

การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันในการแยกสารไอโซพลาโวนจากสารสกัดจากกากถั่วเหลือง



นางสาวสิรินุช ก้องเสียง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1672-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF NANOFILTRATION FOR THE SEPERATION OF ISOFLAVONE COMPOUNDS  
FROM EXTRACT OF SOYBEAN FLAKE

Miss Sirinuch Kongseing



สถาบันวิทยบริการ  
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 2002

ISBN 974-17-1672-9



สิรินุช ก้องเสียง : การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันในการแยกสารไอโซฟลาโวน จากสารสกัดจากกากถั่วเหลือง ( Application of Nanofiltration for the Separation of Isoflavone Compounds from Extract of Soybean Flake ) อ.ที่ปรึกษา : ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ , 150หน้า ISBN 974-17-1672-9

ถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองเป็นแหล่งสำคัญของสารที่เป็นประโยชน์หลายชนิดรวมทั้งไอโซฟลาโวน (ไดดีซินและเจนิสติน) ฮอริโมนพืชที่มีโครงสร้างของโมเลกุลคล้ายกับฮอริโมนเอสโตรเจน ทำให้มีความสามารถในการจับกับเอสโตรเจนรีเซพเตอร์แต่มีความแรงของกิจกรรมน้อยกว่าเอสโตรเจน ปัจจุบันไอโซฟลาโวนได้รับความสนใจทางการแพทย์และใช้เป็นส่วนผสมในอาหารเสริมสุขภาพเนื่องจากมีรายงานถึงความเกี่ยวข้องของไอโซฟลาโวนในการลดและป้องกันโรคของมนุษย์หลายชนิดรวมทั้งโรคมะเร็งหลายอย่าง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและกระบวนการนาโนฟิลเตรชันในการแยกไอโซฟลาโวนจากสารสกัดของกากถั่วเหลืองและทำให้เข้มข้น สารปนเปื้อนขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า 100,000 จะถูกกรองออกก่อนโดยใช้แท่งกรองไมโครฟิลเตรชันที่เป็นแท่งเซรามิกขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกรอง คือ ที่ความดันเท่ากับ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที โดยมีค่าการกักกันของโปรตีนไดดีซินและเจนิสตินของเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันเท่ากับ 0.49, 0.38 และ 0.65 ตามลำดับ ส่วนเพอมีเอทที่ได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยแผ่นเยื่อชนิด NF 7450 (MWCO~600-800) เพื่อให้เข้มข้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการกรองโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันคือที่ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน  $1.51 \times 10^{-2}$  เมตรต่อวินาที ค่าการกักกันไดดีซิน เจนิสตินและแคลเซียมเท่ากับ 0.98, 0.99 และ 0.91 ตามลำดับโดยส่วนคอนเซนเทรทที่ได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันประกอบด้วยไดดีซินและเจนิสติน 0.57 และ 0.49 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ มีปริมาณ โปรตีน ราฟิโนส สเตาซิโอส ฟรักโทส 10.45, 18.34, 19.48 และ 7.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรและเกลือแร่ แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม 11.7, 23.7, 6.8 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา..... 2545.....

# # 4270593621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ISOFLAVONE/ DAIDZIN/ GENISTIN/ NANOFILTRATION/ MEMBRANE

SIRINUCH KONGSEING: APPLICATION OF NANOFILTRATION FOR THE  
SEPERATION OF ISOFLAVONE COMPOUNDS FROM EXTRACT OF SOYBEAN  
FLAKE. THESIS ADVISOR: DR.MUENDUEN PHISALAPHONG. 150 pp.  
ISBN 974-17-1672-9.

Soybean and its processed products are a particularly source of useful components including phytohormone, isoflavones (daidzin and genistin). Isoflavones are structurally similar to estrogen, therefore they can bind with estrogen receptor but possess weak estrogen activity. Presently, interest in isoflavones for medical uses and as nutrition supplements increases according to the reports of their association with prevention and reduction of human diseases including various cancers.

In this research study, microfiltration and nanofiltration were applied for the separation and concentration of isoflavones from soybean flake extract. By using ceramic microfiltration membrane with 0.2  $\mu\text{m}$  pore diameter, impurities with molecular weight (MWCO) more than 100,000 was prefiltered. The optimum condition was at pressure of 0.34 MPa and velocity of  $1.22 \times 10^{-3}$  m/s . The retention of protein, daidzin and genistin are 0.49, 0.38 and 0.65 respectively. The permeate was then concentrated by nanafiltration membrane (NF 7450; MWCO~600-800). The optimum condition was at pressure of 2.6 MPa and velocity of  $1.51 \times 10^{-2}$  m/s . The retention of daidzin, genistin and calcium are 0.98, 0.99 and 0.91 respectively. The concentrate from nanofiltration consisted of 0.57 mg/ml daidzin, 0.49 mg/ml genistin, 10.45 mg/ml protein, 18.34 mg/ml raffinose, 19.48 mg/ml stachyose, 7.05 mg/ml fructose, 11.7 mg/ml calcium, 23.7 mg/ml potassium ,6.8 mg/ml magnesium and 0.13 mg/ml sodium.

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา..... 2545.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำวิธีการทำงานวิจัยตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ที่เป็นประธานการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์ ดร. ชฎา พิศาลพงศ์ ที่เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอบคุณองค์การเภสัชฯ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทดลองวิจัย

ขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทดลองวิจัย

ขอบคุณบริษัทไทยแอลกอฮอล์จำกัดที่ได้สนับสนุนวัสดุดิบในการวิจัย

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้องๆ ในห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ที่การช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้โอกาสทางการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและขอบคุณทุกคนในครอบครัว เพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจตลอดมาจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                      | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ    |
| สารบัญ.....  | ช    |
| สารบัญตาราง.....   | ญ    |
| สารบัญรูป.....   | ฎ    |
| สัญลักษณ์.....   | ณ    |
| บทที่  |      |
| 1. บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                      | 1    |
| 1.2 มุมเหตุจูงใจ.....  | 1    |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                             | 2    |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....                                   | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....                   | 2    |
| 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....                            | 2    |
| 2. ทฤษฎี.....  | 4    |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไอโซพลาโวน.....                  | 4    |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น..... | 6    |
| 3. ทฤษฎี.....  | 13   |
| 3.1 ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ของถั่วเหลือง.....                   | 13   |
| 3.2 ข้อมูลวิทยาศาสตร์ของไอโซพลาโวน.....                      | 15   |
| 3.3 กระบวนการแยกสารโดยใช้เยื่อแผ่น.....                      | 21   |
| 4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....                         | 37   |
| 4.1 สารเคมี.....   | 37   |
| 4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....                      | 37   |
| 4.3 วิธีการทดลอง.....  | 43   |

สารบัญ (ต่อ )

หน้า

|   |    |
|---|----|
| 5. ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....   | 50 |
| 5.1 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดถั่วเหลือง.....  | 50 |
| 5.2 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน.....  | 53 |
| 5.2.1 ค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น.....   | 53 |
| 5.2.2 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์.....  | 55 |
| 5.2.3 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกัน<br>ของไดด์ซีนและเจนิสติน.....   | 57 |
| 5.2.4 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อความขุ่นในคอนเซนเทรท<br>สายป้อนและเพอมีเอท.....  | 59 |
| 5.2.5 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อความเข้มข้น<br>และค่าการกักกันของโปรตีน.....   | 62 |
| 5.2.6 ผลของค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ ในการทดลองแบบกะ.....   | 65 |
| 5.2.7 ผลของความเข้มข้นไดด์ซีน เจนิสตินของสายป้อน คอนเซนเทรท<br>เพอมีเอทและค่าการกักกันที่เวลาต่างๆ ในการทดลองแบบกะ<br>ที่ความเร็วของสายป้อนและความดันคงที่..... | 66 |
| 5.2.8 ผลของความเข้มข้นโปรตีนและความขุ่นของสายป้อนที่เวลาต่างๆ<br>ต่อค่าการกักกัน.....   | 69 |
| 5.2.9 การเปรียบเทียบผลการทดลองของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน<br>กับแบบจำลองต่างๆ.....   | 71 |
| 5.3 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....   | 74 |
| 5.3.1 ลักษณะของเพอมีเอทและคอนเซนเทรทจากกระบวนการ<br>ไมโครฟิลเตรชัน.....   | 74 |
| 5.3.2 ค่าฟลักซ์น้ำกลั่น.....  | 75 |
| 5.3.3 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์.....  | 76 |
| 5.3.4 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อ<br>ค่าการกักกันไดด์ซีน เจนิสติน.....   | 78 |



## สารบัญ (ต่อ)

|  |     |
|--|-----|
| 5.3.5 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อปริมาณแคลเซียม<br>และค่าการนำไฟฟ้า.....  | 80  |
| 5.3.6 ผลของค่าเพอมีเอทพลักซ์ที่เวลาต่างๆในการทดลองแบบกะ.....   | 84  |
| 5.3.7 ผลของความเข้มข้นไดคัลซิน เจนีสตินของสายป้อน คอนเซนเทรท<br>เพอมีเอทและค่าการกักกันที่เวลาต่างๆ ในการทดลองแบบกะ<br>ที่ความเร็วของสายป้อนและความดันคงที่..... | 86  |
| 5.3.8 ค่าการนำไฟฟ้าของสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท<br>ที่เวลาต่างๆ ในการทดลองแบบกะที่ความเร็วของสายป้อน<br>และความดันคงที่.....                                 | 89  |
| 5.3.9 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองต่างๆ ของ<br>กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....  | 94  |
| สรุปผลการทดลอง.....  | 98  |
| ข้อเสนอแนะ.....  | 99  |
| รายการอ้างอิง.....   | 100 |
| ภาคผนวก  |     |
| ภาคผนวก ก . เส้นกราฟมาตรฐาน.....   | 105 |
| ภาคผนวก ข . ข้อมูลการทดลอง.....  | 113 |
| ภาคผนวก ค . ตัวอย่างโครมาโทแกรม.....   | 146 |
| ภาคผนวก ง . ปริมาณสารต่างๆที่มีอยู่ในสารสกัด.....  | 148 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....  | 150 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |   | หน้า |
|----------|---|------|
| 3.1      | แสดงปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นในกากถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออกแล้ว.....                | 14   |
| 3.2      | แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแร่ธาตุชนิดต่างๆที่มีอยู่ในถั่วเหลือง.....              | 15   |
| 3.3      | สารไฟโตเอสโตรเจนที่พบในธรรมชาติ.....  | 16   |
| 3.4      | สูตรโครงสร้างของสารไอโซฟลาโวนและคอนจูเกตของไอโซฟลาโวน<br>ที่มีอยู่ในถั่วเหลือง..... | 20   |
| 4.1      | แสดงข้อมูลของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน NF – 7450.....                                  | 41   |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 3.1    | แสดงต้นและเมล็ดถั่วเหลือง.....13  |
| 3.2    | แสดงองค์ประกอบต่างๆ ในถั่วเหลือง.....14   |
| 3.3    | เปรียบเทียบความสามารถในการจับระหว่างไฟโตเอสโตรเจนกับ<br>เอสโตรเจนรีเซพเตอร์กับเอสตราไดโอดกับเอสโตรเจนรีเซพเตอร์..... 16 |
| 3.4    | แสดงโครงสร้างของไกลโคไซด์ฟอรัมของสารไอโซฟลาโวน<br>(ไดคฮินและเจนิสติน) ..... 18  |
| 3.5    | แสดงการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในสารไอโซฟลาโวน..... 19  |
| 3.6    | แสดงระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน.....23   |
| 3.7    | แสดงลักษณะการไหลขวางของไมโครฟิลเตรชัน.....24  |
| 3.8    | แสดงระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน.....25  |
| 3.9    | แสดงระบบการกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน.....26  |
| 3.10   | แสดงกลไกการแยกอนุภาคที่มีประจุของเยื่อแผ่นประจุลบ..... 26   |
| 3.11   | แสดงการเกิดคอนเซนเทรชัน โพลารไรเซชัน<br>(concentration polarization)..... 28  |
| 3.12   | แสดงค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดัน.....31   |
| 3.13   | แสดงกลไกการอุดตันตามแบบจำลองต่างๆ.....34  |
| 4.1    | ไดอะแกรมแสดงระบบการกรองโดยใช้ไมโครฟิลเตรชัน..... 38   |
| 4.2    | แสดงชุดกรองไมโครฟิลเตรชัน..... 39   |
| 4.3    | ไดอะแกรมแสดงระบบการกรองโดยใช้นาโนฟิลเตรชัน..... 40  |
| 4.4    | แสดงโมดูลของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน.....41   |
| 4.5    | แสดงชุดกรองไมโครฟิลเตรชัน..... 42   |
| 4.6    | แสดงโมดูลของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน.....42   |

## สารบัญรูป ( ต่อ )

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 5.1    | แสดงความเข้มข้นของไอโซพลาไวน์ที่ได้จากการรีฟลักซ์.....51  |
| 5.2    | แสดงลักษณะของสารสกัดจากกากถั่วเหลืองโดยใช้เอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์.....52   |
| 5.3    | แสดงลักษณะของสารสกัดจากกากถั่วเหลืองโดยแยกเอาเอทานอลออก..... 52   |
| 5.4    | แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน.....53   |
| 5.5    | แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ความดันที่ทำการแก้ค่าแล้วของ<br>กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน..... 54  |
| 5.6    | แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ความดันและความเร็วต่างๆ<br>ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน.....56  |
| 5.7    | แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่า<br>การกักกันของไดคซินของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน.....58   |
| 5.8    | แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่า<br>การกักกันของเจนิสตินของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน.....58   |
| 5.9    | แสดงค่าความขุ่นในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท ที่ความดันต่างๆ ของ<br>กระบวนการไมโครฟิลเตรชันความเร็วของสายป้อนคงที่ $9.2 \times 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที .....60       |
| 5.10   | แสดงค่าความขุ่นในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท ที่ความดันต่างๆ ของ<br>กระบวนการไมโครฟิลเตรชันความเร็วของสายป้อนคงที่ $10.7 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที .....60      |
| 5.11   | แสดงค่าความขุ่นในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท ที่ความดันต่างๆ ของ<br>กระบวนการไมโครฟิลเตรชันความเร็วของสายป้อนคงที่ $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที..... 61      |
| 5.12   | แสดงความเข้มข้นของโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ<br>ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันความเร็วของสายป้อนคงที่ $9.2 \times 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที ....63 |
| 5.13   | แสดงความเข้มข้นของโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ<br>ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันความเร็วของสายป้อนคงที่ $10.7 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที....63 |

## สารบัญรูป( ต่อ )

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 5.14   | แสดงความเข้มข้นของโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ<br>ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันความเร็วคงที่ $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที.....64        |
| 5.15   | แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีผลต่อการกักกันโปรตีน<br>ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน..... 64  |
| 5.16   | แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน<br>คงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็ว $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที.....65              |
| 5.17   | แสดงค่าความเข้มข้นของไดคซินในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ<br>ที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็ว $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที.....67    |
| 5.18   | แสดงค่าความเข้มข้นของเจนิสตินในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ<br>ที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็ว $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที..... 67 |
| 5.19   | ผลความเข้มข้นของสายป้อนต่อค่าการกักกันของไดคซินและเจนิสตินที่เวลาต่างๆ<br>ที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็ว $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที.....68    |
| 5.20   | แสดงค่าการกักกันความชุ่มชื้นที่ความชุ่มชื้นของสายป้อนต่างๆ<br>ที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็ว $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที..... 69               |
| 5.21   | แสดงค่าการกักกันของโปรตีนที่เวลาต่างๆ<br>ที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็ว $1.22 \times 10^{-3}$ เมตรต่อวินาที..... 70                                    |
| 5.22   | แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CBMของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน.....72  |
| 5.23   | แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง IBMของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน..... 72   |
| 5.24   | แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง SBMของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน..... 73   |
| 5.25   | แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CFMของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน..... 73   |

## สารบัญญรูป( ต่อ )

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 5.26   | แสดงลักษณะเพอมีเอทและคอนเซนเทรทจากกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน..... 74  |
| 5.27   | แสดงค่าฟลักซ์น้ำกลั่นที่ความดันต่าง ๆ ที่ความเร็วคงที่ 0.011 เมตรต่อวินาที<br>ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิด NF 7450..... 75         |
| 5.28   | แสดงลักษณะเพอมีเอทและคอนเซนเทรทที่ได้จากกระบวนการ<br>นาโนฟิลเตรชัน..... 76   |
| 5.29   | แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ความดันและความเร็วต่าง ๆ ของกระบวนการ<br>นาโนฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิด NF 7450..... 77                                  |
| 5.30   | แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่า<br>การกักกันของไดคซินโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 78   |
| 5.31   | แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่า<br>การกักกันของเจนิสทินโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 79                                       |
| 5.32   | แสดงผลของความดันที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท<br>ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่ความเร็วของสายป้อน 0.011 เมตรต่อวินาที..... 81 |
| 5.33   | แสดงผลของความดันที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท<br>ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่ความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที..... 82 |
| 5.34   | แสดงผลของความดันที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท<br>ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่ความเร็วของสายป้อน 0.019 เมตรต่อวินาที..... 82 |
| 5.35   | แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันการนำไฟฟ้า<br>ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 83   |
| 5.36   | แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันของแคลเซียม<br>ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 83  |
| 5.37   | แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ โดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน<br>สภาวะความดันคงที่ที่ 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที..... 85      |

## สารบัญญรูป( ต่อ )

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.38 แสดงปริมาณไดคิซีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ค่าความดัน 2.6 เมกกะปาสคาล และความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที.....               | 86   |
| 5.39 แสดงปริมาณเจนิสตินในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ค่าความดัน 2.6 เมกกะปาสคาล และความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที.....              | 87   |
| 5.40 แสดงค่าการกักกันของไดคิซีนและเจนิสตินที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ค่าความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและ ความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที.....                          | 88   |
| 5.41 เปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและ ความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที.....          | 90   |
| 5.41 แสดงค่าการกักกันการนำไฟฟ้าที่ค่านำไฟฟ้าในสายป้อนต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน โดยใช้ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและ ความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที .....                       | 91   |
| 5.43 เปรียบเทียบความเข้มข้นของแคลเซียมในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท ที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาล และความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที..... | 92   |
| 5.44 แสดงค่าการกักกันของแคลเซียมที่ความเข้มข้นของแคลเซียมในสายป้อนต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาล และความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาที.....            | 93   |
| 5.45 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CBM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....  | 95   |
| 5.46 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง IBM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....  | 95   |
| 5.47 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง SBM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....  | 96   |
| 5.48 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CFM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....  | 96   |
| 5.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log dt/dV$ กับ $\log d^2/dV^2$ .....  | 97   |

## สัญลักษณ์

|             |     |   |
|-------------|-----|---|
| $C$         | คือ | ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย                                      |
| $C_m$       | คือ | ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น                          |
| $C_p$       | คือ | ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟอมีเอท                                      |
| $D$         | คือ | สัมประสิทธิ์การแพร่ ( diffusion coefficient )                               |
| $d_h$       | คือ | เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรือช่องที่ละลายไหลผ่าน                              |
| $J_v$       | คือ | ค่าเฟอมีเอทฟลักซ์   |
| $k$         | คือ | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย                                      |
| $K_b$       | คือ | ค่าคงที่การกรองของ CBM  |
| $K_c$       | คือ | ค่าคงที่การกรองของ CFM  |
| $K_i$       | คือ | ค่าคงที่การกรองของ IBM  |
| $K_s$       | คือ | ค่าคงที่การกรองของ SBM  |
| $L$         | คือ | ความหนาของเยื่อแผ่น   |
| $L_p$       | คือ | ค่า permeability ของน้ำบริสุทธิ์  |
| $N_{Re}$    | คือ | Reynolds number   |
| $N_{Sc}$    | คือ | Schmidt number  |
| $N_{Sh}$    | คือ | Sherwood number   |
| $Q$         | คือ | ความเร็วโดยปริมาตรของเฟอมีเอทที่เวลาใดๆ                                     |
| $Q_o$       | คือ | ความเร็วโดยปริมาตรของเฟอมีเอทเริ่มต้น ( ก่อนการอุดตัน )                     |
| $R$         | คือ | ค่าการกักกัน  |
| $U$         | คือ | ความเร็วของในการไหล   |
| $V$         | คือ | ปริมาตรของเฟอมีเอท  |
| $x$         | คือ | ระยะห่างจากชั้นขอบเขต   |
| $\sigma$    | คือ | rejection coefficient เป็นค่าที่แสดงการเลือกผ่านและมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 |
| $\Delta\pi$ | คือ | ความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น                 |
| $\Delta P$  | คือ | ค่า transmembrane pressure  |
| $\delta$    | คือ | ความหนาของชั้นขอบเขต  |
| $\rho$      | คือ | ความหนาแน่นของสารละลาย  |
| $\mu$       | คือ | ความหนืดของสารละลาย   |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไอโซพลาโวนเป็นสารประกอบชนิดหนึ่งที่พบในถั่วเหลือง จากรายงานการวิจัยระบุว่า ไอโซพลาโวนมีคุณสมบัติเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของมะเร็ง (Naim และคณะ, 1976) ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจ (Bakhit และคณะ, 1994) เป็นสารต่อต้านสารก่อมะเร็ง (Adlercreutz และคณะ, 1986) และลดอัตราเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง เช่น มะเร็งลำไส้ (Setchell และคณะ, 1984) มะเร็งเต้านม (Setchell และคณะ, 1981) มะเร็งต่อมลูกหมาก (Peterson และ Barnes, 1993) โดยข้อมูลทางการแพทย์พบว่าชาวญี่ปุ่นมีอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งเต้านมน้อยลงทั้งในผู้ชายและผู้หญิง (Adlercreutz และคณะ, 1991) เนื่องจากชาวญี่ปุ่นนิยมบริโภคถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากถั่วเหลือง ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญและราคาไม่แพง (Koury และ Hodges, 1968) องค์ประกอบของสารไอโซพลาโวนที่สำคัญที่มีอยู่ในถั่วเหลือง ได้แก่ ไคตีซิน เจนิสติน ไคดีอะเซอินและเจนิสเตอิน (Water, 1941) โดยทั่วไปสารไอโซพลาโวนถูกสกัดได้จากถั่วเหลืองด้วยตัวทำละลายที่มีขั้วที่อุณหภูมิสูง เช่น เมทานอลหรืออะซิโตนไนท์ (Farmakalidis และ Murphy, 1985) ปริมาณสารไอโซพลาโวนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองจะอยู่ในช่วง 0.1 – 5 มิลลิกรัมต่อกรัมของถั่วเหลือง (Coward และคณะ, 1993) ปัจจุบันมีสิทธิบัตรที่ทำการแยกสารไอโซพลาโวนและทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีการใช้ตัวดูดซับเรซินและการตกผลึก วิธีดังกล่าวมีการสูญเสียผลิตภัณฑ์ค่อนข้างมากกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการแยกสารไอโซพลาโวนจากสารเจือปนอื่นๆ

### 1.2 มุลเหตุจูงใจ

ในกระบวนการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองจากถั่วเหลืองนั้น จะเหลือส่วนที่เป็นกากถั่วเหลืองซึ่งได้สกัดน้ำมันออกไปเป็นจำนวนมาก ส่วนหนึ่งของกากถั่วเหลืองเหล่านี้จะใช้เป็นอาหารสัตว์ (อุทัย คันโธ, 2523) ขายได้ในราคาที่ถูก แต่ในกากถั่วเหลืองเหล่านี้มีสารไอโซพลาโวนซึ่งสามารถทำให้เป็นส่วน

ผสมในอาหารเสริมและใช้เป็นยาป้องกันมะเร็ง (Bingham และคณะ , 1998 ) ซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษา วิธีการแยกสารไอโซฟลาโวนจากกากถั่วเหลืองซึ่งเป็นของเหลือที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลือง โดยการประยุกต์ใช้วิธีการแยกสารโดยใช้เยื่อแผ่นซึ่งกระบวนการที่นำมาใช้ คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน รวมทั้งมีการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการแยกด้วย

### 1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

แยกสารไอโซฟลาโวนที่มีอยู่ในกากถั่วเหลืองโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความดัน ความเข้มข้นของสายป้อน และอัตราการไหลของสายป้อนที่มีผลต่อการแยกสารไอโซฟลาโวนจากสารเจือปนขนาดใหญ่อื่นๆ (มวลโมเลกุลมากกว่า 100,000 ) ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

1.4.2 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความดัน ความเข้มข้นของสายป้อน และอัตราการไหลของสายป้อนที่มีผลต่อการแยกสารไอโซฟลาโวนจากสารถูกละลายตัวอื่นๆ ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.5.1 พัฒนาระบบการการแยกสารไอโซฟลาโวนจากกากถั่วเหลือง โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน ในขั้นตอนการแยกสารและทำให้เข้มข้น

1.5.2 เข้าใจหลักการการถ่ายเทมวลสารและผลกระทบบของตัวแปรต่างๆ ต่อกระบวนการแยกโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

### 1.6 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยต่างๆเกี่ยวกับไอโซฟลาโวน กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

- 1.6.2 ศึกษาวิธีการสกัดสารไอโซฟลาโวนจากกากถั่วเหลืองโดยใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
- 1.6.3 ทำการทดลองเพื่อแยกสารไอโซฟลาโวนจากสารเจือปนขั้นต้น ที่ความดันและอัตราการไหลของสายป้อนที่เหมาะสม โดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน
- 1.6.4 จัดทำและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการแยกในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน
- 1.6.5 ศึกษาตัวแปรต่างๆ เช่น ความดัน ความเข้มข้นของสายป้อนและอัตราการไหลของสายป้อนที่มีผลต่ออัตราการกรองและค่าการกักกันในการแยกสารไอโซฟลาโวน ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน
- 1.6.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไอโซฟลาโวน

ในถั่วเหลืองมีสารไฟโตเอสโตรเจนที่เรียกว่าไอโซฟลาโวนจัดเป็นสารจำพวกเอสโตรเจนชนิดหนึ่งที่ได้จากพืช ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับสเตอรอยดอลเอสโตรเจน (steroidal estrogen) เช่น เอสตราไดออล (estradiol) ซึ่งผลิตจากร่างกายมนุษย์ Phillips (1998) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการบริโภคอาหารเสริมถั่วเหลืองต่ออัตราการเพิ่มเซลล์มะเร็งของสตรีวัยก่อนหมดประจำเดือน โดยศึกษากับสตรีที่มีเซลล์มะเร็งในช่วงเริ่มต้นและระยะรุนแรง โดยให้รับประทานอาหารเสริมถั่วเหลือง 60 กรัม ซึ่งมีไอโซฟลาโวน 45 มิลลิกรัม โดยรับประทานทุกวันเป็นเวลา 14 วันจากการศึกษาพบว่าการบริโภคอาหารที่ทำจากถั่วเหลืองสามารถลดการเกิดมะเร็งเต้านมในสตรีในวัยก่อนหมดประจำเดือน โดยในถั่วเหลืองมีสารที่เรียกว่าไฟโตเอสโตรเจนซึ่งมีคุณสมบัติยับยั้งเซลล์มะเร็งเต้านมในมนุษย์และสัตว์

Barn ( 1995 ) ศึกษาพบว่าไฟโตเอสโตรเจนมีคุณสมบัติเป็นเอสโตรเจนอย่างอ่อนๆ เนื่องจากมีความสามารถในการจับกับ Estrogen acceptor โดย Coumestrol มีความสามารถในการจับกับ Estrogen acceptor มากที่สุด แต่มีความสามารถต่ำกว่า Estradiol เพียง 10 – 20 เท่า แต่เจนิสเตอินมีความสามารถต่ำกว่า 100 เท่าและไดอะเซอิน 1000 เท่า คุณสมบัติที่มีความสามารถต่ำกว่า Estradiol ทำให้ลดการทำงานของ Estrogen receptor และทำให้การสังเคราะห์โปรตีนน้อยลงหรือมีคุณสมบัติเป็น estrogen และ antiestrogen โดยการศึกษาในสัตว์พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถั่วเหลืองสามารถลดขนาดเนื้องอกที่ทำให้เกิดขึ้นโดยใช้สารเคมีได้โดย 7 ตัวอย่างจาก 9 ตัวอย่างของหนูมีเนื้องอกที่มีขนาดลดลงเมื่อให้อาหารที่มีส่วนผสมของถั่วเหลืองและไม่พบว่าเกิดเนื้องอกเพิ่มขึ้นซึ่งจะไม่เกิดผลเช่นเดียวกันนี้เมื่อให้อาหารที่เอาไอโซฟลาโวนออก

Eldridge ( 1982 ) ศึกษาหาปริมาณไอโซฟลาโวนในผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากถั่วเหลืองโดยใช้ High – Performance Liquid Chromatography ซึ่งพบไอโซฟลาโวนอยู่ในรูปที่ต่าง ๆ กัน เช่น

ในรูปของกลูโคไซด์ อะซิทิลกลูโคไซด์และอไกลโคน โดยพบว่าไอโซฟลาโวนอยู่ในรูปไกลโคไซด์มากที่สุดโดยในการวิเคราะห์แบ่งถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออก พบว่ามีไดดีซิน 61.7 , ไกลซีติน 7- เบตา - กลูโคไซด์ 12.9 , เจนนิสติน 119.8 , ไดด์เซอิน 32.8 , เจนิสเตอิน 26.7 มิลลิกรัม/100 กรัม แบ่งถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออกและจะพบสารไอโซฟลาโวนชนิดเดียวกันนี้ในถั่วเหลืองที่ทำให้ปริมาณโปรตีนเข้มข้นและถั่วเหลืองที่แยกเอาโปรตีนออกแต่มีปริมาณที่น้อยกว่า

Barnes และคณะ ( 1994 ) วิเคราะห์หาปริมาณไอโซฟลาโวนที่เป็นกลูโคไซด์จากผลิตภัณฑ์ที่ทำจากถั่วเหลืองหลายชนิดด้วยกันโดยใช้ High - Performance Liquid Chromatography และ Mass spectrometry พบว่าการสกัดไอโซฟลาโวนโดยใช้สารละลายเมทานอล 80 เปอร์เซ็นต์สกัดที่อุณหภูมิสูงๆจะทำให้ส่วนประกอบที่มีอยู่ในถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลง โดยตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นถั่วเหลืองและแบ่งถั่วเหลืองที่สกัดเอาน้ำมันออกแล้ว การสกัดโดยใช้ความร้อนที่ต่ำที่สุดพบว่าจะมีปริมาณไอโซฟลาโวนประเภท 6 - O- malonylglucoside เป็นส่วนใหญ่ ปริมาณเบตาไกลูโคไซด์และ 6 - O - acetylglucoside มีปริมาณน้อย ส่วนอาหารชนิดอื่นเช่น นมถั่วเหลือง เต้าหู้และ soy molasses ที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่ใช้ความร้อนสูงถึง 100 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณไอโซฟลาโวนส่วนใหญ่เป็นชนิดเบตาไกลูโคไซด์

Wang และ Murphy (1994 ) ศึกษาหาปริมาณไอโซฟลาโวนในอาหารที่ทำจากถั่วเหลือง 29 ชนิด เปรียบเทียบกับถั่วเหลืองที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการ พบว่ามีความเข้มข้นของไอโซฟลาโวนเท่าเดิมและเมื่อเปรียบเทียบอาหารที่ทำจากถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการหมักและไม่ผ่านกระบวนการหมักพบว่าอาหารที่ไม่ผ่านการหมักมีสารไกลโคไซด์มากกว่า ส่วนอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักจะมีพวกอไกลโคนมากกว่า

Wang และ Murphy (1994 ) ศึกษาหาปริมาณไอโซฟลาโวนทั้ง 12 ชนิดที่มีอยู่ในถั่วเหลืองชนิดต่างๆ จากประเทศอเมริกา 8 ชนิดและญี่ปุ่น 3 ชนิด โดยใช้ High performance liquid C<sub>18</sub> Reverse phase วิเคราะห์ปริมาณไอโซฟลาโวน ในสายพันธุ์วินตัน 81 ของช่วงปี 1989 - 1991 มีปริมาณไอโซฟลาโวนทั้งหมดอยู่ในช่วง 1176 - 3309 ไมโครกรัมต่อกรัมถั่วเหลือง ส่วนสายพันธุ์อื่นๆของอเมริกามีปริมาณไอโซฟลาโวนอยู่ในช่วง 2053 - 4216 ไมโครกรัมต่อกรัมถั่วเหลือง โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยไอโซฟลาโวนชนิด 6 - O - malonylgenistin, genistin, 6 - malonyldaizin และ daidzin ส่วนถั่วเหลืองที่ได้มาจากประเทศญี่ปุ่นจะมีปริมาณไอโซฟลาโวน

ในช่วง 2041 – 2343 ไมโครกรัมต่อกรัมถั่วเหลืองและ 1261 – 1417 ไมโครกรัมต่อกรัมถั่วเหลืองของปี 1991 และ ปี 1992 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธ์จากญี่ปุ่นจะมีปริมาณ 6 – O – malonylglycitin, genistin และอัตราส่วนปริมาณ 6 – O – malonyldaidzin ต่อไดดีซินสูงกว่าสายพันธ์ที่มาจากอเมริกา

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกสารโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่น

ปัจจุบันกระบวนการใช้เยื่อแผ่นเพื่อแยกสารทำให้บริสุทธิ์ขึ้นหรือเพิ่มความเข้มข้นได้ถูกพัฒนาและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแยกสารด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การกลั่นหรือการระเหย กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนในการทำให้สารเปลี่ยนสถานะ จึงเหมาะในการนำไปใช้กับสารที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง เช่น ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มและยา มีงานวิจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษาลักษณะกลไกการแยกสาร การอุดตันของเยื่อแผ่นรวมทั้งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของเยื่อแผ่น

Bowen และคณะ ( 1991 ) พบว่าการลดลงของเพอมีเอทพลาซิมของสารละลาย Bovine Serum Albumin (BSA) ผ่านเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันและแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของการลดลงของเพอมีเอทพลาซิมกับแรงดึงดูดระหว่างโปรตีนกับรูพรุนของเยื่อแผ่นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการแยกของเยื่อแผ่น ดังนั้นการศึกษาลักษณะการอุดตันและการดูดซับโดยศึกษาการแพร่จากสารละลาย พบว่าในกระบวนการแยกไมโครฟิลเตรชันการปั่นกวนมีผลในการเพิ่มค่าพลาซิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากไมโครฟิลเตรชันไม่มีการสะสมของ BSA ที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นหรือไม่เกิดคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชัน แต่ในกรณีของอัลตราฟิลเตรชันซึ่งมีการกักกันโปรตีนและเกิดการสะสมของโปรตีนที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น การปั่นกวนจะมีผลมากในการเพิ่มเพอมีเอทพลาซิม

ในการพิจารณาการไหลผ่านเยื่อแผ่นของสาร BSA พบว่าแรงเฉือนที่รูพรุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนทำให้กลไกการตกตะกอนของโปรตีนเปลี่ยนแปลงไป ตามแบบจำลองแบบ standard blocking filtration law ส่วนปัจจัยอื่นๆที่มีผลสำคัญต่อการดูดซับของโปรตีนได้แก่ ปริมาณของโปรตีนที่ดูดซับ รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีของผิวหน้าเยื่อแผ่น โครงสร้างและประจุของโปรตีน โดยการลดลงของพลาซิมเมื่อเวลาผ่านไปไม่ได้เกิดเนื่องจากสาเหตุคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันหรือการดูดซับของโปรตีนเพียงอย่างเดียว แต่เกิดเนื่องจากการตกตะกอนของโปรตีนที่

รูปของเยื่อแผ่น ค่าความหนาของชั้นที่ตะกอนบนเยื่อแผ่นจากการคำนวณประมาณ 55 นาโนเมตร ซึ่งปรากฏการณ์นี้แตกต่างจากการดูดซับของโปรตีนที่ผิวหน้าในลักษณะชั้นของโปรตีนปกคลุมที่เยื่อแผ่น

Sean และ Andrew ( 1994 ) พบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดฟาวลิงของการกรองโปรตีนในสารละลาย BSA โดยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันเนื่องจากเกิดการเสียสภาพหรือการตกตะกอนของโปรตีนซึ่งเกิดจากแรงกระทำต่อกันจากหมู่ thiol (-SH) ทำให้เกิดการจับตัวเป็นโมเลกุลคู่ (dimer) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดการตกตะกอนเป็นฟาวลิงของเยื่อแผ่นในระหว่างการกรองสาร bovine serum albumin (BSA) ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าเพอมีเอทพลักซ์ลดลง การลดลงของพลักซ์สามารถทำให้ลดน้อยลงโดยกำจัดกลุ่ม sulfhydryl หรือกลุ่ม carboxymethyl โดยการเติม metal chelate เช่น EDTA หรือ citrate หรือ สาร dithiothreitol การรวมตัวของโปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า ionization ของกลุ่ม thiol สูงขึ้นเป็นผลให้จับกับกลุ่ม thiol กลุ่มอื่นได้มากขึ้น

Kwon และคณะ ( 2000 ) ศึกษาค่าพลักซ์วิกฤตโดยใช้การทดลองไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง ( CFMF ) เพื่อลดข้อจำกัดที่เกิดขึ้น คือการเกิดฟาวลิง โดยมีการศึกษาถึงค่าพลักซ์วิกฤตซึ่งเป็นค่าพลักซ์สูงสุดที่ไม่เกิดการตกตะกอนที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น เมื่อพ้นค่าพลักซ์วิกฤตไปจะเกิดฟาวลิงซึ่งค่านี้จะเท่ากับค่าพลักซ์น้ำสะอาดที่ค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นเดียวกัน พบว่าค่าพลักซ์วิกฤตจะขึ้นกับขนาดของอนุภาค สำหรับอนุภาคขนาดเล็กช่วง 0.1 ไมโครเมตร ค่าการแพร่กลับจากผิวหน้าเยื่อแผ่นมีความสำคัญมากและค่าพลักซ์วิกฤตขึ้นกับประจุของอนุภาค สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 ไมโครเมตร การแพร่กลับซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนซึ่งทำให้อนุภาคไม่เกิดการเกาะที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น ประจุของผิวหน้าจึงไม่มีความสำคัญ การพิจารณาค่าพลักซ์วิกฤตมี 2 วิธี คือ ค่าพลักซ์วิกฤตที่ได้จากค่าเฉลี่ยระหว่างค่าพลักซ์สูงสุดที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นคงที่กับค่าพลักซ์ต่ำสุดที่ค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นเริ่มเพิ่มขึ้นตามเวลาและจากวิธีการทำสมมูลมวล

ค่าพลักซ์วิกฤตที่ได้จากทั้งสองวิธีเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดรูปของเยื่อแผ่นในช่วง 0.1 – 0.65 ไมโครเมตรไม่มีผลต่อการค่าพลักซ์วิกฤต ที่ค่าพลักซ์ที่มากกว่าค่าพลักซ์วิกฤตอัตราการเพิ่มของความดันคร่อมเยื่อแผ่นของเยื่อแผ่นขนาดใหญ่จะมากกว่าเยื่อแผ่นขนาดเล็ก เนื่องการตกตะกอนของอนุภาคบนเยื่อแผ่นจะเกิดการอุดตันที่รูปวงได้มากกว่าเยื่อแผ่นขนาดเล็ก และผลของความเข้มข้นพบว่าค่าพลักซ์วิกฤตลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้น

น้อยจะทำให้อนุภาคเกิดการอุดตันที่รูพรุน ส่วนที่ความเข้มข้นของสายป้อนมากอนุภาคเกาะตัวเป็นสะพานบนรูพรุนเยื่อแผ่นปกคลุมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นแทนที่การอุดตัน

Guu ( 1997 ) ศึกษาการนำน้ำจากการล้างถั่วเหลืองและสารที่สามารถละลายได้ของถั่วเหลืองกลับมาใช้ใหม่ โดยในน้ำมีสารที่ทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ การกำจัดน้ำส่วนนี้ทำได้โดยนำไปรวมกับน้ำเสียจากส่วนอื่นจะทำให้เป็นการสูญเสียน้ำเป็นจำนวนมาก จึงมีการศึกษาการนำกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำที่ได้จากการล้างและแช่ถั่วเหลือง โดยในน้ำมีความเข้มข้นของโปรตีน 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะเป็นพวกเปปไทด์ที่ละลายได้และคาร์โบไฮเดรตเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นพวกกลูโคส ฟรักโทสและโอลิโกแซคคาไรด์ เช่น ราฟิโนส ค่า COD ประมาณ 10,000 ppm ผลการศึกษาโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับ ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 20 - 40 องศาเซลเซียสและความดันในช่วง 1,000 - 4,000 กิโลปาสคาล พลังงานที่ใช้ในการไหลผ่านเยื่อแผ่นของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับเป็น  $2.57 \times 10^3$  และ  $2.48 \times 10^4$  กิโลจูลต่อกิโลกรัม-โมลตามลำดับ โดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่อัตราการไหลผ่านเดียวกันและน้ำที่ได้จากส่วนที่เป็นเพอเมอทของกระบวนการออสโมซิสผันกลับและนาโนฟิลเตรชันสามารถนำไปใช้งานในการล้างและแช่ถั่วเหลืองอีกครั้ง โดยสามารถนำน้ำกลับมาใช้คิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของคอนเซนเทรทของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับซึ่งมีสารในถั่วเหลืองที่ละลายน้ำได้เช่นโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสามารถนำไปเข้ากระบวนการหมักเพื่อให้กรดแลคติกซึ่งใช้ทำชีสหรือโยเกิร์ตต่อไป

Tsuru ( 1994 ) พบว่าเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันชนิดต่างๆ มีความสามารถในการแยกกรดอะมิโนและเปปไทด์ได้แตกต่างกัน โดยเยื่อแผ่นที่มี Molecular weight cutoff ต่ำกว่า 300 ( SU-200 , 600, NF-40 และ Desal-5 ) ไม่เหมาะสำหรับการใช้แยกกรดอะมิโน ส่วนเยื่อแผ่นชนิด NTR - 7450 และ G-20 ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นชนิดประจุลบและมีค่า Molecular weight cutoff ในช่วง 600 - 2000 ค่าการกักกันของ L- glutamic acid ซึ่งมีประจุเป็นลบมีค่ามากกว่า 0.8 และค่าการกักกันเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้น ส่วนกรดอะมิโนที่เป็นกลางตัวอื่นๆ จะมีค่าการกักกันน้อย L- lysine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มีประจุเป็นลบมีค่าการกักกันมากกว่ากรดอะมิโนที่เป็นกลางเนื่องจากแรงผลักรกกันของประจุของโคไอออน ( คลอไรด์ไอออน ) ดังนั้นเยื่อแผ่น NTR -7450 และ G-20 เหมาะสมในการใช้แยกกรดอะมิโน โดยอาศัยกลไกของแรงระหว่างประจุ กรดอะมิโนและ



เปปไทด์ที่มีประจุจะถูกกักอยู่ในสารละลายเข้มข้น ส่วนกรดอะมิโนและเปปไทด์ที่มีประจุเป็นกลางจะอยู่ในส่วนสารละลายเพอมีเอท ผลของ pH ที่มีต่อค่าการกักกันของเปปไทด์ พบว่าที่ค่าการกักกันเพิ่มขึ้นเมื่อ pH มากกว่าและน้อยกว่าค่า isoelectric point เนื่องจากที่ pH มากกว่า isoelectric point เปปไทด์จะเป็นประจุลบและเกิดแรงผลักกับประจุลบที่เยื่อแผ่นและกรณี pH น้อยกว่าค่า isoelectric point เคาทเตอร์ไอออนของเปปไทด์ที่มีประจุเป็นบวก คือ คลอไรด์ไอออนจะถูกกักกันโดยเยื่อแผ่นทำให้เปปไทด์ถูกกักกันไว้เพื่อให้ประจุมีค่าเป็นกลาง

Matsubara และคณะ ( 1996 ) ประยุกต์ใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับและนาโนฟิลเตรชันในการแยกโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides ) ซึ่งประกอบด้วย สเตาซิโอส ราฟิโนส และซูโครสที่อยู่ในน้ำเสียที่ได้จากการต้มถั่วเหลืองในอุตสาหกรรมการผลิตเต้าหู้ โดยใช้อัลตราฟิลเตรชันกรองน้ำเสียเพื่อนำส่วนเพอมีเอทซึ่งมีปริมาณโปรตีนลดลงผ่านกระบวนการออสโมซิสผันกลับ พบว่าเมื่อความดันคร่อมเยื่อแผ่นเพิ่มค่าเพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นและมีสัมพัทธ์เป็นเส้นตรง แต่ความเร็วของสายป้อนมีผลในการเพิ่มค่าเพอมีเอทฟลักซ์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนค่าการกักกันโอลิโกแซคคาไรด์และโซเดียมคลอไรด์ของกระบวนการออสโมซิสผันเป็น 1.0 และ 0.967 - 0.995 ตามลำดับ ในการทดลองเลือกใช้ค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นที่ 5.0 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.117 เมตรต่อวินาทีเพื่อให้ได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงสุด ความสัมพันธ์ของค่าคอนเซนเทรชันแฟคเตอร์ CF( concentration factor ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตรของสายป้อนต่อปริมาตรของคอนเซนเทรท โดยค่าเพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า CF เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของโอลิโกแซคคาไรด์จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง โดยค่า COD ลดลงจาก 8,400 เป็น 27 ppm

สำหรับกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ผลของความดันคร่อมเยื่อแผ่นและความเร็วสายป้อนต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เป็นไปในลักษณะเดียวกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับ โดยมีค่าการกักกันของโอลิโกแซคคาไรด์เท่ากับ 1 และโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.28 - 0.64 ซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น แต่ค่ากักกันเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลช่วง 0.078 - 0.195 เมตรต่อวินาที สภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงสุดคือค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นที่ 3.0 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.117 เมตรต่อวินาที ค่า COD ของเพอมีเอทที่ได้จากนาโนฟิลเตรชันมีค่าลดลงจาก 8,700 ppm เป็น 160 ppm ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เกินค่าของน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ตามกฎหมายของประเทศญี่ปุ่นโดยส่วนคอนเซนเทรทที่ได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีสัดส่วนของโอลิโกแซคคาไรด์ใกล้เคียงกับโอลิโกแซคคาไรด์ในผลิตภัณฑ์ที่ขายในทางการค้า

Nihal และคณะ ( 1998 ) ประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันในการแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักและการเอาสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสารที่ใช้ศึกษาคือน้ำตาล โดยอัตราการไหลของสายป้อนจะมีผลกับคอนเซนเทรชันโพลาริเซชัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสายป้อนเพอมีเอทพลาซมีคัลจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการลดลงของคอนเซนเทรชันโพลาริเซชัน แต่อัตราการเพิ่มของเพอมีเอทพลาซมีคัลจะเพิ่มสูงในช่วงแรกและคงที่ต่อมาในช่วง 18.9 - 29.7 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่ออัตราการไหลของสายป้อนมากกว่าช่วงนี้จะไม่มีการเพิ่มของคอนเซนเทรชันโพลาริเซชันและทำให้เพิ่มค่าการกักกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดคือ 29.7 มิลลิลิตรต่อวินาที

ผลของความดันกับเพอมีเอทพลาซมีคัลของเยื่อแผ่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลคัตออฟ 500 มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงจนถึงความดัน 30 บรรยากาศ ที่ค่าความดันมากกว่าค่านี้การเพิ่มความดันไม่มีผลต่อเพอมีเอทพลาซมีคัลและเมื่อความเข้มข้นสายป้อนเพิ่มขึ้นทำให้เพอมีเอทพลาซมีคัลลดลง ค่าการกักกันจะเพิ่มขึ้นที่ช่วงความเข้มข้นต่ำและคงที่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ที่ระดับความเข้มข้นของกลูโคสและซูโครสมากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ผลของความเข้มข้นจะลดลงเนื่องจากเกิดขึ้นของตัวถูกละลายสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้นทำให้การเพิ่มความเข้มข้นไม่มีผลต่อการแยก สำหรับเยื่อแผ่นที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่าการกักกันสูงกว่าและค่าเพอมีเอทพลาซมีคัลต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่มีขนาดใหญ่และความดันจะมีผลต่อค่าการกักกันมากกว่าความเข้มข้นของสายป้อน ส่วนแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองจะเป็นแบบ statistical-mechanical theory จากการเปรียบเทียบค่าเพอมีเอทพลาซมีคัลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ ค่าการกักกันมีความแตกต่างกันประมาณ 1.7 - 3 เปอร์เซ็นต์และค่าเพอมีเอทพลาซมีคัลแตกต่างกันประมาณ 2.7 - 23 เปอร์เซ็นต์

Yazhen และ Remi ( 1999 ) ประยุกต์ใช้รีซินาโนฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมย้อมผ้าเพื่อลดความเข้มข้นของสีย้อม สารอินทรีย์และสารฟีนอล โดยใช้เยื่อแผ่น NF - 45 ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นไฮโดรฟิลิกมีขนาดรูพรุนระหว่าง 2 - 5 นาโนเมตร

สำหรับผลของความเข้มข้นเริ่มต้น โดยทั่วไปที่ความเข้มข้นสูงๆ ทำให้ความดันออสโมติกมีค่าสูงด้วยส่งผลให้เพอมีเอทพลาซมีคัลลดต่ำลง ผลของความดันคร่อมเยื่อแผ่นที่มีผลต่อค่าเพอมีเอทพลาซมีคัลและค่า global separation factor โดยใช้สีย้อมสีต่างๆ พบว่าสีเขียวค่าเพอมีเอทพลาซมีคัลเพิ่มเป็นเส้นตรงกับค่าความดัน ค่าการแยกเท่ากับ 99.9 เปอร์เซ็นต์และคงที่ แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทมวลไม่ได้เป็นปัจจัยที่ควบคุมเนื่องจากผลของคอนเซนเทรชันโพลาริเซชันไม่มีผลต่อค่าพลาซมีคัล สำหรับสีส้มเมื่อเพิ่มค่าความดันมากขึ้นการเพิ่มของเพอมีเอทพลาซมีคัลจะเป็นไปอย่างช้า ๆ แสดงให้เห็นถึงผลของ

คอนเซนเทรชันโพลาริเซชัน ส่วนสีน้ำเงินเมื่อเพิ่มความดันจะทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างช้าๆ แสดงให้เห็นถึงคอนเซนเทรชันโพลาริเซชันมีผลมาก

Johan และคณะ ( 2001 ) ศึกษาค่าการกักกันของสารละลายเกลือ  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$  และ  $\text{LaCl}_3$  โดยใช้เยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน 4 ชนิด โดยใช้เยื่อแผ่น NTR 7450 ซึ่งเป็นชั้นของเยื่อแผ่นทำด้วย sulfonated polyethersulfone ซึ่งมีประจุเป็นลบที่ค่า pH เป็นกลาง เนื่องจากการแตกตัวของกลุ่ม sulfonic acid ค่าการกักกันของเกลือจะสูงสำหรับ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และการกักกันของ  $\text{MgCl}_2$  จะมีค่าต่ำ จากทฤษฎี Donnan exclusion แสดงให้เห็นค่าความหนาแน่นของประจุที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเกลือและความเข้มข้นของเกลือ ซึ่งผลที่ได้ใกล้เคียงกันเมื่อใช้เยื่อแผ่นชนิด NR 40, UTC 20 และ CA 30 โดยอธิบายได้จากแรงกระทำของประจุในสารละลายกับประจุบนเยื่อแผ่น โดยเกิดการดูดซับกันระหว่างประจุในสารละลายกับประจุบนเยื่อแผ่น

สำหรับเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนขนาดเล็ก เช่น (ชนิด NF 40 มีขนาดรูพรุน 0.42 นาโนเมตร และชนิด UTC 20 มีขนาดรูพรุน 0.41 นาโนเมตร ) ค่าการกักกันของเกลือชนิด  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$  และ  $\text{LaCl}_3$  มีค่าสูง ส่วนเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนขนาดกลางเช่นชนิด CA 30 และชนิด NTR 7450 ค่าการกักกันของเกลือจะมีค่าต่ำกว่าและมีผลของประจุมาเกี่ยวข้องด้วย โดยค่าการกักกันของ  $\text{LaCl}_3$  จะสูงกว่า  $\text{MgCl}_2$  เนื่องจากประจุบนเยื่อแผ่นเมื่อดูจากความหนาแน่นของประจุจะเป็นประจุมากกว่า  $\text{MgCl}_2$  และความหนาแน่นของประจุบนเยื่อแผ่นคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ นาโนฟิลเตรชัน โดยใช้แบบจำลอง Donnan and steric partitioning pore model ( DSPM ) ซึ่งอ้างอิงจากการขยายสมการของ Planck ในการอธิบายการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายผ่านเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันและมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง

Vanและคณะ (2001) ศึกษาการประยุกต์ใช้นาโนฟิลเตรชัน ในการกำจัดสีย้อมจากอุตสาหกรรมย้อมผ้า ทำการศึกษาการเกิดฟาวลิงและการลดลงของฟลักซ์โดยอาศัย 2 วิธีการ คือ การศึกษาค่าการกักกันของสีย้อม ( reactive blue 2 และ reactive orange 16 ) ศึกษาที่ความเข้มข้นของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และสารลดแรงตึงผิว (surfactant) โดยใช้เยื่อแผ่นชนิดต่างๆ เช่น ( ชนิด UTC-60 , NF 70 และ NTR 7450 )

เมื่อศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสีย้อม สารลดแรงตึงผิวและ ionic strength ของสีย้อมพบว่าไม่มีผลต่อค่าเพอเมอแฟล็กซ์ ในช่วงความเข้มข้น 0 – 10 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเกิดฟาวลิง

เพียงเล็กน้อยโดยค่าฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าคงที่ตลอด 2 ชั่วโมงในการทำการทดลองการกรอง ส่วนค่าการกักกันของสีย้อมของเยื่อแผ่นชนิด UTC-60, UTC-20 และ NF 70 มีค่าสูงเพียงพอที่จะกำจัดสีจากสารป้อน สำหรับเยื่อแผ่นชนิด NF - 7450 ซึ่งมีขนาดรูพรุนใหญ่ ความสามารถในการกักกันของสีย้อมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารป้อน ค่าการกักกันของราฟิโนสและกาแลคโตสของเยื่อแผ่นชนิด UTC-20 และ NF-70 จะมีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นชนิด NF - 7450 สำหรับเยื่อแผ่นที่มีขนาดเล็กเช่น UTC-20 และ NF-70 เฉพาะโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น เอทานอลที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ การถ่ายเทมวลสารจะเป็นการละลายผ่านวัสดุโพลีเมอร์ของเยื่อแผ่น สำหรับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ การละลายจะเกิดได้ยากกว่า สำหรับเยื่อแผ่น NF - 7450 ค่าการกักกันของสีย้อมที่ผ่านเยื่อแผ่นเพียงครั้งเดียวไม่เพียงพอจึงต้องนำชุดเยื่อแผ่นมาต่ออีก 1 ชุดซึ่งการกรองในครั้งที่สองปริมาณสีย้อมที่หลุดออกในเพอมีเอทจะน้อยลงเนื่องจากส่วนหนึ่งได้กำจัดไปในขั้นที่หนึ่งแล้ว ค่าความดันออสโมติกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสีย้อมและความดันออสโมติกจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือลดลง ดังนั้นเยื่อแผ่นที่เหมาะสมควรเลือกชนิดที่กักกันไอออนของเกลือและสีย้อมได้เหมาะสม เพอมีเอทที่ได้มีค่าความกระด้าง ปริมาณโลหะ ปริมาณคลอไรด์ ปริมาณซัลเฟต และ BOD/COD อยู่ในระดับที่น่าพอใจสามารถนำมาใช้กับกระบวนการได้ใหม่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

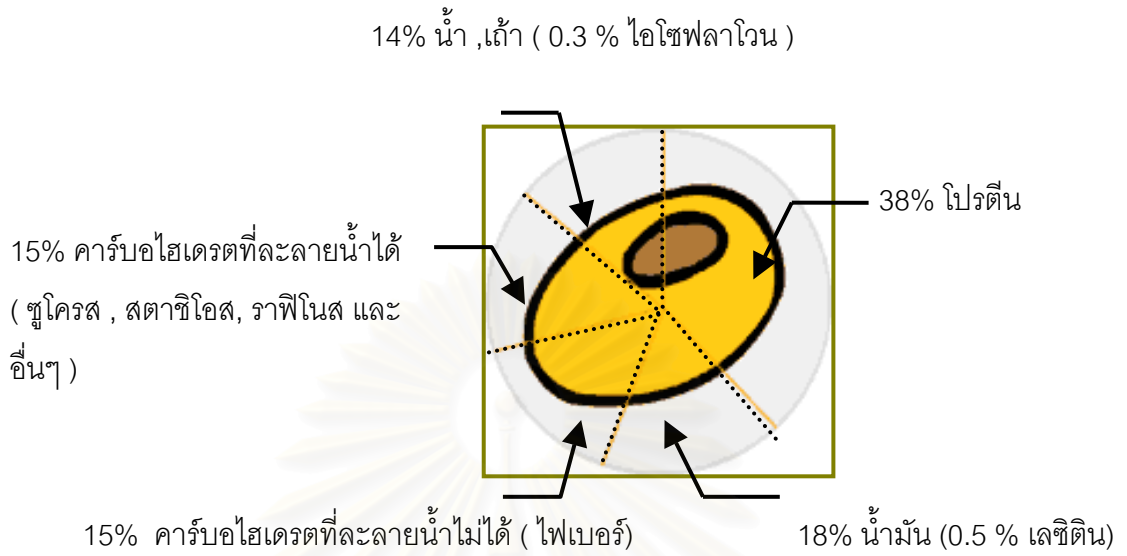
### ทฤษฎี

#### 3.1 ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ของถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองเป็นพืชตระกูลถั่ว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Glycine max* มีการนำถั่วเหลืองไปใช้ประโยชน์ในหลายทางด้วยกัน เช่น ต้นถั่วเหลืองสามารถตรึงไนโตรเจนลงสู่ดิน ลักษณะของต้นถั่วเหลืองและเมล็ดถั่วเหลืองดังแสดง ในรูปที่ 3.1 ถั่วเหลืองใช้ผลิตน้ำมันถั่วเหลืองและทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดด้วยกัน เช่น นมถั่วเหลือง เต้าหู้ ในถั่วเหลืองมีองค์ประกอบต่างๆ ที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถั่วเหลืองและกากถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญ มีกรดอะมิโนที่สำคัญ 9 ชนิดด้วยกันและแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 แสดงต้นและเมล็ดถั่วเหลือง



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบต่างๆ ในถั่วเหลือง

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นในกากถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออกแล้ว

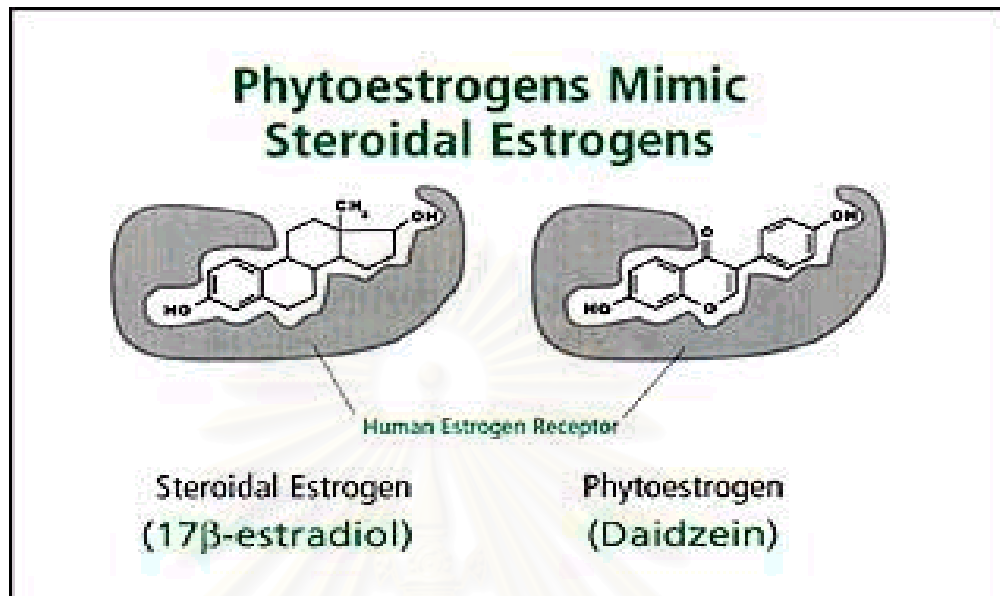
| กรดอะมิโนที่จำเป็น       | ถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออกแล้ว<br>มิลลิกรัมต่อกรัมโปรตีน |
|--------------------------|--|
| Histidine                | 26   |
| Isoleucine               | 46   |
| Leucine                  | 78   |
| Lysine                   | 64   |
| Methionine + Cystine     | 26   |
| Phenylalanine + Tyrosine | 88   |
| Threonine                | 39   |
| Tryptophan               | 14   |
| Valine                   | 46   |

ตารางที่ 3.2 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแร่ธาตุชนิดต่างๆที่มีอยู่ในถั่วเหลือง

| แร่ธาตุ    | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแร่ธาตุ<br>ในถั่วเหลืองที่สกัดน้ำมันออก |
|------------|---|
| โพแทสเซียม | 2.4-2.7   |
| ฟอสฟอรัส   | 0.7-0.9   |
| แคลเซียม   | 0.2-0.3   |
| แมกนีเซียม | 0.2-0.3   |
| คลอไรด์    | 0.1-0.3   |
| เหล็ก      | 0.01  |
| สังกะสี    | 0.005   |
| แมงกานีส   | 0.003-0.004   |
| โซเดียม    | 0.003-0.015   |
| ทองแดง     | 0.001-0.002   |

### 3.2 ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ของไอโซฟลาโวน

ไฟโตเอสโตรเจน (phytoestrogen) จัดเป็นสารเอสโตรเจนที่ได้จากพืช ซึ่งรู้จักในชื่อของ ฟีนอลิก เอสโตรเจน (phenolic estrogen) มีอยู่หลายชนิดด้วยกันและได้จากพืชชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ไอโซฟลาโวนจัดเป็นสารประเภทไฟโตเอสโตรเจนชนิดหนึ่งซึ่งมีมากในพืชตระกูลถั่ว มีโครงสร้างคล้ายกับสารสเตอรอยดเอสโตรเจนในร่างกายสามารถจับกับเอสโตรเจนรีเซพเตอร์ (estrogen receptor) ที่อยู่ในเซลล์ของร่างกายมนุษย์เหมือนกับสารสเตอรอยดเอสโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แต่มีฤทธิ์คล้ายเอสโตรเจนต่ำ (ประมาณ 1/1,000 ถึง 1/100,000 ของเอสโตรเจน) สารไฟโตเอสโตรเจนสามารถถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็วที่ลำไส้และแพร่เข้าสู่กระแสเลือดและทำหน้าที่เป็น anti-estrogen activity ได้ (Bingham และคณะ, 1998)



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบความสามารถในการจับระหว่างไฟโตเอสโตรเจนกับเอสโตรเจนรีเซพเตอร์กับ เอสตราไดออลกับเอสโตรเจนรีเซพเตอร์

ตารางที่ 3.3 สารไฟโตเอสโตรเจนที่พบในธรรมชาติ  
แบ่งเป็น 5 ชนิด

| ชนิดของสารไฟโตเอสโตรเจน     | แหล่งอาหารที่สำคัญ               |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 1. ฟลาโวน (Flavones)        | ผักและผลไม้ที่มีสีเหลืองและสีแดง |
| 2. ฟลาโวนอยด์ (Flavonols)   | ผักและผลไม้ที่มีสีเหลืองและสีแดง |
| 3. ฟลาวาโนน (Flavanones)    | ผลไม้จำพวกส้ม                    |
| 4. ไอโซฟลาโวน (Isoflavones) | พืชตระกูลถั่ว                    |
| 5. ลิกแนน (Lignans)         | ธัญพืช , ผัก และผลไม้            |



สาเหตุที่ไอโซฟลาโวนเป็นสารที่น่าสนใจมากที่สุดในบรรดาไฟโตเอสโตรเจนตัวอื่นๆ เนื่องจากไอโซฟลาโวนมีคุณสมบัติคล้ายสเตอรอยดอลเอสโตรเจนมากกว่าไฟโตเอสโตรเจนตัวอื่นๆ และสามารถพบในพืชตระกูลถั่วซึ่งนิยมใช้เป็นแหล่งโปรตีนแทนเนื้อสัตว์ สารไอโซฟลาโวนประมาณ 4-6 ชนิดมีอยู่ทั่วไปในอาหารของมนุษย์ ไอโซฟลาโวนกลุ่มนี้ถูกแบ่งแยกจากกลุ่มอื่นเนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายกับฮอร์โมนเอสโตรเจนในร่างกายมนุษย์และคุณสมบัติที่สำคัญเช่นเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระ (Naim และคณะ, 1976) และเป็นสารต่อต้านมะเร็ง (Adlercreutz และคณะ, 1986)

สารไอโซฟลาโวนจะถูกดูดซึมอย่างรวดเร็วที่ลำไส้เข้าสู่กระแสเลือด และถูกขับออกทางปัสสาวะโดยใช้เวลาประมาณ 2 วันในการขับไอโซฟลาโวนทั้งหมดออกสำหรับการกินอาหารมื้อหนึ่งๆ และสารไอโซฟลาโวนปริมาณครึ่งหนึ่งจะถูกขับออกภายใน 12 ชั่วโมง (Bingham และคณะ, 1998) ไอโซฟลาโวนที่มีคุณสมบัติเหมือนเอสโตรเจน ได้แก่

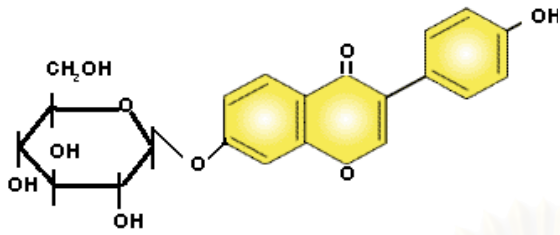
1. ฟอร์โมนอนเนติน (Formononetin)
2. ไบโอชานิน (Biochanin)
3. ไดด์เซอิน (Daidzein)
4. เจนิสเตอิน (Genistein)

ในถั่วเหลืองจะมีไอโซฟลาโวนที่สำคัญอยู่ 3 ชนิด คือ ไดด์เซอิน, เจนิสเตอินและไกลซิติน

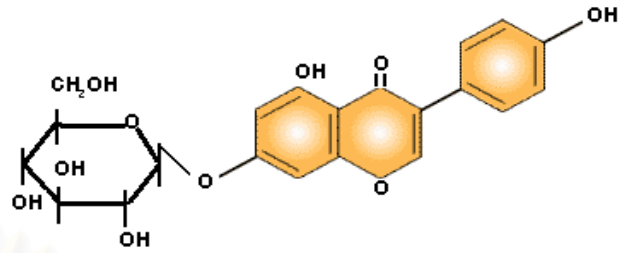
ไกลโคไซด์ (glycoside) และอไกลโคน (aglycone)

สารไอโซฟลาโวนในพืชมักจะอยู่ในรูปที่จับกับโมเลกุลน้ำตาล เรียกโมเลกุลไอโซฟลาโวนที่จับกับน้ำตาลว่า “ไกลโคไซด์” ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลกลูโคส ไกลโคไซด์ที่สำคัญ เช่น ไดด์เซอิน (Daidzin) และ เจนิสติน (Genistin) โมเลกุลน้ำตาลนี้จะถูกแยกออกไปโดยเอนไซม์เพื่อให้โมเลกุลไอโซฟลาโวนอยู่ในรูปอิสระและสามารถทำงานได้ โมเลกุลไอโซฟลาโวนอิสระเรียกว่า “อไกลโคน” เช่น ไดด์เซอิน (Daidzein) และเจนิสเตอิน (Genistein) ดังแสดงในรูป 3.4

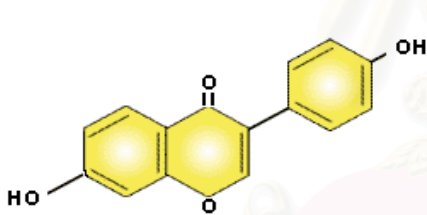
ในอาหารส่วนใหญ่โมเลกุลไอโซฟลาโวนจะอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ซึ่งยังไม่สามารถที่จะทำงานได้ ไอโซฟลาโวนจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายและถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอไกลโคนก่อนโดยอาศัยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในกระเพาะและแบคทีเรียในส่วนลำไส้ระหว่างการย่อยอาหาร แบคทีเรียในลำไส้จะตัดโมเลกุลน้ำตาลเพื่อทำให้ปริมาณเจนิสเตอินและไดด์เซอินเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ร่างกายสามารถนำไปใช้ได้



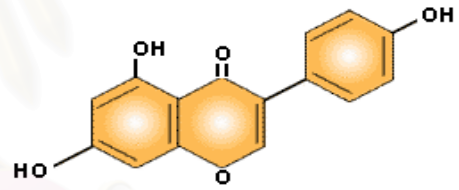
ไดด์ซีน ( $C_{21}H_{20}O_9$ )



เจนิสติน ( $C_{21}H_{20}O_{10}$ )



ไดด์เซอิน ( $C_{15}H_{10}O_4$ )

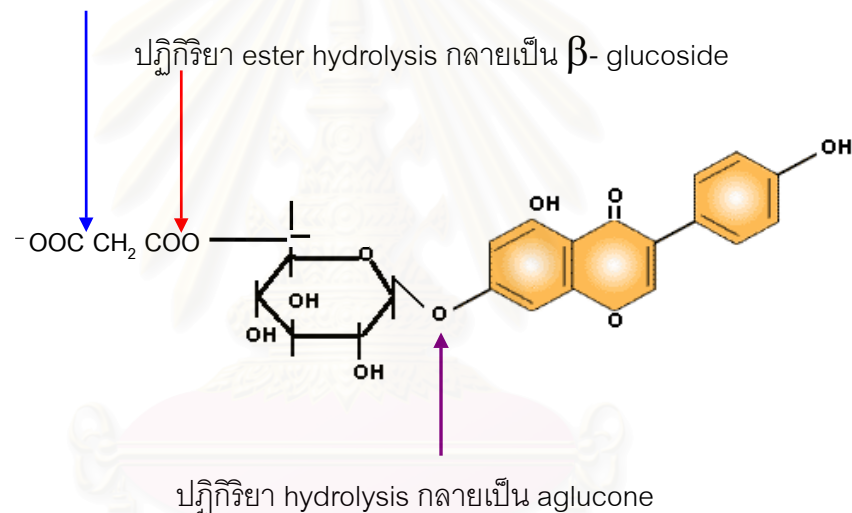


เจนิสเตอิน ( $C_{15}H_{10}O_5$ )

รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของไกลโคไซด์ฟอร์มของสารไอโซฟลาโวน (ไดด์ซีนและเจนิสติน)

ในถั่วเหลืองจะมีไอโซฟลาโวนที่เป็นคอนจูเกตชนิดต่างๆ 12 ชนิด ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดไอโซฟลาโวนได้แก่ เอทานอล เมทานอล ไดเอทิลอีเทอร์และอะซิโตน สำหรับขั้นตอนการสกัดเนื่องจากโครงสร้างของคอนจูเกตบางตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านขั้นตอนการผลิตและปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน การสกัดด้วยสารละลายแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้คอนจูเกตเหล่านี้เกิดปฏิกิริยา de-esterification และเปลี่ยนเป็นรูป  $\beta$ -glucoside มากขึ้น ( Stephen Barnes , Marion Kirk และ Lori Coward , 1994 )

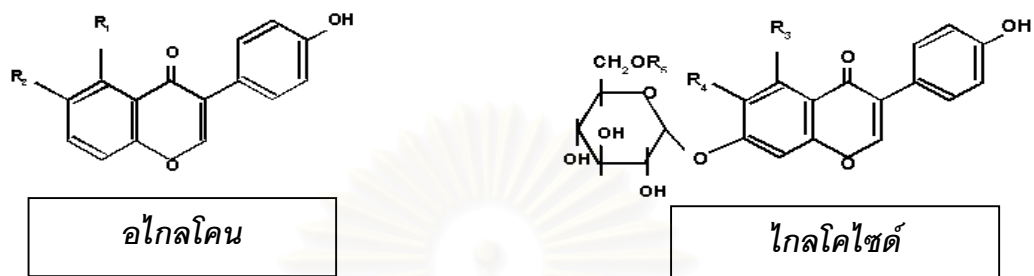
ปฏิกิริยา decarboxylation กลายเป็น acetyl glucoside



รูปที่ 3.5 แสดงการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในสารไอโซฟลาโวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 สูตรโครงสร้างของสารไอโซฟลาโวนและคอนจูเกตของไอโซฟลาโวนที่มีอยู่ในถั่วเหลือง มี 12 ชนิดดังนี้



- อไกลโคโคน (Aglycone)

| R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub>   | ชื่อ      | สูตรเคมี                                       | น้ำหนักโมเลกุล |
|----------------|------------------|-----------|--|----------------|
| H              | H                | daidzein  | C <sub>15</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> | 254            |
| OH             | H                | genistein | C <sub>15</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> | 270            |
| H              | OCH <sub>3</sub> | glycitein | C <sub>16</sub> H <sub>12</sub> O <sub>5</sub> | 272            |

- ไกลโคไซด์ (Glycoside)

| R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub>   | R <sub>5</sub>         | ชื่อ                    | สูตรเคมี  | น้ำหนักโมเลกุล |
|----------------|------------------|------------------------|-------------------------|---|----------------|
| H              | H                | H                      | daidzin                 | C <sub>21</sub> H <sub>20</sub> O <sub>9</sub>  | 416            |
| OH             | H                | H                      | genistin                | C <sub>21</sub> H <sub>20</sub> O <sub>10</sub> | 432            |
| H              | OCH <sub>3</sub> | H                      | glycitin                | C <sub>22</sub> H <sub>22</sub> O <sub>10</sub> | 446            |
| H              | H                | COCH <sub>3</sub>      | 6" - O' Acetyldaidzin   | C <sub>23</sub> H <sub>22</sub> O <sub>10</sub> | 458            |
| OH             | H                | COCH <sub>3</sub>      | 6" - O' Acetylgenistin  | C <sub>23</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> | 474            |
| H              | OCH <sub>3</sub> | COCH <sub>3</sub>      | 6" - O' Acetylglycitin  | C <sub>24</sub> H <sub>24</sub> O <sub>11</sub> | 488            |
| H              | H                | COCH <sub>2</sub> COOH | 6" - O' Malonyldaidzin  | C <sub>24</sub> H <sub>22</sub> O <sub>12</sub> | 502            |
| OH             | H                | COCH <sub>2</sub> COOH | 6" - O' Malonylgenistin | C <sub>24</sub> H <sub>22</sub> O <sub>13</sub> | 518            |
| H              | OCH <sub>3</sub> | COCH <sub>2</sub> COOH | 6" - O' Malonylglycitin | C <sub>25</sub> H <sub>24</sub> O <sub>13</sub> | 532            |

## ประโยชน์ของไอโซฟลาโวน

1. ป้องกันการเกิดโรคมะเร็งชนิดต่างๆ เช่น มะเร็งที่เต้านม, ช่องท้อง, ลำไส้, ต่อมลูกหมาก, สมอง และอื่นๆ เพราะสารไอโซฟลาโวนมีคุณสมบัติเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระ ( antioxidant ) โดยจับกับอนุมูลอิสระของออกซิเจนซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดมะเร็ง (Naim และคณะ, 1976 ) และต่อต้านสารก่อมะเร็ง (anticarcinogen ) ( Adlercreutz และคณะ, 1986 )
2. ป้องกันการอุดตันภายในผนังเส้นเลือด (Atherosclerosis) โดยการเกิดการอุดตันในเส้นเลือดจะทำให้อัตราการไหลของเลือดลดลงเป็นสาเหตุของการเกิดโรคหัวใจ ( heart disease ) (Ferry และคณะ, 1996) นอกจากนี้ยังพบว่าไอโซฟลาโวนมีส่วนในการลดระดับ LDL-cholesterol (low density lipoprotein) และเพิ่มปริมาณ HDL-cholesterol (high density lipoprotein) โดยการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ LDL ในรูปออกซิไดซ์ฟอร์มของ LDL ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันของเส้นเลือด ( Bingham และคณะ, 1998 )
3. ป้องกันโรคกระดูกพรุน (Osteoporosis) อันเนื่องมาจากการลดต่ำลงของฮอร์โมนเอสโตรเจนในเพศหญิงในวัยหมดประจำเดือน โดยการลดต่ำลงของฮอร์โมนเอสโตรเจนจะกระตุ้นการทำงานของเซลล์ที่ทำลายเนื้อเยื่อกระดูกและเซลล์นี้จะขึ้นอยู่กับการทำงานของเอนไซม์ไทโรซีน ไคเนส (Tyrosine kinase ) สารไอโซฟลาโวนมีความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้จึงเป็นการป้องกันโรคกระดูกพรุน ( Akiyama และคณะ, 1987 )
4. บรรเทาอาการข้างเคียงที่เกิดขึ้นเนื่องจากวัยหมดประจำเดือน เช่น นอนไม่หลับ , อาการทางประสาท เนื่องจากไอโซฟลาโวนมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลคล้ายฮอร์โมนเอสโตรเจนจึงเป็นทางเลือกที่ปลอดภัยในการบำบัดอาการที่เกิดในวัยหมดประจำเดือน ( Tham และคณะ,1998 )

### 3.3 กระบวนการแยกสารโดยใช้เยื่อแผ่น

กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นอาศัยความแตกต่างของสารหรือโมเลกุลสองชนิดขึ้นไปที่มีขนาดหรือน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน หลักการสำคัญของการแยกจะต้องมีแรงขับเคลื่อนที่ทำให้สารละลายไหลผ่านเยื่อแผ่นและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้นหรือผลต่างของความดัน โดยสารละลายป้อน (feed) ไหลผ่านเยื่อแผ่นโดยแรงขับเคลื่อน สารละลายส่วนที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ คือ เพอเมอเท (permeate) และส่วนที่ไม่สามารถผ่านได้ คือ รีเทนเทท ( retentate หรือ concentrate ) ส่วนลักษณะของเยื่อแผ่น คือ ตัวกลางซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆ หรือหยดขนาดเล็กมากๆ ที่ทำหน้าที่กั้น

ระหว่าง 2 เฟส โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็งหรืออาจเป็นของเหลว คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของเยื่อแผ่นคือคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น(semi-permeable) การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการดึงดูดกันระหว่างเยื่อแผ่นกับสารนั้นๆหรือจากขนาดรูพรุนหรือจากการมีประจุของเยื่อแผ่นเป็นต้น ( รัตน์ จิระรัตนานนท์ , 2541 )

ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแยกสูงและประหยัดพลังงาน แต่กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นก็มีข้อจำกัด เช่น การเกิดคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชัน ( CP ) คือการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นสูงกว่าใน bulk solution ซึ่งลดประสิทธิภาพของการแยกทั้งในแง่ของฟลักซ์และการกักกันและทำให้เกิดฟาวลิง การลดระดับคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันในระดับหนึ่ง ทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้มีการป้อนสารผ่านเยื่อแผ่นแบบไหลขวางและที่ความเร็วสูงซึ่งจะช่วยให้ตัวถูกละลายที่สะสมเกิดการแพร่กลับไปใน bulk solution

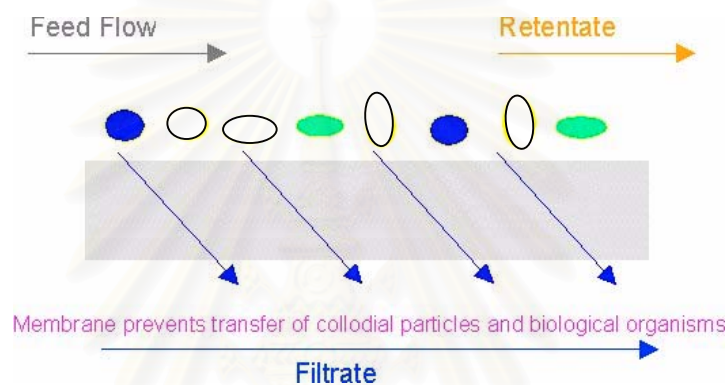
การเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น หมายถึง การสะสมอุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเยื่อแผ่นและภายในรูพรุนซึ่งทำให้ฟลักซ์ลดลงและการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนแปลง ฟาวลิงเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเยื่อแผ่นและสารละลาย สิ่งสะสมอุดตันอาจไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม

กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นที่สำคัญ ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

### 3.3.1 ไมโครฟิลเตรชัน ( Microfiltration , MF)

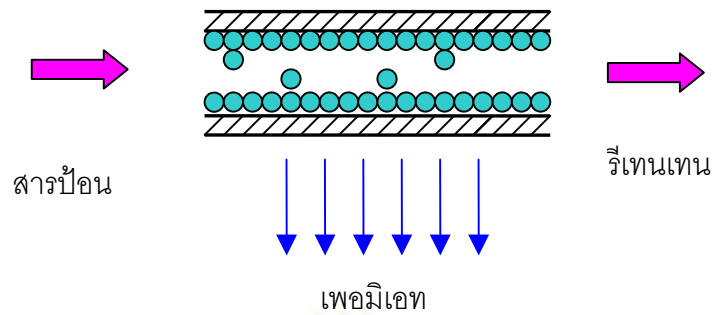
ไมโครฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นในการแยกสารที่มีตัวถูกละลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชัน หรือสารแขวนลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายอยู่ระหว่าง 1 – 5 บรรยากาศ เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันมีขนาดรูพรุน 0.1 – 10 ไมโครเมตร ดังนั้นตัวถูกละลายที่แยกโดยเยื่อแผ่นชนิดนี้ จึงมีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 100,000 ขึ้นไป ตัวอย่างการใช้งานหลักของไมโครฟิลเตรชัน เช่น ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง โดยทั่วไปแล้วไมโครฟิลเตรชัน

จะแยกสารแขวนลอยซึ่งมีขนาดระหว่าง 0.02 – 10 ไมโครเมตรและสารพิษที่อยู่ในน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วงนี้ แต่การใช้งานกระบวนการไมโครฟิลเตรชันสำหรับบำบัดน้ำเสียมีข้อจำกัดของการลดลงของค่าเพอมีเอทฟลักซ์ต่อเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการเกิดการอุดตันที่รูพรุนของเยื่อแผ่นหรือเกิดเป็นชั้นของสารแขวนลอยที่เยื่อแผ่นโดยความดันมีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อการไหลผ่านของสารผ่านเยื่อแผ่นสูงขึ้น ส่วนการเกิดการอุดตันจะมีผลต่อค่าการกระจายของรูพรุนของเยื่อแผ่น นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่น โวมน้ำผลไม้เพื่อการทำให้ใส เป็นต้น



รูปที่ 3.6 แสดงระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

ไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง เป็นการป้อนสารละลายขนานกับเยื่อแผ่นหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมีเอทซึ่งเรียกว่า cross flow หรือ tangential flow ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน การป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีผลของแรงเฉือน ทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าเยื่อแผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.7 ดังนั้นจึงลดการเกิดคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันมีการสะสมของเค้กเพียงบางๆ เท่านั้น การลดลงของฟลักซ์ไม่มากเท่าในการกรองแบบ dead – end จึงเหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันจึงเป็นไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะการไหลขวางของไมโครฟลิดเตรชัน

ฟาวลิงและเจลที่เกิดขึ้นในไมโครฟลิดเตรชันแบบไหลขวาง อาจเกิดจากการดูดซับของตัวถูกละลาย ( โปรตีน , ไขมัน ) บนผิวหน้าเยื่อแผ่นและบนผนังรูพรุน เนื่องจากแรงกระทำเช่น พันธะไฮโดรเจนหรือ hydrophobic interaction หรือการเกิดคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันหรือการอุดตันการบดบังรูพรุน สำหรับไมโครฟลิดเตรชันแบบไหลขวาง ฟาวลิงมักมีความหมายเฉพาะการสะสมอุดตันเฉพาะภายในรูพรุนและฟาวลิงเกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลกับเยื่อแผ่นไม่สามารถผันกลับได้ การกำจัดฟาวลิงจึงต้องล้างด้วยสารเคมี โดยฟาวลิงแบ่งเป็นสองลักษณะคือ ฟาวลิงภายนอกซึ่งเกิดที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นและฟาวลิงภายในซึ่งเกิดที่ผิวหน้าภายในของรูพรุน ( Nakamura และคณะ , 1998 )

ในขณะที่เจลเกิดได้ 2 กรณี กรณีแรกสารนั้นมีความเข้มข้นสูงถึงขีดจำกัดของการละลาย เจลที่เกิดขึ้นจึงเป็นเจลตะกอนสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำ แต่ถ้าสารนั้นเป็นแป้ง เพคติน สามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเจลที่ไม่ผันกลับและอาจมีฟาวลิงบางส่วนที่ผันกลับได้ เมื่อกล่าวถึงการกรองความแตกต่างระหว่างเค้กและเจล คือ เจลเป็นการสะสมของสารโมเลกุลใหญ่ ส่วนเค้กเป็นการสะสมเป็นชั้นของอนุภาคหรือสารแขวนลอยและเจลมีความหนาอยู่ในระดับหน่วยไมครอนในขณะที่ความหนาของเค้กอาจวัดได้หลายมิลลิเมตร ดังนั้นในอัลตราฟลิดเตรชันจึงเรียกชั้นสะสมว่าเจล ส่วนในไมโครฟลิดเตรชันแบบไหลขวางเรียกชั้นดังกล่าวว่า เค้ก

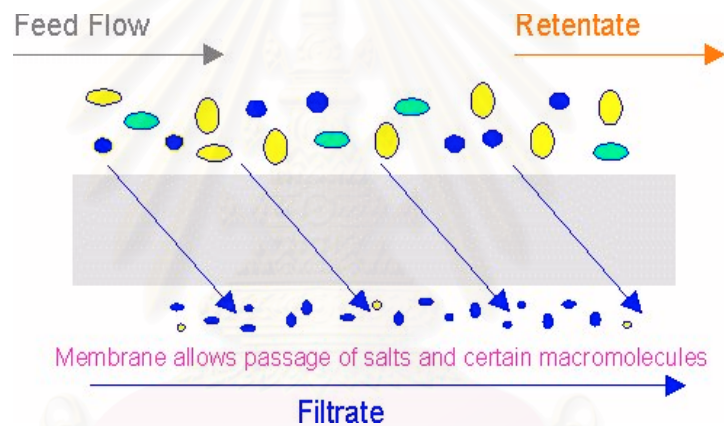
การประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟลิดเตรชัน

1. อุตสาหกรรมน้ำผลไม้และน้ำดื่ม
2. อุตสาหกรรมนมและอาหาร
3. อุตสาหกรรมบำบัดน้ำและการบำบัดน้ำทิ้ง
4. เทคโนโลยีชีวภาพ



### 3.3.2 อัลตราฟิลเตรชัน ( Ultrafiltration , UF )

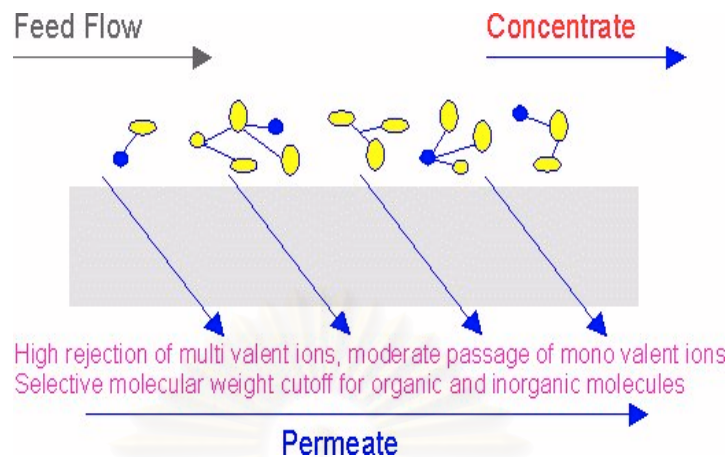
อัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นในการแยกสาร โดยอาศัยความสามารถในการผ่านเยื่อแผ่นของสารซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันหรือเรียกว่าใช้กลไกการคัดขนาดและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนซึ่งสารที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถผ่านเยื่อแผ่นได้และสารที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกกักเก็บไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นประมาณ 0.1 – 1.0  $\mu\text{m}$  ความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 1 – 10 บรรยากาศ เยื่อแผ่นที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นที่แผ่นสมมาตรที่มีชั้นผิวหนา 0.1 – 2  $\mu\text{m}$  ใช้แยกสารที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลคัตออฟ 10,000 – 100,000 มักนิยมใช้ในการแยกโปรตีนและใช้ในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchanger) เป็นต้น (ณัฐพงษ์ เลิศปีติภัทร , 2532 )



รูปที่ 3.8 แสดงระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

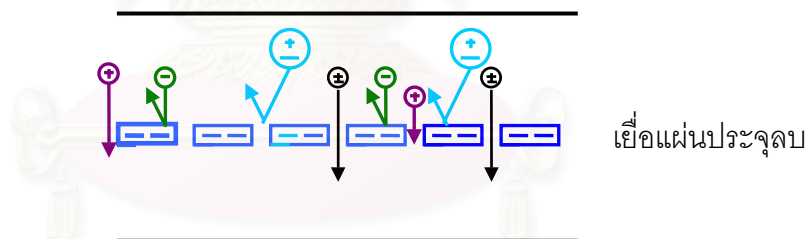
### 3.3.3 นาโนฟิลเตรชัน ( Nanofiltration , NF )

เป็นกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อน โดยความดันที่ใช้จะมีค่าต่ำกว่าความดันที่ใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ โดยอยู่ในช่วง 5 – 30 บรรยากาศ มีค่าน้ำหนักโมเลกุลคัตออฟ 350-10,000 เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนประมาณ 1 - 10 นาโนเมตร เยื่อแผ่นที่ใช้ในนาโนฟิลเตรชันส่วนใหญ่จะเป็นเยื่อแผ่นที่มีประจุซึ่งต่างจากอัลตราฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับ เนื่องจากบนเยื่อแผ่นยังมีกลุ่มของคาร์บอกซิลิกหรือกลุ่มอะมิโนจากวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาซึ่งเยื่อแผ่นที่ใช้อาจทำจาก โพลีเอไมด์หรือซัลโฟเนตโพลีอีเทอร์ซัลโฟน ลักษณะการกรองโดยใช้นาโนฟิลเตรชันแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงระบบการกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน

สำหรับกลไกการแยกของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันคือกลไกการคัดขนาดและกลไกของประจุ ดังนั้นตัวแปรสำคัญของตัวถูกละลายไม่ได้ขึ้นกับความแตกต่างของขนาดตัวถูกละลายกับขนาดของเยื่อแผ่นเท่านั้นยังขึ้นกับความแรงของประจุของเยื่อแผ่นและตัวทำละลายด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงกลไกการแยกอนุภาคที่มีประจุของเยื่อแผ่นประจุลบ

แรงขับเคลื่อนให้สารละลายไหลผ่านเยื่อแผ่นของนาโนฟิลเตรชันใช้ความดันต่างคร่อมระหว่างเยื่อแผ่นเช่นเดียวกับอัลตราฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับ ในการแยกสารโดยใช้นาโนฟิลเตรชันอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนจะสามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ นอกจากนี้ถ้าเป็นสารที่มีประจุจะมีผลกระทบของแรงทางไฟฟ้าของสารละลายกับเยื่อแผ่นที่มีประจุซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Donnan equilibrium เมื่อเยื่อแผ่นเป็นประจุลบจะเกิดแรงดึงดูดกับไอออนบวกและเกิดแรงผลักกับไอออนลบ (Toshinori และคณะ, 1994)

## ข้อดีของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

ค่าความดันที่ใช้ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีค่าต่ำกว่าความดันที่ใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับจึงมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยกว่ากระบวนการออสโมซิสผันกลับที่อัตราการใช้พลังงานเดียวกัน ( Gaubert และคณะ ,1997 )

## การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

1. การกำจัดเกลือจากน้ำกร่อย เพื่อผลิตน้ำดื่มและน้ำสะอาดสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ( Erikson, 1988 )
2. การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งมีองค์ประกอบของสีย้อมและการนำสีย้อมในน้ำเสียกลับมาใช้ ( Yazhen และคณะ,1999 )
3. การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการตกผลึกแลคโตสจากหางนม ( Guu และ Zall , 1992 )
4. การประยุกต์ใช้ในการนำสารที่อยู่ในน้ำหมัก เช่น โปรตีนและน้ำตาลกลูโคส กลับมาใช้ประโยชน์ ( Nihal A., 1998 )

### 3.3.4 ค่าเพอมีเอทฟลักซ์และค่าการกักกัน

ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ ( $J_v$ ) และค่าการกักกัน ( $R$ ) แสดงดังสมการที่ ( 3.1 ) , ( 3.2 ) ตามลำดับ ( Yasuhito ,1996 )

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \cdot \Delta \pi) \quad (3.1)$$

$$R = 1 - C_p / C_m \quad (3.2)$$

เมื่อ  $J_v$  คือ ค่าเพอมีเอทฟลักซ์

$\sigma$  คือ reflection coefficient เป็นค่าที่แสดงการเลือกผ่านและมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1

ถ้า  $\sigma$  มีค่าเท่ากับ 1 คือตัวถูกละลายไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้

$\sigma$  มีค่าเท่ากับ 0 คือตัวถูกละลายสามารถผ่านเยื่อแผ่นได้หมด

$\Delta \pi$  คือ ความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น

$\Delta P$  คือ ความดันผ่านเยื่อแผ่น

- $L_p$  คือ ค่า permeability ของน้ำบริสุทธิ์  
 $R$  คือ ค่าการกักกัน  
 $C_p$  คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟอมีเอท  
 $C_m$  คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น

กรณีในตัวถูกละลายถูกกักกันอย่างสมบูรณ์ค่า reflection coefficient ( $\sigma$ ) มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟอมีเอท  $C_p = 0$  และค่า  $\Delta\pi$  สามารถหาได้จากความเข้มข้นที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นดังสมการ

$$\Delta\pi = \pi(C_m) - \pi(C_p) = \pi(C_m) \quad (3.3)$$

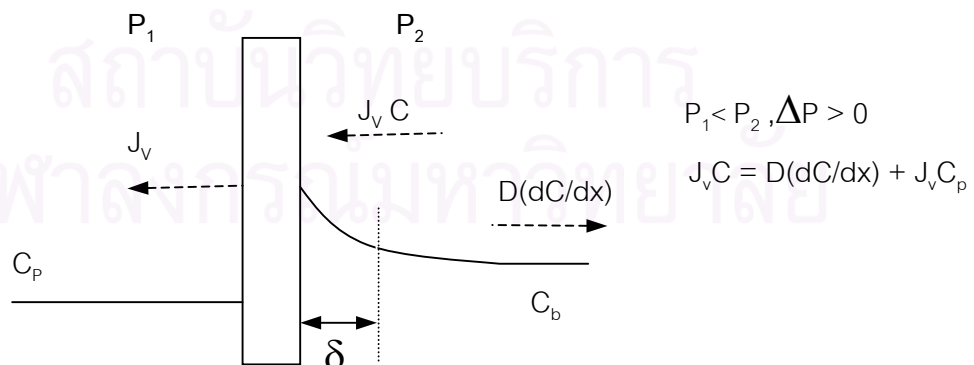
สมการที่ (3.1) สามารถเขียนได้เป็น

$$J_v = L_p(\Delta P - \pi(C_m)) \quad (3.4)$$

ค่า  $L_p$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฟอมีเอทฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ ( $J_w$ ) และค่า transmembrane pressure ( $\Delta P$ ) ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$J_w = L_p \cdot \Delta P \quad (3.5)$$

กรณีที่ระบบมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ ค่า  $C_m$  จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของ bulk solution แต่ในความเป็นจริงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นสูงกว่า bulk solution เนื่องจากเกิดการสะสมของตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่น การที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้ามีสูงกว่า bulk solution เรียกว่า คอนเซนเทรชัน โพลาริเซชัน มีผลทำให้ฟลักซ์ลดลงแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงการเกิดคอนเซนเทรชัน โพลาริเซชัน (concentration polarization)

### 3.3.5 แบบจำลองสำหรับค่าฟลักซ์

#### 3.3.5.1 แบบจำลองเจลโพลาริเซชัน (Gel polarization model)

สมการสมดุลของตัวถูกละลายที่ภาวะของการเกิดคอนเซนเทรชัน โพลาริเซชัน เขียนได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} \text{อัตราการพาสู่อะไหล่แผ่น} \\ \text{ของตัวถูกละลาย} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{อัตราการแพร่กลับ} \\ \text{ของตัวถูกละลาย} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{อัตราการผ่านเยื่อแผ่น} \\ \text{ของตัวถูกละลาย} \end{pmatrix}$$

$$J_v C - \frac{DdC}{dx} = J_v C_p \quad (3.6)$$

อินทิเกรตโดยใช้สภาวะขอบเขตคือ ที่  $x = 0$ ,  $C = C_b$  และที่  $x = \delta$ ,  $C = C_m$  จะได้

$$J_v = \frac{D}{\delta} \ln \frac{C_m - C_p}{C_b - C_p}$$

หรือ 
$$J_v = k \ln \frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $C, C_b, C_m, C_p$  = ความเข้มข้นของสารละลายใน bulk ที่ผิวเยื่อแผ่นและในเฟอมีเอทตามลำดับ  
 $x$  = ระยะห่างจากชั้นขอบเขต

$$k = \frac{D}{\delta} = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย}$$

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)

$\delta$  = ความหนาของชั้นขอบเขต

จากสมการที่ 3.7 จัดรูปใหม่

$$C_m - C_p = (C_b - C_p) \cdot \exp(J_v / k) \quad (3.8)$$

ในกรณีที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟอมีเอทมีค่าน้อยมาก  $C_p = 0$  สมการที่ (3.8) จะเปลี่ยนไปดังนี้

$$C_m = C_b \cdot \exp(J_v / k) \quad (3.9)$$

ถ้าการไหลอยู่ในช่วง laminar flow ค่า  $k$  สามารถหาได้จากสมการ

$$N_{Sh} = 1.62(N_{Re} N_{Sc} d_h / L)^{1/3} \quad (3.10)$$

ในกรณีที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์มีค่าสูง ( $J_v / k > 3$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะใช้สมการตามของรายงานวิจัยของ Weiss และคณะ, 1991 และ Anazawa และคณะ, 1992

$$N_{Sh} = 1.62(N_{Re}^{1/3} + 300N_{Re-y}^{1.1})(N_{Sc} d_h / L)^{1/3} \quad (3.11)$$

โดย  $N_{Re-y} (= d_h \cdot J_v / v_w)$  เป็นค่า reynold number ที่แสดงในรูปของค่า  $J_v$  และสมการ (3.10) และ (3.11) จะเท่ากันเมื่อค่าฟลักซ์เท่ากับศูนย์

$$\text{เมื่อ } N_{Sh} = \text{Sherwood number} = \frac{kd_h}{D}$$

$$N_{Re} = \text{Reynolds number} = \frac{ud_h}{\nu}$$

$$N_{Sc} = \text{Schmidt number} = \nu / D$$

$$\nu = \mu / \rho$$

$\rho$  = ความหนาแน่นของสารละลาย

$\mu$  = ความหนืดของสารละลาย

$d_h$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรือช่องที่ละลายไหลผ่าน

$L$  = ความหนาของเยื่อแผ่น

$u$  = ความเร็วของการไหล

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)

โดยทั่วไปค่า  $k$  เป็นฟังก์ชันกับค่าความเร็วในการไหล ค่า equivalent coefficient ของตัวถูกละลาย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายและค่าความหนืดของสารละลาย

หากความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่น มีค่าสูงถึงขีดจำกัดการละลาย ( $C_g = \text{gel concentration}$ ) ของสารนั้น ตัวถูกละลายอาจเกิดลักษณะคล้ายเจลที่บริเวณผิวเยื่อแผ่น ปฏิกิริยาการนี้เรียกว่า เจลโพลารไรเซชัน ชั้นเจลจะครอบคลุมผิวเยื่อแผ่นมีลักษณะคล้ายเยื่อแผ่นอีกแผ่นหนึ่งต่ออนุกรมอยู่กับเยื่อแผ่นเดิม ทำให้ความต้านการไหลสูงขึ้น ฟลักซ์ของสารละลายจึงมีค่าลดลงและชั้นเจลอาจทำให้ค่าการกักกันสารของเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงไปด้วยซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติทางกลของชั้นเจลที่เกิดขึ้น ถ้าตัวถูกละลายขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่ในชั้นเจลได้เร็วกว่าในเยื่อแผ่นเดิม ค่าการกักกันตัวถูกละลายขนาดเล็กจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าตัวถูกละลายขนาดเล็กเคลื่อนที่ผ่านชั้นเจลสู่เยื่อแผ่นเดิมน้อยลงทำให้ค่าการกักกันเพิ่มขึ้น

ในสภาวะการเกิดเจล  $C_m = C_g$  แทนในสมการ 3.8

$$C_g - C_p = (C_b - C_p) \cdot \exp(J_v / k) \quad (3.12)$$

หรือจัดรูปใหม่

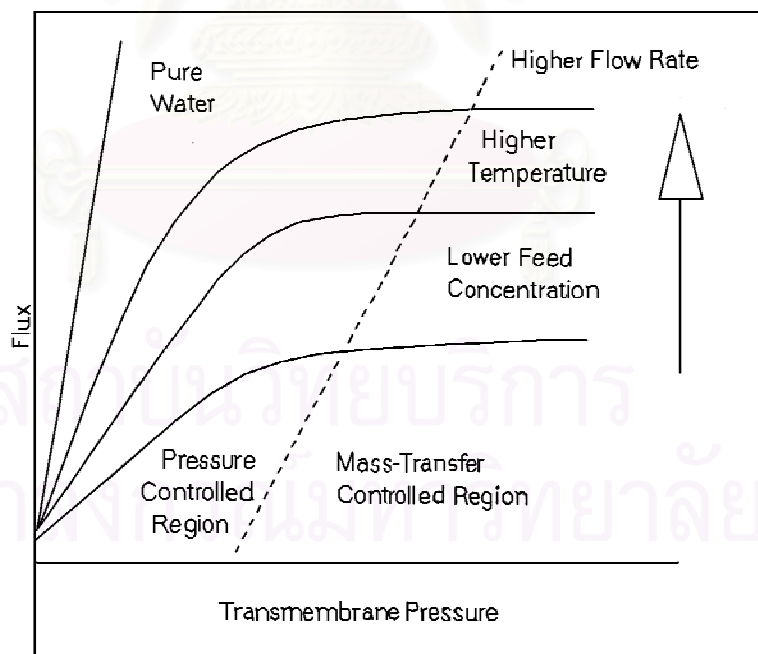
$$J_v = k \ln \frac{C_g - C_p}{C_b - C_p} \quad (3.13)$$

กรณีที่รีเจคชันมีค่าสูง  $C_p$  จะมีค่าน้อยมาก สมการที่ (3.11) ลดรูปเป็น

$$J_v = k \ln C_g / C_b \quad (3.14)$$

ค่า  $C_g$  สามารถหาได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_v$  และ  $\ln C_b$  จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเป็น  $-k$  และจุดตัดบนแกนที่  $J_v = 0$  คือ  $C_g$

ในกรณีนี้แรงขับเคลื่อนในการแพร่กลับของตัวถูกละลายเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นจะมีค่าคงที่ การเพิ่มความดันจึงไม่มีผลทำให้อัตราการแพร่กลับของตัวถูกละลายสูงขึ้นแต่จะเป็นการเพิ่มอัตราการสะสมตัวถูกละลายในชั้นเจลทำให้ชั้นเจลอัดตัวแน่นขึ้น ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเนื่องจากการเกิดเจลโพลาริเซชันจะมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าคงที่ เรียกช่วงที่ค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดันว่า ช่วงการควบคุมโดยการถ่ายเทมวล ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดัน

### 3.3.5.2 แบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่

#### 1. Complete Blocking Model ( CBM )

แบบจำลองนี้มีสมมติฐานว่าโมเลกุลหรืออนุภาคที่เคลื่อนที่มาถึงเยื่อแผ่นจะเข้าไปอุดตันรูพรุน โดยทุกๆโมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนร่วมในการอุดตันรูพรุนโดยไม่มีการซ้อนทับกัน สมการอัตราการไหลของเพอมีเอทที่เสนอในแบบจำลองนี้คือ

$$Q = Q_o - K_b V \quad (3.15)$$

เมื่อ  $Q$  = อัตราการไหลโดยปริมาตรของเพอมีเอทที่เวลาใดๆ

$K_b$  = ค่าคงที่การกรองของ CBM

$V$  = ปริมาตรของเพอมีเอท

$Q_o$  = อัตราการไหลโดยปริมาตรของเพอมีเอทเริ่มต้น ( ก่อนการอุดตัน )

สมการ ( 3.15 ) สามารถเขียนใหม่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอมีเอทกับเวลาได้ดังนี้

$$K_b V = Q_o (1 - \exp(-K_b t)) \quad (3.16)$$

เมื่อ  $t$  = เวลา

ถ้ากลไกการอุดตันเป็นไปตาม CBM ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V$  กับ  $\exp(t)$  ควรเป็นเส้นตรง

#### 2. Intermediate Blocking Model ( IBM)

แบบจำลอง IBM จะมีความคล้ายคลึงกับ CBM โดย IBM กล่าวว่า ในการเกิดการอุดตันโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งสามารถซ้อนทับอยู่บนโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งได้ ดังนั้น

$$\frac{1}{Q} = K_i t + \frac{1}{Q_o} \quad (3.17)$$

เมื่อ  $K_i$  = ค่าคงที่การกรองของ IBM

สมการ ( 3.17) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$K_i V = \ln(K_i Q_o t + 1) \quad (3.18)$$

หรือ

$$K_i Q_o t = \exp(K_i V) - 1 \quad (3.19)$$



ดังนั้นหากกลไกเป็นไปตามแบบจำลอง IBM เมื่อพลอตระหว่าง  $t$  กับ  $\exp(V)$  จะได้กราฟเส้นตรง

### 3. Standard Blocking Model ( SBM )

SBM เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองสารละลายที่มีอนุภาคเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นมาก โดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุนได้และมีอนุภาคบางส่วนถูกดูดซับอยู่ภายในรูพรุนทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเยื่อแผ่นเท่านั้นไม่เกิดขึ้นบางบนผิวภายนอกของเยื่อแผ่น ดังนั้นรูพรุนของเยื่อแผ่นจะมีปริมาตรลดลงเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของเพอมีเอท ดังนั้น

$$Q = Q_o \left( 1 - K_s \frac{V}{2} \right)^2 \quad (3.20)$$

เมื่อ  $K_s$  = ค่าคงที่การกรองของ SBM

สมการ 3.20 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Q_o \frac{t}{V} = 1 + \frac{K_s Q_o t}{2} \quad (3.21)$$

ซึ่งสามารถตรวจสอบผลการทดลองว่าเป็นไปตามแบบจำลอง SBM หรือไม่จากสมการ 3.21 โดยพลอตกราฟระหว่าง  $t/V$  กับ  $t$  และกราฟควรเป็นเส้นตรงหากกลไกการอุดตันเป็นไปตามแบบจำลอง SBM

### 4. Cake Filtration Model ( CFM )

กรณีที่เกิดขึ้นเค้กบนผิวหน้าเยื่อแผ่นโดยไม่มีการอุดตันภายในรูพรุนจะได้ว่า

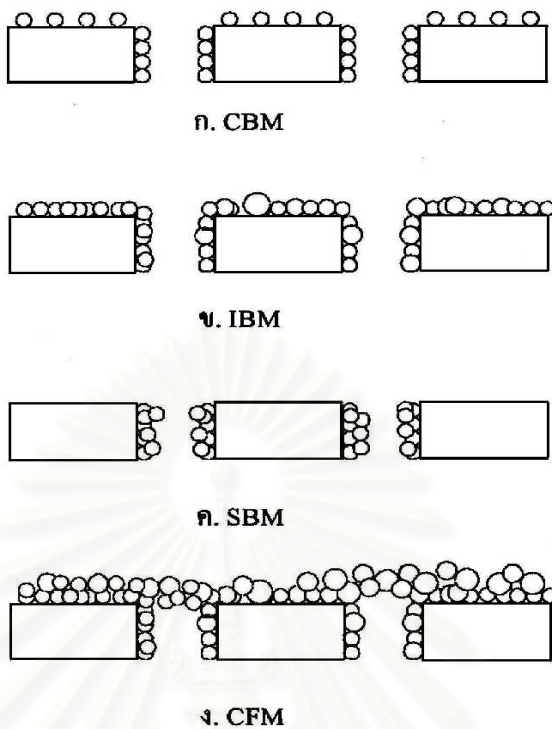
$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_o} + K_c V \quad (3.22)$$

เมื่อ  $K_c$  = ค่าคงที่การกรองของ CFM

สมการ 3.22 เขียนในรูปของปริมาตรและเวลาได้ดังนี้

$$K_c V = \frac{2t}{V} - \frac{2}{Q_o} \quad (3.23)$$

เช่นเดียวกันสามารถตรวจสอบว่าผลการทดลองเป็นไปตาม CFM โดยการพลอตกราฟระหว่างค่า  $V$  และ  $t/V$  หรือไม่จากสมการ 3.23 ภาพจำลองแสดงการอุดตันตามแบบจำลอง CBM, IBM, SBM และ CFM ดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงกลไกการดูดซับตามแบบจำลองต่างๆ

แบบจำลองการทรงภายใต้ความดันคงที่ทั้ง 4 แบบจำลองนั้นสามารถเขียนได้ในรูปของสมการทั่วไป ซึ่งเรียกว่า characteristic equation ดังนี้

$$\frac{d^2 t}{dV^2} = \alpha \left( \frac{dt}{dV} \right)^\beta \quad (3.24)$$

เมื่อ  $\alpha$  และ  $\beta$  คือค่าคงที่ โดยที่  $\beta$  จะแสดงลักษณะเฉพาะของกลไกการดูดซับแบบต่างๆ ดังนี้

| แบบจำลอง | CBM | SBM | IBM | CFM |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| $\beta$  | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 0.0 |

เมื่อพลอต  $dt^2 / dV^2$  กับ  $dt / dV$  บนสเกล log - log จะสามารถหาค่า  $\beta$  ได้จากความชันของกราฟ

## 5. แบบจำลอง statistical-mechanical theory

เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาของนาโนฟิลเตรชันโดยอธิบายลักษณะการถ่ายเทมวลและค่าการกักกันขึ้นกับปัจจัย 3 อย่างคือ ความดัน ความเข้มข้นและอัตราการไหลของสายป้อน ความสัมพันธ์ของค่าเพอมีเอทพลักซ์  $J_v = f(p, c_b)$  และ  $R = f(p, c_b)$  จะมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Nihal และคณะ , 1998 )

เพอมีเอทพลักซ์และค่าการกักกันหาได้จากสมการ

$$J_v = (D_1 c_w + D_2) \Delta p_m \quad (3.25)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{P}{\sigma} \frac{1}{J_v} + \frac{1}{\sigma} \quad (3.26)$$

ความเข้มข้นที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นหาได้จากสมการ

$$c_w = c_b + (c_b - c_p)(e^{J_v/k} - 1) \quad (3.27)$$

ความแตกต่างของความดันคร่อมเยื่อแผ่นหาได้จากสมการ

$$\Delta p_m = \Delta p - \sigma \Delta \Pi \quad (3.28)$$

เมื่อ  $\Delta p$  เป็นค่าความแตกต่างของความดันและ  $\Delta \Pi$  เป็นความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างเยื่อแผ่น โดยค่า  $\Delta \Pi$  หาได้จากสมการ

$$\Delta \Pi = (c_b - c_p)RT \quad (3.29)$$

ค่าการถ่ายเทมวล (k) คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N_{sh}$   $N_{Re}$  และ  $N_{Sc}$

$$N_{sh} = 0.046(N_{Re})^{0.75} (N_{Sc})^{0.33} \quad (3.30)$$

## 6. แบบจำลอง Donan –steric partitioning pore model ( DSPM )

เป็นแบบจำลองสำหรับเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันที่อธิบายการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายไปยังเยื่อแผ่นโดยมีผลจากประจุบนเยื่อแผ่นและสารละลายซึ่งเป็นสมการที่ขยายมาจากสมการของแพลงค์ (Johan และคณะ ,2001 )

$$j_i = -K_{i,d}D \frac{dc_i}{dx} - \frac{z_i c_i K_{i,d} D_i}{RT} F \frac{d\psi}{dx} + K_{i,c} c_i V \quad (3.31)$$

เมื่อ  $j_i$  เป็นค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลาย i ( $\text{ms}^{-1}$ )

$K_{i,d}$  สัมประสิทธิ์ของการต้านทานการแพร่

$D_i$  ค่า bulk diffusivity ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

$c_i$  ค่าความเข้มข้นในเยื่อแผ่น ( $\text{mol m}^{-3}$ )

$z_i$  ค่าวาเลนซ์ของ I

$F$  ค่าคงที่ฟาราเดย์

$R$  ค่าคงที่ของก๊าซ

$T$  อุณหภูมิ

$\psi$  ค่าศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน (V)

$K_{i,c}$  สัมประสิทธิ์การต้านทานของการพา

$V$  ความเร็วของตัวถูกละลาย ( $\text{ms}^{-1}$ )

$X$  ความหนาของเยื่อแผ่น (m)

เทอมในสมการที่ (3.31) แสดงการถ่ายเทเนื่องจากการแพร่ สนามไฟฟ้าและการพาตามลำดับ สำหรับตัวถูกละลายที่ไม่มีประจุ เทอมที่เกี่ยวกับไฟฟ้าในสมการจะถูกตัดออกไปเหลือเพียงผลของการแพร่และการนำของการถ่ายเทตัวถูกละลายในเยื่อแผ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### เครื่องมือและสารเคมี

#### 4.1 สารเคมี

1. กากถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันออก
2. เอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์ ( ปริมาตรโดยปริมาตร ) ของบริษัทไทยแอลกอฮอล์
3. เอทานอล 99.9 เปอร์เซ็นต์ ( ปริมาตรโดยปริมาตร ) ของบริษัทไทยแอลกอฮอล์
4. เมทานอล 33 เปอร์เซ็นต์ ( ปริมาตรโดยปริมาตร ) ของบริษัทแลปสแกน
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 – 3 เปอร์เซ็นต์ ( น้ำหนักโดยปริมาตร )

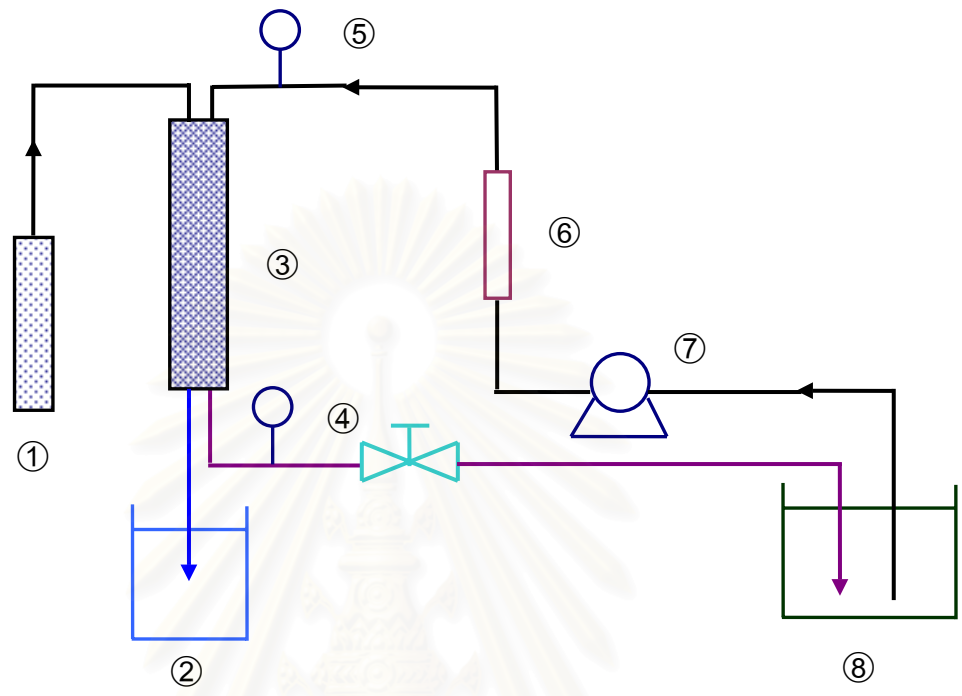
#### 4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 4.2.1 อุปกรณ์สำหรับสกัดไอโซฟลาโวนจากกากถั่วเหลือง ประกอบด้วย

1. Flask ขนาด 500 มิลลิลิตรต่อกับคอนเดนเซอร์
2. เครื่องให้ความร้อนแบบมีแม่เหล็ก
3. บีมสูญญากาศ
4. เครื่องระเหยสูญญากาศ ( Rotary Evaporator )

##### 4.2.2 ชุดการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

ประกอบด้วยถังป้อนสแตนเลสขนาด 20 ลิตร บีมสแตนเลสแบบโรตารีขนาด 0.75 กิโลวัตต์ เพื่อจ่ายสารสกัดจากถั่วเหลืองผ่านเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันทำด้วยเซรามิก ( type 1M-1 , Toshiba ceramics co.,ltd . ) เคลือบภายในแต่ละท่อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 มิลลิเมตร ยาว 85 เซนติเมตรและมีพื้นที่การกรอง 0.2030 ตารางเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางรูมีขนาด 0.2 ไมครอน ( สามารถปิดกั้นอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 )



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมแสดงระบบการกรองโดยใช้ไมโครฟิลเตรชัน

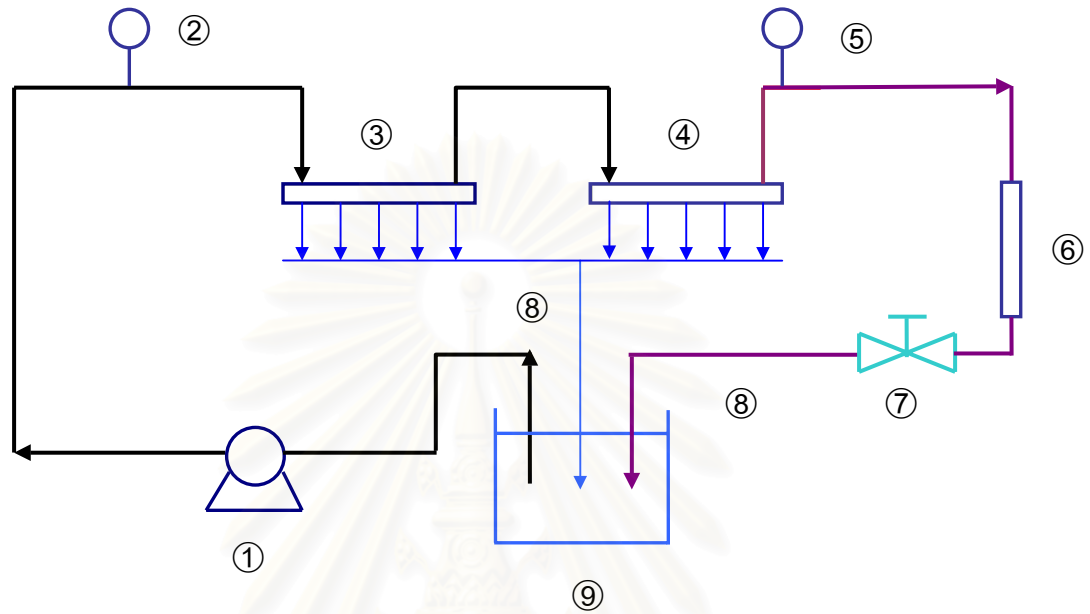
1. ถังไนโตรเจน
2. ถังเพอมีเอท
3. เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน
4. เกจความดันขาเข้า
5. เกจความดันขาออก
6. ถูกลอยวัดอัตราการไหล
7. ปั๊มหมุนเวียน
8. ถังสารป้อน

วิทยาลัยบัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
รูปที่ 4.2 แสดงชุดกรองไมโครฟิลเตรชัน  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

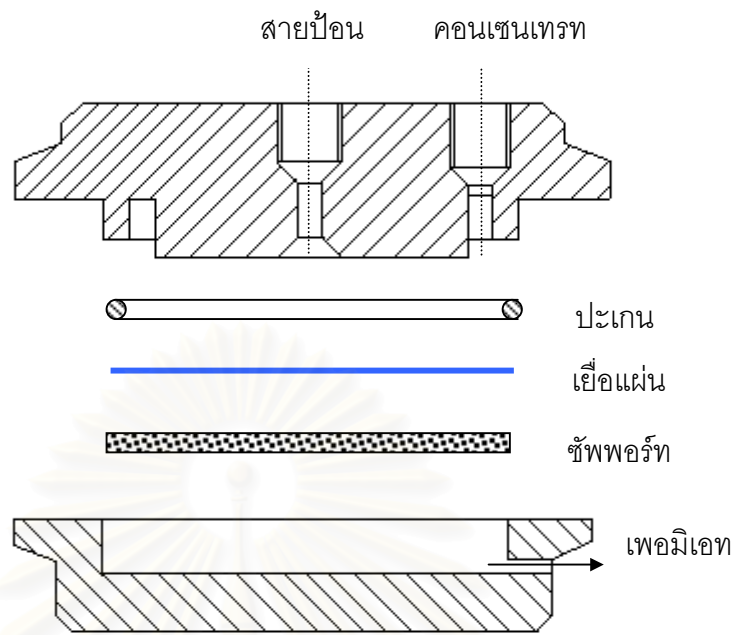
### 4.2.3 ชุดการกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน



รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมแสดงระบบการกรองโดยใช้นาโนฟิลเตรชัน

1. ปั๊มหมุนเวียน
2. เกจความดันขาเข้า
3. โมดูลนาโนฟิลเตรชัน
4. เกจความดันขาออก
5. โมดูลนาโนฟิลเตรชัน
6. ลูกลอยวัดอัตราการไหลของสาร
7. วาล์วขาออก
8. สายเพอมีเอท
9. สายคอนเซนเทรท
10. ถังสารป้อน 20 ลิตร





รูปที่ 4.4 แสดงโมดูลของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน

โมดูลของเยื่อแผ่นมีช่องสำหรับใส่เยื่อแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิว 0.0044 ตารางเมตร ซึ่งโมดูลได้ถูกออกแบบเพื่อทำให้เกิดการไหลขวางเพื่อลดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและฟาวลิงของเยื่อแผ่น โดยที่สายป้อนจะเข้ามาทางช่องตรงกลางของส่วนบนของเยื่อแผ่นแล้วแผ่กระจายไปในแนวรัศมีและออกจากโมดูลที่ช่องด้านข้าง ความดันปรับโดยวาล์วที่อยู่ที่สายออกของโมดูล เยื่อแผ่นที่ใช้คือเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน NF - 7450 ( Nitto Denko Co. ) ข้อมูลของเยื่อแผ่นแสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงข้อมูลของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน NF - 7450

|   |  |
|---|--|
| วัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น  | ซัลโฟเนต โพลีเอสเตอร์ซัลโฟน ( Sulfonated polyether sulfone ) |
| อุณหภูมิสูงสุด ( องศาเซลเซียส )                                       | 40   |
| ความดันสูงสุด ( เมกกะปาสคาล )   | 3  |
| ชนิดของประจุบนเยื่อแผ่น   | ประจุลบ ( Negative )   |
| Permeability ( $L_p \times 10^5$ ( $m \cdot s^{-1} \cdot Mpa^{-1}$ )) | 2  |
| MWCO  | ประมาณ 600 - 800   |



รูปที่ 4.5 แสดงชุดกรองนาโนฟิลเตรชัน



รูปที่ 4.6 แสดงโมดูลของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน

### 4.3 วิธีการทดลอง

#### 4.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดกากถั่วเหลืองด้วยเอทานอล

1. ชั่งกากถั่วเหลืองที่เอาน้ำมันออกแล้ว 60 กรัม ผสมกับเอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 400 มิลลิลิตร ลงในขวด ต่อกอนเดนเซอร์ที่ขวดเพื่อทำการรีฟลักซ์ โดยใช้เวลาในการรีฟลักซ์ 60 นาที
2. กรองสารสกัดถั่วเหลืองโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แยกส่วนที่ใสไปวิเคราะห์ปริมาณไอโซฟลาโวนด้วยเครื่อง HPLC
3. ทำซ้ำข้อ 1 แต่เปลี่ยนเวลาในการรีฟลักซ์เป็น 80 และ 100 นาทีตามลำดับเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการสกัด

#### 4.3.2 การเตรียมตัวอย่างสารสกัดถั่วเหลือง

1. ชั่งกากถั่วเหลืองที่เอาน้ำมันออกแล้ว 60 กรัม ผสมกับเอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 400 มิลลิลิตร ลงในขวดต่อกอนเดนเซอร์ที่ขวดเพื่อทำการรีฟลักซ์ โดยใช้เวลาในการรีฟลักซ์ 100 นาที
2. กรองสารสกัดถั่วเหลืองโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แยกส่วนที่ใสไประเหยเอทานอลออกที่อุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียสโดยใช้ Vacuum Evaporator เพื่อใช้เป็นสารป้อนสำหรับระบบไมโครฟิลเตรชันต่อไป

#### 4.3.3 การทดลองหาฟลักซ์ของน้ำกลั่น ของชุดกรองไมโครฟิลเตรชัน

1. ปรับค่าความดันของปั๊มให้มีค่าที่ 0.1 เมกกะปาสคาลและค่าความเร็วของสายป้อน  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นสารป้อน
2. รอให้ระบบเข้าสู่ steady stage ประมาณ 5 นาที วัดปริมาตรเพอมีเททที่ได้ตามเวลาที่กำหนด
3. เปลี่ยนค่าความดันเป็น 0.2 0.3 และ 0.4 เมกกะปาสคาล (MPa)ตามลำดับ
4. ทำตามข้อ 3.
5. เขียนกราฟระหว่างค่าความดันและเพอมีเททฟลักซ์ที่ได้

#### 4.3.4 การกรองโดยชุดกรองไมโครฟิลเตรชันที่ความดันและความเร็วของสายป้อนค่าต่างๆ

1. นำสารสกัดจากถั่วเหลืองที่แยกเอาเอทานอลออกแล้วมาให้ความร้อนเพื่อไม่ให้สารตกตะกอนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส
2. ทำการกรองแบบต่อเนื่องปรับความเร็วของสายป้อนเป็น  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาทีและความดันของระบบการกรองให้มีค่าเป็น 0.04 เมกกะปาสคาลโดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องมีการวนกลับของสารละลายลงสู่ถังป้อน
3. วัดปริมาตรของสายเพอมีเอทต่อเวลาจนกระทั่งมีค่าคงที่
4. เปลี่ยนค่าความดันของระบบให้เพิ่มขึ้นเป็น 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 และ 0.45 เมกกะปาสคาล
5. เมื่อเสร็จการทดลองล้างเยื่อแผ่นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตรและตามด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งได้ค่าฟลักซ์น้ำกลั่นเท่าเดิม
6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 4 โดยเปลี่ยนค่าความเร็วของสายป้อนเป็น  $1.07 \times 10^{-3}$  และ  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

#### 4.3.5 การทดลองหาเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆและแยกสารละลายเพอมีเอทโดยชุดกรองไมโครฟิลเตรชัน โดยทำการทดลองแบบกะ

1. เลือกค่าความเร็วของสายป้อนและความดันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3.4 แล้วทำการกรองสารสกัดที่ได้จากถั่วเหลืองแบบกะที่สภาวะความเร็วของสายป้อนและความดันที่เลือกไว้เพื่อเก็บเพอมีเอทสำหรับนำไปใช้เป็นสารป้อนของชุดกรองนาโนฟิลเตรชันต่อไป
2. เก็บตัวอย่างเพอมีเอท คอนเซนเทรทและสายป้อนทุกทุก 5 นาที เป็นเวลา 60 นาที เพื่อนำไปหาค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ
3. เก็บตัวอย่างเพอมีเอทต่อไปจนได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของสารป้อน ให้นำสารป้อนที่เหลือเติมน้ำไปอีก 2 เท่าของปริมาณสารป้อนที่เหลือ เพื่อทำไดอะฟิลเตรชัน
4. เก็บเพอมีเอทของส่วนไดอะฟิลเตรชันได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของสารป้อน

#### 4.3.6 การกรองโดยชุดกรองนาโนฟิลเตรชันที่ความดันและความเร็วของสายป้อนต่างๆ

1. นำเพอมีเอทของส่วนที่ทำไดอะฟิลเตรชันมาระเหยน้ำออก ( ใช้ magnetic hotplate อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ) จนมีความเข้มข้นของไอโซพลาโวนใกล้เคียงกับเพอมีเอทที่ได้จากการกรองโดยชุดกรองไมโครฟิลเตรชันผสมเพอมีเอทที่ได้จากทั้งสองวิธีให้เข้ากันเพื่อทำเป็นสารป้อน
2. ปรับค่าความดันให้คงที่เท่ากับ 2 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.011 เมตรต่อวินาที วัดปริมาตรเพอมีเอทที่ได้ต่อเวลาแล้วเปลี่ยนค่าความดันเป็น 2.5, 3.0 และ 3.5 เมกกะปาสคาล โดยวัดปริมาตรเพอมีเอทที่ได้ต่อเวลาทุกค่าความดัน โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องมีการวนกลับของสารละลายลงสู่ถังป้อน
3. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 แต่เปลี่ยนค่าความเร็วของสายป้อนเป็น 0.015 และ 0.019 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

#### 4.3.7 การทดลองหาเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆและแยกสารเพอมีเอทจากคอนเซนเทรทโดยชุดกรองนาโนฟิลเตรชันโดยทำการทดลองแบบกะ

1. เลือกค่าอัตราการไหลของสายป้อนและความดันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3.6 แล้วทำการกรองสารสกัดที่ได้จากถั่วเหลืองที่สภาวะอัตราการไหลและความดันที่เลือกไว้เพื่อแยกเพอมีเอทออกจากคอนเซนเทรท
2. เก็บตัวอย่างเพอมีเอท คอนเซนเทรทและสายป้อนทุกทุก 1 ชั่วโมงครั้ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาปริมาณไอโซพลาโวนที่ความเข้มข้นของสายป้อนที่แตกต่างกัน

#### 4.3.8 การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนโดยวิธี Lowry

##### สารเคมี

1. การเตรียม Copper – Alkaline Solution
  - A. 1 %  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
  - B. 2 % w/v Sodium potassium tartate
  - C. 0.2 M NaOH

D. 4 % w/v  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

สารละลาย Copper – Alkaline Solution เตรียมโดยนำสาร C 49 มิลลิลิตร ผสมกับ D 49 มิลลิลิตร ผสมกับ A 1 มิลลิลิตร ผสมกับ B 1 มิลลิลิตร

#### 4.3.8.1 การเตรียมสารละลายโปรตีนมาตรฐาน

เตรียมสารละลาย Albumin จาก bovine serum ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน 5 ค่า เพื่อทำกราฟมาตรฐานของโปรตีน เตรียมสารละลายมาตรฐานโปรตีนความเข้มข้น 0.6 , 0.12 , 0.18 , 0.24 และ 0.3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

#### 4.3.8.2 การเตรียมตัวอย่าง

ปิเปตสารตัวอย่าง 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย Copper – Alkaline Solution 2.5 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ 10 นาทีจึงเติม Folin reagent 0.25 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 30 นาที และนำไปวัดค่าการดูดซับด้วยเครื่อง UV – spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

#### 4.3.9 การวัดความขุ่น

วัดด้วยเครื่อง UV – spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร

#### 4.3.10 การหาปริมาณแมกนีเซียม

วัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy

ความยาวคลื่นที่ 285.2 นาโนเมตร

ชนิดของเปลวไฟ อากาศ – อะเซทิลีน

อัตราการไหลของอากาศ 13.5 ลิตรต่ออนาที

อัตราการไหลของอะเซทิลีน 2 ลิตรต่ออนาที

#### 4.3.11 การหาปริมาณแคลเซียม

วัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy

ความยาวคลื่นที่ 422.7 นาโนเมตร

ชนิดของเปลวไฟ อากาศ – อะเซทิลีน

อัตราการไหลของอากาศ 13.5 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของอะเซทิลีน 2 ลิตรต่อนาที

#### 4.3.12 การหาปริมาณโพแทสเซียม

วัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy

ความยาวคลื่นที่ 766.5 นาโนเมตร

ชนิดของเปลวไฟ อากาศ – อะเซทิลีน

อัตราการไหลของอากาศ 13.5 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของอะเซทิลีน 2 ลิตรต่อนาที

#### 4.3.13 การหาปริมาณโซเดียม

วัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy

ความยาวคลื่นที่ 589 นาโนเมตร

ชนิดของเปลวไฟ อากาศ – อะเซทิลีน

อัตราการไหลของอากาศ 13.5 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของอะเซทิลีน 2 ลิตรต่อนาที

#### 4.3.14 การหาค่าการนำไฟฟ้า

เครื่องวัดการนำไฟฟ้า ( Metrohm, switzerland )

#### 4.3.15 การวิเคราะห์หาปริมาณไดด์ซีนและเจนิสติน

เครื่อง HPLC ( Shimadzu LC-34, Japan)

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเจนิสตินและไดด์ซีน ให้มีความเข้มข้น ดังนี้

- 0.0125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 0.025 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 0.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

|                           |   |
|---------------------------|---|
| ชนิดของคอลัมน์            | C <sub>18</sub> reverse phase Hypersil เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มิลลิเมตรและ ยาว 250 มิลลิเมตร   |
| เฟสตัวพา ( mobile phase ) | แบบแกรเดียนโดยใช้ A คือ 10 % (v/v) ของสารละลาย อะซิโตนไนโตรในสารละลาย 0.1%(v/v) ไตรฟลูออริกแอซิก และสารละลาย B คือ 90 % (v/v) อะซิโตนไนโตรในสารละลาย 0.1 % (v/v) ไตรฟลูออริกแอซิก โดยเพิ่มปริมาณสารละลาย B จาก 0 % - 40 % ในอัตรา 2 % ต่อนาที |
| อัตราการไหล               | 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที  |
| ดีเทคเตอร์                | UV 252 นาโนเมตร   |
| ปริมาตรที่ใช้ฉีด          | 5 ไมโครลิตร   |

#### 4.3.16 การวิเคราะห์หาปริมาณสเตาซิโอสและราฟิโนส

เครื่อง HPLC (LDC 4100, US. )

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสเตาซิโอสและราฟิโนส ให้มีความเข้มข้น ดังนี้

- 0.0025 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 0.0125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 0.0250 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



- 0.0375 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

|                           |  |
|---------------------------|--|
| ชนิดของคอลัมน์            | Lichrocart – NH <sub>2</sub> เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรและยาว 250 มิลลิเมตร |
| เฟสตัวพา ( mobile phase ) | สารละลายอะซิโตรไนท์ 70 เปอร์เซ็นต์ในน้ำ ปริมาตรโดยปริมาตร                      |
| อัตราการไหล               | 1.6 มิลลิลิตรต่อนาที   |
| ดีเทคเตอร์                | IR   |
| ปริมาตรที่ใช้ฉีด          | 5 ไมโครลิตร  |

#### 4.3.17 การวิเคราะห์หาปริมาณฟรักโทส

เครื่อง HPLC (LDC 4100, US. )

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟรักโทสให้มีความเข้มข้น ดังนี้

- 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

|                           |  |
|---------------------------|--|
| ชนิดของคอลัมน์            | Lichrocart – NH <sub>2</sub> เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรและยาว 250 มิลลิเมตร |
| เฟสตัวพา ( mobile phase ) | สารละลายอะซิโตรไนท์ 90 เปอร์เซ็นต์ในน้ำ ปริมาตรโดยปริมาตร                      |
| อัตราการไหล               | 2 มิลลิลิตรต่อนาที   |
| ดีเทคเตอร์                | IR   |
| ปริมาตรที่ใช้ฉีด          | 20 ไมโครลิตร   |

## บทที่ 5

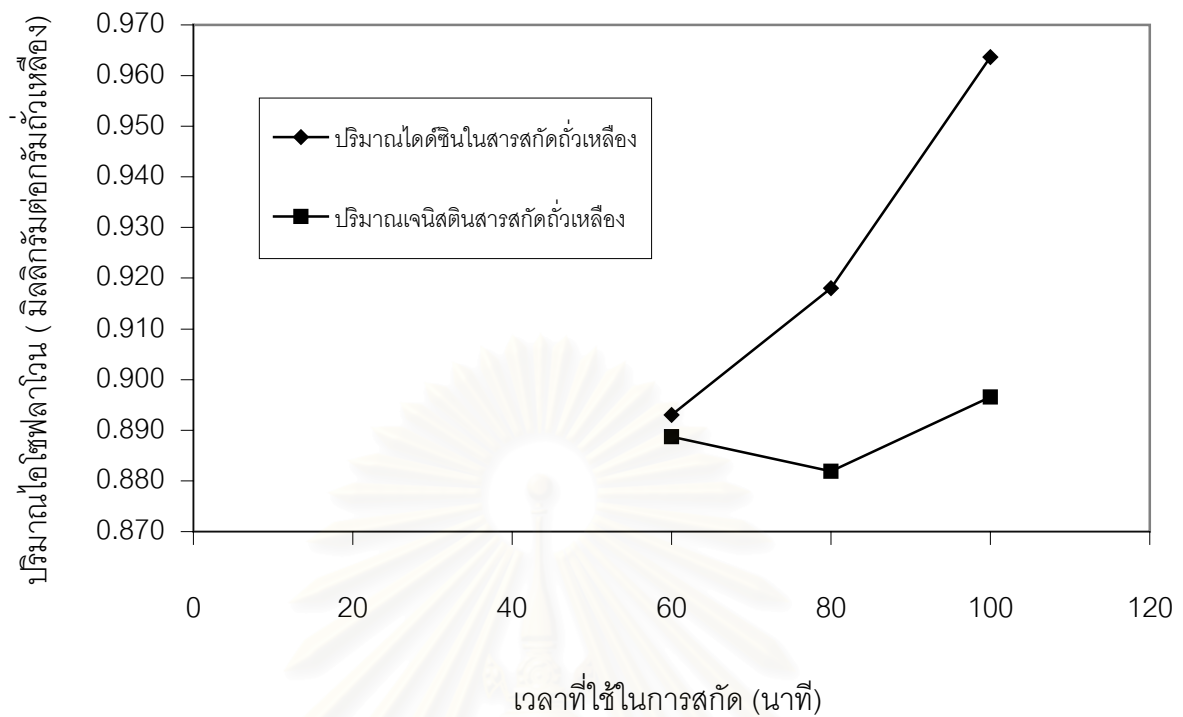
### ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดถั่วเหลือง

จากการสกัดกากถั่วเหลืองที่สกัดเอาน้ำมันออกด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนกากถั่วเหลือง 60 กรัมต่อสารละลายเอทานอล 400 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการรีฟลักซ์ต่างๆ กันเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการสกัด โดยช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการรีฟลักซ์อยู่ในช่วงเวลา 60 – 100 นาที โดยอ้างอิงจากสิทธิบัตร (US patent 5142746) โดยการรีฟลักซ์ด้วยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิสูงทำให้คอนจูเกตต่างๆของไอโซฟลาโวนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองเกิดปฏิกิริยา de-esterification เปลี่ยนคอนจูเกต รูปต่างๆ ให้อยู่ในรูปของกลูโคไซด์ คือ ไดด์ซินและเจนิสทินมากขึ้น พบว่าปริมาณไดด์ซินและเจนิสทิน ที่ได้จากการรีฟลักซ์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการรีฟลักซ์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1

ลักษณะของสารละลายที่ได้จากการสกัดจะมีลักษณะเป็นสารสีเหลือง เมื่อทิ้งให้เย็นจะมีการ ตกตะกอนดังแสดงในรูปที่ 5.2 ก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันต้องนำไปแยก แอลกอฮอล์ออก สารสกัดที่ได้จะมีลักษณะสีเปลี่ยนเป็นน้ำตาลอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.3

ดังนั้นในเวลาที่เหมาะสมในการสกัดเท่ากับ 100 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการสกัด ความเข้มข้นของไดด์ซินและเจนิสทินที่ได้จากการรีฟลักซ์เท่ากับ 0.145 และ 0.134 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไดด์ซินและเจนิสทินเท่ากับ 0.1 และ 0.09 เปอร์เซ็นต์ของ กากถั่วเหลืองตามลำดับ



รูปที่ 5.1 แสดงความเข้มข้นของไอโซฟลาโวน ( มิลลิกรัมต่อกรัมกล้วยแห้ง ) ที่ได้จากการรีฟลักซ์โดยใช้ เวลาในช่วง 60 ถึง 100 นาที ด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราส่วนกากกล้วยแห้ง 60 กรัมต่อสารละลายเอทานอล 400 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะของสารสกัดจากกากถั่วเหลืองโดยใช้เอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์

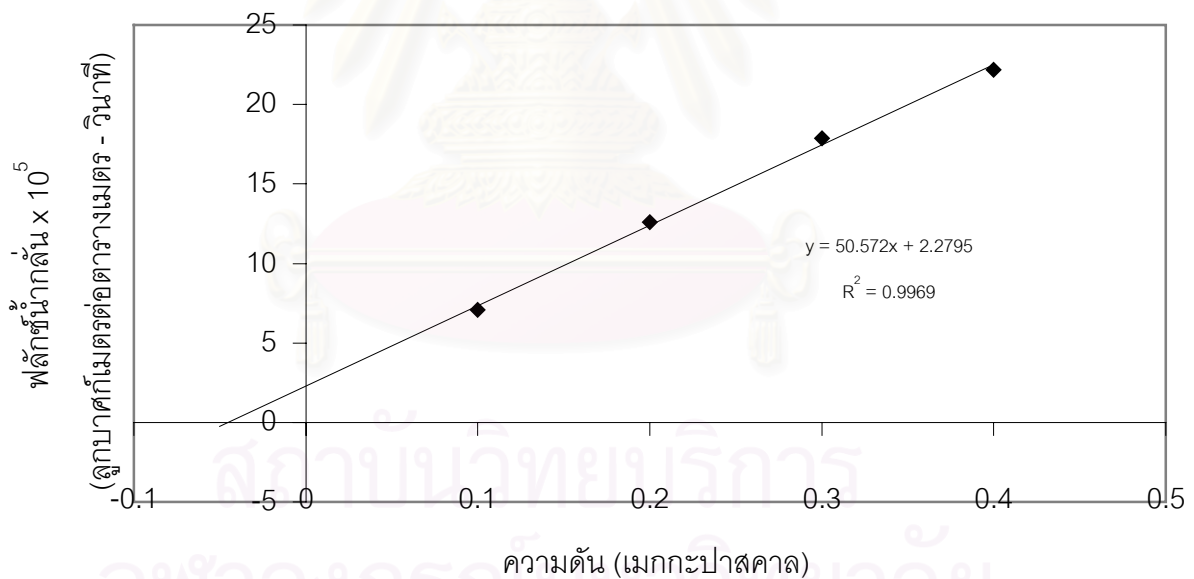


รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะของสารสกัดจากกากถั่วเหลืองโดยแยกเอาเอทานอลออก

## 5.2 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

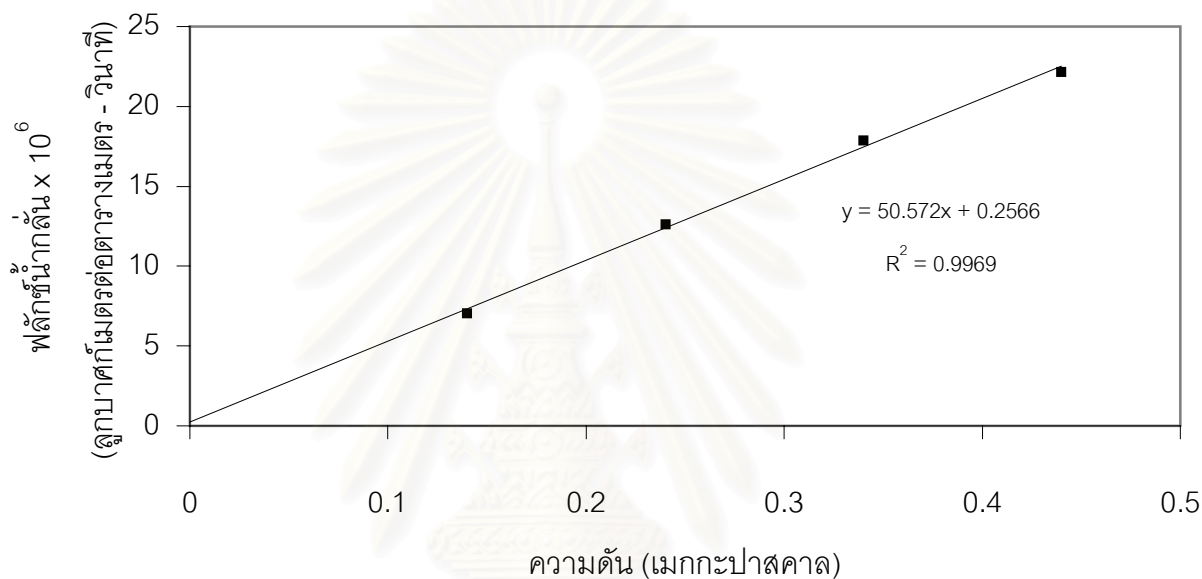
### 5.2.1 ค่าฟลักซ์น้ำกลั่น

เยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันเพื่อแยกสารแขวนลอยและโปรตีนโมเลกุลใหญ่ที่มีอยู่ในสารสกัดจากกากถั่วเหลืองที่แยกเอาเอทานอลออกแล้วเป็นเยื่อแผ่นที่อกวางทำด้วยเซรามิก ในการทดลองต้องทำการศึกษาค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบความสะอาดของเยื่อแผ่นหลังจากการทำความสะอาดเพื่อใช้ในการทดลองครั้งต่อไป โดยต้องหาค่าฟลักซ์น้ำกลั่นก่อนการทดลองการกรองทุกครั้ง โดยจากการทดลองสามารถหาค่าเพอมีอิมิตีของเยื่อแผ่นจากการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นที่ค่าต่างๆ แล้วพลอตกราฟระหว่างฟลักซ์น้ำกลั่นและค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นได้เป็นเส้นตรงความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.5  $J_w = L_p \cdot \Delta P$  โดยที่  $J_w$  คือค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น  $\Delta P$  คือค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่น (รูปที่ 5.4)



รูปที่ 5.4 แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

เนื่องจากเป็นการกรองสารละลายที่ไม่มีอนุภาคเจือปนอยู่ ความต้านทานของเยื่อแผ่นเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคจึงเท่ากับศูนย์แต่จากการทดลองพบกราฟตัดแกน x ที่จุด  $- 0.04$  เมกกะปาสคาล ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในส่วนเครื่องวัดความดันในกรณีที่มีความต้านทานของเข็มน้ำ เมื่อทำการแก้ค่าความดันถูกต้องแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ความดันที่ทำการแก้ค่าแล้วของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

จากรูปที่ 5.5 ค่าความชันคือ ค่าเพอมีอะบิลิตี  $L_p = 50.57$  (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที) / (เมกกะปาสคาล)

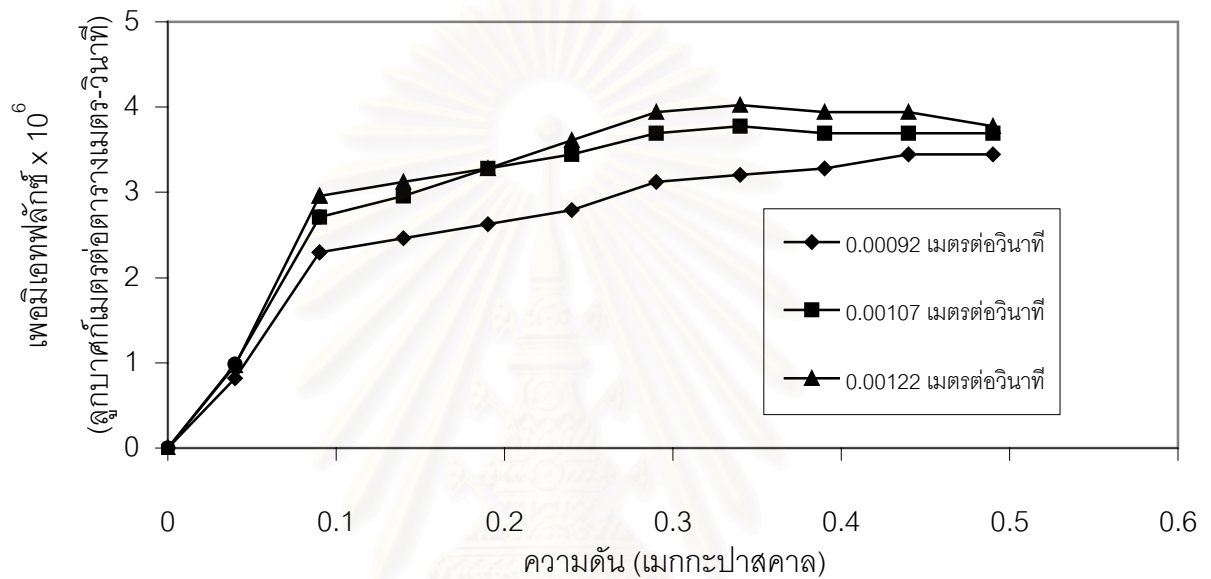
## 5.2.2 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อค่าเพอมีเอทพลักซ์

ในการกรองแบบต่อเนื่องโดยใช้สารป้อนคือสารสกัดจากกากถั่วเหลืองบัจฉัยที่มีผลต่อเพอมีเอทพลักซ์ที่ได้ทำการศึกษาคือ ความดัน ความเร็วของสายป้อนและเวลาที่ใช้ในการกรองจากรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นผลของความดันที่ความเร็วสายป้อนคงที่ พบว่าเมื่อค่าความดันเพิ่มขึ้นในช่วงแรกทำให้ค่าเพอมีเอทเพิ่มขึ้นหรือความดันและเพอมีเอทพลักซ์สัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงจนถึงค่าความดันประมาณ 0.09 เมกกะปาสคาล หลังจากนั้นการเมื่อเพิ่มความดันมากขึ้นทำให้ค่าเพอมีเอทพลักซ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและคงที่ นั่นคือการเพิ่มความดันไม่มีผลทำให้ค่าเพอมีเอทพลักซ์อีกต่อไป ดังแบบจำลองคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันเนื่องจากการเพิ่มค่าความดันทำให้การสะสมตัวของตัวถูกละลายที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้นทำให้ลักษณะของการทำงานเยื่อแผ่นเปลี่ยนไปคือจะเพิ่มความต้านทานใน boundary layer

ลักษณะของกราฟของเพอมีเอทพลักซ์เป็นไปในลักษณะเดียวกับรายงานการวิจัยของ Meireless , M. และคณะ (1991) ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับการเสียดทานของอัลบูมินระหว่างกรองโดยอัลตราฟิลเตรชันและผลของสภาวะการทำงานต่อการเกิดฟาวลิง โดยเพอมีเอทพลักซ์จะเพิ่มขึ้นรวดเร็วเมื่อเพิ่มความดันในช่วงแรกและพลักซ์จะคงที่เมื่อเพิ่มความดันสูงขึ้น โดยพลักซ์อาจจะลดลงเมื่อเพิ่มความดันสูงขึ้นอีก เนื่องจากความเร็ววนในระบบต่ำและความเข้มข้นของสายป้อนสูงทำให้เกิดการสะสมตัวของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้น

ส่วนผลของความเร็วยของสายป้อนเมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ ค่าความเร็วของสายป้อนสูงขึ้นจะทำให้เพอมีเอทพลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นคือที่ความเร็ว  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาทีจะได้ค่าเพอมีเอทพลักซ์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วของสายป้อนเพิ่มขึ้นเป็น  $10.7 \times 10^{-3}$  และ  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาทีตามลำดับ การเพิ่มความเร็วยของสายป้อนมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่ม ( mass transfer coefficient, k ) เพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการไหลขวางลดการสะสมของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นได้มากกว่าที่ความเร็วของสายป้อนต่ำ โดยพบว่าการเพิ่มความเร็วยของสายป้อนในช่วงต้น ( $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาทีเป็น  $10.7 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ) จะมีผลต่อการเพิ่มของเพอมีเอทพลักซ์มากกว่าในช่วงท้าย ( $10.7 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาทีเป็น  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที)ซึ่งอธิบายได้ในลักษณะผลที่เกิดจากคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชัน เช่นเดียวกับในรายงานของ Nihal และ Turker ซึ่งพบว่า

คอนเซนเทรชันโพลาริเซชันสามารถทำให้เกิดน้อยลงได้โดยการปรับความเร็วของสายป้อนที่เหมาะสม



รูปที่ 5.6 แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ความดันและความเร็วต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

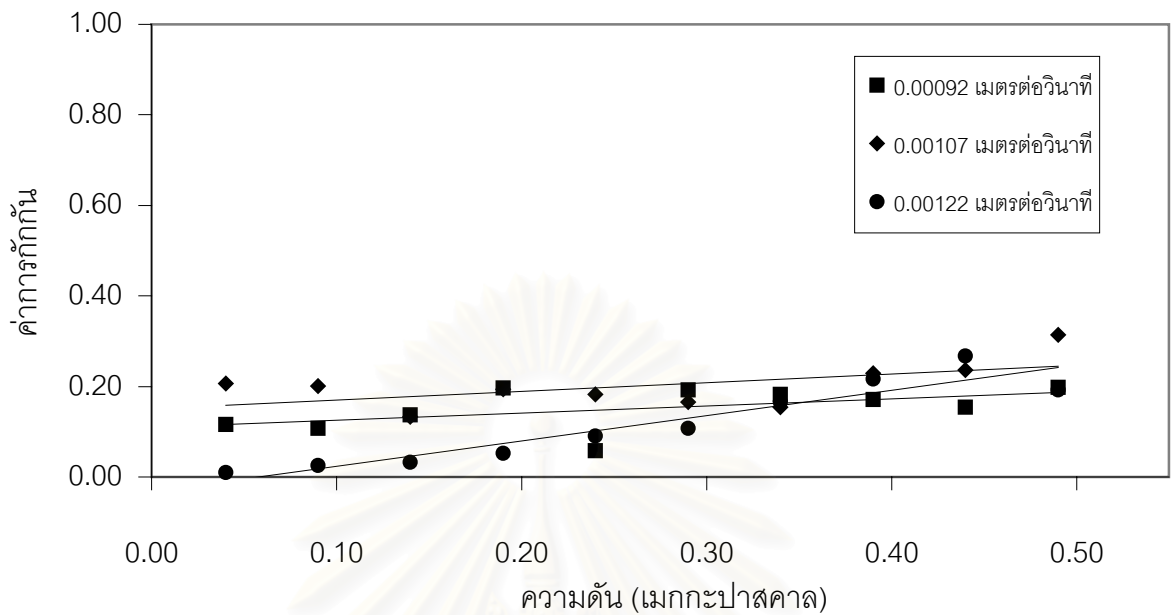


### 5.2.3 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันของไดดีซินและเจนิสติน

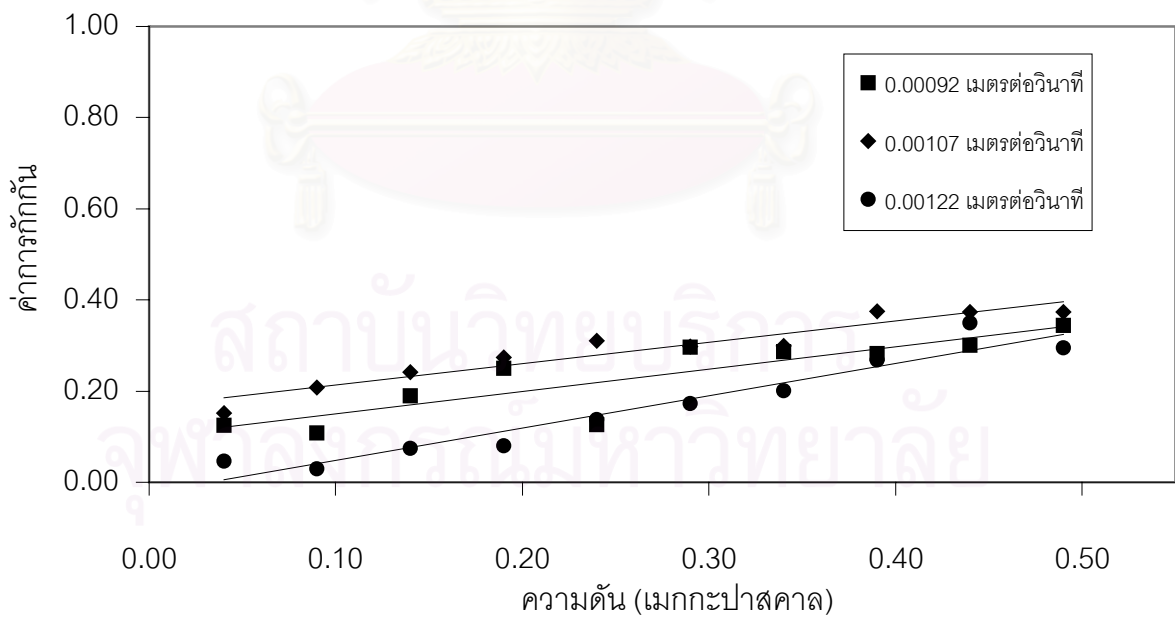
การแยกไอโซพลาไวน์ที่มีอยู่ในสารสกัดจากกากถั่วเหลืองเมื่อผ่านเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน เพื่อแยกส่วนที่แขวนลอยและโปรตีนโมเลกุลใหญ่ออกจากสารสกัดเนื่องจากค่า MWCO ของเยื่อแผ่น ประมาณ 100,000 ขนาดโมเลกุลของไดดีซินและเจนิสตินมีขนาดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 416 และ 432 ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดของเยื่อแผ่นเซรามิกของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันมาก ดังนั้นส่วนของไดดีซินและเจนิสตินจะถูกกักกันได้น้อยสามารถผ่านเยื่อแผ่นไปในส่วนของเพอมีเอท

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วยของสายป้อนที่มีต่อความสามารถในการแยกไอโซพลาไวน์ที่ ความดันคงที่พบว่าความเร็วของสายป้อน  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ค่าการกักกันของไดดีซินและ เจนิสตินจะน้อยกว่าที่ความเร็ว  $9.2 \times 10^{-4}$  และ  $10.7 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ดังรูป 5.7 และ 5.8 ส่วนผลของความดันที่ความเร็วของสายป้อนคงที่พบว่าค่าความดันทำให้ค่าการกักกันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้น ความ ต้านทานที่เยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้ค่าการกักกันเพิ่มขึ้น

ในการเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานจึงควรเลือกที่ค่าความเร็วของสายป้อนและ ความดันที่ทำให้ค่าการกักกันของไดดีซินและเจนิสตินมีค่าต่ำเพื่อลดการสูญเสียปริมาณไดดีซินและ เจนิสตินในเพอมีเอทที่จะนำไปทำการแยกโดยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันต่อไป



รูปที่ 5.7 แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันของไดคิซีนของ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

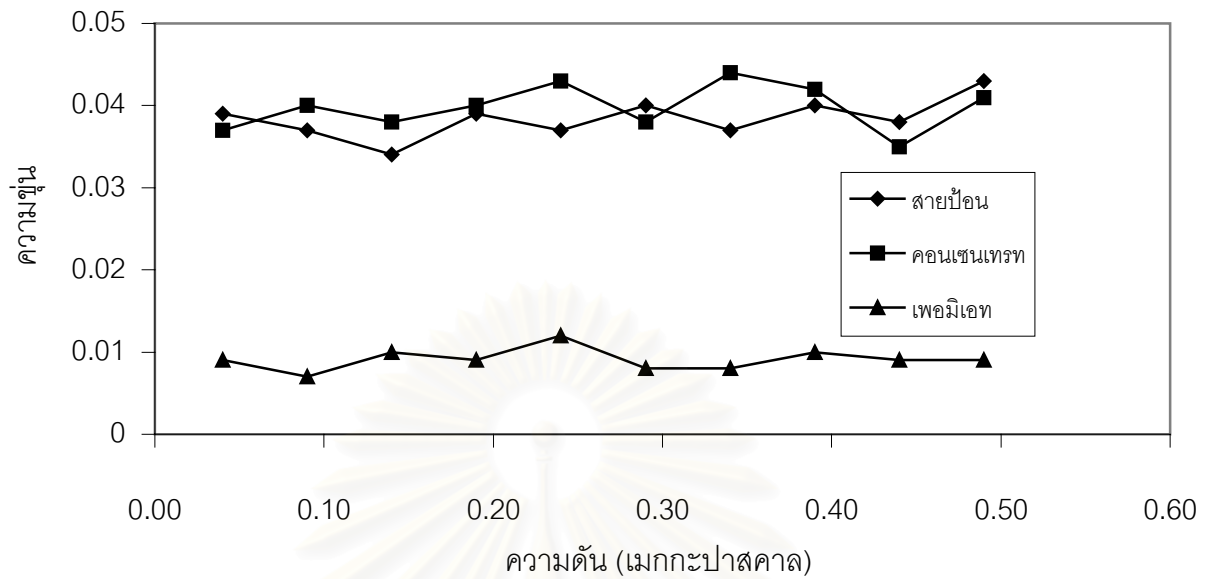


รูปที่ 5.8 แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันของเจนิสตินของ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

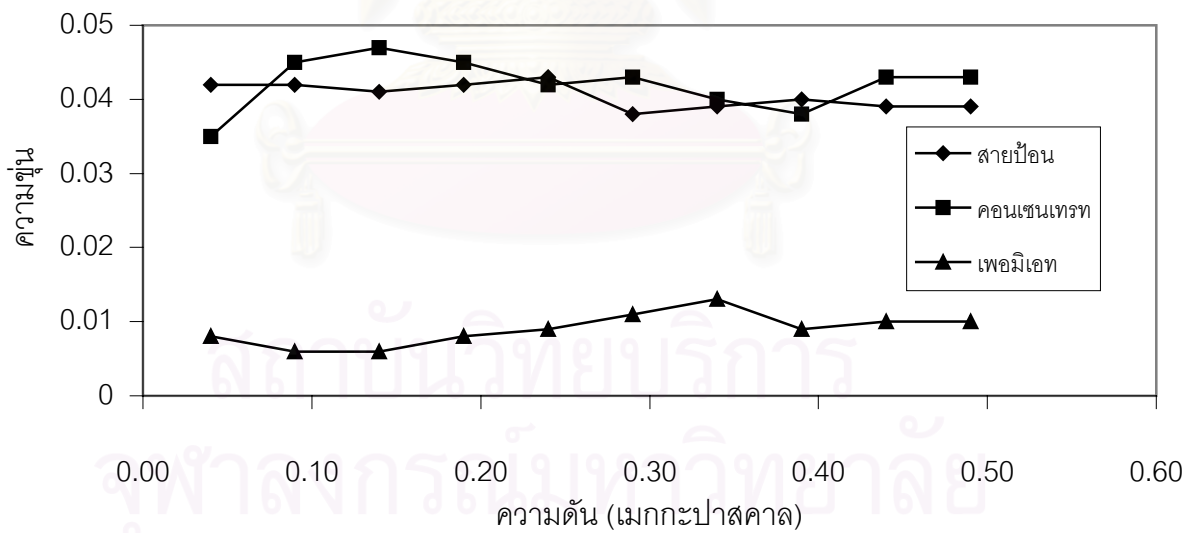
#### 5.2.4 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อความค่าความชุ่มในคอนเซนเทรทสายป้อนและเพอมีเอท

สารสกัดจากถั่วเหลืองที่แยกเอาเอทานอลออกแล้วมีลักษณะชุ่ม เนื่องจากยังมีอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำแขวนลอยอยู่ โดยปริมาณอนุภาคแขวนลอยเหล่านี้สามารถเทียบเคียงได้กับความชุ่มของสารสกัดเมื่อทำการทดสอบเบื้องต้นพบว่าไม่สามารถทำให้ใสได้โดยใช้การกรองทั่วไปแต่หลังจากผ่านเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันลักษณะเพอมีเอทที่ได้จะมีลักษณะใส ซึ่งแตกต่างจากคอนเซนเทรทและสายป้อนที่มีลักษณะชุ่ม เมื่อวัดค่าความชุ่มของเพอมีเอทพบว่าค่าความชุ่มต่ำกว่าสายป้อนและคอนเซนเทรทมาก โดยมีค่าการกักกันของความชุ่มในช่วง 0.7 – 1.0 ดังรายละเอียดในตารางที่ข. 10 – 12 ในภาคผนวก ข.

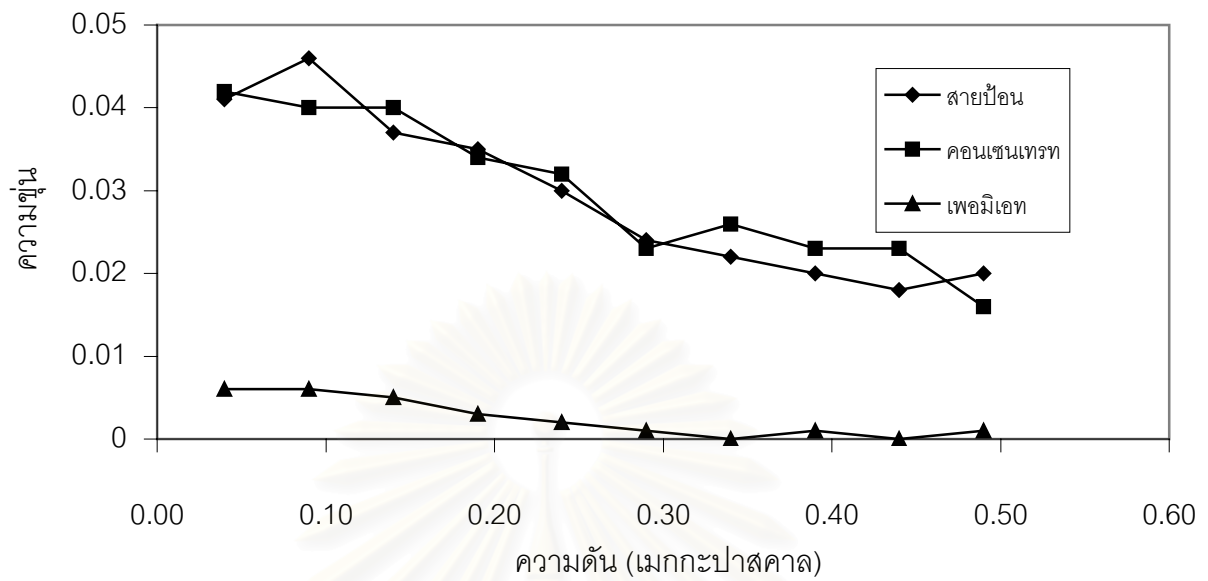
เมื่อพิจารณาผลของความดันที่ความเร็วคงที่ ( 0.04 – 0.49 เมกกะปาสคาล ) พบว่าความดันไม่มีผลทำให้ค่าความชุ่มในเพอมีเอทต่ำลง ยกเว้นในกรณีที่มีความเร็วสูง ( $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ) ซึ่งจะมีความชุ่มลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของความเร็วที่ความดันคงที่นั้นที่ความเร็ว  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ความชุ่มในเพอมีเอทมีค่าต่ำกว่าที่ความเร็ว  $9.2 \times 10^{-4}$  และ  $10.7 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ถึง 5.11 โดยลักษณะที่เกิดขึ้นอาจเนื่องจากการเกิดแรงเฉือนที่ผิวของเยื่อแผ่นในกรณีที่มีความเร็วผ่านเยื่อแผ่นสูง ทำให้อนุภาคที่เกาะที่ผิวเยื่อแผ่นที่ขนาดเล็กและทำหน้าที่กักสารเจือปนโมเลกุลใหญ่ได้ดีขึ้น



รูปที่ 5.9 แสดงค่าความตึงในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้ความเร็วของสายป้อนคงที่  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.10 แสดงค่าความตึงในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้ความเร็วของสายป้อนคงที่  $10.7 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที



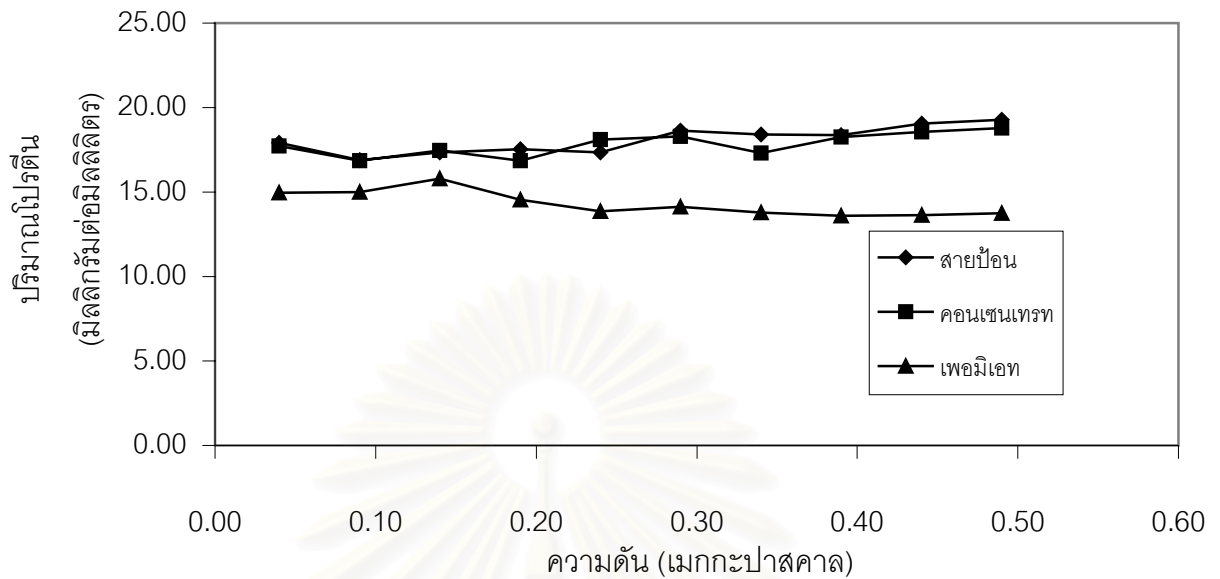
รูปที่ 5.11 แสดงค่าความขุ่นในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท ที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้ความเร็วของสายป้อนคงที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

### 5.2.5 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อความเข้มข้นและค่าการกักกันของโปรตีน

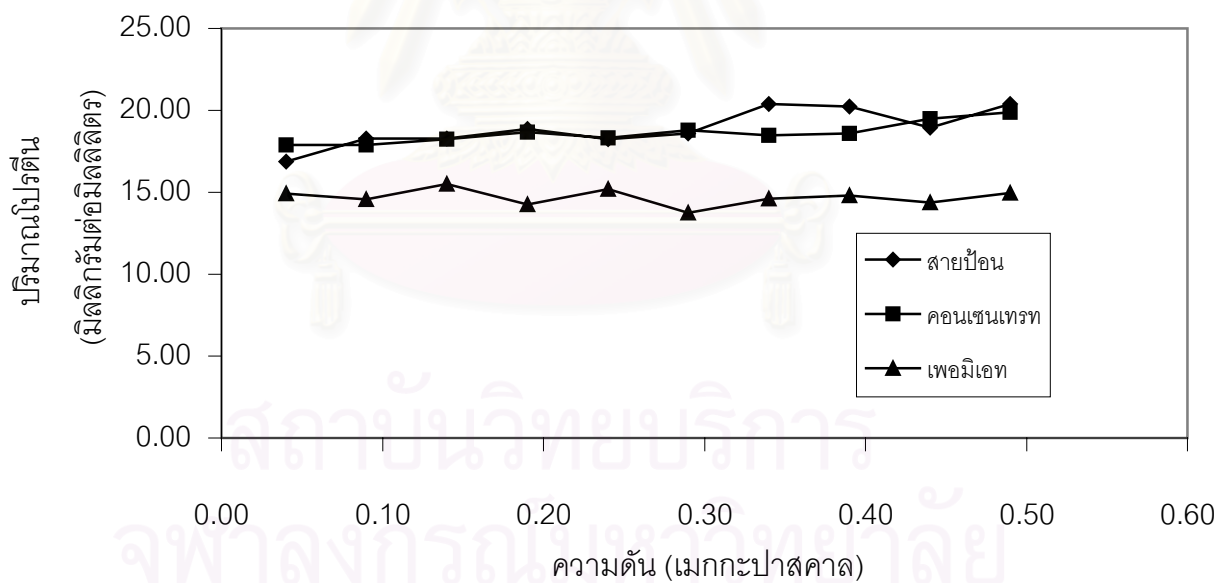
เนื่องจากในกากถั่วเหลืองมีโปรตีนเป็นส่วนประกอบสำคัญ โดยมีโปรตีนเป็นส่วนประกอบถึง 38 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในสารสกัดจากถั่วเหลืองจึงมีโปรตีนอยู่เป็นจำนวนมากด้วยจึงจำเป็นต้องแยกโปรตีนส่วนหนึ่งออกจากสารสกัดก่อนโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน จากกราฟเปรียบเทียบแสดงความเข้มข้นของโปรตีนในเพอมีเอท สายป้อนและคอนเซนเตรทจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของโปรตีนในเพอมีเอทต่ำกว่าในคอนเซนเตรทเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ถึง 5.14

เมื่อพิจารณาที่ความเร็วคงที่และความดันเพิ่มขึ้น ค่าการกักกันโปรตีนพบว่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.1 ถึง 0.4 ดังแสดงในรูปที่ 5.15 การที่ค่าการกักกันเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้เกิดชั้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้นทำให้กักกันโปรตีนได้มากขึ้น ค่าการกักกันที่ได้อยู่ในช่วงต่ำ แสดงว่าโปรตีนถูกกักกันได้เฉพาะโปรตีนโมเลกุลใหญ่เท่านั้นเนื่องจากเยื่อแผ่นเซรามิกที่ใช้มีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ไม่สามารถกักกันโปรตีนโมเลกุลเล็กที่ละลายในสายป้อนได้

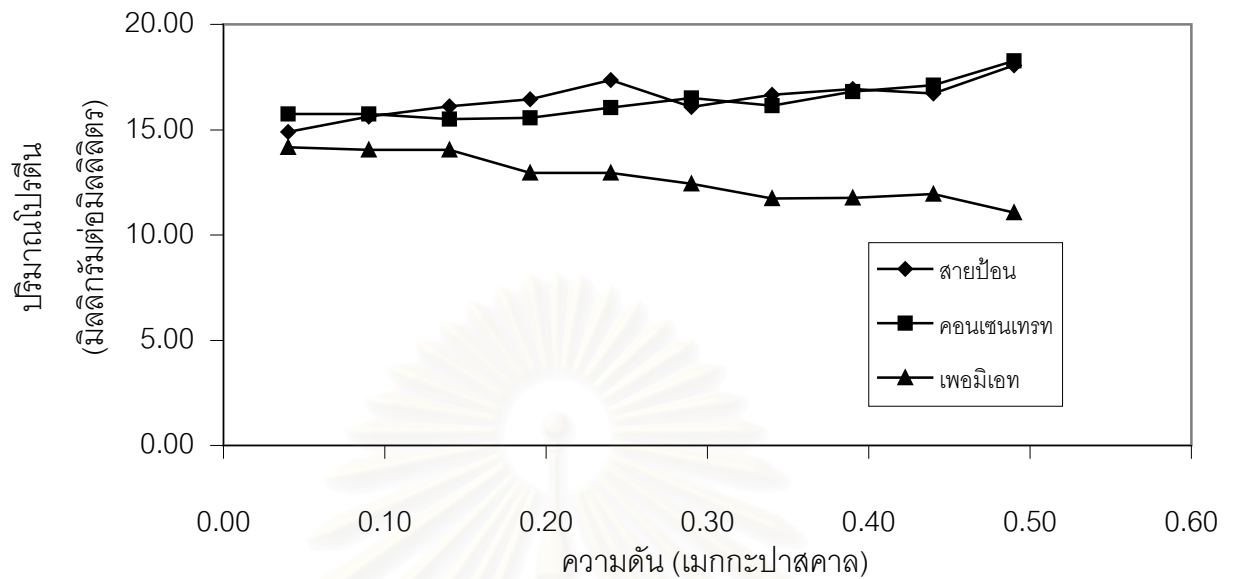
จากการพิจารณาผลของการแยกโดยใช้ไมโครฟิลเตรชันโดยรวมพบว่าควรเลือกใช้ความดันที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและที่ความเร็ว  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นภาวะการกรองที่ให้ค่าเพอมีเอทที่สูง (4.02 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที) มีค่าการกักกันไดดีซินและเจนิสตินต่ำ (ประมาณ 0.17 และ 0.20) ตามลำดับ สามารถแยกสารแขวนลอยและโปรตีนโมเลกุลใหญ่ได้ดีทำให้เพอมีเอทที่ได้มีความใส



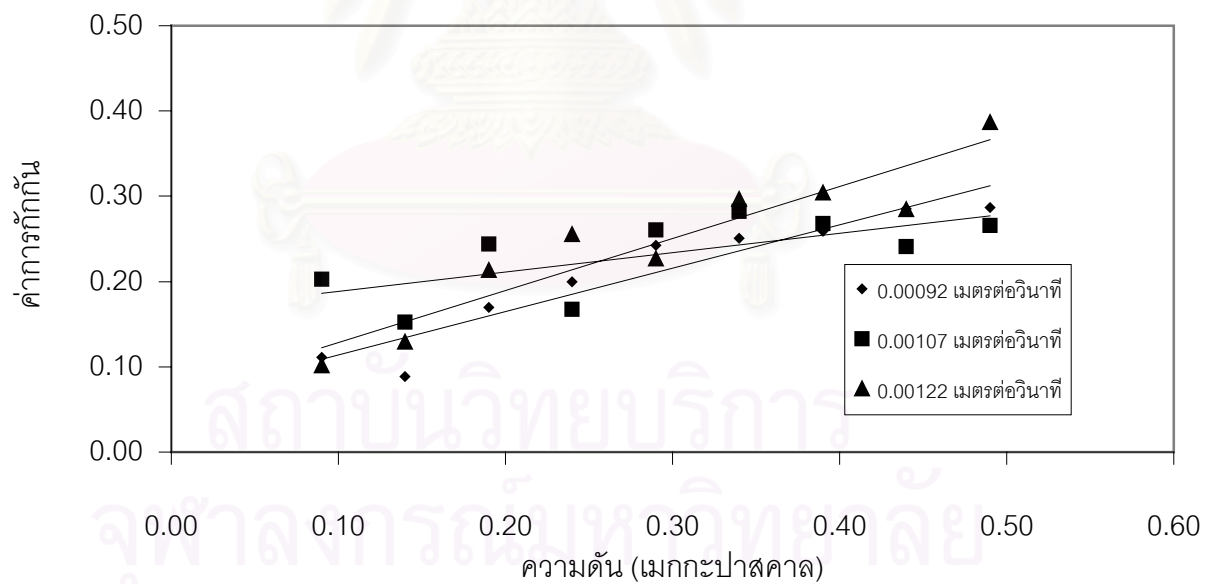
รูปที่ 5.12 แสดงความเข้มข้นของโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้ความเร็วของสายป้อนคงที่  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.13 แสดงความเข้มข้นของโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้ความเร็วของสายป้อนคงที่  $10.7 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.14 แสดงความเข้มข้นของโปรตีนในสายป่วน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันโดยใช้ความเร็วของสายป่วนคงที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

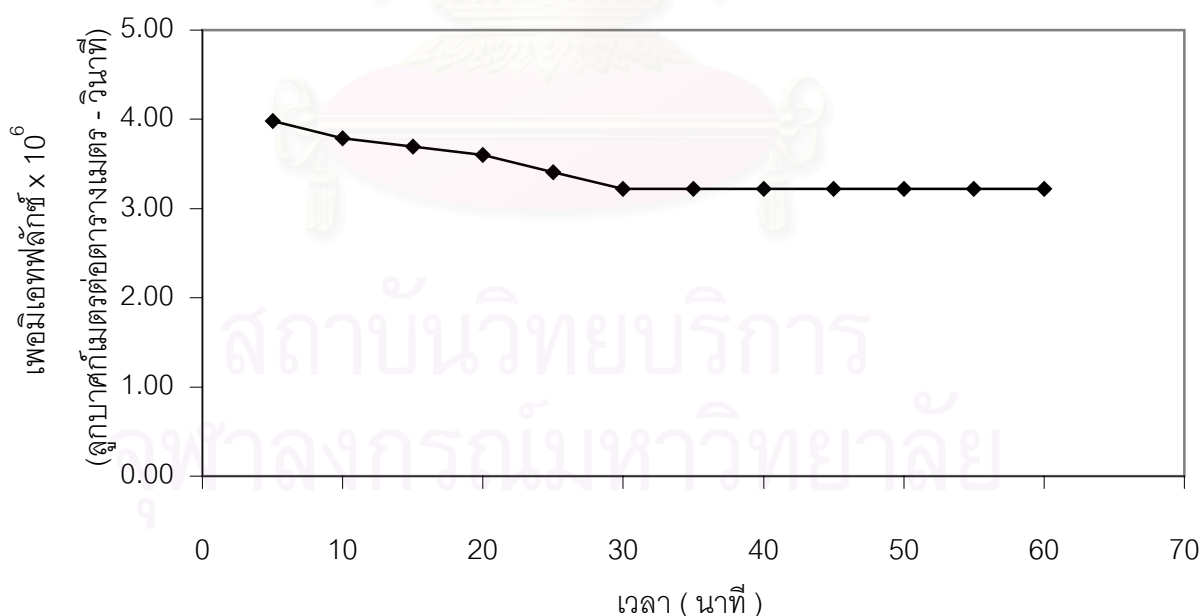


รูปที่ 5.15 แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป่วนที่มีผลค่าการกักกันของโปรตีนของ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน



## 5.2.6 ผลของค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ ในการทดลองแบบกะ

เพื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์และการแยกสารต่างๆ ที่มีอยู่ในสารสกัดจากกากถั่วเหลือง ทำการทดลองโดยกำหนดให้ความดันและความเร็วคงที่ที่จุดที่เหมาะสมคือ 0.34 เมกกะปาสคาลและ  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ทำการทดลองแบบกะ (batch) เมื่อเวลาผ่านไปทำให้ความเข้มข้นของสารต่างๆ ในสายป้อนเพิ่มขึ้นพบว่าเพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงเรื่อยๆ จนถึง  $3.22 \times 10^{-6}$  ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที จากนั้นเพอมีเอทฟลักซ์จะมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยในช่วงแรกความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง เนื่องจากค่าฟลักซ์จะขึ้นกับผลต่างของความดันคร่อมเยื่อแผ่นและความดันออสโมติกซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น โดยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้การสะสมของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้นทำให้เพิ่มค่าความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่นเป็นผลให้ความดันออสโมติกเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง อย่างไรก็ตามหลังจากความเข้มข้นของสายป้อนเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสายป้อนต่อไปจะไม่ค่อยมีผลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ ( จากการทดลอง คือที่ความเข้มข้นของสายป้อนที่เวลา 30 นาที ) ดังรูป 5.16 เนื่องจากความเข้มข้นของชั้นตัวถูกละลายที่สะสมโดยรวมที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นเริ่มคงที่



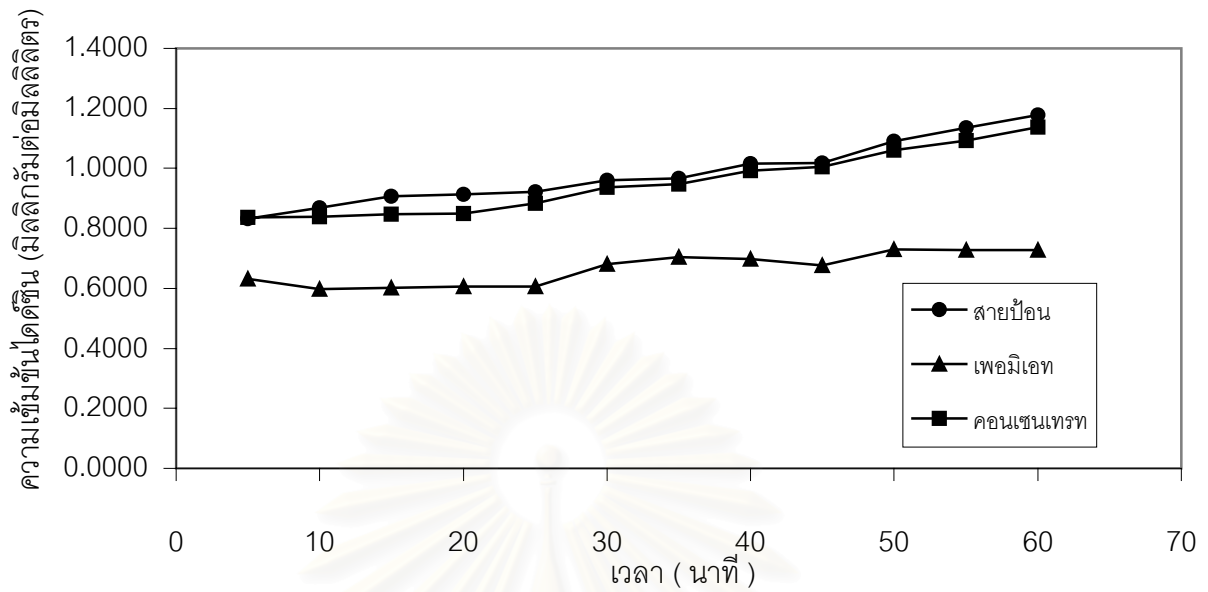
รูปที่ 5.16 แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาล และความเร็วของสายป้อนคงที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

### 5.2.7 ความเข้มข้นของไดด์ซีน เจนีสตินในสายป้อน คอนเซนเทรท เพอมิเอทและค่าการกักกันที่เวลาต่างๆในการกรองแบบกะ(batch)ที่ความเร็วของสายป้อนและความดันคงที่

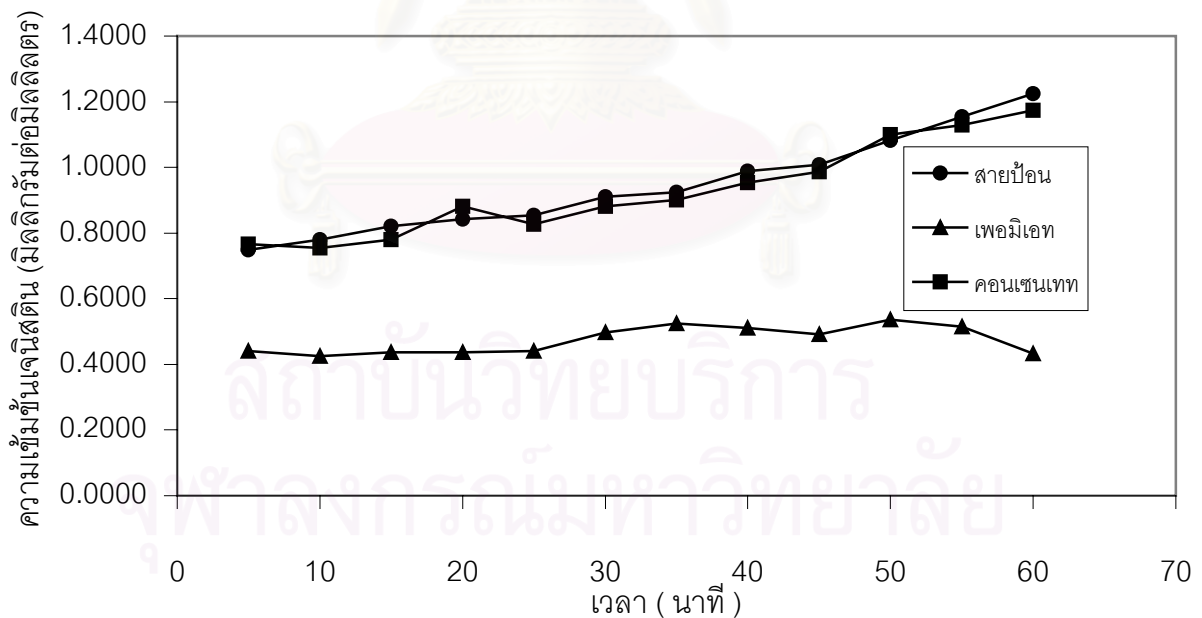
เมื่อพลอตกราฟความเข้มข้นของไดด์ซีนและเจนีสตินในส่วนต่างๆ ตามเวลาในการกรองจะได้ความเข้มข้นของไดด์ซีนและเจนีสตินเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามเวลาเนื่องจากความเข้มข้นของสายป้อนที่เพิ่มขึ้น โดยหลังจากการกรอง 30 นาทีได้สารละลายเพอมิเอทที่มีความเข้มข้นไดด์ซีนและเจนีสตินที่ 30 นาที คือ 0.68 กับ 0.50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ ดังแสดงดังรูป 5.17 และ 5.18

ส่วนค่าการกักกันของไดด์ซีนและเจนีสตินที่เวลาต่างๆ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นหรือความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่ความเข้มข้นของสายป้อนต่ำๆ ทำให้ค่าการกักกันต่ำ นั่นคือไดด์ซีนและเจนีสตินจะหลุดออกไปกับเพอมิเอทได้มากกว่าที่ความเข้มข้นของสายป้อนสูงขึ้น และค่าการกักกันของเจนีสตินมากกว่าไดด์ซีน ดังแสดงในรูปที่ 5.19

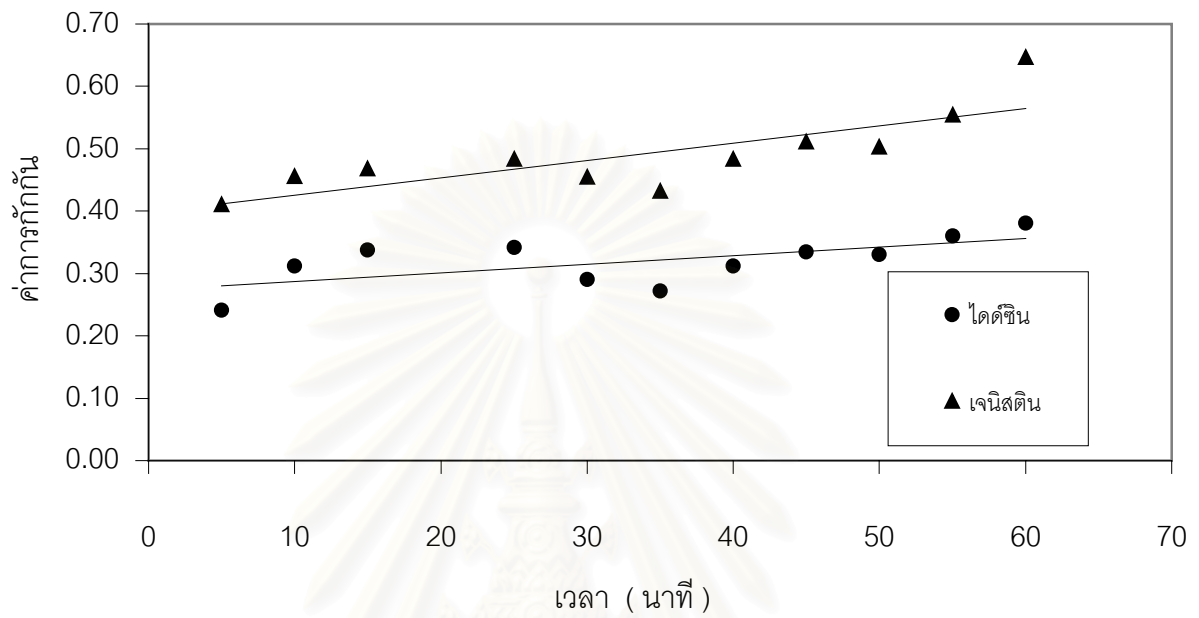
เนื่องจากค่าการกักกันที่ค่อนข้างสูงในช่วงหลังของการกรองจึงจำเป็นต้องมีการเติมน้ำและทำการกรองซ้ำ ( dialysis ) เพื่อลดการสูญเสียไดด์ซีนและเจนีสติน เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าความเข้มข้น ผลของความดันและความเร็วที่มีผลต่อค่าการกักกันจะพบว่าปัจจัยความเข้มข้นมีผลต่อค่าการกักกันมากกว่าความดันและความเร็ว



รูปที่ 5.17 แสดงค่าความเข้มข้นของไดตรีเนียมในสายป้อนคอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.18 แสดงค่าความเข้มข้นของเจนิสทินในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

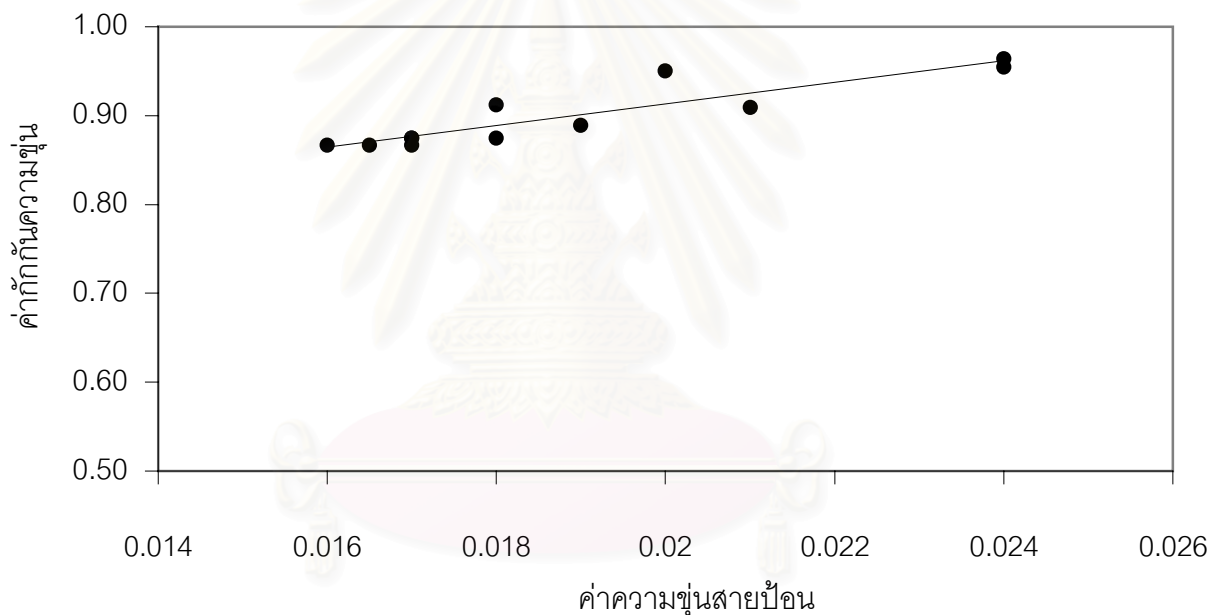


รูปที่ 5.19 ค่าการกักกันของไตดซีนและเจนิสตินที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

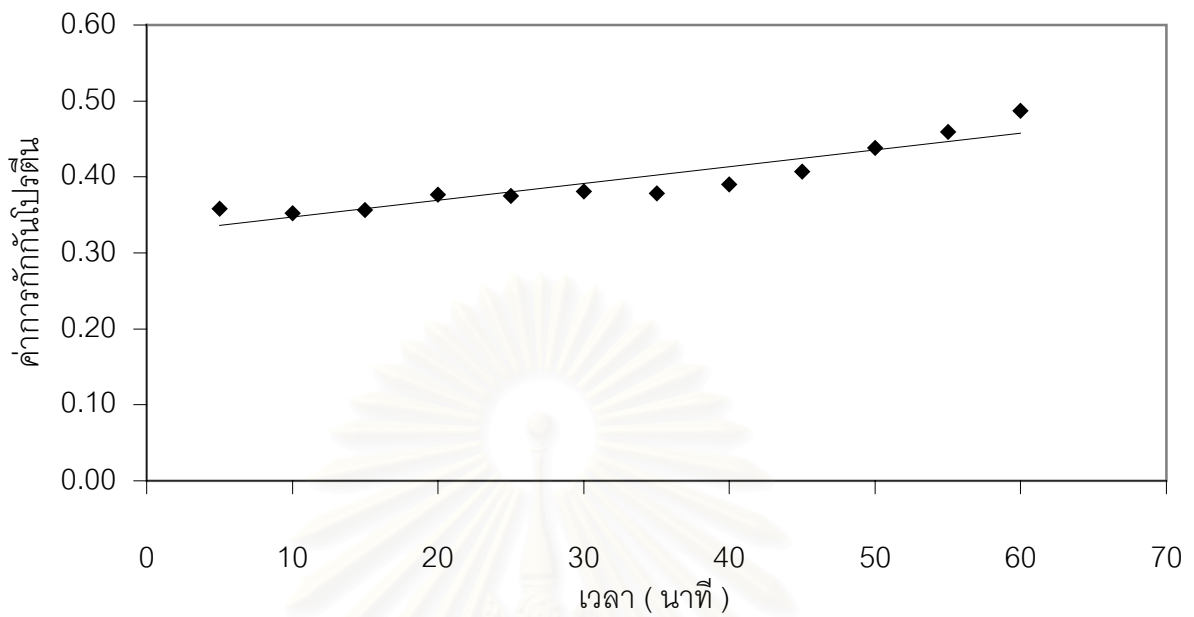
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.2.8 ผลของความเข้มข้นโปรตีนและความขุ่นของสายป้อนที่เวลาต่างๆ ต่อค่าการกักกัน

ค่าความขุ่นของสายป้อนมีผลต่อค่าการกักกันความขุ่นเพียงเล็กน้อยคือ ค่าความขุ่นของสายป้อนเพิ่มขึ้นในช่วง 0.016 ถึง 0.024 ทำให้ค่าการกักกันความขุ่นเพิ่มขึ้นจาก 0.88 ถึง 0.96 แสดงดังรูปที่ 5.20 เช่นเดียวกับแนวโน้มของค่าการกักกันของโปรตีนที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อเวลามากขึ้นค่าการกักกันเพิ่มขึ้นจาก 0.36 ถึง 0.49 หลังจากการกรองนาน 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 5.21 เนื่องจากเมื่อเวลาในการดำเนินการกรองผ่านไปทำให้เกิดชั้นของการกรองที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้นทำให้ค่าการกักกันของโปรตีนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5.20 แสดงค่าการกักกันความขุ่นที่ความขุ่นของสายป้อนต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดันคงที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.21 แสดงค่าการกักกันของโปรตีนที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดันคงที่ 3.4 เมกกะปาสคาล และความเร็วของสายป้อน 15 เมตรต่อวินาที

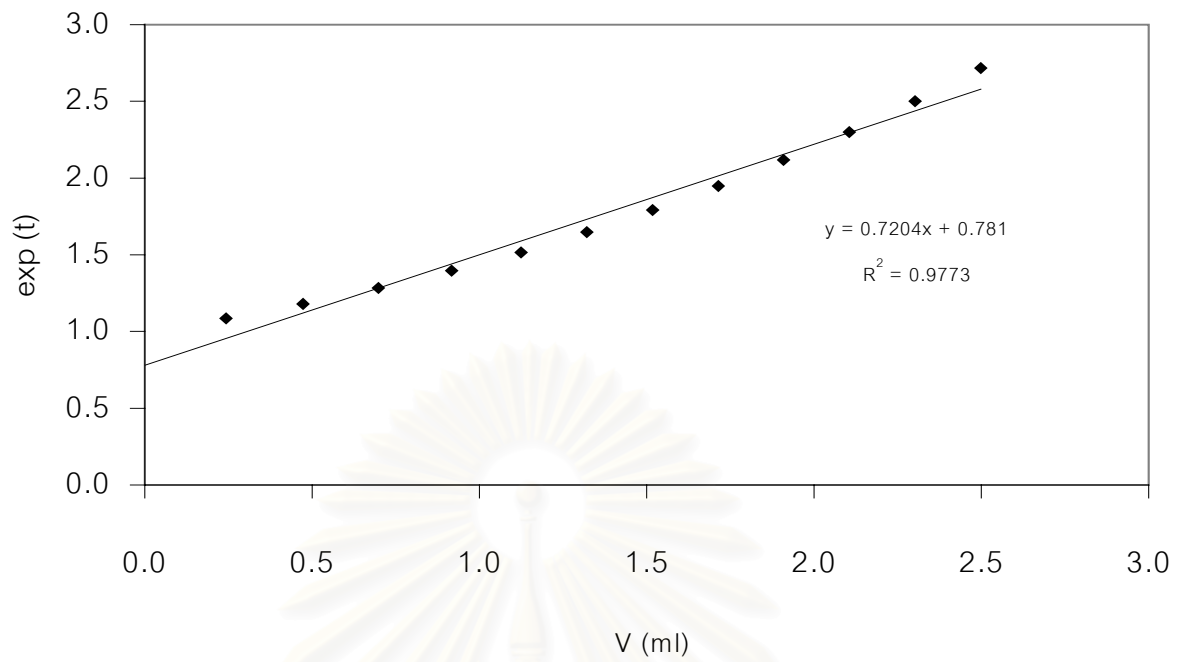
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2.9 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองต่างๆของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

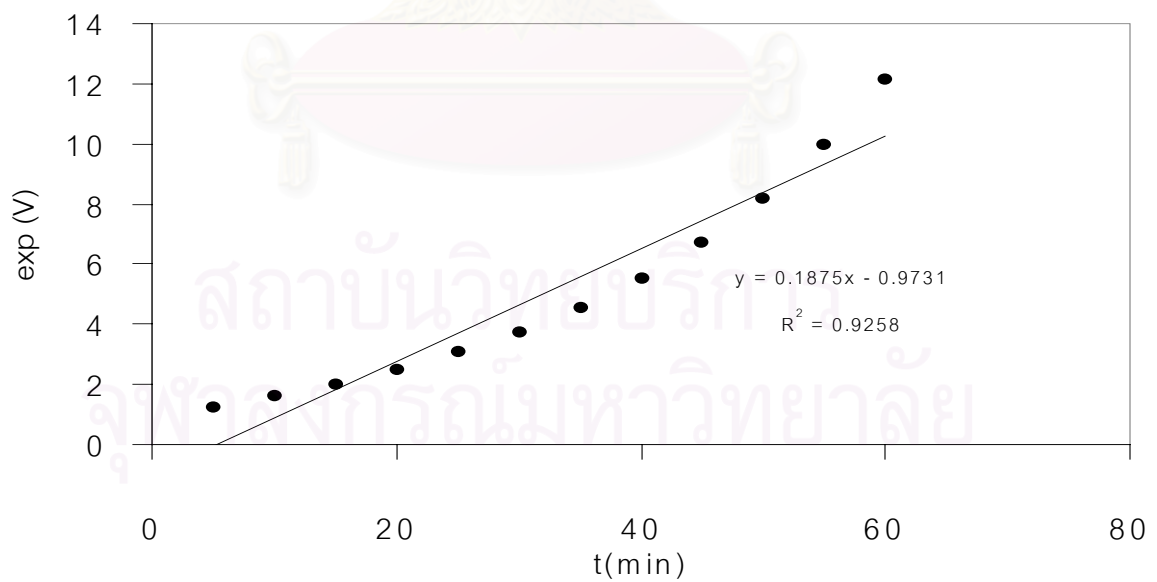
### แบบจำลองภายใต้ความดันคงที่

แบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองนี้เป็นแบบจำลองที่บอกถึงลักษณะการอุดตันสะสมบนผิวและภายในรูเยื่อแผ่นลักษณะต่างๆ กันซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ โดยแบบจำลอง CBM ( พล็อตระหว่างระหว่าง  $V$  กับ  $\exp(t)$  ) แสดงถึงการอุดตันที่ผิวเยื่อแผ่น โดยทุกๆ โมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนร่วมในการอุดตันรูพรุนโดยไม่มีการซ้อนทับกัน แบบจำลอง IBM ( พล็อตระหว่าง  $t$  กับ  $\exp(V)$  ) แสดงลักษณะการอุดตันบนผิวเยื่อแผ่นโดยโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งสามารถซ้อนทับอยู่บนโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งได้ แบบจำลองแบบ SBM (พล็อตระหว่าง  $t/V$  กับ  $t$ ) อธิบายการกรองสารละลายที่มีอนุภาคเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นมาก การอุดตันจึงเกิดที่ภายในรูพรุน แบบจำลอง CFM (พล็อตระหว่าง  $V$  กับ  $t/V$ ) อธิบายการเกิดขึ้นเค้กบนผิวหน้าเยื่อแผ่นโดยไม่มีการอุดตันภายในรูพรุน เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 5.2.6 และ 5.2.7 มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสอดคล้องของข้อมูลจากการทดลองกับแบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่ ตามสมการที่คือแบบจำลองแบบ CBM ( สมการ 3.13 ) IBM ( สมการ 3.15 ) SBM ( สมการ 3.18 ) และ CFM ( สมการ 3.20 ) จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.22 – 5.25 ตามลำดับ โดยมีค่า  $R^2$  จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง CBM , IBM , SBM และ CFM เท่ากับ 0.9773 , 0.9258 , 0.9703 และ 0.9764 ตามลำดับเนื่องจากในสารสกัดจากกากถั่วเหลืองมีตัวถูกละลายอยู่หลายชนิดตั้งแต่ขนาดใหญ่อันจนถึงเล็ก ดังนั้นกลไกการอุดตันของทั้ง 4 แบบจำลองจึงคาบเกี่ยวกัน โดยอาจไม่เป็นอย่างใดอย่างหนึ่งอย่างสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

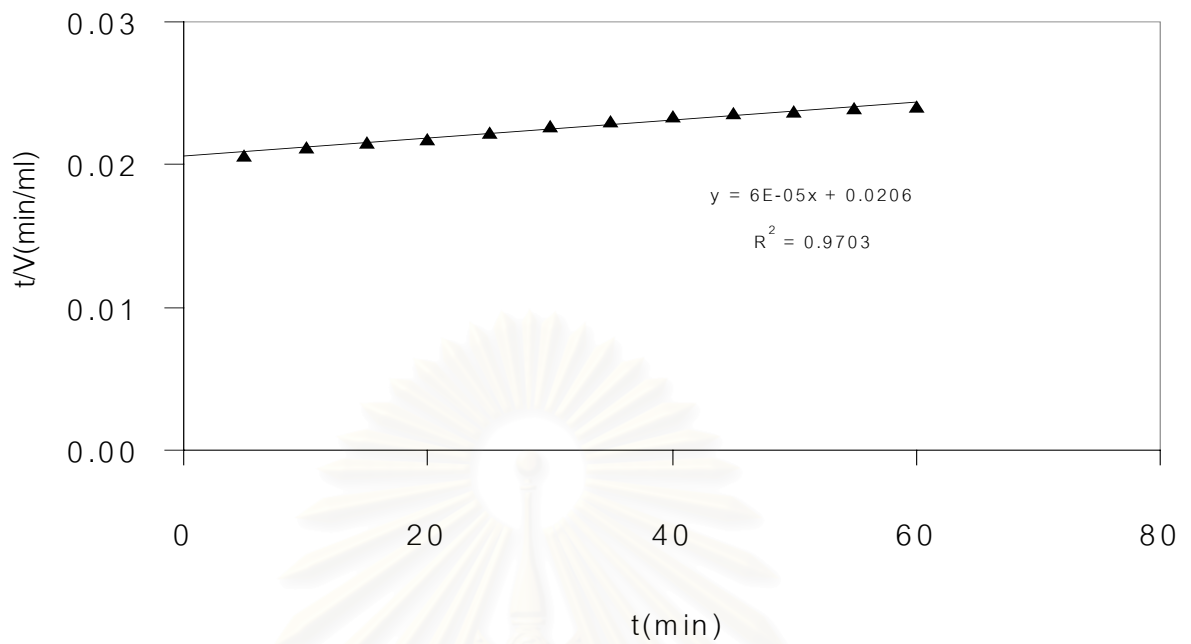


รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CBM

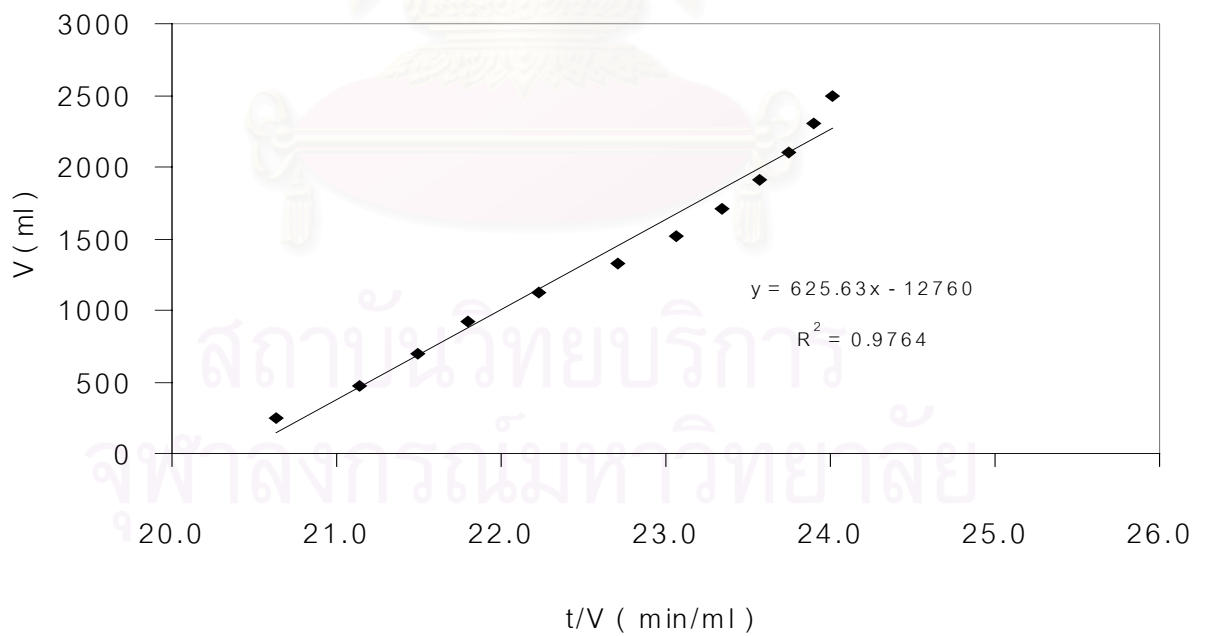


รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง IBM





รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง SBM



รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CFM

## 5.3 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

### 5.3.1 ลักษณะของเพอมีเอทและคอนเซนเตรทจากกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

เพอมีเอทที่ได้จากกระบวนการไมโครฟิลเตรชันจะนำมาทำให้เข้มข้นต่อโดยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เพอมีเอทที่ได้จากกระบวนการไมโครฟิลเตรชันจะมีลักษณะใสสีน้ำตาลอ่อน ส่วนคอนเซนเตรทจะมีลักษณะขุ่นและเหนียวขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.26



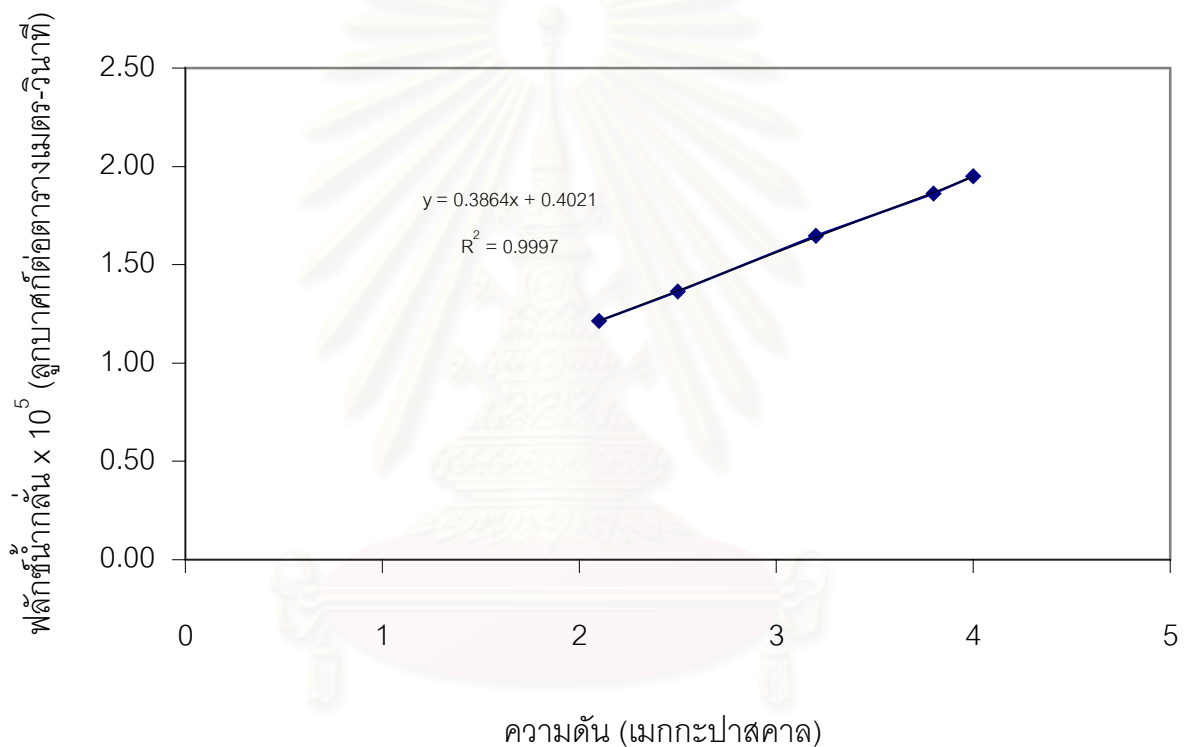
( 1 ) เพอมีเอท

( 2 ) คอนเซนเตรท

รูปที่ 5.26 แสดงความลักษณะเพอมีเอทและคอนเซนเตรทที่ได้จากกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

### 5.3.2 ค่าพลักซ์น้ำกลั่น

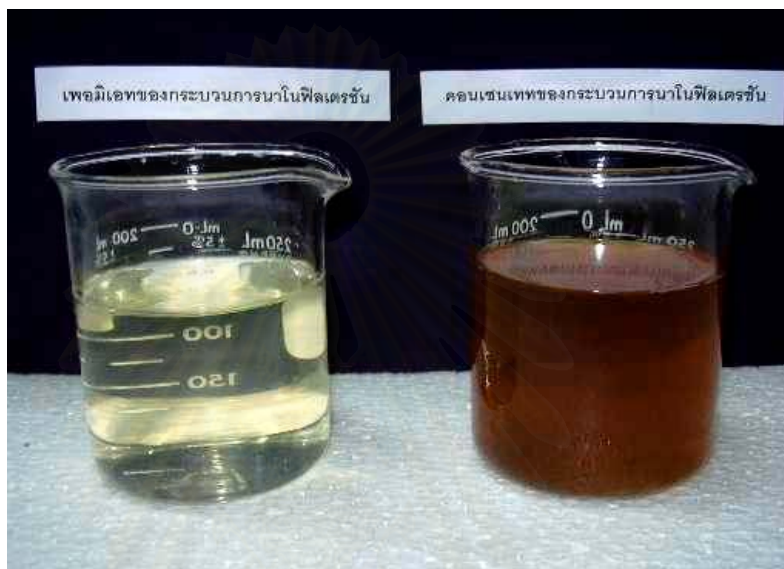
เยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นชนิด NF 7450 ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นชนิดประจุลบ ทำจากโพลีซัลโฟเนต มีค่าเพอมีอะบิลิตีของน้ำกลั่น ซึ่งหาได้จากสมการ  $J_w = L_p \cdot \Delta P$  โดยทำการพลอตกราฟระหว่างค่า  $J_w$  และ  $\Delta P$  ดังแสดงในรูปที่ 5.27 กราฟได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าเพอมีอเทของน้ำกลั่นแปรผันโดยตรงกับค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นดังแสดงในรูป 5.27 ค่าเพอมีอะบิลิตี  $L_p = 0.3864$  (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที) / (เมกกะปาสคาล)



รูปที่ 5.27 แสดงความค่าพลักซ์น้ำกลั่นที่ความดันต่าง ๆ ที่ความเร็วคงที่ 0.011 เมตรต่อวินาทีของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิด NF 7450

### 5.3.3 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์

ลักษณะเพอมีเอทที่ได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้เพอมีเอทที่ได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นสายป้อนแสดงดังรูป 5.28



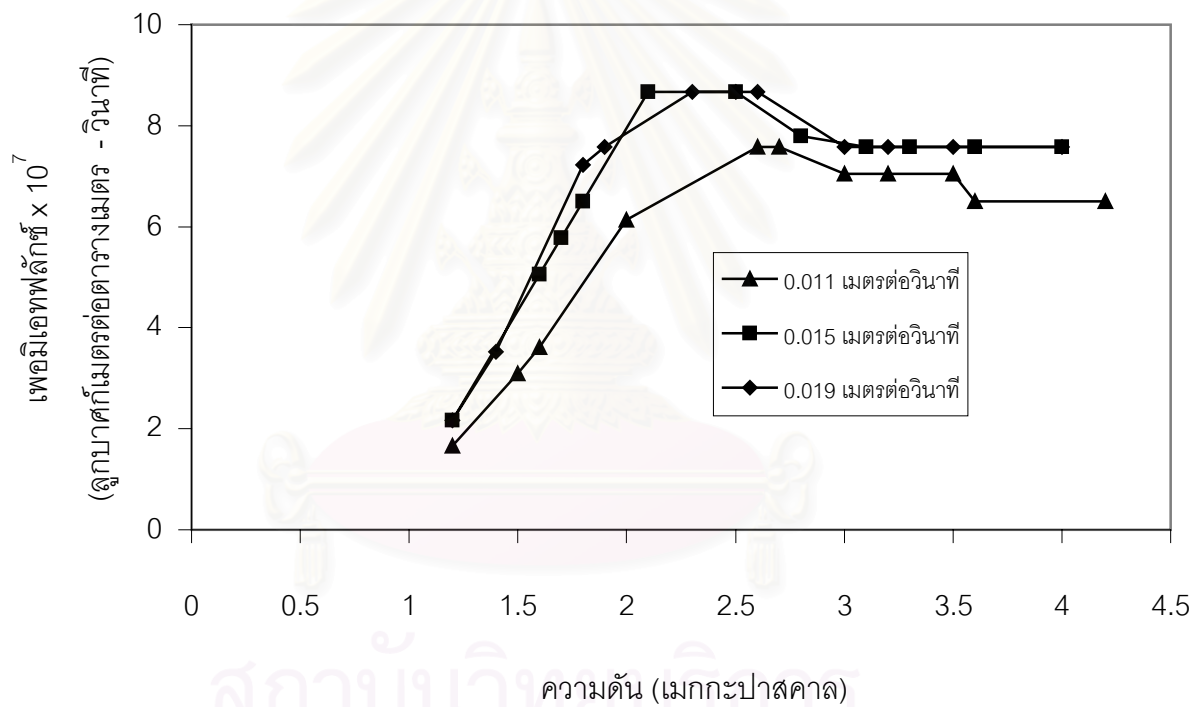
( 1 ) เพอมีเอท

( 2 ) คอนเซนเทรท

รูปที่ 5.28 แสดงความลักษณะเพอมีเอทและคอนเซนเทรทที่ได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

เมื่อพิจารณาถึงผลของความดันที่ความเร็วคงที่ต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ เพอมีเอทฟลักซ์แปรผันโดยตรงกับค่าความดันในช่วงแรก คือค่าเพอมีเอทฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความดันประมาณ 2.0 เมกกะปาสกาล หลังจากนั้นความดันสูงขึ้นความสัมพันธ์ของความดันและเพอมีเอทฟลักซ์จะเบี่ยงเบนจากเส้นตรงจะไม่มีผลทำให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันทำให้เกิดความต้านทานจุดตันที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นมากขึ้น ผลของความดันที่มีเพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงในขณะที่ผลของการถ่ายเทมวลจะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความดันอีกจะทำให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลงและคงที่ แสดงว่าเกิดขึ้นของเจลอัดตัวที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น

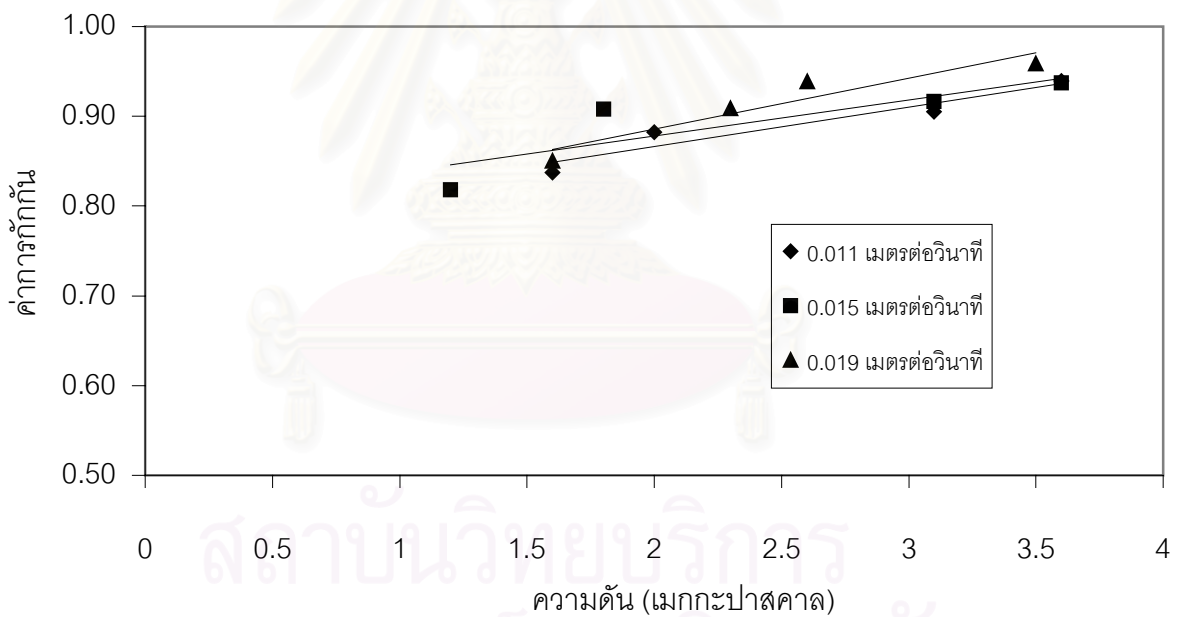
ส่วนผลของความเร็วที่ความดันคงที่ต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ จากการทดลองที่ความเร็ว 0.011 , 0.015 และ 0.019 เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าที่ความเร็วสูงขึ้นทำให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงขึ้นแต่ที่ความเร็ว 0.015 และ 0.019 เมตรต่อวินาที ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ของทั้งสองความเร็วจะค่อนข้างคงที่ ดังนั้นการเพิ่มของความเร็วจะมีผลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ถึงค่าหนึ่งเท่านั้นคือทำให้ความต้านทานที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นลดลงแต่เมื่อถึงค่าความเร็วค่าหนึ่ง การเพิ่มความเร็วจะไม่มีผลในการลดความต้านทานที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น เนื่องจากผลของคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในลักษณะใกล้เคียงกับที่พบในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ดังนั้นการเพิ่มความเร็วมากกว่า 0.015 เมตรต่อวินาทีจะไม่มีผลต่อเพอมีเอทฟลักซ์ ดังแสดงในรูป 5.29



รูปที่ 5.29 แสดงความค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ความดันและความเร็วต่างๆ ของกระบวนการ นาโนฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิด NF 7450

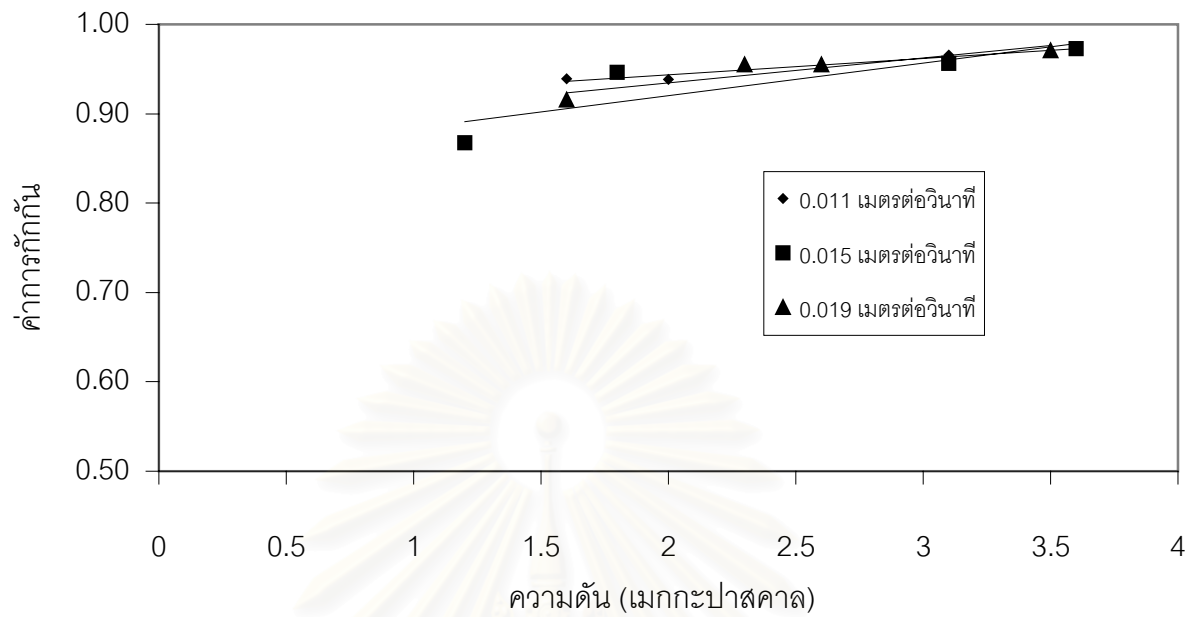
#### 5.3.4 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อค่าการกักกันไดด์ซิน เจนีสติน

ผลของความดันต่อค่าการกักกันของไดด์ซินที่ความเร็วคงที่ ค่าการกักกันจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันเพิ่มขึ้นคืออยู่ในช่วง 0.82 ถึง 0.94 และ 0.87 ถึง 0.97 สำหรับไดด์ซินและเจนีสตินตามลำดับ ส่วนผลของความเร็วต่อค่าการกักกันที่ความดันคงที่ของไดด์ซิน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ค่าการกักกันไดด์ซินเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนค่าการกักกันของเจนีสตินเมื่อเพิ่มความเร็วแทบจะไม่มีผลต่อค่าการกักกันและมีค่าการกักกันสูงสุดที่ความดันประมาณ 3.5 เมกกะปาสคาลโดยมีค่าการกักกันของไดด์ซินและเจนีสตินประมาณ 0.96 และ 0.97 ที่ความเร็ว 0.019 เมตรต่อวินาที จากค่าการกักกันที่มีค่าสูงแสดงว่าไดด์ซินและเจนีสตินถูกกักกันไว้ได้เกือบทั้งหมดในคอนเซนเทรท ดังนั้นจึงเหมาะสมในการใช้เยื่อแผ่นชนิดนี้ในการทำให้ไดด์ซินและเจนีสตินเพื่อทำให้เข้มข้นขึ้นดังแสดงในรูป 5.30 และ 5.31



รูปที่ 5.30 แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันของไดด์ซิน

โดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน



รูปที่ 5.31 แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันของเงินสติน โดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3.5 ผลของความดันและความเร็วของสายป้อนต่อปริมาณแคลเซียมและค่าการนำไฟฟ้า

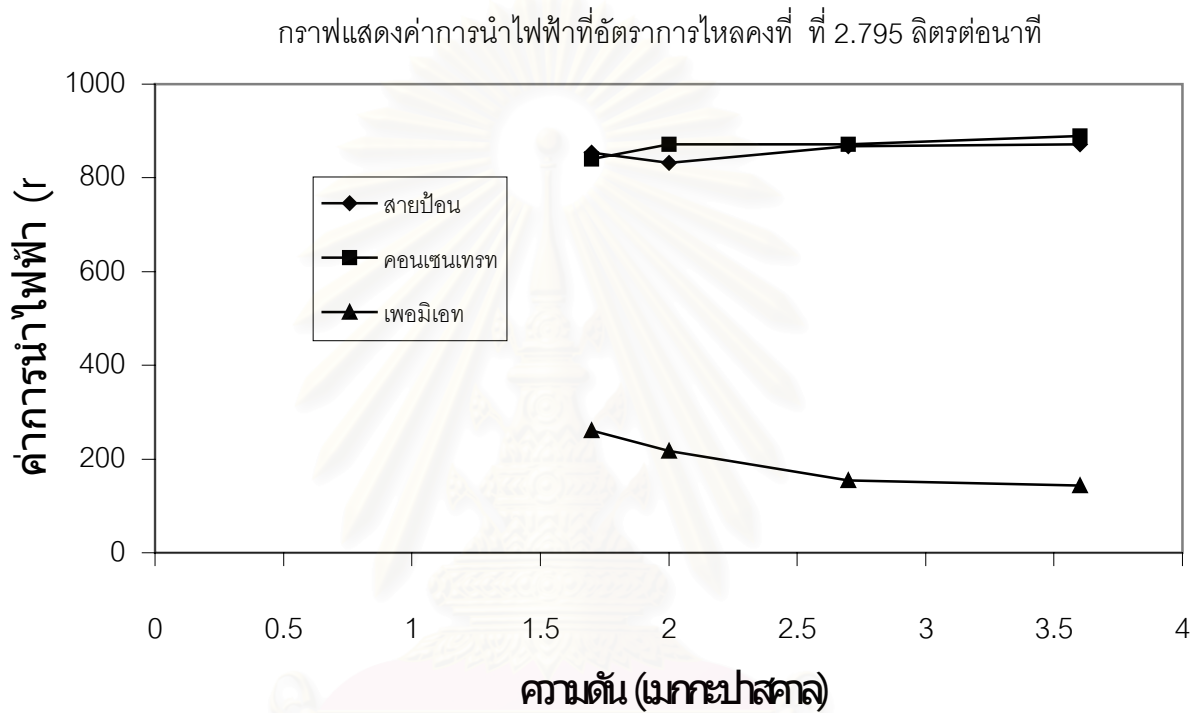
ในถั่วเหลืองมีแร่ธาตุสำคัญหลายชนิดเป็นส่วนประกอบโดยเฉพาะแคลเซียมและโพแทสเซียม ค่าการนำไฟฟ้าอาจใช้เป็นการประมาณปริมาณแร่ธาตุชนิดต่างๆโดยรวม จากรูปที่ 5.32 – 5.34 เปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของสายป้อนซึ่งแตกต่างจากค่าการนำไฟฟ้าของเพอมีเอทแสดงว่า เยื่อแผ่นที่ใช้สามารถกักกันสารที่สามารถนำไฟฟ้าหรือแร่ธาตุชนิดต่างๆ เมื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่าการกักกันการนำไฟฟ้าที่ความเร็วของสายป้อนคงที่ จะเห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าการกักกันนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.6 ถึง 0.9 ค่าการกักกันการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้แร่ธาตุต่างๆ ไปเกาะที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนสภาพความเป็นประจุของเยื่อแผ่น ส่วนผลของความเร็วของสายป้อนต่อค่าการกักกันการนำไฟฟ้าที่ความดันต่างๆมีผลเล็กน้อย จากการทดลองค่าการกักกันการนำไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นความสามารถในการไหลผ่านเยื่อแผ่นของแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสารสกัดค่อนข้างต่ำ

แคลเซียมเป็นแร่ธาตุที่สำคัญที่มีอยู่ประมาณ 0.2 ถึง 0.3 เปอร์เซ็นต์ของถั่วเหลืองที่สกัดเอาน้ำมันออกแล้ว เมื่อพิจารณาผลของความดันที่ดำเนินการ(1.2 – 3.6 เมกกะปาสคาล)ต่อค่าการกักกันแคลเซียมที่ความเร็วของสายป้อนต่าง ๆ ค่าการกักกันจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่าความดันเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มอยู่ในช่วง 0.77 ถึง 0.88 ของความเร็ว 0.011 เมตรต่อวินาที ช่วง 0.82 ถึง 0.93 ของความเร็ว 0.015 เมตรต่อวินาทีและช่วง 0.881 ถึง 0.89 ของความเร็ว 0.019 เมตรต่อวินาที จากค่าการกักกันที่ได้จะเห็นได้ว่าเยื่อแผ่นมีความสามารถในการกักกันแคลเซียมได้สูงซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกับแนวโน้มของค่าการนำไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.35

ผลของความเร็วของสายป้อนต่อค่าการกักกันแคลเซียมที่ความดันคงที่ พบว่าความเร็วไม่มีผลต่อค่าการกักกันแคลเซียม ดังแสดงในรูป 5.35 เนื่องจากเยื่อแผ่นที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันชนิด NTR 7450 ซึ่งประกอบด้วยชั้นของซิลโฟเนต โพลีซิลโฟนซึ่งเป็นเยื่อแผ่นชนิดประจุลบ แต่การที่เยื่อแผ่นมีความสามารถในการกักกันแคลเซียมซึ่งมีประจุบวกสูงอาจเกิดจากแคลเซียมในสายป้อนบางส่วนไปเกาะที่เยื่อแผ่นและทำให้ความประจุของเยื่อแผ่นเปลี่ยนสภาพจากเยื่อแผ่นประจุลบเป็นเยื่อแผ่นประจุบวกมากขึ้นและกักกันประจุบวกมากขึ้นซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกับการศึกษาของ Johan S.และคณะ (2001) ที่ได้ศึกษาความหนาแน่นของประจุบนเยื่อแผ่น NTR 7450 ในการแยกโดยใช้สารละลาย  $\text{NaCl}$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $\text{MgCl}_2$   $\text{MgSO}_4$  และ  $\text{LaCl}_3$  พบว่าความ

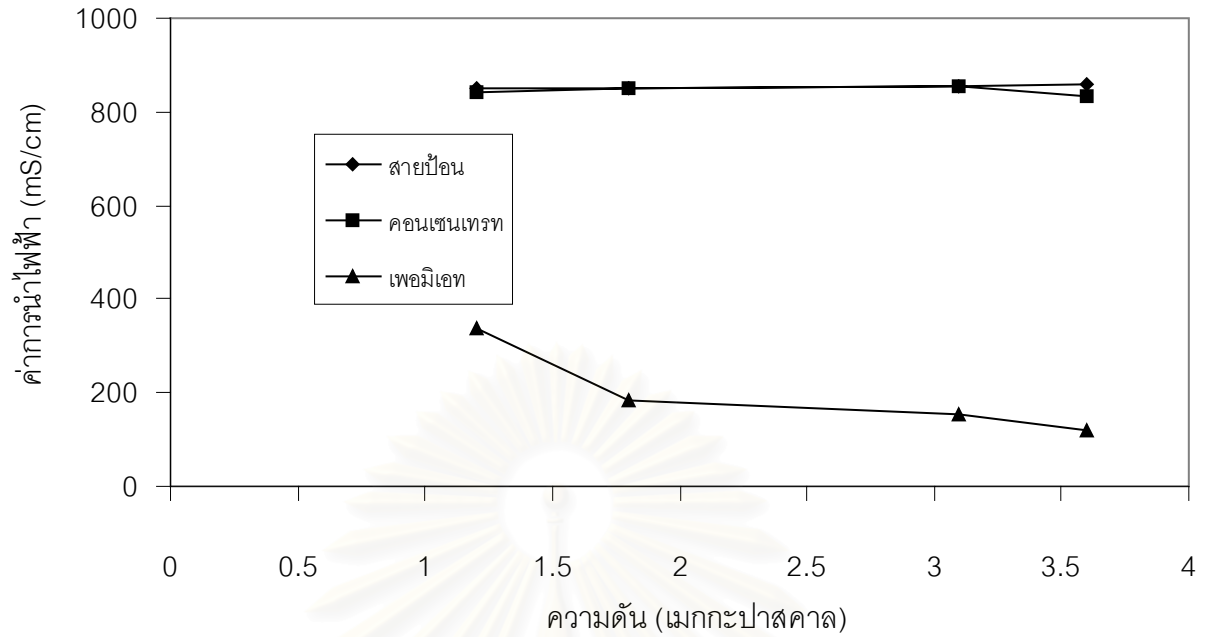


หนาแน่นของประจุบนเยื่อแผ่นขึ้นอยู่กับชนิดของเกลือและความเข้มข้น พบว่าความหนาแน่นของเยื่อแผ่น NTR 7450 เปลี่ยนจากประจุลบเป็นประจุบวกเมื่อเกลือที่ใช้เป็นแมกนีเซียมซัลเฟต โดยเกิดจากการที่แมกนีเซียมไอออนถูกดูดซับที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นทำให้ประจุบนเยื่อแผ่นเปลี่ยนจากประจุลบเป็นบวกมีผลทำให้ค่าการกักกันแมกนีเซียมมากขึ้น

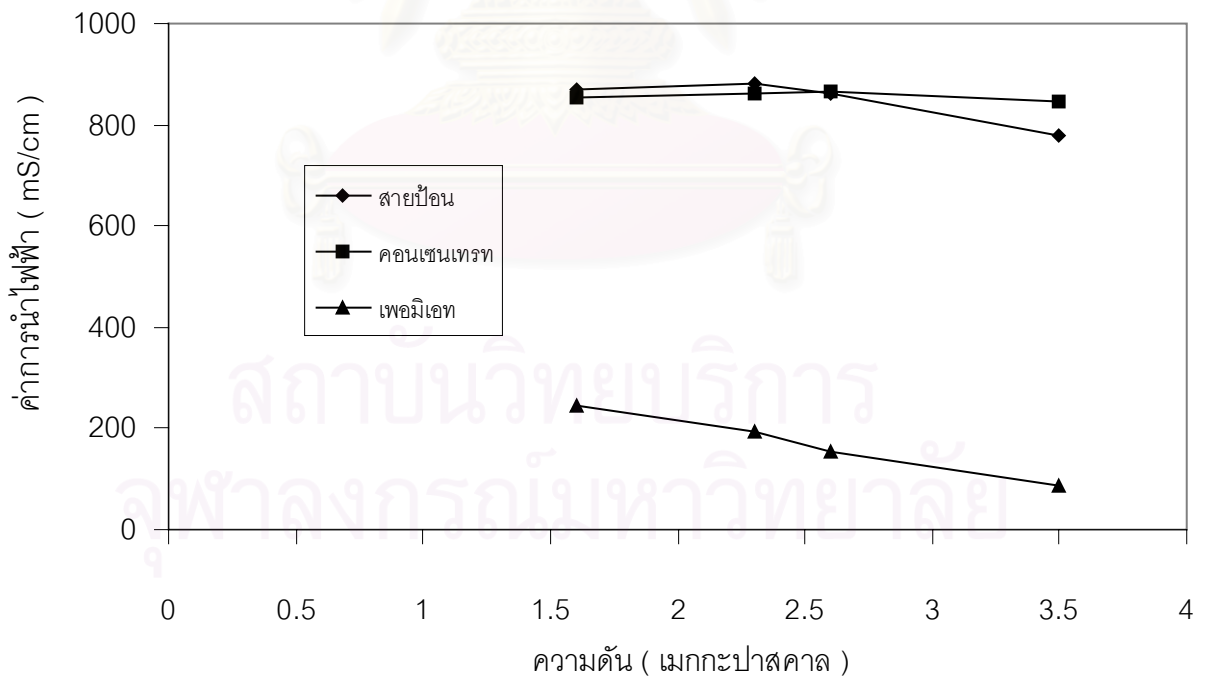


รูปที่ 5.32 แสดงผลของความดันที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมิเอทของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ที่ความเร็วของสายป้อน 0.011 เมตรต่อวินาที

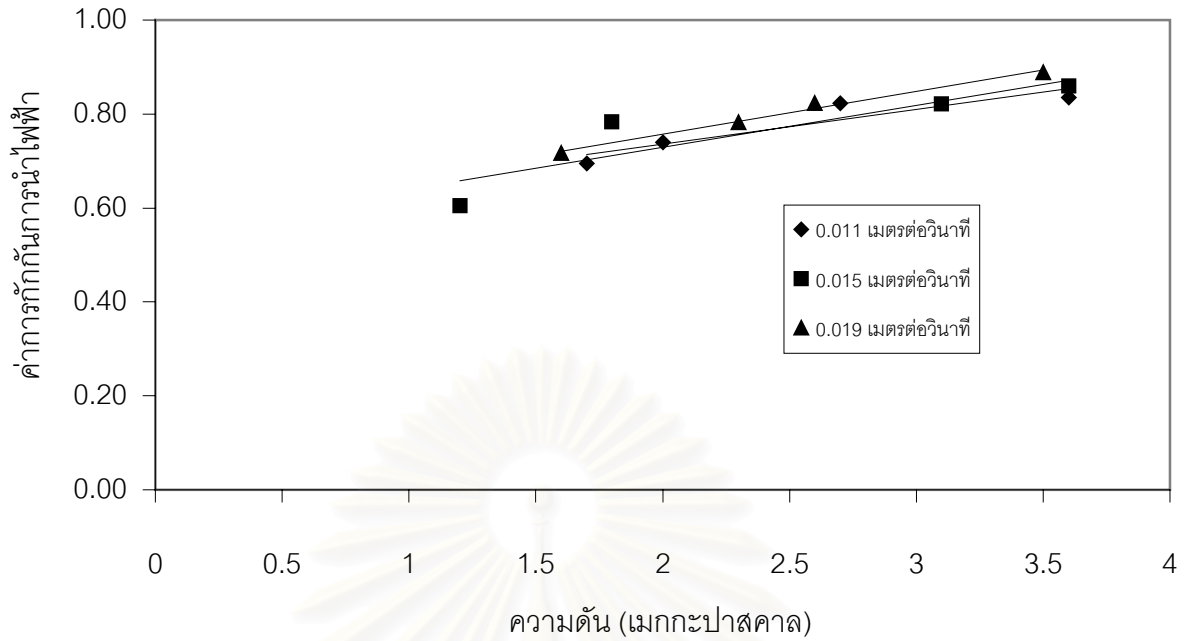
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



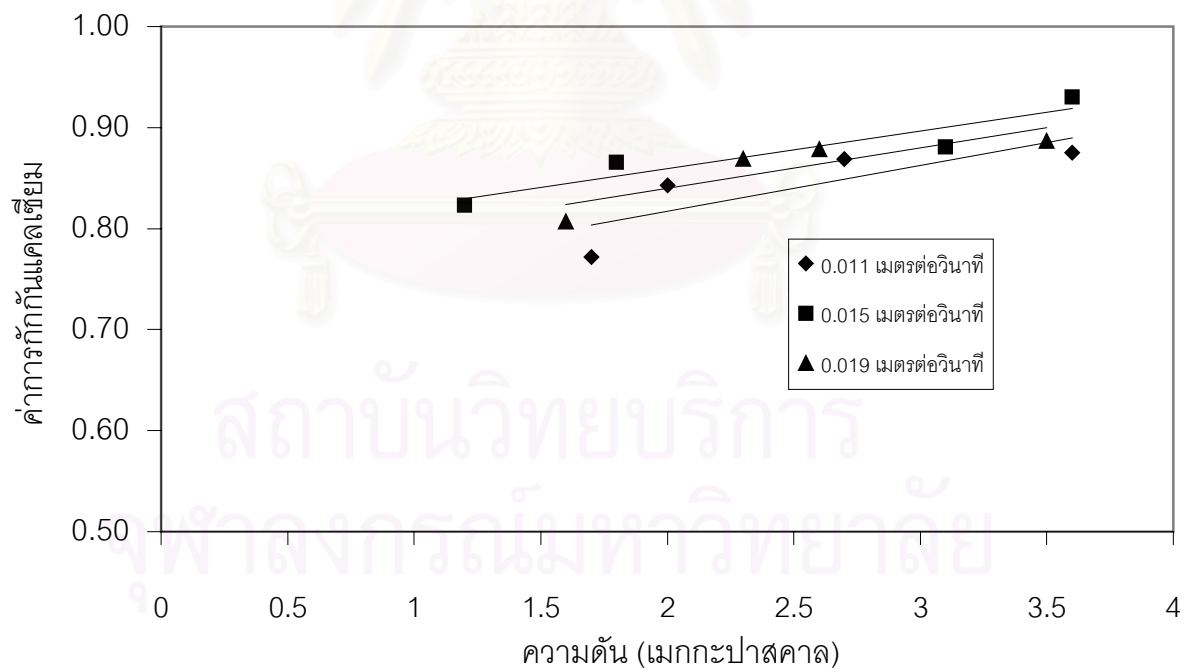
รูปที่ 5.33 แสดงผลของความดันที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ที่ความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.34 แสดงผลของความดันที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ที่ความเร็วของสายป้อน 0.019 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.35 แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันการนำไฟฟ้าของ กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

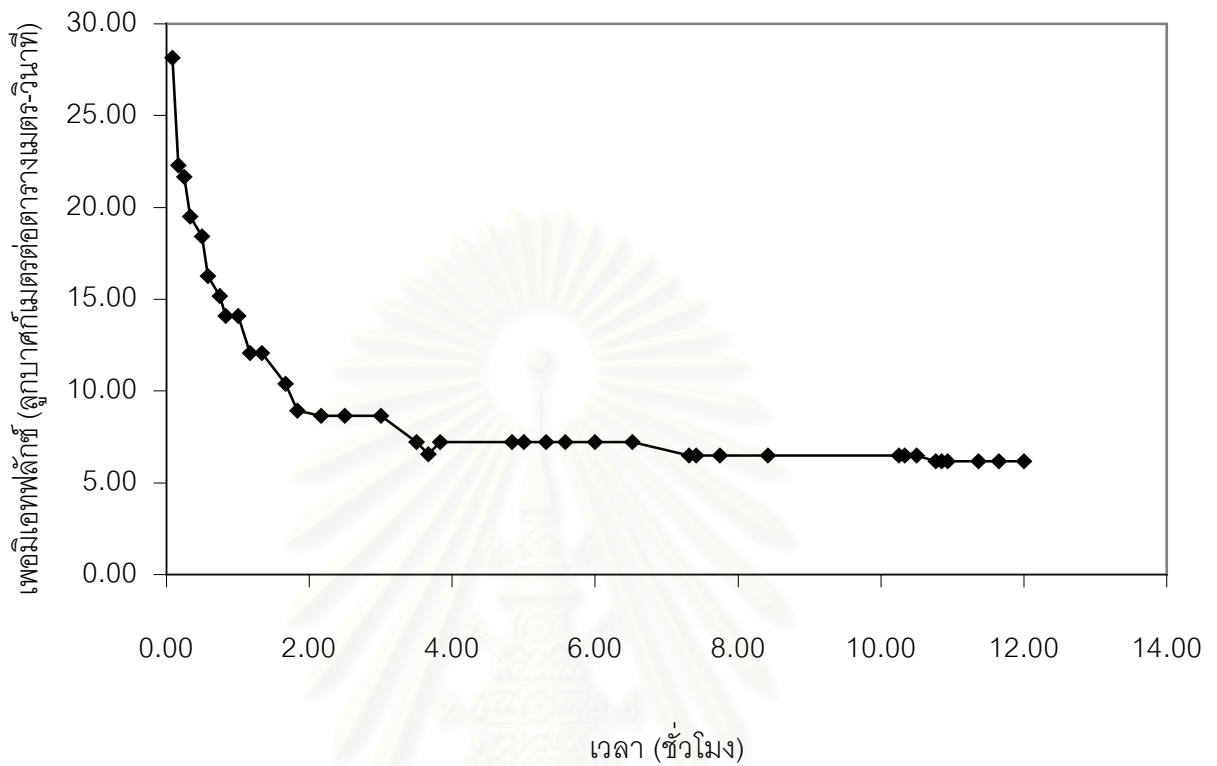


รูปที่ 5.36 แสดงผลของความดันและความเร็วของสายป้อนที่มีต่อค่าการกักกันของแคลเซียมของ กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

### 5.3.6 ผลของค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆในการทดลองแบบกะ

จากผลการทดลองที่ผ่านมาของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันทำการศึกษาผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ โดยกำหนดความเร็วที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.6 เมกกะปาสคาล พบว่าการกรองแบบกะ (batch) เพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและคงที่ที่ช่วงท้ายของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.37

โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงเวลาประมาณ 20 นาที ซึ่งเป็นผลมาจากคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันจะลดลงประมาณ 31 เปอร์เซ็นต์จากฟลักซ์เริ่มต้น ช่วงที่สอง 20 – 110 นาที ลดลงแต่ลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าช่วงแรก การที่อัตราช้าลงเนื่องจากเกิดการสะสมของตัวถูกละลายมากขึ้นเป็นชั้นบางๆ เคลือบอยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น ช่วงหลัง 110 นาที เป็นช่วงที่ฟลักซ์ลดลงด้วยอัตราที่ช้ามากเกือบคงที่ เนื่องจากความหนาของชั้นตัวถูกละลายที่สะสมที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นเริ่มคงที่ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราการทับถมของตัวถูกละลายมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการหลุดออกของตัวถูกละลายจากชั้นของการสะสมเนื่องจากผลของไหลขวาง ซึ่งการแบ่งช่วงการลดลงของเพอมีเอทเป็น 3 ช่วงนี้ตรงกับรายงานการวิจัยของ Fane และ Fell (1992) ซึ่งได้กล่าวว่าการลดลงของฟลักซ์ช่วงแรกเนื่องจากคอนเซนเทรชันโพลาไรเซชันเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการลดลงของฟลักซ์เป็นเวลานานเกิดจากการเกิดฟาวลิง ซึ่งทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างช้าๆ เช่นเดียวกับงานวิจัยของยงยุทธ เฉลิมาติ (2544) ที่รายงานเกี่ยวกับการกรองน้ำอ้อยดิบโดยแบ่งการลดลงของเพอมีเอท ฟลักซ์เป็น 3 ช่วงเช่นกัน

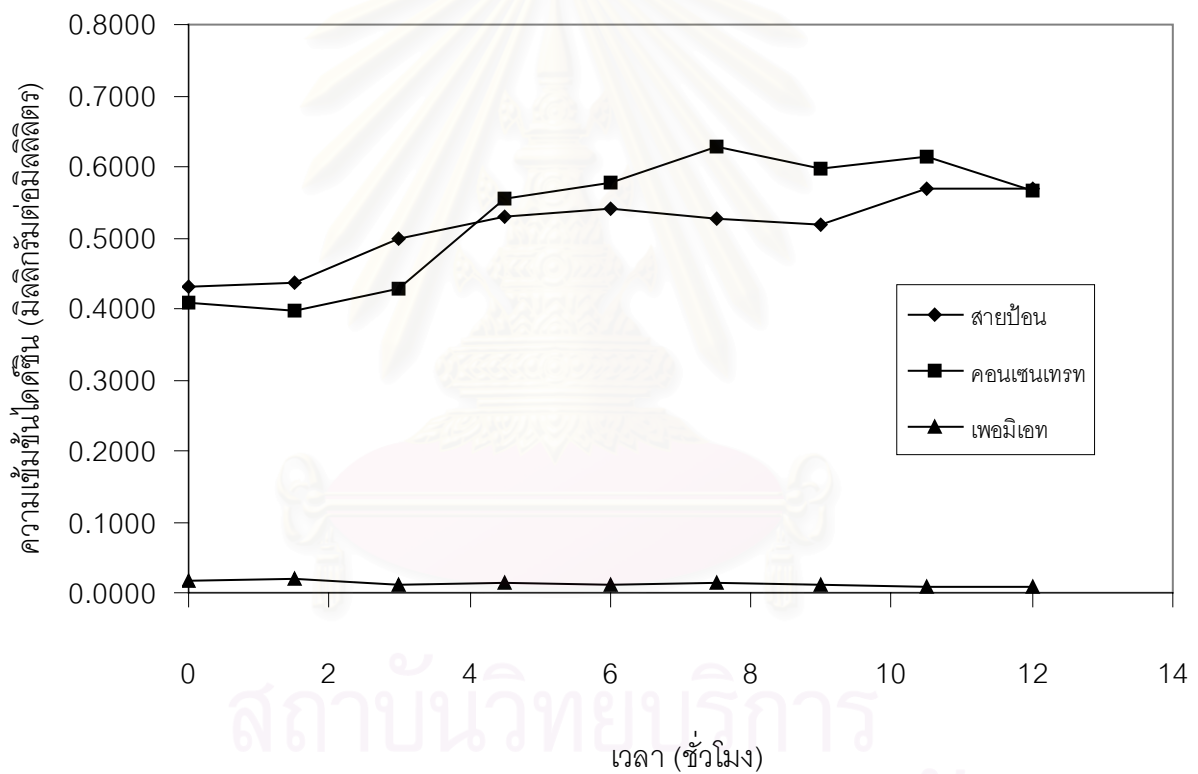


รูปที่ 5.37 แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ โดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่ความดันคงที่ที่ 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที

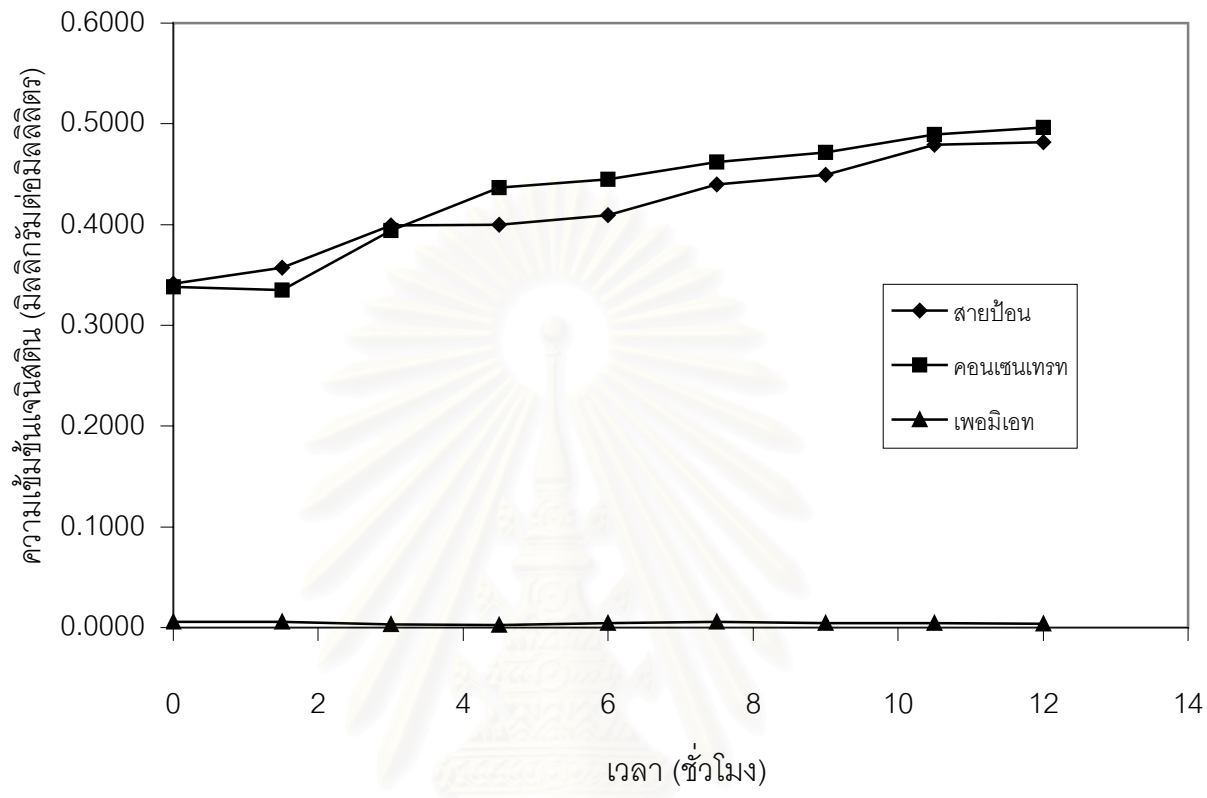
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3.7 ผลของความเข้มข้นไดคิซีน เจนิสตินของสายป้อน คอนเซนเทรท เพอมีเอทและค่าการกักกันที่เวลาต่างๆ ในการทดลองแบบกะ ( batch ) ที่ความเร็วของสายป้อนและความดันคง

ค่าปริมาณไดคิซีนและเจนิสตินในสายเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ จะคงที่ ส่วนค่าการกักกันของไดคิซีน เจนิสตินที่เวลาต่างๆจะคงที่เช่นกัน อยู่ในช่วงมากกว่า 0.95 แสดงให้เห็นว่าการดูดตันส่วนใหญ่ของเยื่อแผ่นไม่ได้เกิดจากไดคิซีนและเจนิสติน แต่เกิดจากโปรตีนและน้ำตาลดังแสดงในรูป 5.38 - 5.40

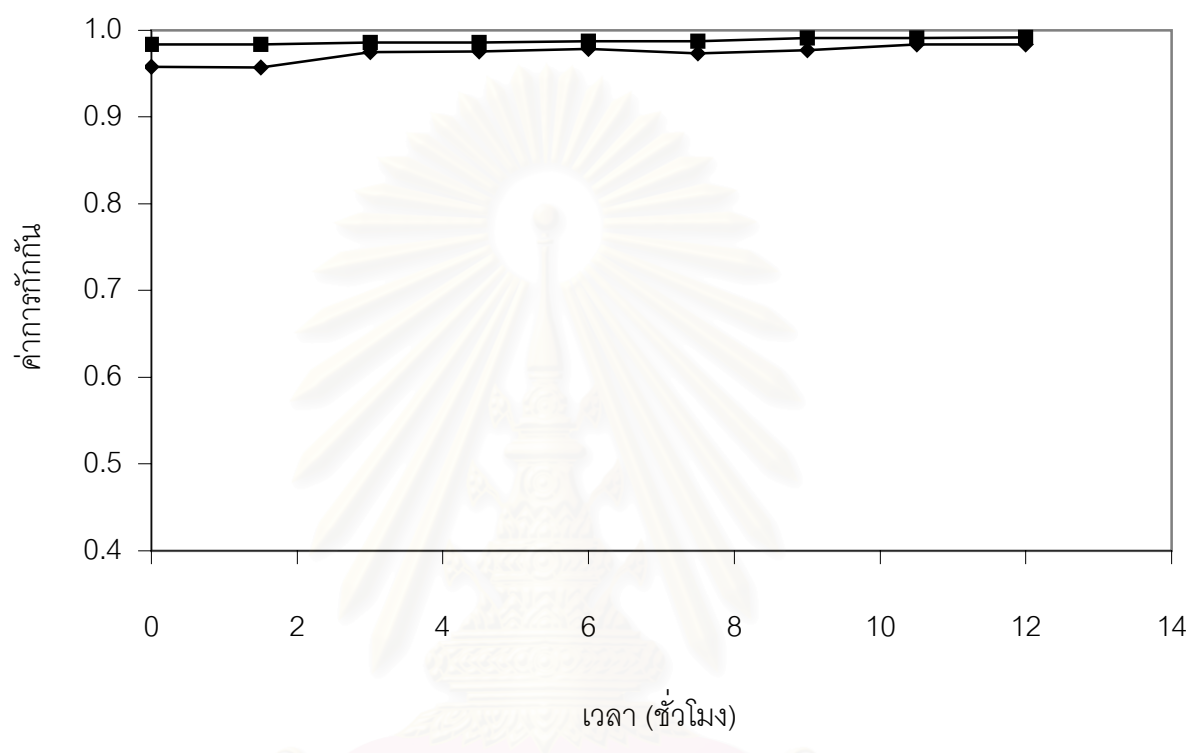


รูปที่ 5.38 แสดงปริมาณไดคิซีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดันคงที่ที่ 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.39 แสดงปริมาณเจนิสดีเอ็นเอในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดันคงที่ที่ 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



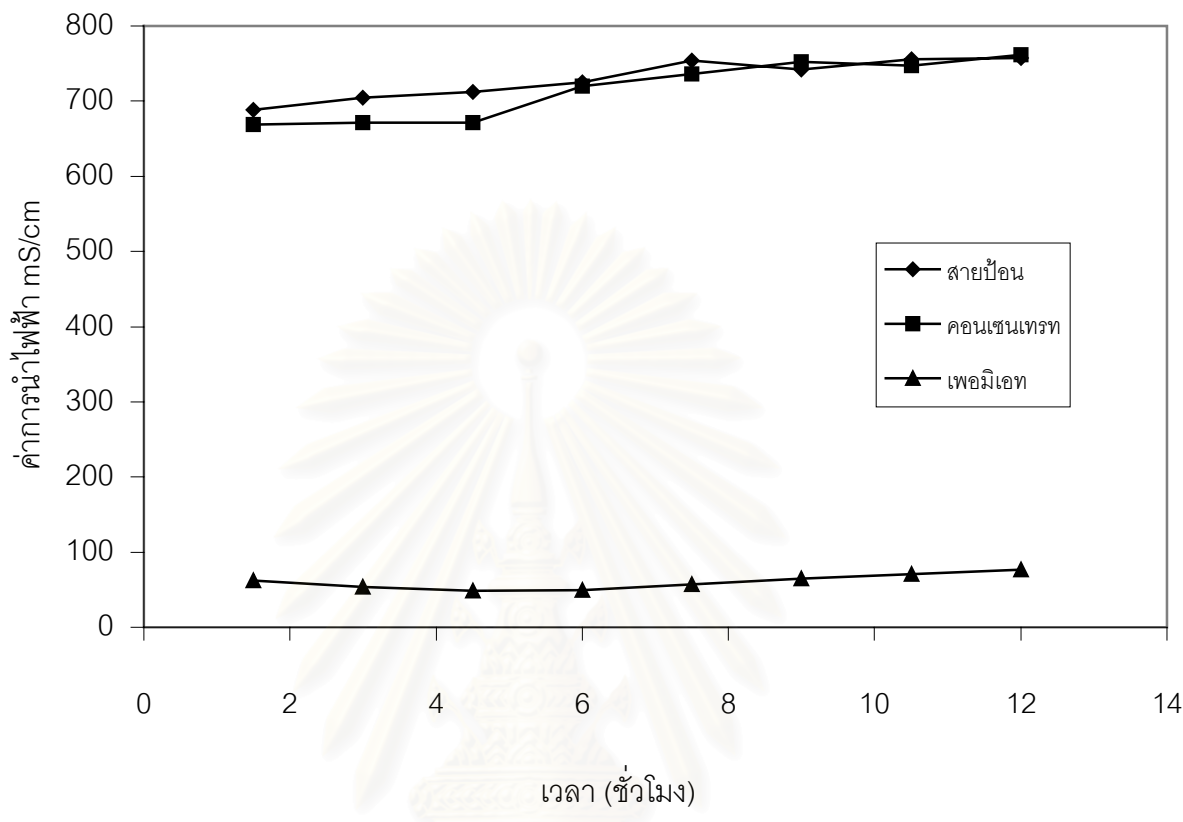
รูปที่ 5.40 แสดงค่าการกำกับของไดคตินและเงินสตินที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนไฟเบอร์ขึ้น โดยใช้ความดันคงที่ที่ 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



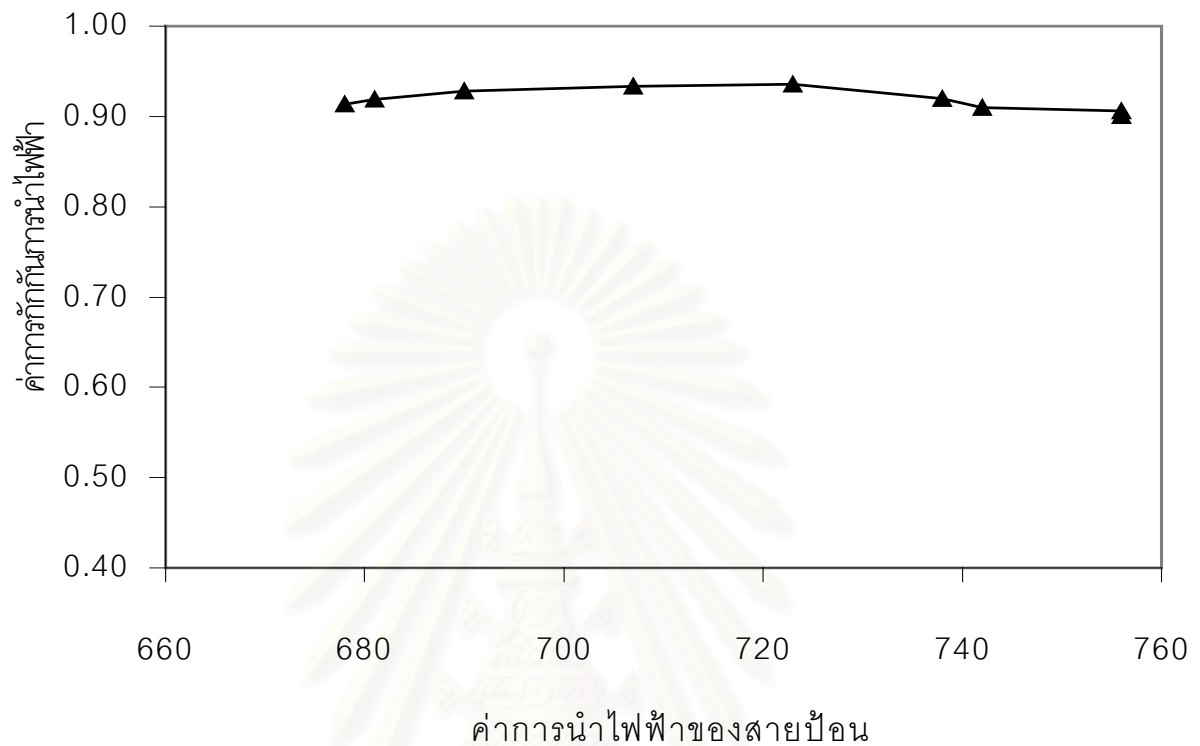
### 5.3.8 ค่าการนำไฟฟ้าของสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ในการทดลองแบบกะ ( batch ) ที่ความเร็วของสายป้อนและความดันคงที่

จากรูปที่ 5.41 จะเห็นว่า การนำไฟฟ้าของคอนเซนเทรทและเพอมีเอทแตกต่างกันมาก เมื่อพิจารณาจากค่าการกักกันจากรูปที่ 5.42 พบว่าค่าการกักกันอยู่ในช่วง 0.90 – 0.94 โดยความเข้มข้นของสายป้อนไม่มีผลกับค่าการกักกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟแสดงปริมาณแคลเซียมของคอนเซนเทรทและเพอมีเอทพบว่าค่าจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับกราฟการนำไฟฟ้าคือ ความเข้มข้นของแคลเซียมในคอนเซนเทรทจะสูงกว่าในเพอมีเอทมากดังแสดงในรูป 5.43 ส่วนค่าการกักกันของแคลเซียมอยู่ในช่วง 0.90 – 0.91 แสดงในรูปที่ 5.44 ซึ่งความเข้มข้นของสายป้อนไม่มีผลกับค่าการกักกันเช่นเดียวกับค่าการนำไฟฟ้า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเยื่อแผ่นสามารถกักกันประจุได้สูงมาก แม้ว่าเยื่อแผ่นที่ใช้จะเป็นเยื่อแผ่นที่มีลักษณะเป็นประจุลบซึ่งน่าจะแยกเกลือที่เป็นประจุบวกได้ดี แต่เนื่องจากผลของการที่ประจุบวกที่มีอยู่ในสารสกัดไปเกาะที่ผิวของเยื่อแผ่นเนื่องจากแรงดึงดูดของประจุบวกและประจุลบทำให้สภาพความเป็นประจุของเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงไปจากประจุลบกลายเป็นประจุบวก ทำให้ความสามารถในการกักกันเกลือที่มีประจุบวกด้วยกันสูงขึ้น ส่วนการที่ความเข้มข้นของสายป้อนไม่มีผลต่อการกักกันอาจเกิดเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสายป้อนไม่มากพอที่จะแสดงให้เห็นผลความแตกต่างของความเข้มข้นได้



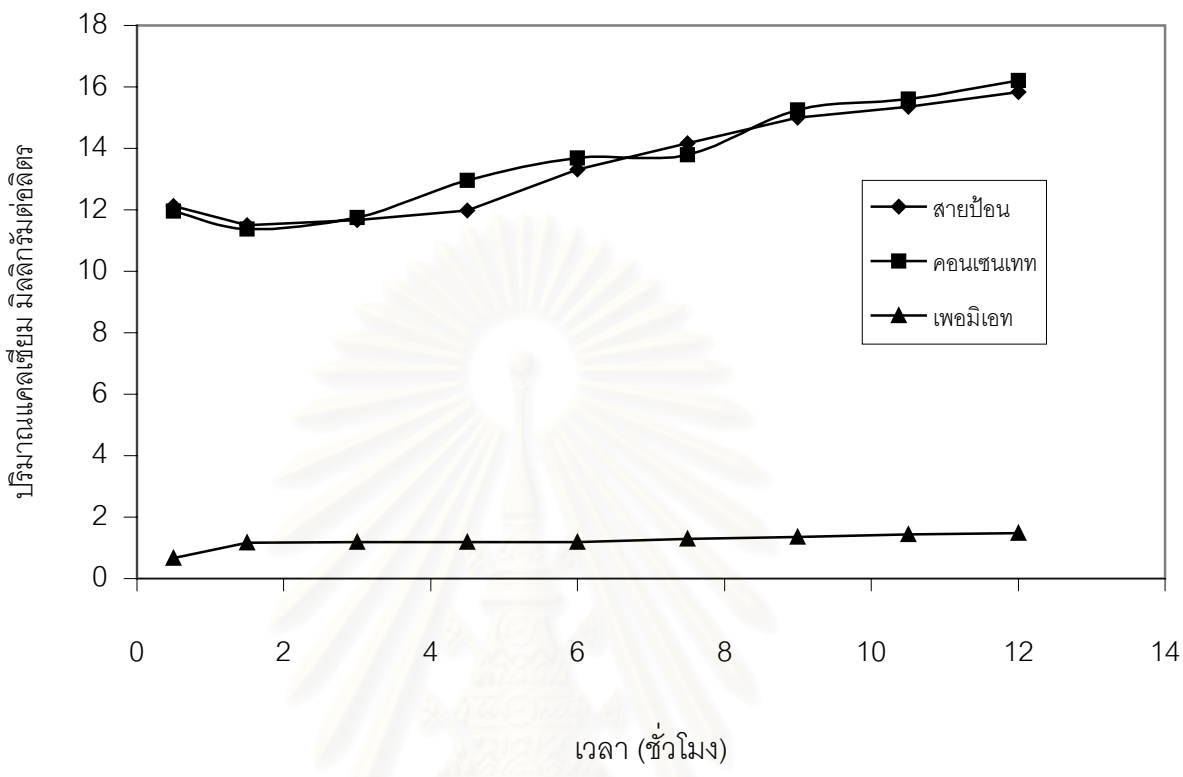
รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของสายบ๊อง คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายบ๊อง 0.015 เมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.42 แสดงค่าการกักกันการนำไฟฟ้าที่ค่านำไฟฟ้าในสายป้อนต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบความเข้มข้นของแคลเซียมในสายป้อน คอนเซนเททและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.44 แสดงค่าการกักกันของแคลเซียมที่ความเข้มข้นของแคลเซียมในสายป้อนต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่ความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตรต่อวินาที

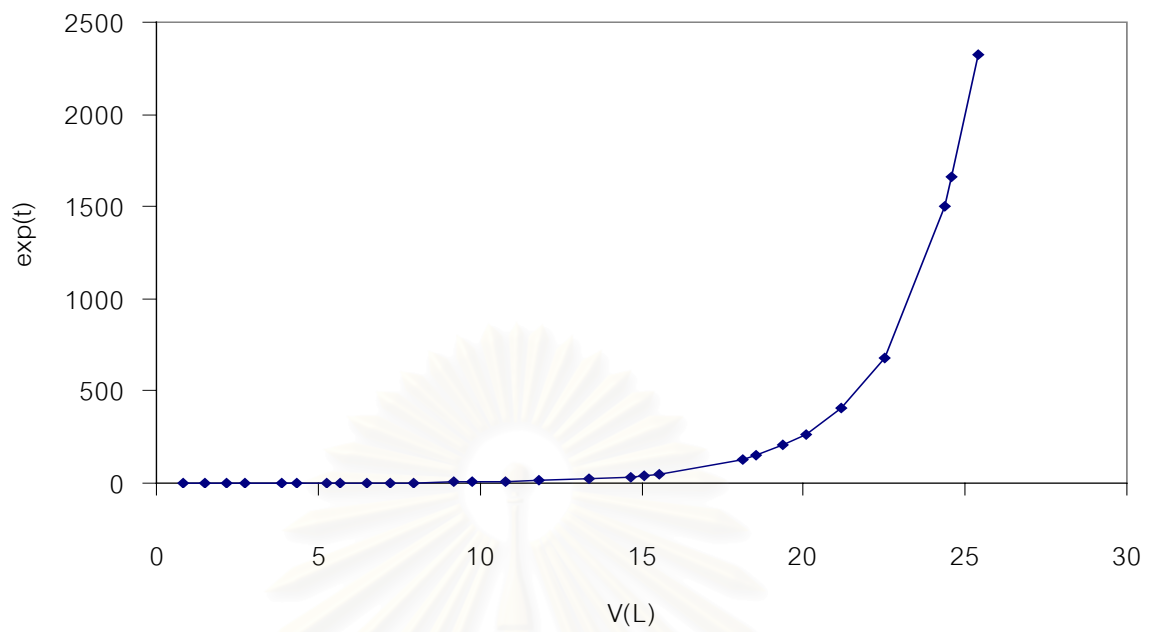
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3.9 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองต่างๆ ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

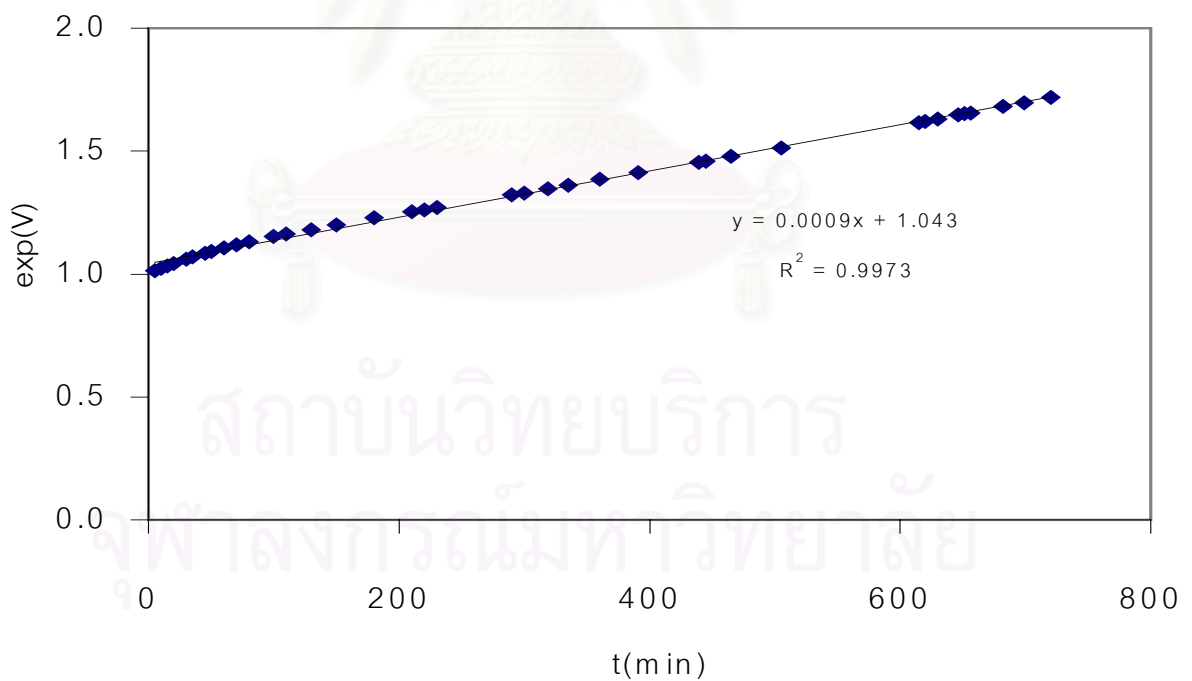
#### แบบจำลองภายใต้ความดันคงที่

ผลของการกรองโดยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกันโดยแบบจำลองแบบต่างๆ คือ แบบจำลอง CBM ตามกราฟ รูป 5.45 โดยพลอตระหว่างปริมาตรการกรองกับเอกซ์โปเนนเชียลของเวลา แบบจำลอง IBM ตามกราฟรูปที่ 5.46 โดยพลอตกราฟระหว่างเวลากับเอกซ์โปเนนเชียลของปริมาตรการกรอง แบบจำลอง SBM ตามกราฟรูปที่ 5.47 โดยพลอตระหว่างเวลากับอัตราส่วนของเวลาต่อปริมาตรการกรองและแบบจำลอง CFM ตามกราฟรูปที่ 5.48 โดยพลอตระหว่างอัตราส่วนของเวลาต่อปริมาตรการกรองกับปริมาตรการกรอง จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองต่างๆ โดยรวมพบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองแบบ IBM มากที่สุดซึ่งอธิบายถึงลักษณะการกรองโดยมีการสะสมตัวของการเกิดการอุดตันโดยโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งสามารถซ้อนทับอยู่บนโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งได้บนเยื่อแผ่น โดยกราฟที่ได้จากการพลอตระหว่าง  $t$  กับ  $\exp(V)$  มีค่า  $R^2 = 0.9973$  เนื่องจากในสารสกัดจากกากถั่วเหลืองมีตัวถูกละลายอยู่หลายชนิดตั้งแต่ขนาดใหญ่มจนถึงเล็ก ดังนั้นกลไกการอุดตันของทั้ง 4 แบบจำลองจึงอาจคาบเกี่ยวกัน โดยอาจจะไม่เป็นอย่างหนึ่งอย่างใดอย่างสมบูรณ์

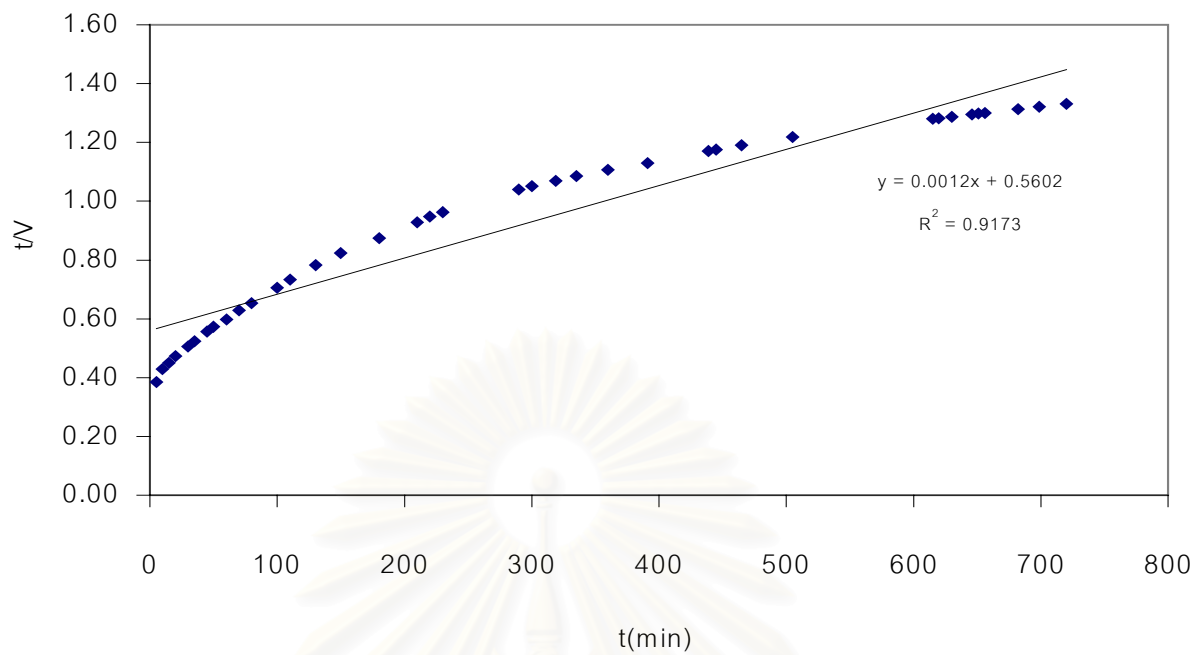
ผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาพลอตระหว่าง  $\frac{d^2t}{dv^2}$  และ  $\frac{dt}{dv}$  บนสเกล  $\log - \log$  เพื่อเปรียบเทียบกลไกการกรองของระบบกับแบบจำลองทั้ง 4 ดังแสดงในรูปที่ 5.49 จะได้ค่าความชัน  $\beta$  เท่ากับ 1.9295 ( $\approx 2$ ), 1.457 ( $\approx 1.5$ ) และ 1.0431 ( $\approx 1$ ) ตามลำดับ โดยค่า  $\beta$  แสดงถึงลักษณะเฉพาะของกลไกการอุดตันแบบต่างๆ โดยค่า  $\beta$  เท่ากับ 2.0, 1.5, 1.0 และ 0.0 แสดงถึงแบบจำลอง CBM SBM IBM และ CFM ตามลำดับ ดังนั้นการกรองที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะโดยช่วงแรกของการกรองมีลักษณะเป็นแบบ CBM (เวลา 0 – 20 นาที) ช่วงที่สองเป็นแบบ SBM (เวลา 20 – 50 นาที) และช่วงที่สามเป็นแบบ IBM (50 นาที - 3 ชั่วโมง) อย่างไรก็ตามลักษณะการอุดตันที่มีผลต่อการกรองมากเป็นไปตามแบบจำลอง IBM คือเกิดการอุดตันของตัวถูกละลายอัดทับกันที่ผิวเยื่อแผ่น เนื่องจากลักษณะของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันมีรูพรุนขนาดเล็ก การอุดตันส่วนใหญ่จึงเกิดที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น



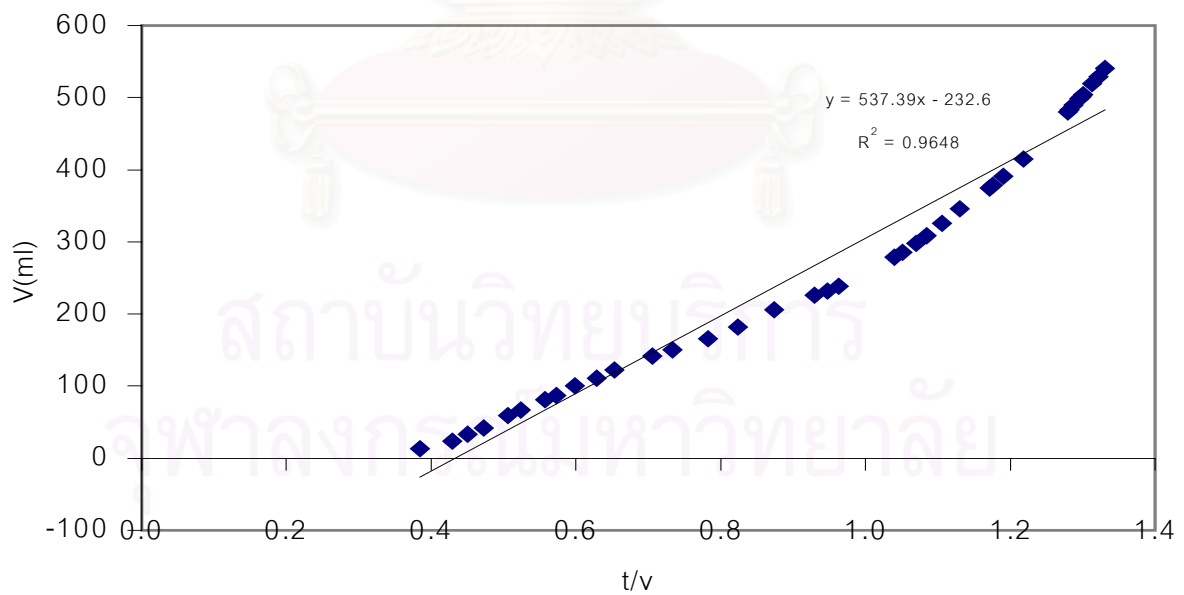
รูปที่ 5.45 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CBM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน



รูปที่ 5.46 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง IBM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

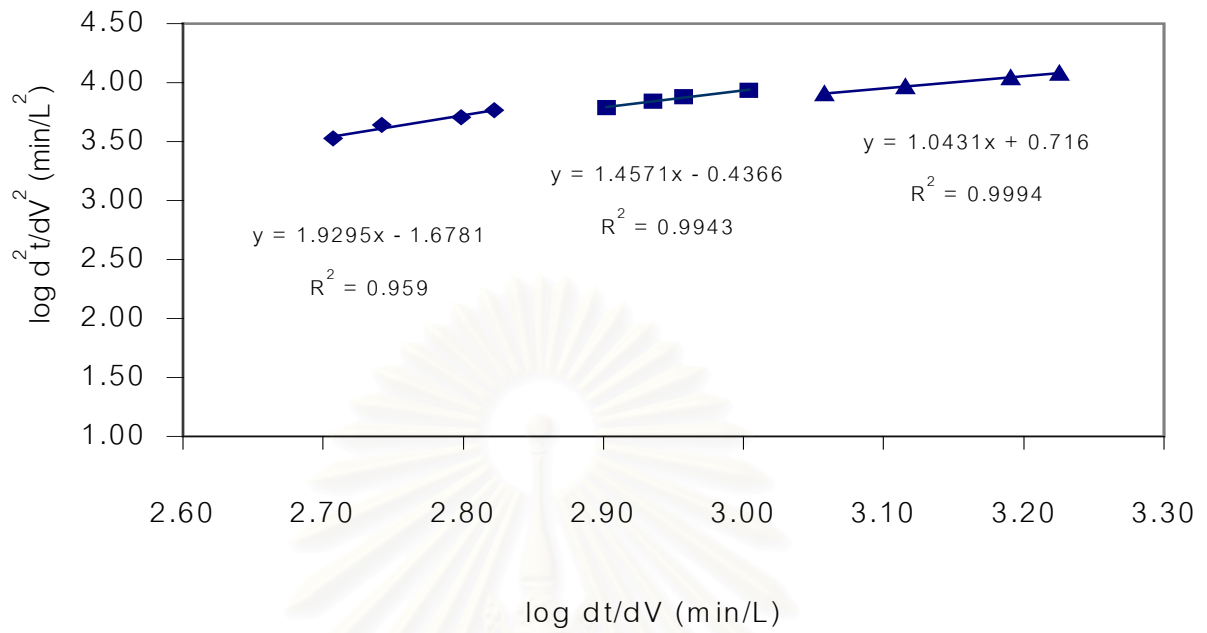


รูปที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง SBM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน



รูปที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง CFM ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน





รูปที่ 5.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log dt/dV$  กับ  $\log d^2t/dV^2$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สรุปผลการทดลอง

การศึกษากำหนดให้สารสกัดจากการถั่วเหลืองเข้มข้นโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน มีรายละเอียดสรุปผลการทดลองดังนี้

1. สารสกัดไอโซฟลาโวนจากกากถั่วเหลืองด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีความเข้มข้นของไดด์ซินและเจนิสตินเท่ากับ 0.145 และ 0.134 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไดด์ซินและเจนิสตินเท่ากับ 0.1 และ 0.09 เปอร์เซ็นต์ของกากถั่วเหลืองตามลำดับ
2. การลดผลของคอนเซนเทรชันโพลาริเซชันของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันทำได้โดยการเพิ่มความเร็วแต่ที่ความเร็วของสายป้อนมากกว่า  $1.07 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาทีจะไม่มีผลต่อคอนเซนเทรชันโพลาริเซชัน
3. ผลของการเพิ่มความดันและความเร็วของสายป้อนในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันต่อการเพิ่มความการกักกันของมีผลต่อไดด์ซินและเจนิสตินมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
4. ผลของความเข้มข้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นรวมของสายป้อนมากขึ้นทำให้ค่าการกักกันของไดด์ซินเจนิสตินและโปรตีนเพิ่มขึ้น
5. ค่าความดันที่และความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันคือที่ความเร็วของสายป้อน  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาทีและความดัน 0.34 เมกกะปาสคาล โดยพิจารณาจากค่าเพอมีเอทพลักซ์ ค่าการกักกันของไดด์ซิน เจนิสติน ความชุ่มและโปรตีน
6. ความเข้มข้นของไดด์ซินและเจนิสตินในเพอมีเอทจากกระบวนการไมโครฟิลเตรชันเท่ากับ 0.72 และ 0.53 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับและความเข้มข้นของโปรตีนเท่ากับ 17.17 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
7. ค่าความดันที่และความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน คือความเร็วของสายป้อนที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.6 เมกกะปาสคาลพิจารณาจากค่าเพอมีเอทพลักซ์ ค่าการกักกันของไดด์ซิน เจนิสติน ค่าการกักกันแคลเซียมและค่าการนำไฟฟ้า
8. ค่าการกักกันไดด์ซินและเจนิสตินของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน NF 7450 มีมากกว่า 0.95 จึงเหมาะสมในการใช้แยกไดด์ซินและเจนิสตินให้อยู่ส่วนคอนเซนเทรท

9. ตามแบบจำลองภายใต้ความดันคงที่ ลักษณะการดูดตันของเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันเกิดขึ้นใกล้เคียงแบบจำลอง IBM มากที่สุดซึ่งอธิบายลักษณะการดูดตันที่เกิดขึ้นจากการสะสมของโมเลกุลซ้อนทับกันบนผิวของเยื่อแผ่น
10. สารสกัดจากกากถั่วเหลืองที่ได้จากส่วนคอนเซนเตรทของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีปริมาณไดคิซีนและเจนิสตินเท่ากับ 0.57 และ 0.49 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ปริมาณโปรตีน 10.45 ราฟิโนส 18.34 สเตาซีโอส 19.48 ฟรักโทส 7.05 แคลเซียม 11.7 โพแทสเซียม 23.7 แมกนีเซียม 6.8 และ โซเดียม 0.13 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ
11. ส่วนคอนเซนเตรทที่ได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เมื่อนำไปผ่านกระบวนการระเหยที่สูญญากาศ ( Vacuum Evaporator ) และ Freeze Dry พบว่ามีปริมาณไดคิซีนและเจนิสตินเท่ากับ 0.73 และ 0.61 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

#### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเปรียบเทียบกระบวนการนาโนฟิลเตรชันกับกระบวนการทำให้เข้มข้นวิธีอื่นเช่นการระเหย ( Evaporation ) ทั้งในแง่ค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ใช้และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้
2. ควรมีการทดสอบการแยกและการทำให้เข้มข้นของผลิตภัณฑ์โดยใช้เยื่อแผ่นชนิดอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อคัดเลือกเยื่อแผ่นที่เหมาะสมที่สุด อาทิเช่นถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นโปรตีนลดลงในกระบวนการแยกขั้นต้นควรเลือกใช้เยื่อแผ่นแบบอัลตราฟิลเตรชันที่มี MWCO ขนาดเล็กกลางแทนเยื่อแผ่นแบบไมโครฟิลเตรชัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- ยงยุทธ เฉลิมชาติ , การลดลงของฟลักซ์และการเกิดฟาวลิงในการทำน้ำอ้อยให้ใสโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2544.
- รัตนา จิระรัตนานนท์ , กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ , ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2541.
- อุทัย คันไธ้ , การพิจารณาชนิดกากถั่วเหลืองเป็นอาหารสุกร , สุกรศาสตร์ 7 (ตุลาคม , 2523) : 5-11.
- Adlercreutz, H., Honjo, H., Higashi, A., Fotsis, T. , Hamalainen E., Hasegawa, T., and Okada, H. Urinary excretion of lignan and isoflavone phytoestrogens in Japanese men and women consuming a traditional Japanese diet. Am J. Clin . Nutr. 54 (1991) : 1093 - 1100.
- Bakhit, R. M. , Klein, B. P. , Essex-Sorlie, D. , Ham, J.O., J. W. ,and Potter, S. M. Intake of 25 g. of soybean protein with or without soybean fiber alters plasma liquid in men with elevated cholesterol concentrations. J. Nutr. 124 (1994) :213-222.
- Bingham S.A., Atkinson C., Liggins J., Bluck L. ,and Coward A. Phyto-oestrogens :where are we now? Br. J. of Nutr. 79 (1998 ) : 393-406.
- Bowen, W. , and Quan , G. Properties of microfiltration membrane : Flux loss during constant pressure permeation of bovine serum albumin. Biotech. Bioeng. 38 ( 1991 ) : 688-696 .
- Branes, D. Effect of genistein on in vitro and in vivo models of cancer. J. Nutr. 125 ( 1995 ) : 777S – 783 S.
- Coward ,L. , Barnes, N., Setshell, K.D.R. , and Barnes, S. Genistein and daidzein, and their b-glycoside conjugates: anti -tumor isoflavones in soybean foods from American and Asian diets. J. Agric. Food Chem. 41 (1993) :1961 - 1967 .
- Eldridge, A. C. Determination of isoflavone in soybean flours, protein concentrates , and isolates , J. Agric. Food Chem. 30 (1982) : 353 - 355 .
- Erikson, P.K. Nanofiltration -what it is and its applications. Presented at the 6 th Annual Technology and Planning Conference : Cambridge, MA, (Nov 1988) :1-3.

- Fane, A. B., Fell, C. J.D., Lim , K. J. , and Joy , D. C., Fouling mechanics of membranes during protein ultrafiltration , J. Membr. Sci. , 68 ( 1992 ) : 79 – 91.
- Guu , Y. K. ,Chiu, C. H. , and Young, J. K. Processing of soybean soaking water with a NF – RO membrane system and lactic acid fermentation of retained solutes. J. Agric. Food Chem. 45 ( 1997 ) : 4096 – 4100.
- Hertog, M.G.L., Feskens, E.J.I.,Hollman, P.C.H., Kantan ,M.B., and Kromhout ,D.Dietary antioxidant flavonoids and risk of coronary heart disease : the Zutphen elderly study .Lancet 342 (1993 ) : 1007-1011.
- Johan S.,Carlo V., Wahab A. M., and Richard W.B. Modelling the retention of ionic components for different nanofiltration membranes. Separation and Purification Technology 22 – 23 ( 2001 ) : 169 – 179 .
- Koury, S. D. ,and Hodges, R. E. Soybean proteins for human diets . J. Am. Diet. Assoc. 52 (1968) : 480 - 483.
- Kwon, D.Y., Vigneswaran , S., Fane , A.G. , and Aim, R. B. Experimental determination of critical flux in cross – flow microfiltration . Separation and Purification Technology 19 ( 2000 ) : 169 – 181.
- Lerthpeetipath N. , Coliphage removal efficiency of membrane filtration process for raw water contaminated with coliphage and E.coli ,Chulalongkorn university,(1997 )
- Meireless , M. , Almar , P. , and Sanchez , V. Albumin denaturation during ultrafiltration : Effects of operating conditions and consequences on membrane fouling. Biotechnol. Bioeng. 38 ( 1991 ) :528 – 534.
- Matsubara, Y., Iwasaki, K. , Nakajima , M., Nabetani , and Nakao, S. Recovery of Oligosaccharides from steamed soybean waste water in Tofu processing by reverse osmosis and nanofiltration membranes . Biosci. Biotech. Biochem. 60 ( 3 ) ( 1996 ) : 421 – 428 .
- Naim, M. , Gestetner, B. , Bondi, A. , and Birk, Y. Antioxidative and antihemolytic activity of soybean isoflavones. J. Agric. Food Chem. 22 (1976) : 806 - 811.
- Nakamura , K., and Matsumoto , K. A. methemathical medel of internal fouling in protein microfiltration . J. Chem. Eng. Jpn. 31 ( 1998 ) : 536 – 544.
- Nihal , A. ,Turker, G. ,and Levent , Y. Effect of Operating Parameters on the Separation of Sugars by Nanofiltration . Sep. Sci. Technol. 33 (1998 ) : 1767 – 1785.

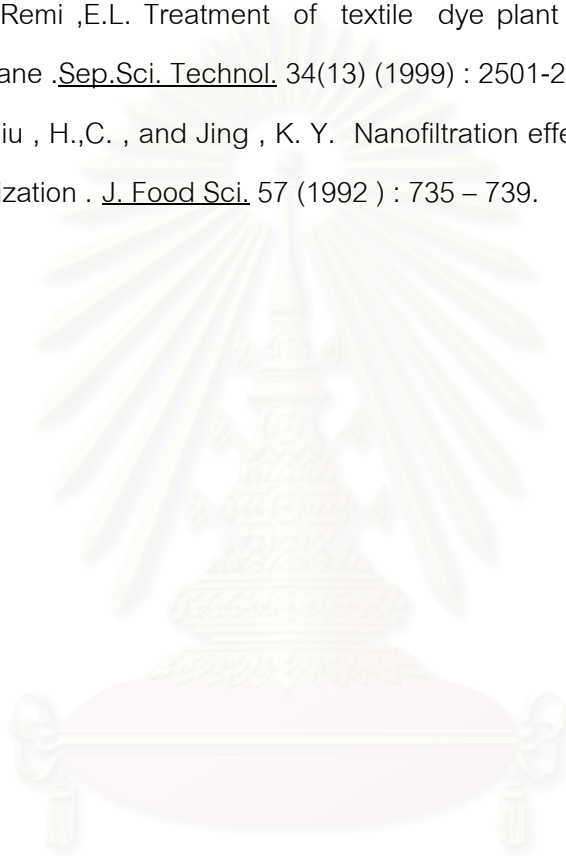
- Peterson, T.C., and Barnes, S. Genistein and biochanin A inhibit the growth of human prostate cancer cells but not epidermal growth factor receptor tyrosine autophosphorylation. Prostate 22 (1993) : 335 - 345.
- Phillips, D. FM., Harding, C., Morton, M., Robers, S. A.; Howell, A., Potten C. S., and Bundred, N. J. Effects of soy – protein supplementation on epithelial proliferation in the histologically normal human breast. Am. J. Clin. Nutr. 68 (1998) : 1431S – 1436S.
- Sean, T. K., and Andrew, L. Z. Effect of intermolecular thiol-disulfide interchange reactions on BSA fouling during microfiltration. Biotechnol. Bioeng. 44 (1994) : 972 – 982.
- Setchell, K.D.R., Lawson, A. M., Borriello, and S.P., et al. Lignan formation in man - microbial involvement and possible roles in relation to cancer. Lancet ii (1981) : 4-8.
- Setchell, K.D., Borriello, S.P., Hulme, P., Kirk, D.N., and Axelson, M. Non-steroidal estrogens. Am. J. Clin. Nutr. 40 (1984) : 569-578.
- Tham, D.M. Clinical Review 97: Potential health benefits of dietary phytoestrogens: a review of the clinical, epidemiological, and mechanistic evidence. J. Clin. Endocrinol. Metab. 83 (7) (July 1998) : 2223-2235.
- Tsuru, T., Shutou, T., Nakao, S., and Kimura, S. Peptide and amino acid separation with nanofiltration membranes. Sep. Sci. Technol. 29 (8) (1994) : 971 - 984.
- Urtiaga, A.M., Gori, E.D., and Ortiz, I. Modeling of the concentration – polarization effects in a pervaporation cell with radial flow. Separation and Purification Technology 17 (1999) : 41 – 51.
- Van der Bruggen, B., Daems, B., Wilms, D., and Vandecasteele, C. Mechanisms of retention and flux decline for the nanofiltration of dye baths from the textile industry. Separation and Purification Technology 22 – 23 (2001) : 519 – 528.
- Wang, H., and Murphy, P. A. Isoflavone content in commercial soybean foods. J. Agric. Food Chem. 42 (1994) : 1666 - 1673.
- Wang, H., and Murphy, P. A. Isoflavone composition of American and Japanese soybeans in Iowa : Effects of variety, crop year, and location. J. Agric. Food Chem. 42 (1994) : 1674 – 1677.

Water , E. D. Genistin ( an isoflavone glucoside ) and its aglucone, genistein , from soybeans . J. Am. Chem. Soc. 63 (1941) : 3273 - 3276.

Williams, M.E. , Hestekin, J.A., Smohters , C. N. ,and Bhattacharyya ,D. Separation of organic pollutants by reverse osmosis and nanofiltration membranes : Mathematical model and experimental verification. Ind. Eng. Chem. Res. 38 (1999) : 3683 - 3695 .

Yazhen ,X.,and Remi ,E.L. Treatment of textile dye plant effluent by nanofiltration membrane .Sep.Sci. Technol. 34(13) (1999) : 2501-2519.

Yuan , K.G. , Chiu , H.,C. , and Jing , K. Y. Nanofiltration effect on the efficacy lactose crystallization . J. Food Sci. 57 (1992) : 735 – 739.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

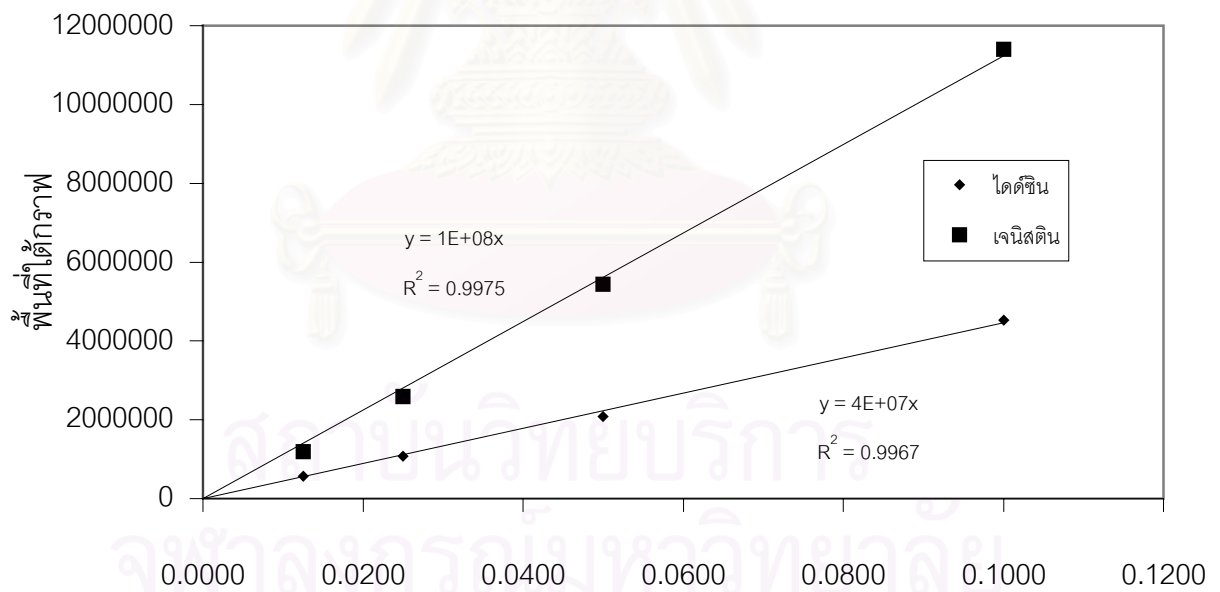


ภาคผนวก ก.

### เส้นกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของไอโซฟลาโวน

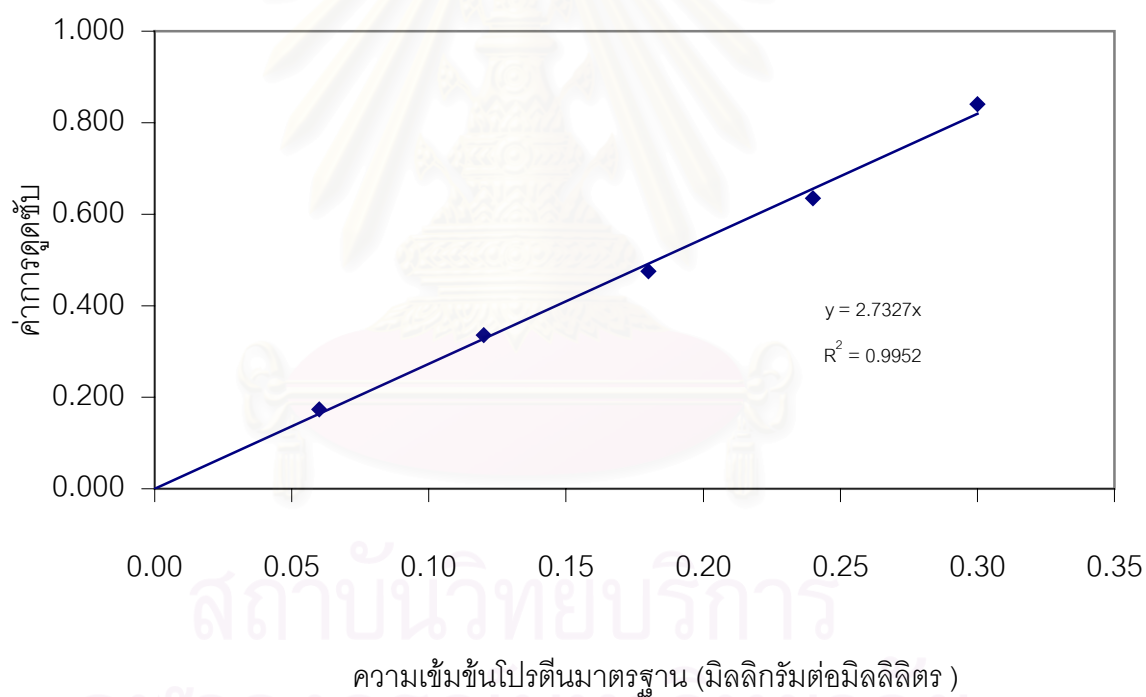
| ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) | พื้นที่ใต้กราฟไดคติน | พื้นที่ใต้กราฟเจนิสติน |
|---------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 0.0125                                | 491839               | 1190905                |
| 0.0250                                | 1006536              | 2590552                |
| 0.0500                                | 1924945              | 5433028                |
| 0.1000                                | 37776686             | 11398878               |



รูปที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไดคตินและเจนิสตินกับพื้นที่ใต้กราฟ

ตารางที่ ก. 2 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของโปรตีน

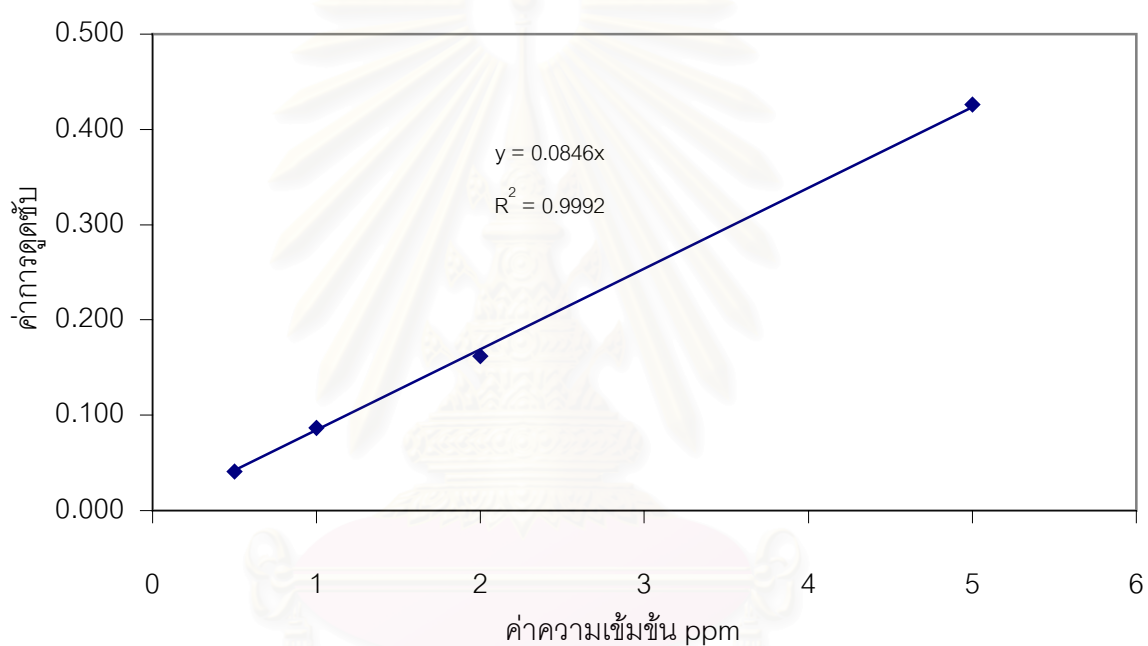
| ความเข้มข้นโปรตีน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) | ค่าการดูดซับ |
|---|--------------|
| 0.06                                      | 0.173        |
| 0.12                                      | 0.336        |
| 0.18                                      | 0.476        |
| 0.24                                      | 0.635        |
| 0.30                                      | 0.841        |



รูปที่ ก. 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโปรตีนมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดซับ

ตารางที่ ก. 3 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของปริมาณแคลเซียม

| ความเข้มข้นของแคลเซียม (ppm) | ค่าการดูดซับ |
|------------------------------|--------------|
| 0.5                          | 0.125        |
| 1                            | 0.250        |
| 2                            | 0.500        |
| 5                            | 1.250        |

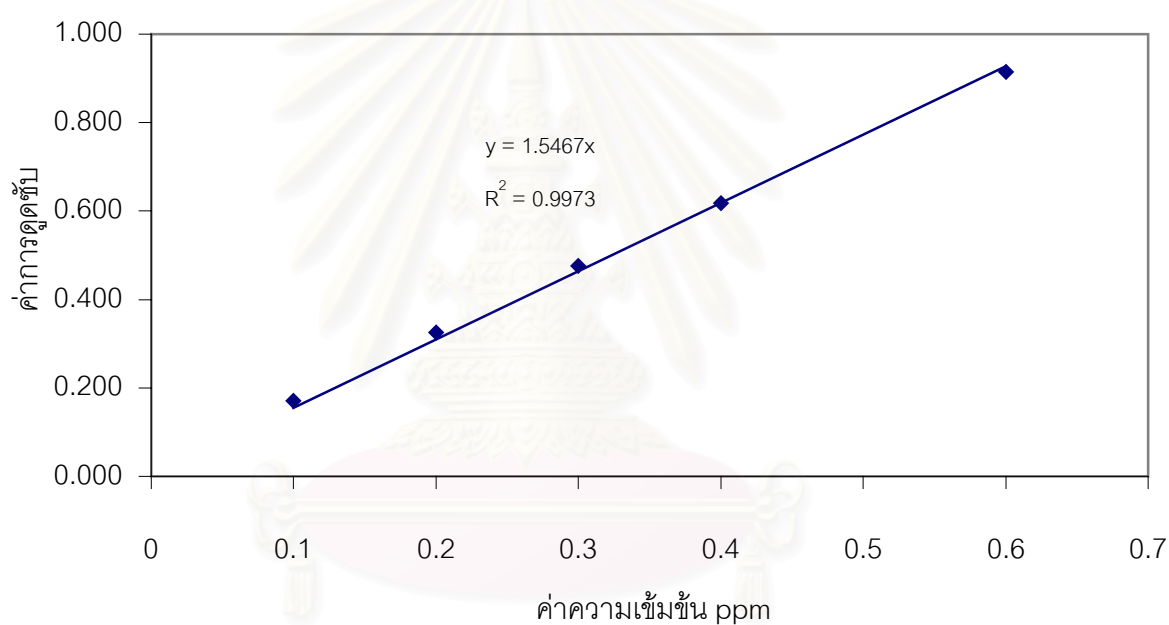


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแคลเซียม (ppm) กับค่าการดูดซับ

ตารางที่ ก. 4 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของปริมาณแมกนีเซียม

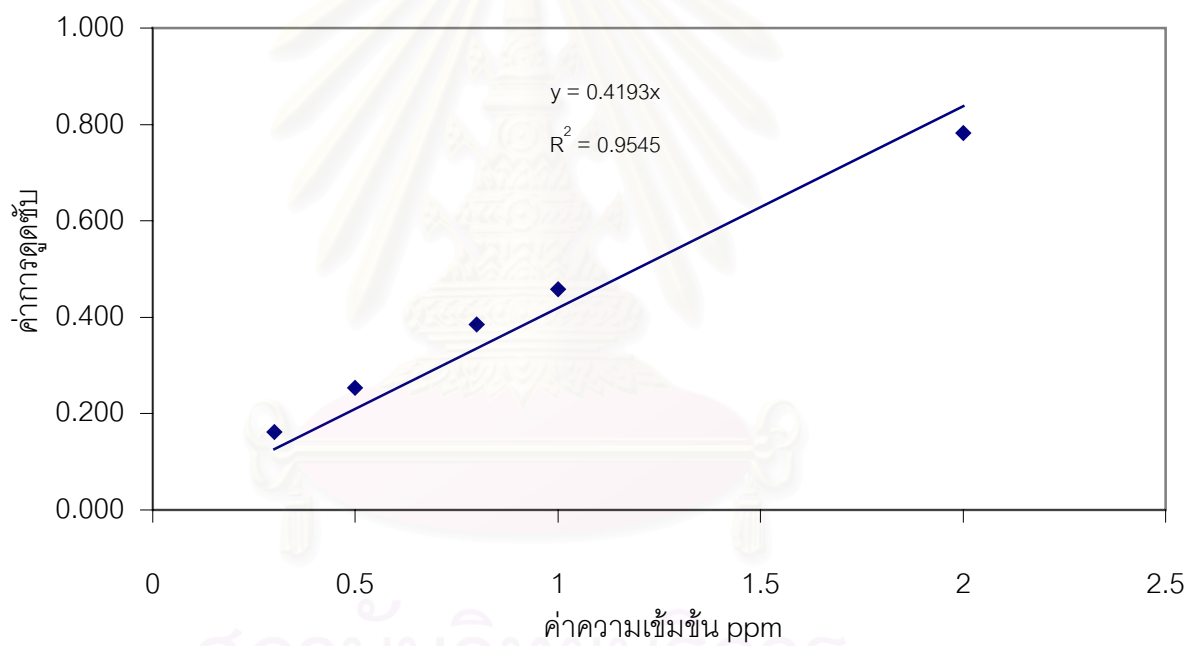
| ความเข้มข้นของแมกนีเซียม (ppm) | ค่าการดูดซับ |
|--------------------------------|--------------|
| 0.1                            | 0.025        |
| 0.2                            | 0.050        |
| 0.3                            | 0.075        |
| 0.4                            | 0.100        |
| 0.6                            | 0.150        |



รูปที่ ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแมกนีเซียม (ppm) กับค่าการดูดซับ

ตารางที่ ก. 5 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของปริมาณโพแทสเซียม

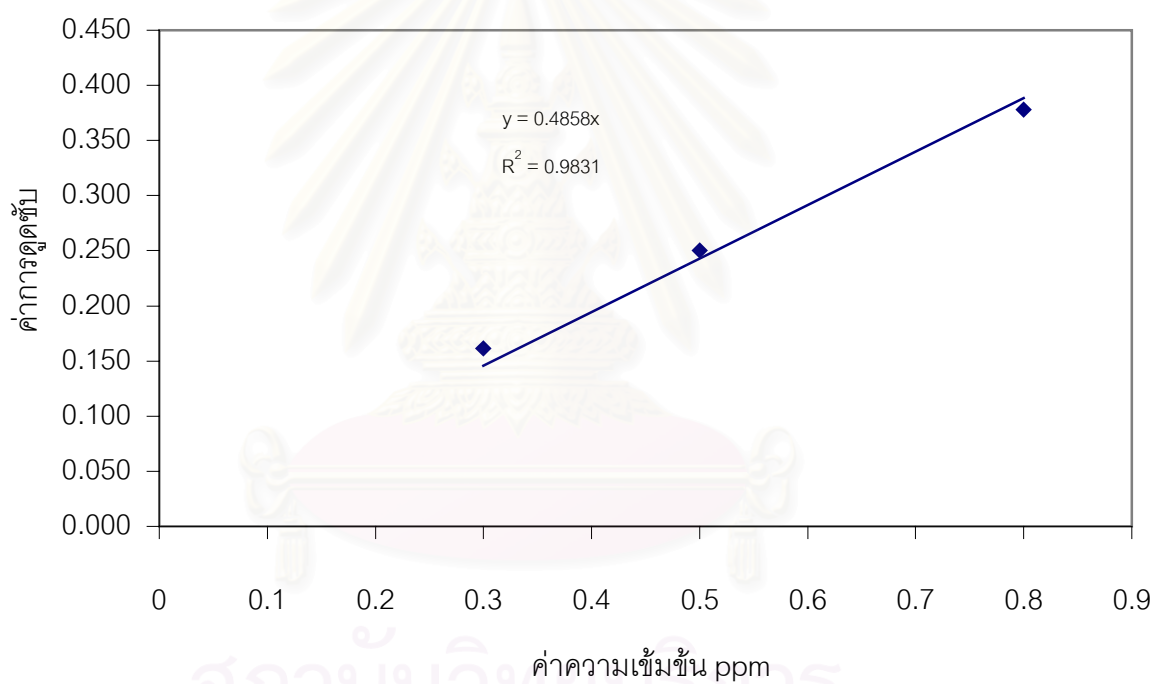
| ความเข้มข้นของโพแทสเซียม (ppm) | ค่าการดูดซับ |
|--------------------------------|--------------|
| 0.3                            | 0.075        |
| 0.5                            | 0.125        |
| 0.8                            | 0.200        |
| 1                              | 0.250        |
| 2                              | 0.500        |



รูปที่ ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโพแทสเซียม (ppm) กับค่าการดูดซับ

ตารางที่ ก. 6 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของปริมาณโซเดียม

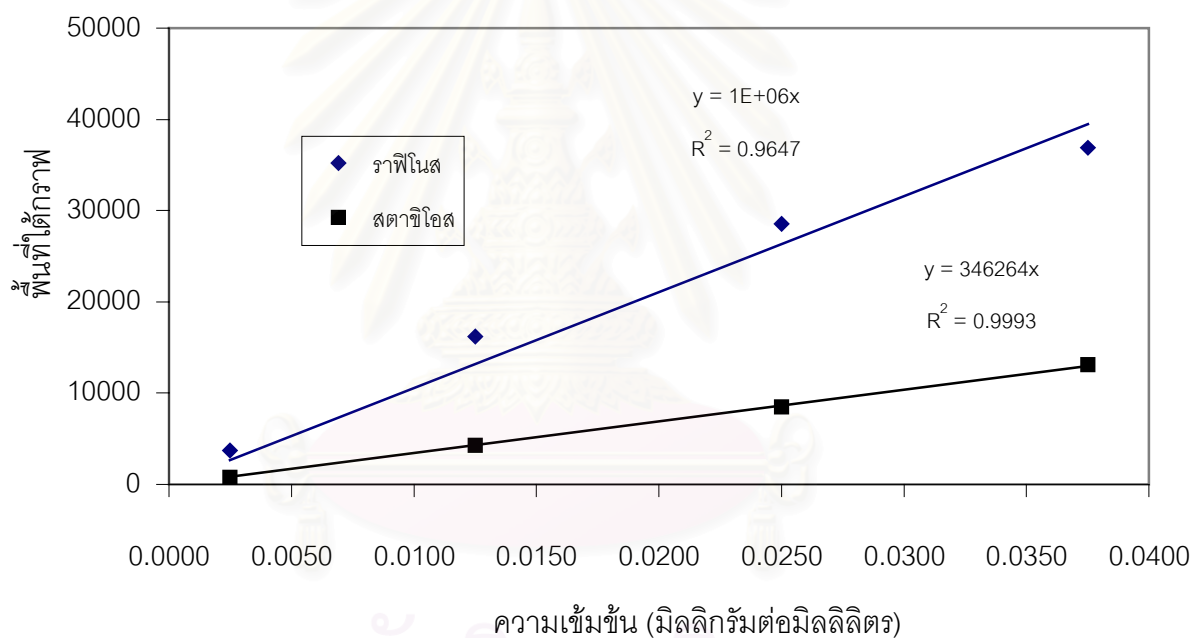
| ความเข้มข้นของโซเดียม (ppm) | ค่าการดูดซับ |
|-----------------------------|--------------|
| 0.3                         | 0.161        |
| 0.5                         | 0.250        |
| 0.8                         | 0.378        |



รูปที่ ก.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโซเดียม (ppm) กับค่าการดูดซับ

ตารางที่ ก. 7 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของราฟิโนสและสตาซิโอส

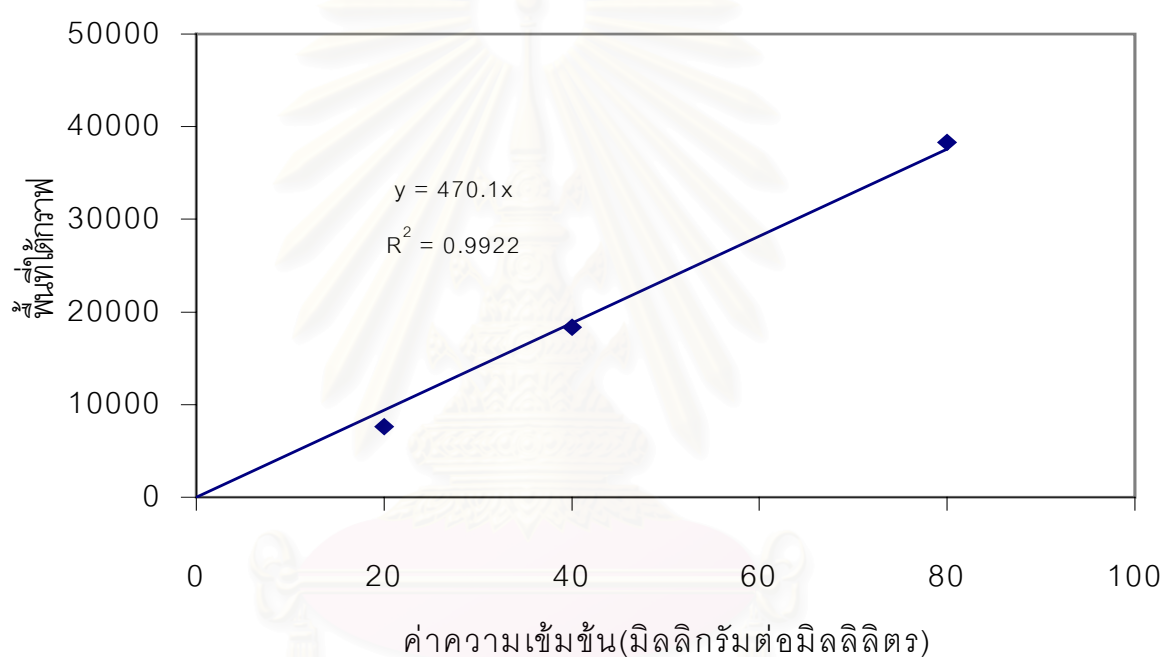
| ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) | พื้นที่ใต้กราฟราฟิโนส | พื้นที่ใต้กราฟสตาซิโอส |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0.0025                              | 3686                  | 792                    |
| 0.0125                              | 16225                 | 4304                   |
| 0.0250                              | 28536                 | 8466                   |
| 0.0375                              | 36863                 | 13125                  |



รูปที่ ก.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นราฟิโนสและสตาซิโอสกับพื้นที่ใต้กราฟ

ตารางที่ ก. 8 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของฟรักโทส

| ความเข้มข้น(มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) | พื้นที่ใต้กราฟ |
|------------------------------------|----------------|
| 20                                 | 7630           |
| 40                                 | 18351          |
| 80                                 | 38278          |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟรักโทสกับพื้นที่ใต้กราฟ



ภาคผนวก ข.

### ข้อมูลการทดลอง

ผลของเวลาต่อการสกัดไอโซฟลาโวนด้วยสารละลายเอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลผลของเวลาในการใช้สกัดไอโซฟลาโวนด้วยสารละลายเอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์

| เวลาที่ใช้ในการสกัด<br>( นาที ) | ปริมาณไดคิซินในสารสกัดแก้วเหลือง<br>( มิลลิกรัมต่อกรัมแก้วเหลือง ) | ปริมาณเจนิสตินสารสกัดแก้วเหลือง<br>( มิลลิกรัมต่อกรัมแก้วเหลือง ) |
|---------------------------------|--|---|
| 60                              | 0.893  | 0.889   |
| 80                              | 0.918  | 0.882   |
| 100                             | 0.964  | 0.897   |

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

ตารางที่ ข.2 แสดงข้อมูลฟลักซ์น้ำกลับ

| ความดัน<br>(เมกะปาสคาล) | เพอมีเอทฟลักซ์ $\times 10^5$ (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที) |
|-------------------------|--|
| 0.14                    | 7.1  |
| 0.24                    | 12.6   |
| 0.34                    | 17.9   |
| 0.44                    | 22.2   |

ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลเพอมีเอทฟลักซ์ของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันและความเร็วของสายป้อนต่างๆ

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | เพอมีเอทฟลักซ์ $\times 10^6$ ( ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที) |   |   |
|--------------------------|---|---|---|
|                          | ความเร็ว $9.2 \times 10^{-4}$<br>เมตรต่อวินาที                    | ความเร็ว $1.07 \times 10^{-3}$<br>เมตรต่อวินาที | ความเร็ว $1.22 \times 10^{-3}$<br>เมตรต่อวินาที |
| 0.04                     | 0.82  | 0.99  | 0.97  |
| 0.09                     | 2.30  | 2.71  | 2.96  |
| 0.14                     | 2.46  | 2.96  | 3.12  |
| 0.19                     | 2.63  | 3.28  | 3.28  |
| 0.24                     | 2.79  | 3.45  | 3.61  |
| 0.29                     | 3.12  | 3.69  | 3.94  |
| 0.34                     | 3.20  | 3.78  | 4.02  |
| 0.39                     | 3.28  | 3.69  | 3.94  |
| 0.44                     | 3.45  | 3.69  | 3.94  |
| 0.49                     | 3.45  | 3.69  | 3.78  |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลปริมาณไดคิซินโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.04                     | 0.5917                              | 0.6289     | 0.5228   | 0.12         |
| 0.09                     | 0.5870                              | 0.6160     | 0.5239   | 0.11         |
| 0.14                     | 0.6113                              | 0.6210     | 0.5272   | 0.14         |
| 0.19                     | 0.6461                              | 0.6207     | 0.5192   | 0.20         |
| 0.24                     | 0.5429                              | 0.5829     | 0.5113   | 0.06         |
| 0.29                     | 0.6276                              | 0.6198     | 0.5068   | 0.19         |
| 0.34                     | 0.6203                              | 0.6571     | 0.5073   | 0.18         |
| 0.39                     | 0.6130                              | 0.6393     | 0.5083   | 0.17         |
| 0.44                     | 0.6208                              | 0.6429     | 0.5252   | 0.15         |
| 0.49                     | 0.6381                              | 0.6594     | 0.5117   | 0.20         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 แสดงข้อมูลปริมาณไดคิซินโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.07 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.04                     | 0.6007                              | 0.6017     | 0.4768   | 0.21         |
| 0.09                     | 0.6338                              | 0.5841     | 0.5063   | 0.20         |
| 0.14                     | 0.6156                              | 0.5760     | 0.5341   | 0.13         |
| 0.19                     | 0.6329                              | 0.6004     | 0.5099   | 0.19         |
| 0.24                     | 0.6305                              | 0.6279     | 0.5151   | 0.18         |
| 0.29                     | 0.6172                              | 0.6209     | 0.5147   | 0.17         |
| 0.34                     | 0.6220                              | 0.5888     | 0.5261   | 0.15         |
| 0.39                     | 0.6728                              | 0.6314     | 0.5186   | 0.23         |
| 0.44                     | 0.6619                              | 0.6661     | 0.5056   | 0.24         |
| 0.49                     | 0.6939                              | 0.6468     | 0.4758   | 0.31         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.6 แสดงข้อมูลปริมาณไดคิซีนโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสกาล) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.04                     | 0.4347                              | 0.4568     | 0.4305   | 0.01         |
| 0.09                     | 0.4407                              | 0.4594     | 0.4297   | 0.02         |
| 0.14                     | 0.4379                              | 0.4534     | 0.4238   | 0.03         |
| 0.19                     | 0.4375                              | 0.4693     | 0.4148   | 0.05         |
| 0.24                     | 0.4453                              | 0.4916     | 0.4052   | 0.09         |
| 0.29                     | 0.4702                              | 0.4764     | 0.4195   | 0.11         |
| 0.34                     | 0.4912                              | 0.4970     | 0.4099   | 0.17         |
| 0.39                     | 0.5112                              | 0.5132     | 0.4003   | 0.22         |
| 0.44                     | 0.5370                              | 0.5073     | 0.3933   | 0.27         |
| 0.49                     | 0.5117                              | 0.5154     | 0.4136   | 0.19         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.7 แสดงข้อมูลปริมาณเจนิสตินโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.04                     | 0.5385                              | 0.5391     | 0.4710   | 0.13         |
| 0.09                     | 0.5301                              | 0.5535     | 0.4730   | 0.11         |
| 0.14                     | 0.5544                              | 0.5458     | 0.4493   | 0.19         |
| 0.19                     | 0.5854                              | 0.5442     | 0.4387   | 0.25         |
| 0.24                     | 0.4934                              | 0.5456     | 0.4311   | 0.13         |
| 0.29                     | 0.5705                              | 0.5693     | 0.4017   | 0.30         |
| 0.34                     | 0.5628                              | 0.5948     | 0.4015   | 0.29         |
| 0.39                     | 0.5601                              | 0.5484     | 0.4018   | 0.28         |
| 0.44                     | 0.5634                              | 0.5403     | 0.3942   | 0.30         |
| 0.49                     | 0.5802                              | 0.5679     | 0.3808   | 0.34         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.8 แสดงข้อมูลปริมาณเจนิสตินโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.07 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.04                     | 0.5429                              | 0.5021     | 0.4604   | 0.15         |
| 0.09                     | 0.5635                              | 0.5126     | 0.4462   | 0.21         |
| 0.14                     | 0.5510                              | 0.5315     | 0.4176   | 0.24         |
| 0.19                     | 0.5722                              | 0.5428     | 0.4153   | 0.27         |
| 0.24                     | 0.5773                              | 0.5413     | 0.3985   | 0.31         |
| 0.29                     | 0.5603                              | 0.5565     | 0.3934   | 0.30         |
| 0.34                     | 0.5687                              | 0.5401     | 0.3983   | 0.30         |
| 0.39                     | 0.6220                              | 0.5788     | 0.3886   | 0.38         |
| 0.44                     | 0.6144                              | 0.5766     | 0.3851   | 0.37         |
| 0.49                     | 0.6191                              | 0.5548     | 0.3880   | 0.37         |

ตารางที่ ข.9 แสดงข้อมูลปริมาณเจนิสตินโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.04                     | 0.4020                              | 0.4088     | 0.3831   | 0.05         |
| 0.09                     | 0.4132                              | 0.4244     | 0.4012   | 0.03         |
| 0.14                     | 0.4039                              | 0.4241     | 0.3738   | 0.07         |
| 0.19                     | 0.4006                              | 0.4243     | 0.3688   | 0.08         |
| 0.24                     | 0.4212                              | 0.4511     | 0.3631   | 0.14         |
| 0.29                     | 0.4311                              | 0.4304     | 0.3566   | 0.17         |
| 0.34                     | 0.4380                              | 0.4507     | 0.3498   | 0.20         |
| 0.39                     | 0.4680                              | 0.4570     | 0.3423   | 0.27         |
| 0.44                     | 0.4955                              | 0.4506     | 0.3224   | 0.35         |
| 0.49                     | 0.4617                              | 0.4721     | 0.3258   | 0.29         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ข.10 แสดงข้อมูลความขุ่นของสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ค่าการดูดซับ |            |          | ค่ากักกัน |
|--------------------------|--------------|------------|----------|-----------|
|                          | สายป้อน      | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |           |
| 0.04                     | 0.039        | 0.037      | 0.009    | 0.77      |
| 0.09                     | 0.037        | 0.04       | 0.007    | 0.81      |
| 0.14                     | 0.034        | 0.038      | 0.01     | 0.71      |
| 0.19                     | 0.039        | 0.04       | 0.009    | 0.77      |
| 0.24                     | 0.037        | 0.043      | 0.012    | 0.68      |
| 0.29                     | 0.04         | 0.038      | 0.008    | 0.80      |
| 0.34                     | 0.037        | 0.044      | 0.008    | 0.78      |
| 0.39                     | 0.04         | 0.042      | 0.01     | 0.75      |
| 0.44                     | 0.038        | 0.035      | 0.009    | 0.76      |
| 0.49                     | 0.043        | 0.041      | 0.009    | 0.79      |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.11 แสดงข้อมูลความขุ่นของสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.07 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ค่าการดูดซับ |            |          | ค่ากักกัน |
|--------------------------|--------------|------------|----------|-----------|
|                          | สายป้อน      | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |           |
| 0.04                     | 0.042        | 0.035      | 0.008    | 0.81      |
| 0.09                     | 0.042        | 0.045      | 0.006    | 0.86      |
| 0.14                     | 0.041        | 0.047      | 0.006    | 0.85      |
| 0.19                     | 0.042        | 0.045      | 0.008    | 0.81      |
| 0.24                     | 0.043        | 0.042      | 0.009    | 0.79      |
| 0.29                     | 0.038        | 0.043      | 0.011    | 0.71      |
| 0.34                     | 0.039        | 0.04       | 0.013    | 0.67      |
| 0.39                     | 0.04         | 0.038      | 0.009    | 0.78      |
| 0.44                     | 0.039        | 0.043      | 0.01     | 0.74      |
| 0.49                     | 0.039        | 0.043      | 0.01     | 0.74      |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.12 แสดงข้อมูลความขุ่นของสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ค่าการดูดซับ |            |          | ค่ากักกัน |
|--------------------------|--------------|------------|----------|-----------|
|                          | สายป้อน      | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |           |
| 0.04                     | 0.041        | 0.042      | 0.006    | 0.85      |
| 0.09                     | 0.046        | 0.04       | 0.006    | 0.87      |
| 0.14                     | 0.037        | 0.04       | 0.005    | 0.86      |
| 0.19                     | 0.035        | 0.034      | 0.003    | 0.91      |
| 0.24                     | 0.03         | 0.032      | 0.002    | 0.93      |
| 0.29                     | 0.024        | 0.023      | 0.001    | 0.96      |
| 0.34                     | 0.022        | 0.026      | 0        | 1.00      |
| 0.39                     | 0.02         | 0.023      | 0.001    | 0.95      |
| 0.44                     | 0.018        | 0.023      | 0        | 1.00      |
| 0.49                     | 0.02         | 0.016      | 0.001    | 0.95      |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.13 แสดงข้อมูลปริมาณโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $9.2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ปริมาณโปรตีน ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|--|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                                | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.04                     | 17.92                                  | 17.74      | 1.11     | 0.16         |
| 0.09                     | 16.88                                  | 16.87      | 15.01    | 0.11         |
| 0.14                     | 17.34                                  | 17.45      | 15.80    | 0.09         |
| 0.19                     | 17.53                                  | 16.85      | 14.55    | 0.17         |
| 0.24                     | 17.34                                  | 18.12      | 13.88    | 0.20         |
| 0.29                     | 18.64                                  | 18.30      | 14.12    | 0.24         |
| 0.34                     | 18.41                                  | 17.30      | 13.79    | 0.25         |
| 0.39                     | 18.36                                  | 18.26      | 13.61    | 0.26         |
| 0.44                     | 19.06                                  | 18.56      | 13.62    | 0.29         |
| 0.49                     | 19.28                                  | 18.78      | 13.74    | 0.29         |
| 0.54                     | 19.57                                  | 18.70      | 13.41    | 0.31         |

ตารางที่ ข.14 แสดงข้อมูลปริมาณโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.07 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน (เมกกะ<br>ปาสคาล) | ปริมาณโปรตีน ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|---------------------------|--|------------|----------|--------------|
|                           | สายป้อน                                | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.4                       | 16.89                                  | 17.90      | 14.92    | 0.12         |
| 0.9                       | 18.30                                  | 17.89      | 14.59    | 0.20         |
| 1.4                       | 18.28                                  | 18.25      | 15.49    | 0.15         |
| 1.9                       | 18.87                                  | 18.68      | 14.27    | 0.24         |
| 2.4                       | 18.26                                  | 18.32      | 15.20    | 0.17         |
| 2.9                       | 18.59                                  | 18.79      | 13.75    | 0.26         |
| 3.4                       | 20.38                                  | 18.48      | 14.62    | 0.28         |
| 3.9                       | 20.22                                  | 18.60      | 14.81    | 0.27         |
| 4.4                       | 18.93                                  | 19.48      | 14.36    | 0.24         |
| 4.9                       | 20.39                                  | 19.89      | 14.97    | 0.27         |
| 5.4                       | 20.67                                  | 20.24      | 13.61    | 0.34         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.15 แสดงข้อมูลปริมาณโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ปริมาณโปรตีน ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|--|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                                | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.4                      | 14.89                                  | 15.76      | 14.16    | 0.05         |
| 0.9                      | 15.64                                  | 15.75      | 14.05    | 0.10         |
| 1.4                      | 16.11                                  | 15.49      | 14.03    | 0.13         |
| 1.9                      | 16.45                                  | 15.55      | 12.94    | 0.21         |
| 2.4                      | 17.37                                  | 16.05      | 12.94    | 0.25         |
| 2.9                      | 16.08                                  | 16.49      | 12.43    | 0.23         |
| 3.4                      | 16.66                                  | 16.15      | 11.72    | 0.30         |
| 3.9                      | 16.92                                  | 16.81      | 11.77    | 0.30         |
| 4.4                      | 16.71                                  | 17.11      | 11.95    | 0.28         |
| 4.9                      | 18.04                                  | 18.26      | 11.06    | 0.39         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.16 แสดงข้อมูลเพอมีเอทพลักซ์ที่เวลาต่างๆ ที่ความดันคงที่ที่ 0.34 เมกกะปาสคาล และความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที) | เพอมีเอทพลักซ์ $\times 10^6$ ( ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที ) |
|-------------|--|
| 5           | 3.98   |
| 10          | 3.79   |
| 15          | 3.69   |
| 20          | 3.60   |
| 25          | 3.41   |
| 30          | 3.22   |
| 35          | 3.22   |
| 40          | 3.22   |
| 45          | 3.22   |
| 50          | 3.22   |
| 55          | 3.22   |
| 60          | 3.22   |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.17 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของไดคิซินในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ ความดันคงที่ที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|-------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|             | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 5           | 0.8313                              | 0.8363     | 0.6308   | 0.24         |
| 10          | 0.8684                              | 0.8395     | 0.5971   | 0.31         |
| 15          | 0.9079                              | 0.8472     | 0.6011   | 0.34         |
| 20          | 0.9137                              | 0.8497     | 0.6052   | 0.34         |
| 25          | 0.9227                              | 0.8830     | 0.6069   | 0.34         |
| 30          | 0.9593                              | 0.9362     | 0.6808   | 0.29         |
| 35          | 0.9663                              | 0.9467     | 0.7035   | 0.27         |
| 40          | 1.0156                              | 0.9919     | 0.6987   | 0.31         |
| 45          | 1.0174                              | 1.0060     | 0.6765   | 0.34         |
| 50          | 1.0902                              | 1.0607     | 0.7297   | 0.33         |
| 55          | 1.1356                              | 1.0919     | 0.7269   | 0.36         |
| 60          | 1.1772                              | 1.1383     | 0.7287   | 0.38         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ข.18 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของเจนิสตินในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่ เวลาต่างๆ โดยความดันคงที่ที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|-------------|-------------------------------------|------------|----------|--------------|
|             | สายป้อน                             | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 5           | 0.7487                              | 0.7662     | 0.4415   | 0.41         |
| 10          | 0.7797                              | 0.7552     | 0.4243   | 0.46         |
| 15          | 0.8205                              | 0.7790     | 0.4360   | 0.47         |
| 20          | 0.8429                              | 0.8822     | 0.4365   | 0.48         |
| 25          | 0.8534                              | 0.8268     | 0.4407   | 0.48         |
| 30          | 0.9106                              | 0.8813     | 0.4964   | 0.45         |
| 35          | 0.9242                              | 0.9013     | 0.5245   | 0.43         |
| 40          | 0.9879                              | 0.9534     | 0.5100   | 0.48         |
| 45          | 1.0074                              | 0.9861     | 0.4922   | 0.51         |
| 50          | 1.0815                              | 1.1003     | 0.5370   | 0.50         |
| 55          | 1.1538                              | 1.1296     | 0.5144   | 0.55         |
| 60          | 1.2254                              | 1.1735     | 0.4336   | 0.65         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.19 แสดงข้อมูลความขุ่นในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ โดยความดันคงที่ที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที่) | ค่าการดูดซับ |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------|--------------|------------|----------|--------------|
|              | สายป้อน      | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 5            | 0.016        | 0.015      | 0.002    | 0.88         |
| 10           | 0.0165       | 0.015      | 0.002    | 0.88         |
| 15           | 0.017        | 0.015      | 0.002    | 0.88         |
| 20           | 0.017        | 0.016      | 0.002    | 0.88         |
| 25           | 0.017        | 0.016      | 0.002    | 0.88         |
| 30           | 0.018        | 0.016      | 0.002    | 0.89         |
| 35           | 0.018        | 0.017      | 0.0015   | 0.92         |
| 40           | 0.019        | 0.018      | 0.002    | 0.89         |
| 45           | 0.02         | 0.02       | 0.001    | 0.95         |
| 50           | 0.021        | 0.022      | 0.002    | 0.90         |
| 55           | 0.024        | 0.022      | 0.001    | 0.96         |
| 60           | 0.024        | 0.028      | 0.001    | 0.96         |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.20 แสดงข้อมูลปริมาณโปรตีนในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอทที่เวลาต่างๆ โดยความดันคงที่ที่ 0.34 เมกกะปาสคาลและความเร็วของสายป้อนคงที่ที่  $1.22 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

| เวลา ( นาที ) | ปริมาณโปรตีน ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|---------------|--|------------|----------|--------------|
|               | สายป้อน                                | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 5             | 25.23                                  | 26.59      | 16.20    | 0.36         |
| 10            | 26.30                                  | 26.54      | 17.04    | 0.35         |
| 15            | 26.45                                  | 26.71      | 17.02    | 0.36         |
| 20            | 26.88                                  | 27.76      | 16.76    | 0.38         |
| 25            | 27.76                                  | 29.06      | 17.36    | 0.37         |
| 30            | 28.35                                  | 27.40      | 17.54    | 0.38         |
| 35            | 29.59                                  | 29.86      | 18.39    | 0.38         |
| 40            | 30.84                                  | 30.96      | 18.80    | 0.39         |
| 45            | 31.25                                  | 31.47      | 18.53    | 0.41         |
| 50            | 32.89                                  | 32.35      | 18.48    | 0.44         |
| 55            | 33.50                                  | 33.42      | 18.11    | 0.46         |
| 60            | 34.89                                  | 36.67      | 17.88    | 0.49         |

### กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

ตาราง ข. 21 แสดงข้อมูลฟลักซ์น้ำกลั่นของเยื่อแผ่น ชนิด NF 7450

| ความดัน (เมกกะปาสคาล) | ฟลักซ์น้ำกลั่น $\times 10^5$ (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที) |
|-----------------------|--|
| 2.1                   | 1.21   |
| 2.5                   | 1.36   |
| 3.2                   | 1.65   |
| 3.8                   | 1.86   |
| 4                     | 1.95   |

ตาราง ข.22 แสดงข้อมูลเพอมีเอทฟลักซ์ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อน 0.011 เมตรต่อวินาที

| ความดัน ( MPa) | เพอมีเอทฟลักซ์ $\times 10^7$ (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที) |
|----------------|--|
| 1.2            | 1.67   |
| 1.4            | 3.09   |
| 1.8            | 3.61   |
| 1.9            | 6.14   |
| 2.3            | 7.58   |
| 2.5            | 7.58   |
| 2.6            | 7.04   |
| 3              | 7.04   |
| 3.2            | 7.04   |
| 3.5            | 6.50   |
| 4              | 6.50   |

ตาราง ข.23 แสดงข้อมูลเพอมีเอทพลักซ์ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อน 0.015 เมตร ต่อวินาที

| ความดัน ( MPa) | เพอมีเอทพลักซ์ $\times 10^7$ (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที) |
|----------------|--|
| 1.2            | 2.17   |
| 1.6            | 5.06   |
| 1.7            | 5.78   |
| 1.8            | 6.50   |
| 2.1            | 8.67   |
| 2.6            | 8.67   |
| 2.8            | 7.80   |
| 3.1            | 7.58   |
| 4              | 7.58   |

ตาราง ข.24 แสดงข้อมูลเพอมีเอทพลักซ์ความดันต่างๆ และความเร็วของสายป้อน 0.019 เมตร ต่อวินาที

| ความดัน ( MPa) | เพอมีเอทพลักซ์ $\times 10^7$ (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - วินาที) |
|----------------|--|
| 1.2            | 2.17   |
| 1.4            | 3.52   |
| 1.8            | 7.22   |
| 1.9            | 7.58   |
| 2.3            | 8.67   |
| 2.5            | 8.67   |
| 2.6            | 8.67   |
| 3              | 7.58   |
| 3.2            | 7.58   |
| 3.5            | 7.58   |
| 4              | 7.58   |

ตาราง ข.25 แสดงข้อมูลปริมาณไดคตินที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.011 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.6                      | 0.5827                                | 0.5572     | 0.0946   | 0.84         |
| 2.0                      | 0.5493                                | 0.5264     | 0.0646   | 0.88         |
| 3.1                      | 0.5810                                | 0.5744     | 0.0551   | 0.91         |
| 3.6                      | 0.5908                                | 0.5917     | 0.0356   | 0.94         |

ตาราง ข.26 แสดงข้อมูลปริมาณไดคตินที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.2                      | 0.6617                                | 0.5711     | 0.1204   | 0.82         |
| 1.8                      | 0.6638                                | 0.5849     | 0.0610   | 0.91         |
| 3.1                      | 0.6343                                | 0.5901     | 0.0528   | 0.92         |
| 3.6                      | 0.6323                                | 0.6278     | 0.0396   | 0.94         |

ตาราง ข.27 แสดงข้อมูลปริมาณไดคิซีนที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.019 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.6                      | 0.836                                 | 0.790      | 0.125    | 0.85         |
| 2.3                      | 0.682                                 | 0.646      | 0.062    | 0.91         |
| 2.6                      | 0.662                                 | 0.636      | 0.041    | 0.94         |
| 3.5                      | 0.679                                 | 0.626      | 0.028    | 0.96         |

ตาราง ข.28 แสดงข้อมูลปริมาณเงินิสตินที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.011 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.6                      | 0.4116                                | 0.3932     | 0.0250   | 0.94         |
| 2.0                      | 0.3899                                | 0.3697     | 0.0239   | 0.94         |
| 3.1                      | 0.4508                                | 0.4018     | 0.0157   | 0.97         |
| 3.6                      | 0.4659                                | 0.4128     | 0.0130   | 0.97         |

ตาราง ข.29 แสดงข้อมูลปริมาณเงินสตีที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.2                      | 0.4062                                | 0.4279     | 0.0538   | 0.87         |
| 1.8                      | 0.4546                                | 0.4053     | 0.0245   | 0.95         |
| 3.1                      | 0.4197                                | 0.4030     | 0.0183   | 0.96         |
| 3.6                      | 0.4792                                | 0.4142     | 0.0130   | 0.97         |

ตาราง ข.30 แสดงข้อมูลปริมาณเงินสตีที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.019 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.6                      | 0.4352                                | 0.4328     | 0.0369   | 0.92         |
| 2.3                      | 0.4917                                | 0.4776     | 0.4685   | 0.95         |
| 2.6                      | 0.4830                                | 0.4685     | 0.5112   | 0.95         |
| 3.5                      | 0.5112                                | 0.4991     | 0.0149   | 0.97         |



ตาราง ข. 31 แสดงข้อมูลการนำไฟฟ้าของสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.011 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>( เมกกะปาสคาล) | ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|---------------------------|---|------------|----------|--------------|
|                           | สายป้อน                                   | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.7                       | 854                                       | 840        | 261      | 0.69         |
| 2                         | 832                                       | 872        | 217      | 0.74         |
| 2.7                       | 867                                       | 872        | 153.9    | 0.82         |
| 3.6                       | 871                                       | 889        | 143.1    | 0.84         |

ตาราง ข. 32 แสดงข้อมูลการนำไฟฟ้าของสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ โดยความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                                   | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.2                      | 851                                       | 844        | 336      | 0.61         |
| 1.8                      | 852                                       | 849        | 185.1    | 0.78         |
| 3.1                      | 855                                       | 854        | 152.3    | 0.82         |
| 3.6                      | 860                                       | 835        | 121.2    | 0.86         |

ตาราง ข. 33 แสดงข้อมูลการนำไฟฟ้าของสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ โดยความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.019 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) |            |                | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|---|------------|----------------|--------------|
|                          | สายป้อน                                   | คอนเซนเทรท | เอาทาร์เอาทาร์ |              |
| 1.6                      | 871                                       | 853        | 247            | 0.72         |
| 2.3                      | 880                                       | 862        | 191.9          | 0.78         |
| 2.6                      | 863                                       | 866        | 152.3          | 0.82         |
| 3.5                      | 777                                       | 845        | 86.9           | 0.89         |

ตาราง ข. 34 แสดงข้อมูลปริมาณแคลเซียมสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ โดยความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.011 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>( เมกกะปาสคาล) | ปริมาณแคลเซียม ( กรัมต่อลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|---------------------------|--------------------------------|------------|----------|--------------|
|                           | สายป้อน                        | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.7                       | 22.5                           | 22.4       | 5.1      | 0.77         |
| 2                         | 22.7                           | 22.4       | 5.1      | 0.77         |
| 2.7                       | 22.7                           | 22.4       | 5.1      | 0.77         |
| 3.6                       | 22.7                           | 22.4       | 5.1      | 0.77         |

ตาราง ข. 35 แสดงข้อมูลปริมาณแคลเซียมสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ โดยความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ปริมาณแคลเซียม ( กรัมต่อลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|--------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                        | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.2                      | 23.1                           | 20.2       | 4.1      | 0.82         |
| 1.8                      | 23.1                           | 20.2       | 4.1      | 0.82         |
| 3.1                      | 23.1                           | 20.2       | 4.1      | 0.82         |
| 3.6                      | 23.1                           | 20.2       | 4.1      | 0.82         |

ตาราง ข. 36 แสดงข้อมูลปริมาณแคลเซียมสายป้อน คอนเซนเทรท และเพอมีเอทที่ความดันต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.019 เมตรต่อวินาที

| ความดัน<br>(เมกกะปาสคาล) | ปริมาณแคลเซียม ( กรัมต่อลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|--------------------------|--------------------------------|------------|----------|--------------|
|                          | สายป้อน                        | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 1.6                      | 19.5                           | 19.8       | 3.8      | 0.81         |
| 2.3                      | 19.5                           | 19.8       | 3.8      | 0.81         |
| 2.6                      | 19.5                           | 19.8       | 3.8      | 0.81         |
| 3.5                      | 19.5                           | 19.8       | 3.8      | 0.81         |

ตาราง ข. 37 แสดงข้อมูลเพอมีเอทพลักซ์เวลาต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.8 เมกกะปาสคาล

| เวลา (นาทีก) | เพอมีเอทพลักซ์ $\times 10^7$<br>(ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที) |
|--------------|---|
| 5            | 28.16   |
| 10           | 22.28   |
| 15           | 21.66   |
| 20           | 19.50   |
| 30           | 18.42   |
| 35           | 16.25   |
| 45           | 15.17   |
| 50           | 14.08   |
| 60           | 14.08   |
| 70           | 12.07   |
| 80           | 12.07   |
| 100          | 10.40   |
| 110          | 8.94  |
| 130          | 8.67  |
| 150          | 8.67  |
| 180          | 8.67  |
| 210          | 7.22  |
| 220          | 6.57  |
| 230          | 7.22  |
| 290          | 7.22  |
| 300          | 7.22  |

ตาราง ข. 38 แสดงข้อมูลเพอมีเอทฟลักซ์เวลาต่างๆ โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.8 เมกกะปาสคาล (ต่อ )

| เวลา ( นาที ) | เพอมีเอทฟลักซ์ $\times 10^7$<br>(ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที) |
|---------------|---|
| 319           | 7.22  |
| 335           | 7.22  |
| 360           | 7.22  |
| 391           | 7.22  |
| 439           | 6.50  |
| 445           | 6.50  |
| 465           | 6.50  |
| 505           | 6.50  |
| 615           | 6.50  |
| 620           | 6.50  |
| 630           | 6.50  |
| 646           | 6.19  |
| 651           | 6.19  |
| 656           | 6.19  |
| 682           | 6.19  |
| 699           | 6.19  |
| 720           | 6.19  |

ตาราง ข. 39 แสดงปริมาณไดด์ซีนของสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.8 เมกกะปาสคาล

| เวลา ( ชั่วโมง ) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                  | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0                | 0.4314                                | 0.4093     | 0.0182   | 0.958        |
| 1.5              | 0.4377                                | 0.3969     | 0.0187   | 0.957        |
| 3                | 0.4979                                | 0.4294     | 0.0126   | 0.975        |
| 4.5              | 0.5294                                | 0.5558     | 0.0129   | 0.976        |
| 6                | 0.5411                                | 0.5772     | 0.0117   | 0.978        |
| 7.5              | 0.5259                                | 0.6271     | 0.0141   | 0.973        |
| 9                | 0.5196                                | 0.5964     | 0.0119   | 0.977        |
| 10.5             | 0.5692                                | 0.6147     | 0.0091   | 0.984        |
| 12               | 0.5676                                | 0.5662     | 0.0091   | 0.984        |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข. 40 แสดงปริมาณเจนิสตินของสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.8 เมกกะปาสคาล

| เวลา ( ชั่วโมง ) | ความเข้มข้น ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ) |            |          | ค่าการกักกัน |
|------------------|---------------------------------------|------------|----------|--------------|
|                  | สายป้อน                               | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0                | 0.3410                                | 0.3381     | 0.0056   | 0.984        |
| 1.5              | 0.3574                                | 0.3349     | 0.0057   | 0.984        |
| 3                | 0.3994                                | 0.3940     | 0.0057   | 0.986        |
| 4.5              | 0.4001                                | 0.4364     | 0.0055   | 0.986        |
| 6                | 0.4095                                | 0.4449     | 0.0052   | 0.987        |
| 7.5              | 0.4400                                | 0.4620     | 0.0057   | 0.987        |
| 9                | 0.4494                                | 0.4714     | 0.0041   | 0.991        |
| 10.5             | 0.4795                                | 0.4891     | 0.0043   | 0.991        |
| 12               | 0.4817                                | 0.4965     | 0.0039   | 0.992        |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข. 41 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.8 เมกกะปาสคาล

| เวลา ( นาที ) | ค่าการนำไฟฟ้า |            |          | ค่ากักกัน |
|---------------|---------------|------------|----------|-----------|
|               | สายป้อน       | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |           |
| 0.5           | 678           | 679        | 58.8     | 0.913     |
| 1.5           | 681           | 679        | 54.9     | 0.919     |
| 3             | 690           | 684.8      | 49.1     | 0.929     |
| 4.5           | 707           | 721        | 48       | 0.932     |
| 6             | 723           | 726        | 47       | 0.935     |
| 7.5           | 738           | 739        | 59.2     | 0.920     |
| 9             | 742           | 747        | 67.3     | 0.909     |
| 10.5          | 756           | 752        | 70.5     | 0.907     |
| 12            | 756           | 762        | 75.7     | 0.900     |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



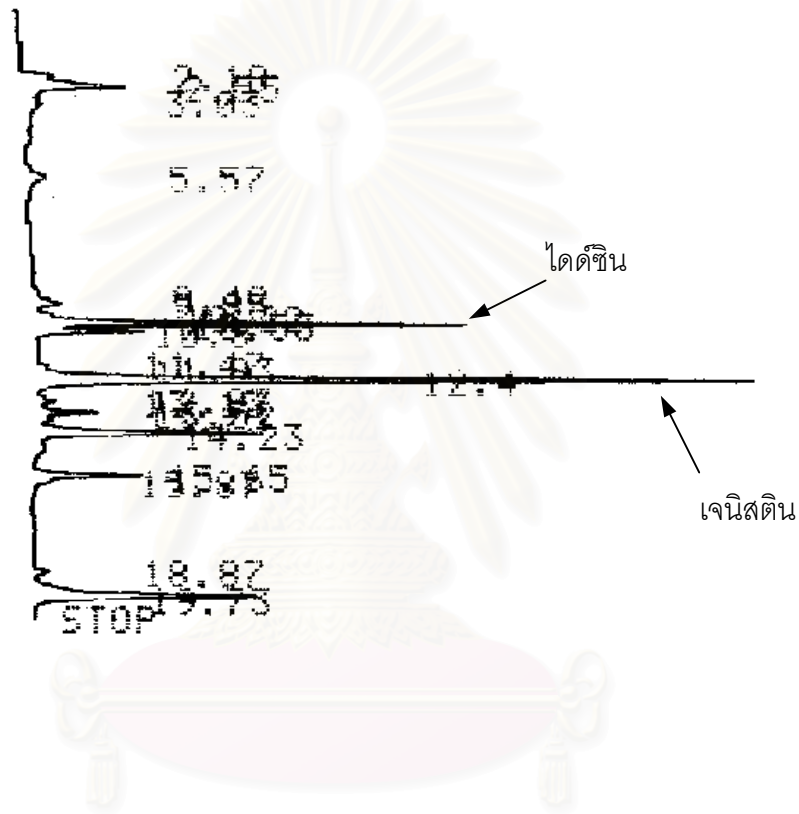
ตาราง ข. 42 แสดงค่าปริมาณแคลเซียมในสายป้อน คอนเซนเทรทและเพอมีเอท โดยค่าความเร็วของสายป้อนคงที่ที่ 0.015 เมตรต่อวินาทีและความดัน 2.8 เมกกะปาสคาล

| เวลา(ชั่วโมง) | ปริมาณแคลเซียม ( มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) |            |          | ค่าการกักกัน |
|---------------|---|------------|----------|--------------|
|               | สายป้อน                                 | คอนเซนเทรท | เพอมีเอท |              |
| 0.5           | 11.4                                    | 11.952     | 1.1508   | 0.899        |
| 1.5           | 11.508                                  | 11.376     | 1.1652   | 0.899        |
| 3             | 11.676                                  | 11.7576    | 1.182    | 0.899        |
| 4.5           | 11.976                                  | 12.96      | 1.1952   | 0.900        |
| 6             | 13.32                                   | 13.68      | 1.188    | 0.911        |
| 7.5           | 14.16                                   | 13.8       | 1.284    | 0.909        |
| 9             | 15                                      | 15.24      | 1.344    | 0.910        |
| 10.5          | 15.36                                   | 15.6       | 1.44     | 0.906        |
| 12            | 15.84                                   | 16.2       | 1.488    | 0.906        |

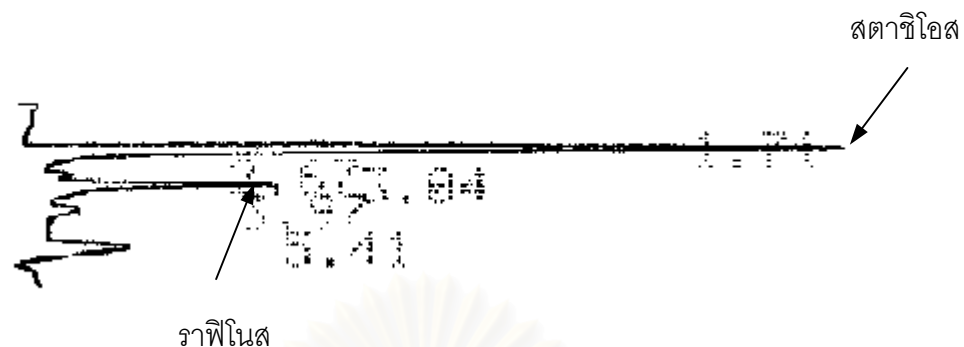
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างโครมาโทแกรมของไดดซีนและเจนิสตินจากตัวอย่างส่วนที่เป็นเพอมีเอทในการกรองแบบ  
ไมโครฟิลเตรชันโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC



| สาร      | รีเทนชันไทม์ (นาที) |
|----------|---------------------|
| ไดดซีน   | 10.59               |
| เจนิสติน | 12.4                |



ตัวอย่างโครมาโทแกรมของราฟิโนสและสตาคิโอสจากส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ในการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

| สาร      | รีเทนชันไทม์ (นาที) |
|----------|---------------------|
| สตาคิโอส | 1.71                |
| ราฟิโนส  | 3.04                |

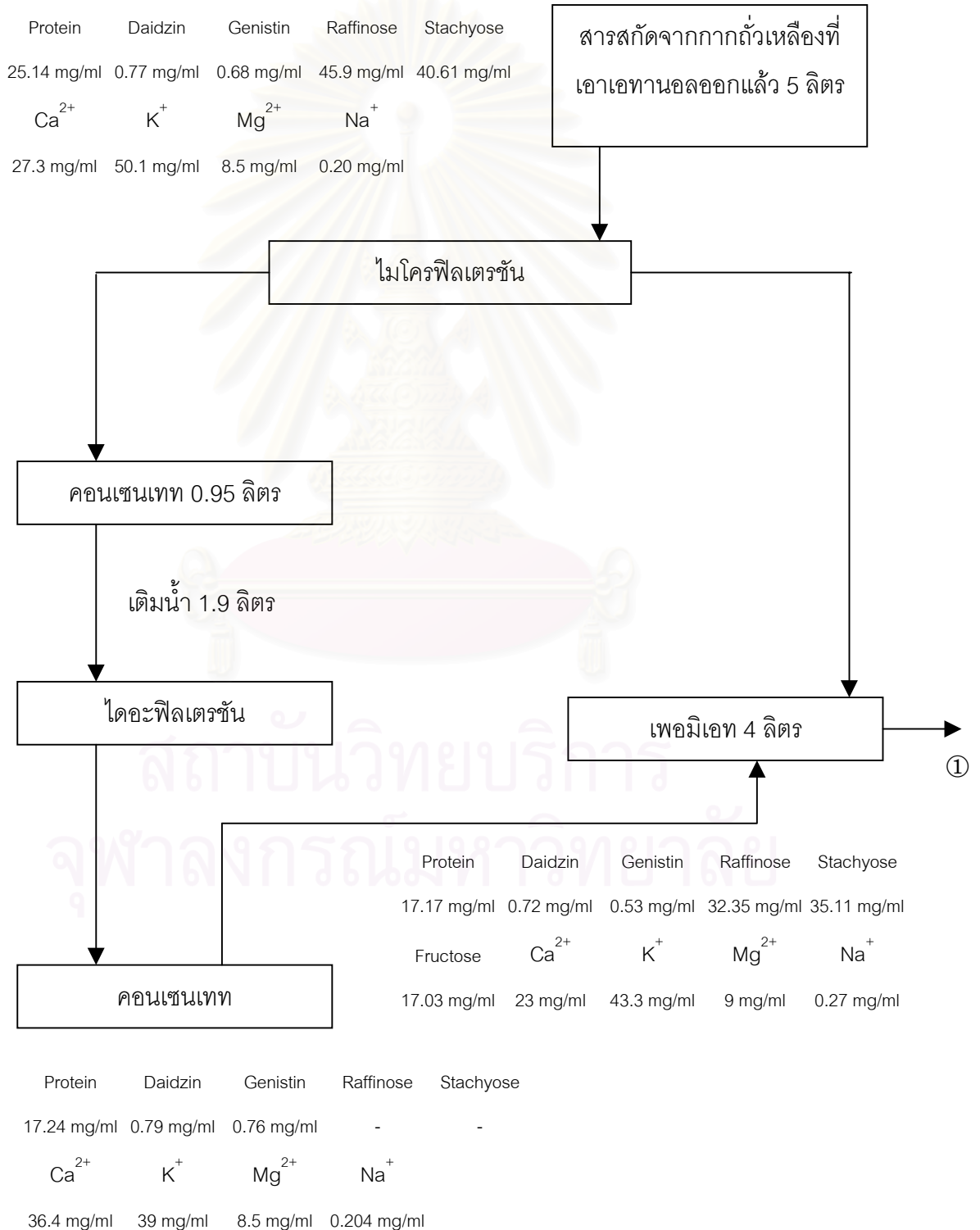
ตัวอย่างโครมาโทแกรมของฟรักโทสจากตัวอย่างส่วนที่เป็นคอนเซนเททในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

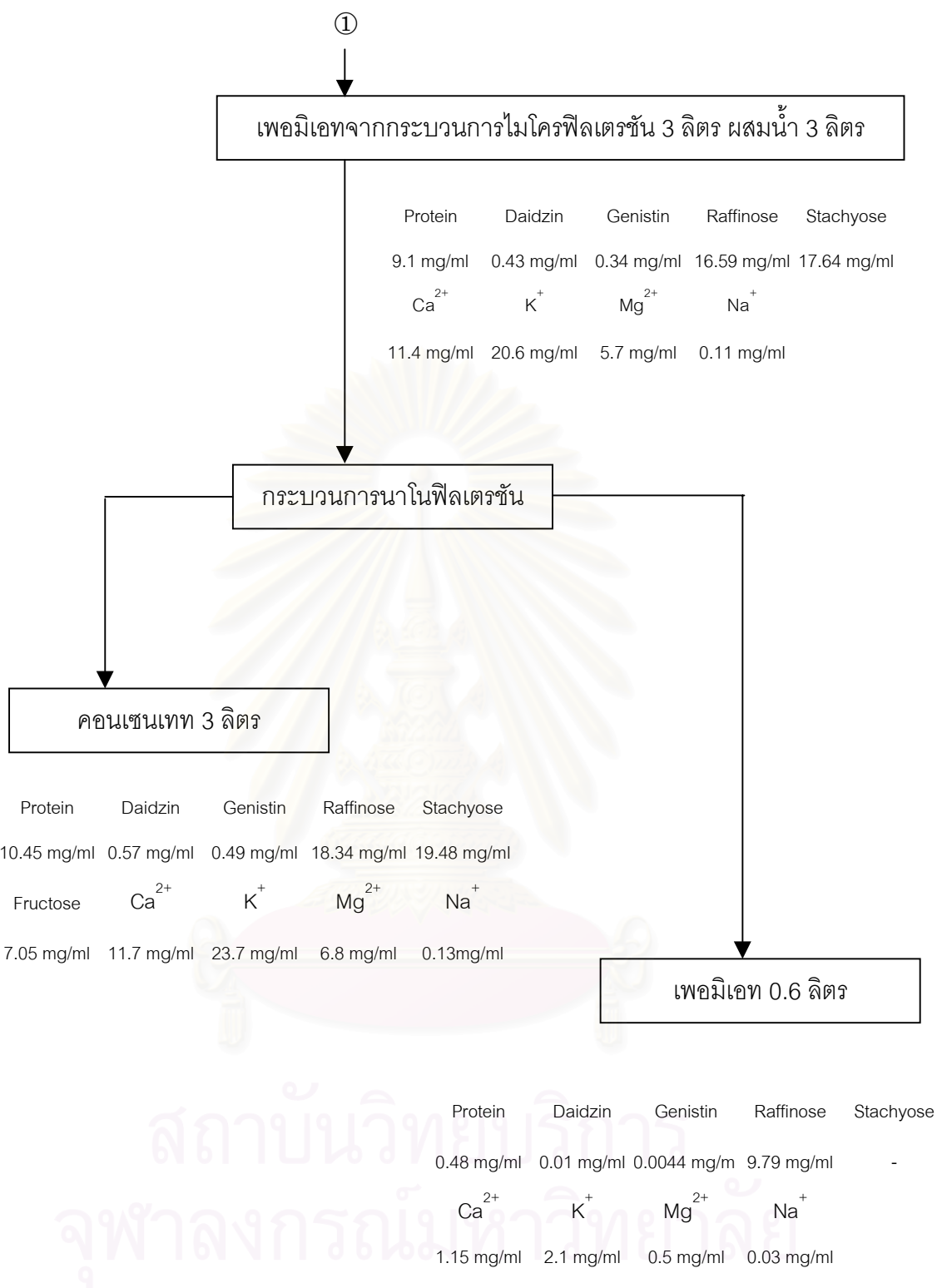


| สาร     | รีเทนชันไทม์ (นาที) |
|---------|---------------------|
| ฟรักโทส | 5.37                |

ภาคผนวก ง.

### ปริมาณสารต่างๆที่มีอยู่ในสารสกัด





## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิรินุช ก้องเสียง เกิดเมื่อวันที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมีที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย