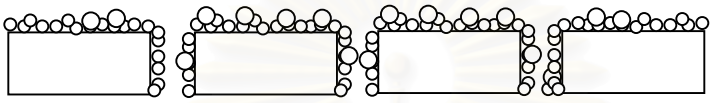
รูปที่ 3.6 แสดงการอุดตันตามแบบจำลอง cake filtration model ก) การเกิดเค้กเมื่อเยื่อแผ่นมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาค ข) การเกิดเค้กเมื่อเยื่อแผ่นมีรูพรุนเล็กกว่าขนาดอนุภาค (Tanaka และคณะ, 2000)



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่

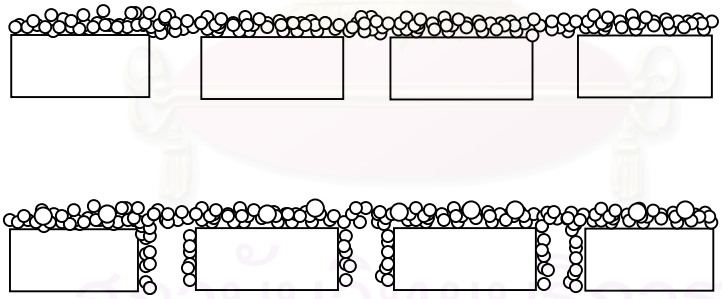


ก. CBM



ข. IBM

ค. SBM



ง. CFM

รูปที่ 3.8 แสดงการอุดตันรูพรุนที่เสนอโดยแบบจำลองต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจัยที่มีผลต่อการกรอง

สิ่งที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการแยกของสาร คือ ค่าฟลักซ์โดยค่าฟลักซ์ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นขึ้นกับพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ

1.ความดัน

ความดันในระบบจะแปรผันตรงกับค่าฟลักซ์ของสารละลายที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ ซึ่งค่าฟลักซ์นี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการกรองโดยแสดงในรูปปริมาตรของเพอร์มิเอทที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นต่อพื้นที่ต่อเวลา ดังสมการที่ 3.16

$$J_V = \frac{\Delta PTM}{\mu R_T} \qquad (3.16)$$

เมื่อ $R_T = R_M + R_P + R_F$

J_V = เพอร์มิเอชันฟลักซ์ (ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

ΔPTM = ความแตกต่างระหว่างความดันก่อนและหลังผ่านเยื่อแผ่น (บาร์)

$= (P_I + P_o) / 2 - P_f = P_I - (\Delta P / 2)$

โดยที่ P_I = ความดันขาเข้า , P_o = ความดันขาออก และ

P_f = ความดันด้านเพอร์มิเอท

R_T = ความต้านทานรวม (เมตร$^{-1}$)

R_P = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (เมตร$^{-1}$)

R_M = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (เมตร$^{-1}$)

R_F = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดสเกล (fouling) (เมตร$^{-1}$)

μ = ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัมต่อเมตร-ชั่วโมง)

จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มสูงขึ้นด้วยจนถึงจุดๆ หนึ่งความดันจะไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์เนื่องจากเกิดความต้านทานของสารที่สะสมบนผิวหน้าของเยื่อแผ่นขึ้น

2. <u>ความเร็วในกระแสเวียนกลับ</u>

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (K) จะเพิ่มขึ้นโดยแปรผันตรงกับความเร็วในกระแสเวียนกลับซึ่งอยู่ในเทอมของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ดังสมการ 3.17

$$Sh = \frac{Kd}{D_V} = ARe^{B}Sc^{1/3} \qquad (3.17)$$

โดย Sh = เชอร์วูด นัมเบอร์ (Sherwood number) (-)

Re = เรย์โนด์ นัมเบอร์ (Reynold number) = $\rho vd / \mu$ (-)

Sc = สมิท นัมเบอร์ (Schmit number) = $\mu / (\rho D_V)$ (-)

d = ความสูงของช่องว่างของของเหลวเหนือเยื่อแผ่น (เมตร)

D_V = สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคแขวนลอย (ตารางเมตรต่อวินาที)

K = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล = D_V / δ (ต่อชั่วโมง)

δ = ความหนาของชั้นขอบเขต (เมตร)

ρ = ความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

μ = ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัมต่อเมตร-ชั่วโมง)

เมื่อเพิ่มความเร็วในกระแสเวียนกลับจะทำให้ความหนาของชั้นขอบเขตมีค่าลดลง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง จากสมการที่ 3.4 ถ้าความเข้มข้นในสายเพอร์มิเอทมีค่าเท่ากับศูนย์ สมการจะลดรูปได้ดังแสดงในสมการที่ 3.18

$$J_V = k \ln \frac{C_w}{C_b} \qquad (3.18)$$

C_w = ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวเยื่อแผ่น (กรัมต่อลิตร)

C_b = ความเข้มข้นของสารละลายในสารละลายป้อน (กรัมต่อลิตร)

ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มความเร็วในกระแสเวียนกลับจะเป็นการเพิ่มค่าแรงเฉือนที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นจึงทำให้ค่าความหนาและความต้านทานของชั้นเจลลดลง แต่ค่าแรงขับเฉลี่ยจะลดลงเมื่อความเร็วในกระแสเวียนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น

3. <u>อุณหภูมิ</u>

อุณหภูมิมีผลต่อความหนืดดังสมการของ Arrhenius

$$\mu = Ae^{-E/RT} \qquad (3.19)$$

เมื่อ μ = ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัมต่อเมตร-ชั่วโมง)

A = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและ molar volume ของสารแต่ละตัว (-)

E = ค่าพลังงานกระตุ้น (จูลต่อเมตร-ชั่วโมง)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (จูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดจะต่ำลง ดังนั้นค่าฟลักซ์ของสารละลายที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 3.16

4. <u>ความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลาย</u>

เนื่องจากความเข้มข้นในสายป้อนมีผลต่อการถ่ายเทมวล, การเกิดโพลาไรเซชัน และการอุดตันของเยื่อแผ่น ดังนั้นค่าฟลักซ์ของสารละลายลดลงเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลายเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 3.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสามารถในการกักเก็บของเยื่อแผ่น (Rejection)

ค่ารีเจคชัน (Rejection) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการกักเก็บสารของเยื่อแผ่น โดยสามารถแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์รีเจคชัน ซึ่งหมายถึง เปอร์เซ็นต์ของตัวถูกละลายหรืออนุภาคที่ถูกเยื่อแผ่นกักไว้เทียบกับตัวถูกละลายหรืออนุภาคในสารละลายแขวนลอยด้านสายป้อน ค่ารีเจคชันสามารถแสดงดังสมการ

$$R = \sigma \times 100 \qquad (3.20)$$

เมื่อ R = ค่าการกักเก็บปรากฏ (เปอร์เซ็นต์)

σ = สัมประสิทธิ์การกักเก็บของเยื่อแผ่น (Rejection Coefficient)

โดย

$$\sigma = 1 - (C_p / C_b) \qquad (3.21)$$

เมื่อ C_p = ความเข้มข้นของสารละลายในสายเพอร์มิเอท (กรัมต่อลิตร)

C_b = ความเข้มข้นของสารละลายในสายป้อน (กรัมต่อลิตร)

ดังนั้น

$$R = [1 - (C_p / C_b)] \ 100 \qquad (3.22)$$

เนื่องจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันทำให้ตัวถูกละลายโมเลกุลใหญ่สะสมอยู่ที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ส่งผลให้ความเข้มข้นที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น (C_w) มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นในสายป้อน (C_b) ดังนั้นค่าการกักเก็บจริง (R_{int}) จึงมีค่าสูงกว่าค่าการกักเก็บปรากฏ ดังแสดงในสมการ 3.23

$$R_{int} = [1- (C_p / C_W)] 100 \qquad (3.23)$$

เมื่อ R_{int} = ค่าการกักเก็บจริง (เปอร์เซ็นต์)

ถ้าเยื่อแผ่นที่เตรียมได้มีความสามารถในการกักเก็บอย่างสมบูรณ์ ค่า σ จะมีค่าเป็น 1 และ C_p มีค่าเป็นศูนย์ ความสามารถในการกักเก็บจะขึ้นกับความเข้มข้น และ ΔPTM นั่นหมายความว่า ถ้าความเข้มข้นสูง ค่า σ จะสูง และถ้า ΔPTM มาก ค่า σ จะสูงด้วย

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (Transmission)

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน หมายถึง เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโปรตีนในสารละลายด้านเพอร์มิเอทเทียบกับความเข้มข้นโปรตีนในสารละลายแขวนลอยด้านสายป้อนดังแสดงในสมการที่3.24

$$\%\text{Transmission} = \left(\frac{X_p}{X_b} \right) 100 \qquad (3.24)$$

เมื่อ X_b = ความเข้มข้นโปรตีนในสายป้อน (กรัมต่อลิตร)

X_p = ความเข้มข้นโปรตีนในสายเพอร์มิเอท (กรัมต่อลิตร)

เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขม (%Debittering)

เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขม หมายถึง เปอร์เซ็นต์ความขมที่ถูกเยื่อแผ่นกักไว้เทียบกับความขมในสารละลายด้านสายป้อนดังแสดงในสมการที่ 3.25

$$\%\text{Debittering} = \left(1 - \frac{Y_p}{Y_b} \right) 100 \qquad (3.25)$$

เมื่อ Y_b = ความเข้มข้นความขมในสายป้อน (EBU)

Y_P = ความเข้มข้นความขมในสายเพอร์มิเอท (EBU)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเยื่อแผ่นชนิดหมุนได้

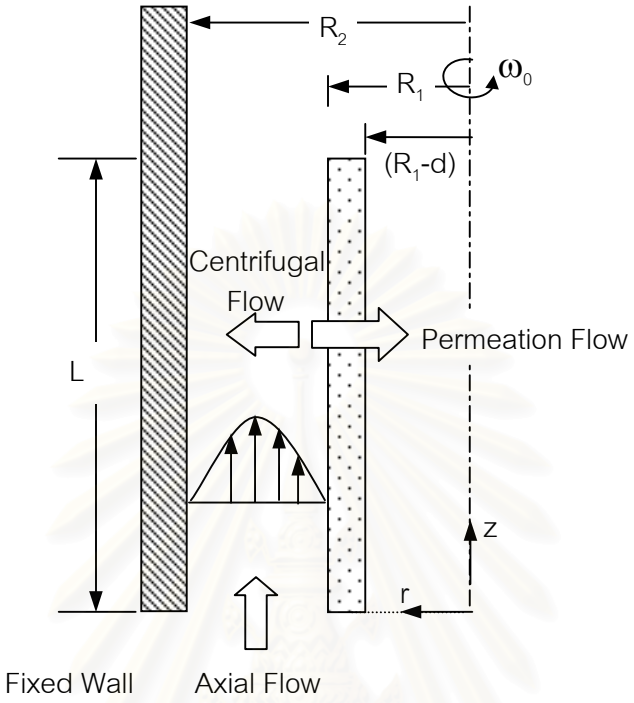
เครื่องกรองชนิดหมุนได้ ประกอบด้วยส่วนที่ใช้ในการกรอง คือ เยื่อแผ่นที่ติดอยู่กับแกนที่สามารถหมุนได้ (roter) โดยใช้แรงขับของมอเตอร์ และท่อทรงกระบอกครอบเยื่อแผ่นเพื่อให้เป็นทางไหลผ่านของสารละลาย

การทำงานของเครื่องกรอง

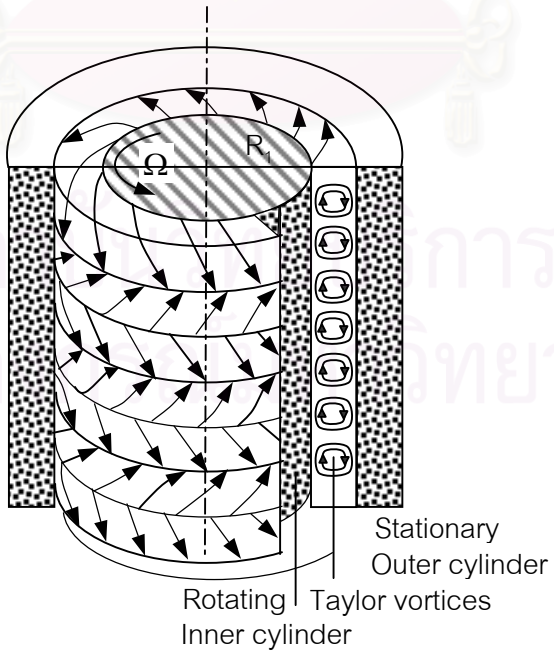
สารละลายแขวนลอย (feed) จะถูกปั๊มเข้าทางด้านล่างของเครื่องกรองไหลผ่านเยื่อแผ่นด้วยแรงขับดันจากปั๊ม สารละลายและอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะสามารถผ่านเข้าทางแนวศูนย์กลางของเยื่อแผ่นแล้วออกท่อทางด้านล่างของเครื่อง (permeate) ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นซึ่งมีความเข้มข้นสูงขึ้น (concentrate) จะไหลผ่านช่องว่างระหว่างเยื่อแผ่นกับท่อทรงกระบอกออกสู่ท่อทางด้านบนของเครื่องกรอง

เมื่อเยื่อแผ่นหมุนจะทำให้เกิดการหมุนวนของสารละลายที่เรียกว่า “การหมุนวนของเทย์เลอร์” (Taylor vortice) โดยการหมุนวนนี้จะทำให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของเยื่อแผ่น ทำให้อนุภาคที่เกาะที่ผิวของเยื่อแผ่นลดลง ซึ่งเป็นการลดการอุดตันของเยื่อแผ่น ลักษณะการไหลของสารละลายระหว่างเยื่อแผ่น และท่อทรงกระบอก กับ ลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านใน และผนังของเยื่อแผ่นด้านนอก แสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 ลักษณะการไหลของสารละลายระหว่างเยื่อแผ่น และท่อทรงกระบอก (จันทพร, 2539)



รูปที่ 3.10 ลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในและผนังของเยื่อแผ่นด้านนอก (Hermert van,P.A., 1987)

จากสมการเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor number equation)

$$Ta = \frac{\omega R_1 \Delta}{\upsilon}\left(\frac{2\Delta}{R_1 + R_2}\right)^{0.5} \qquad (3.26)$$

เมื่อ Ta = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor number) (-)

ω = ความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$ (เรเดียนต่อชั่วโมง)

R_1 = รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น (เมตร)

R_2 = รัศมีภายในของท่อทรงกระบอกที่อยู่กับที่ (เมตร)

Δ = ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก = $R_2 - R_1$ (เมตร)

ν = ความหนืดคิเนมาติก = μ/ρ (ตารางเมตรต่อชั่วโมง)

μ = ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัมต่อเมตร-ชั่วโมง)

ρ = ความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

n = ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น (รอบต่อชั่วโมง)

โดยที่ Ta < Ta,crit จะมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (laminar) เพียงอย่างเดียว

$$Ta,crit = 41.3 + 13.1\Delta/R_1 \qquad (3.27)$$

การหมุนวนของเยื่อแผ่นจะทำให้เกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างท่อทรงกระบอกด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อการไหล คือ เทย์เลอร์นัมเบอร์ของการหมุน และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามารถแบ่งลักษณะการไหลตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์กับลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ได้เป็น 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) $2000 < Ta < 10000 \approx 15000$

การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) $Ta > 15000$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของสารละลายมี 2 ค่า คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกน (axial Reynold number) และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น (tangential Reynold number) ดังสมการที่ 3.28 และ 3.29

$$Re_a = \frac{Vd_h}{\upsilon} \tag{3.28}$$

$$Re_t = \frac{\omega R_1 d_h}{\upsilon} \tag{3.29}$$

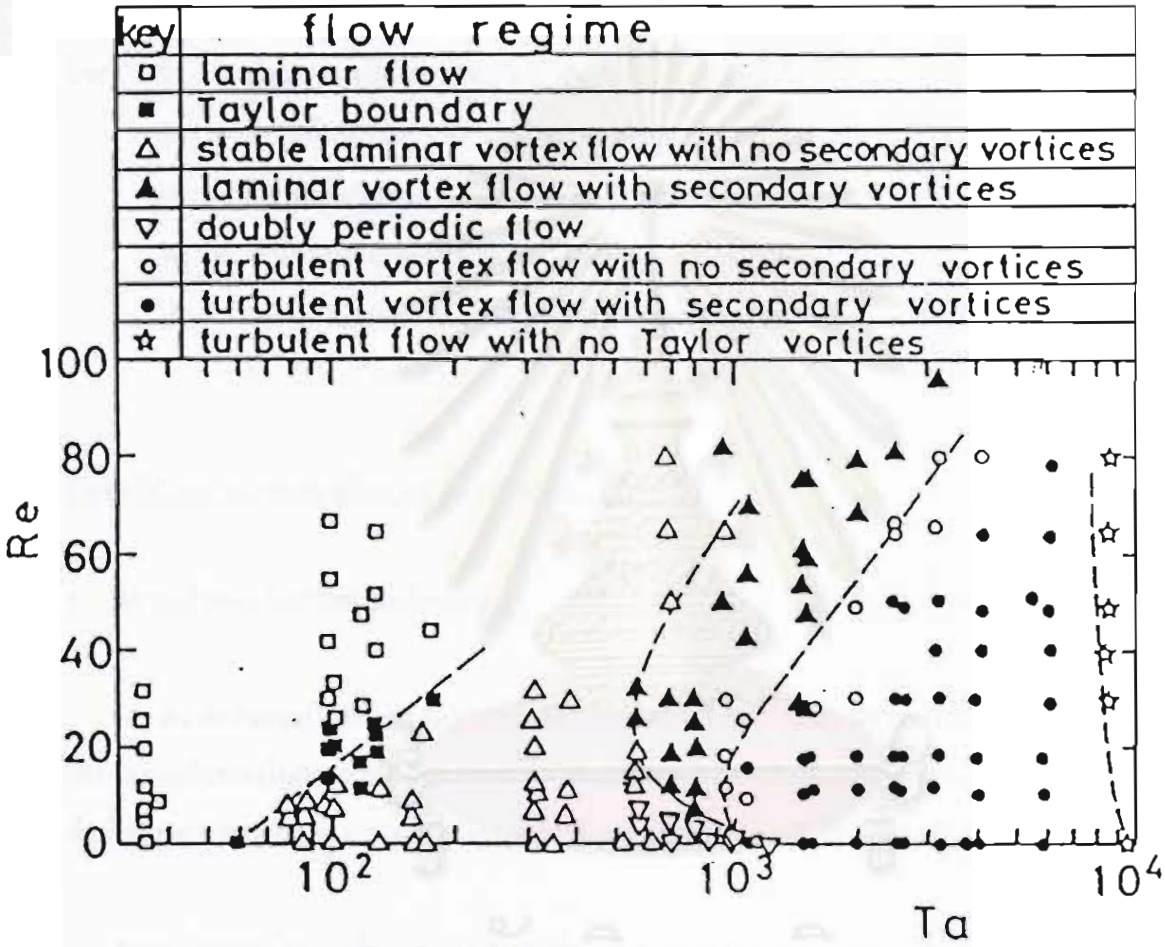
โดยที่ Re_a = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกน

Re_t = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น

V = ความเร็วของสารละลายตามแนวแกน (เมตรต่อชั่วโมง)

d_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอริก = 2d (เมตร)

ดังนั้นการหมุนวนแบบราบเรียบจนถึงการหมุนวนแบบปั่นป่วนเกิดที่ค่าเทลย์เลอร์นัมเบอร์อยู่ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์วิกฤตจนถึงค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ไม่เกิน 10000 และเมื่อค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์มากกว่า 10000 การหมุนวนจะเปลี่ยนเป็นการหมุนวนแบบปั่นป่วน



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (จันทพร ,2539)

การหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างผนังท่อด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก เนื่องจากการหมุนวนของเยื่อแผ่นจะทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวของเยื่อแผ่น ดังสมการ 3.30

$$\tau = 0.23\frac{\omega R1}{\Delta}\sqrt{Ta} \qquad (3.30)$$

โดย τ = อัตราการเฉือน (effecfive shear rate) (ต่อชั่วโมง)

Ta = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor number) (-)

ω = ความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$ (เรเดียนต่อชั่วโมง)

R_1 = รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น (เมตร)

Δ = ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านใน กับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก

= $R_2 - R_1$ (เมตร)

<u>ปัจจัยที่มีผลต่อการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้</u>

1. ความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่น

ความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่นจะแปรผันตรงกับค่าแรงเฉือนตามสมการ 3.30 ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้แรงเฉือนที่เกิดบริเวณผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงสามารถควบคุมการสร้างเจลบนผิวเยื่อแผ่นได้เป็นอย่างดี ทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น

2. ช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน

ช่องว่างระหว่างเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในจะแปรผกผันกับแรงเฉือนที่เกิดบริเวณผิวเยื่อแผ่นตามสมการ 3.30 เมื่อช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในลดลงจะทำให้แรงเฉือนบริเวณผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น เมื่อแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อนุภาคที่อุดตันบริเวณผิวเยื่อแผ่นสามารถหลุดกลับเข้าไปในสารละลายได้มากขึ้น ดังนั้นความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นจึงมีค่าลดลง ฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

3. อัตราการป้อนสาร

อัตราการป้อนสารจะมีผลต่อลักษณะการไหลของสารละลายในช่องว่างระหว่างผนังท่อด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก โดยจะอยู่ในเทอมของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่อยู่ในช่วง 0-100 ($0<Re<100$) จะมีความสัมพันธ์กับค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เมื่อเทย์เลอร์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ปั่นป่วน ดังนั้นจะสามารถกวาดอนุภาคที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นได้ดี แต่เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่ามากกว่า 100 ($Re>100$) และเทย์เลอร์นัมเบอร์มีค่ามากกว่า 2000 ($Ta>2000$) จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) และไม่ทำให้เกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ขึ้น ดังนั้นอนุภาคจะถูกกวาดออกจากผิวหน้าเยื่อแผ่นได้น้อยกว่าการไหลที่เกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 อุปกรณ์

1.เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Incubator Shaker) รุ่น G-FS ของบริษัท Gessells Chaft fur Labortechnik ,Germany.

2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Kubota 5100 ของบริษัท Kubota Corboration,Japan

3. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)

   3.1 รุ่น Spectronic 20 Genesys ของบริษัท Spectronic Instruments,USA

   3.2 รุ่น Beckman DU® Spectrophotometer ของบริษัท Beckman,USA

4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204 ของบริษัท Mettler Toledo,Switzerland

5. กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน รุ่น BH-2 ของบริษัท Olympus

6. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) , Coulter LS230

7. ตู้อบ (Hot air oven) รุ่น ULM500 ของบริษัท Memmert,Germany

8. โฮโมจิไนเซอร์ (High pressure homogenizer) รุ่น Panda ของบริษัท Niro-Soavi,Italy

9. กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น JSM ของบริษัท Jeol, Japan

10. เครื่องวัดพีเอช (pH-meter) รุ่น MP220 ของบริษัท Mettler,Toledo , Switzerland

11.อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) รุ่น Julabo HC-2/8 ของบริษัท Labortechnik GMBH, Germany

12. ปั๊มรีด (Peristatic pump)

   12.1 รุ่น Watson-Marlow 505U ของบริษัท Watson-Marlow Limited, England

   12.2 รุ่น Master Flex 7518-10 ของบริษัท Cole Parmer Instrument.Co,USA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 เคมีภัณฑ์

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ของบริษัท BDH Laboratory, England
2. โซเดียมไฮดรอกไซค์ (NaOH) ของบริษัท Merck,Germany
3. โซเดียมโปแตสเซียมตาร์เตรท ($KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$) ของบริษัท Ajax Chemical,Australia
4. ไอโซออคเทน ($(CH_3)_3CCH_2CH(CH_3)_2$) ของบริษัท Carlo erba,Italy
5. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ของบริษัท Ajax Chemical,Australia
6. โบวีนซีรัมอัลบูมิน (Bovine Serum Albumin,BSA) ของบริษัท Fluka,Switzerland
7. คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) ของบริษัท Carlo erba,Italy
8. น้ำกำจัดแร่ธาตุ (Demineral water)

4.3 เชื้อจุลินทรีย์

สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์จากบริษัทบุญรอดบริวเวอร์รี จำกัด นำไปปั่นแยกน้ำเบียร์ออก ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำในอัตราส่วน 1:3 เพื่อแยกเอาตะกอนฮอพที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ออกก่อนด้วยตะแกรง 150 เมช แล้วนำไปปั่นแยกเอาน้ำออกที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการล้างด้วยน้ำซ้ำอีก 2 ครั้งเพื่อให้ได้ครีมยีสต์ที่สะอาดสำหรับใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

4.4 วิธีการทดลอง

4.4.1 <u>การหาปริมาณความขมที่มีอยู่ในผนังเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์</u>

นำครีมยีสต์ที่ผ่านการล้างจนสะอาดแล้วมาเตรียมให้ได้ในสัดส่วน 1:1 (ครีมยีสต์เปียก:น้ำ) ทำการปรับพีเอชให้ได้ 9-10 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซค์ 2 นอร์มัล จากนั้นกวนเป็นเวลา 1,3,5,15 และ 60 นาที ตามลำดับ วัดพีเอชของสารตัวอย่างหลังกวนอีกครั้งแล้วนำไปวัดขนาดอนุภาค จากนั้นนำไปปั่นแยกเซลล์ยีสต์ออกที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนน้ำด่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาโปรตีนและความขม

4.4.2 <u>กระบวนการทำให้เซลล์แตก (cell disruption)</u>

4.4.2.1 กระบวนการทำให้เซลล์แตกทางกลด้วยโฮโมจิไนเซอร์

ก) ศึกษาผลของความดัน

เตรียมสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ให้ได้ความเข้มข้น 120 กรัมต่อลิตร นำไปผ่านเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ ที่ความดัน 100, 200, 300,400,500, และ 600 บาร์ โดยให้จำนวนรอบที่ผ่านเครื่องโฮโมจิไนเซอร์คงที่ที่ 3 รอบ วิเคราะห์โปรตีน ความขม และขนาดอนุภาค ในยีสต์โฮโมจิเนท ทำการปั่นแยกเศษเซลล์ออกที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์โปรตีนและความขมในยีสต์โปรตีนคอนเซนเตรท

ข) ศึกษาผลของจำนวนรอบ

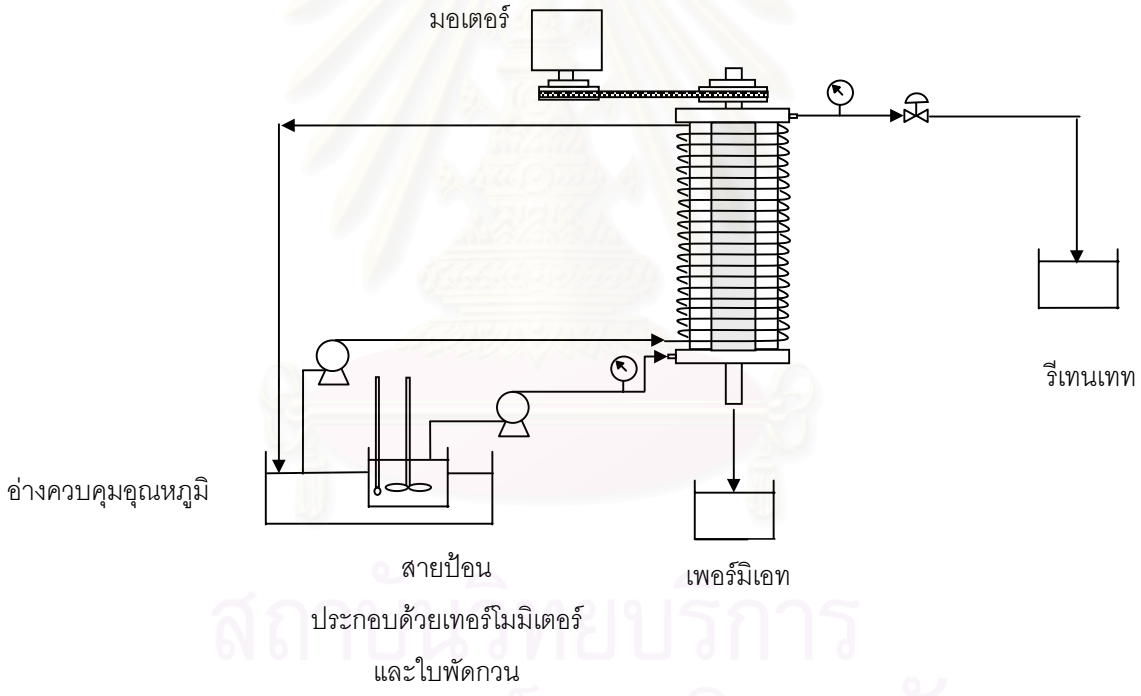
เตรียมสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ให้ได้ความเข้มข้น 120 กรัมต่อลิตร นำไปผ่านเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ 1,2,3 และ 4 รอบ ที่ความดัน 500 บาร์ วิเคราะห์โปรตีน ความขม และขนาดอนุภาคในยีสต์โฮโมจิเนท ทำการปั่นแยกเศษเซลล์ออกที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส 30 นาที 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์โปรตีนและความขมในยีสต์โปรตีนคอนเซนเตรท

4.4.2.2 กระบวนการทำออโตไลซิส (autolysis)

นำสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการทำให้เซลล์แตกด้วยโฮโมจิไนเซอร์ ความเข้มข้น 120 กรัมต่อลิตร มาปรับพีเอชให้ได้ 5.5 นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

4.4.3 <u>กระบวนการกรอง</u>

เครื่องกรองชนิดหมุนได้ (Rotary filter) ใช้มอเตอร์ขนาด ¼ แรงม้า ของบริษัท Mitsubishi ในการทำให้เยื่อแผ่นหมุน ใช้เยื่อแผ่นเซรามิกขนาด 0.2 ไมโครเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.2 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร มีพื้นที่การกรอง 0.340 ตารางเมตร ระยะห่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นด้านนอกกับผนังเยื่อแผ่นด้านใน 0.005 เมตร และเยื่อแผ่นเซรามิกขนาด 0.9 ไมโครเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร มีพื้นที่การกรอง 0.286 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นด้านนอกกับผนังเยื่อแผ่นด้านใน 0.003 เมตร



รูปที่ 4.1 แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้

4.4.3.1 การทดลองกระบวนการกรองแบบต่อเนื่อง

เตรียมสารละลายสายป้อนให้ได้ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร เก็บตัวอย่างสารป้อนเริ่มต้นก่อนกรอง จากนั้นรอจนกระทั่งอุณหภูมิเริ่มต้นของสารป้อนเป็น 20 องศาเซลเซียส ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการ จากนั้นใช้ปั๊มรีดดูดสารละลายผ่านสายยางซิลิโคนเข้าทางด้านล่างของเครื่องกรองด้วยอัตราไหลที่ต้องการ รอจนสารละลายเต็มโมดูลจึงทำการปรับความดันให้ได้ความดัน 0.3 บาร์ เพอร์มิเอทจะไหลออกทางด้านล่างของแท่งเซรามิก ทำการวัดปริมาตรของเพอร์มิเอททุก 2 นาที จนกระทั่งถึงสถานะคงตัว พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างทางสายป้อน สายรีเทนเทท และสายเพอร์มิเอท ในระหว่างช่วงเวลาที่ทำการทดลอง ทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของแข็ง พีเอช โปรตีนและความขมของสารตัวอย่างที่เก็บในช่วงที่ทดลองรวมทั้งสายป้อนก่อนกรองและหลังเสร็จสิ้นการกรองด้วย ในระหว่างที่ทำการกรองจะต้องควบคุมอุณหภูมิของสายป้อนให้ได้ประมาณ 20-25 องศาเซลเซียส และนำสายรีเทนเทท สายเพอร์มิเอทมารวมกับสารละลายสายป้อนอีกครั้งเพื่อควบคุมความเข้มข้นสายป้อนให้คงที่ตลอดการทดลอง

4.4.3.2 การทดลองกระบวนการกรองแบบไม่ต่อเนื่อง

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.4.3.1 โดยนำสายรีเทนเทท รวมกับสารละลายในสายป้อนและดึงสายเพอร์มิเอทออกตลอดเวลาเพื่อทำให้สารละลายในสายป้อนเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ

4.5 การวิเคราะห์

4.5.1 <u>การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของแข็ง (%solid)</u>

ทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของแข็งของสารละลายสายป้อน รีเทนเทท และเพอร์มิเอท โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วนำมาใส่ในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักจนกระทั่งได้น้ำหนักแห้งคงที่

4.5.2 การวิเคราะห์หาจำนวนเซลล์

ทำการวิเคราะห์หาจำนวนเซลล์ในสารละลายเริ่มต้นและสารละลายเพอร์มิเอทโดยใช้แผ่นนับเซลล์ (Haemacytometer) ของบริษัท BOECO กับกล้องจุลทรรศน์ของบริษัท OLYMPUS รุ่น BH-2 ที่มีกำลังขยายสูงสุด 1000 เท่า

4.5.3 การวิเคราะห์โปรตีน (Lowry,1951)

ใส่สารตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณโปรตีน (โดยมีค่าโปรตีนไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม) 0.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายอี 2.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้นาน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอฟ 0.25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้นาน 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร แล้วหาปริมาณโปรตีนจากกราฟมาตรฐานของโบวีนซีรัมอัลบูมิน

หมายเหตุ วิธีเตรียมสารละลายอี และ เอฟ

การเตรียมสารละลายอี โดยทำการเตรียมสารละลาย เอ,บี,ซี และ ดี ดังนี้
สารละลายเอ : 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) คอปเปอร์ซัลเฟต
สารละลายบี : 2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) โซเดียมโปแตสเซียมทาร์เทรต
สารละลายซี : 0.2 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซค์
สารละลายดี : 4 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) โซเดียมคาร์บอเนต
สารละลายเหล่านี้เก็บที่อุณหภูมิห้องได้

เตรียมสารละลายอี โดยผสมสารละลายซี 49 มิลลิลิตร กับสารละลายดี 49 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย เอ 1 มิลลิลิตร และสารละลายบี 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ สารละลายอี ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง

การเตรียมสารละลายเอฟ

ทำการเจือจาง Folin-Ciocalteau ในอัตราส่วน 1:1 ด้วยน้ำกลั่น

4.5.4 <u>การวิเคราะห์ความขม</u> (Analytica-EBC)

ใส่สารตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณความขม 10 มิลลิลิตร ลงขวดปั่นเหวี่ยง จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริก 6 นอร์มัล 1 มิลลิลิตร ใส่เม็ดลูกแก้ว 2 เม็ด แล้วเติมไอโซออคเทน 10 มิลลิลิตร นำไปปั่นแยกเฟสที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร แล้วคำนวณค่าความขมดังแสดงในสมการ โดยแสดงค่าความขมในรูปของจำนวนเต็มในหน่วย EBU (European Brewery Convention)

ความขม (EBU) = O.D.275 นาโนเมตร x 50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการล้างสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ด้วยน้ำ

หลังจากนำสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์มาปั่นแยกน้ำเบียร์ออกที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จึงนำครีมยีสต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำในอัตราส่วน 1 : 3 จากนั้นกรองผ่านตะแกรง 150 เมช เพื่อแยกตะกอนฮอพที่ติดอยู่รอบๆ เซลล์ยีสต์ออกก่อน แล้วจึงนำไปล้างด้วยน้ำซ้ำอีก 2 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.1 พบว่าการล้างด้วยน้ำสามารถลดความขมออกจากครีมยีสต์ได้ส่วนหนึ่ง ความขมที่วิเคราะห์ได้ในน้ำล้างแต่ละครั้งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามลำดับ ครีมยีสต์ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ 3 ครั้ง มีความขมลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 15 EBU.) มีความชื้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการล้างครีมยีสต์ด้วยน้ำ 3 ครั้ง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 1 คืน ก่อนที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่อยู่ในน้ำล้างครีมยีสต์แต่ละครั้ง

ล้างครั้งที่	ความขมที่วิเคราะห์ได้ในน้ำล้าง (EBU.)	ปริมาณความขม (มิลลิกรัม IAA./กรัมเซลล์แห้ง)
1	163	3.26
2	17	0.34
3	8	0.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ศึกษาหาปริมาณความขมที่มีอยู่ในเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์

ก. หาความขมที่มีอยู่ในของเหลวภายในเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์

นำเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 500 บาร์ 4 รอบ ไปปั่นเหวี่ยงแยกเศษเซลล์ออก ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที 3 ครั้ง วิเคราะห์ขนาดของเซลล์ ปริมาณโปรตีน และความขมที่มีอยู่ในของเหลวที่ได้หลังจากปั่นแยกเศษเซลล์ออก โดยจะเรียกของเหลวที่ได้นี้ว่า ซุปเปอร์นาแทนท์ (Supernatant)

จากรูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์พบว่าเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์มีขนาดของเซลล์โดยเฉลี่ย (Mode) เท่ากับ 7.083 ไมโครเมตร และซุปเปอร์นาแทนท์ที่ได้มีปริมาณโปรตีนและความขม เท่ากับ 217.17 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์แห้ง และ 0.403 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมเซลล์แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก) และ 5.2 (ข) ตามลำดับ

ข. หาปริมาณความขมที่มีอยู่ในผนังเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์

นำครีมยีสต์ 50 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) มาปรับ **พีเอช**ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซค์ 2 นอร์มัล ให้ได้พีเอช 9-10 ในภาวะอุณหภูมิห้อง ใช้เวลาในการล้างด่าง 15 นาที และแยกน้ำด่างออกจากเซลล์ทันทีเมื่อถึงเวลา โดยการปั่นแยกที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที (การศึกษาผลของเวลาในการล้างด่างแสดงในภาคผนวก) นำน้ำด่างที่ได้มาวิเคราะห์ขนาดของเซลล์ ปริมาณโปรตีน และความขมที่มีอยู่ในน้ำด่าง

จากรูปที่ 5.1 เซลล์ที่ผ่านการล้างที่เวลา 15 นาที มีขนาดของเซลล์เฉลี่ย เท่ากับ 6.452 ไมโครเมตร และน้ำด่างที่ได้มีปริมาณโปรตีน และความขม เท่ากับ 27.05 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์แห้ง และ 1.65 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมเซลล์แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก) และ 5.2 (ข) ตามลำดับ

ค. เปรียบเทียบปริมาณความขมที่มีอยู่ภายในเซลล์และผนังเซลล์ขอ งสเปนท์ บริวเวอร์ยีสต์

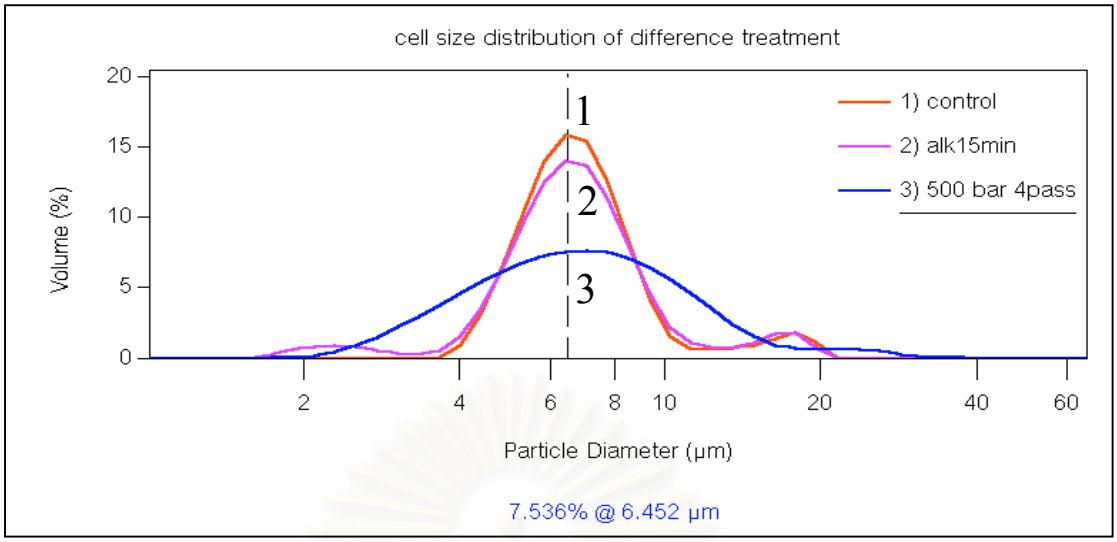
จากรูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ จะเห็นว่าเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างกว่าเซลล์ปกติ เนื่องจากขนาดชิ้นส่วนของเซลล์ส่วนหนึ่งมีขนาดเล็กลงและบางส่วนอาจรวมกลุ่มกันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นขนาดของเซลล์เฉลี่ยจึงใหญ่กว่าเซลล์ปกติ ในขณะที่เซลล์ที่ผ่านการล้างด่างที่เวลา 15 นาที จะมีขนาดของเซลล์เฉลี่ยเท่ากับเซลล์ปกติ และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเซลล์ปกติ

จากรูปที่ 5.2 (ก) แสดงการเปรียบเทียบปริมาณโปรตีน พบว่าปริมาณโปรตีนที่วิเคราะห์ได้ในซุปเปอร์นาแทนท์มีค่ามากกว่าที่วิเคราะห์ได้ในน้ำด่างประมาณ 10 เท่า ดังนั้นโปรตีนที่วิเคราะห์ได้ในซุปเปอร์นาแทนท์จึงเป็นส่วนที่มีอยู่ภายในเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ ส่วนโปรตีนที่วิเคราะห์ได้ในน้ำด่างจึงเป็นส่วนที่ละลายออกมาจากผนังเซลล์ของสเปนบริวเวอร์ยีสต์

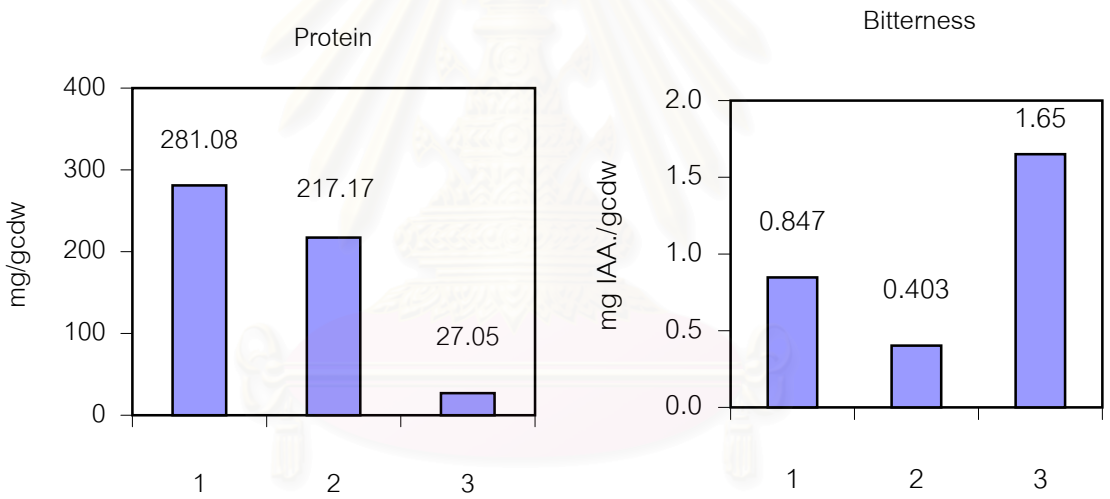
จากรูปที่ 5.2 (ข) แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความขมในส่วนที่มีอยู่ภายในเซลล์กับผนังเซลล์ พบว่าความขมที่มีอยู่ภายในเซลล์มีค่าน้อยกว่าความขมที่มีอยู่ในผนังเซลล์ ประมาณ 4 เท่า ดังนั้นการแยกส่วนของผนังเซลล์ออกจากของเหลวภายในเซลล์จึงเป็นการทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความขมลดลง

ข้อควรสังเกต คือ ความขมที่ได้จากซุปเปอร์นาแทนท์จะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากของเหลวที่ได้จากการปั่นแยกมีลักษณะขุ่น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากไม่สามารถแยกเศษเซลล์ที่เกิดขึ้นจากการทำให้เซลล์แตกด้วยโฮโมจิไนเซอร์ออกได้อย่างสมบูรณ์

การแยกเศษเซลล์ที่เกิดจากการโฮโมจิไนเซอร์ออกอย่างสมบูรณ์โดยวิธีการปั่นแยกจำเป็นต้องปฏิบัติการที่ความเร็วรอบสูงๆ และใช้เวลาในการปั่นแยกนานมากขึ้น เพื่อที่จะได้ของเหลวที่มีลักษณะใส (Clear supernatant) ทำให้เสียพลังงานมาก ดังนั้นผลการทดลองที่ได้นี้จึงสนับสนุนแนวความคิดที่จะประยุกต์ใช้เทคนิคการกรองในการกำจัดความขมโดยทำการแยกผนังเซลล์ที่มีความขมติดอยู่ออกโดยวิธีการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น ในภาวะที่ พีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกลางหรือกรดอ่อน เนื่องจากไอโซ-แอลฟาแอซิดจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและยังคงติดอยู่ที่ผนังเซลล์ ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจึงต้องศึกษาการทำให้เซลล์แตกและการกรองเพื่อแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์



รูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ที่ผ่านการล้างด้วยด่างและโฮโมจิไนเซอร์



(ก) (ข)

หมายเหตุ 1. ยีสต์โฮโมจิเนท (ยีสต์ที่ผ่านการทำให้เซลล์แตกด้วยโฮโมจิไนเซอร์ ความดัน 500 บาร์ 4รอบ)

2. Supernatant (ของเหลวที่ได้หลังจากปั่นแยกเศษเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ออก)

3. น้ำด่างที่ได้จากการล้างเซลล์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซค์ 2 นอร์มัล พีเอช 9.84 เป็นเวลา 15 นาที

รูปที่ 5.2 แสดงปริมาณโปรตีนและความขมที่วิเคราะห์ได้จากส่วนต่างๆ ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์

5.3 ศึกษาการทำให้เซลล์แตกโดยใช้โฮโมจิไนเซอร์

5.3.1 ผลของความดัน

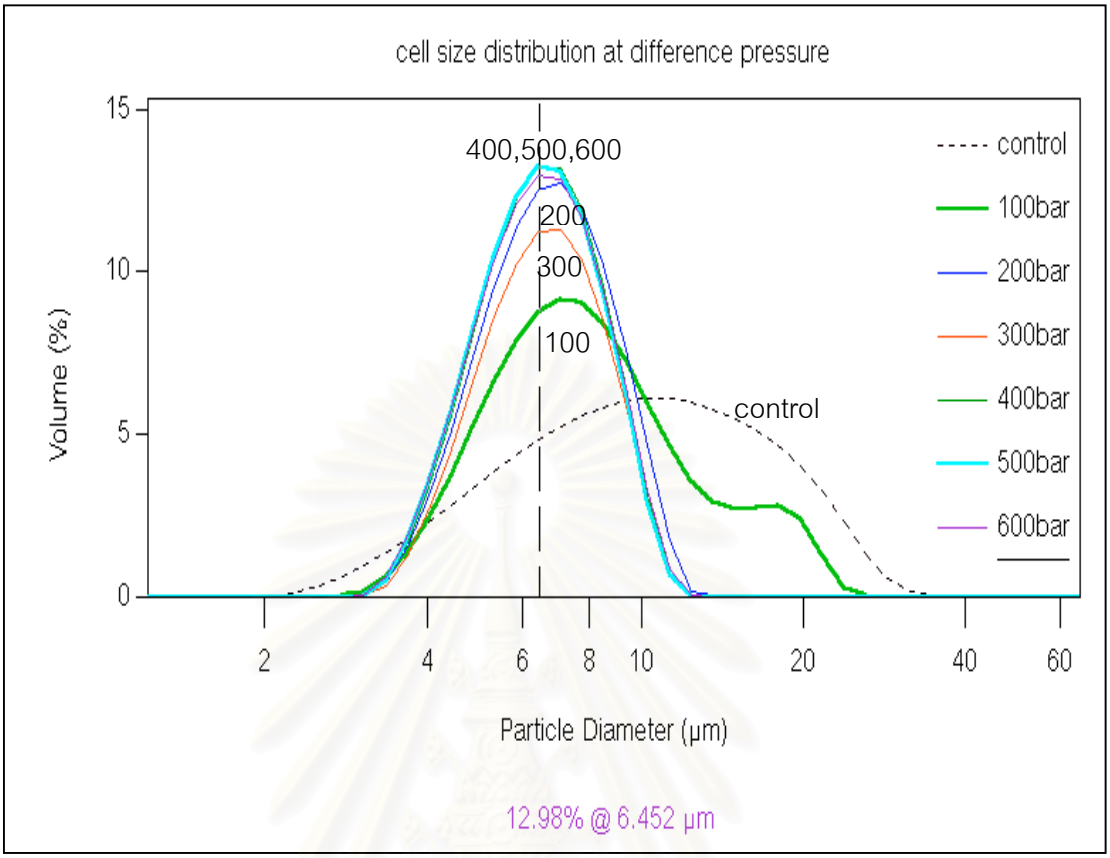
ศึกษาผลการทำให้เซลล์แตกโดยใช้โฮโมจิไนเซอร์ที่ความดัน 100,200,300,400,500 และ 600 บาร์ จำนวนรอบในการผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 3 รอบ

การเพิ่มความดันทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างสเตเตอร์กับลูกสูบในโฮโมจิไนซิงวาล์ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่งผลให้เซลล์เสียหาย (damage) หรือฉีกขาด ซึ่งโปรตีนที่ออกมาจะมีค่าขึ้นกับความดันดังสมการที่ 3.1

จากรูปที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ที่ความดันต่างๆ จะเห็นว่า ขนาดของเซลล์ที่ความดัน 400, 500 และ 600 บาร์ มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณโปรตีนและความขม มีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นในช่วง 100 - 400 บาร์ และจะเริ่มคงที่ที่ความดัน 500 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ

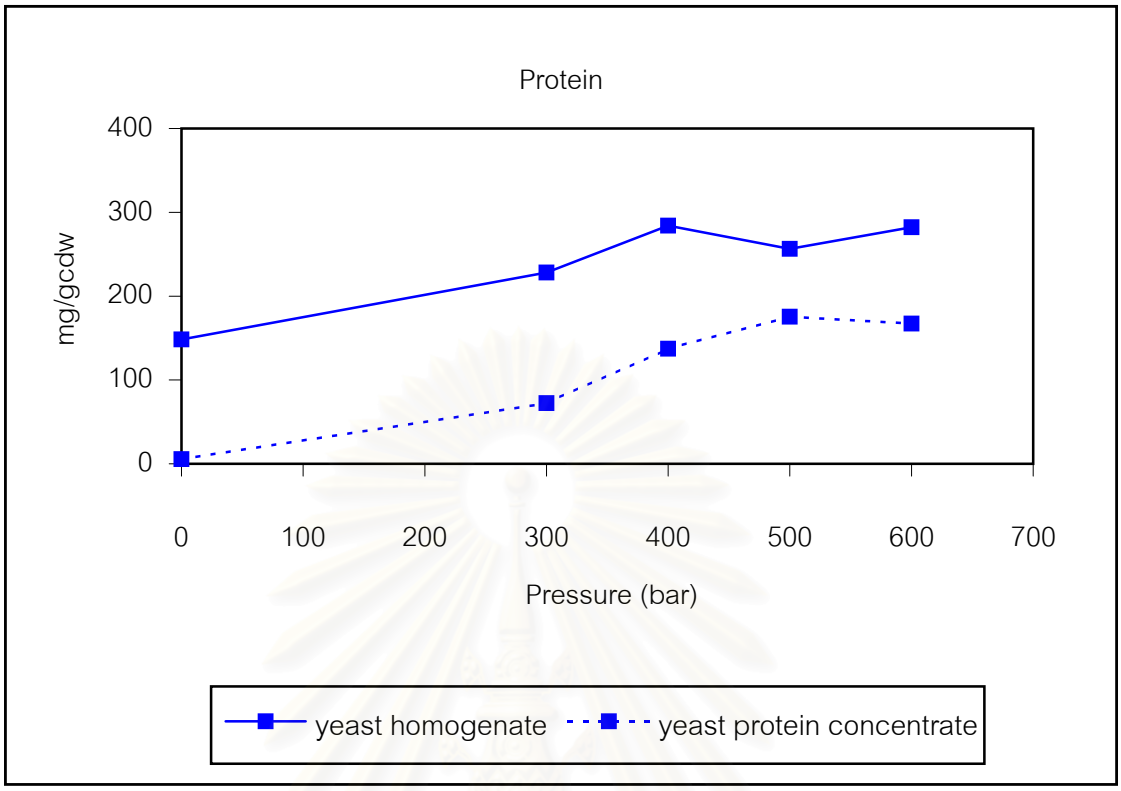
แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความดันจะทำให้เซลล์ฉีกขาดมากขึ้น ดังนั้นโปรตีนที่อยู่ภายในเซลล์จึงสามารถปลดปล่อยออกมาในสารละลายได้มากขึ้น และยังอาจทำให้โมเลกุลของสารที่ให้ความขมที่ติดอยู่ในส่วนของผนังเซลล์หลุดออกมาในสารละลายเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ยังทำให้ชิ้นส่วนของเศษเซลล์มีขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาปริมาณโปรตีนและความขม ควบคู่กับขนาดชิ้นส่วนของเซลล์ เนื่องจากมีผลต่อมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และขั้นตอนการกรองแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าขนาดของเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ที่ความดัน 400, 500 และ 600 บาร์ มีค่าใกล้เคียงกัน และโปรตีนจะมีค่าสูงสุดและเริ่มคงที่ที่ความดัน 500 บาร์ ดังนั้นจึงเลือกที่ความดัน 500 บาร์ ในการศึกษาจำนวนรอบที่เหมาะสมต่อไป

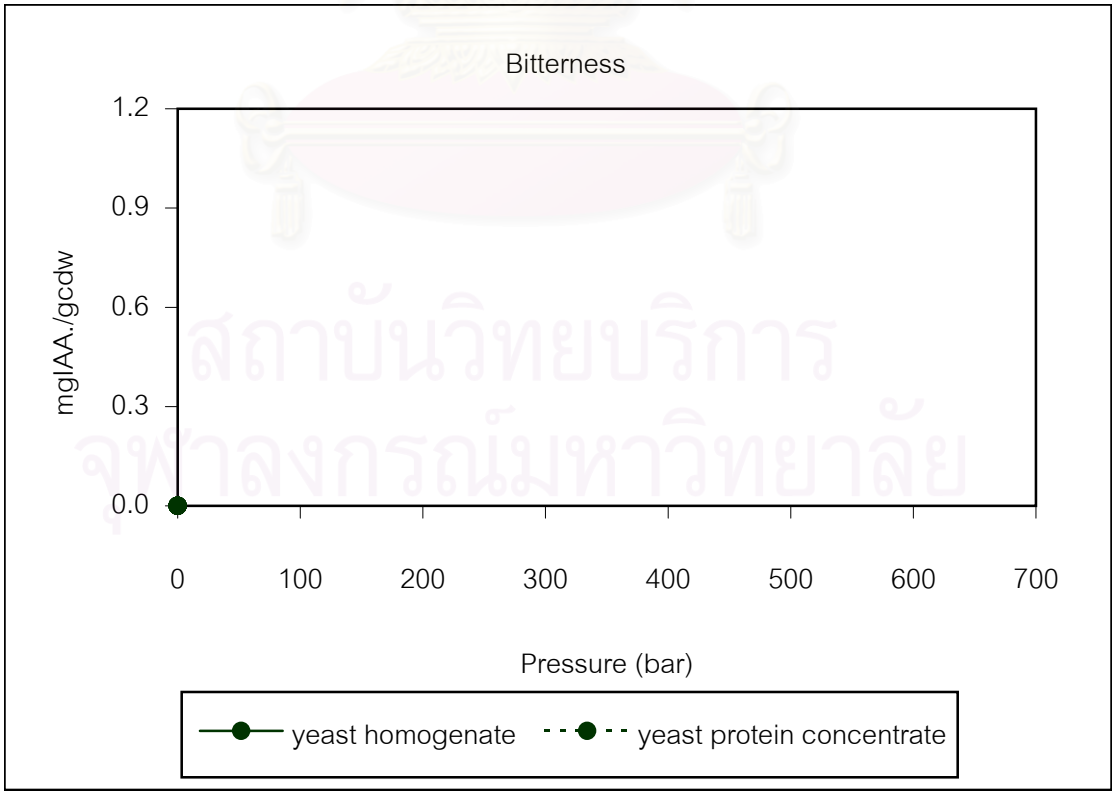


รูปที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์เมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 3 รอบ ที่ความดันต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 แสดงปริมาณโปรตีนที่เปลี่ยนแปลงตามความดันเมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 3 รอบ



รูปที่ 5.5 แสดงปริมาณความขมที่เปลี่ยนแปลงตามความดันเมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 3 รอบ

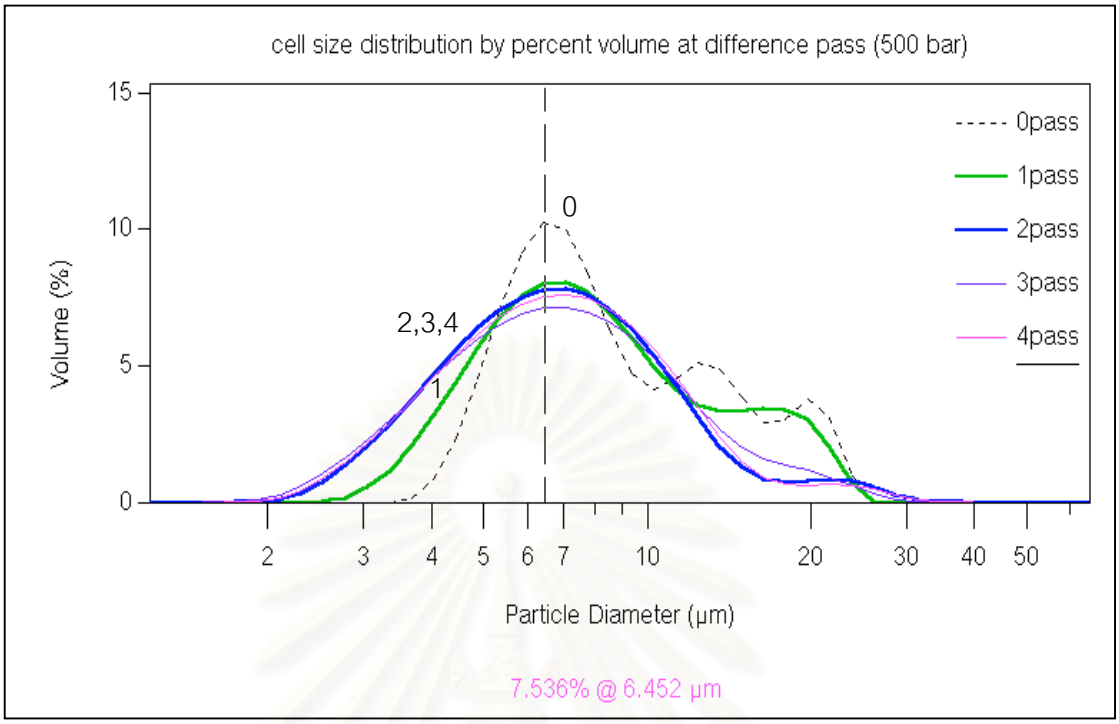
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.2 ผลของจำนวนรอบ

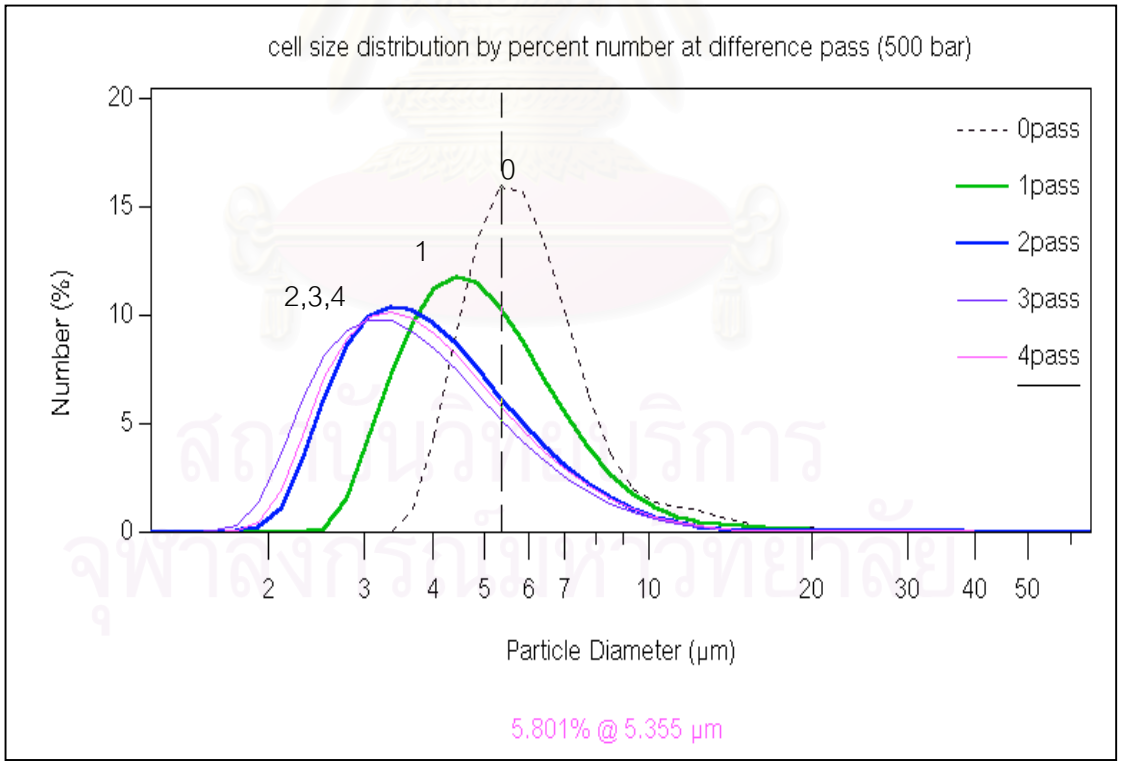
จากการศึกษาผลของจำนวนรอบในการทำให้เซลล์แตกที่ความดัน 500 บาร์ โดยเพิ่มจำนวนรอบจาก 1 ,2 , 3, และ 4 รอบ ตามลำดับ จากรูปที่ 5.6 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการโฮโมจิไนเซอร์จะทำให้เซลล์มีขนาดเล็กลง และมีปริมาณของเศษเซลล์ที่มีขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการทำให้เซลล์แตก (percent disruption) ที่ 1 รอบ 44 เปอร์เซ็นต์ และที่ 2, 3, 4 รอบ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 70.5 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีนจะเริ่มคงที่เมื่อผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 2 รอบ ส่วนความขมจะมีค่าคงที่ตั้งแต่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์เพียงรอบเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และ 5.8

จากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าปริมาณโปรตีนที่ออกมาจากเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์จะขึ้นกับความดัน และจำนวนรอบที่ใช้ในการโฮโมจิไนเซอร์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาขนาดและปริมาณของชิ้นส่วนของเซลล์แล้วจะเห็นว่าที่ภาวะ 500 บาร์ 2 รอบ เป็นภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เซลล์แตกโดยมีขนาดชิ้นส่วนของเซลล์ไม่ต่ำกว่า 1 ไมครอน ดังนั้นขั้นต่อไปจะศึกษาการแยกเศษเซลล์ด้วยวิธีการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น โดยจะทำการหาภาวะที่เหมาะสมในการกรองต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

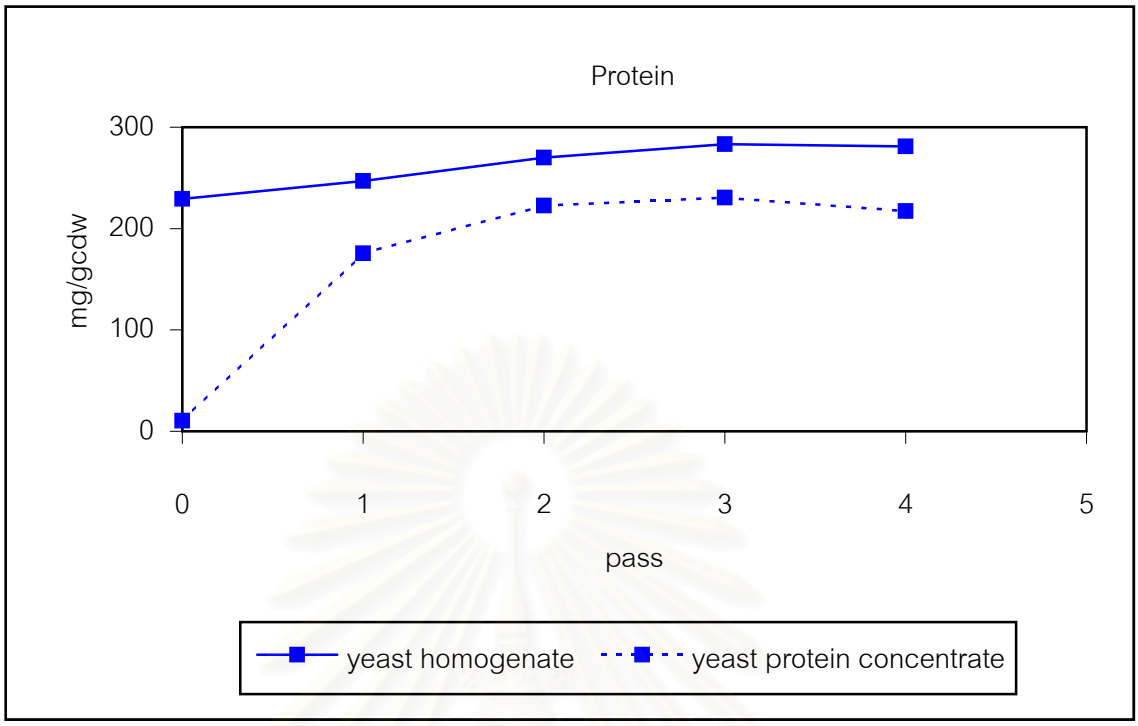


(ก)

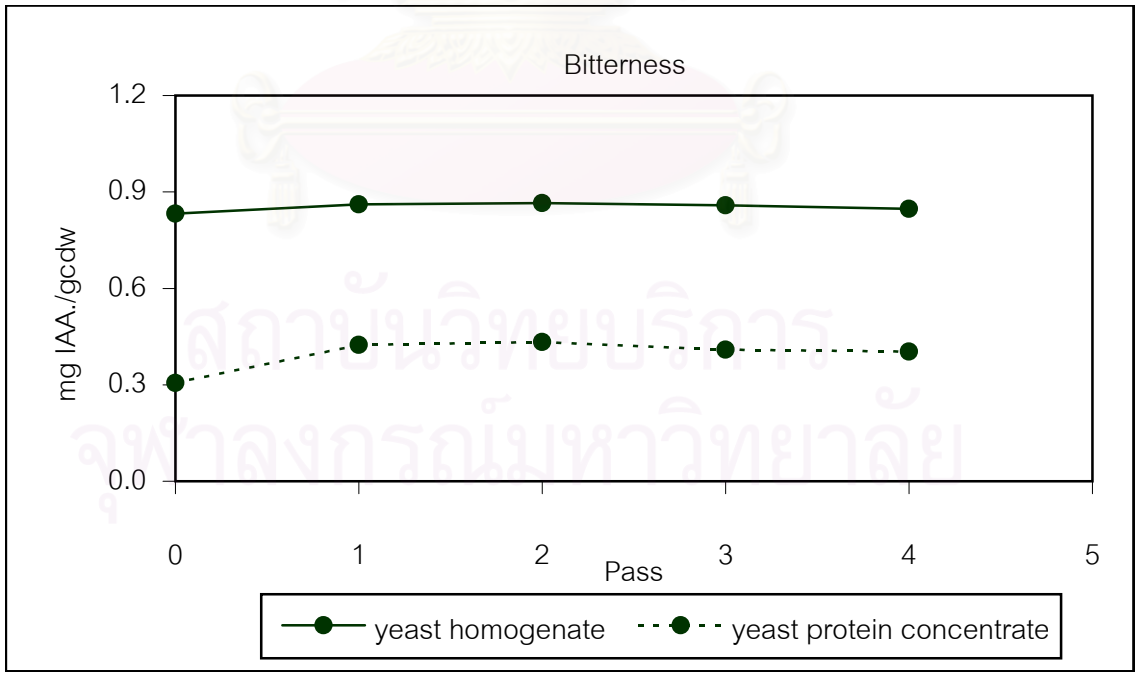


(ข)

รูปที่ 5.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 500 บาร์ ที่รอบต่างๆ



รูปที่ 5.7 แสดงปริมาณโปรตีนที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบในการโฮโมจิไนเซอร์ที่ความดัน 500 บาร์



รูปที่ 5.8 แสดงปริมาณความขมที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบในการโฮโมจิไนเซอร์ที่ความดัน 500 บาร์

5.4 ศึกษาผลการกรองยีสต์โฮโมจิเนทด้วยเยื่อแผ่นเซรามิก

ก. ผลของพีเอชต่อการกรองยีสต์โฮโมจิเนท

การศึกษาในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับเยื่อแผ่นเซรามิก โดยค่าพีเอชที่ทำการศึกษามีขอบเขตอยู่ในช่วงที่เป็นกลางหรือกรดอ่อน เนื่องจากถ้าพีเอชสูงกว่า 7 คือ อยู่ในช่วงที่เป็นด่างจะทำให้สารที่ให้ความขม คือ ไอโซ-แอลฟาแอซิด อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และถ้าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกรด ไอโซ-แอลฟาแอซิดจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและยังคงติดอยู่ที่ผนังเซลล์ และถ้าพีเอชมีค่าต่ำมากเกินไป คือ อยู่ในช่วงที่เป็นกรดมากๆ อาจทำให้โปรตีนที่มีอยู่ในสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทเสื่อมสภาพ (denature) นอกจากนี้ถ้าพีเอชของสารละลายเท่ากับ ค่า pI
(Isoelectric point) ของโปรตีนจะทำให้โปรตีนตกตะกอน ในที่นี้สารละลายโปรตีนที่มีอยู่ภายในเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์จะมีค่า pI เท่ากับ 4.5 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของพีเอชในช่วง 5 , 6 และ 7.5 ตามลำดับ

การศึกษาผลของพีเอชต่อการกรองยีสต์โฮโมจิเนท โดยทำการเจือจางยีสต์โฮโมจิเนทจาก 120 กรัมต่อลิตร เป็น 20 กรัมต่อลิตร อัตราการป้อน 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที ความดัน 0.3 บาร์ ระยะห่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับท่อด้านในเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร ทำการกรองโดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุน 0.9 ไมโครเมตร ปรับพีเอชของสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทเริ่มต้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล และหรือ โซเดียมไฮดรอกไซค์ 1 นอร์มัล ให้ได้พีเอช 5 , 6 และ 7.5 ตามลำดับ

รูปที่ 5.9 แสดงผลของเพอมิเอชันฟลักซ์ตามเวลาในการกรอง จะเห็นว่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทที่มีพีเอช 5 จะเข้าสู่สถานะคงตัวเร็วที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่สถานะคงตัว พบว่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์โฮโมจิเนทที่มีพีเอช 7.5 จะมีค่าสูงที่สุด คือเท่ากับ 26 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ส่วนยีสต์โฮโมจิเนทที่มีพีเอช 5 และ 6 จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 17 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.10 (A) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโปรตีนในยีสต์โฮโมจิเนท และยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทตามเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าความเข้มข้นของโปรตีนในยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทจะมีค่าสูง เมื่อพีเอชของสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากพีเอชมีผลต่อค่าประจุทางไฟฟ้า (electrostatic) และความสามารถในการละลายของโปรตีน โดยในภาวะที่พีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง โปรตีนจะมีความเป็นขั้วมากขึ้น ดังนั้นจะสามารถละลายน้ำได้ดี แต่ถ้าพีเอชเข้าใกล้ค่า pI โปรตีนจะมีประจุรวมเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงเกิดการรวมกลุ่มกันมากขึ้น จากรูปที่ 5.11(A) แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของโปรตีน จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของโปรตีนจะมีค่าสูงสุดที่พีเอช 7.5 รองลงมาคือ ที่พีเอช 6 และ 5 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยที่สถานะคงตัว เท่ากับ 30.83 เปอร์เซ็นต์, 9.83 เปอร์เซ็นต์ และ 5.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

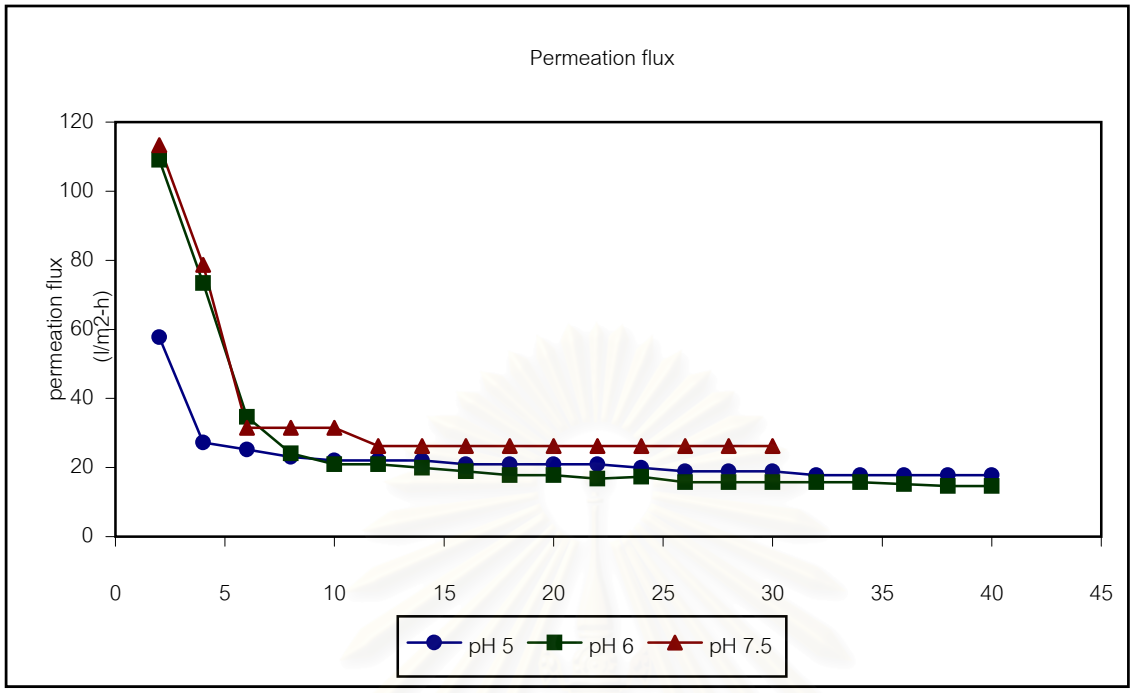
รูปที่ 5.10 (B) แสดงการเปลี่ยนแปลงความขมในยีสต์โฮโมจิเนท และยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทตามเวลาที่ใช้ในการกรอง จะเห็นว่าพีเอชมีผลต่อการละลายของสารที่ให้ความขม โดยโมเลกุลของสารที่ให้ความขมจะละลายออกมาได้มากขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทมีค่าสูงขึ้น

สารละลายยีสต์โฮโมจิเนทที่ได้หลังจากผ่านโฮโมจิไนเซอร์ที่ความดัน 500 บาร์ 2 รอบ จะมีพีเอช 6.13 ดังนั้นเมื่อปรับพีเอชของสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทให้ได้พีเอช 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซค์ 1 นอร์มัล จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอโซ-แอลฟาแอซิดในเศษเซลล์กับโซเดียมไอออนเกิดเป็นเกลือที่ละลายน้ำทันที ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลของสารที่ให้ความขมสามารถผ่านเยื่อแผ่นออกมาได้มากขึ้น แต่เมื่อปรับพีเอชของสารละลายยีสต์โฮโมจิเนทให้มีค่าลดลงเป็น 6 และ 5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล จะทำให้ไอโซ-แอลฟาแอซิดอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและยังคงอยู่ในเศษเซลล์ ดังนั้นยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทที่ได้จึงมีความขมลดลง

จากรูปที่ 5.11 (B) แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมเมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5, 6 และ 7.5 พบว่าการกำจัดความขมโดยเฉลี่ยที่พีเอช 5, 6 และ 7.5 มีค่าเท่ากับ 56.47 เปอร์เซ็นต์, 64.85 เปอร์เซ็นต์ และ 51.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

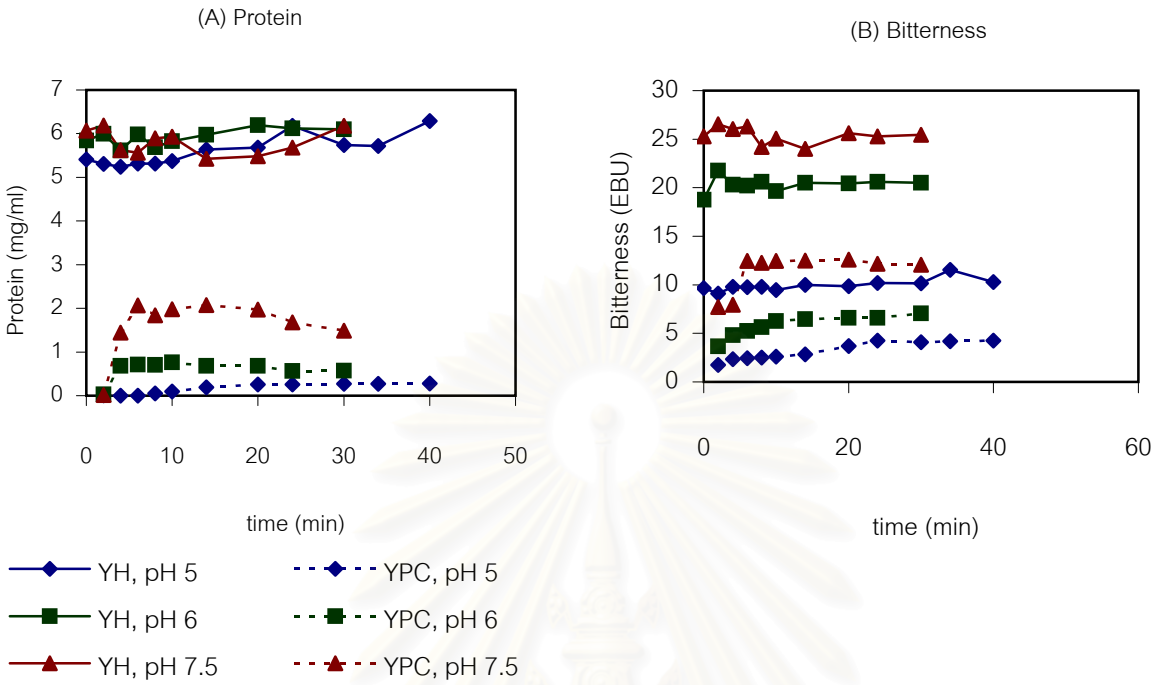
จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าพีเอชมีบทบาทสำคัญต่อการส่งผ่านของโปรตีน และความขม โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้เทคนิคการกรองเพื่อลดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกรองแยกเศษเซลล์ในภาวะที่พีเอชอยู่ในช่วงกลางจนถึงกรดอ่อนจะสามารถลดความขมได้ประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจะทำการศึกษาสมรรถนะของเยื่อแผ่นโดยทดลองกรองยีสต์โฮโมจิเนทด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.9 ไมโครเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

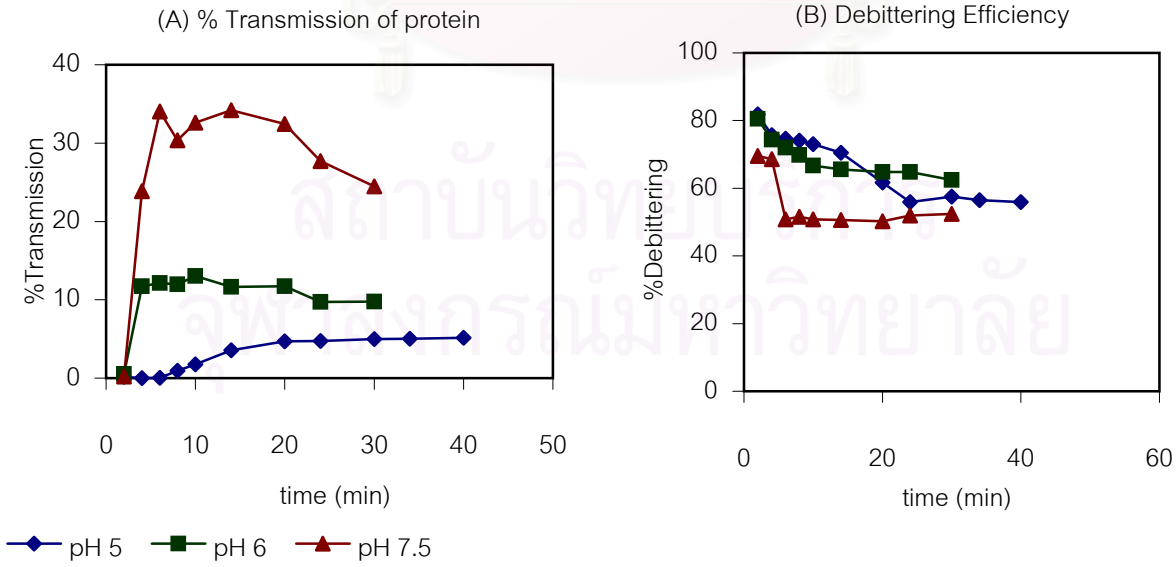


รูปที่ 5.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเพอมิเอชันฟลักซ์ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง เมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5, 6 และ 7.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโปรตีน (A) และความขม (B) ในยีสต์โฮโมจิเนท (YH) และยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท (YPC) ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง เมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5, 6 และ 7.5



รูปที่ 5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (A) และการกำจัดความขม (B) ตามเวลาที่ใช้ในการกรองเมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5, 6 และ 7.5

ข. ศึกษาสมรรถนะของเยื่อแผ่น

ทำการศึกษาสมรรถนะของเยื่อแผ่นโดยทดลองกรองยีสต์โฮโมจิเนทด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.9 ไมโครเมตร (ลักษณะผิวหน้าของเยื่อแผ่นเซรามิกแสดงดังรูปที่ 5.12) ความเข้มข้นยีสต์โฮโมจิเนท 20 กรัมต่อลิตร อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความดัน 0.3 บาร์ ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์กับเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าในช่วงแรกเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.9 ไมโครเมตรให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงกว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร และเพอมิเอชันฟลักซ์ของเยื่อแผ่นทั้งสองเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อกรองไปได้ 15 นาที ซึ่งอธิบายได้ว่าการกรองโดยใช้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.9 ไมโครเมตร อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะเข้าไปสะสมที่บริเวณผนังด้านในของเยื่อแผ่น ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะเกาะสะสมที่บริเวณผิวด้านนอกของเยื่อแผ่น ดังนั้นจึงส่งผลให้เพอมิเอชันฟลักซ์ค่อยๆ ลดลงตามเวลา ซึ่งเรียกเยื่อแผ่นที่มีลักษณะการกรองแบบนี้ว่า Bed filter ในขณะที่การกรองโดยใช้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร อนุภาคส่วนใหญ่จะเกาะสะสมที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นมากกว่าภายในรูพรุน เรียกลักษณะการกรองแบบนี้ว่า Surface filtration ดังนั้นเพอมิเอชันฟลักซ์จะลดลงและเข้าสู่สถานะคงตัวตั้งแต่ในช่วงเวลาแรกๆ ของการกรอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพการแยกเศษเซลล์ของเยื่อแผ่นโดยการนับเซลล์ด้วยเฮมาไซโตมิเตอร์ในกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าสารละลายเพอร์มิเอทที่ผ่านการกรองที่เวลา 2, 10 และ 40 นาที ไม่มีเซลล์หรือเศษเซลล์ปนอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ดังนั้นประสิทธิภาพในการแยกเศษเซลล์ของเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.9 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาถึงอายุการใช้งานของเยื่อแผ่น พบว่าเยื่อแผ่นที่มีอนุภาคอุดตันอยู่ภายในรูพรุนจะทำความสะอาดได้ยาก และต้องเปลี่ยนเยื่อแผ่นบ่อยครั้งกว่าเยื่อแผ่นที่มีอนุภาคเกาะที่ผิวด้านหน้า จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร อนุภาคส่วนใหญ่จะสะสมที่ผิวด้านหน้าของเยื่อแผ่นมากกว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.9 ไมโครเมตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เยื่อแผนที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ในการศึกษาขั้นต่อไป

5.5 ศึกษาผลการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท

การศึกษาในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการไหลผ่านของโปรตีนจากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของสายป้อน 20 กรัมต่อลิตร ความดัน 0.3 บาร์ อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่นกับการหมุนวนของเทย์เลอร์ แสดงในรูปของค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ ตามสมการที่ 3.25 ที่ความเร็ว 600 และ 1000 รอบต่อนาที จะมีค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Ta) เท่ากับ 3494.60 และ 5824.23 มีอัตราการเฉือนเท่ากับ 4613.04 ต่อวินาที และ 9926.17 ต่อวินาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมง เท่ากับ 104.27 ซึ่งสามารถทำนายลักษณะการไหลในช่องว่างระหว่างผนังด้านนอกของเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในได้ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ พบว่าลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงการหมุนวนแบบปั่นป่วน

ก. ผลการกรองยีสต์โฮโมจิเนท

จากรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์กับเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่า การหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ได้เพอมิเอชันฟลักซ์สูงกว่าการหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที เนื่องจากการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนจะทำให้อนุภาคถูกเหวี่ยงออกจากผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้น ดังนั้นความต้านทานที่ผิวเยื่อแผ่นจะมีค่าน้อยลง ส่งผลให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 5.16(A) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโปรตีนในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าความเข้มข้นของโปรตีนในสายเพอร์มิเอทจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการกรอง และเข้าสู่ค่าคงที่ที่เวลาประมาณ 10 นาที เนื่องจากเยื่อแผ่นจะดูดซับโปรตีนทันทีตั้งแต่ในช่วงเวลาแรกของการกรอง จนกระทั่งถึงจุดสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของโปรตีนจึงเข้าสู่ค่าคงที่ (ดังแสดงในภาคผนวก ข) การหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที จะทำให้ความเข้มข้นของโปรตีนเข้าสู่ค่าคงที่เร็วกว่าการหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้เศษเซลล์ถูกเหวี่ยงออกจากผิว

หน้าเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ความเร็วของของเหลวที่ไหลผ่านเยื่อแผ่นมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้โปรตีนผ่านเยื่อแผ่นออกมาได้เร็วขึ้น ระยะเวลาการดูดซับโปรตีนจึงมีค่าน้อยลง และในขณะเดียวกันแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นก็มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจจะทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโปรตีนกับโมเลกุลโปรตีนที่ถูกดูดซับอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นโปรตีนจึงผ่านเยื่อแผ่นออกมามากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.17(A)

รูปที่ 5.16(B) แสดงการเปลี่ยนแปลงความขมในสายรีเทนเทท และสายเพอร์มิเอท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกับโปรตีน อธิบายได้ว่าโมเลกุลของไอโซ-แอลฟาแอซิดเป็นสารประเภท phenolic acid อาจเกิดการดูดซับที่ผิวเยื่อแผ่นด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า จึงทำให้ความขมมีค่าน้อยตั้งแต่ในช่วงเวลาแรกของการกรอง และเมื่อถึงจุดสมดุลของการดูดซับความขมที่ได้จึงมีค่าคงที่ ความขมในสายเพอร์มิเอทมีค่าน้อยกว่าความขมในสายรีเทนเทท เนื่องจากความขมส่วนใหญ่อยู่ที่ผนังเซลล์ของยีสต์ ดังนั้นเมื่อกรองยีสต์โฮโมจิเนทเพื่อแยกเศษเซลล์ออกจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท ที่มีความขมลดลง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่ได้จาการหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็ว 600 และ 1000 รอบต่อนาที ที่สถานะคงตัว มีค่าโดยเฉลี่ย เท่ากับ 58 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ผลการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท

การกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเศษเซลล์ที่มีต่อการไหลผ่านของโปรตีน โดยนำยีสต์โฮโมจิเนทที่ผ่านการทำให้เซลล์แตกที่ความดัน 500 บาร์ 2 รอบ ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร มาปั่นแยกเศษเซลล์ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ของเหลวที่ได้จากการปั่นแยกมีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองขุ่น เรียกว่า ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท

ทำการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมง ด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที ความดัน 0.3 บาร์

รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าเพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าลดลงตามเวลาที่ใช้ในการกรอง เนื่องจากการดูดซับของโปรตีนภายในรูพรุน (ดังแสดงในภาคผนวก ข) และการอุดตันของอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่ผิวด้านหน้าของเยื่อแผ่น ทำให้ปริมาตรรูพรุนของเยื่อแผ่นมีค่าลดลงตามเวลา

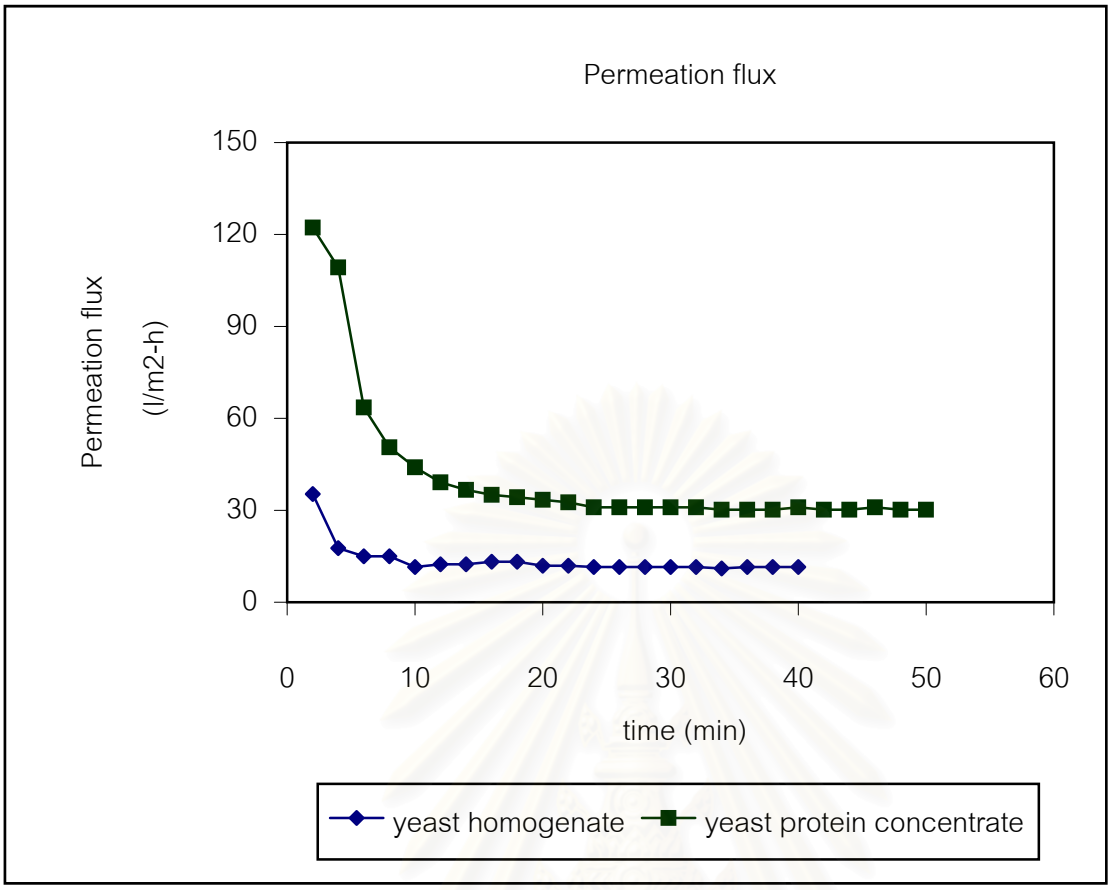
เมื่อเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทกับยีสต์โฮโมจิเนท พบว่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทมีค่าสูงกว่ายีสต์โฮโมจิเนท เนื่องจากยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทมีเศษเซลล์ปนอยู่ในสารละลายน้อยกว่ายีสต์โฮโมจิเนท ดังนั้นความต้านทานการกรองที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยลง

รูปที่ 5.19(A) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโปรตีนในยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท พบว่า เกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกับการกรองยีสต์โฮโมจิเนท และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน ดังแสดงในรูปที่ 5.20(A) จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทมีค่าสูงกว่าการกรองยีสต์โฮโมจิเนทประมาณ 6 เท่า ซึ่งทำให้อธิบายได้ว่าปริมาณของเศษเซลล์มีผลต่อการส่งผ่านโปรตีน โดยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต้านทานที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นมีค่าลดลง

จากรูปที่ 5.19(B) แสดงการเปลี่ยนแปลงความขมในยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทตามเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าความขมในสายเพอร์มิเอทมีค่าน้อยกว่าในสายรีเทนเทท เนื่องจากเยื่อแผ่นสามารถกักเก็บเศษเซลล์ไว้ได้ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความขมลดลง

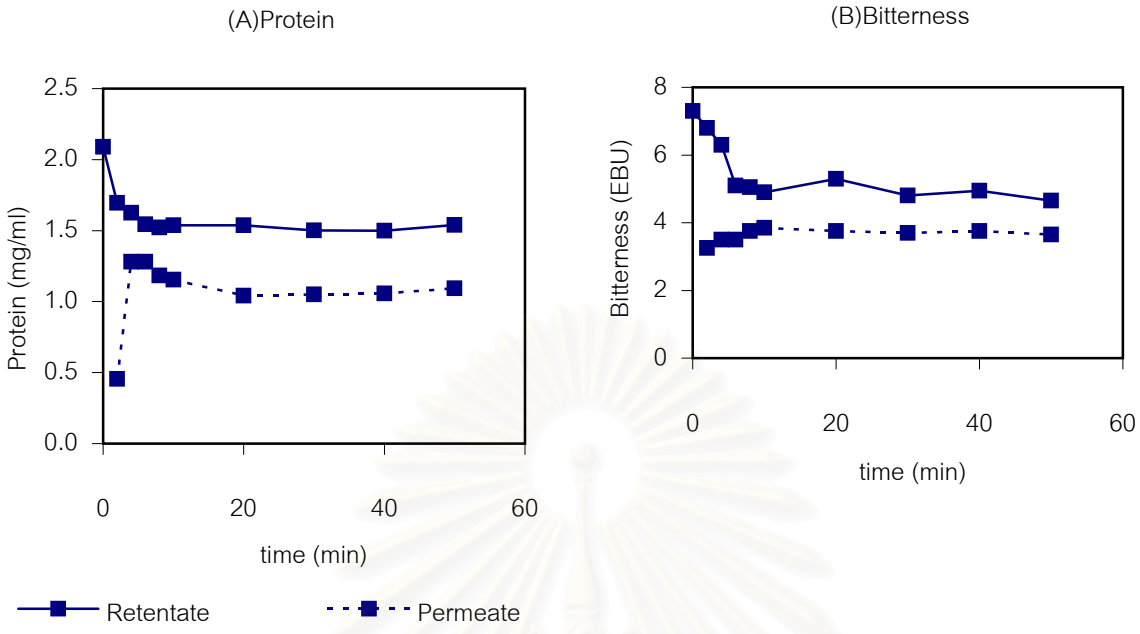
เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่สถานะคงตัวที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์โฮโมจิเนท ดังแสดงในรูปที่ 5.20(B) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

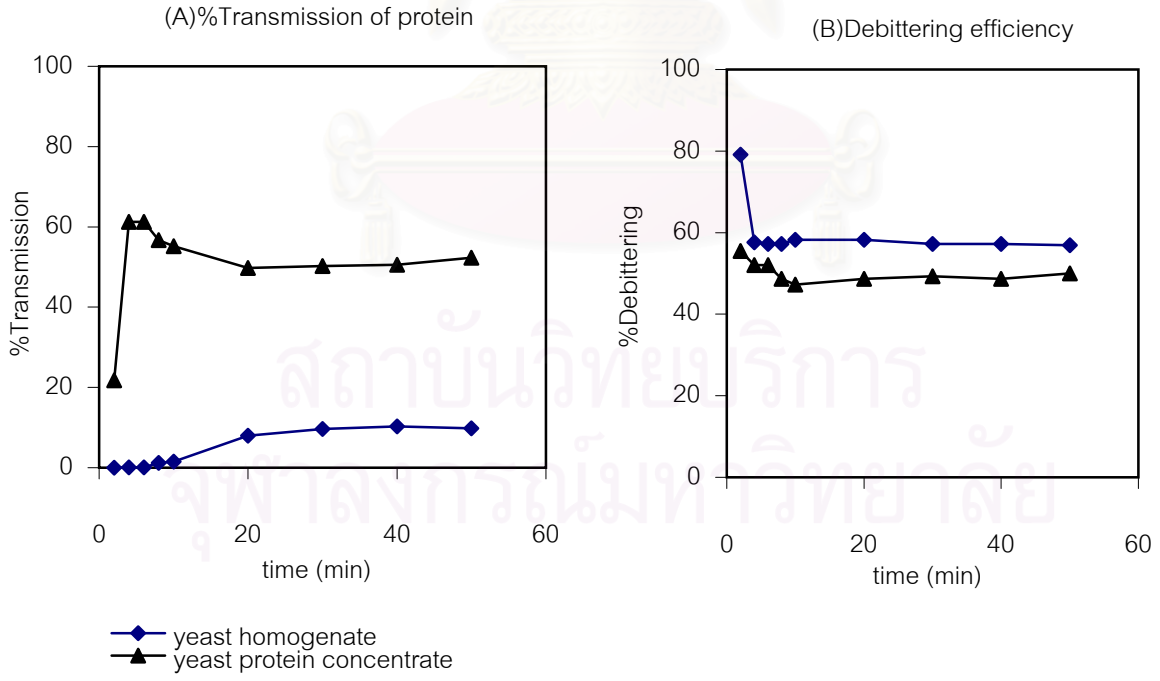


รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์โฮโมจิเนท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ที่ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโปรตีน (A) และความขม (B) ในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอทที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง



รูปที่ 5.20 แสดงผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (A) และการกำจัดความขม (B) ที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท กับยีสต์โฮโมจิเนท ตามเวลาที่ใช้ในการกรองที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. การกรองยีสต์ออโตไลเสท

นำยีสต์โฮโมจิเนทที่ผ่านการทำให้เซลล์แตกที่ความดัน 500 บาร์ 2 รอบ ความเข้มข้น 120 กรัมต่อลิตร มาทำออโตไลซิสโดยปรับพีเอชให้ได้ 5.5 ควบคุมอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 20 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยา สารละลายที่ได้หลังจากการทำออโตไลซิส เรียกว่า ยีสต์ออโตไลเสท และเมื่อแยกเศษเซลล์ออกแล้วจะเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า ยีสต์สกัด

ทำการกรองยีสต์ออโตไลเสทที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที จากรูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์กับเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนจะทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้แรงเฉือนที่เกิดบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถกวาดอนุภาคที่เกาะบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นให้หลุดออกกลับเข้าไปในสารละลายได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที ที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์โฮโมจิเนท ดังแสดงในรูปที่ 5.22 จะเห็นว่าเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ยีสต์ออโตไลเสท และยีสต์โฮโมจิเนท ตามลำดับ เนื่องจากการการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรทจะมีการอุดตันเนื่องจากเศษเซลล์น้อยกว่าการกรองยีสต์ออโตไลเสทหรือยีสต์โฮโมจิเนท ดังนั้นความต้านทานการกรองจึงมีค่าน้อยที่สุด และเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์ออโตไลเสทมีค่าสูงกว่ายีสต์โฮโมจิเนท เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการทำออโตไลซิสจะทำให้สารละลายที่ได้มีความหนืดน้อยลง ดังนั้นจึงทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น

จากรูปที่ 5.23(A) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโปรตีนในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอท พบว่าความเข้มข้นของโปรตีนในสายเพอร์มิเอทมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นของโปรตีนที่มีอยู่ในสายรีเทนเทท ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจากการทำออโตไลซิสเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานาน จึงทำให้โปรตีนที่อยู่ภายในเซลล์ไหลออกมานอกเซลล์มากขึ้น และการทำออโตไลซิสยังเป็นการควบคุมอุณหภูมิ และพีเอชให้เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์โปรตีเอส ดังนั้นโมเลกุลของโปรตีนที่มีขนาดใหญ่จึงถูกย่อยให้มีโมเลกุลเล็กลง และไหลออกมานอกเซลล์มากขึ้น ส่งผลให้

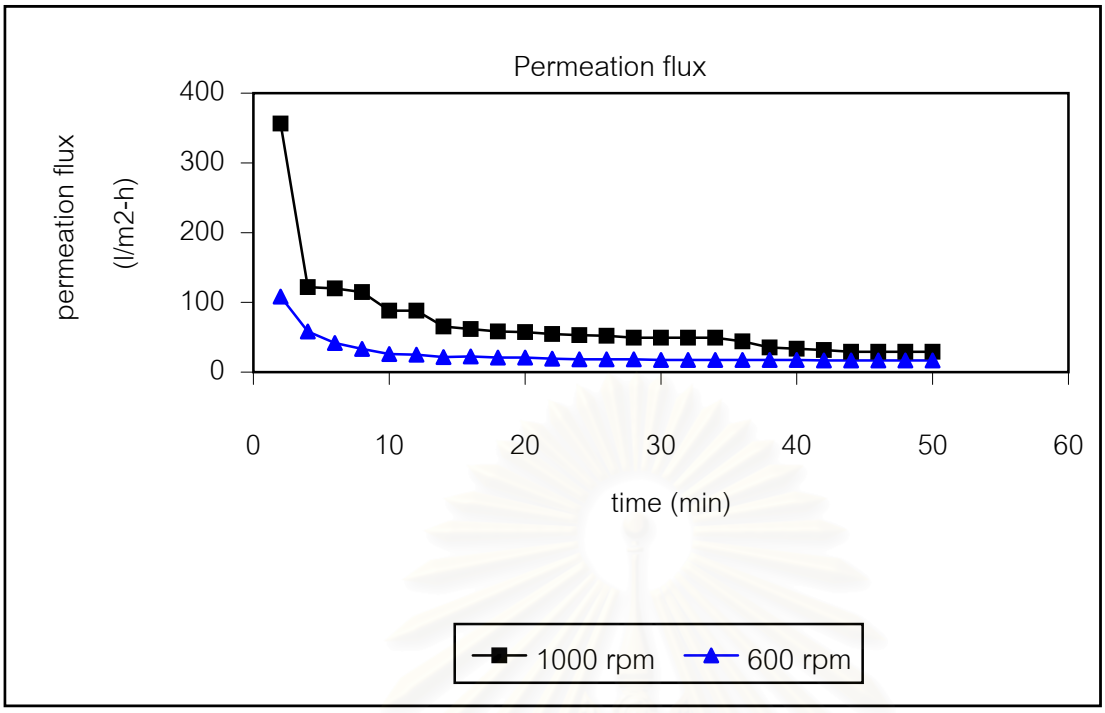
โมเลกุลโปรตีนไหลผ่านเยื่อแผ่นออกมาได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนที่ความเร็ว 600 และ 1000 รอบต่อนาที มีค่าเฉลี่ยที่สถานะคงตัว เท่ากับ 61 และ 63 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.23(B) แสดงการเปลี่ยนแปลงความขมในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอท พบว่าเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันกับการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ดังอธิบายข้างต้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่ความเร็ว 600 และ 1000 รอบต่อนาที มีค่าเฉลี่ยที่สถานะคงตัว เท่ากับ 86 และ 85 เปอร์เซ็นต์

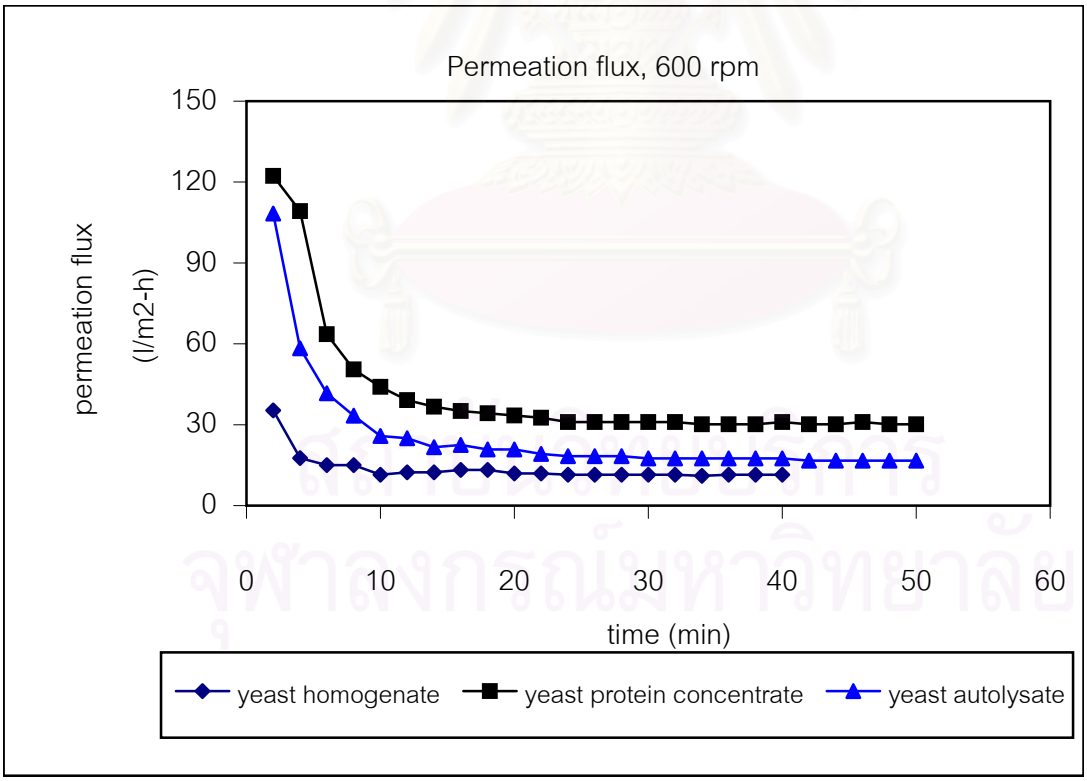
เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขม ที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทกับยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์โฮโมจิเนท ที่ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 5.25 และ 5.26 จะเห็นว่าการกรองยีสต์ออโตไลเสทจะได้เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนสูงที่สุด รองลงมาคือ ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์โฮโมจิเนท ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทมีค่าสูงที่สุด ส่วนยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์โฮโมจิเนทมีค่าใกล้เคียงกัน

พีเอชในสารละลายยีสต์โฮโมจิเนท และยีสต์ออโตไลเสทมีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงพีเอช 5-6 แต่เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทมีค่าสูงกว่าการกรองยีสต์โฮโมจิเนท อาจเป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาออโตไลซิสที่เกิดขึ้น ทำให้สารที่ให้ความขมเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำมากขึ้น ดังนั้นจึงควรที่จะมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

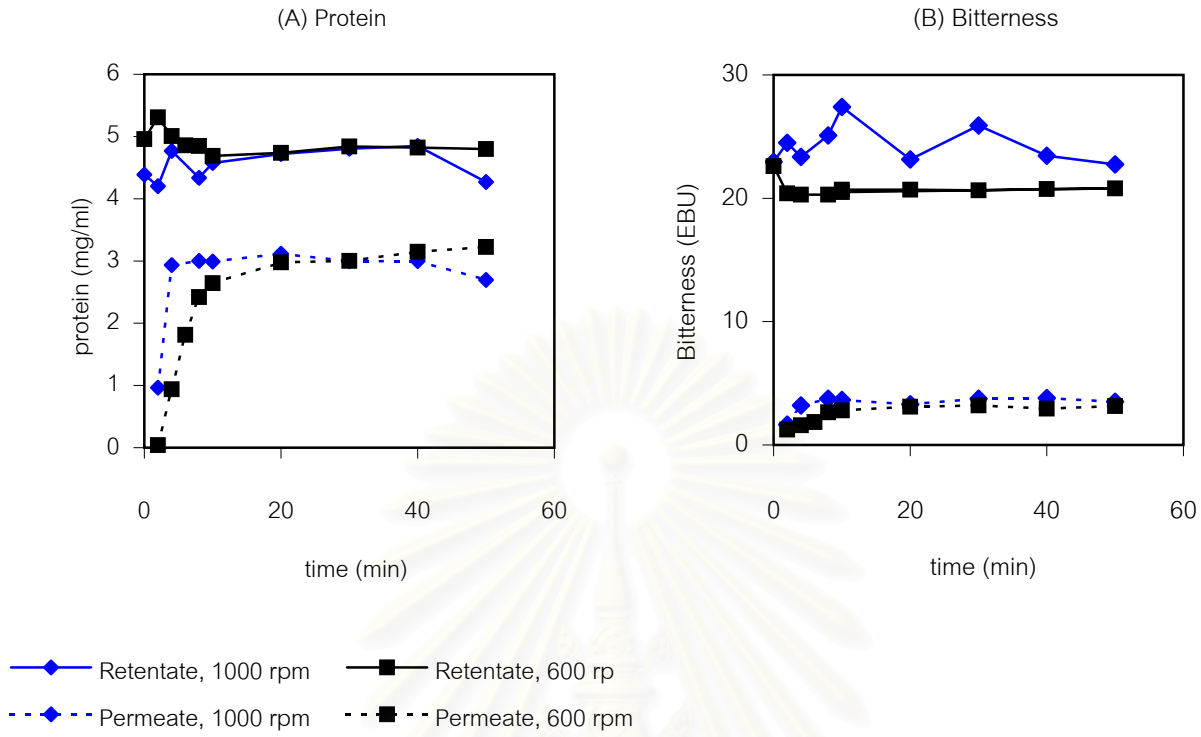
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



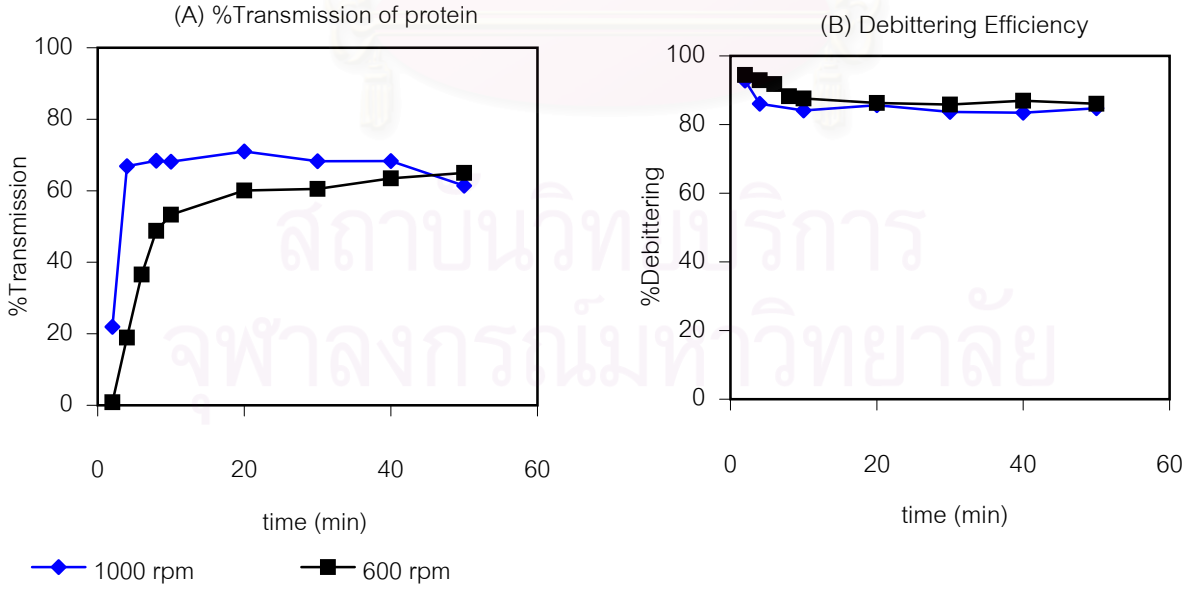
รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ของยีสต์ออโตไลเสทกับเวลาที่ใช้ในการกรอง



รูปที่ 5.22 แสดงผลการเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลซิส ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโปรตีน (A) และความขม (B) ในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอท ที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง



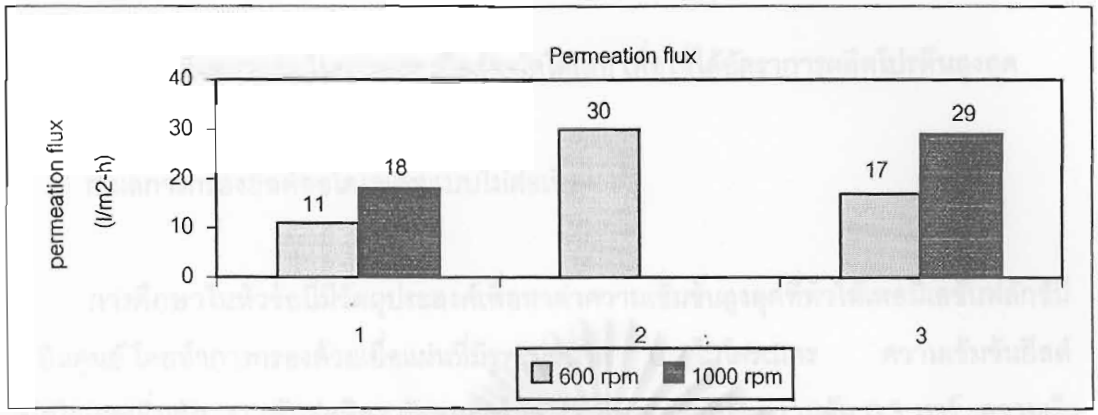
รูปที่ 5.24 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (A) และการกำจัดความขม (B) ที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง

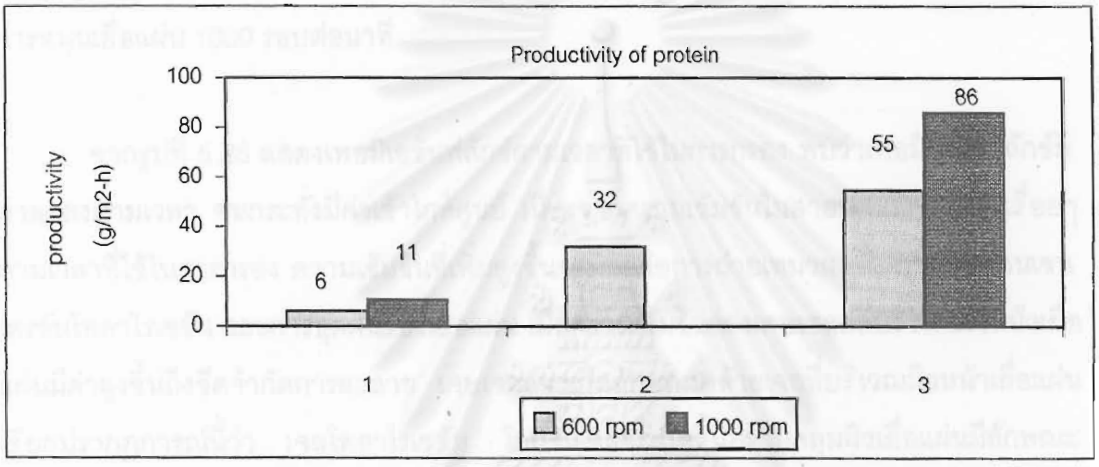
ง. เปรียบเทียบผลการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท

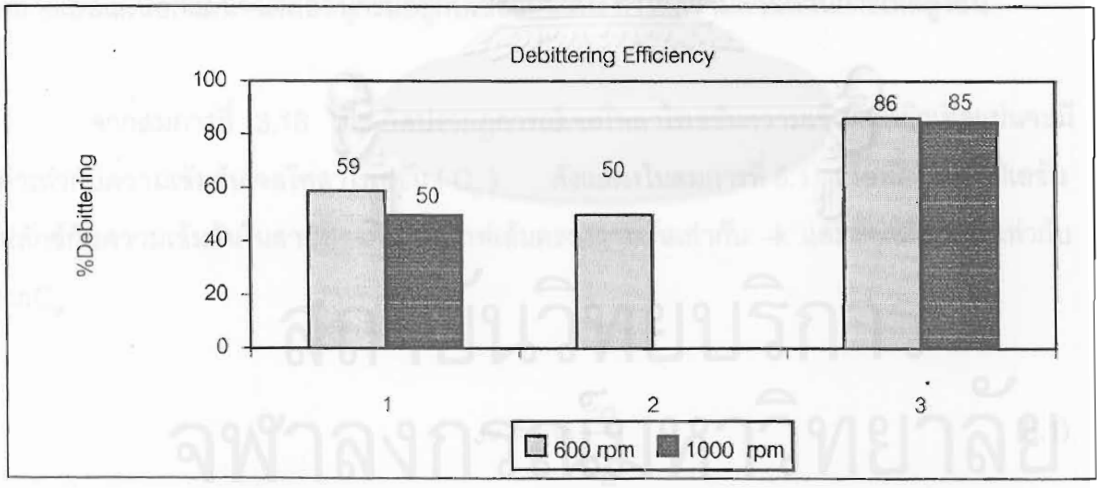
รูปที่ 5.27 แสดงผลการเปรียบเทียบการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท โดยจากการเปรียบเทียบความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่น พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้เกิดการหมุนวนของสารละลาย ที่เรียกว่า การหมุนวนของเทย์เลอร์ เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ และแรงเฉือนที่เกิดบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นสูงขึ้น และทำให้การหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นด้านนอกกับผนังท่อด้านใน มีการหมุนวนแบบปั่นป่วนมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถกวาดอนุภาคที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นให้หลุดออกกลับเข้าไปในสารละลายได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น

จากการเปรียบเทียบอัตราการผลิตโปรตีนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่การกรองที่สถานะคงตัว จะเห็นว่าการกรองยีสต์ออโตไลเสทให้อัตราการผลิตโปรตีนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูงกว่าการกรองยีสต์โฮโมจิเนทประมาณ 8 เท่า ดังนั้นการผลิตยีสต์สกัดจึงมีความคุ้มในการลงทุนมากกว่าการผลิตยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท ในงานวิจัยนี้จึงเลือกผลิตยีสต์สกัดโดยการกรองยีสต์ออโตไลเสท เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการกรองต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย







หมายเหตุ 1. ยีสต์โฮโมจิเนท 2. ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท 3. ยีสต์ออโตไลเสท

รูปที่ 5.27 แสดงผลการเปรียบเทียบการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท และยีสต์ออโตไลเสท

5.6 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกรองยีสต์ออโตไลเสท เพื่อให้ได้อัตราการผลิตโปรตีนสูงสุด

ก.ผลการกรองยีสต์ออโตไลเสทแบบไม่ต่อเนื่อง

การศึกษาในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าเป็นศูนย์ โดยทำการกรองด้วยเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสทเริ่มต้น 20 กรัมต่อลิตร อัตราการไหล 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความดัน 0.3 บาร์ ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.28 แสดงเพอมิเอชันฟลักซ์ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง พบว่าเพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าลดลงตามเวลา จนกระทั่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากความเข้มข้นในสายป้อนมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีผลต่อการถ่ายเทมวล การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และการอุดตันของเยื่อแผ่น เมื่อความเข้มข้นของเศษเซลล์ที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้นถึงขีดจำกัดการละลาย เศษเซลล์จะเกิดลักษณะคล้ายเจลที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เจลโพลาไรเซชัน โดยชั้นเจลจะเกิดขึ้นครอบคลุมผิวเยื่อแผ่นมีลักษณะคล้ายเยื่อแผ่นอีกแผ่นหนึ่งต่ออนุกรมอยู่กับเยื่อแผ่นเดิม ทำให้ความต้านทานการไหลสูงขึ้น

จากสมการที่ 3.18 เมื่อเกิดปรากฏการณ์เจลโพลาไรเซชันความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่นจะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นเจลโพลาไรเซชัน (C_g) ดังแสดงในสมการที่ 5.1 เมื่อพลอตเพอมิเอชันฟลักซ์กับความเข้มข้นในสายป้อนจะได้กราฟเส้นตรงความชันเท่ากับ –k และมีจุดตัดกราฟเท่ากับ $klnC_g$

$$Jv = k\ln\frac{C_g}{C_b} \qquad (5.1)$$

$$J_v = k\ln C_g - k\ln C_b \qquad (5.2)$$

เนื่องจากปริมาณสารเคมี และเยื่อแผ่นมีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงประมาณค่าความเข้มข้นเจลโพลาไรเซชันจากการพลอตค่าเพอมิเอชันฟลักซ์กับความเข้มข้นของสายป้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ดังแสดงในรูปที่ 5.29 จากกราฟจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเศษเซลล์มีค่าประมาณ 0.216 เมตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นเจลโพลาไรเซชันมีค่าประมาณ 44 กรัมต่อลิตร

ข. ผลการกรองยีสต์ออโตไลเสทแบบต่อเนื่อง (continuous)

ทำการกรองยีสต์ออโตไลเสทแบบเวียนเซลล์กลับทั้งหมด (total recycle) โดยนำยีสต์ออโตไลเสท ความเข้มข้น 120 กรัมต่อลิตร เจือจางให้ได้ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ทำการกรองด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร อัตราการไหลของสายป้อน 11, 15 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.30 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์กับอัตราการไหลของสายป้อนที่ความเร็วรอบต่าง จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของสายป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าลดลง และการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น

การเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ผลลัพธ์ของแรงรวม 3 แรง คือ แรงเหวี่ยง แรงเนื่องจากการไหลของเพอร์มิเอท และแรงเนื่องจากการไหลตามแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 มีแนวโน้มไปในทิศทางตามแนวแกนมากกว่าที่จะไหลผ่านเยื่อแผ่นออกมา เพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าต่ำลง และเมื่อลดอัตราการไหลให้มีค่าต่ำลงจะทำให้ขนาดของวอร์เท็กซ์ (vortex) ที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างระหว่างผนังด้านนอกของเยื่อแผ่นกับผนังด้านในของท่อทรงกระบอก (housing) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 มีขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงสามารถกวาดอนุภาคที่เกาะที่ผิวด้านนอกของเยื่อแผ่นออกไปอย่างต่อเนื่อง เพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มความเร็วในการหมุนของเยื่อแผ่นจะทำให้เกิดการหมุนวนแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงเฉือนที่ผิวเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น เพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

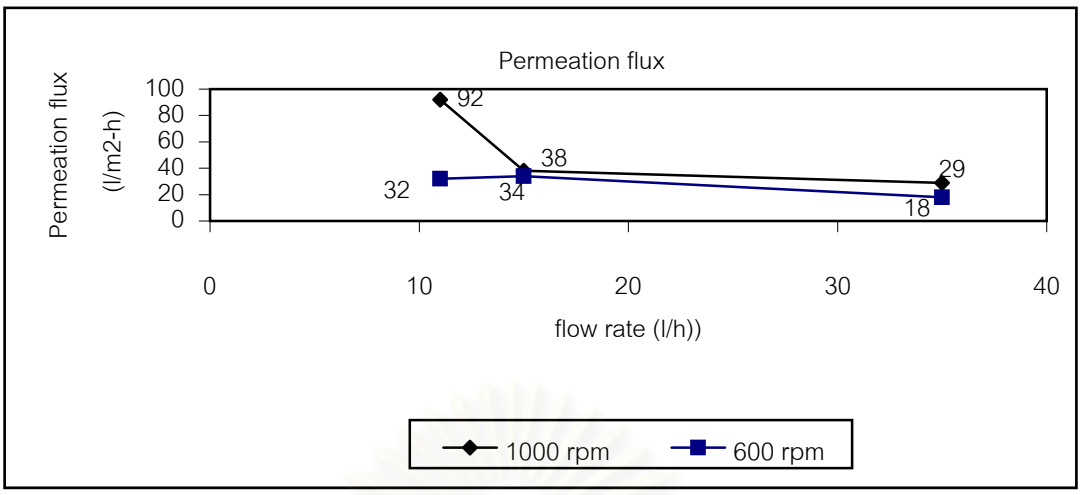
ตารางที่ 5.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่สถานะคงตัว อัตราการไหล 11,15 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	600	1000	600	1000
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ส่งผ่านโปรตีน		เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขม	
11	70.94	71.55	85.10	68.14
15	65.97	79.01	86.06	67.58
35	62.27	67.43	88.91	86.50

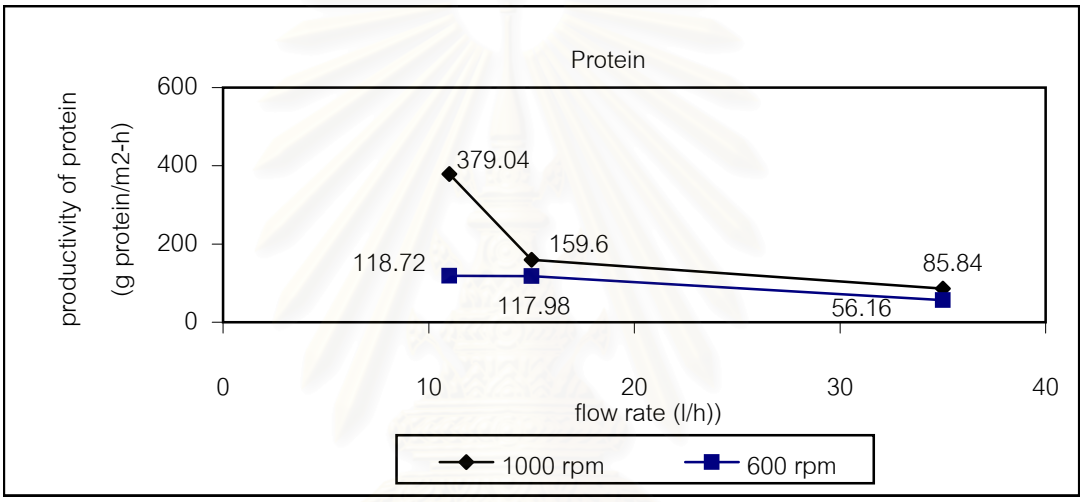
จากตารางที่ 5.2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทแบบต่อเนื่องมีค่าอยู่ในช่วง 60-80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับภาวะที่ใช้ในการกรอง โดยเยื่อแผ่นสามารถกักเก็บเศษเซลล์ไว้ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ (จากการส่องกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า)

การเพิ่มความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น จะทำให้เกิดแรงเฉือนที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้น ดังนั้นอนุภาคจะถูกกวาดออกจากผิวหน้าเยื่อแผ่น ดังนั้นโปรตีนจึงผ่านเยื่อแผ่นออกมาได้มากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนยังคงมีค่าไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากโปรตีนบางส่วนถูกเยื่อแผ่นดูดซับไว้ (ภาคผนวก ข) ส่วนเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขมมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไอโซ-แอลฟาแอซิดกับเศษเซลล์ถูกทำลาย ดังนั้นโมเลกุลไอโซ-แอลฟาแอซิดจึงสามารถผ่านเยื่อแผ่นออกมาได้

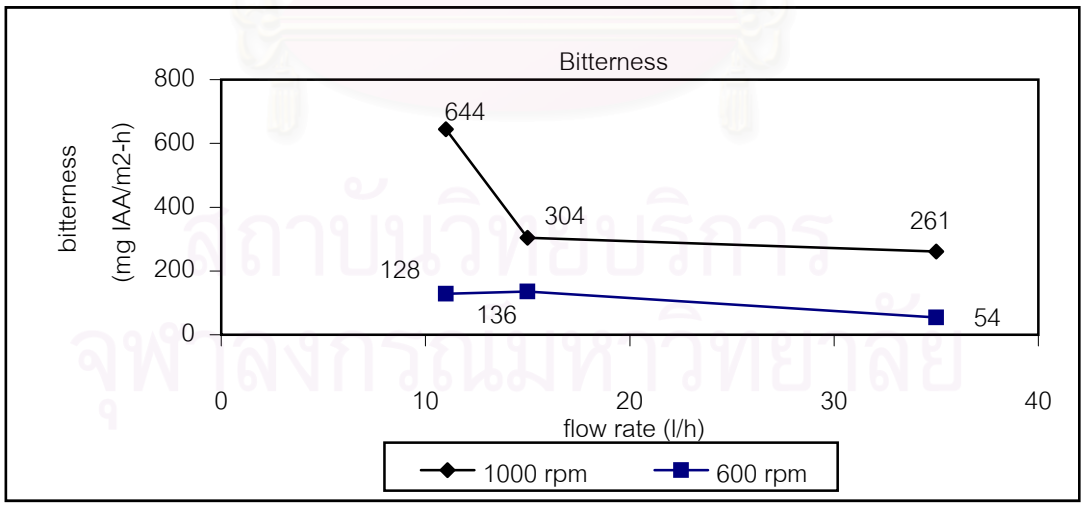
อัตราการผลิตโปรตีนมีค่าสูงสุด เท่ากับ 379 กรัมโปรตีนต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที และมีความขม เท่ากับ 644 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อตารางเมตร-ชั่วโมง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.30 แสดงผลการเปรียบเทียบการกรองที่สถานะคงตัว อัตราการไหล 11 ,15 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที

5.7 เปรียบผลการการกำจัดความขมที่ได้จากการกรองกับการใช้สารเคมี

เมื่อเปรียบเทียบยีสต์สกัดที่ผ่านการลดความขมโดยการกรองแยกเศษเซลล์ออกจากยีสต์ออโตไลเสท ที่ภาวะการกรองแบบต่อเนื่อง โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร อัตราการไหล 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความดัน 0.3 บาร์ ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที กับยีสต์สกัดที่ได้จากการลดความขมโดยใช้สารเคมี (อัมพร, 1997) ดังแสดงในตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าการกำจัดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์โดยใช้การกรองมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้สารเคมี คือ ใช้เวลาในการกำจัดความขมน้อยกว่า และได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของของแข็ง และเปอร์เซ็นต์การเก็บเกี่ยวโปรตีนสูงกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนและความขมที่มีอยู่ในยีสต์สกัดที่ได้จากงานวิจัยนี้ พบว่าปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในยีสต์สกัดมีค่าน้อยกว่า ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากการดูดซับโปรตีนของเยื่อแผ่น (ภาคผนวก ข) และปริมาณความขมที่มีอยู่ในยีสต์สกัดมีค่าสูงกว่า อาจเนื่องมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิต

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นว่าเมื่อเทียบ 1 กรัมโปรตีนที่มีอยู่ในสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์เริ่มต้น การกำจัดความขมโดยใช้เฮกเซนจะได้อัตราการผลิตโปรตีนเท่ากับ 3.17 กรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่การกำจัดความขมโดยการกรองแยกเศษเซลล์จะได้อัตราการผลิตโปรตีนที่สถานะคงตัวเท่ากับ 0.23 กรัมต่อชั่วโมง เมื่อมีโปรตีนเข้าในระบบอย่างต่อเนื่องด้วยอัตรา 1 กรัมต่อชั่วโมง และมีพื้นที่การกรอง เท่ากับ 0.034 ตารางเมตร ดังนั้นถ้าต้องการอัตราการผลิตโปรตีนมากกว่าหรือเท่ากับอัตราการผลิตโปรตีนที่ได้จากการกำจัดความขมโดยใช้เฮกเซน ก็สามารถทำได้ทำได้โดยเพิ่มพื้นที่การกรองให้มากกว่าหรือเท่ากับ 0.469 ตารางเมตร

จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการกรองสามารถกำจัดความขมออกจากสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ได้ โดยใช้เวลาในการกำจัดความขมน้อยกว่า และได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีสารเคมีเจือปน นอกจากนี้ยังสามารถขยายขนาดได้ง่ายอีกด้วย ดังนั้นการใช้การกรองแยกเศษเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดความขมที่ดีกว่าการใช้สารเคมี

ตาราง 5.4 เปรียบเทียบยีสต์สกัดที่ได้จากการกำจัดความขมด้วยวิธีต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อน้ำหนักแห้ง)	1	2	3	4
เวลาที่ใช้ในการกำจัดความขม (นาที)	-	20	10	10
ผลได้ของของแข็ง	38.04	20.00	35.41	39.79
การเก็บเกี่ยวโปรตีน	50.94	37.00	52.83	59.66
ปริมาณโปรตีน (กรัมโปรตีนต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	0.58	0.62	0.58	0.35
ความขม (มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	0.35	0.16	0.16	0.60

<u>หมายเหตุ</u>

- ความขมที่มีอยู่ในสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ก่อนกรอง เท่ากับ 1.15 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

1,2,3 เป็นผลการกำจัดความขมที่ได้จากการทดลองระดับกึ่งโรงงาน (pilot scale) (อัมพร,1997)

1. คือ ยีสต์สกัดที่ได้จากการปั่นแยกผนังเซลล์ของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ที่ผ่านการทำ ออโตไลซิส โดยไม่มีการกำจัดความขม
2. คือ ยีสต์สกัดที่ได้จากการปั่นแยกผนังเซลล์ของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการล้างด้วยโซเดียมคาร์บอเนต 2 เปอร์เซ็นต์ ก่อนการทำออโตไลซิส และเวลาที่ใช้ในการกำจัดความขมเป็นเวลาที่ไม่รวมการล้างด่างออก
3. คือ ยีสต์สกัดที่ได้จากการกำจัดความขมออกด้วยเฮกเซนหลังจากการทำออโตไลซิส
4. คือ ยีสต์สกัดที่ได้หลังจากการกรองแยกผนังเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ออกด้วย เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความดัน 0.3 บาร์ อัตราการไหล 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที (จากงานวิจัยนี้)

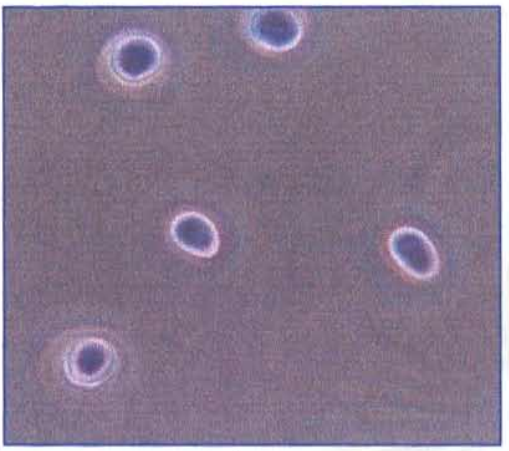
5.8 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณความขมที่มีอยู่ในยีสต์สกัดที่ได้จากการแยกผนังเซลล์ของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์และการทำออโตไลซิสยังคงมีความขมมากกว่ายีสต์สกัดที่ได้จากการกำจัดความขมโดยใช้สารเคมี ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระบบสามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไอโซ-แอลฟาแอซิดกับผนังเซลล์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.4 จึงทำให้โมเลกุลไอโซ-แอลฟาแอซิดสามารถผ่านเยื่อแผ่นออกมา ดังนั้นจึงทดลองผลิตยีสต์สกัดโดยการกรองแยกผนังเซลล์ของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการทำออโตไลซิสโดยไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมครอน อัตราการไหล 15 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที พบว่ายีสต์สกัดที่ได้มีปริมาณสารที่ให้ความขม 0.25 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ปริมาณโปรตีน 0.44 กรัมโปรตีนต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และผลได้ของของแข็ง 36.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่ายีสต์สกัดที่ได้จากวิธีนี้มีปริมาณความขมน้อยกว่ายีสต์สกัดที่ได้จากการทำออโตไลซิสโดยผ่านโฮโมจิไนเซอร์ ที่นำมากรองที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที และมีผลได้ของของแข็งน้อยกว่า แต่มีปริมาณโปรตีนมากกว่า มีสาเหตุจากการทำออโตไลซิสนั้นจะทำการปรับพีเอชของสารละลายก่อนให้ได้ 5.5 ดังนั้นสารที่ให้ความขมจึงอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและยังคงติดอยู่ในผนังเซลล์ไม่ละลายออกมาในสารละลาย นอกจากนี้ยังไม่ถูกแรงเฉือนเนื่องจากโฮโมจิไนเซอร์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ภายในเซลล์จะออกมานอกเซลล์ได้โดยอาศัยการแพร่ (diffusion) เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นระหว่างภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ เมื่อพิจารณาลักษณะของเซลล์ที่ผ่านกระบวนการต่างๆ จากการส่องกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 5.31 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อยู่ภายในเซลล์ของยีสต์ออโตไลเสทที่ไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ยังคงอยู่ภายในเซลล์ยีสต์เมื่อเทียบกับลักษณะของเซลล์ที่ผ่านการโฮโมจิไนเซอร์แล้วมาทำออโตไลซิสต่อ จะเห็นว่าการทำให้เซลล์แตกก่อนนั้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ภายในเซลล์หลุดออกมานอกเซลล์ได้มากกว่า ส่วนปริมาณโปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ที่ผ่านการทำออโตไลซิสมีมากกว่า เนื่องจากเซลล์ที่ผ่านการทำออโตไลซิสยังคงมีขนาดของเซลล์ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับเซลล์ปกติ ดังนั้นจึงทำให้สามารถกรองแยกเศษเซลล์ออกได้ง่ายกว่าการกรองเซลล์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กปนอยู่ นอกจากนี้ยังไม่เกิดการอุดตันเนื่องจากเศษเซลล์ที่มีขนาดเล็กไปอุดตันหรือปิดกั้นรูพรุนของเยื่อแผ่น ดังนั้นจึงทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูง และทำให้โปรตีนสามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ดีอีกด้วย (ผลการทดลองแสดงในผนวก) และเมื่อเปรียบเทียบยีสต์สกัดที่ได้กับยีสต์สกัดที่ได้จากการกำจัดความขมโดยใช้สารเคมีพบว่ามีปริมาณความขมสูงกว่า 2 เท่า ปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกัน และผลได้ของของแข็งมีค่าสูงกว่า

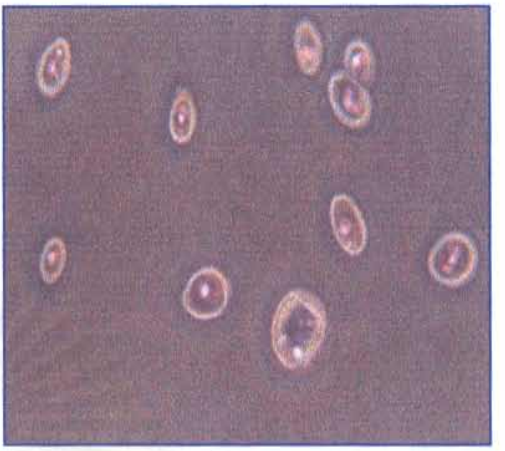
เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการผลิตยีสต์สกัดโดยการแยกผนังเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์โดยการกรองด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมครอน จะเห็นว่าการผลิตยีสต์สกัดโดยไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์จะมีความคุ้มในการลงทุนมากกว่า เนื่องจากสามารถประหยัดพลังงานในการทำให้เซลล์แตก และเมื่อนำมากรองแยกผนังเซลล์ออกด้วยเยื่อแผ่นจะได้เพอมิเอชันฟลักซ์ที่สูงกว่า ซึ่งส่งผลให้มีอัตราการผลิตโปรตีนที่สูงกว่าด้วย ดังนั้นจึงน่าที่จะทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการกรองยีสต์ออโตไลเสทต่อไป

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบความขมที่มีอยู่ในยีสต์ทั้งหมด (ความเข้มข้น 120 กรัมต่อลิตร) ที่ได้ในขั้นตอนต่าง ๆ

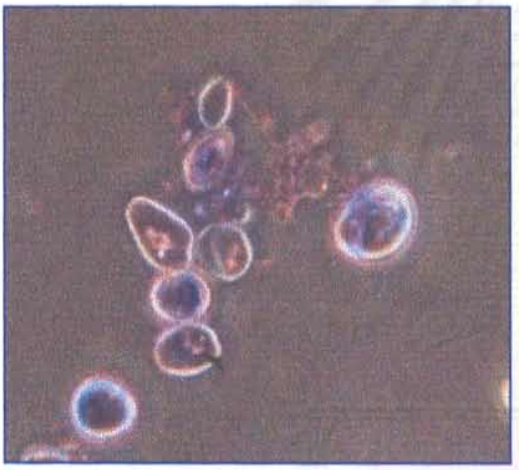
		E.B.U.	มิลลิกรัมไอโซแอลฟาแอซิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง
1	สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์เริ่มต้น	114	0.95
2	สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 500 บาร์ 2 รอบ (yeast homogenate)	118	0.98
3	สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 500 บาร์ 2 รอบ และนำไปผ่านการทำออโตไลซิส (ก่อนกรอง)	116	0.97
4	สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ 500 บาร์ 2 รอบ และนำไปผ่านการทำออโตไลซิส (ระหว่างทำการกรองที่เวลา 40 นาที , ที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อชั่วโมง , ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที)	170	1.42
5	สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการทำออโตไลซิสโดยไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ (ก่อนกรอง)	48	0.40
6	สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการทำออโตไลซิสโดยไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์ (ระหว่างทำการกรองที่เวลา 40 นาที, อัตราการไหล 15 ลิตรต่อชั่วโมง, ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที)	71	0.59



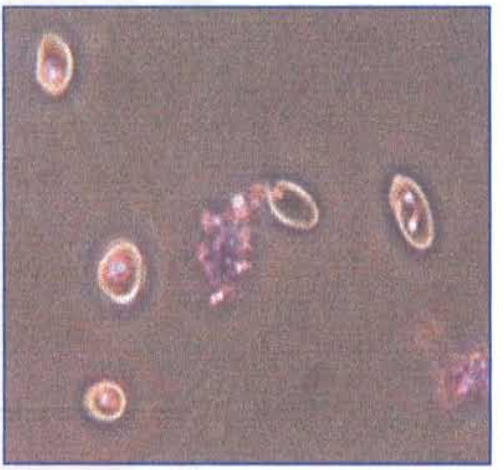
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.31 แสดงลักษณะของเซลล์ที่ผ่านกระบวนการต่างๆ จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1000 เท่า

ก) ลักษณะของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ก่อนผ่านกระบวนการต่างๆ

ข) ลักษณะของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการทำออโตไลซิส

ค) ลักษณะของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านโฮโมจิไนซอร์ ความดัน 500 บาร์ 2 รอบ

ง) ลักษณะของเซลล์สเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ที่ผ่านการทำออโตไลซิสหลังจากผ่านโฮโมจิไนเซอร์ ความดัน 500 บาร์ 2 รอบ

สรุปผลการทดลอง

1.ความขมส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผนังเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ โดยของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์จะ มีความขมน้อยกว่าที่ผนังเซลล์ประมาณ 4 เท่า

2.ความดันและจำนวนรอบที่ใช้ในการทำโฮโมจิไนเซอร์มีผลต่อปริมาณโปรตีนที่ปลดปล่อยออกมานอกเซลล์ ภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เซลล์แตกด้วยโฮโมจิไนเซอร์ คือ ความดัน 500 บาร์ 2 รอบ จะได้ปริมาณโปรตีน 0.223 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และความขม เท่ากับ 0.433 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

3.พีเอชมีผลต่อการละลายของโปรตีน และความขม โดยพีเอชที่เหมาะสมในการกรองสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์เพื่อกำจัดความขม คืออยู่ในช่วงพีเอช 5-6

4.เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.9 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกเศษเซลล์ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร อนุภาคส่วนใหญ่จะเกาะสะสมที่บริเวณผิวด้านนอกของเยื่อแผ่น ส่วนเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.9 ไมโครเมตร อนุภาคส่วนใหญ่จะสะสมที่บริเวณผนังด้านในของเยื่อแผ่น ดังนั้นจึงทำความสะอาดได้ยากกว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร

5.การกรองยีสต์ออโตไลเสทจะได้อัตราการผลิตโปรตีนสูงกว่าการกรองยีสต์โฮโมจิเนทประมาณ 8 เท่า การทำออโตไลซิสทำให้ความหนืดของสารละลายมีค่าลดลง และทำให้โปรตีนไหลออกมานอกเซลล์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้เพอมิเอชันฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนมีค่าสูงขึ้น

6.ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสทที่ทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าเท่ากับศูนย์ คือ ประมาณ 44 กรัมต่อลิตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเศษเซลล์มีค่าประมาณ 0.216 เมตรต่อชั่วโมง

7.ภาวะที่เหมาะสมในการกรองยีสต์ออโตไลเสทเพื่อให้ได้อัตราการผลิตโปรตีนสูงสุด คือ ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท 20 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลของสายป้อน 11 ลิตรต่อชั่วโมง ความดัน 0.3 บาร์ ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที จะได้อัตราการผลิตโปรตีน เท่ากับ 379 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ความขม 644 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ผลได้ของของแข็ง 37.79 เปอร์เซ็นต์ การเก็บเกี่ยวโปรตีน 59.66 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโปรตีน 0.354 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ความขม 0.6 มิลลิกรัมไอโซ-แอลฟาแอซิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขม เท่ากับ 68.14 เปอร์เซ็นต์

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการกรองยีสต์ออโตไลเสทโดยไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์
2. ศึกษาผลของเยื่อแผ่นที่มีต่อการกรองยีสต์ออโตไลเสท

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จันทนี จงนิตยกาล และ ชัชวาล จีนเลิศ. รายงานสภาวะอุตสาหกรรมเบียร์.ฝ่ายนโยบาย 4.กองเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. สำนักปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม.2529.

จันทพร ปุณณรัตนกุล. การแยกเซลล์ *Alcaligenes eutrophus* ATCC 17697 ที่มีพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรต จากน้ำหมักโดยเครื่องกรองระดับอนุภาครูปทรงกระบอกชนิดหมุนได้ วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539

ชนิตโชต เดชวิศิษฎ์สกุล และ คณะ.ความพยายามในการหาวิธีกำจัดฮอพจากยีสต์ที่ได้จากการหมักเบียร์โดยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟฟี โครงการพิเศษปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2539.

รัตนา จิระรัตนานนท์. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.2543 : 147-192.

วิวัฒน์ หวังเจริญ. การผลิตยีสต์ออโตไลเสทเพื่อใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นรสเนื้อ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2537.

วุฒิพงศ์ บุญนายวา. การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกชนิดหมุนได้ วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539

สุพจน์ ใช้เทียมวงศ์. จุลชีววิทยา. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง 2529 : 366-369.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Bailey,S.M. and Meagher,M.M., Crossflow Microfiltration of Recombinant *Escherichia coli* Lysates after High Pressure Homogenization. Biotechnol.Bioeng. 56. No.3 (1997) : 304-310.

Bowen,W.R. and Calvo,J.I., and Harnanedez,A., Steps of Membrane Blocking in Flux Decline During Protein Microfiltration. J.Mem.Sci. 45(1995) : 3-16.

Bowen,W.R. and Gan Q., Properties of Microfiltration Membranes : Flux Loss During Constant Pressure Permeation of Bovine Serum Albumin .Biotechnol Bioeng. 38 (1991) : 688-696.

Bowen,W.R. and Gan,Q., Properties of Microfiltration Membranes : The Effects of Adsorption and Shear on the Recovery of an Enzyme. Biotechnol.Bioeng. 40 (1992) : 91-497.

Bowen,W.R. and Hall,N.J., Properties of Microfiltration Membranes : Mechanisms of Flux Loss in Recovery of an Enzyme. Biotechnol.Bioeng. 40 (1992) : 491-497.

Bowen,W.R. and Hughes,D.T., Properties of Microfiltration Membrane.Part 2 : Adsorption of Bovine Serum Albumin at Aluminium Oxide Membranes. J.Mem.Sci. 51 (1990) : 189-200.

Charles,S. and Robert,H.D., Protein Recovery from Cell Debris Using Rotary and Tangential Cross-Flow Microfiltration. Biotechnol.Bioeng.47 (1995) : 155-164.

Clarkson,A.I.,Lefeure,P. and Titchener-Hooker,N.J., A Study of Process Interaction between Cell Disruption and Cell Debris Clarification Stages in the Recovery of Yeast Intercellular Products. Biotechnol.Prog .9 (1993) : 462-467.

Dubois,M.Gilles,K.A.,Hamilton,J.K.,Robers,P.A. and Smith,F., Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. Analytical Chemistry Vol.28 (1956): 350-356.

European Brewery Convention, Analytica-EBC, 4th edition, 1987

Forman,S.M,DeBernardez,E.R.,Feldberg,R.S. and Swartz,R.W., Crossflow Filtration for Separation of Inclusion Bodies from Soluble Protein in Recombinant *Escherichia coli* Cell Lysate. J.Mem.Sci.48 (1990) : 263-279.

Garetz,M. Using Hops : The Complete Guide to Hops for the Craft Brewer, A Hop Tech Book (1994) :10-14, 126.

Goldberg,E., Handbook of Downstream Process (1997) : 1-19.

Hough,J.S., Malting and Brewing Science. London : Champman and Hall ,(1971) : 327.

Kroner,K.H. and Nissinem,V., Dynamic Filtration of Microbial Suspensions using and Auxillary Rotating Filter. J.Mem.Sci. 36 (1988) : 85-100.

Lowry,O.H.,Rosebrough,N.J.,Farr,A.L. and Randal,R.J., Protein Measurement with the Folin Phenol Reagent. J.Biol.Chem. 193 : 265-275.

Marffy,F.,Kula,M.R., Enzyme Yields from Cells of Brewer's Yeast Disrupted by Treatment in a Horizontal Disintegrator. Biotechnol.Bioeng. 16 (1974) : 623-634.

Murase,T.,Iritani,E.,Chidphong,P.Kano,K.Atsumi,K. and Shirato,M., High Speed Microfiltration usig a Rotating Cylindrical Ceramic Membrane. International Chemical Engineering. 31 (1991) : 370-378.

Niemthanorm,A., Production of Yeast Extract from Spent Brewer's Yeast . M.Sc.Thesis,Mahidol University.1997

Reed,G. and Nagodawithana,T.W., Yeast Derived Products. In : Yeast Technology 2nd.edition.Van Nustrand Reinhold,1991 : 369-412.

Roberts,A.D.,Zhang,Z.,Young,T.W. and Thomas,C.R.,Direct Determination of the Strength of Brewing Yeast Cells using Micromanipulations. Inst.Chem.Eng.Ann.Res.Event, University College London, 1994, 73-75.

Shamlou,P.A., Siddiqi,S.F. and Titchener-Hooker,N.J., A Physical Model of High-Pressure Disruption of Bakers' Yeast Cells.Chem.Eng.Sci.50.No.9 (1995) : 1383-1391.

Siddiqi,S.F.,Titchener-Hooker,N.J. and Shamlou,A., Simulation of Particle Distribution Changes Occurring During High-Pressure Distribution of Bakers' Yeast. Biotechnol.Bioeng. 50 (1996) : 145-150.

Simard,R.E. and Bouksaim,M. Process for Brewer's Yeast Debittering, US 5716653. 1998.

Sugimoto,H.,Synergistic Effect of Ethanol and Sodium Chloride on autolysis of Baker's Yeast for Preparing Food-Grade Yeast Extract. J.Food.Sci. 39 (1974) : 939-942.

Suphantharika,M.and Varavinit,S. and Shobsngob,S., Removal of Bitter Substances from Spent Brewer's Yeast Extract by Solvent Extraction. ASEAN J. Sci. Technol. Develop. . 16 No.2 (1999) : 11-18.

Tanaka,T., Kamimura,R.,Itoh,K. and Nakanishi,K. ,Factors Affecting the Performance of Crossflow Filtration of Yeast Cell Suspension. Biotechnol.Bioeng. 41 (1993) : 617-624.

Tanaka,T. and et.al., Formation and Structural Change of Cake during Crossflow Microfiltration of Microbial Cell Suspension Containing Fine Particles.Biosepeparation Engineering Elsevier Science B.V., 2000 : 29-34.

Vak,B.,Merry,Y.,Pederson,J.U.and Horovitz,O.A.,A Semi-Continuous Process for the Production of Human Interferon-αC from *E.coli* Using Tangential Flow Microfiltration and Immuno-Affinity Chromatography. Biotechnol.Lett. 6 No.10. (1984) : 621-626.

Van Hamet,P.A. and Tiesjema,R.H. Safety Aspects of Closed-System Filtration and Ultrafiltration in Vaccine Production. Swiss Biotech . 5 (1987) : 13-18.

Verduyn,C.,Suksomcheep,A. and Suphantharika,M.,Effect of High Pressure Homogenization and Papain on the Preparation of Autolysed Yeast Extract .World Journal of Microbiology & Biotechnology.15 (1999) :57-63.

West,S.M. ,Method of Removing Bitter Substances from Brewer's Yeast and Brewer's Yeast Autolysates. U.S.Pat.4,097,614.

Whitworth,D.A. Assessment of an Industrial Homogenizer for Protein and Enzyme Solubilization from Spent Brewery Yeast . Compt.Rend.Trav.Lab.Carlsberg. 40 No.2 (1974) : 19-32.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

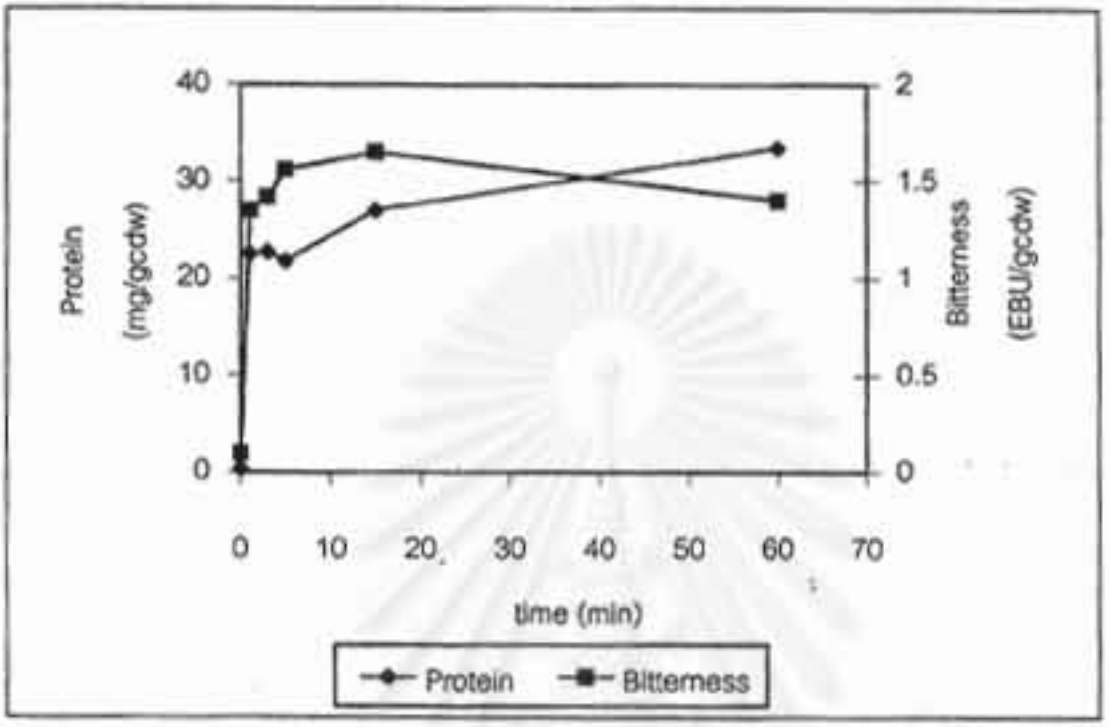
ก. ผลการล้างสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์ด้วยด่าง

การศึกษาในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณความขมที่มีอยู่ในส่วนของผนังเซลล์ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับปริมาณความขมที่มีอยู่ในของเหลว (supernatant) หลังจากแยกผนังเซลล์ออกแล้ว

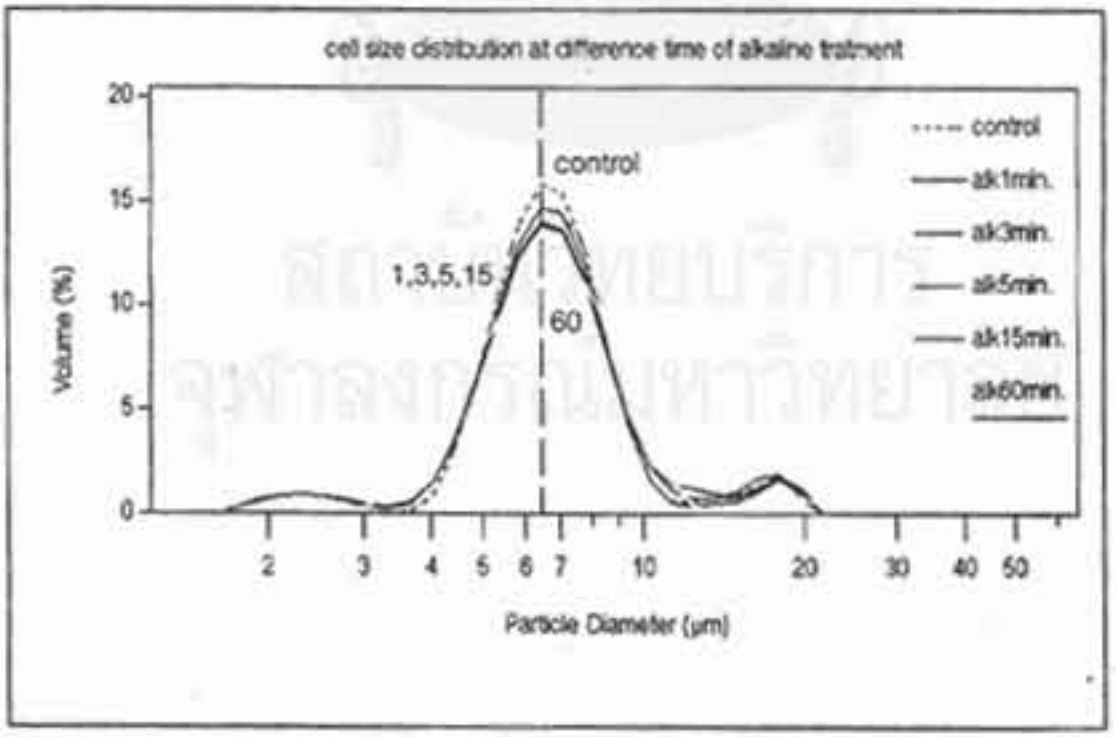
จากรายงานการวิจัยเบื้องต้น (Reed และ Nagodawitthana, 1991 , Ampom,1997 และ Renold, 1998) พบว่าความขมส่วนใหญ่ติดอยู่ที่ผนังเซลล์ของยีสต์และสามารถกำจัดออกได้ดีในภาวะที่เป็นด่าง โดยเมื่อนำครีมยีสต์ 50 เปอร์เซ็นต์(ปริมาตรต่อปริมาตร) มาปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 นอร์มัล ให้ได้พีเอชอยู่ในช่วง 9-10 กวนเป็นเวลา 1,3,5,15 และ 60 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ก.1 พบว่าที่เวลา 1,3,5 และ 15 นาที ตามลำดับ ความขมที่ละลายอยู่ในผนังเซลล์ของสเปนท์บริวเวอร์ยีสต์จะละลายออกมาเพิ่มมากขึ้นตามเวลาในการกวน เนื่องจากสารที่ให้ความขม คือ ไอโซ-แอลฟาแอซิด (IAA) จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไอออนเกิดเป็นเกลือคอมเพล็กซ์ (salt complex)ที่ละลายน้ำ แต่เมื่อทำการกวนนาน 60 นาที พบว่าค่าความขมที่วิเคราะห์ได้ในน้ำด่างมีค่าลดลง เป็นผลเนื่องจากเกลือคอมเพล็กซ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนทำให้พีเอชของระบบมีค่าลดลง จากพีเอช 9.87 เป็นพีเอช 7.49 ดังแสดงในตารางที่ ก.1 จึงทำให้ไอโซ-แอลฟาแอซิดเปลี่ยนรูปจากที่สามารถละลายน้ำได้ไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายน้ำตามเดิม ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Amporn,1997

ตาราง ก.1 แสดงผลของพีเอช ปริมาณโปรตีน และความขม ตามเวลาที่ใช้ในการล้างด่าง

เวลา	พีเอช	พีเอช	ปริมาณโปรตีน		ความขม	
(min)	ก่อนกวน	หลังกวน	mg/ml	mg/gcdw	EBU	mgIAA./gcdw
0	6.05	_	0.07	0.38	19	0.1
1	9.84	9.52	2.36	22.53	142	1.35
3	9.96	9.4	2.39	22.74	164	1.42
5	9.88	9.32	2.29	21.79	149	1.56
15	9.84	8.79	2.84	27.05	173	1.65
60	9.87	7.49	3.51	33.47	147	1.4



รูป ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโปรตีน และความขมที่วิเคราะห์ได้ในน้ำต่ำตามเวลาที่ใช้ในการล้างต่าง



รูปที่ ก.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ตามเวลาที่ใช้ในการล้างต่าง

ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ศึกษาการเกิดการดูดซับโปรตีนของเยื่อแผ่นเซรามิก

1) ผลการกรองโบวีนซีรัมอัลบูมิน

จากการศึกษาผลการกรองโบวีนซีรัมอัลบูวิน (จากบริษัท Sigma Chemical, มีน้ำหนักโมเลกุล (MW.) 69,000 ,ขนาด 11.6x2.7x2.7 นาโนเมตร ,diffusion coefficient $0.7*10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที, isoelectric point 4.7-4.9 (Bowen และ Hughes,1990)) ที่ความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร โดยทำการกรองด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ1000 รอบต่อนาที ความดัน 0.3 บาร์ อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมง รูปที่ ข.1 แสดงค่าเพอมิเอชันฟลักซ์กับเวลาที่ใช้ในการกรองที่ความเร็วรอบ 600 และ 1000 รอบต่อนาที จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเพอมิเอชันฟลักซ์จะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง และเพอมิเอชันฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่นเพิ่มสูงขึ้น

เพอมิเอชันฟลักซ์ของสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาในการกรอง เนื่องจากการเกิดสเกล (fouling) ที่เยื่อแผ่น ปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดสเกล คือ การดูดซับ การกักเก็บพร้อมกับการหลุดออก การกักเก็บโดยไม่มีการหลุดออก และการอุดตันหรือปิดกั้นรูพรุนของตัวถูกละลาย (รัตนา, 2541)

Bowen และ Gan (Bowen และ Gan, 1991) พบว่าการลดลงของเพอมิเอชันฟลักซ์ของสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินสามารถอธิบายได้โดยใช้ Standard Blocking Filtration Law โดยปริมาตรของรูพรุนจะลดลงเนื่องจากการสะสมของโปรตีนที่ผนังรูพรุนของเยื่อแผ่น

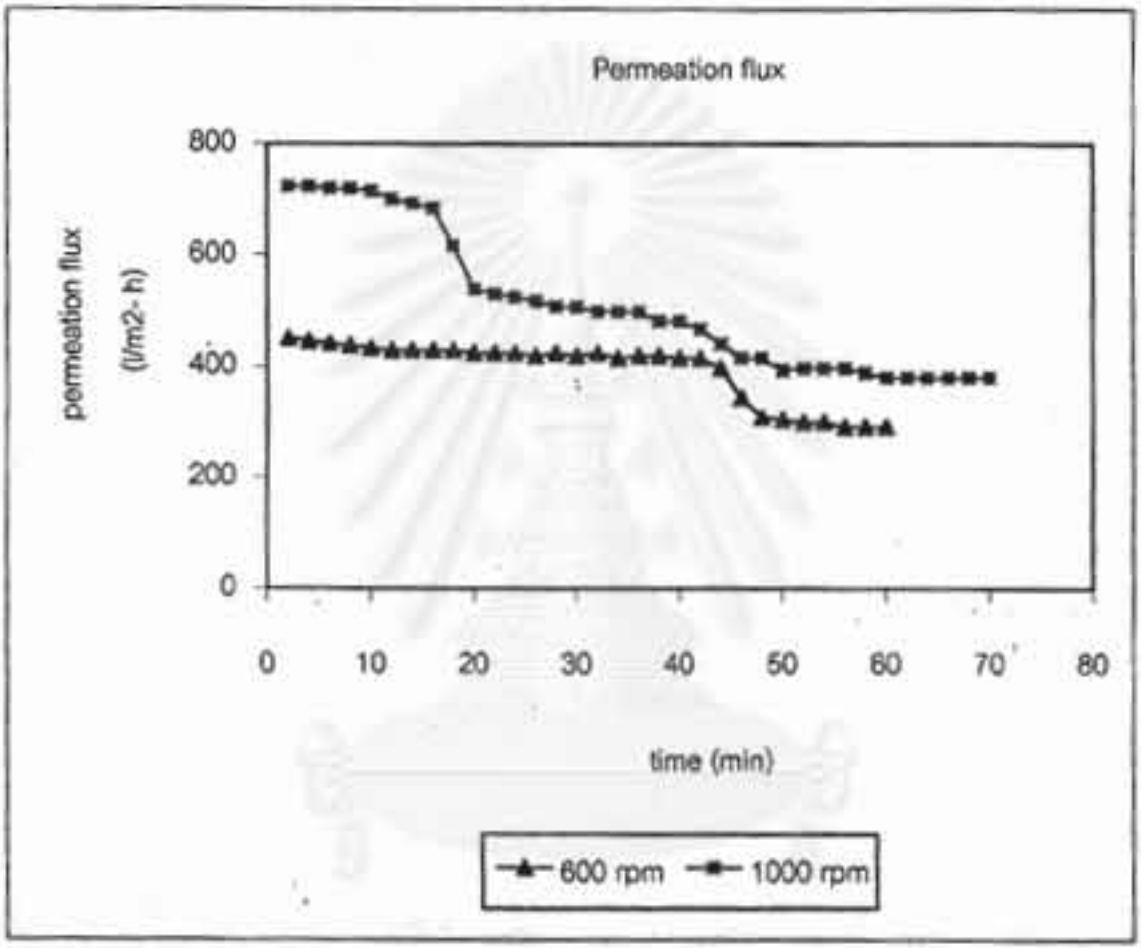
Bowen และคณะ (รัตนา, 2541 อ้างถึง Bowen และคณะ, 1995) ได้ศึกษาระบบไมโครฟิลเตรชันแบบ dead end ของสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินโดยใช้เยื่อแผ่นโพลิคาร์บอเนตที่มีรูพรุนแบบแคปปิลารี พบว่ากลไกการอุดตันรูพรุนไม่น่าจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนชัดเจน แต่สามารถเกิดด้วยหลายกลไกในเวลาเดียวกัน เพราะเยื่อแผ่นมีการกระจายขนาดของรูพรุนต่างๆ กัน Bowen และคณะจึงเสนอว่าการอุดตันอาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กันหรือในระยะที่ใกล้เคียงกัน คือ

1) เกิดการอุดตันรูพรุนที่มีขนาดเล็กก่อน
2) เกิดการสะสมภายในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่
3) อนุภาคขนาดใหญ่เริ่มปกคลุมหรือสะสมทับอนุภาคที่สะสมหรืออุดตันอยู่ก่อน
4) เกิดชั้นเค้กเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่

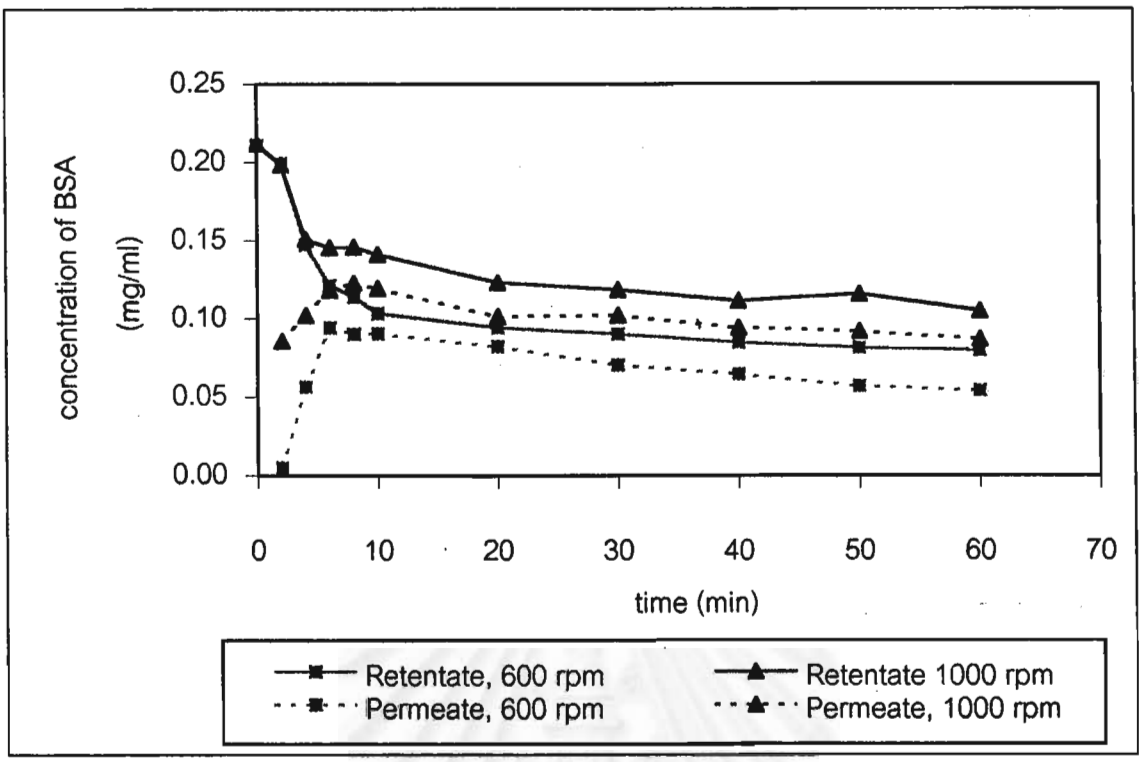
รูปที่ ข.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินตามเวลาที่ใช้ในการกรอง จะเห็นว่าความเข้มข้นสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินในสายเพอร์มิเอทจะมีค่าน้อยในช่วงเวลาแรกๆ ของการกรอง และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าคงที่ ในขณะเดียวกันความเข้มข้นของโบวีนซีรัมอัลบูมินในสายรีเทนเททก็มีค่าลดลง และคงที่ตั้งแต่ในช่วงเวลาแรกๆ ของการกรองเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการดูดซับโปรตีนของเยื่อแผ่น

ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัย ของ Bowen และ Hughes (Bowen และ Hughes, 1990) ที่ได้ศึกษาการดูดซับโบวีนซีรัมอัลบูมินของเยื่อแผ่นอลูมิเนียมออกไซค์ (Aluminium Oxide) โดยพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นในช่วงแรกอย่างรวดเร็ว และอัตราการดูดซับโปรตีนจะขึ้นกับความเข้มข้นของโปรตีน และอัตราการไหลของเพอร์มิเอท (permeation rate) ความเข้มข้นของโปรตีนที่ลดลงจะขึ้นกับการดูดซับ (Adsorption) มากกว่าการกักเก็บที่ผิวเยื่อแผ่น นอกจากนี้ความหนาของเยื่อแผ่นยังมีผลต่อปริมาณการสูญเสีย(loss) โปรตีนเนื่องจากการดูดซับด้วย

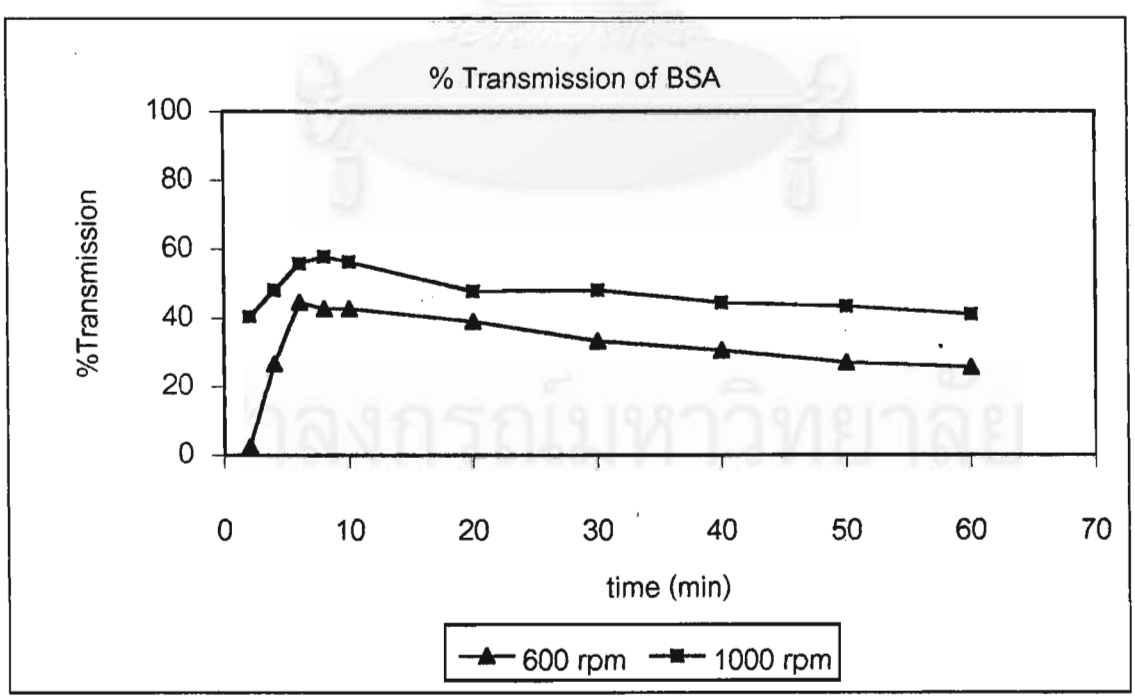
เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโบวีนซีรัมอัลบูมินตามเวลาที่ใช้ในการกรองที่สถานะคงตัว ที่ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที และ 1000 รอบต่อนาที มีค่าเท่ากับ 34.66 และ 48.33 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ของสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมิน กับเวลาในการกรอง ด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ที่ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที



รูปที่ ข.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโบวีนซีรัมอัลบูมินในสายรีเทนเทท และเพอร์มิเอท ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที



รูปที่ ข.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีน (BSA) ที่ได้จากการกรองด้วยเยื่อแผ่นเซรามิก 0.2 ไมโครเมตร ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที

2) ผลการกรองโบวีนซีรัมอัลบูมินด้วยเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ที่มีโปรตีนอุดตันอยู่ภายในรูพรุนเยื่อแผ่นแล้ว (เยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองแล้ว)

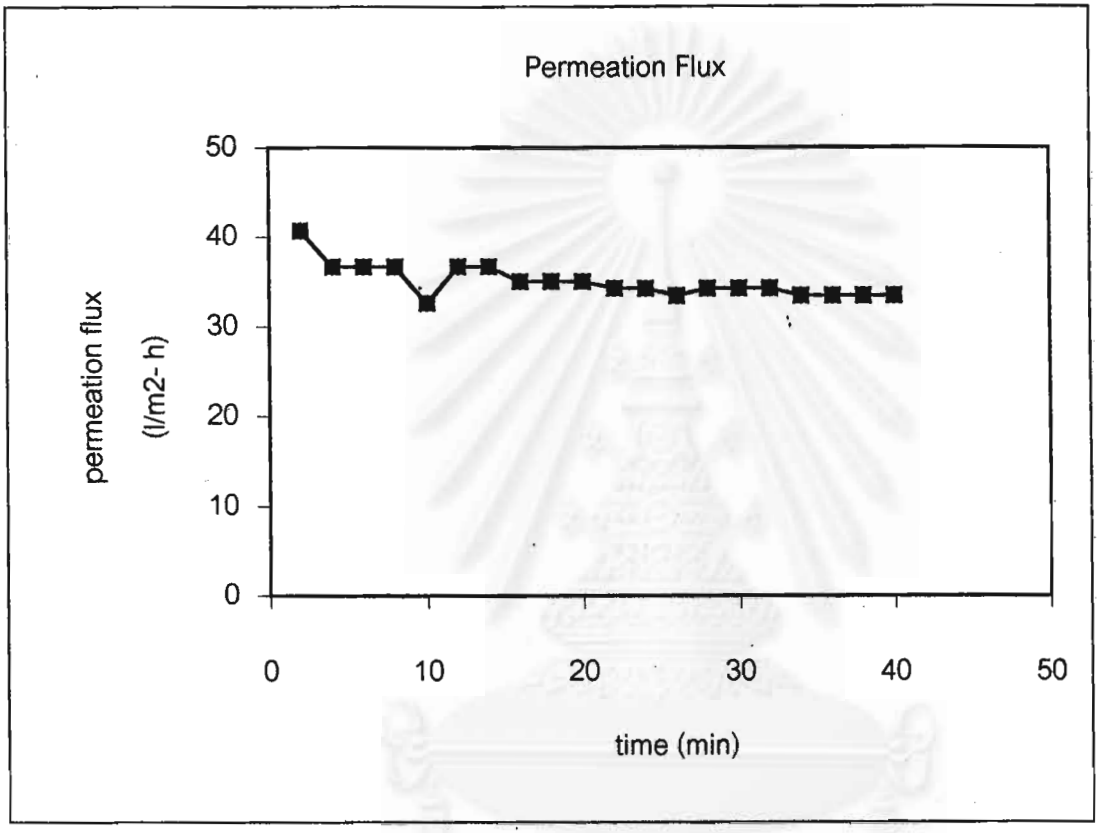
เมื่อทำการกรองโบวีนซีรัมอัลบูมิน 0.2 กรัมต่อลิตร ด้วยเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ซึ่งมีโปรตีนอุดตันอยู่ภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นแล้ว ที่ความดัน 0.3 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที จากรูปที่ ข4 .แสดงค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมินตามเวลาที่ใช้ในการกรอง จะเห็นว่าเพอมิเอชันฟลักซ์จะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ตั้งแต่ในช่วงเวลาแรกๆ ของการกรอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาตรรองรูพรุนมีค่าคงที่ จึงทำให้ปริมาตรของเพอร์มิเอทมีค่าคงที่ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง

รูปที่ ข.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโบวีนซีรัมอัลบูมินตามเวลาที่ใช้ในการกรอง จะเห็นว่าความเข้มข้นโบวีนซีรัมอัลบูมินในสายเพอร์มิเอทยังคงมีค่าน้อยกว่าในสายรีเทนเทท และความเข้มข้นโบวีนซีรัมอัลบูมินในสายเพอร์มิเอทจะมีค่าลดลงตั้งแต่ในช่วงเวลาแรกๆ ของการกรอง และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่เวลาประมาณ 20 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเยื่อแผ่นสามารถดูดซับโปรตีนได้อีก โดยโปรตีนที่ถูกดูดซับภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นชั้นแรก (monolayer) จะถูกดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่แข็งแรง ส่วนโปรตีนที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (sublayer) จะยึดเหนี่ยวกันระหว่างโปรตีนกับโปรตีน ซึ่งจะสามารถหลุดออกจากกันได้ง่ายกว่าโปรตีนที่ถูกยึดเหนี่ยวกับเยื่อแผ่น ดังจะเห็นได้จากการล้างเยื่อแผ่นที่ผ่านการใช้แล้วด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อนำมาผ่านการล้างด้วยน้ำกำจัดอนุภาคจนกระทั่งมีพีเอช 7 ก็ยังมีค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำไม่เท่ากับเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำที่ได้จากเยื่อแผ่นที่ยังไม่ได้ใช้งาน ดังนั้นปัจจัยหลักในการลดลงของเพอมิเอชันฟลักซ์จะขึ้นกับปริมาณการดูดซับของโปรตีนที่ผนังรูพรุนของเยื่อแผ่นชั้นแรกซึ่งจะมีผลต่อปริมาตรรูพรุนของเยื่อแผ่น

จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นได้ว่าการลดลงของเพอมิเอชันฟลักซ์เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสเกลที่เยื่อแผ่น ซึ่งเกิดขึ้นจากการดูดซับของตัวถูกละลาย เช่น โปรตีน ไขมัน บนผิวเยื่อแผ่น และในผนังรูพรุน เนื่องจากแรงกระทำ เช่น พันธะไฮโดรเจน หรือ hydrophobic interaction รวมถึงการอุดตันและหรือการบดบังรูพรุนของอนุภาคในสารละลาย (รัตนา, 2541) และปัจจัยหลักที่ทำให้ความเข้มข้นโปรตีนในสายเพอร์มิเอทมีค่าน้อยเกิดจากจากการดูดซับโปรตีนของเยื่อแผ่น โดยปัจจัย

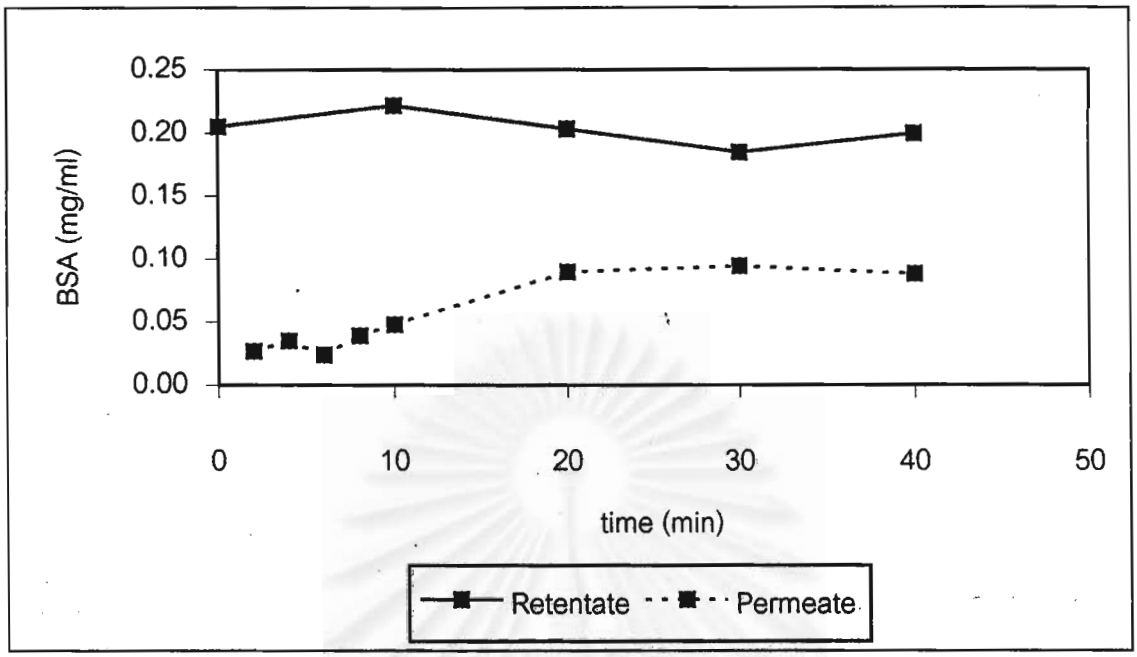
ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับโปรตีน คือ ลักษณะทางเคมีของเยื่อแผ่น (membrane surface chemistry), โครงสร้างของโปรตีน (protein structure), จำนวน (magnitude) และประจุ (charge) ของโปรตีน และผิวเยื่อแผ่น รวมถึงความสามารถในการละลายน้ำของโปรตีน (degree of hydration) (Bowen และ Gan, 1991)

รูปที่ ข.6 แสดงผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโบวีนซีรัมอัลบูมินที่ได้จากการกรองด้วยเยื่อแผ่นที่มี และไม่มีโปรตีนอุดตัน ที่ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนที่ได้จากการกรองด้วยเยื่อแผ่นที่มีโปรตีนอุดตันอยู่แล้วจะมีค่าค่อยเพิ่มขึ้นในช่วง 20 นาที แรก เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโบวีนซีรัมอัลบูมินที่สถานะคงตัวมีค่าประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโมเลกุลโปรตีนที่อุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นสามารถดูดซับโปรตีนได้อีกด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า โดยการดูดซับโปรตีนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ในช่วงเวลาแรกของการกรอง

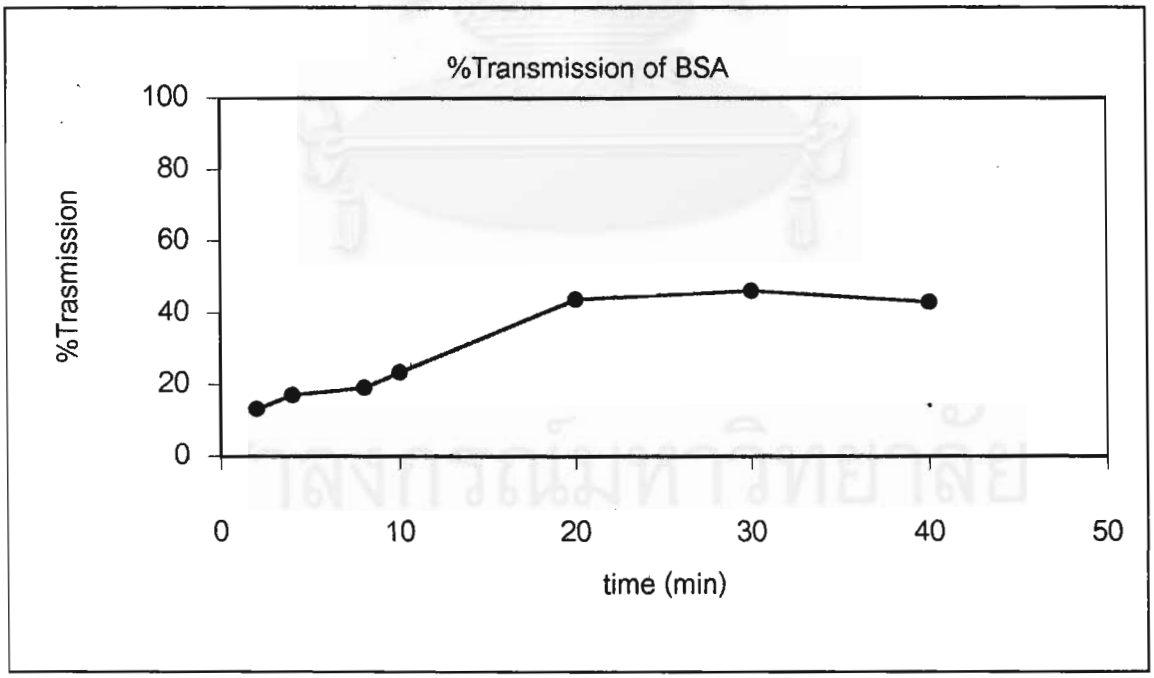


รูปที่ ข.4 แสดงความสัมพันธ์ของเพอมิเอชันฟลักซ์ของสารละลายโบวีนซีรัมอัลบูมิน ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง ที่ได้จากการกรองผ่านเยื่อแผ่นที่มีโปรตีนอุดตันแล้ว ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



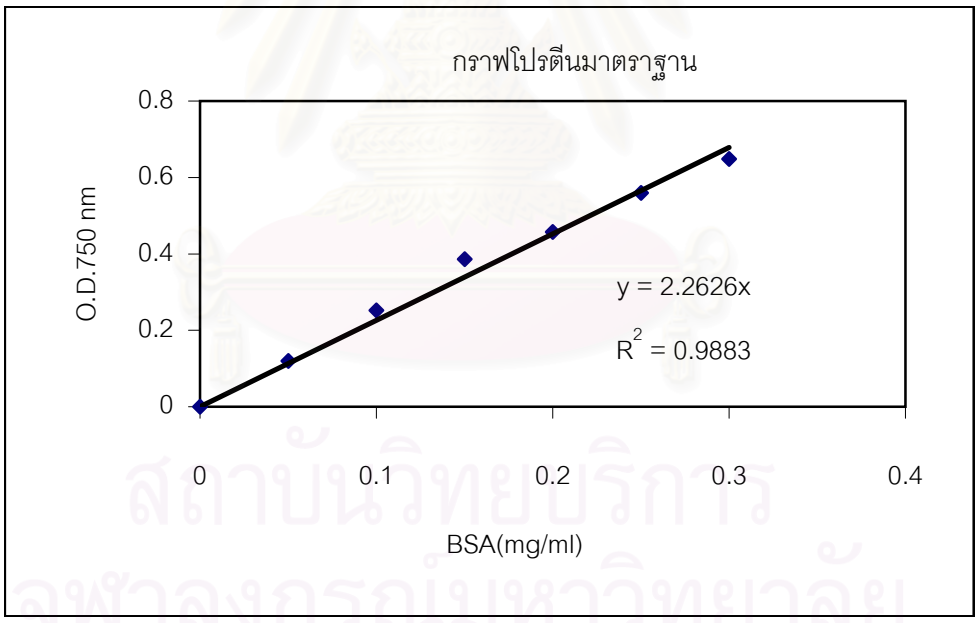
รูปที่ ข.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโบวีนซีรัมอัลบูมินทางสายรีเทนเทท และสายเพอร์มิเอท ตามเวลาที่ใช้ในการกรองในการกรอง ที่ได้จากการกรองผ่านเยื่อแผ่นที่มีโปรตีนอุดตันแล้ว ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที



รูปที่ ข.6 แสดงผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านโปรตีนที่ได้จากการกรองด้วยเยื่อแผ่น 0.2 ไมโครเมตร ที่มีโปรตีนอุดตัน ความเร็วในการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที

ตาราง ข.1 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนมาตราฐาน (โบวีนซีรัมอัลบูมิน) ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

BSA mg/ml	ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	0	0	0
0.05	0.121	0.118	0.120
0.10	0.274	0.230	0.252
0.15	0.406	0.366	0.386
0.20	0.474	0.440	0.457
0.25	0.579	0.540	0.560
0.30	0.657	0.639	0.648



รูปที่ ข.7 แสดงกราฟมาตราฐานโปรตีน (โบวีนซีรัมอัลบูมิน) ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.1 ผลการเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนทที่มี พีเอช 5,6 และ 7.5

ความเข้มข้นยีสต์โฮโมจิเนท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.9	ไมโครเมตร

pH	5		6		7.5	
เวลา (min)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)
2	0.055	58	0.104	109	0.108	113
4	0.026	27	0.070	73	0.075	79
6	0.024	25	0.033	35	0.030	31
8	0.022	23	0.023	24	0.030	31
10	0.021	22	0.020	21	0.030	31
12	0.021	22	0.020	21	0.025	26
14	0.021	22	0.019	20	0.025	26
16	0.020	21	0.018	19	0.025	26
18	0.020	21	0.017	18	0.025	26
20	0.020	21	0.017	18	0.025	26
22	0.020	21	0.016	17	0.025	26
24	0.019	20	0.017	17	0.025	26
26	0.018	19	0.015	16	0.025	26
28	0.018	19	0.015	16	0.025	26
30	0.018	19	0.015	16	0.025	26
32	0.017	18	0.015	16		
34	0.017	18	0.015	16		
36	0.017	18	0.015	15		
38	0.017	18	0.014	15		
40	0.017	18	0.014	15		

ตาราง ค.2 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนในยีสต์โฮโมจิเนท และยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง เมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5,6 และ 7.5

เวลา (min)	พีเอช 5			พีเอช 6			พีเอช 7.51		
	ยีสต์โฮโมจิเนท	ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท		ยีสต์โฮโมจิเนท	ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท		ยีสต์โฮโมจิเนท	ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท	
	โปรตีน(g/ll)	โปรตีน(g/ll)	%Transmission	โปรตีน(g/ll)	โปรตีน(g/ll)	%Transmission	โปรตีน(g/ll)	โปรตีน(g/ll)	%Transmission
0	5.41			5.84			6.07		
2	5.30	0.01	0.18	5.99	0.03	0.54	6.18	0.01	0.19
4	5.24	0.00	0.02	5.61	0.69	11.72	5.62	1.45	23.85
6	5.31	0.00	0.03	5.98	0.71	12.14	5.56	2.07	34.05
8	5.32	0.05	0.94	5.69	0.70	11.99	5.89	1.84	30.37
10	5.37	0.09	1.74	5.83	0.76	13.05	5.93	1.98	32.59
14	5.64	0.19	3.57	5.97	0.68	11.65	5.42	2.08	34.20
20	5.68	0.25	4.71	6.20	0.69	11.72	5.48	1.97	32.45
24	6.18	0.26	4.74	6.12	0.57	9.72	5.68	1.68	27.71
30	5.74	0.27	5.00	6.10	0.57	9.76	6.18	1.49	24.47
34	5.71	0.27	5.02				6.77	1.51	
40	6.29	0.28	5.13				6.36	1.41	
สายป้อนหลังกรอง	6.44			6.45			7.11		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมในยีสต์โฮโมจิเนท และยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท ตามเวลาที่ใช้ในการกรอง เมื่อยีสต์โฮโมจิเนทมีพีเอช 5,6 และ 7.5

เวลา (min)	พีเอช 5			พีเอช 6			พีเอช 7.51		
	ยีสต์โฮโมจิเนท	ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท		ยีสต์โฮโมจิเนท	ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท		ยีสต์โฮโมจิเนท	ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท	
	EBU	EBU	%debittering	EBU	EBU	%debittering	EBU	EBU	%debittering
0	10			19			25		
2	9	2	81.87	22	4	80.53	27	8	69.57
4	10	2	75.65	20	5	74.40	26	8	68.58
6	10	2	74.61	20	5	72.00	26	12	50.79
8	10	3	74.09	21	6	69.87	24	12	51.58
10	9	3	73.06	20	6	66.67	25	12	50.79
14	10	3	70.47	21	6	65.60	24	13	50.59
20	10	4	61.66	20	7	64.80	26	13	50.20
24	10	4	55.96	21	7	64.80	25	12	51.98
30	10	4	57.51	21	7	62.40	25	12	52.37
34	12	4	56.48						
40	10	4	55.96						
สายป้อนหลังกรอง	12			22			26		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.4 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท ที่ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น 600 และ 1000 รอบต่อนาที

ความเข้มข้นยีสต์โฮโมจิเนท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600 และ 1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

ความเร็วรอบ	600 rpm		1000 rpm	
เวลา (min)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)
2	0.040	35	0.050	44
4	0.020	18	0.023	20
6	0.017	15	0.028	25
8	0.017	15	0.024	21
10	0.013	11	0.025	22
12	0.014	12	0.023	20
14	0.014	12	0.024	21
16	0.015	13	0.023	20
18	0.015	13	0.023	20
20	0.014	12	0.022	19
22	0.014	12	0.021	19
24	0.013	11	0.021	19
26	0.013	11	0.021	19
28	0.013	11	0.020	18
30	0.013	11	0.020	18
32	0.013	11	0.020	18
34	0.013	11	0.020	18
36	0.013	11	0.020	18
38	0.013	11	0.020	18
40	0.013	11	0.020	18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.5 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท

ความเข้มข้นยีสต์โฮโมจิเนท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	5.52	5.52	5.52	5.52				
2			6.01	0.12	0.002	0.000	0.05	0.028
4			5.38	0.11	0.003	0.000	0.05	0.048
6			6.12	0.12	0.002	0.000	0.04	0.044
8			5.67	0.11	0.066	0.001	0.99	1.202
10	6.40	0.13	6.36	0.13	0.084	0.001	0.96	1.522
20	6.44	0.13	6.14	0.12	0.440	0.007	5.24	7.973
30	6.18	0.12	5.86	0.12	0.533	0.008	6.11	9.655
40	6.07	0.12	5.98	0.12	0.568	0.009	6.51	10.296
50	5.86	0.12	6.02	0.12	0.539	0.008		9.776
สายป้อนหลังกรอง	6.06	3.34						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(มล.)	1	0.12	0.18	0.135	0.55	0.015
โปรตีน(มก.)	5.52	0.62	1.07	0.03	3.34	0.46

ตาราง ค.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท

ความเข้มข้นยีสต์โฮโมจิเนท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	EBU	mg	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	15	14.85	15	14.85				
2			20	0.393	3	0.047	109.41	79.12
4			19	0.385	6	0.095	111.18	57.58
6			14	0.283	6	0.095	95.25	57.24
8			14	0.288	6	0.095	95.25	57.24
10	15	0.306	15	0.304	6	0.093	71.12	58.25
20	14	0.282	12	0.234	6	0.093	73.85	58.25
30	13	0.263	13	0.258	6	0.095	72.84	57.24
40	13	0.261	11	0.228	6	0.095	72.84	57.24
50	13	0.259	14	0.283	6	0.096		56.90
สายป้อนหลังกรอง	14	7.7						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(l)	1	0.12	0.18	0.135	0.55	0.015
ความขม (mg)	14.85	1.37	2.66	0.80	7.70	2.32

ตาราง ค.7 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท

ความเข้มข้นยีสต์โฮโมจิเนท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	5.01	5.01				
2	5.97	0.12	0.012	0.000	0.54	0.24
4	5.49	0.11	0.280	0.004	5.70	5.60
6	4.57	0.09	0.288	0.004	7.14	5.75
8	5.18	0.10	0.460	0.007	9.76	9.18
10	4.92	0.10	0.461	0.007	10.19	9.20
20	5.04	0.10	0.591	0.009	11.51	11.80
30	5.06	0.10	0.523	0.008	9.25	10.44
40	4.80	0.10	0.672	0.010	11.89	13.42
สายป้อนหลังกรอง	4.92	3.30				

	สายป้อนเริ่มต้น	รีเทนเทท	เพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	1	0.16	0.12	0.67	0.05
โปรตีน (g)	5.01	0.82	0.00	3.30	0.89

ตาราง ค.8 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์โฮโมจิเนท

ความเข้มข้นยีสต์โฮโมจิเนท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	13	13.40				
2	14	0.27	2	0.032	92.92	84.33
4	13	0.26	5	0.068	92.61	66.30
6	11	0.22	5	0.078	128.85	60.61
8	11	0.21	5	0.079	111.50	52.27
10	11	0.21	6	0.083	121.68	48.36
20	11	0.23	5	0.079	102.21	50.47
30	12	0.23	5	0.081	95.58	52.42
40	12	0.23	6	0.091	107.08	47.39
สายป้อนหลังกรอง	14	9.21				

	สายป้อนเริ่มต้น	รีเทนเทท	เพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(l)	1	0.16	0.12	0.67	0.05
ความขม (mg)	13.40	1.87	0.59	9.21	1.73

ตาราง ค.9 แสดงผลการเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท 20 กรัมต่อลิตร

ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น 600 รอบต่อนาที

อัตราการไหล 11,15,35 ลิตรต่อชั่วโมง

ความดัน 0.3 บาร์

เยื่อแผ่นเซรามิก 0.2 ไมโครเมตร

อัตราการไหล (l/h)	11		15		35	
เวลา (นาที)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)
2	0.130	115	0.218	192	0.130	115
4	0.104	92	0.096	85	0.070	62
6	0.100	88	0.088	78	0.050	44
8	0.090	79	0.081	71	0.040	35
10	0.086	76	0.073	64	0.031	27
12	0.063	56	0.067	59	0.030	26
14			0.064	56	0.026	23
16	0.053	47	0.060	53	0.027	24
18			0.059	52	0.025	22
20	0.050	44	0.056	49	0.025	22
22			0.056	49	0.023	20
24			0.054	48	0.022	19
26	0.049	43	0.052	46	0.022	19
28	0.050	44	0.052	46	0.022	19
30	0.040	35	0.050	44	0.021	19
32			0.050	44	0.021	19
34			0.048	42	0.021	19
36	0.046	41	0.047	41	0.021	19
38	0.038	34	0.053	47	0.021	19
40	0.035	31	0.050	44	0.021	19
42	0.037	33	0.048	42	0.020	18
44	0.036	32	0.047	41	0.020	18
46	0.036	32	0.045	40	0.020	18
48	0.036	32	0.047	41	0.020	18
50	0.036	32	0.046	41	0.020	18
52			0.045	40		
54			0.049	43		
56			0.047	41		
58			0.040	35		
60			0.040	35		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.10 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	11	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	5.24	5.242	5.24	5.242				
2			5.50	0.110	3.31	0.050	380	63.15
4			4.51	0.090	3.42	0.051	314	65.30
6			4.80	0.096	3.30	0.050	292	63.03
8			4.95	0.099	3.79	0.057	301	72.26
10	4.42	0.088	4.82	0.096	3.52	0.053	267	67.20
20	4.61	0.092	4.83	0.097	3.75	0.056	166	71.59
30	4.65	0.093	4.66	0.093	3.70	0.056	131	70.66
40	4.77	0.095	4.75	0.095	3.70	0.055	114	70.57
สายป้อนหลังกรอง	4.77	2.482						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	1	0.08	0.16	0.12	0.52	0.12
โปรตีน (g)	5.24	0.37	0.78	0.43	2.48	1.19

ตาราง ค.11 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	11	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	EBU	mg	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	28	28.15	28	28.15				
2			28	0.57	4	0.053	407	87.4
4			30	0.61	5	0.069	422	83.7
6			27	0.54	4	0.065	384	84.5
8			27	0.54	4	0.065	345	84.5
10	27	0.54	27	0.54	4	0.065	330	84.5
20	24	0.48	27	0.54	4	0.061	179	85.6
30	25	0.51	27	0.53	4	0.063	148	85.1
40	28	0.55	28	0.56	4	0.062	127	85.4
สายป้อนหลังกรอง	20	10.40						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	สายรีเทนเทท	สายเพอมิเอท	สายป้อนสุดท้าย	loss
ปริมาตร(l)	1	0.08	0.16	0.12	0.52	0.12
ความขม(mg)	28.15	12.47	4.41	0.50	10.40	0.36

ตาราง ค.12 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	15	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	5.26	5.255	5.26	5.26				
2			5.00	0.10	1.95	0.029	374.49	37.05
4			4.54	0.09	3.35	0.050	283.96	63.79
6			4.59	0.09	3.06	0.046	237.48	58.20
8			4.66	0.09	3.29	0.049	235.33	62.66
10	4.69	0.094	4.91	0.098	2.98	0.045	191.87	56.69
20	4.42	0.088	4.68	0.094	3.33	0.050	164.44	63.33
30	4.49	0.090	4.73	0.095	3.47	0.052	152.87	65.94
40	4.70	0.094	4.40	0.088	3.61	0.054	159.11	68.63
สายป้อนหลังกรอง	4.51	2.705						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	1	0.08	0.16	0.12	0.6	0.04
โปรตีน (g)	5.26	0.37	0.75	0.38	2.70	1.06

ตาราง ค.13 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	15	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	E.B.U.	มก.	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	27.70	27.70	27.70	27.70				
2			26.05	0.521	3.85	0.058	740.56	86.10
4			26.20	0.524	3.70	0.056	313.41	86.64
6			26.15	0.523	3.75	0.056	291.18	86.46
8			27.75	0.555	4.05	0.061	289.46	85.38
10	27.70	0.554	26.85	0.537	4.40	0.066	283.41	84.12
20	27.80	0.556	26.35	0.527	4.20	0.063	207.53	84.84
30	28.20	0.564	26.35	0.527	3.45	0.052	152.21	87.55
40	28.25	0.565	26.85	0.537	3.50	0.053	154.41	87.36
สายป้อนหลังกรอง	21.55	12.93						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(l)	1	0.08	0.16	0.12	0.60	0.04
ความขม (mg)	27.70	2.24	4.25	0.46	12.93	7.82

ตาราง ค.14 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	4.96	4.959	4.96	4.959				
2			5.31	0.106	0.04	0.001	4.74	0.83
4			5.01	0.100	0.94	0.014	58.01	18.94
6			4.86	0.097	1.81	0.027	80.04	36.59
8			4.85	0.097	2.42	0.036	85.40	48.80
10	5.24	0.105	4.69	0.094	2.64	0.040	72.29	53.30
20	4.78	0.096	4.74	0.095	2.98	0.045	65.71	60.07
30	4.56	0.091	4.84	0.097	3.00	0.045	55.61	60.52
40	4.63	0.093	4.82	0.096	3.15	0.047	58.31	63.46
50	4.63	0.093	4.80	0.096	3.22	0.048	56.90	65.02
สายป้อนหลังกรอง	4.64	2.64						

	สารป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	1	0.1	0.18	0.135	0.57	0.015
โปรตีน (g)	4.96	0.48	0.88	0.30	2.64	0.66

ตาราง ค.15 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	E.B.U.	มก.	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	23	22.60	23	22.60				
2			20	0.408	1	0.019	143	94.47
4			20	0.406	2	0.024	99	92.92
6			20	0.406	2	0.028	82	91.81
8			21	0.414	3	0.040	94	88.27
10	24	0.487	21	0.414	3	0.042	77	87.61
20	22	0.445	21	0.413	3	0.047	68	86.28
30	23	0.469	21	0.415	3	0.048	59	85.84
40	22	0.449	21	0.416	3	0.044	55	86.95
50	24	0.489	21	0.410	3	0.047	56	86.06
สายป้อนหลังกรอง	24	13.59						

	สารป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	1	0.1	0.18	0.135	0.57	0.015
ความขม (mg)	22.60	2.34	3.70	0.34	13.59	2.63

ตาราง ค.16 แสดงผลการเปรียบเทียบเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท 20 กรัมต่อลิตร

ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น 1000 รอบต่อนาที

ความดัน 0.3 บาร์

อัตราการไหล 11,15,35 ลิตรต่อชั่วโมง

เยื่อแผ่นเซรามิก 0.2 ไมโครเมตร

อัตราการไหล (l/h)	11		15		35	
เวลา (min)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)
2	0.378	334	0.420	371	0.404	356
4	0.373	329	0.192	169	0.138	122
6	0.264	233	0.176	155	0.136	120
8	0.192	169	0.162	143	0.130	115
10	0.192	169	0.144	127	0.100	88
12	0.194	171	0.132	116	0.100	88
14	0.185	163	0.127	112	0.074	65
16	0.177	156	0.122	108	0.070	62
18	0.146	129	0.117	103	0.066	58
20	0.143	126	0.116	102	0.065	57
22	0.144	127	0.112	98	0.062	55
24	0.136	120	0.100	88	0.060	53
26	0.139	123	0.072	64	0.059	52
28	0.139	123	0.053	47	0.056	49
30	0.134	118	0.053	47	0.056	49
32	0.133	117	0.051	45	0.056	49
34	0.134	118	0.058	51	0.056	49
36	0.108	95	0.056	49	0.050	44
38	0.113	100	0.052	46	0.040	35
40	0.11	97	0.051	45	0.038	34
42	0.111	98	0.050	44	0.036	32
44	0.108	95	0.045	40	0.033	29
46	0.108	95	0.043	38	0.033	29
48	0.108	95	0.042	37	0.033	29
50	0.108	95	0.044	39	0.033	29
52	0.104	92	0.044	39		
54	0.104	92	0.044	39		
56	0.104	92	0.043	38		
58	0.104	92	0.043	38		
60	0.104	92	0.043	38		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.17 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	11	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	5.76	11.53	5.76	11.53				
2	4.99	0.075			3.52	0.053	1175	61.12
4	4.77	0.072			4.24	0.064	1396	73.62
6	4.74	0.071			3.99	0.060	930	69.25
8	4.79	0.072			4.13	0.062	699	71.63
10	5.18	0.078	5.72	0.086	4.10	0.062	695	71.17
20	5.07	0.076	5.44	0.082	4.07	0.061	513	70.55
30	5.14	0.077	5.75	0.086	4.11	0.062	485	71.24
40	5.01	0.075	5.73	0.086	4.22	0.063	410	73.24
สายป้อนหลังกรอง	5.21	8.75						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	2	0.135	0.06	0.12	1.68	0.005
โปรตีน (g)	11.53	0.31	0.34	0.49	8.75	1.65

ตาราง ค.18 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	11	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	EBU	mg	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	22	44.80	22	22.40				
2	22	0.32			3	0.041	917	87.72
4	21	0.32			7	0.104	2287	68.97
6	22	0.33			7	0.107	1666	68.08
8	23	0.35			7	0.107	1203	68.30
10	23	0.34	31	0.47	7	0.106	1194	68.53
20	23	0.34	30	0.45	7	0.107	902	68.08
30	24	0.36	31	0.47	7	0.107	845	68.08
40	23	0.34	32	0.47	7	0.108	699	67.86
สายป้อนหลังกรอง	23	37.88						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(l)	2	0.135	0.06	0.12	1.68	0.005
ความขม (mg)	44.8	2.69	1.86	0.7875	38	1.575

ตาราง ค.19 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	15	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(min)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	mg/m2-h	%Transmission
0	5.42	10.85	5.42	10.85				
2	5.01	0.075			3.99	0.060	1477	73.51
4	4.86	0.073			4.01	0.060	680	74.00
6	5.33	0.080			4.09	0.061	635	75.39
8	5.15	0.077			4.19	0.063	600	77.34
10	5.22	0.078	5.69	0.085	4.29	0.064	545	79.05
20	5.41	0.081	5.45	0.082	4.29	0.064	439	79.14
30	5.19	0.078	5.53	0.083	4.23	0.064	198	78.08
40	5.31	0.080	5.17	0.077	4.33	0.065	195	79.79
สายป้อนหลังกรอง	5.41	9.088						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	รีเทนเทท	เพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	2	0.135	0.06	0.12	1.68	0.005
โปรตีน (g)	10.85	0.32	0.33	0.50	9.09	0.61

ตาราง ค.20 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	15	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	EBU	mg	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	26	51.90	26	51.90				
2	23	0.45			7	0.102	2520.0	73.796
4	27	0.54			8	0.124	1397.6	68.21
6	27	0.55			8	0.123	1273.4	68.40
8	23	0.46			8	0.118	1122.1	69.75
10	29	0.58	32	0.646	9	0.128	1080.0	67.24
20	29	0.57	31	0.617	9	0.128	870.0	67.24
30	27	0.54	29	0.583	8	0.122	381.1	68.59
40	27	0.54	26	0.528	9	0.128	382.5	67.24
สายป้อนหลังกรอง	19	32.34						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	สายรีเทนเทท	สายเพอมิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(l)	2	0.135	0.06	0.12	1.68	0.005
ความขม (mg)	51.90	4.23	14.24	0.97	32.34	0.11

ตาราง ค.21 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	4.39	4.389	4.39	4.389				
2			4.20	0.084	0.96	0.014	343.46	21.95
4			4.77	0.095	2.93	0.044	357.34	66.87
6								
8			4.34	0.087	3.00	0.045	344.23	68.38
10	4.15	0.083	4.57	0.091	2.99	0.045	263.82	68.13
20	4.28	0.086	4.72	0.094	3.12	0.047	178.71	71.00
30	4.05	0.081	4.80	0.096	3.00	0.045	148.06	68.28
40	4.15	0.083	4.85	0.097	3.00	0.045	100.55	68.33
50	3.86	0.077	4.27	0.085	2.70	0.040	78.18	61.43
สายป้อนหลังกรอง	4.90	1.961						

	สารป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	สายรีเทนเทท	สายเพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(l)	1	0.10	0.16	0.12	0.40	0.22
โปรตีน (g)	4.39	0.41	0.73	0.02	1.96	1.27

ตาราง ค.22 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสท

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	1000	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	EBU	mg	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	22.95	22.95	22.95	22.95				
2			24.50	0.49	1.65	0.02	588.18	92.81
4			23.35	0.47	3.20	0.05	389.65	86.06
6								
8			25.10	0.50	3.75	0.06	430.15	83.66
10	19.90	0.40	27.40	0.55	3.65	0.05	322.06	84.10
20	19.85	0.40	23.15	0.46	3.30	0.05	189.26	85.62
30	21.45	0.43	25.90	0.52	3.75	0.06	185.29	83.66
40	22.70	0.45	23.45	0.47	3.80	0.06	127.41	83.44
50	23.70	0.47	22.75	0.46	3.50	0.05	101.50	84.75
สายป้อนหลังกรอง	20.75	8.30						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	สายรีเทนเทท	สายเพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	1	0.10	0.16	0.12	0.40	0.22
ความขม (mg)	22.95	2.15	3.91	0.40	8.30	10.34

ตาราง ค.23 แสดงเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทที่ไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	15	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

อัตราไหล	15 l/h				
เวลา (min)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)	เวลา (min)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)
2	500	441	42	206	182
4	450	397	44	206	182
6	420	371	46	196	173
8	400	353	48	190	168
10	370	326	50	186	164
12	326	288	52	170	150
14	340	300	54	160	141
16	322	284	56	156	138
18	316	279	58	152	134
20	312	275	60	142	125
22	296	261	62	140	124
24	268	236	64	134	118
26	266	235	66	130	115
28	260	229	68	124	109
30	258	228	70	118	104
32	252	222	72	110	97
34	248	219	74	104	92
36	238	210	76	104	92
38	214	189	78	100	88
40	210	185	80	96	85

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.24 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทที่ไม่ผ่านโซโนจิไนเซอร์

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	15	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา (นาที)	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต g/m2-h	%Transmission
	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g	โปรตีน(g/l)	g		
0	5.73	5.728	5.73	5.73				
2					2.59	0.039	1144.57	45
4					3.51	0.053	1393.37	61
6					3.29	0.049	1217.77	57
8					3.40	0.051	1201.12	59
10	4.91	0.098	5.81	0.116	3.81	0.057	1243.78	67
20	4.36	0.087	5.64	0.113	3.73	0.056	1028.12	65
30	4.68	0.094	5.36	0.107	3.91	0.059	890.43	68
40	4.71	0.094	5.22	0.104	3.87	0.058	716.58	68
สายป้อนหลังกรอง	4.84	3.052						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	สายรีเทนเทท	สายเพอร์มิเอท	สายป้อนสุดท้าย	loss
ปริมาตร (l)	1	0.08	0.08	0.12	0.63	0.09
โปรตีน (g)	5.73	0.37	0.44	0.42	3.05	1.44

ตาราง ค.25 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมที่ได้จากการกรองยีสต์ออโตไลเสทที่ไม่ผ่านโฮโมจิไนเซอร์

ความเข้มข้นยีสต์ออโตไลเสท	20	กรัมต่อลิตร
ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	15	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายป้อน		สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	EBU	mg	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	8	8.05	8	8.1				
2					3	0.050	1478	
4					2	0.036	953	
6					4	0.059	1445	
8					4	0.059	1394	
10	9	0.19	12	0.2	3	0.041	881	66.5
20	10	0.20	13	0.3	5	0.071	1308	41.0
30	10	0.21	12	0.2	2	0.034	512	72.0
40	12	0.24	12	0.2	2	0.034	417	72.0
สายป้อนหลังกรอง	8	4.85						

	สายป้อนเริ่มต้น	สายป้อน	สายรีเทนเทท	สายเพอร์มิเอท	สายป้อนสุดท้าย	loss
ปริมาตร(l)	1	0.08	0.08	0.12	0.63	0.09
ความขม (mg)	8.05	0.83	0.99	0.38	4.85	1.00

ตาราง ค.26 แสดงเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จากการกรองยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท

ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา (min)	ปริมาตร (l)	เพอมิเอชันฟลักซ์ (l/m2-h)
2	0.15	122
4	0.134	109
6	0.078	64
8	0.062	51
10	0.054	44
12	0.048	39
14	0.045	37
16	0.043	35
18	0.042	34
20	0.041	33
22	0.04	33
24	0.038	31
26	0.038	31
28	0.038	31
30	0.038	31
32	0.038	31
34	0.037	30
36	0.037	30
38	0.037	30
40	0.038	31
42	0.037	30
44	0.037	30
46	0.038	31
48	0.037	30
50	0.037	30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.27 แสดงผลการวิเคราะห์โปรตีนในสายรีเทนเทท และสายเพอร์มิเอทที่ได้จากการกรอง

ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท

ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.9	ไมโครเมตร

เวลา	สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	โปรตีน (g/l)	g	โปรตีน (g/l)	g	g/m2-h	%Transmission
0	2.09	2.09				
2	1.69	0.03	0.46	0.01	55.67	21.78
4	1.62	0.02	1.28	0.02	139.77	61.21
6	1.54	0.02	1.28	0.02	81.36	61.21
8	1.52	0.02	1.18	0.02	59.87	56.66
10	1.54	0.02	1.15	0.02	50.78	55.18
20	1.54	0.02	1.04	0.02	34.79	49.79
30	1.50	0.02	1.05	0.02	32.52	50.21
40	1.50	0.02	1.06	0.02	32.72	50.53
50	1.54	0.02	1.09	0.02	32.99	52.33
สายป้อนหลังกรอง	1.53	1.04				

	สารป้อนเริ่มต้น	สายรีเทนเทท	สายเพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร (l)	1	0.18	0.135	0.68	0.005
โปรตีน (g)	2.09	0.21	0.14	1.04	0.70

ตาราง ค.28 แสดงผลการวิเคราะห์ความขมในสายรีเทนเทท และสายเพอร์มิเอทที่ได้จากการกรอง

ยีสต์โปรตีนคอนเซนเทรท

ความเร็วการหมุนเยื่อแผ่น	600	รอบต่อนาที
อัตราการไหล	35	ลิตรต่อชั่วโมง
ความดัน	0.3	บาร์
เยื่อแผ่นเซรามิก	0.2	ไมโครเมตร

เวลา	สายรีเทนเทท		สายเพอร์มิเอท		อัตราการผลิต	
(นาที)	EBU	mg	EBU	mg	mg/m2-h	%Debittering
0	7	7.30				
2	7	0.10	3	0.049	397.42	55.48
4	6	0.09	4	0.053	382.34	52.05
6	5	0.08	4	0.053	222.55	52.05
8	5	0.08	4	0.056	189.54	48.63
10	5	0.07	4	0.058	169.48	47.26
20	5	0.08	4	0.056	125.34	48.63
30	5	0.07	4	0.056	114.62	49.32
40	5	0.07	4	0.056	116.17	48.63
50	5	0.07	4	0.055	110.10	50.00
สายป้อนหลังกรอง	4	2.92				

	สายป้อนเริ่มต้น	สายรีเทนเทท	สายเพอร์มิเอท	สายป้อนหลังกรอง	loss
ปริมาตร(l)	1	0.18	0.135	0.68	0.005
ความขม (mg)	7.30	0.72	0.49	2.92	3.17

ประวัติผู้แต่ง

นางสาว ปราณี กิตติอนงค์ เกิดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ.2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย