



การกรองด้วยเยื่อกรองแบบพ่นทางสำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่  
ของยางน้ำยาง

**Hybrid-Membrane Process for Skim Latex Recovery**

นฤมล ทองมาก

**Narumol Thongmak**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Environmental Engineering  
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ชื่อวิทยานิพนธ์	การกรองด้วยเยื่อกรองแบบพันทางสำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ของหางน้ำยาง
ผู้เขียน	นางสาวนฤมล ทองมาก
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2552

### บทคัดย่อ

การศึกษาการประยุกต์ใช้การกรองด้วยเยื่อกรองแบบพันทางสำหรับการแยกเนื้อเยื่อออกจากหางน้ำยางโดยใช้เทคนิคร่วมในการปรับสภาพหางน้ำยางก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี เมื่อการทดสอบการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนในชุดกรองขนาดเล็กคือ หางน้ำยางที่เติม SDS (sodium dodecyl (lauryl) sulfate) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl เนื่องจากมีความสม่ำเสมอของค่าฟลักซ์ขณะกรอง และหางน้ำยางสามารถคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ (colloid dispersion) ดีที่สุด ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงในชุดกรองขนาดเล็ก โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ พบว่าทุกสภาวะที่ทดสอบส่วนใหญ่มีแนวโน้มสอดคล้องกับรูปแบบการอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking) แต่อย่างไรก็ตามพบลักษณะฟาวลิงแบบอื่น ๆ ร่วมอยู่ด้วย และจากการวิเคราะห์ฟาวลิงโดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\alpha_w$ ) พบว่า หางน้ำยางที่เติม SDS ก่อนและตามด้วยการปรับ pH มีค่า  $\alpha_w$  น้อยกว่าหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH ก่อน และตามด้วยการเติม SDS ประมาณ 3-14 เท่า เนื่องจากมีอนุภาคขางจำนวนน้อยที่ออรวมกันบนผิวเมมเบรนขณะกรองแบบปิดตายหรือตายตัว ซึ่งส่งผลให้ชั้นเค้กสะสมน้อยกว่าและ/หรือไม่อัดตัวแน่น และเมื่อศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระยะเวลาในการบ่มหางน้ำยางหลังจากที่มีการเติม SDS ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่เหมาะสม คือ 5 วัน ซึ่งถูกนำไปใช้เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมีในการเดินระบบกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางในสเกลระดับห้องปฏิบัติการ (cross flow microfiltration lab scale unit) คือ จากนั้นตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl ผลทดสอบเพิ่มความเข้มข้นเนื้อเยื่อ ออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) มีประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนดีกว่ารูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  คือส่งผลให้หางน้ำยางมีลักษณะชั้นขึ้นมีค่า %DRC เพิ่มขึ้น

จากเดิมประมาณร้อยละ 4 เป็นร้อยละ 19.49 และใช้เวลาในการเดินระบบน้อยกว่าประมาณ 2 เท่า ในขณะที่ค่า VFA บ่งชี้ถึงสถานะการเสถียรภาพ คือ การสูญเสียสภาพการเป็นคอลลอยด์ มีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.02 และฟาวลิงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบผันกลับได้ คิดเป็นร้อยละ 89.38 สำหรับผลการวิเคราะห์น้ำเพอมีเอท (ซีรัม) พบว่า น้ำซีรัมมีค่า turbidity เหลืออยู่ประมาณ 47.4 NTU โดยน้ำซีรัมมีลักษณะสีเหลืองใส และพบว่าในน้ำซีรัมมีโปรตีนทั้งหมดอยู่ประมาณ 475 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งโปรตีนในน้ำซีรัมส่วนใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 25-40 กิโลดาลตัน ซึ่งด้วยคุณสมบัติของน้ำซีรัมจึงจะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ผลิตภัณฑ์เรีย สำหรับรายเซลล์เดี่ยว แพลงก์ตอนสัตว์ หรือหากวิเคราะห์หองค์ประกอบทางชีวเคมีแล้วพบสารที่มีคุณค่าและมีประโยชน์ต่อสุขภาพก็นำไปใช้ประโยชน์ต่อ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำซีรัมได้

<b>Thesis Title</b>	Hybrid-Membrane Process for Skim Latex Recovery
<b>Author</b>	Miss Narumol Thongmak
<b>Major Program</b>	Environmental Engineering
<b>Academic Year</b>	2009

### ABSTRACT

This research experiment applied to use hybrid-membrane process for separation latex particle by chemical conditioning on the skim latex before feeding into cross flow microfiltration lab scale unit. It was found that the optimum of chemical conditioning when testing efficiency and performance of separation by membrane in microfiltration lab scale unit was added 1% SDS by weight (sodium dodecyl (lauryl) sulfate) and followed with a pH adjustment in the range of 8-8.5 with HCl in skim latex. This condition could provided the stable flux value and preserved the best of colloidal dispersion. The analysis results of fouling phenomena in microfiltration lab scale unit using mathematic models showed that all of condition tests were correlated with the complete pore blocking model under the consideration on experimental data. However, another type of fouling phenomena was also found. The cake filtration theory was used to analyze and calculate the resistance coefficient ( $\alpha_w$ ). The results showed that the values of  $\alpha_w$  in skim latex with SDS and with a pH adjustment were 3-14 times lower than skim latex with pH adjustment and with SDS because small amount of latex particle deposit on membrane surface when filtering under dead end mode. This caused to less cake layer deposition. In addition, the incubation time of conditioned skim latex was studied after adding 1%SDS. The result showed that the optimum of incubation time was about 5 days. So the optimum of chemical conditioning on the skim latex before feeding into cross flow microfiltration lab scale unit. When pH adjustment in the range of 8-8.5 with HCl, the results showed that cross flow microfiltration lab scale unit at critical flux ( $J_{crit}$ ) had more efficient of membrane separation than cross flow microfiltration lab scale unit at half of critical flux ( $50\% J_{crit}$ ). The efficiency and performance of cross flow microfiltration lab scale unit at critical flux ( $J_{crit}$ ) presented the percentage value of dry rubber content (%DRC ) in concentrated skim latex increased from 4% up to 19.49% and its spent time 2 times lesser than at half of critical flux ( $50\% J_{crit}$ ) while the VFA

value was 0.02%. Mostly of reversible fouling resistance occurred in cross flow microfiltration lab scale unit at critical flux ( $J_{crit}$ ), which was about 89.38%. The analysis of permeate (serum) was found that turbidity was about 47.4 NTU and color of serum had clear yellow. The protein content obtained in serum had 475 mg/L, mostly of molecular weight size distribution was in the range of 25-40 kDa. The characteristics of the serum can benefit for the proliferation of aquaculture production bacterial algae plankton culture or if the property in biochemical analysis (valued products) will benefit and use for increasing serum valued.

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 การตรวจเอกสาร	4
1.2.1 น้ํายางสดหรือน้ํายางธรรมชาติ	4
1.2.2 การรักษาสภาพน้ํายางสด	8
1.2.3 การผลิตน้ํายางชั้นด้วยวิธีการปั่นแยก	8
1.2.4 หางน้ํายาง	14
1.2.5 ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมผลิตน้ํายางชั้น	17
1.2.6 เทคโนโลยีเมมเบรน	24
1.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เมมเบรนเพื่อแยกอนุภาคยาง	47
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	52
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	52
2. วิธีการวิจัย	53
2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	53
2.2 วัสดุ	60
2.2.1 ตัวอย่างหางน้ํายางที่ใช้ในการทดลอง	60
2.2.2 สารเคมี เครื่องแก้ว และวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ	60
2.2.3 เมมเบรนชนิดแผ่น	60
2.2.4 เมมเบรนท่อกลวง/วัสดุเซรามิกส์	60
2.3 อุปกรณ์	62
2.3.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างหางน้ํายาง	62
2.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ	62
2.3.3 แบบจำลองระบบฯ และอุปกรณ์ประกอบแบบจำลอง	63

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. ผลการศึกษาสมบัติและการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี	66
3.1 ศึกษาคุณสมบัติของหางน้ำยาง	66
3.2 การปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี	68
3.2.1 ผลการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี	70
3.2.2 ผลของสารเคมีต่อการแยกเฟสในหางน้ำยางและลักษณะอนุภาคยาง	78
3.2.3 ผลของแรงเชิงกลต่อความสูงของเฟสเข้มข้น	80
3.2.4 ผลของอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องต่อสภาพหางน้ำยาง	82
3.3 บทสรุป	82
4. ผลการศึกษาประสิทธิภาพและสมรรถนะการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน	83
4.1 สภาพการซึมผ่านได้ของชุดเมมเบรนสะอาด (initial permeability membrane)	83
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนในชุดกรองขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อยาง	84
4.2.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนชุดกรองขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อยาง	85
4.2.2 การวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง	94
4.2.3 การวิเคราะห์ฟาวลิงโดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\alpha W$ )	101
4.3 บทสรุป	103
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อยาง	104
4.4.1 การทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ )	105
4.4.2 สมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางแบบต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อยาง	106
4.4.3 ประเภทและระดับของค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง	111
4.4.4 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้อยางออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อยาง	115



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. บทสรุป และข้อเสนอแนะ	118
5.1 บทสรุป	118
5.2 ข้อเสนอแนะ	121
บรรณานุกรม	122
ภาคผนวก	132
ภาคผนวก ก ใช้น้ำหนักโมเลกุล ของโปรตีน	133
ภาคผนวก ข ภาพอนุภาคหางน้ำยาง (กำลังขยาย 400 เท่า) ที่ระยะเวลาในการบ่มต่างกัน	135
ภาคผนวก ค การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วย เมมเบรน	136
ประวัติผู้เขียน	139

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบของน้ำยางสด	7
1.2 คุณสมบัติของซีรัมของน้ำยาง	7
1.3 ปริมาณการใช้สารเคมี/น้ำ/ของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการจับตัวของเนื้อยางในทางน้ำยาง	10
1.4 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากน้ำยางข้นและยางสกิม	10
1.5 ตัวอย่างสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากน้ำยาง	11
1.6 ข้อดี-ข้อเสียของการใช้กรดซัลฟูริกในการจับเนื้อยาง	15
1.7 ชนิดของเสียและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมน้ำยางข้น	18
1.8 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำยางข้น	18
1.9 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน	27
1.10 การใช้งานและสถานะการเดินระบบในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง: ประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม	31
1.11 เทคนิคและวิธีการป้องกันและการฟื้นฟูสภาพเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงขณะเดินระบบกรองแบบไหลขวาง	44
1.12 การใช้งานและสถานะการเดินระบบรูปแบบการกรองแบบไหลขวางเพื่อแยกอนุภาคยาง	49
2.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์	57
2.2 สถานะการทดสอบชนิดและปริมาณของสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test	58
2.3 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์: กรณีศึกษาการปรับสภาพด้วยสารเคมีในชุดทดสอบ Jar Test	58
2.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์: กรณีศึกษาการกรองโดยใช้ชุดกรองเล็ก	59
2.5 สถานะการทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) และค่าความเร็วไหลขวางที่เหมาะสม	59
2.6 สถานะการทดสอบสมรรถนะการกรองสารป้อนโดยเดินระบบแบบต่อเนื่องในเวลา 6-8 ชั่วโมง	59
2.7 สถานะการทดสอบอัตราการปนเปื้อนฟองอากาศ	60

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
2.8	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์: กรณีศึกษาการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน	60
2.9	คุณลักษณะเฉพาะของเมมเบรนชนิดแผ่น	61
2.10	คุณลักษณะเฉพาะของเมมเบรนท่อกลาง	62
3.1	คุณสมบัติของหางน้ำก่อนการปรับสภาพด้วยสารเคมี	67
3.2	ผลการศึกษาลักษณะหางน้ำหลังเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (SDS)	74
3.3	ผลการศึกษาลักษณะหางน้ำหลังเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (SLES)	75
3.4	ผลการศึกษาลักษณะหางน้ำหลังเติมโพลีเมอร์ประจุบวก (PACI)	76
3.5	ผลการศึกษาลักษณะหางน้ำหลังเติมโพลีเมอร์ประจุบวก (PQA)	77
4.1	ผลวิเคราะห์การกรองโดยใช้ชุดกรองเล็ก (ในสถานะที่เติมและไม่เติมสารปรับสภาพ)	89
4.2	ผลวิเคราะห์การกรองโดยใช้ชุดกรองเล็ก (ความเข้มข้น SDS ที่ปริมาณสูง และ ลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่ใช้ต่างชนิดกัน)	93
4.3	ค่าฟลักซ์จากการประมาณ โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบสมการ ณ เวลา $t = 0$	99
4.4	สรุปค่า $\alpha W$ จากความสัมพันธ์ระหว่าง $t/V$ และ $V$	103
4.5	ผลวิเคราะห์ตัวอย่างเมื่อกรองด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบ ไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ $50\% J_{crit}$ (ความเร็วไหลขวาง 3 m/s)	109
4.6	ผลวิเคราะห์ตัวอย่างเมื่อกรองด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบ ไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) (ความเร็วไหลขวาง 3 m/s)	110
4.7	ผลประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้องานออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้องาน	116

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า	
1.1	กระบวนการผลิตน้ำยางข้น วัสดุและทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต	9
1.2	น้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตน้ำยางข้น	19
1.3	แสดงระดับของเทคโนโลยีเมมเบรน	24
1.4	หลักการของกระบวนการแยกโดยเมมเบรน	26
1.5	ลักษณะเฉพาะของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน โดยใช้ความดันเป็นแรงขับ	28
1.6	รูปแบบการเดินระบบกรองแบบปิดตายและแบบไหลขวาง	29
1.7	การลดลงของฟลักซ์และการเพิ่มขึ้นของฟาวลิ่ง เนื่องจากความหนาของชั้นเค้กสะสม	30
1.8	ลักษณะการเกิดฟาวลิ่ง	37
1.9	ลักษณะการเกิดฟาวลิ่งของเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่างๆเทียบกับขนาดของตัวถูกละลาย	38
1.10	การทำความสะอาดเมมเบรนระหว่าง backpulsing	41
2.1	แบบจำลองระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง	56
2.2	แบบจำลองการแยกด้วยเมมเบรนในชุดกรองสเกลระดับห้องปฏิบัติการ	57
2.3	เมมเบรนชนิดแผ่น (plane organic membrane)	61
2.4	เมมเบรนประเภทท่อกลาง (tubular modules with multi channel ceramic membrane)	62
2.5	ภาพถ่ายระบบชุดกรองเล็กที่ใช้ร่วมกับเมมเบรนชนิดแผ่น	64
2.6	ภาพถ่ายระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางพร้อมรายละเอียด	64
3.1	ทดสอบชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test	68
3.2	การเสียดสีของหางน้ำยางเมื่อเติมสาร PQA ที่ความเข้มข้นสูงระหว่าง 1-4 มิลลิลิตร	73
3.3	ความสูงของเฟสเข้มข้นที่เกิดขึ้นเมื่อเติมสารเคมีปรับสภาพที่ปริมาณความเข้มข้นและชนิดต่างกัน	78
3.4	ภาพแสดงอนุภาคหางน้ำยางจากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบบันทึกภาพที่ กำลังขยาย 400 เท่า	79

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.5 ผลของแรงเชิงกลต่อความสูงของเฟสเข้มข้น	81
4.1 ผลการทดสอบสภาพซึมผ่านได้ของชุดเมมเบรนสะอาดแบบทอกลวงระดับไมโครฟิลเตรชัน	84
4.2 การแยกด้วยเมมเบรนในชุดกรองขนาดความจุ 150 มิลลิลิตร	85
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา ผ่านเมมเบรนขนาดรูช่องเปิด 0.22 ไมโครเมตร ที่ความดันคงที่ 1 บาร์ ความเร็วรอบในการกวน 150 และ 300 รอบต่อนาที ในสภาวะที่ผ่านการปรับ pH (7-8)	86
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา ผ่านเมมเบรนขนาดรูช่องเปิด 0.22 ไมโครเมตร ที่ความดันคงที่ 1 บาร์ ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที	87
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา ผ่านเมมเบรนขนาดรูช่องเปิด 0.22 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ SDS ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก) ที่ความดันคงที่ 1 บาร์ ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที	92
4.6 รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง	95
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา สำหรับการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง 4 รูปแบบสมการ (ปรับ pH ด้วย H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> มีค่า pH 7-8)	96
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา สำหรับการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง 4 รูปแบบสมการ (กรดต่างชนิดกัน ลำดับการเติมสาร (ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่ใช้เพื่อปรับสภาพต่อหาน้ำยาง)	97
4.9 การเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่าง $t/V$ กับ $V$ เมื่อทดสอบกรองหาน้ำยาง ภายใต้สภาวะ ลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) และปริมาณสารปรับสภาพชนิด SDS และกรดต่างชนิดกันในการปรับ pH หาน้ำยาง	102
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคหาน้ำยางและระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม	104
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันขับของหาน้ำยางที่ %DRC ร้อยละ 5 และน้ำยางที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 10 และ 20 ที่ความเร็วไหลขวางคงที่ 3 m/s ที่อุณหภูมิห้อง	105
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณของเพอมีเอท (น้ำซีรัม)	107

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 ลักษณะทางกายภาพของหางน้ำยางหลังผ่านกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน	108
4.14 ภาพแสดงการล้นของฟองออกนอกระบบ ขณะเดินระบบกรองในชุดการทดลองที่กำหนดให้มีการเติมอากาศ	111
4.15 ค่าความต้านทานคงเหลือค้างของเมมเบรนหลังการล้างด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง (ต่อเนื่อง) ที่ค่าฟลักซ์ 50% $J_{crit}$ (ก) และที่ค่าฟลักซ์ที่ $J_{crit}$ (ข)	112
4.16 ค่าความต้านทานเนื่องจากเกิดฟาวลิง ทั้งแบบผันกลับได้ ( $R_{rev}$ ) และแบบผันกลับไม่ได้ ( $R_{irr}$ ) เมื่อสิ้นสุดการกรองแบบไหลขวาง (ต่อเนื่อง) ที่ค่าฟลักซ์ 50% $J_{crit}$ (ก) และที่ค่าฟลักซ์ที่ $J_{crit}$ (ข)	113

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ปัจจุบันไทยเป็นประเทศที่สามารถส่งออกยางพาราได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก การนำผลผลิตจากต้นยางพาราไปใช้ประโยชน์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ 1) การนำไปใช้ในรูปของยางแห้ง (dry rubber) โดยผ่านกระบวนการผลิตยางแท่ง ยางเครพ ยางแผ่นอบแห้ง ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง และ 2) การนำไปใช้ในรูปของน้ำยางข้น (concentrated latex) โดยผ่านกระบวนการผลิตน้ำยางข้น หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์ยางเหล่านี้จะถูกแปรรูปในอุตสาหกรรมปลายทางต่อไป อาทิ น้ำยางข้นจะถูกนำไปใช้ในการผลิตถุงมือยาง ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย เครื่องมือวิทยาศาสตร์การแพทย์ ฯลฯ สำหรับยางแท่งจะถูกนำไปใช้ในการผลิตยางรถยนต์ พื้นรองเท้า และอุปกรณ์สำหรับเครื่องกลต่าง ๆ เป็นต้น

โรงงานน้ำยางข้นถือเป็นอุตสาหกรรมสำคัญที่ทำรายได้ให้กับประเทศและท้องถิ่นภาคใต้ โดยทั่วไปแล้วโรงงานใช้รูปแบบกระบวนการผลิตน้ำยางข้นด้วยวิธีปั่นแยกด้วยความเร็วสูงซึ่งพอสรุปขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ (1) ขั้นตอนการรับน้ำยางสด ที่มีการเติมสารเคมี คือ แอมโมเนีย TMTD/ZnO เพื่อรักษาสภาพน้ำยาง และเติมสาร DAP (diammonium hydrogen phosphate) ก่อนผ่านตะแกรง (2) น้ำยางสดที่ผ่านการเติมสาร DAP จะเข้าสู่บ่อรับน้ำยางสด และทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน เพื่อตกตะกอนเอาแมกนีเซียม (ตะกอนสีขาว) ในน้ำยางสดออก เรียกว่า ขี้แป้ง โดยปริมาณสารเคมีที่ใช้ขึ้นกับคุณภาพของน้ำยางและเกณฑ์มาตรฐานในการผลิต (3) ผ่านน้ำยางเข้าสู่เครื่องปั่นแยกโดยอาศัยหลักการที่อนุภาคยางมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำซีรัม ทำให้น้ำยางถูกแยกออกเป็นสองส่วน คือ น้ำยางข้น และหางน้ำยาง โดยน้ำยางข้นจะถูกนำไปบรรจุในถังขนาดมาตรฐานสำหรับส่งขาย (4) ส่วนของหางน้ำยางที่ออกจากเครื่องปั่นแยกจะยังคงมีเนื้อยางหลงเหลืออยู่ จึงมักมีกรรมวิธีการเก็บเกี่ยวเอาเนื้อยางในส่วนนี้ด้วยการเติมกรดซัลฟูริกในหางน้ำยางที่ถูกกักไว้ในบ่อทิ้งไว้จนกระทั่งยางจับตัวกัน แล้วนำยางที่จับตัวในหางน้ำยางมาผลิตเป็นยางสกิมเครพหรือสกิมบลิ๊อคต่อไป

ดังนั้นหางน้ำยางเป็นยางธรรมชาติซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเซนตริฟิวจ์น้ำยางสดให้กลายเป็นน้ำยางข้น โดยหางน้ำยางซึ่งเป็นวัตถุดิบของการทำยางสกิมนั้น ปกติจะมีเนื้อยางอยู่ราว 4-8% DRC (dry rubber content) หางน้ำยางที่ได้จะมีการไล่แอมโมเนียออกไปก่อนที่จะมีการเติมกรดซัลฟูริกในบ่อพักหางน้ำยางแล้วปล่อยให้เกิดการจับตัวของเนื้อยาง หลังจากนั้นจะทำการเก็บเกี่ยวเนื้อยางและนำเนื้อยางมารีดเพื่อกำจัดน้ำในเนื้อยางออก น้ำเสียจากการแยกเนื้อยาง การล้างบ่อ

พักทางน้ำยาง และการรีดยาง จะถูกส่งไประบบบำบัดน้ำเสียรวมเพื่อบำบัดต่อไป (สมทิพย์ คำนวณวิชช์ และคณะ, 2545) โดยรูปแบบการผลิตดังกล่าวนี้ส่งผลให้น้ำเสียมีค่า pH ต่ำเนื่องจากมีปริมาณกรดซัลฟูริกที่เติมขณะแยกเพื่อเก็บเกี่ยวเนื้อยางออกจากทางน้ำยางและน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดยังคงมีเนื้อยางส่วนที่หลงเหลืออยู่จากการเก็บเกี่ยวไม่หมด ซึ่งส่งผลให้น้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์สูง นอกจากนี้มีการใช้สารลดแรงตึงผิวประเภทเกลือของ quaternary ammonium (cationic surfactant) และการใช้สารสร้างและรวมตะกอน (coagulant and flocculant) โดยการใช้สารกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีชื่อทางการค้าหลากหลาย เป็นต้น เพื่อให้อนุภาคยางจับตัวและแยกออกจากน้ำซีรัม (ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์, 2545)

จากการดำเนินการดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าของเหลว/น้ำเสีย ที่ได้จากการผลิตยางสกินนั้นจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นซีรัมจำนวนมาก และจากรายงานผลการศึกษาคณสมบัติของน้ำซีรัมของน้ำยางพบว่าในน้ำซีรัมมีส่วนประกอบของสารอาหารหลายประเภทด้วยกัน เช่น สารประเภทคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและน้ำตาล ซึ่งสารเหล่านี้สามารถเป็นอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้น้ำซีรัมยังมีสารอื่นๆ ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ตัวอย่างเช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โซเดียม แมกนีเซียม เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการนำส่วนที่เป็นซีรัมไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการนำซีรัมมาใช้ในรูปแบบของธาตุอาหารสำหรับผลิตแบคทีเรีย สาหร่ายเซลล์เดียว และแพลงก์ตอนสัตว์ที่สามารถนำมาเป็นอาหารสำหรับสัตว์น้ำเศรษฐกิจ ([http://rescom2006.trf.or.th/display/show\\_column.php?id\\_salaban=27](http://rescom2006.trf.or.th/display/show_column.php?id_salaban=27)) แต่ด้วยรูปแบบการผลิตแบบเดิมนั้นส่งผลให้ไม่สามารถนำน้ำซีรัมกลับมาใช้ประโยชน์หรือเพิ่มมูลค่าได้อย่างกว้างขวาง และวิธีการดังกล่าวทำให้ได้ยางที่มีคุณภาพต่ำ และก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้การพัฒนากระบวนการใหม่ที่จะช่วยลดปัญหามลภาวะ และเพิ่มมูลค่าของยางและน้ำซีรัมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ และเป็นแนวทางการศึกษาที่ต้องการข้อมูลประกอบการตัดสินใจสำหรับการปรับเปลี่ยนการแยกเนื้อยางออกจากทางน้ำยาง

เทคโนโลยีเมมเบรนเป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้หรือใช้ในรูปแบบผสมผสานกับวิธีการผลิตแบบทั่วไปในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมผลิตยา อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ เพื่อแยกองค์ประกอบในรูปสารแขวนลอย คอลลอยด์ สารละลาย โมเลกุล และ อีออนต่างๆ ออกจากส่วนที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ และขีดความสามารถในการแยกกระดัดของรูเมมเบรนที่คัดแยกอนุภาค โมเลกุล อีออนต่างๆ ในของเหลว แบ่งได้เป็น 4 ระดับ คือ ระดับไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) และรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis) (Howell, 2004) โดยภายใต้การเลือกใช้และเดินระบบอย่างเหมาะสม กระบวนการเหล่านี้มีขีด



สามารถแยกองค์ประกอบ เช่น โปรตีน เอนไซม์-แลคโตส ฟรุกโตส ไขมัน แร่ธาตุ และวิตามิน ออกจากสารป้อนได้

หางน้ำยางซึ่งเป็นของเหลวที่แยกเอาเนื้อเยื่อส่วนใหญ่ออกแล้ว จึงมีส่วนของน้ำในอัตราส่วนที่สูงกว่าเนื้อเยื่อมาก และอนุภาคของเนื้อเยื่อในหางน้ำยางมีขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคยางที่แยกได้ในส่วนของ น้ำยางข้น ประกอบกับการทำให้เนื้อเยื่อเข้มข้นขึ้นด้วยวิธีทั่วไปเป็นสิ่งที่ยากเนื่องจากความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพ-เคมี ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคที่เล็กนั่นเอง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาทดลองโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน เพื่อแยกและนำกลับเนื้อเยื่อในหางน้ำยางด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชัน ด้วยการเดินระบบภายใต้สภาวะต่างๆ ที่เหมาะสม และลดข้อจำกัดของการใช้เมมเบรน อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ฟาวลิงที่เกิดขึ้นแบบใดแบบหนึ่งหรือหลายแบบร่วมกันได้แก่ เกิดจากการสะสมความเข้มข้นของอนุภาค-โมเลกุลที่ใกล้ผิวหน้าเมมเบรน (concentration polarisation) การสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเมมเบรน (cake deposition) การบดล็อกของอนุภาค-โมเลกุลภายในรูกรอง และการดูดติดภายในรูกรอง (pore blocking and adsorption) ที่ส่งผลให้สมรรถนะของการเดินระบบลดลง ดังนั้นหากมีการใช้เทคนิคการปรับสภาพหางน้ำยางก่อนป้อนเข้าระบบการกรอง เช่น การทำให้เนื้อเยื่อมีการกระจายตัวด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว การทำให้เกิดการรวมตัวของเนื้อเยื่อ (coagulation) จึงเป็นแนวทางเทคโนโลยีที่เรียกว่า “hybrid membrane process” อันจะเป็นแนวทางการพัฒนา และเป็นเครื่องมือให้ภาคการผลิตในระบบอุตสาหกรรมน้ำยางข้น-ยางสกิมก๊าวเดินไปในทิศทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในรูปแบบของการพัฒนาที่ยั่งยืนภายใต้แนวคิดหลักของเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (clean technology, CT concept) โดยจะสามารถแยกเอาส่วนที่เป็นซีรัมไปพร้อมๆ กับการลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษคือ กรดซัลฟูริกในปริมาณสูง ลดการใช้น้ำในกระบวนการผลิต ขณะเดียวกันลดของเสียรูปต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่ต้องบำบัดสุดท้ายอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการแยกสารประกอบในหางน้ำยางที่อยู่ในรูปสารละลายและไม่ละลายออกจากกันได้ โดยควรเป็นวิธีการที่ส่งผลให้เกิดการทำลายคุณสมบัติของซีรัมน้อยสุด และได้เนื้อเยื่อออกมามากที่สุด ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าจากน้ำซีรัมที่ทิ้งเป็นน้ำเสีย (by product) จากการผลิตน้ำยางข้นและการทำยางสกิมได้มากขึ้น รวมทั้งช่วยแก้ปัญหามลพิษทางน้ำที่จะเกิดขึ้นจากโรงงานยางด้วย ในขณะเดียวกันก็จะสามารถทำให้ความเข้มข้นของเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้นจากเดิมราว 4-8% DRC เป็น 40% DRC (ใช้ยางสังเคราะห์ styrene-butadiene rubber (SBR) ในการทดสอบ โดยทดสอบในถังป้อนขนาด 500 ลิตร และเดินระบบจนกระทั่งค่าฟลักซ์ลดลงเหลือประมาณ  $0 \times 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที ซึ่งใช้เวลาในการเดินระบบต่อเนื่องประมาณ 2 เดือน) (Novalic, *et al.*, 1997)

## 1.2 การตรวจเอกสาร

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและมีการส่งออกยางธรรมชาติรายใหญ่ โดยผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีการส่งออกได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่งมาตรฐานและน้ำยางข้น ทั้งนี้อุตสาหกรรมจากยางพาราเป็นอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูงในตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำยางข้นเป็นการแปรรูปน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้นเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ เช่น กุ้งมือยาง กุ้งยางอนามัย ยางรถยนต์

การผลิตน้ำยางข้นของประเทศไทยมีการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตลอดระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา (2542-2551) คือมีการเพิ่มขึ้นจาก 300,640 ตันในปี 2542 เป็น 587,047 ตันในปี 2551 (<http://www.rubberthai.com/rubberthai/>) เนื่องจากการขยายการผลิตของอุตสาหกรรม กุ้งมือยาง และอุตสาหกรรมผลิตกุ้งยางอนามัย ที่เข้ามาใช้ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตของโลก (<http://www.dsutures.co.th/?cid=3&pid=18>) น้ำยางข้นผลิตขึ้นจากการนำน้ำยางสด จากส่วนที่มีปริมาณเนื้อยาง (dry rubber content) เฉลี่ยประมาณ 35% สารละลายที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber solid) 5% และน้ำ (water) มาผ่านกระบวนการแปรรูปให้อยู่ในรูปของน้ำยางข้นที่มีเนื้อยางแห้งอย่างน้อย 60% โดยใช้วิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง เพื่อแยกน้ำและสารอื่นๆ ที่ละลายอยู่ออกไปบางส่วน น้ำยางที่ได้จะเรียกว่า Centrifuged Latex ซึ่งมีน้ำยางข้น 60% (<http://www.dsutures.co.th/?cid=3&pid=18>) และในกระบวนการนี้จะมีส่วนของหางน้ำยางเกิดขึ้นมา หางน้ำยางที่ได้จากการผลิตน้ำยางขนนั้นยังมีเนื้อยางอยู่ราว 4-8% DRC ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องปั่นและการปรับเครื่องปั่นน้ำยาง โดยเนื้อยางที่ได้จากหางน้ำยางเหล่านี้จะถูกแปรสภาพเป็น สกิมบลิ้อค หรือ สกิมเครพ ต่อไป

### 1.2.1 น้ำยางสดหรือน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวข้นคล้ายน้ำมัน มีสภาพเป็นคอลลอยด์ หรือสารแขวนลอย มีอนุภาคขนาด 0.05-5 ไมโครเมตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5-7.0 น้ำยางมีค่าความหนืดประมาณ 12-15 centipoise (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 centipoise) และมีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัม/มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารต่างๆ ซึ่งมีปริมาณที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง ซึ่งองค์ประกอบของน้ำยางสด (ตารางที่ 1.1) โดยปริมาณเนื้อยางของน้ำยางธรรมชาติอาจแปรปรวนตั้งแต่ 25 ถึง 45 % ปริมาณความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งทั้งหมดในน้ำยางกับปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 3 % แต่ถ้าเป็นกรณีของน้ำยางที่ปั่นทำให้ข้นแล้ว ความ

แตกต่างกันเล็กน้อยเพียงประมาณ 1-2 % เท่านั้น ทั้งนี้องค์ประกอบของน้ำยางสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

**1.2.1.1 ส่วนที่เป็นยาง (dry rubber content)** เป็นสารประกอบไฮโดรเจนที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรเคมีคือ  $(C_5H_8)_n$  เรียกชื่อทางเคมีว่า โพลี-ไอโซพรีน (polyisoprene) ที่เชื่อมโยงต่อกันประมาณ 2,000-5,000 หน่วยต่อ 1 โมเลกุล หน่วยย่อยดังกล่าวเมื่อเกิดการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุลจะเรียงตัวกันในแบบ cis-configuration เรียกชื่อโมเลกุลขงว่าเป็น cis-1,4-polyisoprene เนื้อยางมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000,000 รูปร่างอนุภาคขงเป็นรูปทรงกลม หรือ รูปลูกแพร์ ขนาด 0.05-5 ไมโครเมตร มีประจุไฟฟ้าที่ผิวเป็นลบ และ เคลื่อนที่แบบบราวเนียนตลอดเวลา

**1.2.1.2 ส่วนประกอบที่ไม่ใช่ยาง (non rubber content)** เป็นส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่ส่วนที่เป็นยาง ประกอบด้วย

*1) ส่วนที่เป็นน้ำซีรัม (serum)*

น้ำซีรัม คือ ส่วนที่เป็นน้ำใสขงน้ำยาง ได้จากการแปรรูปเบื้องต้นขงน้ำยางเป็นยางชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็ยางข้น ยางแผ่น หรือแม้แต่การจับตัวกันตามธรรมชาติ หลังจากแยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกไปแล้ว จะเหลือส่วนที่เป็นน้ำใสเรียกว่า ซีรัม ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร มีการรายงานคุณสมบัติขงน้ำซีรัมที่ได้จากการทำน้ำยางข้น (ตารางที่ 1.2) ซึ่งประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ

- คาร์โบไฮเดรต เป็นสารพวกแป้งและน้ำตาลมีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1 % น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิด คิวบาชิทอล (quebrachitol) และมีน้ำตาลชนิดกลูโคส ซูโครส ฟรุคโตส ปริมาณเล็กน้อย น้ำตาลเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียใช้เป็นอาหาร เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายตัวให้กรดโมเลกุลที่มีขนาดเล็กๆ (short chain fatty acid) ทำให้น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพและรวมตัวเป็นก้อน กรดเหล่านี้เป็นกรดที่ระเหยได้ (volatile fatty acid : VFA) ประกอบด้วย กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดโพลีไอนิก เป็นต้น

- โปรตีนและกรดอะมิโนมีหลายชนิด แต่โปรตีนที่อยู่ในน้ำยางในปริมาณสูง คือ
  - แอลฟาโกลบูลิน ( $\alpha$ -globulin) เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 200,000 มีสมบัติเป็น surface-active จะอยู่บนรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ และน้ำมันกับน้ำ ซึ่งโปรตีนชนิดนี้จะไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในกรด ดังและเกลือ มีค่า isoelectric point ที่ pH เท่ากับ 4.8 ซึ่งอนุภาคขงจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วภายใต้ที่ pH ขง  $\alpha$ -globulin ละลายได้น้อยที่สุด

- ฮีวิน (hevein) เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า  $\alpha$ -globulin คือมีค่าประมาณ 10,000 hevein จะอยู่ที่ผิวอนุภาคขงและสามารถละลายน้ำได้ มีค่า isoelectric point ที่

pH เท่ากับ 4.5 ส่วนประกอบของโมเลกุลมีกำมะถันประมาณ 5 % ดังนั้นขณะที่น้ำยางสูญเสียสภาพ จะเกิดการบูดเน่า โดยโปรตีนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์และสาร เมอร์แคปแทน(mercaptan) ซึ่งทำให้มีกลิ่นเหม็น

- ไขมัน (lipid) ไขมันซึ่งอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็น สารพวกฟอสโฟไลปิด ชนิด  $\alpha$ -lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่ในผิวของอนุภาคยาง

## 2) ส่วนของลูทอยด์และองค์ประกอบอื่นๆ

- ลูทอยด์ เป็นอนุภาคค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-3 ไมโครเมตร ห่อหุ้มด้วยเยื่อบางๆ โดยภายในเยื่อบางๆ นี้มีทั้งสารละลายและสารแขวนลอย

- องค์ประกอบอื่นๆ มีสารพวกที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนอิสระ เช่น โคลีน (choline) เมทิลลามีน (methylamine) กรดอินทรีย์ (organic acid) กรดอนินทรีย์ (inorganic acid) อนุมูลของสารอินทรีย์โดยเฉพาะพวกฟอสเฟตและคาร์บอนเนต และอนุมูลของโลหะ ซึ่งส่วนใหญ่ เป็นพวกเหล็ก แมกนีเซียม โซเดียม ทองแดง เป็นต้น (วารสารณ์ ขจรไชยกุล, 2536)

หากนำน้ำยางสดมาปั่นแยกด้วยความเร็วสูงประมาณ 30,000 รอบ/นาที นาน 45 นาที จะพบว่ามี การแยกชั้นเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- (1) ส่วนของเนื้อยาง (white rubber fraction) เป็นส่วนบนสุดของหลอด เป็น สักส่วนประมาณ 37% โดยน้ำหนัก (กรัมต่อน้ำยาง 100 กรัม) ประกอบด้วยเนื้อยาง โปรตีน 0.55% และไขมัน 0.6%

- (2) ส่วนของเม็ดสีส้ม-เหลือง (frey-wyssling) เป็นกรดไขมัน (plastrochromarol) ที่มีความสำคัญทำให้ยางคงรูป และสารจำพวก carotenoi

- (3) ส่วนของน้ำใส (serum fraction) เป็นสักส่วนประมาณ 48% โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน สารประกอบไนโตรเจน และโลหะต่าง ๆ

- (4) ส่วนของก้นหลอด (bottom fraction) เป็นสักส่วนประมาณ 15% โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย ลูทอยด์บอดี ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีเยื่อหุ้มล้อมรอบมีคุณสมบัติเป็น เบสิคโปรตีน ที่สามารถทำหน้าที่เสมือนเอนไซม์ในไลโปโซม ซึ่งมีอิทธิพลต่อการแข็งตัวของยาง (สมทิพย์ คำนธีรวนิษฐ์ และคณะ, 2545)

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของน้ำยางสด

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์(โดยน้ำหนัก)
ของแข็งทั้งหมด(Total solids content, TSC)	36
เนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC)	33
สารพวกโปรตีน	1-1.5
เถ้า	จนถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2531

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติของซีรัมของน้ำยาง

คุณสมบัติ	ผลการวิเคราะห์
pH	4.77
Total solids	42,550
Volatile solids	36,410
Suspended solids	2,850
COD	32,690
BOD	13,670
Total nitrogen	4,620
Ammonia nitrogen	3,430
Albuminoid nitrogen	755
Nitrate nitrogen	3
Nitrite nitrogen	1
Total sugars	500
Reducing sugars	409
Al	1.6
Ca	6.0
Cu	4.0
Fe	2.0
K	618
Mg	61
Mn	0.6
Na	11.0
P	61.0
Rb	3.0
Si	8.0

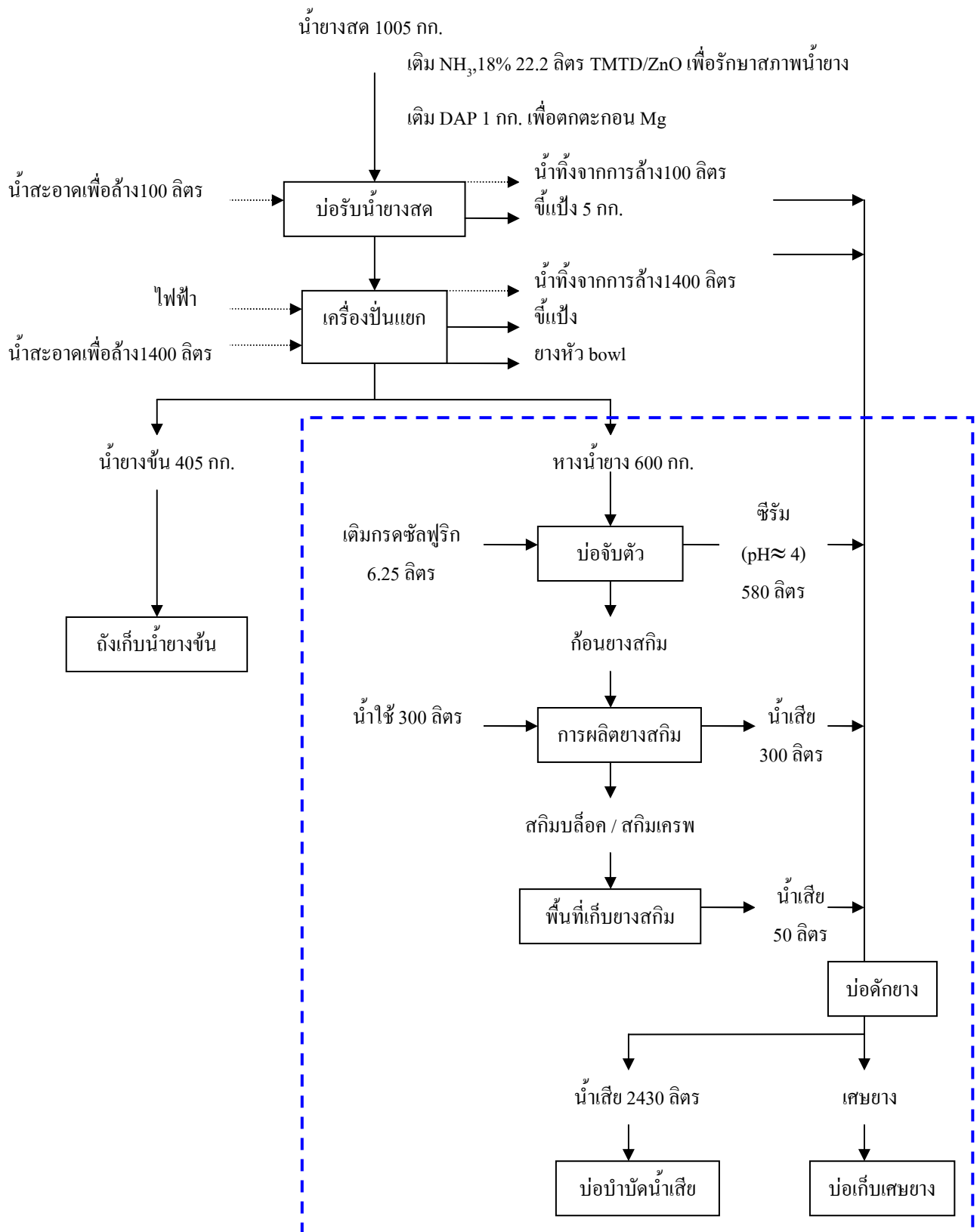
หน่วย : เป็น ppm ยกเว้น pH ที่มา : Ahmad bin Ibbrahim , 1982

### 1.2.2 การรักษาสภาพน้ำยางสด

น้ำยางสดหลังกรีดยางจากต้นยางจะคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ไม่เกิน 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นน้ำยางจะจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ คล้ายเม็ดพริก แล้วค่อยๆ หนืดขึ้น อนุภาคยางจะเริ่มจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนกระทั่งน้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพ โดยน้ำยางจะถูกแยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่เป็นซีรัม ในเวลาต่อมายางจะเริ่มเกิดการบวมและมึน การคงสถานะของเหลวของน้ำยางมีปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ ประจุไฟฟ้าลรอบๆ อนุภาคยาง ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคยาง และ ชั้นโปรตีนที่อยู่รอบๆ อนุภาคยาง เนื่องจากในน้ำยางมีสารประกอบพวกน้ำตาลจึงเป็นอาหารของแบคทีเรียและยีสต์ และการสูญเสียสภาพของน้ำยางอาจเกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่สลายโปรตีน ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางจับเป็นก้อนก่อนเวลาที่ต้องการหรือเพื่อให้ น้ำยางอยู่ในสภาพของเหลวตามที่ต้องการจึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีรักษาสภาพน้ำยางสด ในการผลิตน้ำยางข้นนั้นต้องรักษาสภาพน้ำยางสดเป็นระยะเวลายาวนาน เพื่อรวบรวมให้ได้ปริมาณเพียงพอสำหรับผลิตน้ำยางข้น ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้คือ แอมโมเนีย หรือแอมโมเนียร่วมกับสารอื่นเช่น TMTD/ZnO เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและใช้ง่าย (<http://south.nfe.go.th/LearnSquare/courses/43/03parakeep002.htm>)

### 1.2.3 การผลิตน้ำยางข้นด้วยวิธีการปั่นแยก

น้ำยางข้น คือ น้ำยางที่มีเนื้อยางแห้ง (dry rubber content: DRC) ไม่ต่ำกว่า 60% การผลิตน้ำยางข้นสามารถทำได้ 4 วิธี คือ (1) วิธีระเหยด้วยน้ำ (evaporation) (2) วิธีทำให้เกิดครีม (creaming) (3) วิธีปั่นแยก (centrifuging) และ (4) วิธีแยกด้วยไฟฟ้า (electrodecantation) ซึ่งวิธีการผลิตน้ำยางข้นที่ใช้ในประเทศไทย คือวิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง (ภาพประกอบที่ 1.1) อาศัยหลักการ คือ น้ำยางธรรมชาติเป็นสารละลายคอลลอยด์ที่ประกอบด้วยส่วนอนุภาคยางแขวนลอยกระจัดกระจายอยู่ในซีรัม และเนื่องจากอนุภาคยางเหล่านี้เบาหรือน้ำซีรัมจึงลอยตัวสู่ผิวหน้าน้ำยาง และมีการเคลื่อนไหวแบบบราวเนียน ซึ่งอัตราเคลื่อนไหวขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดของโลก ดังนั้น การปั่นจะช่วยเพิ่มแรงดึงดูด และเร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาง ซึ่งช่วยแยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากส่วนน้ำซีรัม ในการปั่นแยกน้ำยางสดจะได้ 2 ส่วน คือ น้ำยางข้นและหางน้ำยาง และจะมีการล้างเครื่องปั่นยางทุกๆ 2 หรือ 3 ชั่วโมง เนื่องจากการอุดตันของยางและกากขี้แป้งบริเวณหัวโบว์ของเครื่องปั่นยาง ซึ่งในการล้างแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการล้างนานประมาณ 10-15 นาที (วันชัย แก้วยอด, 2540)



ภาพประกอบที่ 1.1 กระบวนการผลิตน้ำยางชั้น วัตถุประสงค์และทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต  
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2548

จากกระบวนการผลิตน้ำยางชั้นดังภาพประกอบที่ 1.1 สามารถสรุปปริมาณการใช้สารเคมีและน้ำในกระบวนการผลิต/ของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเติมกรดซัลฟูริกในบ่อพักหางน้ำยางเพื่อให้เกิดการจับตัวของเนื้อยางได้ดังแสดงในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ปริมาณการใช้สารเคมี/น้ำ/ของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการจับตัวของเนื้อยางในหางน้ำยาง

รายการ	ปริมาณการใช้/การเกิด(ลิตรต่อตันหางน้ำยาง)
กรดซัลฟูริก	10.42
น้ำเสีย + ชีวม	1,466.67
น้ำใช้	500.00

ที่มา: คัดแปลงจากภาพประกอบที่ 1.1 กรมควบคุมมลพิษ, 2548

หลังจากโรงงานอุตสาหกรรมยางได้ผลิตน้ำยางชั้นและยางสกิมแล้ว จะทำการขายต่อให้กับอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต้องใช้น้ำยางชั้นและยางสกิมเป็นวัตถุดิบ ดังตารางที่ 1.4 โดยกระบวนการที่จะผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางมีหลายแบบ การเลือกวิธีหรือเทคนิคของกระบวนการขึ้นอยู่กับประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต เช่น กระบวนการจุ่มแบบพิมพ์ (dipping process) การผลิตยางฟองน้ำ (foaming process) การหล่อเบ้าพิมพ์ (casting process) และการผลิตยางยัด (threading process) เป็นต้น ตามตารางที่ 1.5 แสดงตัวอย่างสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากน้ำยาง

ความเข้มข้นของน้ำยางที่นำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หรือนำมาใช้ประโยชน์นั้นในบางครั้งจะมีการเจือจางให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์หรือการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การทำ น้ำยางผสมซีเมนต์ เป็นต้น

ตารางที่ 1.4 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากน้ำยางชั้นและยางสกิม

ชนิดของยาง	ลักษณะ	การใช้งาน
น้ำยางชั้น	เป็นของเหลว สามารถเติมสารเคมีเพื่อให้เหนียวและแข็งแรงมากขึ้น โดยไม่ต้องเติมสารเสริมความแข็งแรง (reinforcing filter)	ผลิตภัณฑ์จุ่มแบบ เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย หุ่นสำหรับทารก ผลิตภัณฑ์ตีฟอง เช่น ที่นอน หมอน ตุ๊กตาฟองน้ำ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์หล่อแบบ เช่น ตุ๊กตายาง หุ่นการศึกษา เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เส้นด้ายยัด (latex thread) เช่น ท่อยาง กาวยางน้ำ เป็นต้น



ตารางที่ 1.4 (ต่อ) ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากน้ำยางข้นและยางสгим

ชนิดของยาง	ลักษณะ	การใช้งาน
ยางสгим	เป็นยางสгимในรูปแบบลีดหรือเครพ มีสีหลากหลายขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ถ้าผลิตจากหางน้ำยางใหม่จะได้ยางสгимสีจาง ถ้าผลิตจากหางน้ำยางที่เก่าจะได้ยางสгимสีคล้ำ เนื่องจากยางสгимมีส่วนของ non-rubber สูงจึงสามารถทำให้ง่ายกรรูปได้เร็ว	ใช้ผสมกับยางคุณภาพสูงเพื่อลดต้นทุน เนื่องจากยางสгимมีสีอ่อน (ยางสгимที่คุณภาพดี) สามารถใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางสีจาง หรือ ยางที่ต้องการเติมสี มักใช้ผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพต่ำ เช่น ยางปูพื้น ยางล้อรถเข็น ยางกันกระแทก เป็นต้น

ที่มา: คัดแปลงจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมและDANCED, 2544

ตารางที่ 1.5 ตัวอย่างสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากน้ำยาง

ส่วนผสม สำหรับทำผลิตภัณฑ์โดยวิธีจุ่มแบบพิมพ์	สัดส่วนโดยน้ำหนักแห้ง (phr)		
	ถุงยางอนามัย	ถุงมือแม่บ้าน	ผลิตภัณฑ์ยางหนา โดยใช้แบบพิมพ์รีด
60% น้ำยางธรรมชาติ	100	100	100
20% สารละลายโปแตสเซียมคาปริเลต	0.4	0.8	-
10% สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	0.5	0.5	-
20% Texafor FN 30	-	-	0.5
10% สารละลาย PVME	-	-	1.0
50% ดิสเพิซชั่นกำมะถัน	1.0-1.25	1.25-1.5	1.5
50% ดิสเพิซชั่น ZDEC	0.75	0.75	-
50% ดิสเพิซชั่น ZDBC	0.25	0.25	1.0
50% ดิสเพิซชั่นซิงค์ออกไซด์	1.0	1.25	0.25
50% ดิสเพิซชั่นสารป้องกันออกซิเดชั่น	1.0	1.0	1.0
50% อิมัลชันน้ำมันจากพืช	-	0.5	-
น้ำ	ตามที่ต้องการเพื่อเจือจางส่วนผสม		

PVME = Polyvinyl methyl ether

ZDEC = Zinc diethyl dithiocarbamate

ตารางที่ 1.5 (ต่อ) ตัวอย่างสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากน้ำยาง

ส่วนผสม สำหรับทำยางพองน้ำ	สัดส่วนโดยน้ำหนักแห้ง (phr)
	ยางพองน้ำ
60% น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ	100
20% สารละลายโปแตสเซียมโอลิเอต	1.5
50% คิสเพิสชั้นกำมะถัน	2.0
50% คิสเพิสชั้น ZDBC	1.0
50% คิสเพิสชั้น ZMBT	1.0
50% คิสเพิสชั้นสารป้องกันออกซิเดชั่น เช่น Permanex WSP	1.0
50% คิสเพิสชั้นซิงค์ออกไซด์	50.0
50% สารละลาย Vulcafor EFA (หรือคิสเพิสชั้น DPG)	0.8
50% คิสเพิสชั้น SSF	1.2
ส่วนผสม สำหรับทำสายยางยืด	สัดส่วนโดยน้ำหนักแห้ง (phr)
	สายยางยืด
60 - 69% น้ำยางธรรมชาติ	100
10% สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	0.5 – 1.0
20% สารละลายโปแตสเซียมลอเรต	0.4
50% คิสเพิสชั้นกำมะถัน	1.5
50% คิสเพิสชั้น ZDBC	0.3
50% คิสเพิสชั้น ZMBT	1.5
50% คิสเพิสชั้นสารป้องกันออกซิเดชั่น	1.0
50% คิสเพิสชั้นดีทานีลไดออกไซด์	5.0
50% คิสเพิสชั้นซิงค์ออกไซด์	2.0
ส่วนผสม สำหรับทำกาวแข็งติดของจดหมาย	สัดส่วนโดยน้ำหนักเปียก
	กาวแข็งติดของจดหมาย
60% น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงหรือต่ำ	167
10% สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	2.0
50% คิสเพิสชั้นซิงค์ไดเอทิลไดไทโคาร์บาเมต	1.0

ZDBC = Zinc dibutyl dithiocarbamate

ZMBT = Zinc - 2 - mercaptobenzothiazole

ตารางที่ 1.5 (ต่อ) ตัวอย่างสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากน้ำยาง

ส่วนผสม สำหรับทำกาวติดเร็ว	สัดส่วนโดยน้ำหนักแห้ง (phr)		
	กาวติดเร็ว		
60% น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ	167		
โทลูอิน	3.0-5.0		
50% ดิสเพิสซัน ZDEC	2.0		
ส่วนผสม สำหรับทำกาวติดหนัง	สัดส่วนโดยน้ำหนักแห้ง (phr)		
	กาวหนืดน้อย	กาวหนืดมาก	
60% น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงหรือต่ำ	100	100	
20% สารละลาย Sodium EDTA	2.5	2.5	
สารป้องกันกาวเสื่อม	0.5	1.0	
สารช่วยเพิ่มความหนืด (เช่น 5% สารละลายเมททิลเซลลูโลส)	-	2.0	
ดิสเพิสซันยางสนช่วยเพิ่มความเหนียวติดแน่น	-	10-20	
ส่วนผสม สำหรับทำกาวใช้งานทั่วไป	สัดส่วนโดยน้ำหนักแห้ง (phr)		
	กาวใช้งานทั่วไป		
60% น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงหรือต่ำ	100		
Coal-tar naphtha	10		
Pale ester gum	2.6		
Wood resin	0.46		
Oleic acid	0.32		
Anionic surfactant	0.5		
ส่วนผสม สำหรับทำผลิตภัณฑ์ประเภทหล่อเข้าปูนพลาสติก	สัดส่วนโดยน้ำหนักเปียก		
	ลักษณะผลิตภัณฑ์		
	นิ่ม	ค่อนข้างแข็ง	แข็ง
60% น้ำยางธรรมชาติ	167	167	167
10% casein (สารเพิ่มความเสถียร)	-	-	5.0
50% ดิสเพิสซันกัมอะกัน	2.0	3.0	5.0
50% ดิสเพิสซันซิงค์ออกไซด์	2.0	2.0	10.0
50% ดิสเพิสซัน ZDEC	2.0	2.0	3.0
ไวติง	-	100	300
ดิสเพิสซิงเอเจนท์ เช่น tetrasodium pyrophosphate	-	0.5	1.0
น้ำ	-	30.0	90.0
การวัลคาไนซ์ (องศาเซลเซียส/นาที)	100/30 (ขึ้นกับความหนาเบ้าและผลิตภัณฑ์)		

ตารางที่ 1.5 (ต่อ) ตัวอย่างสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากน้ำยาง

ส่วนผสม สำหรับน้ำยางที่ผสมกับซีเมนต์	สัดส่วนโดยน้ำหนักเปียก	
	น้ำยางที่ผสมกับซีเมนต์	
60% น้ำยางข้น	167	
10% เกซีน	25	
25% Non – Ionic surfactant	20	
น้ำ	38	
ได้น้ำยางที่มีเนื้อยาง 40%		
ส่วนผสม สำหรับทำน้ำยางผสมซีเมนต์	สัดส่วนโดยน้ำหนักเปียก	
	ยางน้อย	ยางมาก
ทราย	300	300
ซีเมนต์	100	100
น้ำ	30	10
40% เนื้อยาง	25	50

EDTA = Ethylene diamine tetra acetic acid

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2549 และ <http://polymer.igetweb.com/php?mo=3&art=4158>

#### 1.2.4 ทางน้ำยาง

ทางน้ำยางเป็นส่วนหนึ่งของเหลวที่มีองค์ประกอบทางธรรมชาติซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเซนตริฟิวจ์น้ำยางสดให้กลายเป็นน้ำยางข้น ทางน้ำยางเป็นของเหลวที่แยกเอาเนื้อยางส่วนใหญ่ ออกแล้วจึงมีส่วนของน้ำในอัตราส่วนที่สูงกว่าเนื้อยางมาก และอนุภาคของเนื้อยางในทางน้ำยางมีขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคยางที่แยกได้ในส่วนของน้ำยางข้น โดยทางน้ำยางมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ คือ (คัดแปลงจาก [http://www2.envi.psu.ac.th/PSU\\_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSE MINAR /latex4.pdf](http://www2.envi.psu.ac.th/PSU_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSE%20MINAR/latex4.pdf))

- ยางที่มีอนุภาคขนาดเล็ก 0.04-0.4 ไมโครเมตร
- น้ำซีรัมมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 g/ml ซึ่งประกอบไปด้วยสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เป็นสารพวกแป้งและน้ำตาล โปรตีนและกรดอะมิโน
- สารเคมีที่เติมในน้ำยางสดเพื่อใช้รักษาสภาพ เช่นแอมโมเนียและสารละลาย dispersion ของ TZ (TMTD+ZnO)

หางน้ำยางซึ่งเป็นวัตถุดิบของการทำยางสกินนั้นปกติจะมีเนื้อยางอยู่ราว 4-8% DRC (Dry Rubber Content) มีสภาพเป็นด่างโดยมีค่า pH  $\approx$  10-11 (<http://phoenix.eng.psu.ac.th/chem/File/polngan/2548/paiboon/Copy%20of%201..pdf>) หางน้ำยางที่ออกจากเครื่องปั่นยางนั้นจะ ใช้การจับเนื้อยางด้วยกรดซัลฟูริก แต่การใช้กรดซัลฟูริกที่มากเกินไปจะทำให้ยางเปื่อยและเสื่อมง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ยางสกินไม่ได้คุณภาพ นอกจากนี้ปริมาณกรดซัลฟูริกที่เดิมมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณแอมโมเนียในหางน้ำยางที่เข้าบ่อจับตัว เนื่องจากถ้าหางน้ำยางมีปริมาณแอมโมเนียสูงจะต้อง ใช้กรดในการจับตัวในปริมาณมาก การไล่แอมโมเนียนั้นมักจะทำสำหรับหางน้ำยางที่มีความ เข้มข้นของแอมโมเนียเกินกว่า 0.2% (สมทิพย์ ด้านธีรวิรัช และคณะ, 2545) เพื่อลดปริมาณการใช้ กรดซัลฟูริกในการจับตัวเพื่อผลิตยางสกิน ส่วนระยะเวลาที่เหมาะสมในการจับตัวของยางสกิน คือ 24 ชั่วโมง ถ้าจำเป็นต้องจับตัวด้วยเวลานี้น้อยกว่านี้จะต้องใช้ปริมาณกรดซัลฟูริกมากขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและDANCED, 2544) ดังตารางที่ 1.6 สรุปข้อดี-ข้อเสียของการใช้ กรดซัลฟูริก

ตารางที่ 1.6 ข้อดี-ข้อเสียของการใช้กรดซัลฟูริกในการจับเนื้อยาง

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ราคาโดยประมาณของกรดซัลฟูริก ~ 4 บาท/กก. 2. ยางจับตัวกันเป็นก้อนทั้งหมด 3. น้ำซีรัมจากการจับตัวมีสภาพเป็นกรด คือ มี pH 4.5 สามารถนำไปผสมน้ำล้างเพื่อทำให้ยาง จับตัว	1. ทำให้ได้ยางสกินที่มีคุณภาพต่ำ 2. เกิดกลิ่นเหม็นจากก๊าซ $H_2S$ 3. น้ำซีรัมที่นำไปผสมน้ำล้างเพื่อทำให้ยางจับตัวต้อง รอเป็นระยะเวลายาวนานเพราะปริมาณยางในน้ำล้าง มีน้อยกว่า 1% ยางที่ได้มีสีคล้ำและคุณภาพต่ำ 4. เกิดปัญหาการกัดกร่อนภายในโรงงาน เนื่องจากไอ ระเหยของกรด

ที่มา: ดัดแปลงจาก [http://www2.envi.psu.ac.th/PSU\\_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSEMINAR/latex4.pdf](http://www2.envi.psu.ac.th/PSU_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSEMINAR/latex4.pdf)

การทำให้อนุภาคยางในหางน้ำยางจับตัวกันนั้น โดยทั่วไปทำได้โดยการเติมสาร ช่วยในการจับตัว (coagulant) เพื่อให้อนุภาคยางจับตัวและแยกออกจากน้ำซีรัม (ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์, 2545) ซึ่งได้แก่

(1) การเติมกรดซัลฟูริก หรือ กรดฟอร์มิก ที่ความเข้มข้นสูง ส่งผลให้ค่า pH ของ หางน้ำยางลดลงมาก และจะมีกรดในน้ำทิ้งซึ่งส่งผลกระทบต่อการบิน (เป็นวิธีที่นิยมใช้กันใน ปัจจุบัน)

(2) การเติม  $\text{CaCl}_2$  หรือ polyamine ลงในหางน้ำยางที่กำลังอัดแอมโมเนียออกแล้ว

(3) การใช้สารลดแรงตึงผิวประเภทเกลือของ quaternary ammonium (cationic surfactant) ซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีผลกับ pH ของหางน้ำยาง สารลดแรงตึงผิว (surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ มีคุณลักษณะที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็น hydrophilic (ชอบน้ำ) และส่วนหางที่เป็น hydrophobic (ไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมัน) หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิว คือ ส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงถึงความเข้มข้นหนึ่ง โมเลกุลภายในเนื้อของของเหลวจะรวมกันเป็นกลุ่ม โดยสารลดแรงตึงผิวแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ละลายน้ำ (hydrophilic) ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (anionic surfactant) ซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูก และใช้ได้ดี, สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (cationic surfactant) จะมีราคาแพงและไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH 10-11), สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและบวก (amphoteric surfactant (zwitterionics)) และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (nonionic surfactant) ([http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp\\_7\\_2548\\_surfactant.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf))

(4) การใช้จุลินทรีย์บางประเภท เช่น แบคทีเรีย (*E. coli*, *A. aerogenes*, *A. cetobactor*) และยีสต์ ซึ่งสามารถทำให้หางน้ำยางจับตัวได้ และมีประโยชน์ในการนำยางสกิมไปใช้ร่วมกับปุ๋ย

(5) การเติมเอนไซม์ในหางน้ำยางเพื่อย่อยสลายโปรตีนที่ผิวของอนุภาคยางและในซีรัม แล้วจึงเติมกรดลงในยางที่ไม่มีโปรตีน ซึ่งจะส่งผลให้ยางจับตัวได้ง่ายขึ้นและสามารถใช้กรดที่เจือจางลงได้

(6) การใช้สารสร้างและรวมตะกอน (coagulant and flocculant) ในการทำให้เนื้อยางในหางน้ำยางจับตัวกันด้วยกระบวนการ coagulation-flocculation โดยการใช้สารกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีชื่อทางการค้าหลากหลาย เช่น การใช้สาร POLYCO พบว่าเนื้อยางในหางน้ำยางจะรวมตัวกันเป็นก้อนแยกตัวออกจากน้ำซีรัมภายในเวลา 3-5 ชั่วโมง ([http://www2.envi.psu.ac.th/PSU\\_ERC/images/stories/PAO/News% 20and%20Events/RUBBERSEMINAR/latex4. pdf](http://www2.envi.psu.ac.th/PSU_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSEMINAR/latex4.pdf)) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วสารพอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (มากกว่า 10 ล้าน โมเลกุล) มีลักษณะเป็นโซ่ยาว อาจมีกิ่งก้านสาขาบ้างแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์จะจับยึดอนุภาคหลายอนุภาคเข้าด้วยกันด้วยแขนโซ่ที่ยาวนั้นคล้ายๆ กับสะพานยึดทำให้เกิดฟล็อกเกาะกันอย่างหลวมๆ ด้วยโครงสร้างสามมิติ โดยไม่ต้องคำนึงว่าอนุภาคมีแรงผลักระหว่างประจุมากน้อยเพียงใด นอกจากนั้นการจับยึดของกลุ่มอนุภาคอ่อนข้างแข็งแรง ขากที่จะแตกหลุดเนื่องจากการถ่ายเท นอกจากบางอนุภาคที่จับยึดกันอย่างหลวมๆ ในส่วนนอกของกลุ่มอนุภาค

เท่านั้น การเกิดฟล็อกโดยการใส่สารพอลิเมอร์นั้นจะได้ฟล็อกที่โตขึ้นอย่างรวดเร็วในระหว่างการกวน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณพอลิเมอร์ที่จับกับอนุภาคแล้วเกิดเป็นฟล็อกขนาดใหญ่จะมีน้อยกว่าเกิดเป็นฟล็อกขนาดเล็ก การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของฟล็อกจะลดโอกาสในการจับของพอลิเมอร์กับผิวของฟล็อกเพราะฟล็อกที่โตขึ้นทำให้พื้นที่ผิวลดลง โดยที่อัตราการจมตัวและขนาดของฟล็อกจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่จะใช้ในกระบวนการรวมตะกอน โดยสามารถแบ่งพอลิเมอร์ได้ 3 ประเภทตามประจุผิว ดังนี้ ประเภทประจุลบ (anionic polymer) ประเภทประจุบวก (cationic polymer) และ ประเภทไร้ประจุ (nonionic polymer) โดยที่พอลิเมอร์ชนิดประจุลบและประจุบวกจะใช้ได้ดีกับอนุภาคที่มีประจุตรงกันข้าม ส่วนพอลิเมอร์ชนิดไร้ประจุจะเกาะกับอนุภาคได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ใช้ได้ดีกับทั้งอนุภาคที่มีประจุบวกและประจุลบ (พงศ์นรินทร์ ปรานนกร, 2543)

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารจับยางในทางน้ำยางชนิดอื่นเพื่อใช้แทนกรดซัลฟูริกความเข้มข้นสูง โดยศึกษาเพื่อเพิ่มความเข้มข้นให้กับทางน้ำยางด้วยกระบวนการ Creaming ซึ่งสารจับยางที่ทำให้เกิดคริมที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความเข้มข้นให้กับทางน้ำยาง เช่น A701 A702 (สิทธิบัตรกลุ่ม NR Life, MTEC, สวทช.) CMC และ Alginate เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า A702 สามารถเพิ่มความเข้มข้นให้กับทางน้ำยางได้จากเดิม 5% เป็น 30% DRC แต่อย่างไรก็ตามในท้ายที่สุดแล้วกระบวนการนี้ยังคงต้องมีการใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่ำในปริมาณน้อย เพื่อทำการจับตัวเนื้อยางที่อยู่ในชั้นคริม ส่วนยางสกิมที่ได้พบว่ามีคุณภาพที่ดีกว่ายางสกิมโดยทั่วไป ([http://www2.envi.psu.ac.th/PSU\\_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSEM INAR/ latex4.pdf](http://www2.envi.psu.ac.th/PSU_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSEM INAR/ latex4.pdf))

ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวเนื้อยางและนำเนื้อยางมารีดเพื่อกำจัดน้ำในเนื้อยางออกแล้ว น้ำเสียจากการแยกเนื้อยาง การล้างบ่อพักทางน้ำยาง และการรีดยาง จะถูกส่งไประบบบำบัดน้ำเสยรวมเพื่อบำบัดต่อไป ซึ่งมักจะมีผลทำให้เกิดปัญหาของกลิ่นเหม็นจากการบำบัดน้ำเสยขึ้น ภายหลัง หากทางโรงงานใช้ระบบการบำบัดประเภทไร้อากาศ ทั้งนี้เพราะซัลเฟตในน้ำเสยจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า:  $H_2S$ ) (สมทิพย์ คำนธีรวณิชย์ และคณะ, 2545)

### 1.2.5 ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น คือ ของเสยในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต (ตารางที่ 1.7) ได้แก่ กากขี้แป้งของยางหลังจากบ่มน้ำยางก่อนปั่นแยก เศษยางที่รวบรวมไว้จำหน่ายซึ่งมักบดเน่าส่งกลิ่นเหม็น กลิ่นสารเคมีรักษาสภาพน้ำยางซึ่งโรงงานน้ำยางข้นส่วนใหญ่มักมีปัญหาเรื่องกลิ่นของแอมโมเนียในโรงงาน และ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า:  $H_2S$ ) จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบปิด ในขณะที่ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากน้ำทิ้งต่างๆในขั้นตอนการผลิต (ภาพประกอบที่ 1.1) รวมถึงน้ำทิ้งของทางน้ำยางที่มีความเข้มข้นกรดซัลฟูริกสูงถูกรวบรวมเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย จึงทำให้ปัญหาน้ำเสียเป็นประเด็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นเป็นอันดับต้นๆของอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นที่ทำให้เกิดมลพิษน้ำในแหล่งน้ำใกล้เคียงที่รับน้ำทิ้งจากโรงงาน โดยแสดงภาพรวมของน้ำเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตน้ำยางชั้นดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.2 และลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น แสดงดังตารางที่ 1.8 (สมทิพย์ คำานธีรวนิชย์ และคณะ, 2545)

ตารางที่ 1.7 ชนิดของเสียและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น

ชนิดของเสีย	ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น
1. น้ำเสีย	40-320 ลบ.ม./วัน หรือ 2.30-9.14 ลบ.ม./ตันน้ำยางชั้น
2. กากของเสียที่เป็นของแข็ง	
- ในรูปเนื้อเยื่อที่ตกค้างในทางระบายน้ำเสีย และภาชนะบรรจุต่างๆ	10-100 ตัน/เดือน
- ในรูป “จีแป็ง”	0.7-500 ตัน/เดือน หรือ 0.6-50 กก.กากจีแป็ง/ตันน้ำยางชั้น

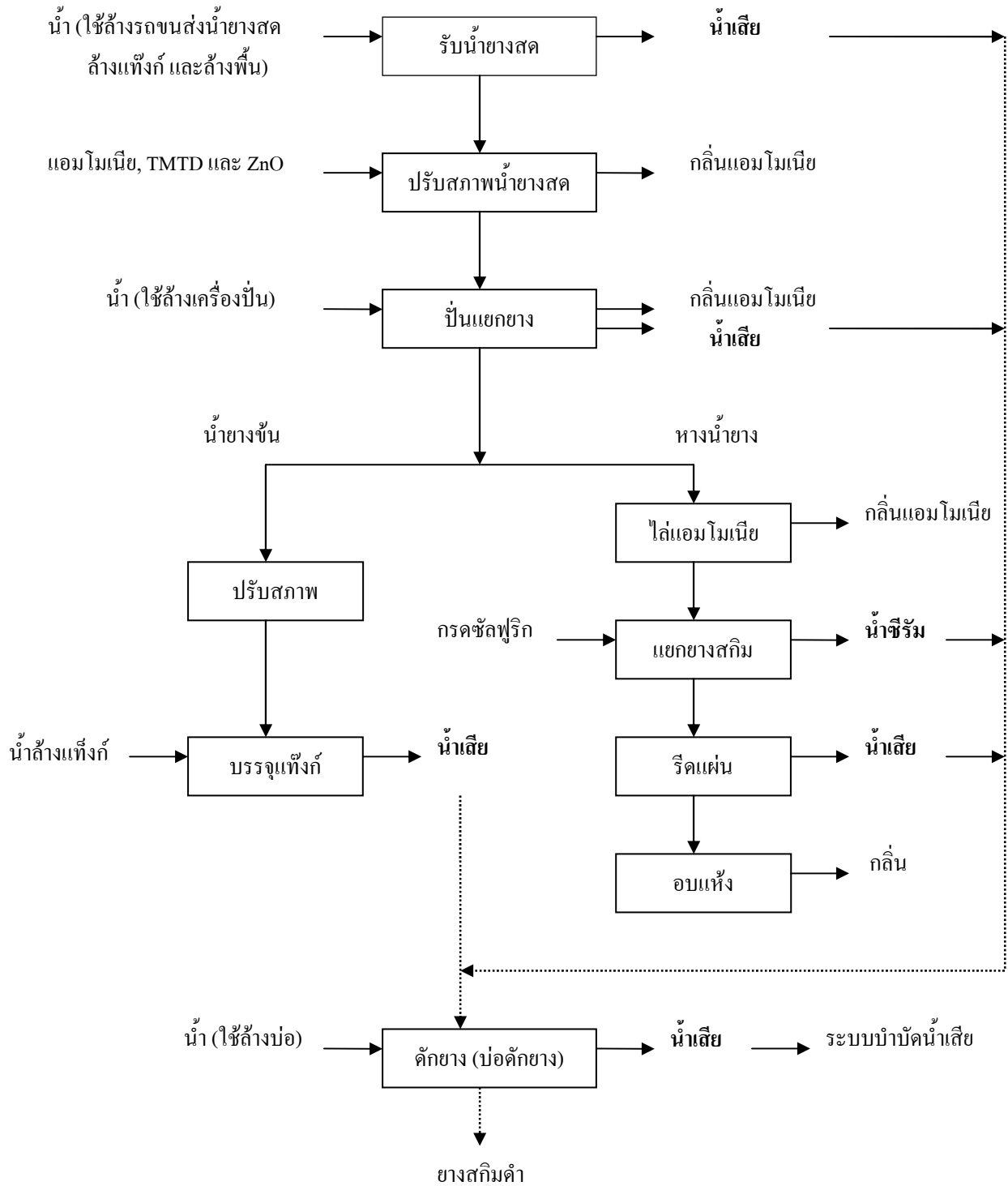
ที่มา: คัดแปลงจาก สมทิพย์ คำานธีรวนิชย์ และคณะ, 2545

ตารางที่ 1.8 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น

ตัวแปรวิเคราะห์	ช่วงที่ศึกษาได้
ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำยางชั้น (ลบ.ม./ตันน้ำยางชั้น)	2.30-9.14
ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตยางสกิม (ลบ.ม./ตันยางสกิม)	4.0-50.0
pH	2.33-7.23
BOD <sub>5</sub> (มก./ล.)	571-13,463
COD (มก./ล.)	672-64,210
SS (มก./ล.)	54-2,300
TKN (มก./ล.)	70-2,290
TP (มก./ล.)	2.2-20.5
SO <sub>2</sub> <sup>-4</sup> (มก./ล.)	51-1,118
Mg (มก./ล.)	4.8-136

ที่มา: คัดแปลงจาก สมทิพย์ คำานธีรวนิชย์ และคณะ, 2545





ภาพประกอบที่ 1.2 น้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตน้ำยางข้น

ที่มา : พัชรภรณ์ จำแก้ว, 2546

โรงงานผลิตน้ำยางข้นส่วนใหญ่มีกระบวนการทำยางสกิมเพื่อดึงเนื้อยางที่ตกค้างในหางน้ำยาง ดังนั้นน้ำเสียจากโรงงานน้ำยางข้นจึงมีแหล่งกำเนิดหลักๆ 2 แหล่งดังนี้ คือ

1. น้ำเสียจากการล้างเครื่องแยกเหวียงและน้ำล้างอื่นๆภายในโรงงาน ประมาณ 1-1.5 ลบ.ม.ต่อตันน้ำยางสด มีค่า pH  $\approx$  6-8

2. น้ำเสียจากกระบวนการผลิตยางสกิม

- น้ำเสียในรูปน้ำซีรัมจากบ่อจับเนื้อยางในหางน้ำยาง ประมาณ 0.5-0.6 ลบ.ม.ต่อตันน้ำยางสด มีค่า pH  $\approx$  2-4

- น้ำเสียจากการล้างและรีดก้อนยางสกิมที่จับตัวได้ ประมาณ 0.3-0.4 ลบ.ม.ต่อตันน้ำยางสด มีค่า pH  $\approx$  2-4

อย่างไรก็ดีแม้จะพบว่าในน้ำเสียที่ไหลรวมกันก่อนจะเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียจะถูกนำมารวมกันเพื่อทำการเก็บเกี่ยวหรือคัดเนื้อยางส่วนที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียออกอีกครั้งหนึ่งเป็นขั้นสุดท้ายก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งทุกโรงงานพยายามที่จะทำการเก็บเกี่ยวเนื้อยางออกจากน้ำเสียให้ได้มากที่สุด โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีที่นำมาใช้ คือ บ่อดักยาง (rubber trap) เพราะบ่อดักยางที่มีขีดความสามารถในการกักเก็บน้ำเสียที่คือนั้นควรมีระยะพักน้ำเสียประมาณ 16-24 ชั่วโมง ทำให้สามารถลดการะบรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพได้อย่างน้อย 40% (พัชราภรณ์ จำแก้ว, 2546) การดักยางเป็นการดักจับเนื้อยางที่ปะปนมากับน้ำเสียจากกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การตกค้างในบ่อรับน้ำยางสด เครื่องปั่นยาง และบ่อเก็บน้ำยางข้น ซึ่งยางที่ได้จะสามารถนำไปขายในราคาที่ดี เนื่องจากมีคุณภาพไม่ดี (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

ดังนั้นพอสรุประบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมน้ำยางข้นในภาคใต้ที่นิยมใช้กันทั่วไปได้เป็น 3 รูปแบบคือ

1. แบบที่มีการใช้ระบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond) โดยมีบ่อไร้อากาศ บ่อมีอากาศ-ไร้อากาศ และบ่อมีอากาศ

2. กลุ่มที่มีการใช้ระบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond) ร่วมกับบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon)

3. กลุ่มที่มีการใช้ระบบบำบัดที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น ซึ่งได้แก่ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) หรือปฏิกรณ์ชั้นสลัดจ์แอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น UASB (upflow anaerobic sludge blanket) หรือ การใช้วิธีการประยุกต์ใช้ดิน (land application) (สมทิพย์ คำนธีรวนิษฐ์ และคณะ, 2545)

ในกระบวนการผลิตน้ำยางข้นนั้นต้องใช้น้ำปริมาณสูงในการล้างยางและทำความสะอาดเครื่องจักร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดด้วยวิธีการที่เหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งถ้าระบบไม่มีประสิทธิภาพก็จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่รุนแรงรวมทั้งก่อความ

เครื่องร้อนให้แก่ชุมชน การบำบัดน้ำเสียโรงงานยางเพื่อรักษาสภาพแวดล้อมอาจบำบัดด้วยระบบต่างๆกัน โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆของน้ำเสียที่จะต้องได้รับการบำบัด ประสิทธิภาพการบำบัดในรูปแบบต่างๆของระบบ ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำยางขึ้นมากกว่า 95% เป็นระบบบ่อธรรมชาติเริ่มต้นระบบด้วยบ่อไร้อากาศหลายบ่อ ด้วยเหตุผลที่ว่าสามารถรับภาระความสกปรกสูงๆได้ ใช้พลังงานน้อย ลดค่าบีโอดีได้ประมาณ 60-80% ซึ่งในขั้นตอนนี้จะช่วยลดภาระของระบบบ่อเติมอากาศที่เป็นบ่อหลังๆทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดลดลง (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2540) อย่างไรก็ตามบ่อไร้อากาศมีข้อจำกัดคือ เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นจากแบคทีเรียประเภทไม่ใช้อากาศย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจนที่มีอยู่ในสารประกอบ เช่น ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ทำให้สารอินทรีย์สลายตัวให้พลังงานและสารประกอบที่มีกลิ่นเหม็นรบกวนเช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) เป็นต้น

ค่าใช้จ่ายของโรงงานน้ำยางขึ้นเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียพบว่ามีค่าใช้จ่ายระหว่าง 15,300-173,500 บาทต่อเดือน (กำลังผลิตอยู่ในช่วง 2-300 ตันผลผลิตต่อวัน) โดยเป็นค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี ค่าแรงงาน ค่าซ่อมบำรุง ค่าตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ค่าไฟฟ้าและค่าที่ปรึกษา เมื่อวิเคราะห์โดยภาพรวมของโรงงานน้ำยางขึ้นในภาคใต้อาจกล่าวได้ว่า โรงงานน้ำยางขึ้นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียทางด้านค่าไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นหากมีการนำเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (clean technology) เข้ามามีส่วนร่วมในกระบวนการผลิตก็จะสามารถช่วยลดปริมาณน้ำเสียที่จะเกิดขึ้นและนำไปสู่การลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียได้ (สมทิพย์ ด้านธีรวิชัย และคณะ, 2545)

เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (clean technology : CT) คือ การลดของเสียที่แหล่งกำเนิด โดยมีการใช้ซ้ำและรีไซเคิล เพื่อลดหรือกำจัดการเกิดของเสีย โดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้วัตถุดิบ พลังงาน น้ำ หรือทรัพยากรอื่นๆ หรือการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ โดยหลักการของเทคโนโลยีสะอาดจะเน้นการป้องกันและลดมลพิษตั้งแต่ต้นทางการผลิต ส่วนถ้ามีมลพิษหรือของเสียเกิดขึ้นจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ใช้ซ้ำได้หรือไม่ ท้ายที่สุดจึงนำไปบำบัดหรือทิ้งทำลายอย่างถูกต้องต่อไป

กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ให้ความสำคัญต่อปัญหามลภาวะของโรงงานน้ำยางขึ้น และได้มีนโยบายการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดเพื่อเป็นหลักปฏิบัติสำหรับการป้องกันมลพิษและได้กำหนดเกณฑ์ป้องกันมลพิษในอุตสาหกรรมน้ำยางขึ้นขึ้น 6 ประเภท (กรมโรงงานอุตสาหกรรม และDANCED, 2544) คือ

(1) การสูญเสียเนื้อยาง กำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 5 ของเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด โดยทำการศึกษาเก็บข้อมูลโรงงานน้ำยางขึ้น 10 โรงงาน คำนวณต้นทุนของการสูญเสียที่ราคาซื้อขายน้ำยางสดที่เนื้อยางแห้งกิโลกรัมละ 19.50 บาท กรณีศึกษาหากโรงงานสามารถลดการ

สูญเสียเนื้อยางจากร้อยละ 8.9 เป็นร้อยละ 5 จะทำให้สามารถมีรายได้เพิ่ม 54.60 บาทต่อน้ำยางสด 100 กิโลกรัมเนื้อยางแห้ง ถ้าโรงงานผลิตน้ำยางชั้น 10,000 ตันต่อปี จะใช้น้ำยางสดประมาณ 6,000 ตันเนื้อยางแห้งต่อปี โรงงานก็จะมียาได้เพิ่ม 3,276,000 บาทต่อปี

(2) การใช้แอมโมเนีย โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- การผลิตน้ำยางชั้นประเภท HA (high ammonia) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20 กิโลกรัม/ตันน้ำยางชั้น (ข้อมูลโรงงานน้ำยางชั้น 9 โรงงาน) จำนวนต้นทุนของแอมโมเนียที่ราคาแอมโมเนียกิโลกรัมละ 18.00 บาท กรณีศึกษาหากโรงงานสามารถลดการใช้แอมโมเนียลงจาก 25.3 เป็น 20 กิโลกรัมต่อตันน้ำยางชั้น จะทำให้สามารถลดต้นทุนค่าแอมโมเนียลงได้ถึง 95.40 บาทต่อตันน้ำยางชั้น ถ้าโรงงานผลิตน้ำยางชั้น 10,000 ตันต่อปี โรงงานจะประหยัดค่าใช้จ่ายถึง 954,000 บาทต่อปี

- การผลิตน้ำยางชั้นประเภท LA (low ammonia) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 14 กิโลกรัมต่อตันน้ำยางชั้น (ข้อมูลโรงงานน้ำยางชั้น 6 โรงงาน) จำนวนต้นทุนของแอมโมเนียที่ราคาแอมโมเนียกิโลกรัมละ 18.00 บาท กรณีศึกษาหากโรงงานสามารถลดการใช้แอมโมเนียลงจาก 18.8 เป็น 14 กิโลกรัมต่อตันน้ำยางชั้น จะทำให้สามารถลดต้นทุนค่าแอมโมเนียลงได้ถึง 86.40 บาทต่อตันน้ำยางชั้น ถ้าโรงงานผลิตน้ำยางชั้น 10,000 ตันต่อปี โรงงานจะประหยัดค่าใช้จ่ายถึง 864,000 บาทต่อปี

(3) การใช้น้ำ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำยางชั้น โดยทำการศึกษากับข้อมูลโรงงานน้ำยางชั้น 17 โรงงานพบว่า มี 14 โรงงานที่มีมาตรวัดน้ำที่ใช้ในการผลิต จำนวนต้นทุนของน้ำที่ใช้ที่ราคาลูกบาศก์เมตรละ 3.50 บาท กรณีศึกษาหากโรงงานสามารถลดการใช้น้ำลงจาก 15.8 เป็น 5.0 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำยางชั้น จะทำให้สามารถลดต้นทุนค่าน้ำลงได้ถึง 37.80 บาทต่อตันน้ำยางชั้น ถ้าโรงงานผลิตน้ำยางชั้น 10,000 ตันต่อปี โรงงานจะประหยัดค่าใช้จ่ายถึง 378,000 บาทต่อปี

(4) การใช้ DAP (diammonium hydrogen phosphate) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2.20 กิโลกรัมต่อตันน้ำยางชั้น โดยทำการศึกษากับข้อมูลโรงงานน้ำยางชั้น 15 โรงงาน จำนวนต้นทุนของ DAP ที่ราคา กิโลกรัมละ 30 บาท กรณีศึกษาหากโรงงานสามารถลดการใช้ DAP ลงจาก 4.20 เป็น 2.20 กิโลกรัมต่อตันน้ำยางชั้น จะทำให้สามารถลดต้นทุนค่า DAP ลงได้ถึง 60 บาทต่อตันน้ำยางชั้น ถ้าโรงงานผลิตน้ำยางชั้น 10,000 ตันต่อปี โรงงานจะประหยัดค่าใช้จ่ายถึง 600,000 บาทต่อปี

(5) การใช้ไฟฟ้า กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 90 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันน้ำยางชั้น โดยทำการศึกษากับข้อมูลโรงงานน้ำยางชั้น 10 โรงงาน จำนวนต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ราคา กิโลวัตต์ชั่วโมงละ 2.20 บาท กรณีศึกษาหากโรงงานสามารถลดการใช้ไฟฟ้าลงจาก 150.0 เป็น 90.0 กิโลวัตต์

ชั่วโมงต่อตันน้ำยางชั้น จะทำให้สามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าลงได้ถึง 132 บาทต่อตันน้ำยางชั้น ถ้าโรงงานผลิตน้ำยางชั้น 10,000 ตันต่อปี โรงงานจะประหยัดค่าใช้จ่ายถึง 1,320,000 บาทต่อปี

(6) การใช้กรดซัลฟูริก กำหนดให้มีความเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตันเนื้อยางแห้งในทางน้ำยาง โดยทำการศึกษาเก็บข้อมูลโรงงานน้ำยางชั้น 11 โรงงาน จำนวนต้นทุนของกรดซัลฟูริกที่ราคากิโลกรัมละ 2.00 บาท กรณีศึกษาหากโรงงานสามารถลดการใช้กรดซัลฟูริกลงจาก 367 เป็น 200 กิโลกรัมต่อตันเนื้อยางแห้งในทางน้ำยาง จะทำให้สามารถลดต้นทุนค่ากรดซัลฟูริกลงได้ถึง 334 บาทต่อตันเนื้อยางแห้งในทางน้ำยาง ถ้าโรงงานผลิตน้ำยางชั้น 10,000 ตันต่อปี โรงงานจะประหยัดค่าใช้จ่ายถึง 150,300 บาทต่อปี

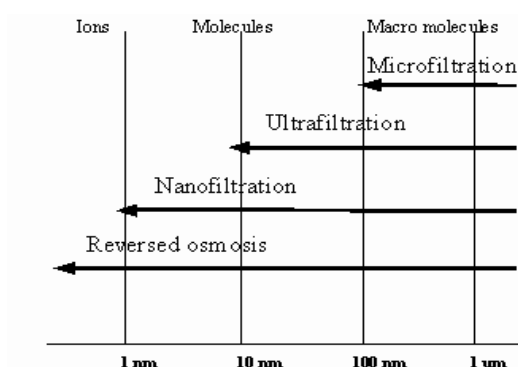
ดังนั้นในปัจจุบันนี้โรงงานก็จะประหยัดค่าใช้จ่ายและมีรายได้ต่อปีในส่วนของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี การใช้น้ำ และการใช้ไฟฟ้า เมื่อดำเนินการตามหลักเทคโนโลยีสะอาด โดยมีเงินที่ประหยัดได้เพิ่มขึ้นจากเดิมเนื่องจากราคาน้ำยางสดที่รับซื้อเพิ่มขึ้นจากเมื่อปี พ.ศ. 2544 ได้มีการปรับตัวขึ้นจาก 19.50 เป็น 65.00 บาทต่อกิโลกรัมเนื้อยางแห้ง (<http://www.rubber.co.th/menu5.php>) ในปีพ.ศ. 2552

จากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำยางชั้นแบบต่างๆ ไปรวมถึงหลักปฏิบัติของเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดที่แนะนำสำหรับอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น นอกจากนี้ภายใต้หลักเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดมีความเป็นไปได้ในการนำหลักเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดในส่วนของกระบวนการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตทางเลือกมาปรับใช้ เพื่อทำการเก็บเกี่ยวเนื้อยางให้ได้มากที่สุดและเป็นการลดของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นมีความเป็นไปได้ 2 แนวทางคือ แนวทางแรกเป็นการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางชั้นโดยใช้กระบวนการอื่นที่สามารถลดสารเคมีที่ใช้ น้ำที่ออกมาไม่ใช่ น้ำเสียแต่เป็นน้ำซีรัมที่บริสุทธิ์ที่อุดมไปด้วยสารอาหารหลายประเภทด้วยกัน เช่น สารประเภทคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและน้ำตาล ซึ่งสามารถนำน้ำซีรัมกลับมาใช้ประโยชน์หรือเพิ่มมูลค่าได้ ส่วนแนวทางที่สองเป็นการปรับเปลี่ยนกระบวนการในการจัดการเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยวเนื้อยางในทางน้ำยางแทนการใช้กรดซัลฟูริกแบบต่างๆ ไป ซึ่งแนวทางที่สองนี้เป็นไปในกรณีที่โรงงานยังไม่พร้อมที่จะปรับเปลี่ยนใช้กระบวนการผลิตในแนวทางที่หนึ่ง แทนที่กระบวนการเดิมในการเก็บเกี่ยวเนื้อยางในทางน้ำยาง เพื่อลดการใช้สารเคมีในบางส่วน ลดน้ำเสียที่เกิดขึ้น และมีการนำเอา น้ำซีรัมในส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้ทั้งนั้นแล้วในปัจจุบันนี้กระบวนการทางเลือกที่คาดว่าจะนำมาใช้แทนกระบวนการแบบเดิมก็คือการแยกเนื้อยางออกจากทางน้ำยางด้วยเทคโนโลยีเมมเบรน ซึ่งเทคโนโลยีเมมเบรนเป็นเทคโนโลยีที่มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางและแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร-เครื่องดื่ม อุตสาหกรรมยา และเวชภัณฑ์ และอุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น

## 1.2.6 เทคโนโลยีเมมเบรน

### 1.2.6.1 ภาพรวมการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนสำหรับการแยก

กระบวนการแยกโดยเทคโนโลยีเมมเบรนแบบใช้แรงดันขับ (pressure driven membrane process) แบ่งระดับตามขีดความสามารถในการแยกของขนาดของรูเมมเบรนที่คัดแยกอนุภาค โมเลกุล อีออนต่างๆ ในของเหลว (จากหยาบไปละเอียด ดังภาพประกอบที่ 1.3) แบ่งได้ 4 ระดับ คือ ระดับไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) และรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis) (Howell, 2004)



ภาพประกอบที่ 1.3 แสดงระดับของเทคโนโลยีเมมเบรน

ที่มา: [www.lenntech.com/membrane-technology.htm](http://www.lenntech.com/membrane-technology.htm)

มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในยุคแรกและต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมการผลิตหลักๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร-เครื่องดื่ม (เบียร์ ไวน์ นม น้ำผลไม้) เพื่อแยกองค์ประกอบ เช่น โปรตีน เอนไซม์-แลคโตส ฟรุกโตส ไขมัน แร่ธาตุ วิตามินต่างๆ ซึ่งเป็นการที่ไม่ใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนต่ำ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ปลอดภัยในขณะแยก และทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพเหมือนหรือใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เริ่มต้น ในขณะที่การใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมโลหะ มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกน้ำมัน แยกสารเคมี ตัวเติม-ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะ และอื่นๆ และ/หรือนำกลับคืนสิ่งที่มีมูลค่า เช่น เอนไซม์ โปรตีน น้ำตาล วิตามิน น้ำมัน อีออนโลหะในรูปออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับคอลลอยด์ ที่เหลือค้างกลับออกมาจากน้ำหรือสารป้อน เป็นต้น (Baker, 2000) นอกจากนี้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการแยกผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ ค่ากรดต่าง ตัวทำละลาย แรงกระทำต่างๆ เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตยา (ใช้เพื่อแยกองค์ประกอบทางเคมี ด้วยยาสำคัญที่มีราคาแพง สารปฏิชีวนะ วิตามินต่างๆ ที่มีความเข้มข้นในระดับต่ำ) รวมถึงใช้ในการทำให้บริสุทธิ์ และนำกลับคืนผลิตภัณฑ์ซึ่งกระบวนการแบบ

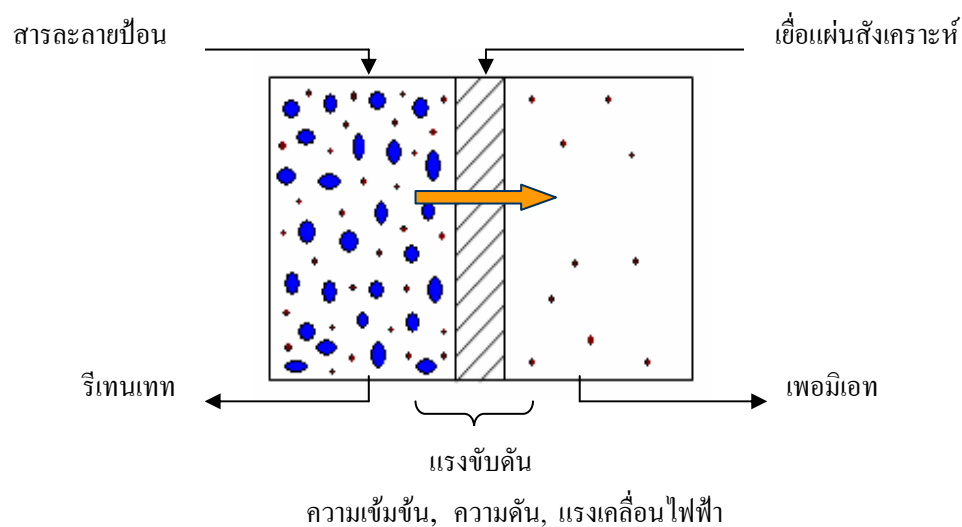
ทั่วไปนั้นเสียค่าใช้จ่ายสูง โดยเฉพาะในแง่ของพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการ นอกจากนี้การขยายตัวของการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีเมมเบรนด้านอื่นๆนั้น พบว่ามีการใช้ในสาขากระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ และเทคโนโลยีชีวภาพทางการแพทย์ เช่น การใช้แยกเซลล์ การใช้ฟอกเลือดให้บริสุทธิ์ การเข้าร่วมในถังหมักกระบวนการชีวภาพ เป็นต้น (Howell, *et al.*, 1993 and Wang, 2001)

ลักษณะการใช้งานเทคโนโลยีเมมเบรนในกระบวนการแยกสามารถสรุปได้ 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ การแยกตัวทำละลายออกจากตัวถูกละลาย (solvent-solute separation) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง การทำให้ผลิตภัณฑ์ใส (การแยกของแข็งแขวนลอยอนุภาคระดับคอลลอยด์ เชื้อโรคปนเปื้อน ออกจากโปรตีน และ/หรือเอนไซม์ เป็นต้น) การทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้น และการแยกตัวถูกละลายออกจากตัวถูกละลาย (solute-solute separation) เพื่อแยกของผสมที่มีขนาดโมเลกุลระดับไมโครและนาโน ทั้งนี้ในการแยกตัวทำละลายออกจากตัวถูกละลาย กล่าวได้ว่าเป็นขั้นตอนสำคัญในช่วงท้ายของกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม (downstream processing) และเป็นเทคโนโลยีที่น่าจะเหมาะสมสำหรับการใช้งานแยกหลายชนิด เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่มีความแตกต่างกันของขนาด-มวลโมเลกุล เช่น การแยก PEG, BSA,  $\alpha$ -lactalbumin และ lysozyme (Cheryan, 1998) โดยสามารถจัดวางรูปแบบของระดับการใช้งานร่วมกับขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิตช่วงตอนต้นและตอนท้ายของกระบวนการนั้น ทำให้มีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับเปลี่ยนใช้งานได้แบบระบบเดี่ยว (single process) หรือใช้งานแบบหลายระดับร่วมกัน (multi series process) หรือใช้งานร่วมกับหน่วยกระบวนการทางกายภาพ และเคมีแบบอื่นๆ ที่สามารถจัดวางรูปแบบและลำดับการแยกระดับต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการของแต่ละอุตสาหกรรม ขณะเดียวกันก็สามารถขยายสเกลเพื่อรองรับกำลังการใช้งานที่อาจจะเพิ่มขึ้นในอนาคตได้ (Durham, *et al.*, 2001) โดยต้องพิจารณาเลือกรูปแบบของกระบวนการ และชนิด-สมบัติของเมมเบรน (ประเภทชอบน้ำ-hydrophilic membrane, ประเภทไม่ชอบน้ำ-hydrophobic membrane, ประเภทมีประจุ และประเภทไม่มีประจุที่ผิว เป็นต้น) ให้เหมาะสมกับสิ่งที่ต้องการแยกออกจากสารปนเปื้อน

ในส่วนของการออกแบบและเดินระบบเมมเบรน ต้องพิจารณาเรื่องการเลือกใช้วัสดุเมมเบรน (พอลิเมอร์, เซรามิกส์) รูปร่างชุดเมมเบรน (แบบท่อกลวง, แบบเส้นใย, แบบแผ่นเฟรม, แบบม้วน) รูปแบบการเดินระบบ (แบบปิดตาย dead-end filtration และ แบบไหลขวาง cross-flow filtration) และรูปแบบการกรอง (inside to outside และ outside to inside) ซึ่งต้องพิจารณาและเลือกให้มีความสอดคล้องกับลักษณะ และสมบัติน้ำปนเปื้อนและ/หรือสารที่ต้องการแยก และอยู่ภายใต้หลักของเทคโนโลยีที่มีความคุ้มค่าและเกิดประสิทธิผลสูง (eco-technology and optimisation) คือ สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งปัจจุบันนี้มีการพัฒนาจนเกิดจุดคุ้มทุนทั้งในเรื่องของ พลังงาน ค่าต้นทุนของเมมเบรน (Howell, *et al.*, 1993; Mulder, 1991; and Jones and Ó Melia, 2000)

### 1.2.6.2 ทฤษฎีการแยกภายใต้แรงดันขับ

การแยกโดยใช้เมมเบรนเป็นกระบวนการที่แยกสารที่ทำให้สารมีความบริสุทธิ์หรือทำให้สารเข้มข้นขึ้น โดยใช้เมมเบรนซึ่งมีคุณสมบัติในการเลือกผ่าน กระบวนการแยกสารด้วยเมมเบรนเกิดขึ้นโดยอาศัยแรงขับ (driving force) ซึ่งแรงขับที่ใช้ อาจเป็นความแตกต่างของความดัน ความเข้มข้น หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.4 และตารางที่ 1.9 เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 1.4 หลักการของกระบวนการแยกโดยเมมเบรน

ที่มา: ดัดแปลงจาก เชิดชัย ตั้งอมรสฤษดิ์, 2537

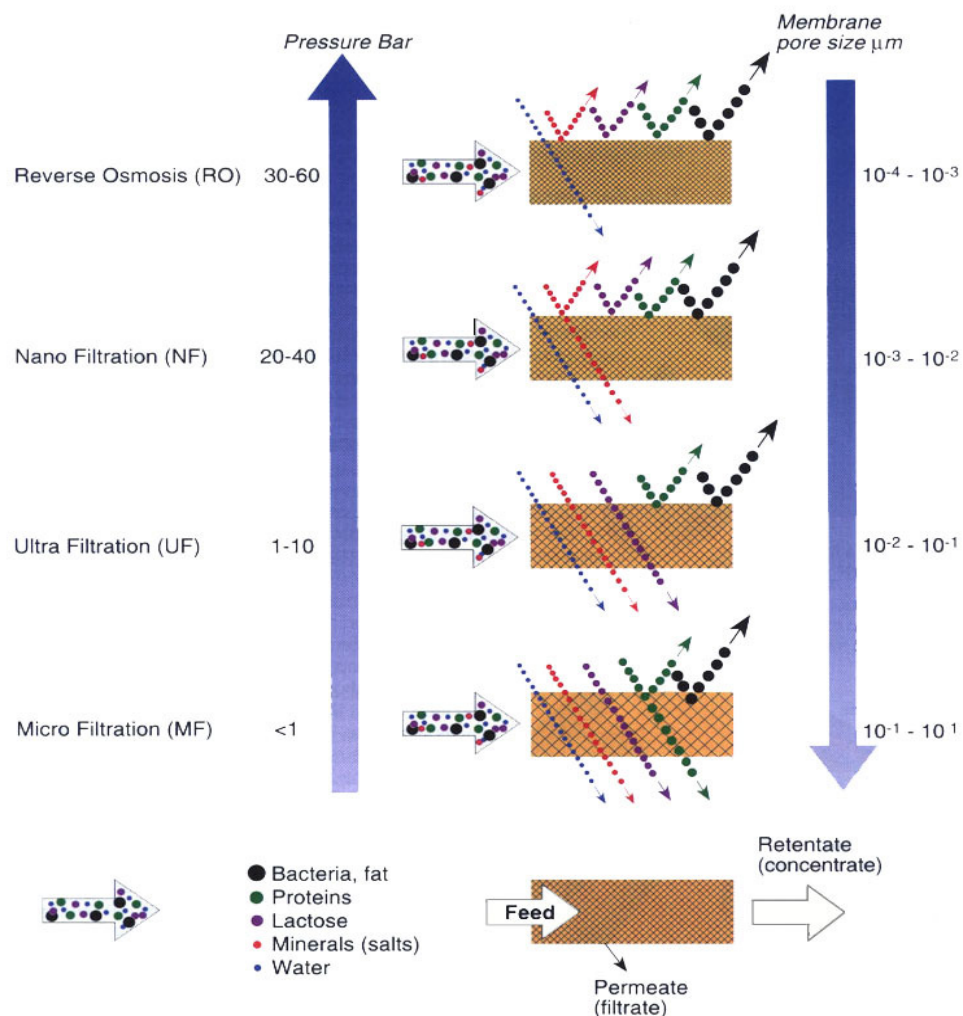
หลักการของกระบวนการเมมเบรนที่ใช้ความดันเป็นแรงดันขับ (RO, NF, UF และ MF ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.5) คือสารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กจะผ่านเมมเบรนโดยอาศัยแรงดันขับเคลื่อนสารเนื่องจากผลต่างของความดันระหว่างเมมเบรน (transmembrane pressure, TMP) ส่วนตัวถูกละลายหรืออนุภาคขนาดใหญ่จะถูกกักไว้ที่ผิวหน้าเมมเบรน ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้เรียกส่วนนี้ว่า รีเทนเนท (retentate) หรือ สารละลายเข้มข้น (concentrate) ส่วนตัวทำละลายและตัวถูกละลายบางส่วนที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่า เพอมีเอท (permeate) ส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นรีเทนเนท หรือเพอมีเอท หรือทั้งสองส่วนขึ้นอยู่กับความต้องการ (ฐปนีย์ ฤทธิไพโรจน์, 2548) นอกจากความดันแล้วปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ความเร็วของการไหล และอุณหภูมิ ซึ่งจะมีผลต่อฟลักซ์ของเพอมีเอท (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)



ตารางที่ 1.9 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

กระบวนการ	แรงขับ	สารที่ผ่าน	สารที่ถูกกักกัน
ออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis)	$\Delta P$ ผลต่างความดัน 1-10 MPa	ตัวทำละลาย (น้ำ)	- สารที่ละลายน้ำ - สารแขวนลอย
นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration)	$\Delta P$ ผลต่างความดัน 1-2 MPa	น้ำ ไอออนประจุเดียว ผ่านได้บ้าง	- สารที่น้ำหนักโมเลกุล > 200 - สารโมเลกุลใหญ่ - คอลลอยด์
อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration)	$\Delta P$ ผลต่างความดัน 100-800 kPa	น้ำและสารโมเลกุลเล็ก (น้ำหนักโมเลกุล < 1,000)	- สารโมเลกุลใหญ่ - คอลลอยด์
ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration)	$\Delta P$ ผลต่างความดัน 100-150 kPa	น้ำและ โมเลกุลที่ละลายน้ำได้	- สารแขวนลอยและอนุภาค เล็กๆ - คอลลอยด์บางชนิด
การแยกก๊าซ gas permeation หรือ gas diffusion	$\Delta P$ ผลต่างความดัน $\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	ก๊าซหรือไอ ที่ผ่านเมมเบรน	ก๊าซหรือไอที่ไม่ผ่าน เมมเบรน
เพอเวปพอเรชัน pervaporation	$\Delta P$ ผลต่างความดัน $\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	น้ำหรือสารอินทรีย์ (ขึ้นกับชนิดเมมเบรน)	ขึ้นกับชนิดเมมเบรน
liquid membrane	$\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	ไอออนบวก/ลบ หรือ สารโมเลกุลเล็ก	ไม่สามารถระบุได้ทั่วไป
ไดอะไลซิส (dialysis)	$\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	ตัวถูกละลายที่เป็น ไอออน, โมเลกุลเล็ก	- สารที่ละลายน้ำได้ - สารแขวนลอยที่มีน้ำหนัก โมเลกุลสูงกว่า 1,000
อิเล็กโตรไดอะไลซิส (electrodialysis)	$\Delta V$ ความต่างศักย์ 1-2 V/cell pair	ไอออนบวก หรือ ลบ	- สารที่ไม่ใช่ไอออน - สารโมเลกุลใหญ่
membrane distillation	$\Delta P_i$ ผลต่างความดันไอ	สารที่ระเหยง่าย ส่วนมากเป็นน้ำ	ตัวถูกละลายที่ไม่สามารถ กลายเป็นไอ

ที่มา: ดัดแปลงจาก รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543



ภาพประกอบที่ 1.5 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนโดยใช้ความดันเป็นแรงขับ  
ที่มา: [www.egr.msu.edu/~steffe/handbook/fig643.html](http://www.egr.msu.edu/~steffe/handbook/fig643.html)

### 1.2.6.3 รูปแบบการเดินระบบกรอง (mode of filtration)

กระบวนการเมมเบรนสามารถแบ่งกระบวนการกรองตามรูปแบบการเดินระบบกรองและทิศทางการไหลของสารป้อนเป็น 2 รูปแบบคือ

#### (1) การกรองแบบปิดตายหรือการกรองแบบตายตัว (dead-end filtration)

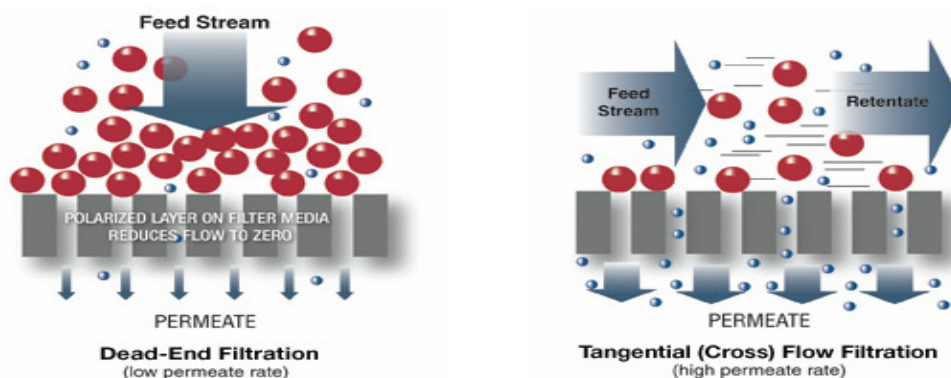
การกรองแบบปิดตาย เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน ดังภาพประกอบที่ 1.6 ซึ่งทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรน ที่เรียกว่า เค้ก (cake) ซึ่งการสะสมของเค้กทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น หรือทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว จนทำให้ต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดชั้นเค้กที่เกิดขึ้น ดังนั้นการกรองแบบ dead-end จึงมีการแนะนำไว้ว่า

ควรใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และมีความเข้มข้นต่ำ และดำเนินการกรองแบบกะ หรือทีละเท (batch operation)

## (2) การกรองแบบไหลขวาง (cross-flow filtration)

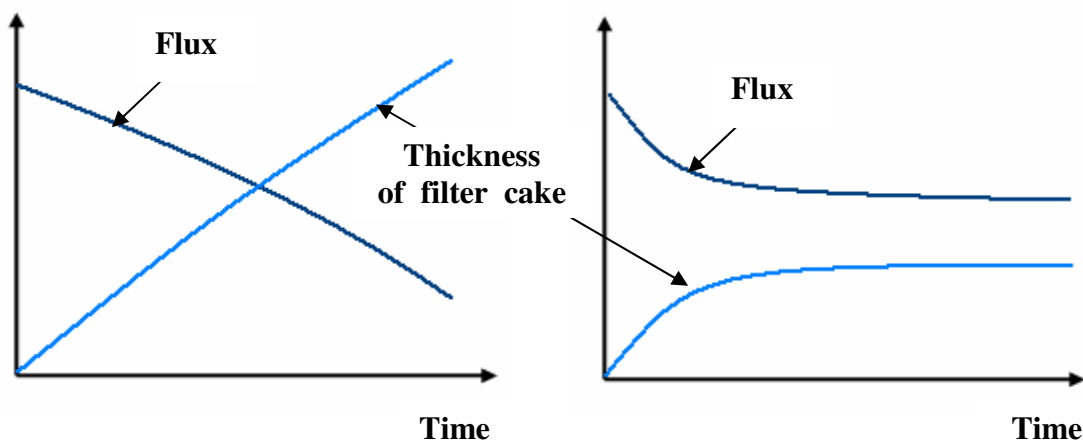
การกรองแบบไหลขวาง เป็นการป้อนสารละลายขนานกับเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมีเอท ซึ่งเรียกว่า cross-flow หรือ tangential flow ดังภาพประกอบที่ 1.6 ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ นาโนฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน โดยการป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีผลของแรงเฉือน ทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้า เมมเบรน ดังนั้นการกรองในรูปแบบไหลขวางซึ่งช่วยลดการเกิด concentration polarization (CP) บริเวณผิวหน้าเมมเบรน ดังนั้นจึงมีการสะสมของเค้กเพียงบางๆ เท่านั้น จึงพบว่าการลดลงของฟลักซ์ไม่มากเท่าที่พบในรูปแบบการกรองแบบ dead-end (ภาพประกอบที่ 1.7) จึงเหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน จึงได้รับความนิยมและพบมากในไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่ (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543)

สภาวะการเดินระบบในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายเช่น ประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมประเภทอาหาร-เครื่องดื่ม การผลิตน้ำดื่ม และการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่แล้วนิยมประยุกต์ใช้งานในการผลิตน้ำผลไม้พร้อมดื่ม โดยค่าความเร็วไหลขวาง (cross-flow velocity) ในการเดินระบบมีค่าประมาณ 1-5 m/s ดังแสดงในตารางที่ 1.10



ภาพประกอบที่ 1.6 รูปแบบการเดินระบบกรองแบบปิดตายและแบบไหลขวาง

ที่มา: [www.spectrapor.com/filtration/Edge.html](http://www.spectrapor.com/filtration/Edge.html)



(ก)

การกรองแบบปิดตาย

(ข)

การกรองแบบไหลขวาง

ภาพประกอบที่ 1.7 การลดลงของฟลักซ์และการเพิ่มขึ้นของฟาวลิ่ง เนื่องจากความหนาของชั้นเค้กสะสม:

(ก) ลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อกรองแบบปิดตายหรือตายตัว

(ข) ลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อกรองแบบไหลขวาง

ที่มา: คัดแปลงจาก Rearick, *et al.*, 1995 อ้างโดย ชาลิต รัตนธรรมสกุล และคณะ, 2548

ตารางที่ 1.10 การใช้งานและสภาวะการเดินระบบในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง: ประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	สมรรถนะ/ประสิทธิภาพ	
Skim milk	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.22 $\mu$ m	6.9	190	จากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ในการเตรียม native phosphocaseinate โดยใช้กระบวนการ cross-flow microfiltration แบบทั่วไป เนื่องจากกระบวนการนี้ทำให้ความเข้มข้นของหางนม ประกอบไปด้วยโปรตีนทั้งหมด 79% และมีอัตราส่วนระหว่าง casein nitrogen ต่อ total protein nitrogen มากกว่า 0.91 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยมาก่อน แม้ว่าเงื่อนไขในการกรองจะแตกต่างกัน	Pouliot, <i>et al.</i> , 1996
River water	cellulose acetate MCWO 150,000 polyethersulfone MCWO 30,000 hollow fiber membrane ultrafiltration	0.16	50	จากการศึกษาพบว่าภายใต้สภาวะการเดินระบบเดียวกันฟลักซ์สำหรับเมมเบรนที่ผลิตจาก cellulose acetate มีค่าสูงกว่าเมมเบรนที่ผลิตจาก polyethersulfone และแรงดันในการ backwashing ควรมีค่ามากกว่าสองเท่าของแรงดัน(100 kPa)ที่ใช้ในการเดินระบบเพื่อรักษาให้ฟลักซ์มีค่าสูงและคงที่	Nakatsuka, <i>et al.</i> , 1996
milk	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 1.4 $\mu$ m	5	100	จากการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า cross-flow MF เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดจุลินทรีย์ในนม และปริมาณไขมันของนมที่ผ่านการกรองมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.05% และสามารถลดแบคทีเรียได้ประมาณ 4-5 log cycles	Pafylas, <i>et al.</i> , 1996

hollow fiber membrane = เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง; tubular membrane = เมมเบรนชนิดท่อ; MCWO = molecular weight cut-off (Da); MF = microfiltration

ตารางที่ 1.10 (ต่อ) การใช้งานและสภาวะการเดินระบบในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง: ประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	สมรรถนะ/ประสิทธิภาพ	
Skim milk	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.14 $\mu\text{m}$	1.5-8	10-190	จากการทดลองเมื่อใช้ค่า CFV สูงที่สุดคือ 8 m/s ที่อุณหภูมิ 55°C พบว่าค่าการกักกันของ whey protein น้อยที่สุดคือ 12% เมื่อเปรียบเทียบกับค่า CFV ที่ 6m/s ที่อุณหภูมิ 15°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39% โดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า TMP ในช่วง 10-190 kPa และที่อุณหภูมิ 55°C, CFV เท่ากับ 8 m/s พบว่าฟลักซ์มีค่าสูงที่สุดคือ 145 L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ดังนั้นสรุปได้ว่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและ CFV มีค่าเพิ่มขึ้น	Samuelsson, <i>et al.</i> , 1997
Lake water	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.2 $\mu\text{m}$	5	220	จากการทดลองกรองน้ำจากทะเลสาบด้วยเมมเบรนระดับ microfiltration เพื่อวัตถุประสงค์ในการใช้เป็นน้ำดื่มพบว่าสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย จุลชีพและสาหร่ายได้ทั้งหมด และสามารถกักกัน TOC และ chloroform ได้ 64% และ 56% ตามลำดับ	Bottino, <i>et al.</i> , 2001
Apple juice	ceramic tubular membrane ultrafiltration MCWO 15,000 MCWO 50,000	2,7	150,400	การลดลงของฟลักซ์โดยส่วนใหญ่แล้วนั้นเกิดมาจากปรากฏการณ์ฟาวลิ่ง โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการลดการเกิดฟาวลิ่งคือ เดินระบบที่ค่าแรงดันขับต่ำ (150 kPa) และที่ค่าความเร็วไหลขวางสูง (7 m/s) ส่วนคุณภาพน้ำแอมป์เปิดที่ได้มีคุณภาพสูง	Bruijn, <i>et al.</i> , 2002

CFV = cross-flow velocity (ความเร็วไหลขวาง)

MCWO = molecular weight cut-off (Da)

TMP = transmembrane pressure (แรงดันขับ)

TOC = total organic carbon

ตารางที่ 1.10 (ต่อ) การใช้งานและสภาวะการเดินระบบในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง: ประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	สมรรถนะ/ประสิทธิภาพ	
Pineapple juice	polyethersulfone tubular membrane microfiltration pore size 0.3 $\mu\text{m}$	6	100	จากการศึกษาการกรองน้ำสับปะรดโดยการรวมขั้นตอน enzymatic hydrolysis ร่วมกับ microfiltration พบว่าประสบความสำเร็จเนื่องจาก ค่า haze (ความขุ่น) ของน้ำสับปะรดลดลงจาก 97.2 ไปเป็น 3.4 และค่า luminosity (ความใส) เพิ่มขึ้นจาก 16.8 ไปเป็น 97.9	Carneiro, <i>et al.</i> , 2002
Lemon juice	15% PVDF, 5% PMMA และ 5% PVP in dimethylformamide(DMF) microfiltration pore size 0.2 $\mu\text{m}$	0.2-1	20-100	จากการทดลองกรองน้ำมะนาวด้วยเมมเบรนที่เตรียมขึ้นพบว่า การเพิ่มขึ้นของแรงดันไม่ส่งผลกระทบต่อเพอมีอเท ดังนั้นค่าที่เหมาะสมในการเดินระบบคือ แรงดันขับเท่ากับ 60 kPa และความเร็วไหลขวางเท่ากับ 1 m/s	Espamer, <i>et al.</i> , 2006
Phosphorus-containing wastewater	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.2 $\mu\text{m}$	2.1	150	จากการศึกษาปรับปรุงประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตและลดการเกิดฟาวลิ่ง โดยการบำบัดขั้นต้นด้วยการเติมปูนขาวก่อนเข้าสู่การกรองด้วยเมมเบรนพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด $\text{PO}_4^{3-}$ เพิ่มขึ้นจาก 11.0% ไปเป็น 99.7% และการเพิ่มขนาดอนุภาคโดยการบำบัดขั้นต้นสามารถช่วยลดการอุดตันภายในรูได้ โดยฟลักซ์ของสารป้อนที่เติมปูนขาวแล้วกรองด้วย MF มีค่าเท่ากับ 60% ซึ่งสูงกว่าการกรองสารป้อนด้วย MF โดยตรง	Zhang, <i>et al.</i> , 2006

PVDF = Polyvinylidene fluoride; PMMA = Polymethylmethacrylate; PVP = Polyvinylpyrrolidone; MF = microfiltration

ตารางที่ 1.10 (ต่อ) การใช้งานและสภาวะการเดินระบบในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง: ประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	สมรรถนะ/ประสิทธิภาพ	
Apple juice	polyethersulfone plate membrane ultrafiltration MCWO 50,000 Da	2.5-3.5	100-200	จากการศึกษาประสิทธิภาพการกรองน้ำแอปเปิ้ลด้วยเมมเบรนระดับ ultrafiltration โดยไม่ใช้เอนไซม์ และไม่ผ่านขั้นตอนการฆ่าเชื้อเบื้องต้นด้วยการทำพาสเจอร์ไรเซชัน พบว่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเดินระบบคือ TMP= 2.0 bar, CFV = 2.5 m/s และ $T=50^{\circ}\text{C}$ และในระยะยาวพบว่าฟลักซ์เฉลี่ยมีค่าสูงกว่า $120 \text{ l/m}^2\text{-h}$ และมีค่า VCF สูง (volume concentration factor, >20) โดยน้ำแอปเปิ้ลที่แยกได้นั้นมีคุณภาพดีมากคือ มีค่า haze(T625) > 96.0%, ความขุ่น < 0.3 NTU และไม่มีส่วนของแป้ง เพคติน และ thermo-acidophilic bacteria ปะปนอยู่ในน้ำแอปเปิ้ล	He, <i>et al.</i> , 2007
Oily wastewater	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.05 $\mu\text{m}$	0.21-1.68	50-300	จากการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ พบว่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงเมื่อเดินระบบที่ค่า TMP, CFV สูง และความเข้มข้นของน้ำมันต่ำ และจากการทดลองพบว่า ฟลักซ์มีค่าลดลง เมื่อสารป้อนมีค่าความเข้มข้นของเกลือสูงหรือมีค่า pH ต่ำ	Hua, <i>et al.</i> , 2007
Wine	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.2 $\mu\text{m}$	2.2	150	จากการปรับปรุงการกรองไวน์ด้วยกระบวนการผสมผสานแบบใหม่ซึ่งเป็นการใช้ column adsorption ร่วมกับ crossflow microfiltration พบว่า ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 15– 20% นอกจากนี้ยังพบว่าความมีเสถียรภาพของโปรตีนของไวน์ที่ได้มีคุณภาพดีกว่าไวน์ที่ได้จากกระบวนการกรองแบบทั่วไป และยังไม่ส่งผลกระทบต่อสีหรือสารประกอบฟีนอลิกของไวน์ด้วย	Salazar, <i>et al.</i> , 2007

plate membrane = เมมเบรนชนิดแผ่น



ในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนภายใต้แรงดันขับ ฟลักซ์จะเป็นตัวบ่งบอกถึงสมรรถนะของระบบ โดยที่ค่าฟลักซ์แสดงถึงปริมาตรของเพอมีเอทที่ผ่านรูพรุนของเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรนต่อเวลา (Hua, *et al.*, 2007) ดังมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1.1)

$$\text{Permeate flux } (J) = \frac{\text{Permeate volume collected}}{(\text{Membrane area}) \times (\text{time})} \quad (1.1)$$

และฟลักซ์มีความสัมพันธ์กับแรงดันขับ (pressure driving force) และความต้านทาน (resistance) การไหลดังสมการที่ (1.2)

$$J = \frac{TMP}{\mu \cdot R_t} \quad (1.2)$$

เมื่อ	$J$	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอท ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )
	$TMP$	=	ความแตกต่างของความดัน (Pa)
	$\mu$	=	ความหนืดของเพอมีเอท (Pa.s)
	$R_t$	=	ความต้านทานรวม ( $\text{m}^{-1}$ )

โดยที่ TMP ของการกรองแบบไหลขวางในกรณีของเมมเบรนแบบท่อ (tubular membrane) และแบบเส้นใย (hollow fiber membrane) สามารถหาได้จากสมการที่ (1.3) และความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานต่างๆ ดังสมการที่ (1.4) และ (1.5) (Guerra, *et al.*, 1997)

$$TMP = \frac{P_{in} + P_{out}}{2} - P_{p'} \quad (1.3)$$

เมื่อ	$P_{in}$	=	ความดันขาเข้า หรือความดันของสารป้อน (Pa)
	$P_{out}$	=	ความดันขาออก หรือความดันของรีเทนเนท (Pa)
	$P_{p'}$	=	ความดันด้านเพอมีเอท (Pa)

ในการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นในส่วนของรีเทนเททในระหว่างการกรองสามารถหาได้จากค่าแฟกเตอร์ความเข้มข้นเชิงปริมาตร (volumetric concentration factor : VCF) ดังสมการที่ (1.6) (Krstic, *el al.*, 2004)

$$VCF = \frac{V_{feed,i}}{V_{ret,t}} \quad (1.6)$$

เมื่อ  $V_{feed,i}$  = ปริมาตรของสารป้อนที่เริ่มเดินระบบ ( $m^3$ )

$V_{ret,t}$  = ปริมาตรของรีเทนเททที่เวลาใดๆ ( $m^3$ )

สำหรับการหาค่าการกักกัน (rejection) เป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติการกักสารของเมมเบรน ซึ่งหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของตัวถูกละลายที่ถูกเมมเบรนกักไว้หรือไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ หาได้จากสมการที่ (1.7) แต่ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันจะใช้คำว่า “ค่าการคงอยู่ (retention)” ซึ่งมีนิยามตามสมการที่ (1.8) เพื่อเน้นถึงองค์ประกอบที่มีคุณค่าที่ต้องการแยกออกจากสารละลาย โดยองค์ประกอบที่ต้องการในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน คือโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ได้ผ่านเมมเบรน ออกไปเพื่อนำกลับใช้ประโยชน์ใหม่ (จันทร์ทอง สุนทรภา, 2547)

$$R = \left[ 1 - \frac{C_p}{C_f} \right] \times 100 \quad (1.7)$$

$$R_F = \left[ 1 - \frac{C_p}{C_r} \right] \times 100 \quad (1.8)$$

เมื่อ  $R$  = ค่าการไม่ยอมรับหรือค่าการกักกัน (rejection )

$R_F$  = ค่าการคงอยู่ (retention)

$C_p$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมีเอท

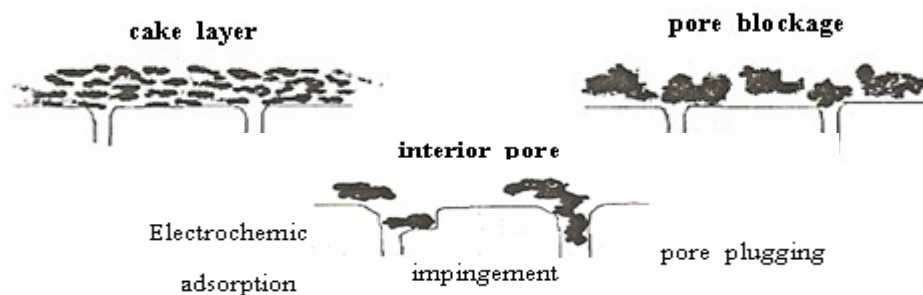
$C_f$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายป้อน

$C_r$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในรีเทนเทท

ในขณะที่ทำการเดินระบบกรองนั้น ค่าฟลักซ์จะมีการลดลง อันเนื่องมาจากหลายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งเกิดการสะสมและ/หรืออุดตันภายในรูพรุน บนผิวหน้าและบริเวณใกล้ผิวเมมเบรน ซึ่งสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของค่าฟลักซ์ได้แก่ ผลจากการเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (concentration polarization : CP) และปรากฏการณ์ฟาวลิง (fouling) โดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 1.2.6.4

#### 1.2.6.4 ปรากฏการณ์ฟาวลิง (fouling phenomena)

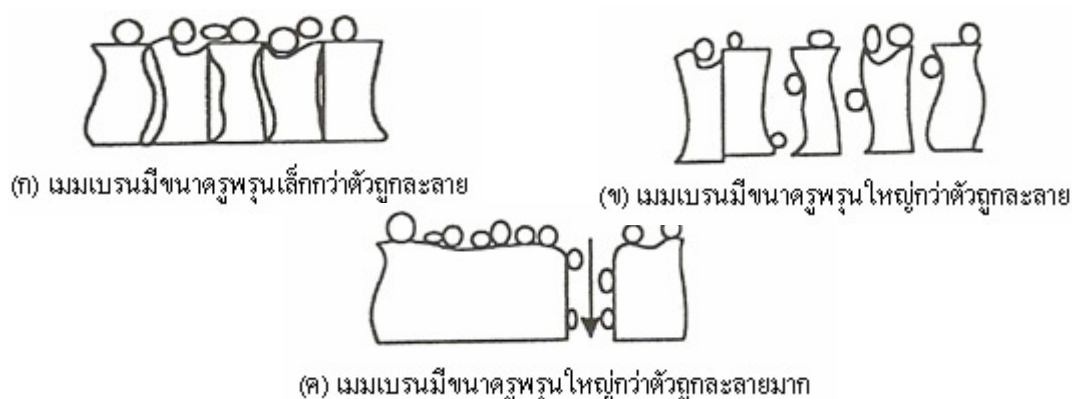
ฟาวลิงที่เกิดขึ้นมีหลายลักษณะขณะเดินระบบเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับต่างๆ ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะและขีดความสามารถในการแยกลดลงขณะเดินระบบแบบต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่อง ฟาวลิงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกรองสารผ่านเมมเบรน โดยความหมายของฟาวลิงยังไม่เป็นที่เข้าใจชัดเจนนัก และก็ยากที่จะแยกออกจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (เกิดจากการสะสมความเข้มข้นของอนุภาค โมเลกุลที่ใกล้ผิวหน้าเมมเบรน) ได้อย่างชัดเจน แต่อาจกล่าวให้เข้าใจง่ายๆ ได้ว่า การเกิดฟาวลิงของเมมเบรน หมายถึง การสะสม/ อุุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุน ซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงและการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนแปลง โดยฟาวลิงเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเมมเบรนและสารละลาย และหากระดับฟาวลิงรุนแรงก็ทำให้สิ่งสะสมและอุุดตันจะไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ และจำเป็นต้องล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) โดยพอสรุปลักษณะหลักๆ ของฟาวลิงที่เกิดขึ้นแบบใดแบบหนึ่งหรือหลายแบบร่วมกัน คือ เกิดจากการสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเมมเบรน (cake layer) การสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่บริเวณช่องเปิดของรูกรอง (pore blockage) และการบล็อคของอนุภาค-โมเลกุลภายในรูพรุนและการอุุดติดภายในรูกรอง (interior pore fouling) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.8 โดยที่ cake layer และ pore blockage เป็นฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพได้ (reversible fouling) ด้วยการทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนโดยอาศัยเทคนิคทางไฮดรอดนามิกส์ ส่วนการอุุดติดภายในรูกรองนั้นเป็นฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพไม่ได้ (irreversible fouling) จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ (ชันทอง สุนทรภา, 2547)



ภาพประกอบที่ 1.8 ลักษณะการเกิดฟาวลิง

ที่มา: ชันทอง สุนทรภา, 2547

ฟาวลิ่งนอกจากจะทำให้ฟลักซ์ลดลงแล้วยังทำให้คุณสมบัติการกักกันสารเปลี่ยนแปลงด้วย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.9 ซึ่งแสดงลักษณะการเกิดฟาวลิ่งของเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่างๆ เทียบกับขนาดของตัวถูกละลาย สำหรับเมมเบรนที่มีรูพรุนแบบแน่นและมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าตัวถูกละลาย (ภาพประกอบที่ 1.9 (ก)) การเกิดฟาวลิ่งจะเกิดบนผิวเมมเบรนเท่านั้น ทั้งขนาดรูพรุนและคุณสมบัติการกักกันสารของเมมเบรนจึงไม่เปลี่ยนแปลง การกักกันตัวถูกละลายจะถูกควบคุมโดยเมมเบรนเหมือนเดิม แต่อย่างไรก็ตาม ความต้านทานการไหลของตัวทำละลายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปิดรูพรุนของตัวถูกละลายจึงส่งผลให้ฟลักซ์ลดลง ในขณะที่เมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายเล็กน้อย (ภาพประกอบที่ 1.9 (ข)) ฟาวลิ่งจะเกิดขึ้นมากทั้งภายในรูพรุนและบนผิวเมมเบรน โดยจะเกิดบนเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้การกักกันตัวถูกละลายเปลี่ยนแปลงไปคือ จะถูกควบคุมโดยโครงสร้างของฟาวลิ่งเป็นหลัก ส่วนเมมเบรนที่มีรูพรุนห่างและมีขนาดใหญ่กว่าตัวถูกละลายมากนั้น (ภาพประกอบที่ 1.9 (ค)) ฟาวลิ่งจะเกิดขึ้นมากทั้งภายในรูพรุนและบนผิวเมมเบรน ส่งผลให้คุณสมบัติการกักกันสารเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าแบบอื่น



**ภาพประกอบที่ 1.9** ลักษณะการเกิดฟาวลิ่งของเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่างๆ เทียบกับขนาดของตัวถูกละลาย

ที่มา: Meireles, *et al.*, 1991 อ้างโดย รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543

จากการทดสอบล้างเมมเบรนเซรามิกที่มีรูพรุนขนาดต่างๆ ภายหลังจากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของสารละลายอัลบูมิน (รูปร่างเป็นวงรีขนาด 40x140 อังสตรอม) พบว่าเมื่อทำการล้างด้วยน้ำกลั่น เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 40 อังสตรอม สามารถทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นเท่ากับฟลักซ์เริ่มต้น ส่วนเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 350 และ 1000 อังสตรอม การล้างด้วยน้ำนั้นไม่สามารถทำให้ฟลักซ์กลับมาเท่ากับฟลักซ์เริ่มต้นได้ (Clark, *et al.*, 1990 อ้างโดย เชิดชัย ตั้งอมรสฤษดิ์, 2537)

โดยการกลับคืนของฟลักซ์จะแปรผกผันกับขนาดรูพรุนของเมมเบรนกล่าวคือ ถ้าขนาดรูพรุนใหญ่ การกลับคืนของฟลักซ์จะน้อยกว่า ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าระดับของการเกิดฟาวลิงเกิดกับเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่ารูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ (Meireles, *et al.*, 1991 อ้างโดย เชิดชัย ตั้งอมรสขันธ์, 2537) การเกิดฟาวลิงภายในรูพรุนของเมมเบรนโดยตัวถูกละลายนั้นจะเกิดขึ้นได้ง่ายมาก โดยเฉพาะถ้าตัวถูกละลายมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดรูพรุน

### 1.2.6.5 วิธีการป้องกันและฟื้นฟูสภาพเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง

(1) **วิธีการป้องกัน** ปรากฏการณ์ฟาวลิงดังที่กล่าวมาแล้วเป็นสิ่งที่สามารถควบคุมและลดระดับการเกิดฟาวลิงได้ด้วยหลายเทคนิคด้วยกัน ประกอบกับภายใต้การพัฒนารูปแบบการเดินระบบ สภาวะการเดินระบบ ซึ่งมีรายงานว่า การเดินระบบที่ค่าฟลักซ์ต่ำ (Field, *et al.*, 1995 and Howell, 1995) การเดินระบบที่ค่าความดันขั้วต่ำ การใช้เทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ และการปรับสภาพสารป้อนเข้าระบบ รวมถึงการเลือกใช้วัสดุเมมเบรนและระดับขีดความสามารถในการแยกที่เหมาะสมกับลักษณะสารป้อนเป็นแนวทางพิจารณาหลักของการป้องกันฟาวลิงแบบฉบับพลัน นอกจากนี้การลดระดับการเกิดฟาวลิงจะช่วยยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนและยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Tansel, *et al.*, 1995) ซึ่งการใช้หลายๆ เทคนิคดังกล่าวนี้ร่วมกันเป็นสิ่งที่ทำให้ระบบมีความคุ้มค่าสูง สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันนี้ราคาต้นทุนของเมมเบรนในตลาดโลกมีราคาถูกลง คุณภาพของเมมเบรนที่พัฒนาและผลิตขายมีคุณภาพดีขึ้น และอายุของเมมเบรนสำหรับการใช้งานยาวนานขึ้น และมีแนวโน้มการเกิดฟาวลิงในระดับต่ำลง (Howell, *et al.*, 1993; Howell, 2004 and Wakeman and Williams, 2002)

การควบคุมการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงเนื่องจากคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันในไมโครฟิลเตรชัน สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน (ปาริชาติ ตียปรีชญา, 2544) เช่น

- ใช้อัตราการไหลต่ำ เพราะการใช้อัตราการไหลต่ำจะทำให้ตัวถูกละลายสามารถผ่านเมมเบรนได้โดยไม่เกิดการอุดตันในเมมเบรน ในขณะที่การใช้อัตราการไหลที่สูงจะทำให้อนุภาคขนาดเล็กติดค้างในรูเมมเบรนได้ และเป็นไปได้ว่าการใช้อัตราการไหลที่สูงจะทำให้อนุภาครวมตัวกันแน่นกว่าการใช้อัตราการไหลที่ต่ำ

- การล้างย้อน (backwashing) หากการสะสมของอนุภาคเกิดบริเวณผิวหน้าเมมเบรน การทำ backwashing เป็นระยะๆ จะสามารถขจัดอนุภาคที่อยู่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนออกได้ ทั้งนี้การทำ backwashing สามารถทำได้กับเมมเบรนชนิดเซรามิกและ hollow fiber เท่านั้น และจะได้ผลดีในเมมเบรนที่มีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (anisotropic) มากกว่าที่เป็นเนื้อเดียวกัน (isotropic) เพราะอนุภาคติดอยู่กับ โครงสร้างของเมมเบรน จึงถูกกำจัดออกได้ยาก สิ่งสำคัญในการ

ทำ backwashing คือ การกำจัดอนุภาคที่หลุดออกมาให้ออกจากระบบการกรอง หากไม่ได้กำจัดอนุภาคเหล่านั้นออกจากระบบ อนุภาคจะสามารถรวมตัวกับอนุภาคในสารละลายเริ่มต้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว

- ทำการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง (cross-flow filtration) ซึ่งรูปแบบการกรองแบบนี้รีเทนเททจะถูกหมุนเวียนกลับมายัง feed tank จึงทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเมมเบรน ลดลง นอกจากนี้แล้วรูปแบบการเดินระบบกรองแบบนี้ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนให้นานขึ้น และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการทำงาน

- ใช้ ultrasonic energy เป็นการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้อนุภาคที่สะสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรนกระจายกลับไปสู่ bulk solution

การควบคุมการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงในลักษณะขั้นแก้ก การสะสมภายในรูกรอง และเปลือกครุกรอง สามารถกระทำได้ 3 วิธีการด้วยกัน (Fane, *et al.*, 1987 อ้างโดย อำไพ ชนะไชย, 2536) คือ

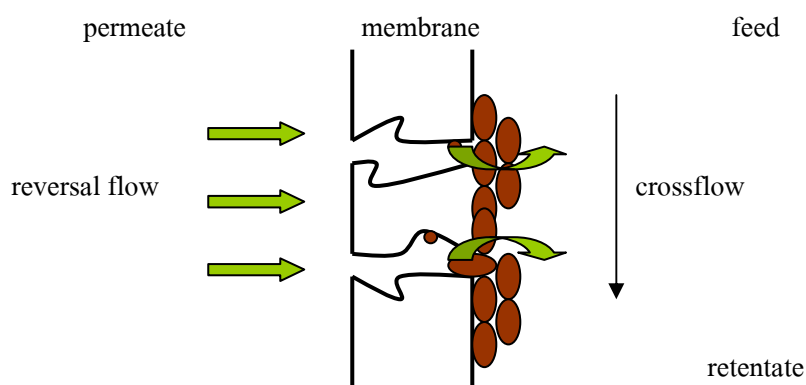
- การปรับสภาพผิวของเมมเบรน (membrane surface modification) เมมเบรนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำจะเกิดฟาวลิงสูงกว่าเมมเบรนที่ชอบน้ำ การเลือกใช้เมมเบรนที่ชอบน้ำจึงช่วยลดปัญหาการเกิดฟาวลิงได้มาก แต่เนื่องจากเมมเบรนที่ชอบน้ำมักมีความต้านทานต่อสารเคมีและความร้อนต่ำ ทำให้มีขีดความสามารถในการใช้งานจำกัด บางครั้งจึงจำเป็นต้องเลือกใช้เมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำ อย่างไรก็ตามเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำก็สามารถปรับสภาพผิวให้ชอบน้ำได้ โดยการให้เมมเบรนสัมผัสกับสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ สารที่ชอบน้ำก็จะดูดซับบนผิวและภายในรูพรุนของเมมเบรนทำให้เมมเบรนมีพื้นที่ผิวชอบน้ำได้

- การเตรียมและการปรับสภาพสารละลายป้อน (feed conditioning/treatment) เป็นการกำจัดหรือลดปริมาณตัวถูกละลายบางชนิดที่ก่อให้เกิดฟาวลิง หรือปรับสภาพสารละลายให้มีสถานะที่จะเกิดฟาวลิงน้อยที่สุดก่อนที่จะผ่านกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น การแยกเหวี่ยง การเติมสารเคมี การใช้ความร้อน และการกวนเร็วเพื่อสร้างตะกอน ซึ่งจะเป็นการลดอัตราการเกิดฟาวลิงและเป็นการช่วยเพิ่มระยะเวลาในการเกิดฟาวลิง (Tansel, *et al.*, 1995) เป็นต้น

- การใช้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม (appropriate operating conditions) ซึ่งหากมีการเดินระบบการทำงานที่เหมาะสมก็จะสามารถช่วยลดการเกิดฟาวลิงได้ โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการลดการเกิดฟาวลิงคือ การเดินระบบที่ค่าแรงดันขับต่ำและที่ค่าความเร็วไหลขวางสูง (Bruijn, *et al.*, 2002)

นอกจากนี้อีกเทคนิคหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการลดการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิ่ง คือ การล้างย้อนด้วยการอัดแรงดัน (backpulsing) (Sondhi and Bhave, 2001) ซึ่งความแตกต่างระหว่าง backpulsing กับ backwashing คือ ความเร็วและแรงผลักดันที่ใช้ในการทำให้อนุภาคหลุดออกจากผิวเมมเบรน โดยที่ backpulsing นั้นการไหลย้อนกลับ (reversal flow) จะเกิดขึ้นทุกๆรอบการทำที่ 2-3 นาที ด้วยแรงดันสูง (สูงถึง 10 bar) โดยใช้เวลาในช่วงสั้นๆ (โดยทั่วไป < 1 วินาที) ส่วน backwashing นั้นการไหลย้อนกลับจะเกิดขึ้นเป็นช่วงๆ โดยเกิดทุกๆช่วง 30 นาทีถึงหลายชั่วโมง และมีเวลาในการทำ backpulsing รอบละ 5-30 วินาที

ในระหว่างการกรองนั้นจะเกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรนซึ่งส่งผลก่อให้เกิดชั้นเค้กหรือเจล และในเวลาเดียวกันอนุภาคบางส่วนอาจเกิดการดูดซับหรือเกิดการบดอัดบริเวณช่องเปิดรูพรุน ซึ่งการทำ backpulsing นั้นจะช่วยทำให้อนุภาคที่เกิดเป็นชั้นเค้กหลุดออกจากเมมเบรนดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.10



ภาพประกอบที่ 1.10 การทำความสะอาดเมมเบรนระหว่าง backpulsing

ที่มา: ดัดแปลงจาก Sondhi and Bhave, 2001

วิธีการป้องกันและลดการเกิดฟาวลิ่งอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้หลักการของการหาค่า “ค่าฟลักซ์วิกฤต (critical flux)” โดยเดินระบบให้ค่าฟลักซ์ของเพอเมตมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับจุดฟลักซ์วิกฤต เพราะจุดวิกฤตนี้เป็นจุดที่ฟลักซ์ของเพอเมตเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดชั้นเค้ก ซึ่งเป็นฟาวลิ่งรูปแบบผันกลับได้ การนำหลักการค่าฟลักซ์วิกฤตมาประยุกต์ใช้นั้น ได้มีการนำเสนอ กับหลายผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ ผลิตภัณฑ์นมพร่องมันเนย (skimmed milk) และใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ เป็นต้น (Sulaiman, *et al.*, 1998; Gesan-Guiziou, *et al.*, 1999; Mänttari and Nyström, 2000)

(2) **วิธีการฟื้นฟูสภาพ** แม้ว่าจะมีการควบคุมและลดระดับการเกิดฟาวลิงแล้ว ถึงกระนั้นก็ยังพบว่ามีการเกิดฟาวลิง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสมเป็นระยะๆ เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงเมมเบรนใหม่มากที่สุดและเพื่อยืดอายุการใช้งาน ฟาวลิงเกิดจากองค์ประกอบในสารละลายที่ไปสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน และในรูพรุน และอาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในสารละลาย การเกิดฟาวลิงมีความไม่ผันกลับสูงจึงไม่สามารถกำจัดฟาวลิงด้วยการล้างน้ำธรรมดา การเลือกวิธีการล้างและทำความสะอาดเมมเบรนต้องพิจารณาถึงชนิดของสารอุดตัน วัสดุที่ผลิตเป็นเมมเบรนและรูปแบบของโมดูล ตลอดจนค่าใช้จ่าย ความยากง่าย และระยะเวลาในการล้างประกอบด้วย

**วิธีทำความสะอาด** แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีทางกายภาพ และวิธีทางเคมี

- **วิธีทางกายภาพ (physical methods)** หมายถึงการทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการเดินระบบเป็นหลัก เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะช่วยให้แรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรน แต่การลดการสะสมหรืออุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น อีกวิธีที่กล่าวถึงกันอยู่เสมอคือการชุบน้ำที่สะสมออกจากผิวหน้าเมมเบรนด้วยฟองน้ำที่ทำให้มีลักษณะเป็นลูกกลมๆ (sponge balls) ใช้กับเมมเบรนแบบท่อ โดยการใส่ก้อนฟองน้ำที่มีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเข้าไปในน้ำหรือสารละลายที่ปล่อยให้ไหลผ่านเมมเบรนเพื่อให้ก้อนฟองน้ำชุบน้ำที่สะสมออก วิธีทางกายภาพที่ใช้กันแพร่หลาย คือ การล้างกลับทาง (backwashing) ทำได้โดยการป้อนสารละลายภายใต้ความดันเข้าทางด้านเพอมีเอท ซึ่งจะทำให้สารละลายดันสารอุดตันหลุดออกจากเมมเบรน แรงดันในการล้างกลับทางควรมีค่ามากกว่าสองเท่าของแรงดันที่ใช้ในการเดินระบบเพื่อรักษาให้ฟลักซ์มีค่าสูงและคงที่ (Nakatsuka, et al., 1996) การล้างกลับทางอาจทำระหว่างการกรองหรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรองคือล้างกลับทางด้วยน้ำหรือสารทำความสะอาด

วิธีทางกายภาพใช้ได้ผลดีในกรณีที่มีการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าการอุดตันภายในรูพรุน หลังจากการล้างกลับฟลักซ์อาจมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่น่าพอใจขึ้นอยู่กับชนิดของสารอุดตัน แต่ในระยะยาวแล้วก็อาจพบว่าฟลักซ์ยังคงลดลงอยู่ ดังนั้นการล้างด้วยวิธีทางเคมีจึงมีความจำเป็นและเป็นที่ยอมรับเนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

- **วิธีทางเคมี (chemical methods)** การทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยสารเคมีอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลายเกิดการหลุดออก หรือสารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยากับสารอุดตัน เช่น ทำให้เกิดไฮโดรไลซิส การย่อยสลายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543) เป็นต้น



### สารเคมีที่ใช้ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถละลายสารอุดตันหรือทำให้สารอุดตันเกาะตัวกันน้อยลงด้วยกลไกทางกายภาพหรือทางเคมี
- รักษาสภาพการกระจายตัวของสารอุดตันไม่ให้กลับไปสะสมอีก
- ไม่เป็นสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันเสียเอง
- ไม่ทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพ

จากเทคนิคและวิธีการป้องกันและการฟื้นฟูสภาพเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงขณะเดินระบบกรองสามารถสรุปได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.11

ตารางที่ 1.11 เทคนิคและวิธีการป้องกันและการฟื้นฟูสภาพเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงขณะเดินระบบกรองแบบไหลขวาง

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	เทคนิค / วิธีการป้องกัน / การฟื้นฟูสภาพ	
Skim milk	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.22 $\mu\text{m}$	6.9	190	- ล้างด้วยสารละลาย NaOH (2.0%), H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> / HNO <sub>3</sub> (2.0%) และ NaOCl (200 ppm of total residual chlorine) โดยสารละลายที่ใช้ล้างทั้งหมดจะไหลวนอยู่อย่างน้อย 15 นาที หลังจากนั้นตามด้วยน้ำกลั่น	Pouliot, <i>et al.</i> , 1996
River water	cellulose acetate MCWO 150,000 Da polyethersulfone MCWO 30,000 Da hollow fiber membrane ultrafiltration	0.16	50	- ทำการกรองเบื้องต้นด้วยตะแกรงตาข่าย 200 $\mu\text{m}$ - backwashing โดยฉีด sodium hypochlorite (NaClO) ที่ความเข้มข้น 3-5 mg/l พร้อมกับน้ำที่ใช้ในการล้างกลับทางเพื่อขยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เมมเบรน โดยการล้างกลับทางเกิดทุกช่วง 30 นาที และความดันที่ใช้ในการล้างกลับทางคือ 90-100 kPa และในระหว่างการเดินระบบจะมีการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการล้างกลับทาง ที่ละขั้นคือ 20, 45, และ 70 วินาที	Nakarsuka, <i>et al.</i> , 1996
milk	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 1.4 $\mu\text{m}$	5	100	- ใช้วิธีทางเคมีโดยใช้สารล้างที่เป็นด่าง (Ultrasil-1 1, EcoLab, St. Paul, MN) และทำการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน 200 ppm หรือ peracetic acid-hydrogen peroxide sanitizer (Oxonia, EcoLab, St. Paul, MN) และตามด้วยน้ำร้อนที่ปลอดเชื้อ	Pafylas, <i>et al.</i> , 1996

hollow fiber membrane = เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง tubular membrane = เมมเบรนชนิดท่อ MCWO = molecular weight cut-off

ตารางที่ 1.11 (ต่อ) เทคนิคและวิธีการป้องกันและการฟื้นฟูสภาพเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงขณะเดินระบบกรองแบบไหลขวาง

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	เทคนิค / วิธีการป้องกัน / การฟื้นฟูสภาพ	
Lake water	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.2 µm	5	220	- backflushing - ใช้วิธีทางเคมีโดยใช้สารละลาย $\text{NH}_3$ pH 1-2 , $\text{NaOH}$ pH 12 คลอรีน 200 ppm และสารซักล้าง P3 Ultrasil 25, Henkel-Ecolab, 0.1 %	Bottino, <i>et al.</i> , 2001
Apple juice	ceramic tubular membrane ultrafiltration MCWO 15,000 Da MCWO 50,000 Da	7	150	- ใช้วิธีทางเคมีโดยทำการล้างเมมเบรนด้วย 2% $\text{NaOH}$ , 1% $\text{HNO}_3$ , 0.7% Ultrasil 11 และ 0.5% Ultrasil 75 จนกระทั่งได้ฟลักซ์น้ำเริ่มต้นกลับคืนมา	Bruijn, <i>et al.</i> , 2002
Lemon juice	15% PVDF, 5% PMMA และ 5% PVP in dimethylformamide(DMF) microfiltration pore size 0.2 µm	1	60	- ใช้วิธีทางเคมีโดยทำการล้างเมมเบรนด้วยเอนไซม์และคลอรีน และทำการหมუნเวียนสารละลายนี้ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 30 นาที และทำการล้างระบบครั้งสุดท้ายด้วยน้ำเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการวัดฟลักซ์น้ำ	Espamer, <i>et al.</i> , 2006

PMMA = Polymethylmethacrylate PVDF = Polyvinylidene fluoride PVP = Polyvinylpyrrolidone

ตารางที่ 1.11 (ต่อ) เทคนิคและวิธีการป้องกันและการฟื้นฟูสภาพเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงขณะเดินระบบกรองแบบไหลขวาง

ประเภทสารป้อน	สถานะการเดินระบบ			อ้างอิง	
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )		เทคนิค / วิธีการป้องกัน / การฟื้นฟูสภาพ
Phosphorus-containing wastewater	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.2 $\mu\text{m}$	2.1	150	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การบำบัดขั้นต้นด้วยการเติมปูนขาว</li> <li>- เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบในแต่ละรอบจะทำการล้างด้วยน้ำกลั่นและล้างด้วยแปรงเล็กและน้ำกลั่น ทำจนกระทั่งน้ำล้างที่ได้ใส</li> <li>- การล้างด้วยวิธีทางเคมีทำโดยหมุนเวียนสารละลาย 0.1 M <math>\text{HNO}_3</math> ที่ค่า CVF = 4.5 m/s, TMP = 0.10 MPa และ T = 25 °C เป็นเวลา 25 นาที หลังจากนั้นล้างตามด้วยน้ำกลั่นและ ทำการวัดฟลักซ์น้ำสะอาด</li> </ul>	Zhang, <i>et al.</i> , 2006
Apple juice	polyethersulfone plate membrane ultrafiltration MCWO 50,000 Da	2.5	200	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้วิธีทางเคมีโดยดำเนินการดังต่อไปนี้</li> <li>(1) ล้างด้วย 0.03% pectinase และ 0.05% amylase solution ที่มีค่า pH 4.5–5.0 ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที และหลังจากนั้นล้างด้วย caustic solution (pH 11–12) ประกอบไปด้วย 0.1% ionic surfactant, 0.05% EDTA ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 50 นาที (2) ล้างด้วยน้ำสะอาด (3) ล้างด้วยสารละลาย chlorinated caustic cleaning agent (containing 200 ppm NaClO, pH 9.0–9.5) ที่อุณหภูมิ 30–40 °C เป็นเวลา 60 นาที (4) ล้างด้วยน้ำสะอาด</li> </ul>	He, <i>et al.</i> , 2007
Oily wastewater	ceramic tubular membrane microfiltration pore size 0.05 $\mu\text{m}$	1.68	200	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้วิธีทางเคมีโดยล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นล้างตามด้วย 3% NaOH เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สุดท้ายล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเพอมีเอทที่ ออกมามีค่า pH เป็นกลาง หลังจากนั้นทำการวัดฟลักซ์น้ำเริ่มต้น</li> </ul>	Hua, <i>et al.</i> , 2007

plate membrane = เมมเบรนชนิดแผ่น

### 1.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เมมเบรนเพื่อแยกอนุภาคยาง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เมมเบรนในอุตสาหกรรมยางนั้นยังมีอยู่น้อย แต่เท่าที่สืบค้นพบว่ารายงานที่เกี่ยวข้องมีการศึกษาเกี่ยวกับความเสถียรของการกรองแบบไหลขวาง เพื่อแยกอนุภาคยางพร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้น และมีการศึกษาถึงผลของค่าน้ำหนักโมเลกุลสารป้อนที่ถูกเมมเบรนกักไม่ให้ผ่าน (molecular weight cut-off, MWCO) ที่แตกต่างกันและความเหมาะสมของเมมเบรนที่ใช้ในการแยกอนุภาคยาง โดยสามารถสรุปสถานะการเดินระบบเมมเบรนในสารป้อนชนิดนี้ได้ดังตารางที่ 1.12

มีการประยุกต์และพบรายงานความเป็นไปได้ของการใช้เมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันเพื่อแยกอนุภาคยางออกจากส่วนที่เป็นของเหลวที่เป็นหางน้ำยางเพื่อหลีกเลี่ยงการเติมสารเคมี ซึ่งทำให้เกิดของเสียจากตะกอนที่เกิดขึ้น และต้องการนำกลับเนื้อยางในหางน้ำยางนั้น เนื่องจากการใช้เมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหา และทดแทนข้อจำกัดจากวิธีการแยกแบบทั่วไป และพบว่าการใช้เมมเบรนดังกล่าวสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ (เดินระบบภายใต้ความดันขับต่ำ และสามารถเดินระบบที่อุณหภูมิห้องทั่วไปได้ดี) และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ปนเปื้อนเป็นครั้งที่สองจากสารเคมี มีการรายงานผลศึกษาการใช้เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุทั้งกลุ่มเซรามิกและโพลีเมอร์ิก เช่น polyacrylonitrile polysulfone และ polysulfone/poly (vinylpyrrolidone) เป็นต้น ซึ่งมีความเหมาะสมในการแยกอนุภาคยาง และในทางปฏิบัติพบว่าปริมาณเพอมีเอทระหว่างการกรองหางน้ำยางไม่ขึ้นกับจำนวน หรือรูปร่างของเมมเบรนชนิดโพลีเมอร์ิกที่บรรจุไว้ในชุดเมมเบรน ขณะที่ผลของค่า MWCO ต่างๆ ระหว่าง 20,000 50,000 ดาลตัน และ 0.2 ไมโครเมตร ไม่พบว่ามีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยเพอมีเอทฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการเลือกใช้ต้องพิจารณาต้นทุนของเมมเบรนประกอบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมมเบรนเซรามิกมีต้นทุนการลงทุนที่สูงกว่าเมมเบรนโพลีเมอร์ิก แต่ความแปรผันของค่าลงทุนเรื่องเมมเบรนนั้นต้องพิจารณาถึงปัจจัยเรื่องอายุการใช้งานของเมมเบรนประกอบด้วย โดยทั่วไปเมมเบรนเซรามิกมีอายุใช้งานที่ยาวนานกว่า สำหรับขนาดรูกรองและค่า MWCO ของเมมเบรนที่อยู่ในช่วงไมโครฟิลเตรชันจะได้ค่าฟลักซ์ขณะกรองเริ่มต้นสูงกว่า ทั้งนี้หากเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคยางก็เป็นข้อพิจารณาหนึ่งสำหรับการทำบริสุทธิ์อนุภาคนาโนเช่นกัน (Konieczny and Bodzek 1996; Novalic, *et al.*, 1997; and Tishchenko, *et al.*, 2002) ผลของสมรรถนะขณะกรองตัวอย่างหางน้ำยางด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันต่อค่าฟลักซ์และการเกิดฟาวลิ่งนั้นพบว่า ลักษณะความไม่เสถียรของหางน้ำยางส่งผลต่อการลดลงอย่างรวดเร็วของค่าเพอมีเอทฟลักซ์อย่างต่อเนื่องกับระยะเวลาการกรองในระหว่างการเดินระบบกรองแบบต่อเนื่อง และการปรับแต่งสารป้อนด้วยการเติมสารเติมแต่งอินทรีย์ เช่น

octylphenoxy polyethoxy ethanol มีผลต่อค่าฟลักซ์และความคงที่ของสมรรถนะระบบกรอง (Zahka and Mir, 1977) สำหรับลักษณะของปรากฏการณ์ฟาวลิงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นลักษณะฟาวลิงแบบชั้นเจล และแบบอุดปิดหรือบดอัดภายในรูกรอง (Zahka and Mir, 1977) และการใช้สารลดแรงตึงผิวมากในสารป้อนส่งผลต่อการเกิดการสะสมตัวของมวลและทำให้ค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้ลดลง นอกจากนี้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเทนนั้นมีความสัมพันธ์ลักษณะเชิงเส้นตรงกับค่าความเร็วไหลขวางที่ผิวเมมเบรน ขณะที่ความสัมพันธ์ของค่าเพอมีเทกับความเข้มข้นของหางน้ำยาที่ทดสอบเป็นลักษณะ exponential คือ มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนสูงขึ้น ส่วนอัตราของฟลักซ์ที่ได้รับขณะกรองไม่ขึ้นกับค่าความดันขั้วที่ให้กับระบบขณะกรอง และพบว่าค่าความเข้มข้นของสารป้อนเริ่มต้นและความเข้มข้นขณะกรองที่เพิ่มขึ้นกรณีเดินระบบแบบไม่หมุนเวียนเพอมีเทกลับสู่ระบบนั้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลง (Konieczny and Bodzek 1996; Novalic, *et al.*, 1997; and Gesan-Guiziou, *et al.*, 2002)

ดังนั้น แนวคิดของการป้องกันและควบคุมการเกิดฟาวลิง โดยพยายามให้ค่าฟลักซ์คงที่ตลอดการกรองตัวอย่างหางน้ำยาหรือสารอิมัลชันของอนุภาคขานั้น มีการแนะนำให้ใช้หลายเทคนิคร่วมกัน เช่น การเดินระบบที่ค่าฟลักซ์วิกฤตหรือต่ำกว่าซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ดีกว่า และเหมาะสมกว่าการเดินระบบกรองที่ค่าความดันขั้ววิกฤต เพื่อบ่งชี้สภาวะคงที่ของสมรรถนะการกรอง และจากรายงานวิจัยส่วนใหญ่ กล่าวว่า ค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้เป็นอิสระกับค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์เริ่มต้นของเมมเบรน นั่นคือเป็นอิสระกับขนาดรูกรอง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าไม่มีความจำเป็นที่จะเลือกใช้งานเมมเบรนที่มีขนาดรูกรองขนาดใหญ่ นั่นคือ ขนาดของรูกรองที่ใหญ่กว่าจะไม่ส่งผลทำให้ได้ค่าฟลักซ์วิกฤตขณะกรองอนุภาคขามากขึ้น และไม่ช่วยทำให้การกรองมีความคงที่ ซึ่งรูปแบบของการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์วิกฤตร่วมกับการควบคุมค่าความดันที่เกิดขึ้นและการใช้เทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ เช่น การควบคุมค่าความเร็วไหลขวางให้เหมาะสม และเพียงพอในการลดโอกาสการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรน รวมถึงการใช้วิธีการล้างเมมเบรนอย่างเหมาะสม เช่น การใช้สารซักล้างอินทรีย์ (ตัวทำละลายพอลิเมอร์) เช่น methyl ethyl ketone (MEK) โดยการใช้สารซักล้างอินทรีย์ร่วมกับการล้างเชิงกล เช่น การขัดล้างด้วยฟองน้ำทรงกลมให้ประสิทธิภาพที่ดีต่อการฟื้นฟูสภาพชุดกรอง (Novalic, *et al.*, 1997) ซึ่งเป็นข้อพิจารณาหนึ่งเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและสมรรถนะของการเดินระบบกรองที่สูงตามต้องการ

ตารางที่ 1.12 การใช้งานและสภาวะการเดินระบบรูปแบบการกรองแบบไหลขวางเพื่อแยกอนุภาคยาง

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	สมรรถนะ/ประสิทธิภาพ	
epoxidised natural rubber latex (ENR latex)	Polysulfone (PSF) MWCO 20,000 MWCO 25,000 plate and frame membrane MWCO 18,000 MWCO 35,000 tubular membrane ultrafiltration	-	plate and frame membrane 500-600 tubular membrane 100-300	จากการศึกษาการกรอง ENR latex ด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน นั้นพบว่าระดับความเข้มข้นที่ได้มีค่าระหว่าง 60-65% และตัวแปรสำคัญในการเดินระบบที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ คือ ความเข้มข้นของสารป้อน อุณหภูมิ และความดัน นั่นคือฟลักซ์จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น และฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับความดันนั้นฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง ซึ่งได้มีการแนะนำความดันที่เหมาะสมในการทำงานสำหรับเมมเบรนชนิดแผ่น คือ 500-600 kPa ส่วนเมมเบรนที่มีค่า MWCO แตกต่างกันพบว่าการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์สำหรับเมมเบรนที่มีค่า MWCO สูงกว่านั้นเป็นไปอย่างไม่มีนัยสำคัญ	Nambiar, 1993
latex wastewaters	Polyacrylonitrile (PAN) Polysulfone (PSF) tubular membrane ultrafiltration	1-3.5	50-350	เมมเบรนที่ผลิตจาก PAN และ PSF มีความเหมาะสมในการแยกอนุภาคยาง เพอมิเอทฟลักซ์ที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนเมมเบรนต่อโมดูลและรูปร่างของเมมเบรนชนิดโพลิเมอร์ที่บรรจุไว้ นอกจากนี้พบว่าเพอมิเอทฟลักซ์มีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วไหลขวางบนผิวเมมเบรนและความเข้มข้นของยางที่อุณหภูมิของสารป้อนคงที่	Koniczny and Bodzek, 1996

MWCO = molecular weight cut-off (Da)    plate and frame membrane = เมมเบรนชนิดแผ่น    tubular membrane = เมมเบรนชนิดท่อ

ตารางที่ 1.12 (ต่อ) การใช้งานและสภาวะการเดินระบบรูปแบบการกรองแบบไหลขวางเพื่อแยกอนุภาคยาง

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	สมรรถนะ/ประสิทธิภาพ	
SBR-latex emulsion	polyolefin; MWCO 20,000 ceramic; MWCO 50,000 tubular membrane ultrafiltration ceramic; pore size 0.2 $\mu\text{m}$ microfiltration	3-4	100-400	พบว่า SBR-latex emulsion มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 40% DRC และผลของค่า MWCO ต่างๆ ระหว่าง 20,000 50,000 และ 0.2 $\mu\text{m}$ ไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยเพอเมอแฟล็กซ์อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้การเลือกใช้ต้องพิจารณาต้นทุนของเมมเบรนรวมถึงปัจจัยเรื่องอายุการใช้งานของเมมเบรนประกอบด้วย นอกจากนี้เมมเบรนที่อยู่ในช่วงไมโครฟิลเตรชันจะได้ค่าฟลักซ์ขณะกรองเริ่มต้นที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามก็มีโอกาสเกิดการบดลื้อของรูกรองที่สูงกว่าเช่นกัน	Novalic, <i>et al.</i> , 1997
latex suspension	ceramic tubular membrane ultrafiltration 15 and 300 $\text{kgmol}^{-1}$ cut-off microfiltration pore size 0.2 $\mu\text{m}$	0.5-1.5	0-160	ลักษณะการสะสมของอนุภาคจะเกิดขึ้นหลังจากจุดที่เริ่มวิกฤตภายใต้สภาวะต่างๆ (pore diameter, cross-flow velocity, latex concentration, surfactant content) และจากการทดลองพบว่า $J_{crit} / \tau_w$ เป็นเงื่อนไขที่ต้องการสำหรับการกรองที่มีเสถียรภาพซึ่งเหมาะสมมากกว่า $\Delta P_{crit} / \tau_w$ เนื่องจาก $J_{crit}$ เป็นอิสระกับค่าความต้านทานเชิงพลศาสตร์เริ่มต้นของเมมเบรน	Gesan-Guiziou, <i>et al.</i> , 2002

tubular membrane = เมมเบรนชนิดท่อ      MWCO = molecular weight cut-off (Da)       $J_{crit}$  = critical permeation flux ( $\text{l h}^{-1} \text{m}^{-2}$ )  
 $\tau_w$  = shear stress at the membrane wall       $\Delta P_{crit}$  = critical transmembrane pressure (Pa or bar)



ตารางที่ 1.12 (ต่อ) การใช้งานและสภาวะการเดินระบบรูปแบบการกรองแบบไหลขวางเพื่อแยกอนุภาคยาง

ประเภทสารป้อน	สภาวะการเดินระบบ				อ้างอิง
	ชนิดวัสดุ / ลักษณะ / ระดับเมมเบรน	Cross-flow velocity ( m/s )	แรงดันขับ ( kPa )	สมรรถนะ/ประสิทธิภาพ	
skim latex serum	Polyvinylidene fluoride (PVDF) MWCO 100,000 Da tubular membrane ultrafiltration	flow rate 1400 ml/min	89	จากการศึกษาทดลองใช้เทคนิค gas sparging นั้นพบว่ามีประสิทธิภาพในการปรับปรุงกระบวนการกรองแบบไหลขวางสำหรับเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและสามารถลดปรากฏการณ์ฟาวลิงในระหว่างการกรองได้ เนื่องจากการฉีดก๊าซไนโตรเจน หรือ gas sparging นั้นเป็นการกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วนในสารป้อนและเมื่อทำการเปรียบเทียบสภาวะที่ไม่ใช้เทคนิค gas sparging และใช้เทคนิค gas sparging พบว่าเพอเมอทิฟลิกซ์เพิ่มขึ้นจาก 8.29% เป็น 145.33% ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบคือ มีค่า TMP เท่ากับ 89 kPa อัตราการไหลของสารป้อน เท่ากับ 1400 ml/min และอัตราการไหลของ gas sparging เท่ากับ 500 ml/min	Sulaiman and Aroua, 2002
natural rubber latex (NR latex)	Polyvinylidene fluoride (PVDF) MWCO 100,000 Da tubular membrane ultrafiltration	flow rate 250-300 ml/s	250	จากการศึกษาทดลอง พบว่า NR latex มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 30% ไปเป็น 46% DRC โดยใช้ระบบการควบคุมที่เหมาะสม [1.0 % of ammonia, 0.1% ammonium laurate (from 10 % solution) and 0.025%TMTD/ Zinc Oxide (from 50% dispersion with a ratio of 1:1)] เพื่อรักษาเสถียรภาพของยาง สำหรับการเดินระบบด้วย UF และเพื่อขยับช่วงการเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ โดยค่า TMP ที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ 250 kPa ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการยืดระยะเวลาการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงเนื่องจากคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันและชั้นเจล และค่าอัตราการไหลขวางที่เหมาะสมที่สุดคือ 250-300 ml/s	Veerasamy, <i>et al.</i> , สืบค้นจาก <a href="http://www.membrane.unsw.edu.au/imstec03/content/papers/IND/ims tec208.pdf">www.membrane.unsw.edu.au/imstec03/content/papers/IND/ims tec208.pdf</a> .

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาเทคนิคร่วมในการปรับสภาพของหางน้ำยางก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง
- 2) ประเมินประสิทธิภาพและสภาวะการทำงานที่เหมาะสมต่อค่าฟลักซ์ การแยกองค์ประกอบของเนื้อยางและซีรัม
- 3) ศึกษากลไก ปัจจัยที่มีผลต่อระดับการเกิดฟาวลิง และการลดฟาวลิงที่เกิดขึ้น

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้องค์ความรู้และเทคนิคร่วมในการปรับสภาพของหางน้ำยางก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันที่ช่วยให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรองด้วยเมมเบรนมากขึ้น
- 2) ได้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแยกเนื้อยางจากหางน้ำยางด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน
- 3) ได้องค์ความรู้ของสาเหตุและเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับลดฟาวลิงจากการกรองหางน้ำยาง
- 4) ได้ข้อมูลค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่เกิดขึ้นจากการใช้เทคโนโลยี hybrid membrane process จากการทดลอง

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ตั้งเครื่องมือทดลอง/แบบจำลองและทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และวิเคราะห์ตัวอย่าง ณ ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ร่วมกับห้องปฏิบัติการทางพอลิเมอร์ สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ และส่งตัวอย่างวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคยางที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งมีรายละเอียดของการดำเนินการวิจัย ดังนี้

#### 2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การกรองด้วยเยื่อกรองแบบพื้นทางสำหรับการแยกเนื้อยางออกจากหางน้ำยางโดยใช้เทคนิคร่วมในการปรับสภาพหางน้ำยางก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง โดยทดลองในสเกลระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีรายละเอียดของการดำเนินการวิจัย ดังนี้

(1) ศึกษาคุณสมบัติของหางน้ำยางที่ใช้เป็นสารป้อน โดยวิเคราะห์ค่า pH, turbidity, total solids content, dry rubber content, viscosity, COD, VFA, phosphorus (TP), TKN, alkalinity (as  $\text{NH}_3$ ) และ particle size วิเคราะห์ระบุรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 เพื่อให้ได้ข้อมูลลักษณะของหางน้ำยางจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นในจังหวัดสงขลาที่ร่วมวิจัย โดยทำการศึกษาทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างหางน้ำยาง

(2) ทดสอบความพร้อมของระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง (ภาพประกอบที่ 2.1) และชุดเมมเบรน เช่น การรื้อซิม ข้อต่อเชื่อมภายในระบบ และทดสอบหาค่าอัตราการกรองเริ่มต้นของชุดเมมเบรนสะอาดก่อนกรองด้วยสารป้อน พร้อมทั้งทำการศึกษาผลการเติมสารปรับสภาพโดยการใช้น้ำประปา ร่วมกับสารปรับสภาพที่ใช้ในการทดสอบ

(3) ตรวจสอบความพร้อมใช้งานระบบชุดกรองเล็กที่ใช้ร่วมกับเมมเบรนชนิดแผ่น (ภาพประกอบที่ 2.2)

(4) ทดสอบชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test (ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ คือ 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 7-8) โดยเลือกใช้ anionic surfactant 2 ชนิด และ cationic polymer 2 ชนิด ได้แก่ sodium dodecyl (lauryl) sulfate (SDS), sodium polyxyethylene

lauryl ether sulfate (SLES) และ poly aluminium chloride (PACl), polyquaternary amine (PQA) และทดสอบเพิ่มเติมที่ความเข้มข้นของ SDS ที่ปริมาณสูง คือ ความเข้มข้นร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก ที่ pH 8-8.5 โดยใช้กรดต่างชนิดกันในการปรับ pH ทางน้ำยา ( $H_2SO_4$  และ HCl) และทดสอบผลของลำดับการเติม(ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่ใช้ เพื่อเปรียบเทียบผลการรักษาสภาพทางน้ำยาและผลต่อสมรรถนะการกรองเบื้องต้นในชุดกรองเล็กก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน โดยกำหนดวิธีการวิเคราะห์ สภาพะในการทดสอบ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

(5) ทดสอบชนิดสารเคมีในปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ (4) เพื่อหาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับสภาพทางน้ำยาก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง โดยใช้ชุดกรองเล็กขนาดความจุ 150 มิลลิลิตร ที่ใช้ร่วมกับเมมเบรนชนิดแผ่น (เดินระบบกรองแบบทีละครั้ง) ที่ต่อเชื่อมกับถังก๊าซไนโตรเจนเพื่อให้ความดันขณะกรอง (ภาพประกอบที่ 2.2) กำหนดค่าความดันคงที่ที่ 1 บาร์ และกวนสารป้อนขณะกรองที่ความเร็วรอบการกวนต่ำและสูงคือ 150 และ 300 รอบต่อนาที (เพื่อสร้างสภาวะกรองแบบไหลขวางระดับต่ำและระดับปกติ โดยต้องการเปรียบเทียบให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง) และวิเคราะห์พารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 2.4 ในตัวอย่างสารป้อนและเพอมีเอท (ซีรัม)

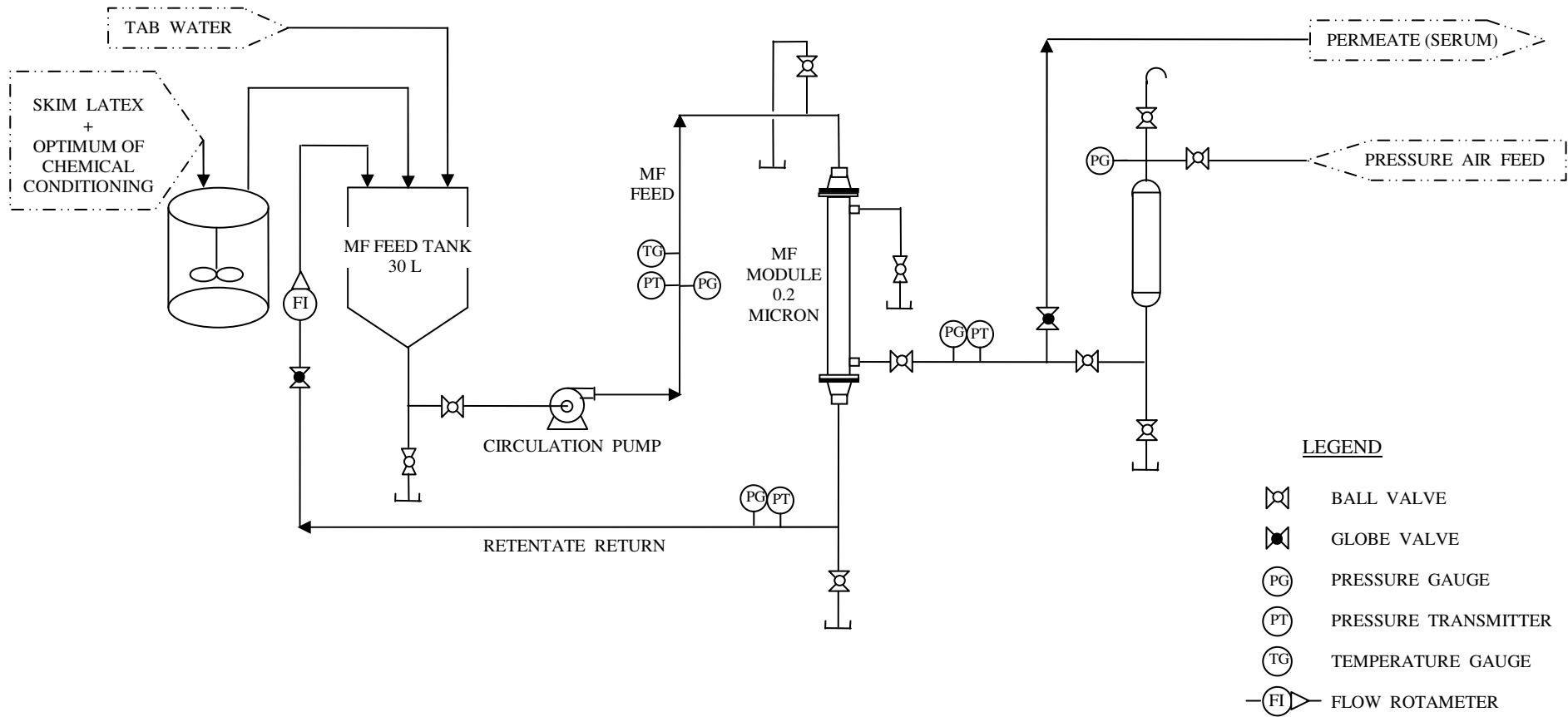
(6) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าฟลักซ์โดยทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) (Field, *et al.*, 1995) เมื่อกรองทางน้ำยา (%DRC ประมาณร้อยละ 5) และน้ำยาที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 10 และ 20 (เจือจางจากน้ำยาสดที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 30) ภายใต้สภาวะการทดลองดังตารางที่ 2.5 ที่ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมเพียงชนิดเดียว สำหรับการปรับสภาพของทางน้ำยา โดยใช้การเดินระบบกรองแบบไหลขวาง และทำการเดินระบบกรองที่ความเร็วไหลขวางคงที่ 3 m/s ที่อุณหภูมิห้อง และเดินระบบแบบต่อเนื่องในเวลา 6-8 ชั่วโมง (เวลาแต่ละรอบการผลิตในอุตสาหกรรมทั่วไป) ที่ค่าฟลักซ์คงที่ 2 ค่า ( $50\% J_{crit}$  และ  $J_{crit}$ ) โดยทำการเดินระบบกรองที่ความเร็วไหลขวาง 3 m/s ที่อุณหภูมิห้อง โดยกำหนดสภาวะการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.6 และศึกษาอัตราการป้อนฟองอากาศ (injection factor,  $\epsilon$ ) โดยเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ความเร็วไหลขวางคงที่ 2 และ 3 m/s ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการป้อนฟองอากาศเท่ากับ 0.6 ดังตารางที่ 2.7 (อัตราการป้อนฟองอากาศ ควรมีค่าระหว่าง  $0.2 < \epsilon < 0.9$  (Cabassud, *et al.*, 2001)) ทั้งนี้จะทำให้เกิดฟองขณะเติมอากาศ ดังนั้นต้องพิจารณาถึงผลต่อการเดินระบบ

(7) ศึกษากลไกการเกิดฟาวลิงและระดับฟาวลิงในชุดการทดลองที่ค่าฟลักซ์คงที่ 2 ค่า และประสิทธิภาพของการล้างชุดเมมเบรนเพื่อฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีการใช้เทคนิคเชิงกล ใช้เทคนิค

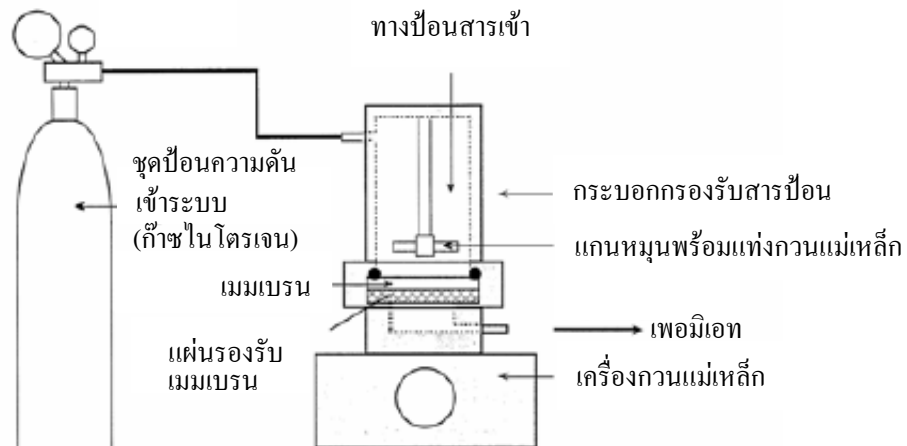
ทางไฮโดรไดนามิกส์ และใช้สารเคมี ในรูปแบบผสมผสานทั้งทางเทคนิคที่เหมาะสม และประหยัด  
ค่าใช้จ่าย

(8) ศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคจากตัวอย่างป้อน ด้วยการวิเคราะห์  
ลักษณะทางกายภาพและเคมีของคุณภาพชีวมวลที่แยกได้ (เพอมีเอท) และส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อไขมัน  
(รีเทนเทท) ดังแสดงวิธีการวิเคราะห์และรายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่  
2.1 และตารางที่ 2.8 ตามลำดับ

(9) ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในเชิงเศรษฐศาสตร์



ภาพประกอบที่ 2.1 แบบจำลองระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง



ภาพประกอบที่ 2.2 แบบจำลองการแยกด้วยเมมเบรนในชุดกรองสเกลระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
pH	Electrometric Method <sup>1</sup>
TKN	Macro - Kjeldahl Method <sup>1</sup>
Turbidity	Nephelometric Method <sup>1</sup>
COD	Closed Reflux Method <sup>1</sup>
Total Phosphorus (TP)	Stannous Chloride Method <sup>1</sup>
Total Solids Content	มาตรฐาน ISO 124 <sup>2</sup> Latex, rubber - Determination of solids content
Alkalinity (as NH <sub>3</sub> )	มาตรฐาน ISO 125 <sup>2</sup> Natural rubber latex concentrate - Determination of alkalinity
Dry Rubber Content	มาตรฐาน ISO 126 <sup>2</sup> Natural rubber latex concentrate - Determination of dry rubber content
VFA	มาตรฐาน ISO 506 <sup>2</sup> Rubber latex, natural, concentrate - Determination of volatile fatty acid number
Viscosity	ใช้เครื่องวัดความหนืด (viscosimeter)
Particle Size	WI-RES-LPSA-001 <sup>3</sup>
Protein	ใช้ spectrophotometer, standard solution of $\alpha$ -globulin

ที่มา: <sup>1</sup> APHA, AWWA, and WEF, 2005

<sup>2</sup> วราภรณ์ ขจรไชยกูล และ พรรษา ช่วยปลั่ง, 2530

<sup>3</sup> ส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตารางที่ 2.2 สภาวะการทดสอบชนิดและปริมาณของสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test

สารป้อน	สภาวะที่กำหนดในการทดสอบ			
	การปรับ pH ด้วยกรด	ความเข้มข้นของ สารเคมีปรับสภาพ (mg/l)	ความเร็วรอบกวนเร็ว (rpm)	ความเร็วรอบกวนช้า (rpm)
1. หางน้ำยาง + SDS	7-8 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0, 2, 4, 6, 8, 10	150 (1 นาที)	40 (20 นาที)
2. หางน้ำยาง + SLES				
3. หางน้ำยาง + PACl		0, 0.3, 0.6, 1, 2, 4 mL*		
4. หางน้ำยาง + PQA				
5. หางน้ำยาง + SDS	8-8.5 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0.5-1% โดยน้ำหนัก		
6. หางน้ำยาง + SDS	8-8.5 (20%HCl)			

หมายเหตุ: การทดสอบแต่ละชุดการทดสอบในข้างต้นจะมีการทำชุดควบคุมทุกครั้ง โดยแต่ละชุดการทดสอบนั้น จะทำซ้ำ 2-3 ครั้ง

\*การทดสอบใช้ความเข้มข้นในหน่วยมิลลิลิตร เนื่องจากไม่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้น และเป็นสารเคมีเกรดทางการค้า หน้าลากไม่ระบุความเข้มข้น (สารเคมีได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงาน)

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์: กรณีศึกษาการปรับสภาพด้วยสารเคมีในชุดทดสอบ Jar Test

พารามิเตอร์	รีเทนเทพ (หางน้ำยางเมื่อสิ้นสุดการกรอง)	ส่วนน้ำใส (ซีรัม+เนื้อยางขนาดเล็ก)
pH	✓	✓
TKN	✓	✓
COD	✓	✓
TP	✓	✓
Turbidity	✓	✓
VFA	✓	✗
Total Solids Content	✓	✗
Dry Rubber Content	✓	✓*
Viscosity	✓	✓*
Alkalinity (as NH <sub>3</sub> )	✓	✓*

\* ทำการวิเคราะห์ในกรณีที่เลือกใช้สารเคมี (ชนิดที่เหมาะสม) คือ สารลดแรงดึงผิว(surfactant)

✓ = พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ✗ = พารามิเตอร์ที่ไม่วิเคราะห์



ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์: กรณีศึกษาการกรองโดยใช้ชุดกรองเล็ก

พารามิเตอร์	สารป้อน (หางน้ำยาก่อนกรอง)	รีเทนเทท (หางน้ำยามื่อสิ้นสุดการกรอง)	เพอมีเอท (ซีรัม)
pH	✓	✗	✓
TKN	✓	✗	✓
COD	✓	✗	✓
TP	✓	✗	✓
Turbidity	✓	✗	✓
Protein	✗	✗	✓
Dry Rubber Content	✓	✓	✗

✓ = พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ✗ = พารามิเตอร์ที่ไม่วิเคราะห์

ตารางที่ 2.5 สภาวะการทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) และค่าความเร็วไหลขวางที่เหมาะสม

ตัวอย่างป้อน	สภาวะที่กำหนดในการทดสอบ	
	ความเร็วไหลขวาง (m/s)	อุณหภูมิ (°C)
หางน้ำยาก (%DRC ≈ 5) + สารเคมีชนิดและปริมาณที่เหมาะสม*	3	อุณหภูมิห้อง
น้ำยาก (%DRC ≈ 10) + สารเคมีชนิดและปริมาณที่เหมาะสม	3	อุณหภูมิห้อง
น้ำยาก (%DRC ≈ 20) + สารเคมีชนิดและปริมาณที่เหมาะสม	3	อุณหภูมิห้อง

\* จากสภาวะที่ได้ภายหลังชุดการทดลองที่กำหนดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.6 สภาวะการทดสอบสมรรถนะการกรองสารป้อนโดยเดินระบบแบบต่อเนื่องในเวลา 6-8 ชั่วโมง

ตัวอย่างป้อน	สภาวะที่กำหนดในการทดสอบ		
	ความเร็วไหลขวาง (m/s)	ฟลักซ์ ( $l/m^2-h$ )	อุณหภูมิ (°C)
หางน้ำยาก + สารเคมีชนิดและปริมาณที่เหมาะสม*	3	50% $J_{crit}$	อุณหภูมิห้อง
		$J_{crit}$	อุณหภูมิห้อง

\* จากสภาวะที่ได้ภายหลังชุดการทดลองที่กำหนดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.7 สภาวะการทดสอบอัตราการป้อนฟองอากาศ

ตัวอย่างป้อน	สภาวะที่กำหนดในการทดสอบ			
	ความเร็วของสารป้อน (m/s)	อัตราการป้อนฟองอากาศ (E)	ความเร็วของแก๊ส (m/s)	อุณหภูมิ (°C)
หางน้ำยาง + สารเคมีชนิดและปริมาณที่เหมาะสม*	2	0.6	3 (29.25 l/min)	อุณหภูมิห้อง
	3	0.6	4.5 (43.88 l/min)	อุณหภูมิห้อง

\* จากสภาวะที่ได้ภายหลังจากการทดลองที่กำหนดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์: กรณีศึกษาการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน

พารามิเตอร์	สารป้อน (หางน้ำยาง)	เพอมีเอท (ซีรัม)	รีเทนเทท (เนื้อเยื่อที่เข้มข้นขึ้น)
pH	✓	✓	✓
Turbidity	✗	✓	✗
Total Solids Content	✓	✓	✓
Dry Rubber Content	✓	✓	✓
VFA	✓	✗	✓
TKN	✓	✓	✗
Viscosity	✓	✗	✓
Protein	✗	✓	✗
Alkalinity (as NH <sub>3</sub> )	✓	✗	✓
TP	✗	✓	✗

## 2.2 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

2.2.1 ตัวอย่างหางน้ำยางที่ใช้ในการทดลอง มาจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นในจังหวัดสงขลาที่ร่วมวิจัย โดยทำการเก็บรักษาไว้ในระบบปิดซึ่ง (แกสลอนพลาสติก)

2.2.2 สารเคมี เครื่องแก้ว และวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังระบุไว้ในตารางที่ 2.1

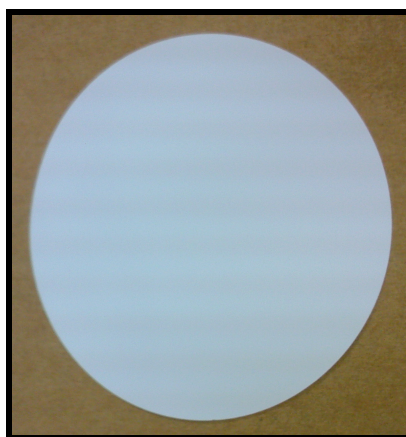
2.2.3 เมมเบรนชนิดแผ่น มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.9 และแสดงดังภาพประกอบที่ 2.3

2.2.4 เมมเบรนท่อกลวง/วัสดุเซรามิกส์ เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์ (เซรามิกส์) สามารถใช้ทำงานในช่วงที่กว้าง เนื่องจากทนอุณหภูมิได้สูง ทนต่อ pH ในช่วงกว้าง และทนต่อ

ความดัน และเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูกรองเฉลี่ย 0.22 ไมโครเมตร (เมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันมีขนาดรูกรองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.1-1 ไมโครเมตร) เนื่องจากถ้าเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูกรองเฉลี่ยใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของสารป้อน (โดยทั่วไปขนาดอนุภาคภายในทางน้ำประมาณ 0.04-0.4 ไมโครเมตร (คัดแปลงจาก [http://www2.envi.psu.ac.th/PSU\\_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSE\\_MINAR\\_latex4.pdf](http://www2.envi.psu.ac.th/PSU_ERC/images/stories/PAO/News%20and%20Events/RUBBERSE_MINAR_latex4.pdf))) ค่าฟลักซ์ที่ได้ในช่วงเริ่มต้นสูง แต่จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดฟาวลิ่งภายในรูกรองของเมมเบรน ซึ่งเมมเบรนที่เลือกใช้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.10 และแสดงดังภาพประกอบที่ 2.4

ตารางที่ 2.9 คุณลักษณะเฉพาะของเมมเบรนชนิดแผ่น

คุณลักษณะเฉพาะ	รายละเอียด
วัสดุ	เซลลูโลสเอสเตอร์ผสม
ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง)	47 มิลลิเมตร
ขนาดรูกรองเฉลี่ย	0.22 ไมโครเมตร
พื้นที่กรอง	11.9 ตารางเซนติเมตร
ค่าความต้านทานเมมเบรน ( $R_m$ )	$2.5 \times 10^6$ เมตร <sup>-1</sup>

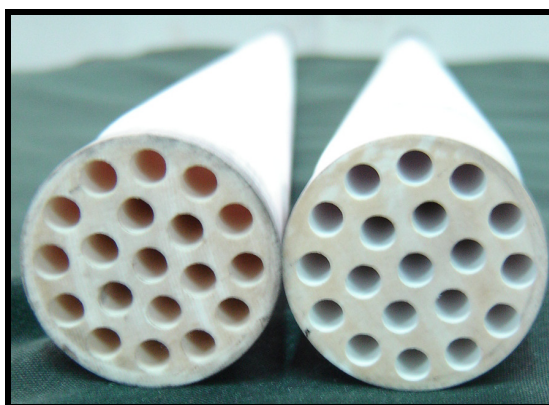


ภาพประกอบที่ 2.3 เมมเบรนชนิดแผ่น (plane organic membrane)

ตารางที่ 2.10 คุณลักษณะเฉพาะของเมมเบรนท่อกลวง

คุณลักษณะเฉพาะ	รายละเอียด
ประเภทเมมเบรน	ท่อกลวง (19 channels)
วัสดุผลิตเมมเบรน	เซรามิกส์
ขนาดรูเปิด	0.22 ไมโครเมตร
พื้นที่กรอง	0.24 ตารางเมตร
อายุการใช้งาน	≈ 5 ปี

หมายเหตุ: เมมเบรนที่ใช้มาจากผู้ผลิตประเทศจีน ซึ่งนำเข้าโดยบริษัท liquid purification engineering



ภาพประกอบที่ 2.4 เมมเบรนประเภทท่อกลวง (tubular modules with multi channel ceramic membrane)

## 2.3 อุปกรณ์

2.3.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างทางน้ำยาง ได้แก่ แกลลอนพลาสติกขนาด 35 ลิตร

2.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

- Spectronic Unicam รุ่น GENESYS 10 UV
- เครื่องกวน Jar Test ผลิตภัณฑ์ PHIPPS & BIRD
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ผลิตภัณฑ์ Chyo รุ่น MJ-3000
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ผลิตภัณฑ์ Chyo รุ่น JK-200
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ผลิตภัณฑ์ HACH รุ่น sension 1
- เครื่องวัดความขุ่น (turbidimeter) ผลิตภัณฑ์ HACH รุ่น 2100 N Turbidimeter
- ตู้อบความร้อนแห้ง (hot air oven) ผลิตภัณฑ์ Memmert

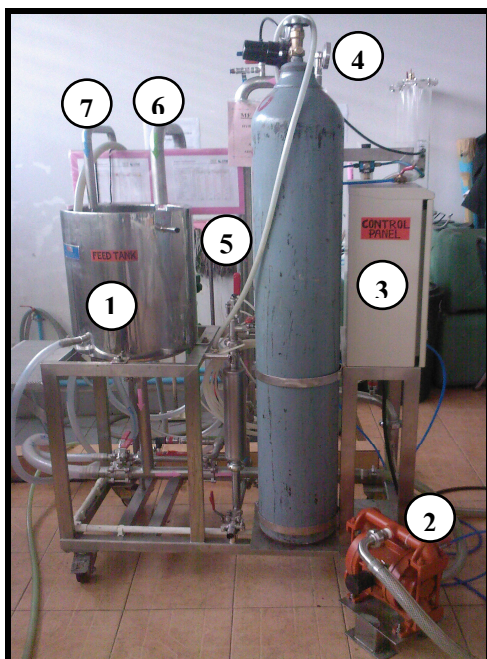
- เครื่องกวนชนิดใช้แม่เหล็ก (magnetic stirrer) และเตาไฟฟ้า (Hot plate) ผลิตภัณท์ Thermolyne รุ่น cimarec® 3
- ชุดกรองบุคเนอร์ (buchner filter)
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump ) ผลิตภัณท์ GAST รุ่น 0823
- ชุดกลั่นแอมโมเนีย (ammonia distillation apparatus) ผลิตภัณท์ VELP SCIENTIFICA รุ่น UDK126A (เพื่อการวิเคราะห์ TKN)
- ชุดย่อยไนโตรเจน (nitrogen digester apparatus) ผลิตภัณท์ VELP SCIENTIFICA รุ่น DK20
- ตู้ดูดความชื้น (desiccator) ผลิตภัณท์ DURAN
- เตาย่อยสลายตัวอย่างสำหรับซีโอดีแบบปิด (COD reactor) ผลิตภัณท์ HACH
- กระจกกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- เครื่องทำระเหยแบบหมุน (rotary evaporator) ผลิตภัณท์ Buchi รุ่น Rotavapor® R-3000
- เครื่องเหวี่ยงตัวอย่าง (centrifuge) ผลิตภัณท์ Hettich Zentrifugen รุ่น Universal 16 R
- เครื่องผสมตัวอย่าง (vortex) ผลิตภัณท์ Thermolyne รุ่น Maxi Max II
- เครื่องวัดความหนืด (viscometer) ผลิตภัณท์ Brookfield รุ่น LVF

### 2.3.3 แบบจำลองระบบฯ และอุปกรณ์ประกอบแบบจำลอง

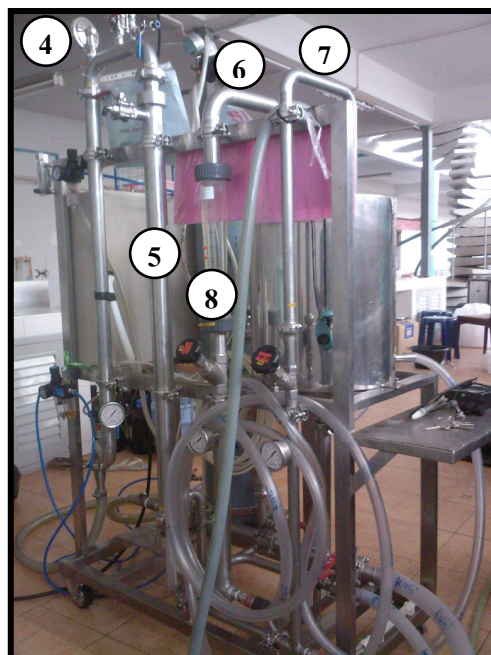
ภาพถ่ายระบบชุดกรองเล็กที่ใช้ร่วมกับเมมเบรนชนิดแผ่น (ภาพประกอบที่ 2.5) และแบบจำลองระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง (ภาพประกอบที่ 2.1) และภาพถ่ายระบบฯ (ภาพประกอบที่ 2.6) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้



ภาพประกอบที่ 2.5 ภาพถ่ายระบบชุดกรองเล็กที่ใช้ร่วมกับเมมเบรนชนิดแผ่น



(ก) ภาพด้านหน้า



(ข) ภาพด้านหลัง

ภาพประกอบที่ 2.6 ภาพถ่ายระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่  
รูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางพร้อมรายละเอียด

ระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง (ภาพประกอบที่ 2.6) มีรายละเอียดเกี่ยวกับระบบฯ ดังต่อไปนี้

- (1) MF Feed tank ถังพักตัวอย่างเข้าระบบ ตัวถังทำด้วยสแตนเลส มีความจุประมาณ 30 ลิตร
- (2) Feed pump ปั๊มส่งตัวอย่างวนระบบ
- (3) Control panel แผงแสดงการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ประกอบ
- (4) Temperature gauge เกจแสดงอุณหภูมิ
- (5) MF module ชุดกรองเมมเบรนขนาด 0.22 ไมโครเมตร ชนิด Tubular modules with multi channel ceramic membrane (ภาพประกอบที่ 2.4) รายละเอียดดังตารางที่ 2.10
- (6) Retentate ส่วนเนื้อเยื่อที่เข้มข้นขึ้น
- (7) Product น้ำซีรัม
- (8) Flow rotameter อุปกรณ์วัดอัตราการไหลกลับของส่วนเนื้อเยื่อที่เข้มข้นขึ้น

### บทที่ 3

#### ผลการศึกษา

#### สมบัติและการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี

ผลการศึกษาในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึง ผลจากการดำเนินการวิจัย เพื่อศึกษาสมบัติและการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี ซึ่งประกอบด้วยผลการศึกษาคุณสมบัติของหางน้ำยาง ผลการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี ผลของสารเคมีต่อการแยกเฟสในหางน้ำยาง และลักษณะอนุภาคยาง ผลของแรงเชิงกลต่อความสูงของเฟสเข้มข้น และผลของอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องต่อสภาพหางน้ำยาง ดังกล่าวรายละเอียดถัดไป

#### 3.1 ศึกษาคุณสมบัติของหางน้ำยาง

เก็บตัวอย่างหางน้ำยางที่ใช้เป็นสารป้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นในจังหวัดสงขลาที่ร่วมวิจัย โดยทำการวิเคราะห์ค่า pH, turbidity, total solids content, dry rubber content, viscosity, COD, VFA, TP, TKN, alkalinity (as  $\text{NH}_3$ ) และ particle size พารามิเตอร์ดังกล่าววิเคราะห์ตามวิธีการ standard method for the examination of water and wastewater 21<sup>th</sup> edition (APHA, AWWA and WEF, 2005) และวิธีการทดสอบน้ำยาง (วารกรณ์ ขจรไชยกุล และ พรธษา ช่วยปล้อง, 2530) ดังตารางที่ 2.1 (บทที่ 2) โดยทำการวิเคราะห์หางน้ำยางทุกครั้งที่เก็บตัวอย่างหางน้ำยางสำหรับการศึกษา โดยเก็บตัวอย่างช่วงเดือนมิถุนายน-ตุลาคม พ.ศ. 2551

ผลการวิเคราะห์สมบัติของหางน้ำยางก่อนการปรับสภาพด้วยสารเคมี (anionic surfactant 2 ชนิด และ cationic polymer 2 ชนิด) สรุปผลแสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่า pH มีค่าเฉลี่ย  $9.55 \pm 0.21$  ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากในการเก็บรวบรวมน้ำยางสดจะมีการเติมแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพน้ำยางและป้องกันการจับตัวกันของเนื้อยาง และลักษณะทางกายภาพของหางน้ำยางในส่วนของ turbidity มีค่าสูง ระหว่าง  $60,000 \pm 4,242$  NTU เนื่องจากอนุภาคยางในหางน้ำยางแขวนลอยอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว (ซีรัม) หลังจากการปั่นแยกด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ในขั้นตอนการทำน้ำยางชั้น โดยขนาดอนุภาคในหางน้ำยางเฉลี่ยเท่ากับ  $0.77 \pm 0.56$  ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดทั่วไปของอนุภาคยางซึ่งมีขนาดระหว่าง 0.05-5 ไมโครเมตร (สมทิพย์ ค่านธีรวณิช และคณะ, 2545) จึงเห็นได้ว่าอนุภาคเนื้อยางในหางน้ำยางมีขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคยางที่แยกได้ในส่วนของน้ำยางชั้น และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่า %TSC ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดในหางน้ำยาง (ปริมาณยางส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในหางน้ำยาง รวมกับ



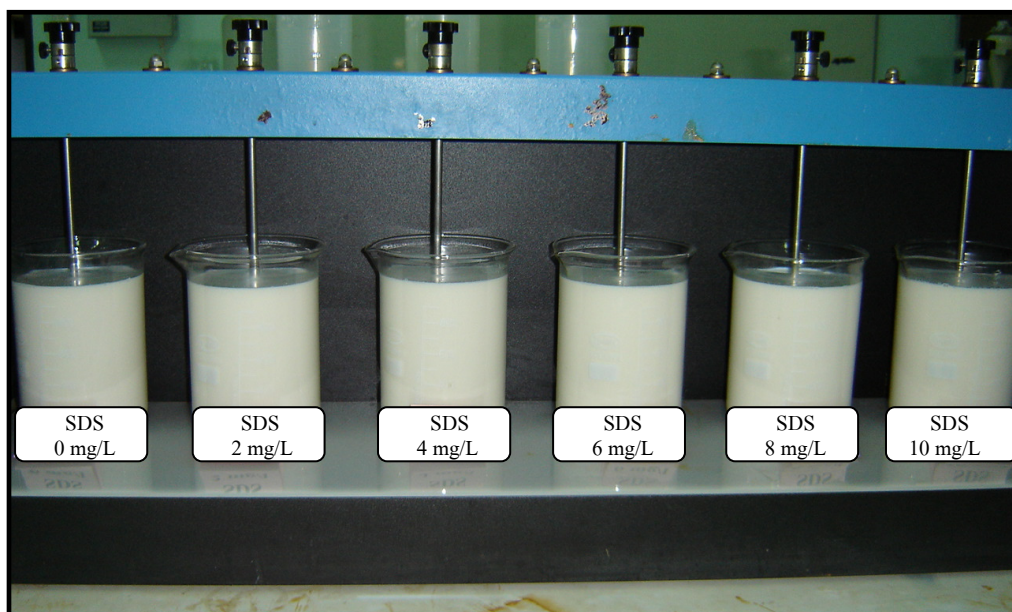
สารอื่นๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่น้ำ) มีค่าร้อยละ  $9.89 \pm 1.57$  ในขณะที่ %DRC ซึ่งแสดงถึงปริมาณ ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อทั้งหมดในหางน้ำยางมีค่าเป็นร้อยละ  $4.69 \pm 1.01$  จึงสรุปได้ว่าส่วนของหางน้ำยาง จะมีส่วนของปริมาณเนื้อเยื่ออยู่น้อย เนื่องจากการแยกเอาเนื้อเยื่อส่วนใหญ่ที่มีขนาดใหญ่ออกใน ขั้นตอนการทำน้ำยางข้น ดังนั้นหางน้ำยางจึงมีส่วนของน้ำในอัตราส่วนที่สูงกว่าเนื้อเยื่อมาก และ จากแนวปฏิบัติทั่วไปที่รักษาสภาพน้ำยางสดด้วยสารละลายแอมโมเนีย ส่งผลให้ส่วนของ หางน้ำยางที่เป็นผลพลอยได้นั้น มีค่า alkalinity  $0.28 \pm 0.02\%$  (as  $\text{NH}_3$ ) ซึ่งเป็นค่าปริมาณต่างอิสระ ทั้งหมดในน้ำยางแสดงเป็นปริมาณแอมโมเนียนั้นและเป็นค่าที่บ่งชี้การรักษาสภาพของน้ำยาง ในขณะที่ค่า VFA บ่งชี้ถึงสถานะการเสถียรภาพ คือ การสูญเสียสภาพการเป็นคอลลอยด์ ซึ่งมี ค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ  $0.008 \pm 0.002$  (น้ำยางสดที่มีคุณภาพควรมีค่า VFA ต่ำกว่าร้อยละ 0.04) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่า COD, TKN และ TP พบว่ามีค่าระหว่าง  $179,682 \pm 31,891$ ,  $1,372 \pm 930$  และ  $61 \pm 34.75$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของ งานวิจัยที่ผ่านมา (Somtip, *et al.*, 2008) และในหางน้ำยางมีปริมาณ โปรตีนรวมระหว่าง  $667 \pm 1.46$  มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของหางน้ำยางก่อนการปรับสภาพด้วยสารเคมี

Parameter	Range	X $\pm$ SD
pH	9.90-9.52	9.55 $\pm$ 0.21
Turbidity (เอ็นทียู)	63,000-54,100	60,000 $\pm$ 4,242
Total Solids Content (เปอร์เซ็นต์)	11.01-6.33	9.89 $\pm$ 1.57
Dry Rubber Content (เปอร์เซ็นต์)	6.09-3.85	4.69 $\pm$ 1.01
Alkalinity (as $\text{NH}_3$ ) (เปอร์เซ็นต์)	0.29-0.26	0.28 $\pm$ 0.02
Particle Size (ไมโครเมตร)	1.63-0.07	0.77 $\pm$ 0.56
Viscosity (เซนติพอยท์)	3.5-3.25	3.44 $\pm$ 0.11
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	218,181-116,129	179,682 $\pm$ 31,891
TKN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,744-714	1,372 $\pm$ 930
TP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	71.28-25.39	61 $\pm$ 34.75
VFA ((เปอร์เซ็นต์)	0.01-0.007	0.008 $\pm$ 0.002
Protein (มิลลิกรัมต่อลิตร)	668-666	667 $\pm$ 1.46

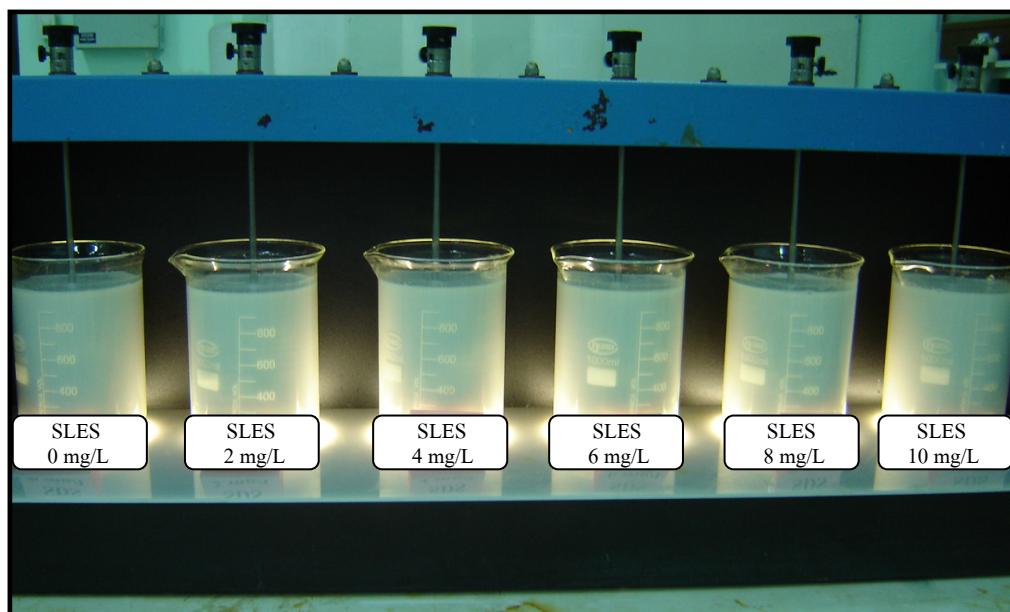
### 3.2 การปรับสภาพทางน้ำด้วยสารเคมี

ศึกษาการปรับสภาพทางน้ำด้วยสารเคมี โดยทดสอบชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test (ที่ pH 7-8) โดยเลือกใช้ anionic surfactant 2 ชนิด และ cationic polymer 2 ชนิด ได้แก่ sodium dodecyl (lauryl) sulfate (SDS), sodium polyxyethylene lauryl ether sulfate (SLES) และ poly aluminium chloride (PACl), polyquaternary amine (PQA) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังภาพประกอบที่ 3.1 โดยกำหนดวิธีการวิเคราะห์ สภาพการทดสอบ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ของบทที่ 2) ซึ่งการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมแต่ละชนิดสำหรับการปรับสภาพทางน้ำมาก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน

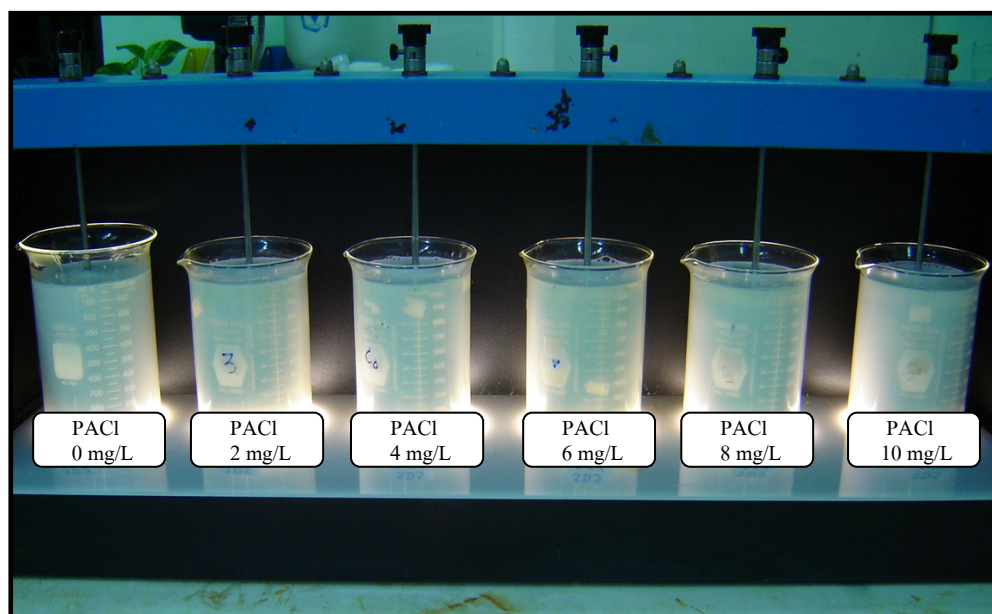


(ก) anionic surfactant ชนิดที่ 1 คือ sodium dodecyl (lauryl) sulfate (SDS)

ภาพประกอบที่ 3.1 ทดสอบชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test

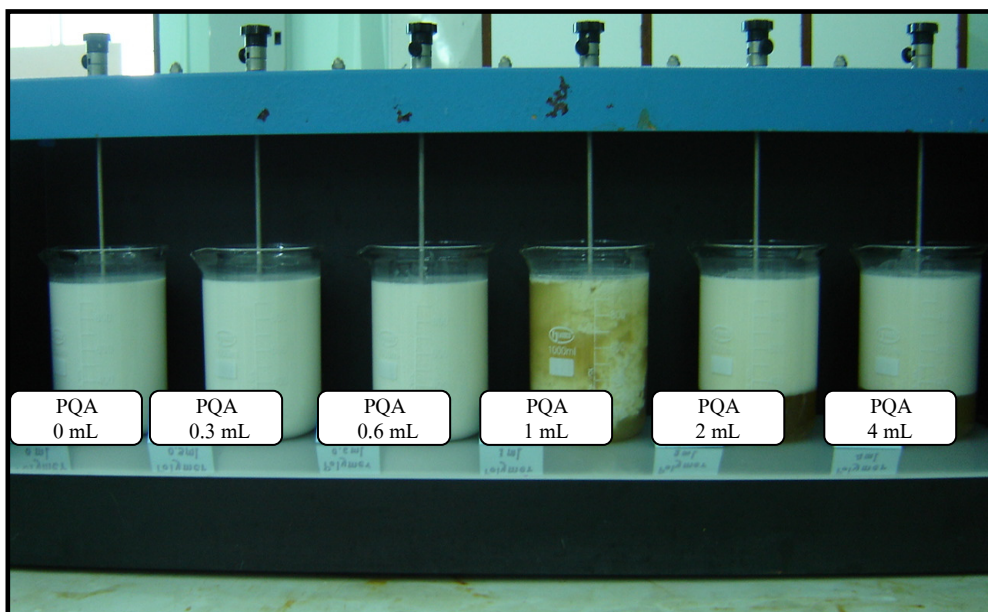


(๗) anionic surfactant ชนิดที่ 2 คือ sodium polyxyethylene lauryl ether sulfate (SLES)



(ค) cationic polymer ชนิดที่ 1 คือ poly aluminium chloride (PACl)

ภาพประกอบที่ 3.1 (ต่อ) ทดสอบชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test



(ง) cationic polymer ชนิดที่ 2 คือ polyquaternary amine (PQA)

ภาพประกอบที่ 3.1 (ต่อ) ทดสอบชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในชุดทดสอบ Jar Test

### 3.2.1 ผลการปรับสภาพทางน้ำด้วยสารเคมี

#### 3.2.1.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ sodium dodecyl (lauryl) sulfate (SDS)

ผลการศึกษาลักษณะทางน้ำขาก่อนและหลังเติมสาร SDS พบว่า ก่อนเติมสาร SDS ทางน้ำขามีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและหลังการเติมสาร SDS แล้วทางน้ำขามีการแยกออกเป็น 2 เฟส คือ เฟสเข้มข้น และเฟสเจือจาง โดยเฟสเข้มข้นพบอนุภาคขนาดใหญ่ (8.063  $\mu\text{m}$ ) กว่าขนาดเฉลี่ยในทางน้ำขาก่อนเติมสาร SDS และเฟสเจือจางประมาณ 11 และ 2 เท่าตามลำดับ เนื่องจากอนุภาครวมกลุ่มเกาะแบบหลวมๆ และความสูงเฟสเข้มข้นที่ปริมาณสาร SDS ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสูงมากที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมสาร SDS ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า ผลการศึกษาลักษณะทางน้ำขาก่อนเติมสาร SDS (ตารางที่ 3.2) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์สมบัติเฟสเข้มข้นกับทางน้ำขาก่อนเติมสาร SDS ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า %DRC turbidity และค่า COD เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.44 (จาก 6.09 %DRC เป็น 6.48 %DRC) ร้อยละ 100 และร้อยละ 10 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงค่า turbidity ในเฟสเจือจาง พบว่าปริมาณสาร SDS ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้เฟสเจือจางมีค่า turbidity ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสาร SDS ที่เติมที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อพิจารณาค่า viscosity และ alkalinity พบว่าทางน้ำขาก่อนการปรับสภาพด้วยสาร SDS มีค่า viscosity ไม่ต่างไปจาก

หาน้ำย้างก่อนการปรับสภาพด้วยสาร SDS มากนัก (จาก 3.5 เซนติพอยท์ เป็น 5 เซนติพอยท์ในการวิเคราะห์ทำการรวมส่วนที่เป็นเฟสเจือจางและเฟสเข้มข้นเข้าด้วยกัน) ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการเติมสาร SDS แทนจะไม่ส่งผลต่อสมบัติของหาน้ำย้าง ส่วนค่า alkalinity มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 74.11 เนื่องจากการตั้งทิ้งไว้ประมาณ 4 ชั่วโมง (ระบบเปิด) เพื่อศึกษาการแยกเฟสของหาน้ำย้างที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร SDS

### 3.2.1.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ sodium polyxyethylene lauryl ether sulfate (SLES)

ผลการศึกษาลักษณะหาน้ำย้างก่อนและหลังเติมสาร SLES พบว่า ก่อนเติมและหลังเติมสาร SLES มีลักษณะในทำนองเดียวกันกับสาร SDS คือ ก่อนเติมสาร SLES หาน้ำย้างมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและหลังการเติมสาร SLES แล้วหาน้ำย้างมีการแยกออกเป็น 2 เฟส โดยในเฟสเข้มข้นพบอนุภาคขนาดใหญ่ ( $8.730 \mu\text{m}$ ) กว่าขนาดเฉลี่ยในหาน้ำย้างก่อนเติมสาร SLES และเฟสเจือจางประมาณ 12 และ 2 เท่า ตามลำดับ ซึ่งที่ปริมาณความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีความสูงของเฟสเข้มข้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมสาร SLES ที่ปริมาณความเข้มข้นอื่นๆที่ทดสอบ โดยตารางที่ 3.3 แสดงถึงผลการศึกษาลักษณะหาน้ำย้างหลังเติมสาร SLES และเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติเฟสเข้มข้นเปรียบเทียบกับหาน้ำย้างก่อนเติมสาร SLES ที่ปริมาณความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่า %DRC turbidity และค่า COD เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 (จาก 3.85 %DRC เป็น 5.01 %DRC) ร้อยละ 64 และร้อยละ 44 ตามลำดับ และพบว่าที่ปริมาณสาร SLES ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้เฟสเจือจางมีค่า turbidity ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบกับปริมาณสาร SLES ที่ความเข้มข้นอื่นๆ และเมื่อพิจารณาค่า viscosity และ alkalinity พบว่าหาน้ำย้างที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร SLES มีค่า viscosity ไม่ต่างไปจากหาน้ำย้างก่อนการปรับสภาพด้วยสาร SLES มากนัก (จาก 3.5 เซนติพอยท์ เป็น 4.3 เซนติพอยท์ ในการวิเคราะห์ทำการรวมส่วนที่เป็นเฟสเจือจางและเฟสเข้มข้นเข้าด้วยกัน) ดังนั้นอาจสรุปได้เช่นเดียวกันว่าการเติมสาร SLES แทนจะไม่ส่งผลต่อสมบัติของหาน้ำย้าง ส่วนค่า alkalinity มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 83.04 เนื่องจากการตั้งทิ้งไว้ (ระบบเปิด) เพื่อศึกษาการแยกเฟสของหาน้ำย้างที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร SLES

### 3.2.1.3 ผลของโพลิเมอร์ประจุบวก Poly aluminium chloride (PACl)

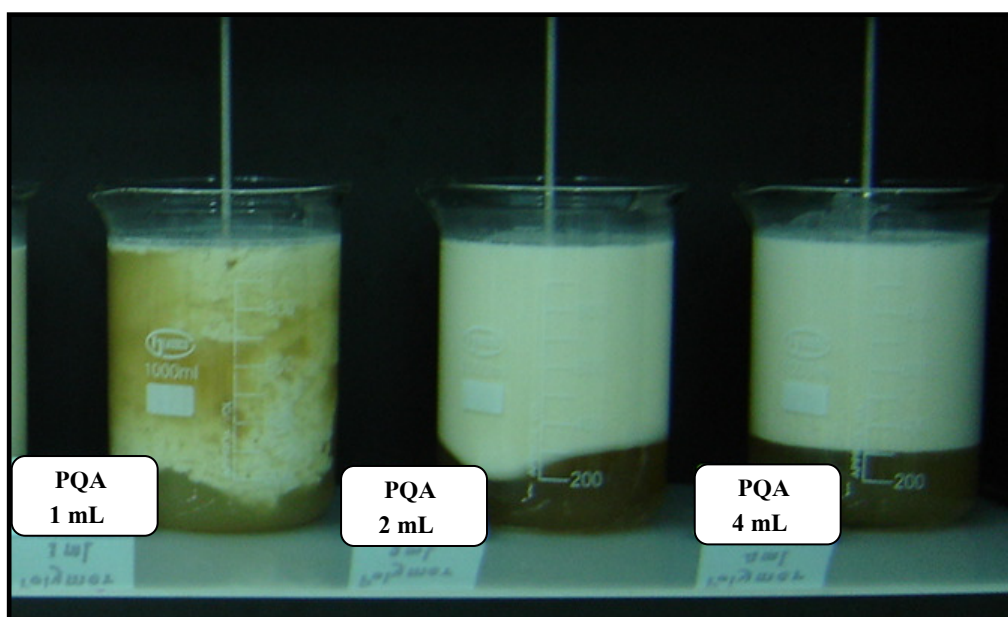
ผลการศึกษาลักษณะหาน้ำย้างก่อนและหลังเติมสาร PACl พบว่า ก่อนเติมสาร PACl นั้นหาน้ำย้างมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและหลังการเติมสาร PACl พบว่าหาน้ำย้างมีการแยกออกเป็น 2 เฟส ซึ่งมีลักษณะในทำนองเดียวกันกับสาร SDS และ SLES เมื่อทำการเปรียบเทียบ

ความสูงของเฟสเข้มข้นที่เกิดขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ พบว่าการเติมสาร PACI ที่ปริมาณความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสูงของเฟสเข้มข้นมากที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคยางเฉลี่ยที่เกิดขึ้น พบว่าขนาดอนุภาคยางเฉลี่ยในเฟสเข้มข้นมีขนาดใหญ่ ( $9.752 \mu\text{m}$ ) กว่าอนุภาคยางเฉลี่ยในทางน้ำยางก่อนเติมสาร PACI และเฟสเจือจางประมาณ 13 และ 1.5 เท่า ตามลำดับ ตารางที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงผลการศึกษาลักษณะทางน้ำยางหลังเติมสาร PACI ผ่านตัวแปรต่างๆ และเมื่อวิเคราะห์สมบัติเฟสเข้มข้นเปรียบเทียบกับทางน้ำยางก่อนเติมสาร PACI ที่ปริมาณความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่า %DRC และ turbidity เพิ่มขึ้นร้อยละ 25 (จาก 3.94 %DRC เป็น 4.93 %DRC) และร้อยละ 23 ส่วนค่า COD มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และที่ปริมาณสาร PACI ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าปริมาณสาร PACI ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้เฟสเจือจางมีค่า Turbidity ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงค่า viscosity และ alkalinity พบว่าทางน้ำยางที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร PACI มีค่า viscosity ไม่ต่างไปจากทางน้ำยางก่อนการปรับสภาพด้วยสาร PACI มากนัก (จาก 3.5 เซนติพอยท์ เป็น 5 เซนติพอยท์ ในการวิเคราะห์ทำการรวมส่วนที่เป็นเฟสเจือจางและเฟสเข้มข้นเข้าด้วยกัน) ดังนั้นอาจสรุปได้เช่นเดียวกันว่าการเติมสาร PACI แทบจะไม่ส่งผลต่อสมบัติของทางน้ำยาง ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกับการเติมสาร SDS และ SLES ส่วนค่า alkalinity มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 82.75 เนื่องจากการตั้งทิ้งไว้ (ระบบเปิด) เพื่อศึกษาการแยกเฟสของทางน้ำยางที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร PACI

#### 3.2.1.4 ผลของโพลิเมอร์ประจวบกว Polyquaternary amine (PQA)

ผลการศึกษาลักษณะทางน้ำยางก่อนและหลังเติมสาร PQA พบว่า ก่อนเติมสาร PQA นั้นทางน้ำยางมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและหลังการเติมสาร PQA พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ (0.3 และ 0.6 มิลลิกรัม) ของการเติมสาร PQA ทางน้ำยางมีการแยกออกเป็น 2 เฟส คือ เฟสเข้มข้นและเฟสเจือจาง และที่ที่ปริมาณการเติมสูง (1, 2 และ 4 มิลลิกรัม) ของสาร PQA พบว่าส่งผลให้ทางน้ำยางเสียสภาพ คือ เนื้อยางในทางน้ำยางมีการจับตัวกันเป็นก้อน (ภาพประกอบที่ 3.2) แยกจากส่วนซีรัมซึ่งมีลักษณะสีเหลือง โดยมีความแตกต่างทางลักษณะกายภาพ เช่น ความใสของซีรัม ซึ่งตารางที่ 3.5 แสดงให้เห็นถึงผลการศึกษาลักษณะทางน้ำยางหลังเติมสาร PQA และเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าโปรตีนในน้ำซีรัม พบว่าหลังเติมสาร PQA ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 มิลลิกรัม มีค่าโปรตีนเท่ากับ  $1,947 \pm 13$ ,  $1,895 \pm 86$  และ  $1,580 \pm 177$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ทำการวิเคราะห์หาค่าโปรตีนในสาร PQA ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 มิลลิกรัม พบว่าค่าโปรตีนในสาร PQA มีค่าประมาณ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับค่าโปรตีนที่วัดได้ในน้ำซีรัมที่เนื้อยางเสียสภาพแยกตัวออกไป ทั้งนี้ปริมาณโปรตีนที่วัดได้สูงใน

น้ำซีรัมที่เนื้อเยื่อสภาพแยกตัวออกไปเมื่อเติมสาร PQA นั้น อาจเกิดจากชั้น โปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยางแตกหรือหลุดไปรวมกับน้ำซีรัมเมื่อเติมสาร PQA ลงไปในหางน้ำยาง (<http://southnfe.go.th/LearnSquare/courses/43/03parakeep002.htm>)



ภาพประกอบที่ 3.2 การเสียดสภาพของหางน้ำยางเมื่อเติมสาร PQA ที่ปริมาณการเติมสูงระหว่าง 1-4 มิลลิลิตร

จากตารางที่ 3.2-3.5 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์หางน้ำยางในสภาวะที่ผ่านการปรับ pH แต่ไม่มีการเติมสารปรับสภาพ (ชุดควบคุมทั้ง 4 ชุด) ให้ผลค่อนข้างต่างกันทั้งในเฟสเข้มข้น และเฟสเจือจาง ทั้งนี้เนื่องจากหางน้ำยางที่ใช้ในการทดสอบเป็นหางน้ำยางที่เก็บจากโรงงานคนละครั้งกัน

ตารางที่ 3.2 ผลการศึกษาลักษณะทางน้ำภายหลังเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (SDS)

Parameter	เฟสเข้มข้น						เฟสเจือจาง					
	0 mg/L <sup>+</sup>	2 mg/L	4 mg/L	6 mg/L	8 mg/L	10 mg/L	0 mg/L	2 mg/L	4 mg/L	6 mg/L	8 mg/L	10 mg/L
pH	7.65*	7.63*	7.62*	7.61*	7.56*	7.31*	-	-	-	-	-	-
Turbidity (เอ็นทียู)	115,000	105,500	115,000	114,500	111,000	120,500	89,150	97,900	92,500	92,000	80,350	80,100
Total Solids Content (เปอร์เซ็นต์)	9.60	9.36	9.76	9.65	9.93	10.02	8.28	8.37	8.27	8.28	8.36	8.10
Dry Rubber Content (เปอร์เซ็นต์)	6.49	6.59	6.11	6.40	6.12	6.48	4.18	4.07	4.08	3.95	3.77	4.54
Alkalinity (as NH <sub>3</sub> ) (เปอร์เซ็นต์)	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07
Particle Size (ไมโครเมตร)	7.88	-	8.77	-	-	8.06	3.94	-	5.21	-	-	3.63
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	198,019	190,099	205,940	205,940	213,861	198,019	190,099	150,495	158,415	174,257	190,099	190,099
TKN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	723	1,283	1,251	709	737	1,465	448	770	714	1,069	625	546
TP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	78.64	78.64	84.69	87.83	81.09	71.21	61.34	72.71	65.99	88.03	52.93	36.98
Viscosity (เซนติพอยท์)	5*	5*	5*	5*	5*	5*	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ: + ที่สาร PQA 0 mg/L มีการปรับ pH ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 7-8 ด้วย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยที่ทางน้ำขังดิบจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่า pH, %TSC, %DRC, Turbidity และ COD ประมาณ

9.55±0.21, 9.89±1.57, 4.69±1.01, 60,000±4,242 และ 179,682±31,891 ตามลำดับ

- Not determined

\* ในการวิเคราะห์ได้ทำการรวมส่วนที่เป็นเฟสเจือจางและเฟสเข้มข้นเข้าด้วยกัน



ตารางที่ 3.3 ผลการศึกษาลักษณะทางน้ำภายหลังเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (SLES)

Parameter	เฟสเข้มข้น						เฟสเจือจาง					
	0 mg/L <sup>+</sup>	2 mg/L	4 mg/L	6 mg/L	8 mg/L	10 mg/L	0 mg/L	2 mg/L	4 mg/L	6 mg/L	8 mg/L	10 mg/L
pH	7.56*	7.54*	7.52*	7.49*	7.5*	7.42*	-	-	-	-	-	-
Turbidity (เอ็นทียู)	81,350	67,000	89,150	73,300	75,450	117,500	65,250	63,250	60,550	59,850	61,800	59,450
Total Solids Content (เปอร์เซ็นต์)	7.99	7.52	8.46	8.29	8.00	8.31	7.25	7.20	7.02	7.14	7.30	7.15
Dry Rubber Content (เปอร์เซ็นต์)	4.42	4.07	5.01	4.71	4.46	4.76	3.56	3.63	3.33	3.50	3.61	3.55
Alkalinity (as NH <sub>3</sub> ) (เปอร์เซ็นต์)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04
Particle Size (ไมโครเมตร)	-	-	8.73	-	-	7.43	-	-	4.27	-	-	6.56
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	154,838	129,032	167,741	141,935	148,387	219,354	109,677	116,129	116,129	103,225	103,225	116,129
TKN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,380	616	1,456	868	2,016	616	812	2,156	1,680	2,072	1,148	1,540
TP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	26.87	28.01	27.74	31.83	35.09	28.28	17.00	23.87	25.18	24.30	18.80	22.29
Viscosity (เซนติพอยท์)	4*	4.3*	4.4*	4.2*	4.4*	4.4*	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : + ที่สาร PQA 0 mg/L มีการปรับ pH ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 7-8 ด้วย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยที่ทางน้ำยาดิบจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่า pH, %TSC, %DRC, Turbidity และ COD ประมาณ

9.55±0.21, 9.89±1.57, 4.69±1.01, 60,000±4,242 และ 179,682±31,891 ตามลำดับ

- Not determined

\* ในการวิเคราะห์ได้ทำการรวมส่วนที่เป็นเฟสเจือจางและเฟสเข้มข้นเข้าด้วยกัน

ตารางที่ 3.4 ผลการศึกษาลักษณะหางน้ำยางหลังเติม โพลีเมอร์ประจุบวก (PACl)

Parameter	เฟสเข้มข้น						เฟสเจือจาง					
	0 mg/L <sup>+</sup>	2 mg/L	4 mg/L	6 mg/L	8 mg/L	10 mg/L	0 mg/L	2 mg/L	4 mg/L	6 mg/L	8 mg/L	10 mg/L
pH	7.62*	7.73*	7.71*	7.68*	7.69*	7.49*	-	-	-	-	-	-
Turbidity (เอ็นทียู)	76,800	82,500	74,250	85,750	90,350	76,350	62,850	49,500	52,400	49,150	58,750	48,450
Total Solids Content (เปอร์เซ็นต์)	8.11	8.15	7.94	8.49	8.29	8.07	6.92	6.93	6.98	6.67	6.81	6.53
Dry Rubber Content (เปอร์เซ็นต์)	5.00	5.06	4.72	5.52	5.09	4.93	3.52	3.54	3.67	3.35	3.51	3.12
Alkalinity (as NH <sub>3</sub> ) (เปอร์เซ็นต์)	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Particle Size (ไมโครเมตร)	-	-	7.00	-	-	9.75	-	-	5.45	-	-	5.98
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	145,454	185,124	119,008	152,066	165,289	132,231	132,231	105,785	112,396	99,173	112,396	112,396
TKN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3,332	3,080	2,296	2,408	532	2,548	2,744	476	3,164	2,100	2,464	3,388
TP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	30.46	59.35	48.77	34.71	48.94	40.82	33.13	42.89	45.67	44.47	25.99	28.23
Viscosity (เซนติพอยท์)	5*	5*	5*	5*	5*	5*	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : + ที่สาร PQA 0 mg/L มีการปรับ pH ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 7-8 ด้วย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยที่หางน้ำยางดิบจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่า pH, %TSC, %DRC, Turbidity และ COD ประมาณ

9.55±0.21, 9.89±1.57, 4.69±1.01, 60,000±4,242 และ 179,682±31,891 ตามลำดับ

- Not determined

\* ในการวิเคราะห์ได้ทำการรวมส่วนที่เป็นเฟสเจือจางและเฟสเข้มข้นเข้าด้วยกัน

ตารางที่ 3.5 ผลการศึกษาลักษณะทางน้ำของหลังเติม โพลีเมอร์ประจุบวก (PQA)

Parameter	เฟสเข้มข้น						เฟสเจือจาง					
	0 mL <sup>+</sup>	0.3 mL	0.6 mL	1 mL	2 mL	4 mL	0 mL	0.3 mL	0.6 mL	1 mL	2 mL	4 mL
pH	7.73*	7.72*	7.67*	7.49*	7.5*	7.47*	-	-	-	-	-	-
Turbidity (เอ็นทียู)	-	85,850	82,250	-	-	-	70,950	62,350	37,900	493.5	130	282.5
Dry Rubber Content (เปอร์เซ็นต์)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.95	4.87	4.88
Particle Size (ไมโครเมตร)	-	-	-	-	-	-	-	0.98	0.91	10.92	7.18	7.07
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	174,545	174,545	-	-	-	167,272	138,181	109,090	50,909	58,181	43,636
TKN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	3,416	3,108	-	-	-	3,332	2,884	1,736	3,136	1,932	1,820
TP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	24.3	24.8	-	-	-	30.7	27.2	19.1	22.9	26.1	21.7
Protein (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,947	1,895	1,580

หมายเหตุ : + ที่สาร PQA 0 mg/L มีการปรับ pH ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 7-8 ด้วย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยที่ทางน้ำยังดิบจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่า pH, %TSC, %DRC, Turbidity และ COD ประมาณ

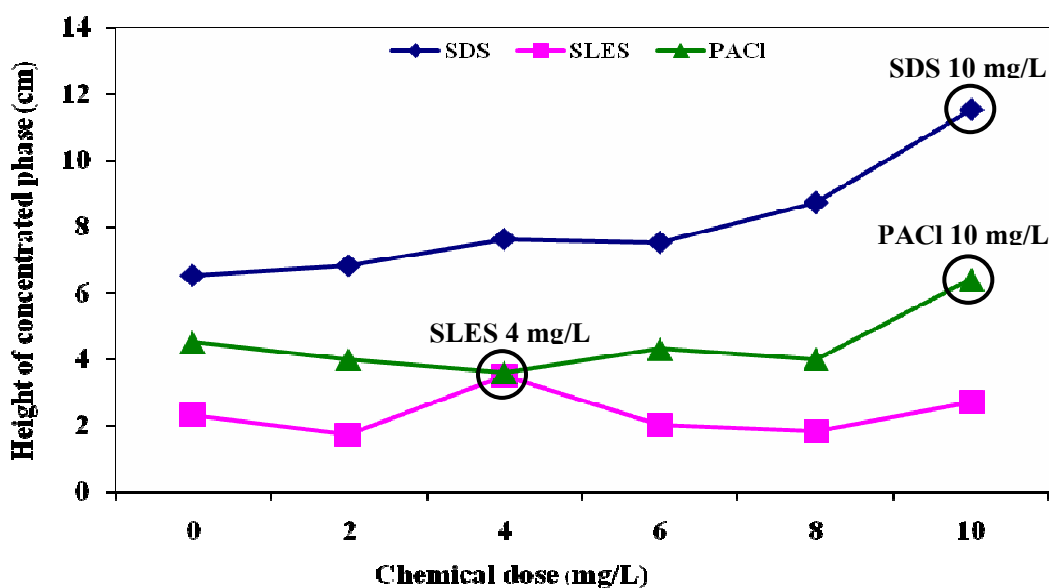
9.55±0.21, 9.89±1.57, 4.69±1.01, 60,000±4,242 และ 179,682±31,891 ตามลำดับ

- Not determined

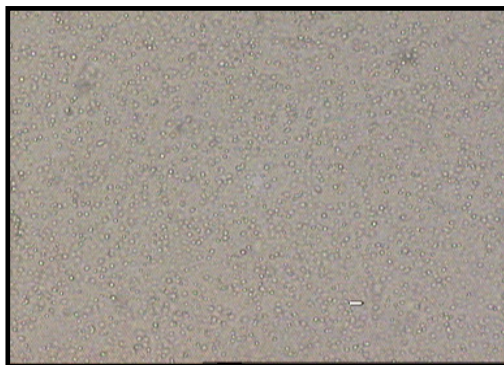
\* ในการวิเคราะห์ได้ทำการรวมส่วนที่เป็นเฟสเจือจางและเฟสเข้มข้นเข้าด้วยกัน

### 3.2.2 ผลของสารเคมีต่อการแยกเฟสในทางน้ำยางและลักษณะอนุภาคยาง

จากการศึกษาโดยใช้ระยะเวลาในการสังเกตประมาณ 4 ชั่วโมง พบว่า ผลของการปรับ pH และการเติมสารเคมี มีอิทธิพลต่อความสูงของเฟสที่แยกได้เป็นส่วนเข้มข้น ซึ่งจากภาพประกอบที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงความสูงของเฟสเข้มข้นที่ปริมาณความเข้มข้นและชนิดสารเคมีที่ทดสอบต่างกัน โดยพบว่าความสูงของเฟสเข้มข้นที่เติม SDS และ PACI ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสูงมากที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มข้นที่ต่ำกว่า และที่ปริมาณความเข้มข้นสาร SLES 4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีความสูงของเฟสเข้มข้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมสาร SLES ที่ค่าความเข้มข้นอื่นๆ และจากภาพประกอบที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบทั้งสองชนิดและโพลีเมอร์ประจุบวกชนิด PACI ดังกล่าวต่ออนุภาคยาง ซึ่งพบว่าการเติมสารเคมีชนิด SDS, SLES และ PACI และมีการปรับ pH ทำให้อนุภาคยางในเฟสเข้มข้นมีการเกาะรวมกลุ่มกันมากขึ้น คือในเฟสเข้มข้นอนุภาคยางจะอยู่รวมกันอย่างหนาแน่นมากกว่าในเฟสเจือจาง และอนุภาคยางบางส่วนในเฟสเข้มข้นจะมีการรวมกลุ่มจับกันเป็นก้อนๆ



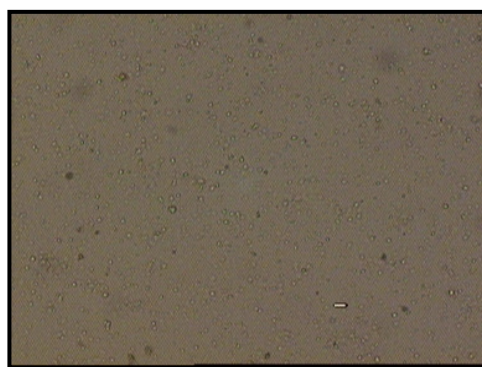
ภาพประกอบที่ 3.3 ความสูงของเฟสเข้มข้นที่เกิดขึ้นเมื่อเติมสารเคมีปรับสภาพที่ปริมาณความเข้มข้นและชนิดต่างกัน



(ก) Һางน้ำยาง



(ข) เฟสเข้มขึ้นปริมาณสาร SDS 10 mg/L



(ค) เฟสเจือจางปริมาณสาร SDS 10 mg/L

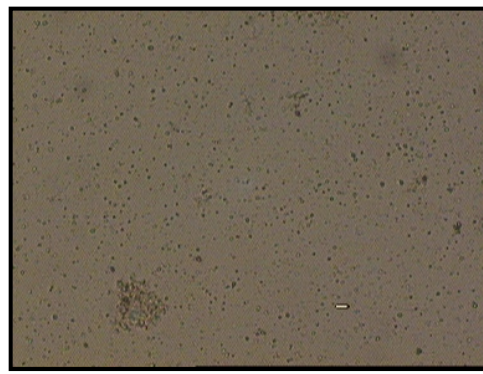


(ง) เฟสเข้มขึ้นปริมาณสาร SLES 10 mg/L



(จ) เฟสเจือจางปริมาณสาร SLES 10 mg/L

**ภาพประกอบที่ 3.4** ภาพแสดงอนุภาคҺางน้ำยางจากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบบ้นที่กภาพที่  
กำลังขยาย 400 เท่า



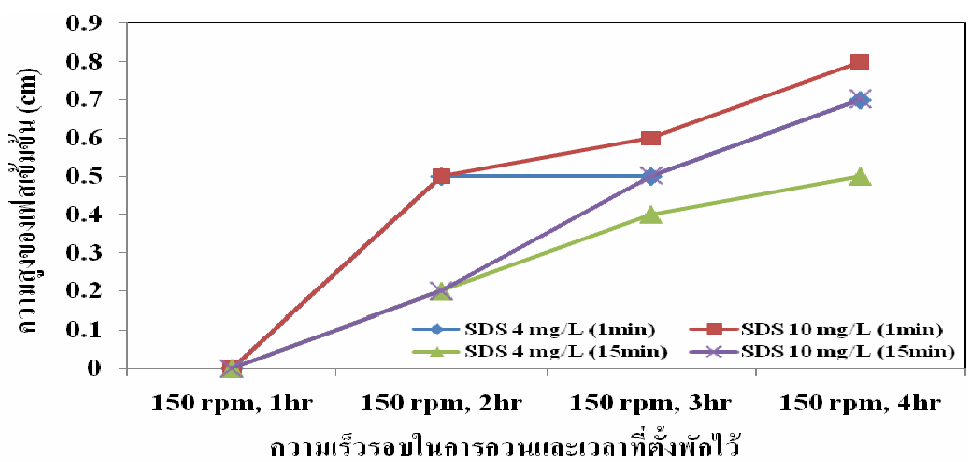
(ก) เฟสเข้มข้นปริมาณสาร PACI 10 mg/L

(ข) เฟสเจือจางปริมาณสาร PACI 10 mg/L

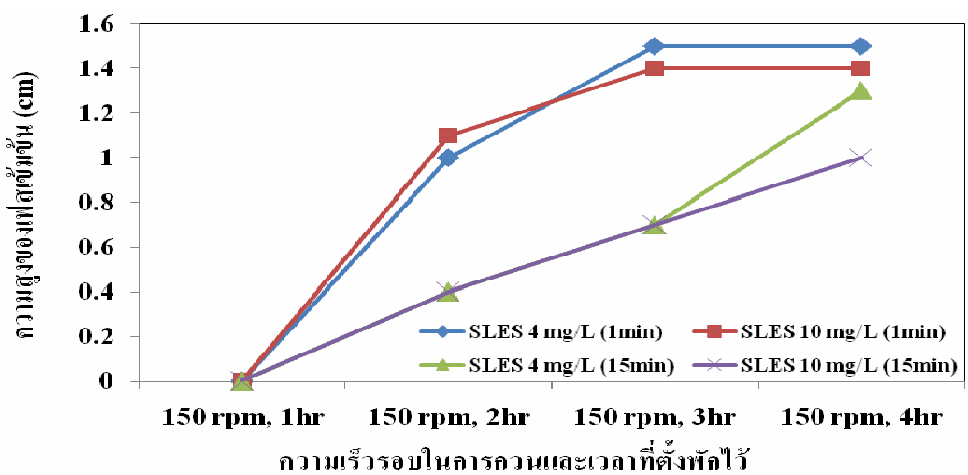
ภาพประกอบที่ 3.4 (ต่อ) ภาพแสดงอนุภาคทางน้ำจากกล้องจุลทรรศน์แบบบันทึกภาพที่ กำลังขยาย 400 เท่า

### 3.2.3 ผลของแรงเชิงกลต่อความสูงของเฟสเข้มข้น

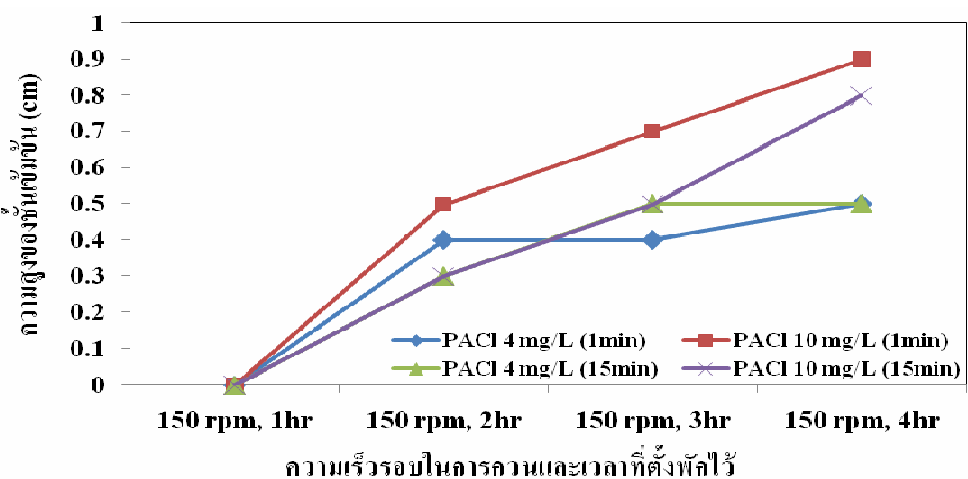
จากการศึกษาอิทธิพลของแรงเชิงกลต่อความสูงของเฟสเข้มข้นเพื่อตรวจสอบว่าการรบกวนเสถียรภาพที่ระยะเวลาในการกวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ทางน้ำอย่างไรที่สภาวะต่างๆ เปลี่ยนไป จากเดิมหรือไม่ เนื่องจากทางน้ำที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีจะมีการนำไปทดสอบต่อในระบบกรองที่มีการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง ซึ่งในการเดินระบบกรองจะมีไหลวนของสารป้อนตลอดเวลา ดังนั้นจึงทำการทดสอบผลของแรงเชิงกลจากการไหลวนของสารป้อนในระบบจะส่งผลต่อเสถียรภาพทางน้ำอย่างไรที่ปรับสภาพแล้วอย่างไร โดยทดสอบกวนทางน้ำผสมเข้ากับสารเคมีที่ความเร็วรอบค่าเดียวตลอดการศึกษา แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการกวนเพิ่มขึ้น ทำการศึกษาทางน้ำที่ผ่านการเติมสารเคมี 3 ชนิด คือ SDS, SLES และ PACI ที่ความเข้มข้นสารเคมี 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการบันทึกความสูงของเฟสเข้มข้น ซึ่งผลการศึกษาแรงเชิงกลต่อความสูงของเฟสเข้มข้น พบว่า แรงเชิงกลมีอิทธิพลต่อความสูงของเฟสเข้มข้นเล็กน้อย ซึ่งจากภาพประกอบที่ 3.5 พบว่าเมื่อทำการรบกวนเสถียรภาพด้วยการกวนอีกครั้งโดยระยะเวลาที่ใช้ในการกวนเพิ่มขึ้นพบว่าที่เวลา 2 ชั่วโมงทางน้ำที่ผ่านการเติมสารเคมีทั้ง 3 ชนิด (SDS, SLES และ PACI ทั้ง 2 ความเข้มข้น) เริ่มกลับมาแยกเฟสเหมือนเดิม แต่ความสูงของเฟสเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าความสูงของเฟสเข้มข้นก่อนการกวนรบกวนเสถียรภาพ และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ความสูงของเฟสเข้มข้นที่ความเข้มข้นสารเคมีทั้ง 2 ค่า ที่สารเคมี 3 ชนิด มีการเพิ่มขึ้นกลับไปใกล้เคียงหรือเท่ากับความสูงของเฟสเข้มข้นก่อนการกวนรบกวนเสถียรภาพ



ก) สาร SDS



ข) สาร SLES



ค) สาร PACI

หมายเหตุ: SDS 4 mg/L (1min) คือ หางน้ำยางเติมสาร SDS 4 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

ภาพประกอบที่ 3.5 ผลของแรงเชิงกลต่อความสูงของเฟสเข้มข้น

### 3.2.4 ผลของอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องต่อสภาพหางน้ำยาง

จากการศึกษาใช้เครื่องเขย่า เขย่าหางน้ำยางผสมเข้ากับสารเคมีที่มีความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาทีและให้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง คือ ที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ SDS ที่ความเข้มข้นสูง คือ ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (ตามด้วยการปรับ pH) มีผลต่อการยืดอายุของหางน้ำยาง คือ ทำให้หางน้ำยางคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ (colloid dispersion) เป็นระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นประมาณ 1 สัปดาห์ ซึ่งพิจารณาจากสภาพทางกายภาพ โดยการสังเกตด้วยตา ซึ่งสภาพปกติของหางน้ำยางที่มีเสถียรภาพ อนุภาคยางจะไม่จับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ และคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ แต่เมื่อเกิดการเสถียรภาพของหางน้ำยางอนุภาคยางจะจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ คล้ายเม็ดพริกแล้วค่อยๆ หนืดขึ้น ในเวลาต่อมายางจะเริ่มเกิดการบวมและมึนกลืนเหม็น

### 3.3 บทสรุป

จากการทดสอบเรื่องการปรับสภาพหางน้ำยางที่ผ่านการปรับก่อนและตามด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ คือ 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ลักษณะหางน้ำยางหลังเติม SDS ที่ค่าความเข้มข้นสูงของช่วงความเข้มข้นต่ำ ผ่านตัวแปรต่างๆ เช่น turbidity, TSC, DRC, COD, TP และ viscosity ไม่มีความแตกต่างกันกับลักษณะหางน้ำยางหลังเติม SDS ที่ค่าความเข้มข้นต่ำของช่วงความเข้มข้นต่ำ และพบว่าหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH และตามด้วยการเติม SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพ หรือคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ของหางน้ำยางไว้ได้ ในขณะที่หางน้ำยางที่เติม SDS ที่ความเข้มข้นสูง คือ ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (ตามด้วยการปรับ pH) สามารถรักษาเสถียรภาพ หรือคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ของหางน้ำยางไว้ได้ดี ดังนั้นจึงขยายผลเพื่อศึกษาต่อ โดยนำสภาวะที่ปริมาณความเข้มข้น SDS สูง ซึ่งเป็นผลที่มีการทดสอบในน้ำยางสดและเป็นค่าที่เหมาะสมกับน้ำยางสด คือ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (เป็นผลวิจัยที่ยังไม่ได้เผยแพร่เรื่องการปรับสภาพน้ำยางสด โครงการวิจัยของ พรทิพย์ ศรีแดงและคณะ) นำมาพิจารณาทดสอบกรองเพิ่มเติมในชุดกรองเล็กขนาดความจุ 150 มิลลิลิตร ดังจะกล่าวรายละเอียดเพิ่มเติมในบทที่ 4 ถัดไป



## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### ประสิทธิภาพและสมรรถนะการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน

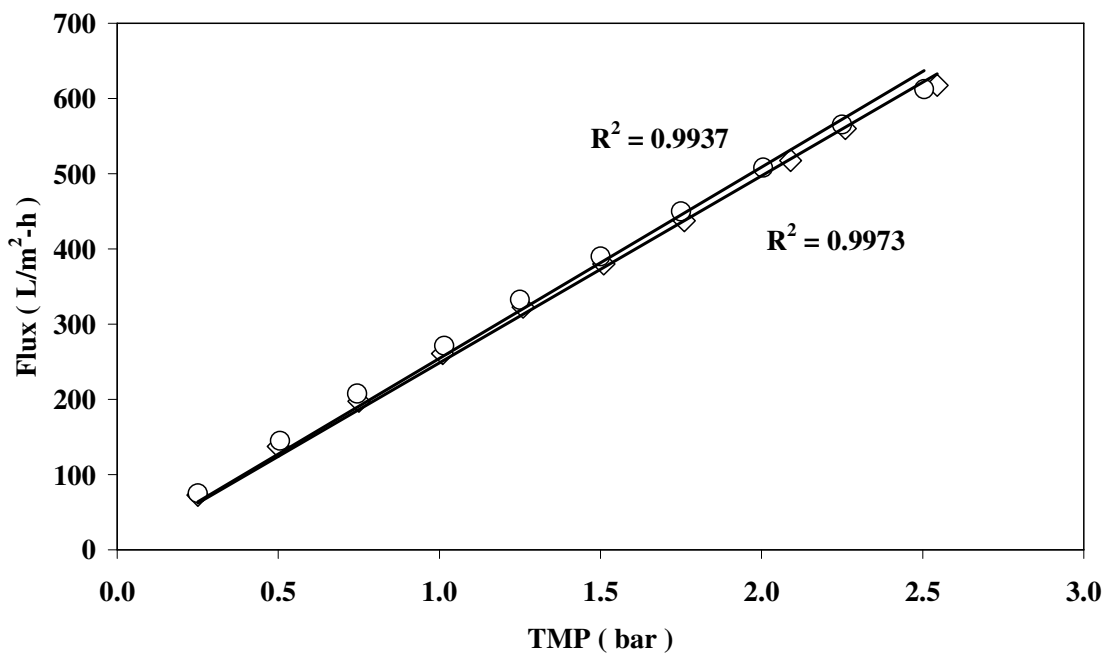
##### 4.1 สภาพการซึมผ่านได้ของชุดเมมเบรนสะอาด (Initial permeability membrane)

การศึกษากการทดสอบสภาพการซึมผ่านได้ของเมมเบรนสะอาดด้วยน้ำประปาสะอาด เพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันส่งผ่านเมมเบรน (transmembrane pressure) และค่าฟลักซ์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงพลศาสตร์ของเมมเบรนก่อนใช้งาน (hydraulic resistance of the membrane ;  $R_m$ ) โดยดำเนินการป้อนน้ำประปาสะอาดผ่านเมมเบรนสะอาดเริ่มต้นที่แต่ละค่าความดันส่งผ่านเมมเบรน(transmembrane pressure ; TMP) และบันทึกค่าฟลักซ์ (flux) ค่าฟลักซ์ที่ได้นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ และค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนเพื่อคำนวณหาค่าต้านทานเชิงพลศาสตร์ของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้งาน (initial hydrodynamic resistance of the membrane ;  $R_{m_i}$ ) ดังสมการที่ (1)

$$J = \frac{TMP}{\mu \cdot R_t} \quad (1)$$

เมื่อ	$J$	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอท ( $m^3/m^2.s$ )
	$TMP$	=	ความแตกต่างของความดัน (Pa)
	$\mu$	=	ความหนืดของเพอมีเอท (Pa.s)
	$R_t$	=	ความต้านทานรวม ( $m^{-1}$ )

โดยภาพประกอบที่ 4.1 แสดงผลการกรองน้ำประปาผ่านเมมเบรนสะอาด 2 ครั้ง ที่แต่ละค่าความดันส่งผ่านเมมเบรน และบันทึกค่าฟลักซ์ เพื่อนำไปใช้คำนวณค่าความต้านทานเชิงพลศาสตร์ของเมมเบรน (hydraulic resistance of the membrane;  $R_m$ ) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.34 \times 10^{11}$  ต่อเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นที่มีการใช้เมมเบรนขนาดรูเปิด 0.22 ไมโครเมตร และเป็นเมมเบรนประเภทท่อกลวง (19 channels) มีค่าความต้านทานเชิงพลศาสตร์ของเมมเบรนเท่ากับ  $2.5 \times 10^{11} - 8 \times 10^{11}$  ต่อเมตร (Decloux, *et al.*, 2007 )



ภาพประกอบที่ 4.1 ผลการทดสอบสภาพซึมผ่านได้ของชุดเมมเบรนสะอาดแบบท่อกลางระดับไมโครฟิลเตรชัน

#### 4.2 การทดสอบการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนในชุดกรองขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความเข้มข้นนํ้าอย่าง

ในระหว่างการดำเนินงานวิจัยนั้น ได้ทดลองนำทางนํ้าYang ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร SDS, SLES และ PACl ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งที่ผ่านการปรับ pH (7-8) และไม่ปรับ pH มาทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนชนิดแผ่น ขนาดรูช่องเปิด 0.22 ไมโครเมตร โดยทดสอบในชุดกรองขนาดความจุ 150 มิลลิตร ดังภาพประกอบที่ 4.2 ที่ต่อเชื่อมกับถังกักเก็บให้ความดันขณะกรอง ในขณะที่การป้อนทางนํ้าYang เพิ่มเข้าไปในระบบ (กำหนดค่าความดันขั้วคงที่ที่ 1 บาร์ และกวนสารป้อนขณะกรอง 150 และ 300 รอบต่อ นาที) บันทึกปริมาณนํ้าซีรัม(เพอมีเอท) สำหรับคำนวณค่าฟลักซ์ขณะกรอง และวิเคราะห์สมบัติทางนํ้าYang ก่อนกรองผ่านพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ pH, turbidity, COD, TKN, TP และ %DRC ส่วนทางนํ้าYang หลังกรองเมื่อสิ้นสุดการกรอง ซึ่งมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นผ่านค่า %DRC และวิเคราะห์สมบัตินํ้าซีรัมผ่านพารามิเตอร์ ได้แก่ pH, turbidity, COD, TKN, TP และ protein (ตารางที่ 2.5)



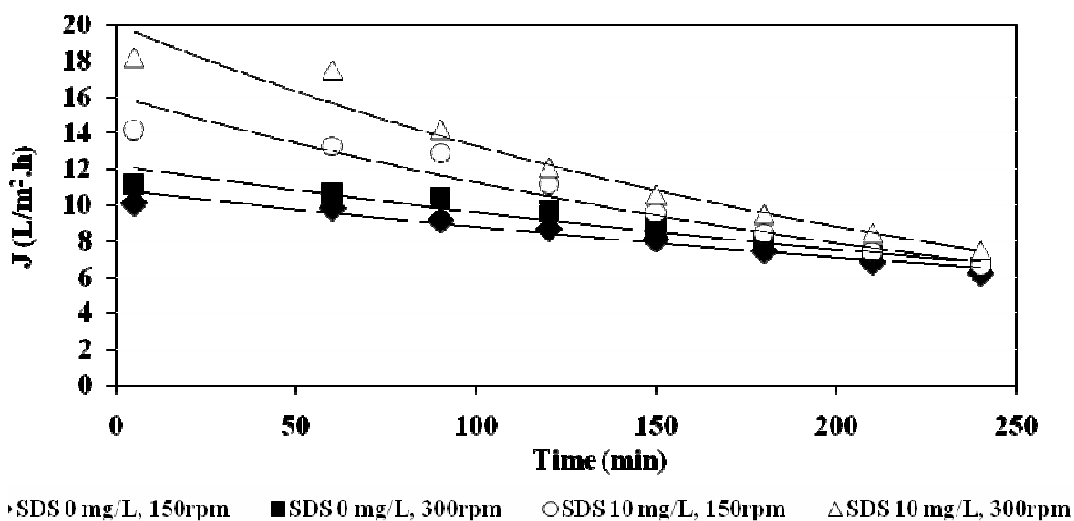
ภาพประกอบที่ 4.2 การแยกด้วยเมมเบรนในชุดกรองขนาดความจุ 150 มิลลิลิตร

#### 4.2.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนชุดกรองขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความเข้มข้นนํ้ายาง

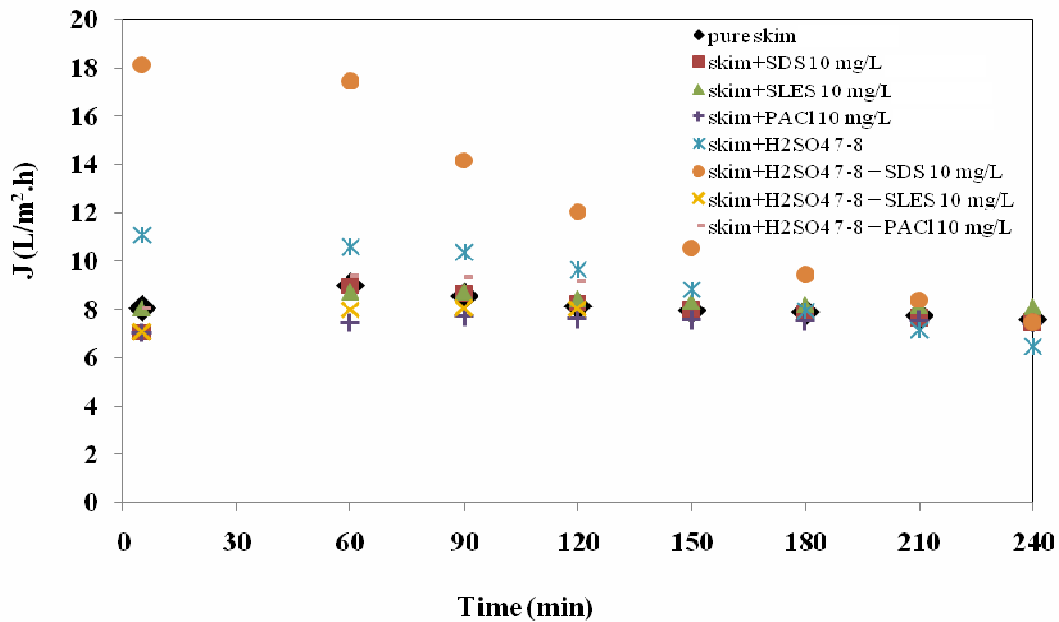
##### 4.2.1.1 ที่ปริมาณ SDS SLES และ PACI ช่วงความเข้มข้นต่ำ (10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

สำหรับผลทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนพบว่า การเติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และการใช้ความเร็วในการกวนขณะกรองส่งผลบวกต่อการเพิ่มและรักษาระดับของค่าฟลักซ์ขณะกรอง โดยทางนํ้ายางที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที มีค่าฟลักซ์เริ่มต้นสูงที่สุด คือ 18.15 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร รองลงมา คือ ทางนํ้ายางที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที มีค่าฟลักซ์เริ่มต้น 14.12 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ทางนํ้ายางที่ไม่เติมสาร SDS กวนที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที มีค่าฟลักซ์เริ่มต้น 11.09 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร และทางนํ้ายางที่ไม่เติมสาร SDS ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที มีค่าฟลักซ์เริ่มต้นต่ำที่สุด คือ 10.08 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ทั้งนี้ค่าฟลักซ์สิ้นสุดการกรองมีค่าใกล้เคียงกัน คือ  $6.69 \pm 0.55$  ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ดังภาพประกอบที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที ส่งผลบวกต่อการเพิ่มและรักษาระดับของค่าฟลักซ์ขณะกรองมากกว่า 150 รอบต่อนาที และเมื่อทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนโดยการเติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทางนํ้ายางที่ไม่ผ่านการปรับ pH ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที พบว่า ค่าฟลักซ์ที่ได้ค่อนข้างคงที่โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7-9 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับทางนํ้ายางที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านการปรับ pH และความเร็วรอบในการกวน

300 รอบต่อนาที ที่ให้ค่าฟลักซ์เริ่มต้นสูงกว่าประมาณ 2 เท่า (ภาพประกอบที่ 4.4) เนื่องจากอนุภาคยางในทางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคยางในทางน้ำยางที่ไม่ผ่านการปรับ pH (ขนาดอนุภาคยางในทางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH มีค่าประมาณ 5.658 ไมโครเมตร และอนุภาคยางในทางน้ำยางที่ไม่ผ่านการปรับ pH มีค่าประมาณ 0.559 ไมโครเมตร) ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีลักษณะการเรียงตัวที่หลวมกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และในทำนองเดียวกันเมื่อทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนโดยการเติมสาร SLES และ PACI 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH และไม่ผ่านการปรับ pH ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที พบว่า ค่าฟลักซ์ที่ได้ค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกับการเติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทางน้ำยางที่ไม่ผ่านการปรับ pH โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7-9 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ดังนั้นในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่า ทางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH และความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นสภาวะการเดินระบบกรองที่ให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนดีกว่าทางน้ำยางที่ไม่ผ่านการปรับ pH



ภาพประกอบที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา ผ่านเมมเบรนขนาดรูช่องเปิด 0.22 ไมโครเมตร ที่ความดันคงที่ 1 บาร์ ความเร็วรอบในการกวน 150 และ 300 รอบต่อนาที ในสภาวะที่ผ่านการปรับ pH (7-8)



ภาพประกอบที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา ผ่านเมมเบรนขนาดรูช่องเปิด 0.22 ไมโครเมตร ที่ความดันคงที่ 1 บาร์ ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที

ผลวิเคราะห์น้ำเพอมีเอท (ซีรัม) ดังตารางที่ 4.1 พบว่า น้ำซีรัมที่ผ่านการปรับ pH มีค่า turbidity ลดลงกว่าร้อยละ 99 เมื่อเทียบกับค่า turbidity เริ่มต้นของหางน้ำยาง โดยมีค่า turbidity เหลืออยู่ประมาณ  $7.8 \pm 3.8$  NTU และไม่มีมีความแตกต่างกันของค่า pH และ TP ในตัวอย่างที่ไม่เติมและเติมสาร SDS เมื่อทดสอบกรองที่ความเร็วรอบต่างกัน ในขณะเดียวกัน พบว่า ไม่มีมีความแตกต่างกันของค่า COD เมื่อทดสอบกรองที่ความเร็วรอบต่างกันทั้งในตัวอย่างที่ไม่เติมและเติมสาร SDS แต่ค่า COD ในน้ำเพอมีเอทของหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH แต่ไม่เติมสาร SDS, SLES และ PACI มีค่ามากกว่าค่า COD น้ำเพอมีเอทของหางน้ำยางที่เติมสาร SDS, SLES และ PACI ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ประมาณ 2 เท่าตัว เพราะในน้ำเพอมีเอทของหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH แต่ไม่เติมสาร SDS, SLES และ PACI มีค่า turbidity มากกว่าน้ำเพอมีเอทของหางน้ำยางที่เติมสาร SDS, SLES และ PACI ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่า turbidity ที่มากกว่านั้นเนื่องจากอนุภาคยางที่เล็ดลอดออกมา ขณะที่มิโปรตีนทั้งหมดอยู่ประมาณ  $406 \pm 79$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันในตัวอย่างน้ำซีรัมที่ผ่านการเติมและไม่เติมสารปรับสภาพ และในน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางในสถานะที่ไม่ผ่านการปรับ pH พบว่ามีค่า Turbidity เหลืออยู่น้อยมาก คือประมาณ  $33 \pm 29$  NTU

เมื่อเปรียบเทียบน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางที่ผ่านการปรับค่า pH กับน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางในสถานะที่ไม่มีการปรับ pH พบว่าค่าโปรตีนรวมของน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางที่ผ่านการปรับค่า pH มีค่าต่ำกว่าน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางในสถานะที่ไม่มีการปรับ pH ประมาณ 1 เท่า ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากกรดที่ใช้ในการปรับค่า pH ( $\text{pH} \approx 7-8$  ด้วยกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เนื่องจากโปรตีนที่อยู่ในน้ำซีรัมจะเปลี่ยนเป็นประจุบวก ในขณะที่โปรตีนที่ผิวอนุภาคยางมีการเปลี่ยนไปเป็นประจุบวกอย่างช้าๆ ทำให้อนุภาคยางดึงโปรตีนในน้ำซีรัมเข้ามาหา จึงส่งผลให้ค่าโปรตีนในน้ำซีรัมลดลง (สิวโรฒ บุญราศรี, 2543) โปรตีนในน้ำซีรัมที่ผ่านการกรองทุกสถานะที่ทดสอบส่วนใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 25-40 กิโลดาลตัน (ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์การกรองโดยใช้ชุดกรองเล็ก (ในสถานะที่เต็มและไม่เต็มสารปรับสภาพ)

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์																				
	pH			Turbidity (NTU)			COD (mg/L)			TKN (mg/L)			TP (mg/L)			Protein (mg/L)			DRC (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Skim latex + 7-8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 150 rpm	7.65	-	7.55	60,000	-	13.26	168,627	-	29,630	1,176	-	756	67	-	30.4	-	-	362	6.1	14.4	-
Skim latex + 7-8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 300 rpm	7.65	-	7.49	60,000	-	12.0	168,627	-	29,630	1,176	-	462	67	-	27.8	-	-	324	6.1	16.0	-
Skim latex + 7-8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +10 mg/L SDS, 150 rpm	7.59	-	7.55	60,000	-	5.36	160,784	-	14,815	1,218	-	1,134	52	-	33.7	-	-	330	6.1	17.0	-
Skim latex + 7-8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +10 mg/L SDS, 300 rpm	7.59	-	7.41	60,000	-	5.07	160,784	-	14,815	1,218	-	714	52	-	35.8	-	-	440	6.1	21.8	-
Skim latex + 7-8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +10 mg/L SLES,300rpm	7.53	-	7.42	60,000	-	5.52	116,129	-	17,591	-	-	-	-	-	-	-	-	519	-	-	-
Skim latex +7-8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +PAC110 mg/L,300 rpm	7.58	-	7.40	60,000	-	5.48	158,678	-	16,328	-	-	-	-	-	-	-	-	460	-	-	-

หมายเหตุ: 1 คือ สารป้อน (หางน้ำยาก่อนกรอง)

2 คือ สารป้อน (หางน้ำยากในชุดกรอง เมื่อสิ้นสุดการกรอง)

3 คือ เพอมีเอท (ซีรัม)

- Not determined

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลวิเคราะห์การกรองโดยใช้ชุดกรองเล็ก (ในสถานะที่เต็มและไม่เต็มสารปรับสภาพ)

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์																				
	pH			Turbidity (NTU)			COD (mg/L)			TKN (mg/L)			TP (mg/L)			Protein (mg/L)			DRC (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Skim latex ไม่ปรับ pH, 300 rpm	9.76	-	9.45	63,600	-	33.4	217,218	-	21,192	2,156	-	1,316	15.4	-	2.6	-	-	667	4.8	8.6	-
Skim latex + SDS 10 mg/L, ไม่ปรับ pH, 300 rpm	9.63	-	9.37	-	-	13.5	-	-	26,490	-	-	1,232	-	-	4.1	-	-	736	-	8.1	-
Skim latex +SLES 10 mg/L, ไม่ปรับ pH, 300 rpm	9.66	-	9.28	-	-	74.4	-	-	26,490	-	-	1,344	-	-	4.7	-	-	812	-	8.6	-
Skim latex+PACl 10 mg/L, ไม่ปรับ pH, 300 rpm	9.56	-	9.34	-	-	11.4	-	-	21,192	-	-	1,428	-	-	3.8	-	-	744	-	8.1	-

หมายเหตุ: 1 คือ สารป้อน (หางน้ำขางก่อนกรอง)

2 คือ สารป้อน (หางน้ำขางในชุดกรอง เมื่อสิ้นสุดการกรอง)

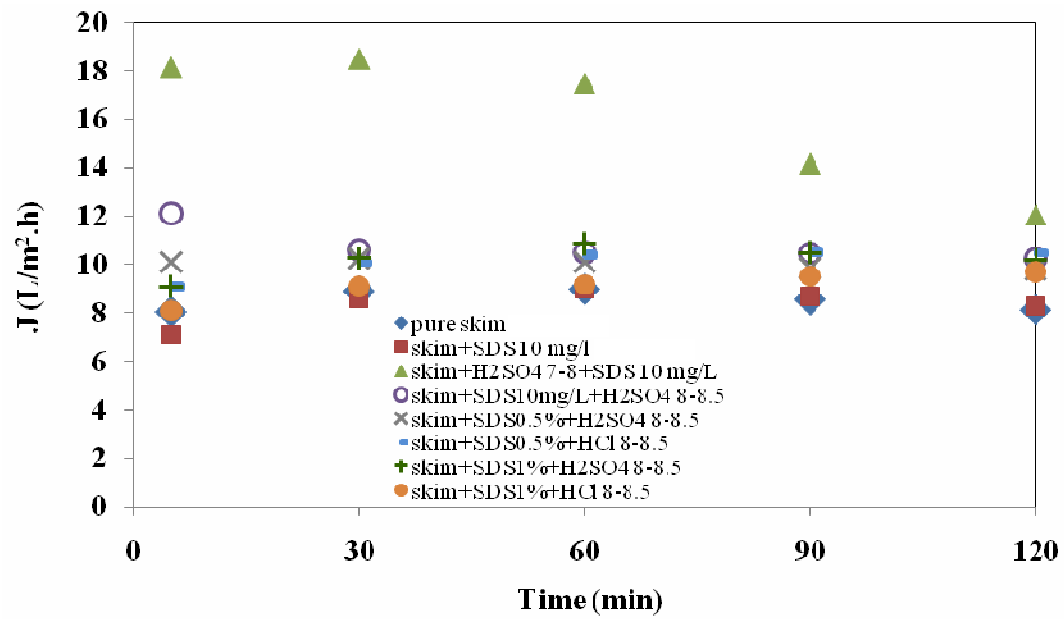
3 คือ เพอมีเอท (ซีรัม)

- Not determined



#### 4.2.1.2 ที่ปริมาณ SDS ช่วงความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก)

จากการทดสอบเพิ่มเติมที่ความเข้มข้นของ SDS ที่ปริมาณสูง ซึ่งศึกษาผลของลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) สารปรับสภาพและปริมาณสารปรับสภาพชนิด SDS ที่ความเข้มข้นสูงต่อเสถียรภาพหางน้ำยาง โดยใช้กรดต่างชนิดกันในการปรับ pH หางน้ำยาง และลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่ใช้สำหรับการปรับสภาพของหางน้ำยาง โดยแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง คือ (1) หางน้ำยางปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 7-8 ด้วย  $H_2SO_4$  และตามด้วยการเติม SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (2) หางน้ำยางเติม SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตรก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย  $H_2SO_4$  (3) หางน้ำยางเติม SDS ร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย  $H_2SO_4$  และ (4) หางน้ำยางเติม SDS ร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl ซึ่งผลวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของหางน้ำยางก่อนการปรับสภาพด้วยสารเคมี มีค่า turbidity, TSC, DRC, viscosity, COD, TKN และ TP ระหว่าง  $60,000 \pm 4,242$  NTU, ร้อยละ  $9.89 \pm 1.57$ , ร้อยละ  $6.09 \pm 0.06$ ,  $3.44 \pm 0.11$  เซนติพอยท์,  $179,682 \pm 31,891$ ,  $1,372 \pm 930$  และ  $61 \pm 34.75$  มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 3.1) และเมื่อทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรน พบว่า การปรับสภาพหางน้ำยางด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก) รวมถึงลำดับการเติม SDS ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ( $H_2SO_4$  และ HCl) ส่งผลต่อการรักษาระดับของค่าฟลักซ์ขณะกรองให้มีความสม่ำเสมอ คือ มีค่าอยู่ในช่วง 8-10 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ดังภาพประกอบที่ 4.5 และเมื่อพิจารณาถึงการเสถียรภาพของหางน้ำยางร่วมด้วย พบว่า หางน้ำยางที่เติม SDS ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl สามารถคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ (colloid dispersion) ได้ยาวนานและดีที่สุด และจากผลวิเคราะห์น้ำเพอมีเอท (ซีรัม) ดังตารางที่ 4.2 พบว่า ค่า turbidity และ COD ของหางน้ำยางที่ปรับสภาพด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก) มีค่าสูงกว่าหางน้ำยางที่ปรับสภาพด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ (2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทั้งนี้เนื่องมาจากประจุลบของ SDS และอนุภาคยาง จึงส่งผลให้มีการผลึกกันมากขึ้นระหว่างประจุ ดังนั้นจึงมีอนุภาคยางบางส่วนผสมออกมาพร้อมน้ำซีรัมขณะกรอง เนื่องจากค่า turbidity ของน้ำเพอมีเอทมีค่า  $550 \pm 346$  NTU ซึ่งสูงกว่าค่า turbidity ในเพอมีเอทของหางน้ำยางที่เติม SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพประกอบที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา ผ่านเมมเบรนขนาดรูช่องเปิด 0.22 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ SDS ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก) ความดันคงที่ 1 บาร์ ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที

**ตารางที่ 4.2** ผลวิเคราะห์การกรองโดยใช้ชุดกรองเล็ก\* (ความเข้มข้น SDS ที่ปริมาณสูง และ ลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่ใช้ต่างชนิดกัน)

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์									
	pH		Turbidity (NTU)		COD (mg/L)		TKN (mg/L)		Protein (mg/L)	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Skim latex + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH 7-8) +SDS 10mg/l	-	7.41	-	5.1	-	14,815	-	714	-	440
Skim latex +SDS 10 mg/l + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH 8-8.5)	8.40	8.20	-	3.4	239,080	18,391	3,724	2,688	-	377
Skim latex +SDS 0.5% + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH 8-8.5)	8.46	8.21	-	377	211,494	45,977	3,500	3,416	-	322
Skim latex +SDS 0.5% + HCl (pH 8-8.5)	8.58	8.36	-	154	239,080	36,782	3,836	3,164	-	456
Skim latex +SDS 1% + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH 8-8.5)	8.49	8.25	-	762	202,299	55,172	4,116	3,500	-	420
Skim latex +SDS 1% + HCl (pH 8-8.5)	8.35	8.21	-	907	211,494	36,782	3,584	2,856	-	317

หมายเหตุ: 1 คือ สารป้อน (หางน้ำยางในชุดกรองเมื่อสิ้นสุดการกรอง)

2 คือ เพอมิเอท (ซีรัม)

- Not determined

\* เป็นผลวิเคราะห์เมื่อกรองและกวนหางน้ำยางที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

#### 4.2.2 การวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง

เมื่อนำข้อมูลผลการกรองจากการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนในชุดกรองขนาดเล็กมา 1 ชุดข้อมูล ในส่วนของหางน้ำยางที่มีการเติมสาร SDS และผ่านการปรับ pH ก่อนและหลังด้วยสารเคมีต่างชนิดกันมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบสมการ (Hu and Scott; 2008) และอธิบายดังภาพประกอบที่ 4.6 (Vela, *et al.*, 2008) เพื่ออธิบายกลไกการเกิดฟาวลิง ได้แก่ การอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking) การอุดปิดรูกรองแบบมาตรฐาน (gradual pore blocking or standard pore blocking) การกรองขณะที่มีการสะสมหรือเกิดฟาวลิงบางส่วนภายในรูช่องเปิดของเมมเบรน (intermediate filtration) และ การกรองบนชั้นเค้กสะสมบนเมมเบรน (cake filtration) โดยเมื่อค่าความดันในการกรองคงที่รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงทั้ง 4 สามารถอธิบายได้ดังสมการ (4.1), (4.2), (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ

1. การอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking)

$$\ln(J^{-1}) = \ln(J_0^{-1}) \quad (4.1)$$

2. การอุดปิดรูกรองแบบมาตรฐาน (gradual pore blocking or standard pore blocking)

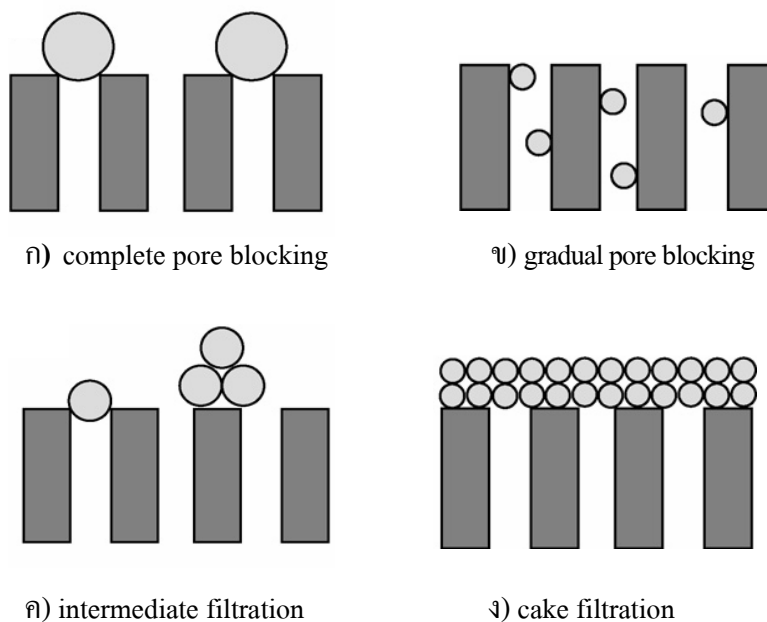
$$J^{-0.5} = J_0^{-0.5} + k_s t \quad (4.2)$$

3. การกรองขณะที่มีการสะสมหรือเกิดฟาวลิงบางส่วนภายในรูช่องเปิดของเมมเบรน (intermediate filtration)

$$J^{-1} = J_0^{-1} + k_i t \quad (4.3)$$

4. การกรองบนชั้นเค้กสะสมบนเมมเบรน (cake filtration)

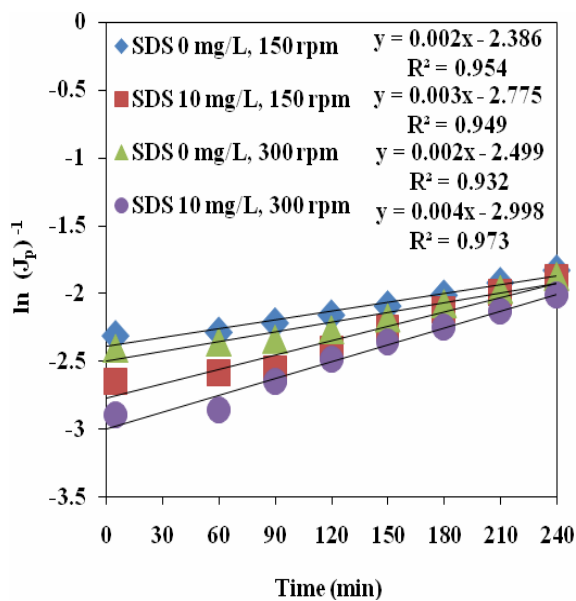
$$J^{-2} = J_0^{-2} + k_c t \quad (4.4)$$



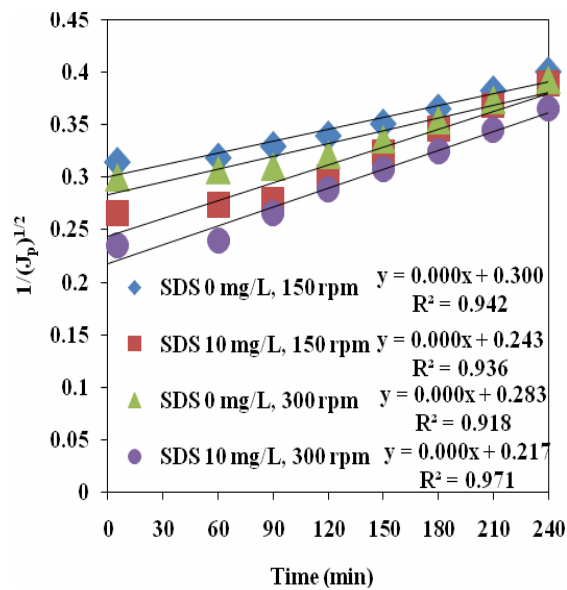
ภาพประกอบที่ 4.6 รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง

ที่มา: Vela, *et al.*, 2008

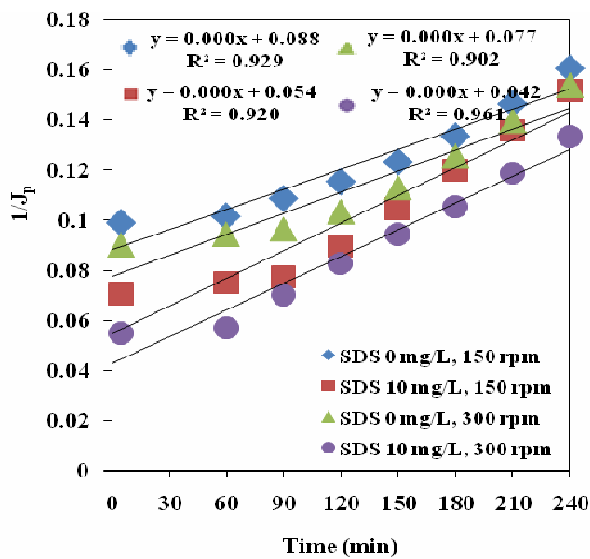
จากการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงขณะกรองหาน้ำยาขี้ผึ้งที่เติมกรด  $H_2SO_4$  ก่อนเติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่เติมสาร SDS ในสภาวะความดันคงที่ที่ 1 บาร์ เปรียบเทียบกับการกรองหาน้ำยาขี้ผึ้งที่มีการเติมกรดต่างชนิด คือ  $H_2SO_4$  และ HCl หลังจากการเติมสาร SDS ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาที่ใช้ในการกรองตามรูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบสมการ (ดังภาพประกอบที่ 4.7 และ 4.8) ซึ่งพบว่า ณ เวลา  $t = 0$  ค่าฟลักซ์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบสมการนั้นให้ค่าดังตารางที่ 4.3



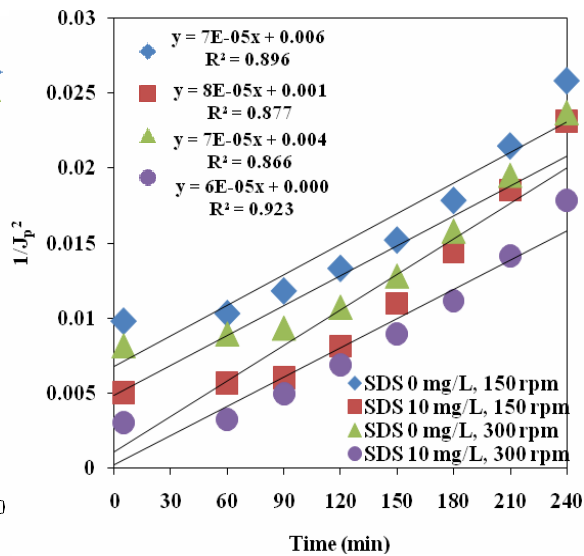
ก) complete pore blocking



ข) gradual pore blocking

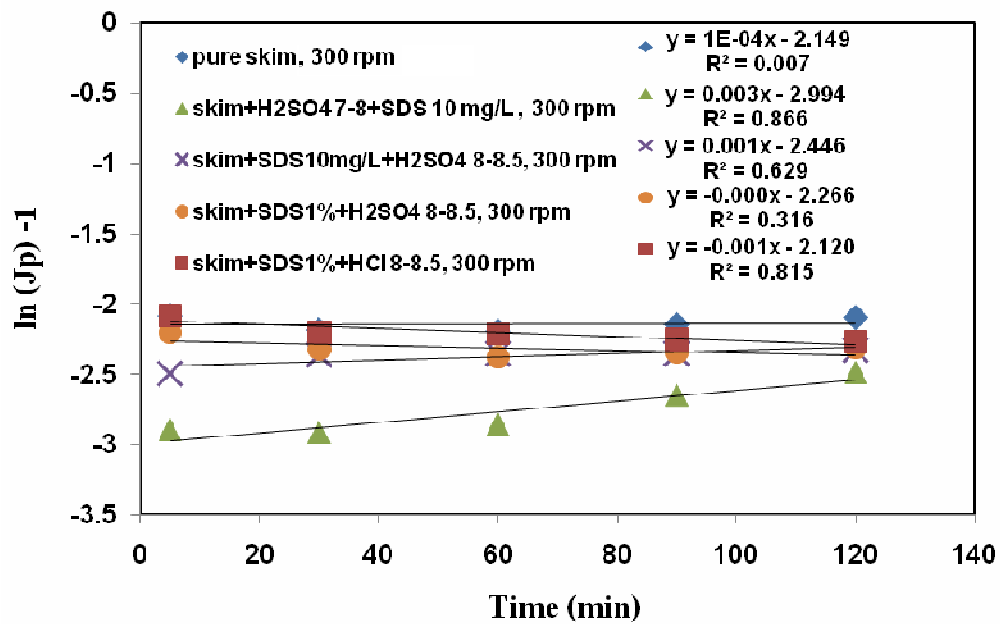


ค) intermediate filtration

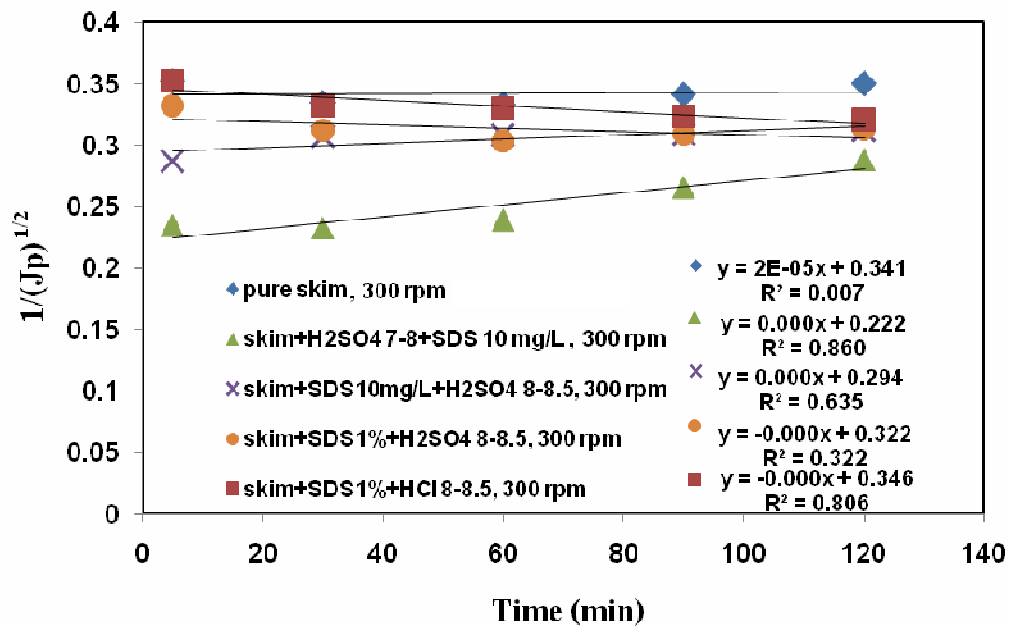


ง) cake filtration

ภาพประกอบที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา สำหรับการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง 4 รูปแบบสมการ (ปรับ pH ด้วย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> มีค่า pH 7-8)

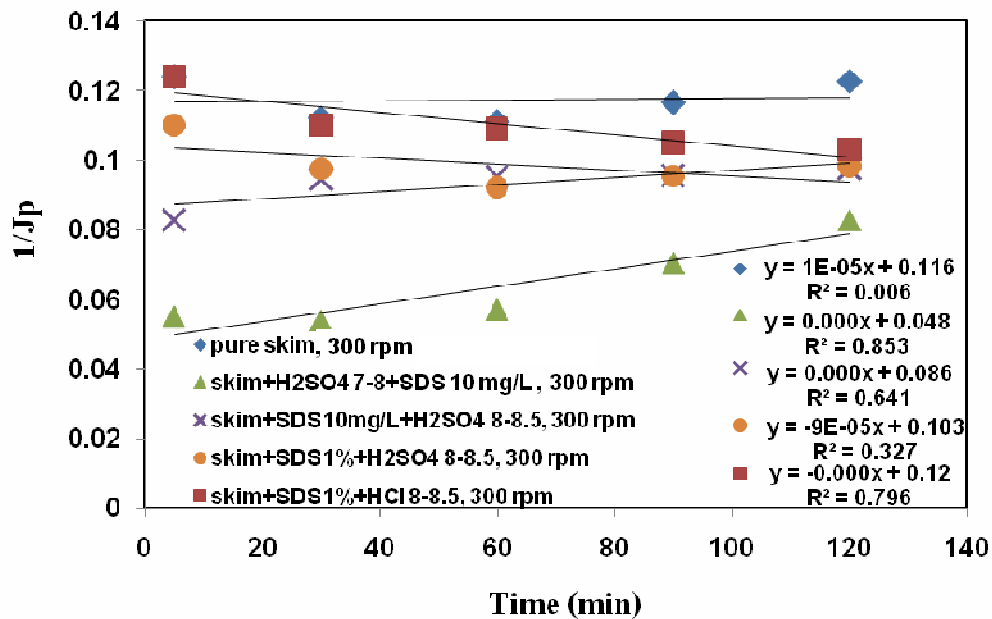


ก) complete pore blocking

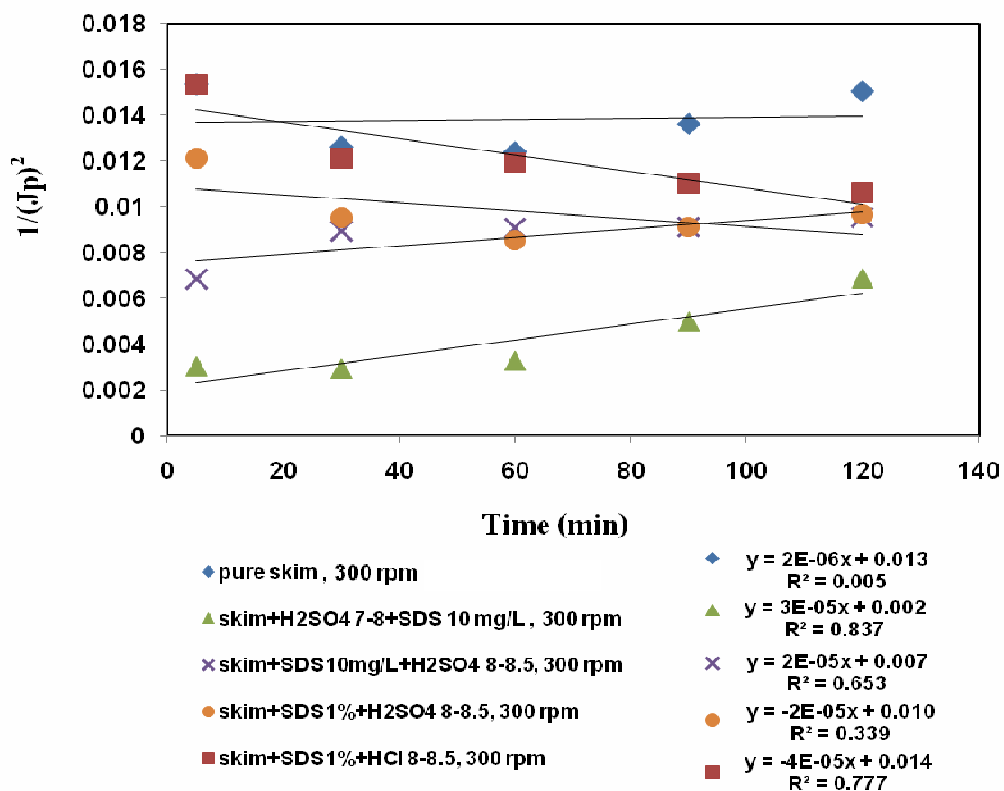


ข) gradual pore blocking

ภาพประกอบที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา สำหรับการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง 4 รูปแบบสมการ (กรดต่างชนิดกัน ลำดับการเติมสาร (ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่ใช้เพื่อปรับสภาพต่อหางน้ำยา)



ก) intermediate filtration



ง) cake filtration

ภาพประกอบที่ 4.8 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับช่วงเวลา สำหรับการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง 4 รูปแบบสมการ (กรดต่างชนิดกัน ลำดับการเติมสาร (ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่ใช้เพื่อปรับสภาพต่อหางน้ำยาง)



ตารางที่ 4.3 ค่าฟลักซ์จากการประมาณ โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบสมการ ณ เวลา  $t = 0$

ลำดับการปรับสภาพ ทางน้ำยางและสถานะ ทดสอบ	ค่าฟลักซ์ เริ่มต้นจาก การทดลอง ( $L/m^2-h$ )	ค่าฟลักซ์จากการประมาณ ณ เวลา $t = 0$ ( $L/m^2-h$ )			
		complete pore blocking	Gradual pore blocking	intermediate filtration	cake filtration
skim+ $H_2SO_4$ (pH 7-8) +SDS 0 mg/L,150 rpm	10.08	10.87	11.11	11.36	12.91
skim+ $H_2SO_4$ (pH 7-8) +SDS 0 mg/L,300 rpm	11.09	12.17	12.49	18.52	31.62
skim+ $H_2SO_4$ (pH 7-8) +SDS 10 mg/L,150 rpm	14.12	16.04	16.94	12.99	15.81
skim+ $H_2SO_4$ (pH 7-8) +SDS 10 mg/L,300 rpm	18.15	20.05	21.24	23.81	-
pure skim, 300 rpm	8.07	8.58	8.60	8.62	8.77
skim+SDS10mg/L+ $H_2SO_4$ (pH 8-8.5), 300 rpm	12.10	11.54	11.57	11.63	11.95
skim+SDS1%+ $H_2SO_4$ (pH 8-8.5), 300 rpm	9.08	9.64	9.64	9.71	10.00
skim+SDS1%+HCl (pH 8-8.5), 300 rpm	8.07	8.33	8.35	8.33	8.45

เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์เริ่มต้น ( $J_0$ ) จากการทดสอบตรงกับค่าฟลักซ์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบสมการ (เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์ตลอดช่วงเวลากการกรองเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิ่งอาจไม่แม่นยำนัก เนื่องจากเมื่อเริ่มทำการกรองแบบต่อเนื่องจะเกิดฟาวลิ่งหลายรูปแบบร่วมกัน ดังนั้นจึงใช้ข้อพิจารณาที่ค่าฟลักซ์เริ่มต้น ( $J_0$ ) เนื่องจากค่าฟลักซ์เริ่มต้นเป็นค่าฟลักซ์ที่สูงสุดที่เกิดขึ้น โดยยังไม่เกิดฟาวลิ่งบนผิวหน้าเมมเบรน (Hu and Scott; 2008)) (ตารางที่ 4.3 ) พบว่า ค่าฟลักซ์ ณ เวลา  $t = 0$  จากการประมาณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ (1) คือรูปแบบการอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking) มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์เริ่มต้นที่ได้จากการทดสอบกรองมากที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงค่าความคลาดเคลื่อนของค่าฟลักซ์เริ่มต้นจากการทดสอบตรงกับค่าฟลักซ์ที่ได้จากการประมาณ โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ พบว่า ในสถานะที่ไม่เติมสาร SDS มีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างร้อยละ 7.84-8.74 และในสถานะที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10.47

โดยรูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาว์ลิงขณะกรองหางน้ำยางทุกสภาวะที่ทดสอบมีแนวโน้มสอดคล้องกับรูปแบบการอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking) นั่นคือ ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับรูช่องเปิดของเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่บริเวณรูช่องเปิดของเมมเบรน ซึ่งสัมพันธ์กับผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคยาง (WI-RES-LPSA-001) ในสภาวะที่ทำการทดสอบกรอง โดยสภาวะที่ไม่เติมสาร SDS มีขนาดอนุภาคยางเฉลี่ย  $5.91 \pm 2.78$  ไมโครเมตร และสภาวะที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีขนาดอนุภาคยางเฉลี่ย  $5.85 \pm 3.13$  ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดรูช่องเปิดของเมมเบรน 0.22 ไมโครเมตร เห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคยางมีขนาดใหญ่กว่ารูช่องเปิดเฉลี่ยของเมมเบรน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดรูช่องเปิดของเมมเบรนที่ผลิตขึ้นไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของขนาดรูช่องเปิดซึ่งทำให้แต่ละแผ่นเมมเบรนมีทั้งรูช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่และเล็กกว่า 0.22 ไมโครเมตร

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาว์ลิงขณะกรองหางน้ำยางที่มีการใช้กรดต่างชนิดกัน ในการปรับ pH หางน้ำยาง และลำดับการเติมสาร (ก่อน-หลัง) SDS (ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) และ กรดที่ใช้เพื่อปรับสภาพต่อหางน้ำยางพบว่า เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์เริ่มต้น ( $J_0$ ) จากการทดสอบกรองกับค่าฟลักซ์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบสมการ (ตารางที่ 4.3 ) พบว่า ค่าฟลักซ์ ณ เวลา  $t = 0$  จากการประมาณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ (1) คือรูปแบบการอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking) มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์เริ่มต้นที่ได้จากการทดสอบกรองมากที่สุดทุกสภาวะ ยกเว้นสภาวะที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย  $H_2SO_4$  ที่พบว่า ค่าฟลักซ์ ณ เวลา  $t = 0$  จากการประมาณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ (4) คือรูปแบบการกรองบนชั้นเค้กสะสมบนเมมเบรน (cake filtration) มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์เริ่มต้นที่ได้จากการทดสอบกรองมากที่สุด ดังนั้นรูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาว์ลิงขณะกรองหางน้ำยางทุกสภาวะที่ทดสอบมีแนวโน้มสอดคล้องกับรูปแบบการอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking) ยกเว้นสภาวะที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย  $H_2SO_4$  ที่มีรูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาว์ลิงสอดคล้องกับรูปแบบการกรองบนชั้นเค้กสะสมบนเมมเบรน (cake filtration) ซึ่งรูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาว์ลิงขณะกรองหางน้ำยางทุกสภาวะมีลักษณะเด่นที่สอดคล้องกับรูปแบบปรากฏการณ์ฟาว์ลิงดังที่กล่าวไว้ และมีลักษณะรองร่วมกับรูปแบบอื่นๆ

### 4.2.3 การวิเคราะห์ฟาวลิงโดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\alpha W$ )

เมื่อนำข้อมูลผลการกรองจากการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนในชุดกรองขนาดเล็กที่มีการกวนสารป้อนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นการกรองแบบไหลขวางที่ค่าต่ำๆ ซึ่งขณะกรองจนถึงสิ้นสุดกรองรูปแบบของฟาวลิงที่ปรากฏมักพบรูปแบบเด่นและรูปแบบอื่นร่วมด้วย โดยการสะสมตัวของอนุภาคยงที่มีขนาดใหญ่กว่ารูกรองเมื่ออุดตันรูกรองทั้งหมดแล้วก็จะเกิดการสะสมเป็นชั้นเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\alpha W$ ) เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะการปรับสภาพหาน้ำยาล้างด้วย SDS ที่ปริมาณและลำดับการเติมต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\alpha W$ ) เป็นค่าที่คำนวณจากทฤษฎีการกรองบนชั้นเค้ก ดังสมการที่ (4.5) (Stridang, *et al.*, 2008 ) โดยค่าความชันของกราฟเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/V$  และ  $V$  ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณและแทนค่าในสมการที่ (4.5) เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\alpha W$ )

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \times \alpha \times W}{2 \times \Delta P \times \Omega^2} \times V + \frac{\mu \times R_m}{\Delta P \times \Omega} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $W$  = ความเข้มข้นของ โมเลกุลและอนุภาค ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$T$  = เวลา (s)

$\Delta P$  = ค่าความดันผ่านเมมเบรน (Pa)

$\alpha$  = ความต้านทานจำเพาะ ( $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$R_m$  = ความต้านทานเริ่มต้นของเมมเบรน ( $\text{m}^{-1}$ )

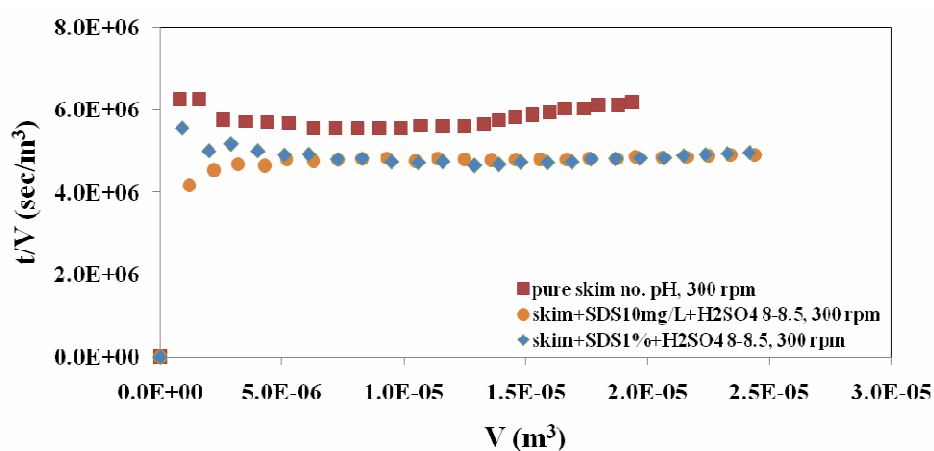
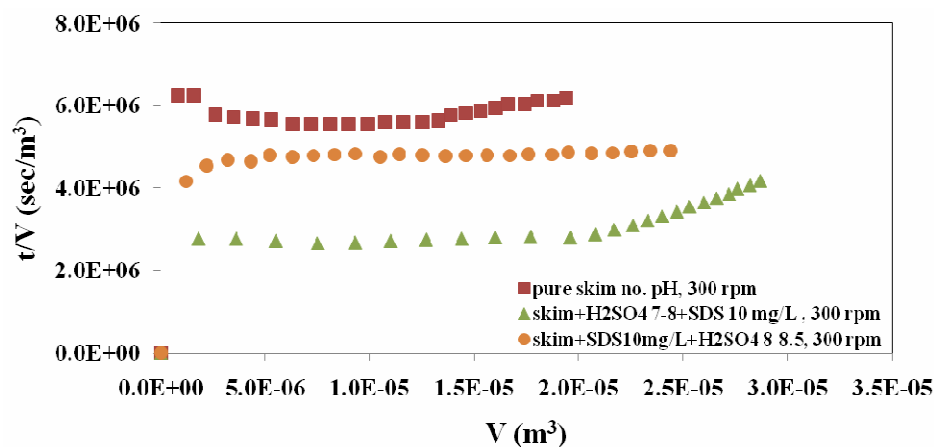
$\mu$  = ความหนืดของของเหลว (Pa.s)

$V$  = ปริมาตรน้ำเพอมีอิต ( $\text{m}^3$ )

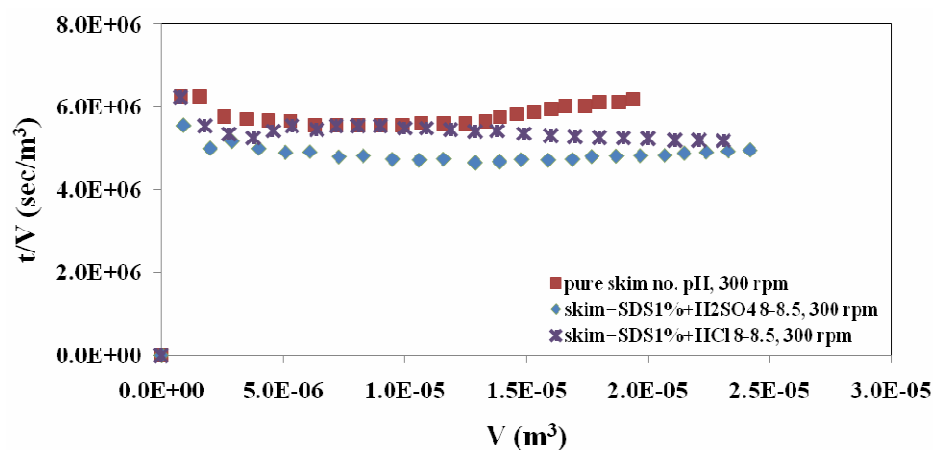
$\Omega$  = พื้นที่ผิวกรองของเมมเบรน ( $\text{m}^2$ )

ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/V$  กับ  $V$  ของหาน้ำยาล้างที่สภาวะต่างๆ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า ค่า  $\alpha W$  ของหาน้ำยาล้างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมี มีค่าน้อยกว่าประมาณ 2 เท่า เปรียบเทียบหาน้ำยาล้างที่ผ่านการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 7-8 ด้วย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  และตามด้วยการเติม SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่หาน้ำยาล้างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมี มีค่า  $\alpha W$  สูงกว่าหาน้ำยาล้างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) ประมาณ 2-3 เท่า และเมื่อพิจารณาจากลำดับการเติม SDS

และกรด(ก่อน-หลัง) ที่ใช้สำหรับการปรับสภาพของหางน้ำยาง พบว่า หางน้ำยางที่เติม SDS ก่อน และตามด้วยการปรับ pH มีค่า  $\alpha W$  น้อยกว่าหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH ก่อน และตามด้วยการเติม SDS ประมาณ 3-14 เท่า ดังตารางที่ 4.4 เนื่องจากมีอนุภาคยางจำนวนน้อยที่ออรรวมกันบนผิวเมมเบรนขณะกรองแบบปิดตายหรือตายตัว ซึ่งส่งผลให้ชั้นเค้กสะสมน้อยกว่าและ/หรือไม่อัดตัวแน่น



ภาพประกอบที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/V$  กับ  $V$  เมื่อทดสอบกรองหางน้ำยางภายใต้สภาวะ ลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) และปริมาณสารปรับสภาพชนิด SDS และกรดต่างชนิดกันในการปรับ pH หางน้ำยาง



ภาพประกอบที่ 4.9 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/V$  กับ  $V$  เมื่อทดสอบกรองทางน้ำภายใต้สภาวะ ลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) และปริมาณสารปรับสภาพชนิด SDS และกรดต่างชนิดกันในการปรับ pH ทางน้ำยาง

ตารางที่ 4.4 สรุปค่า  $\alpha W$  จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/V$  และ  $V$

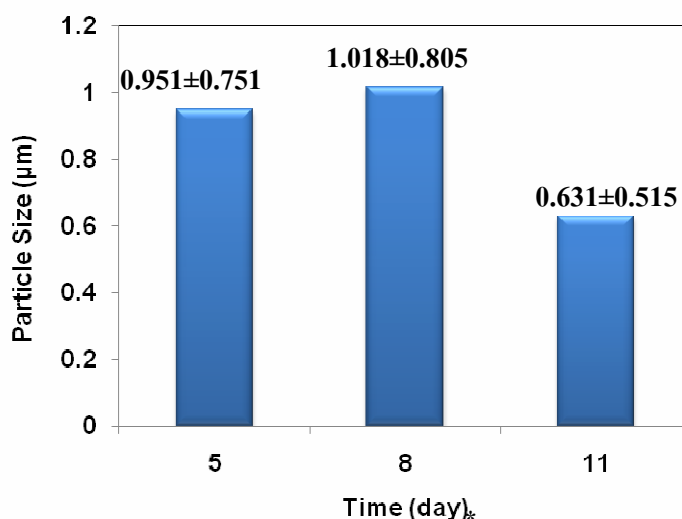
ตัวอย่าง	$\alpha W$ ( $m^2$ )
pure skim no. pH, 300 rpm	$7.3 \times 10^{11}$
Skim + $H_2SO_4$ 7-8 + SDS10 mg/L, 300 rpm	$1.1 \times 10^{12}$
skim+SDS10 mg/L+ $H_2SO_4$ 8-8.5, 300 rpm	$8.1 \times 10^{10}$
skim+ SDS 1%+ $H_2SO_4$ 8-8.5, 300 rpm	$2.4 \times 10^{11}$
skim + SDS1%+ HCl 8-8.5, 300 rpm	$3.2 \times 10^{11}$

### 4.3 บทสรุป

จากหัวข้อ 4.2.3 พบว่าทางน้ำยางที่เติม SDS ก่อนและตามด้วยการปรับ pH มีค่า  $\alpha W$  ต่ำ ซึ่งส่งผลให้เกิดชั้นเค้กสะสมน้อยและ/หรือไม่อัดตัวแน่น และเมื่อพิจารณาถึงการเสียสภาพของทางน้ำยางประกอบ พบว่าทางน้ำยางที่เติม SDS ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl สามารถคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ (colloid dispersion) หรือ สารแขวนลอย (suspension) ดีที่สุด ดังนั้นจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพทางน้ำยางด้วยสารเคมี ในการเดินระบบกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางในสเกลระดับห้องปฏิบัติการ (cross flow microfiltration lab scale unit)

#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางเพื่อเพิ่มความเข้มข้นนํ้าอย่าง

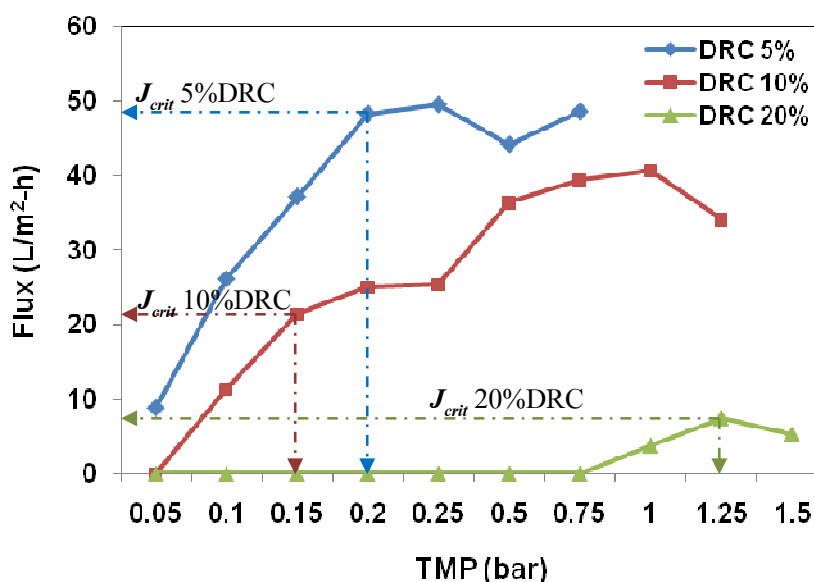
จากสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพนํ้าอย่างด้วยสารเคมี ในหัวข้อ 4.3 (นํ้าอย่างที่เติม SDS ร้อยละ 1 โดยนํ้าหนัก ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl) ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระยะเวลาในการบ่มนํ้าอย่างหลังจากที่มีการเติม SDS ร้อยละ 1 โดยนํ้าหนัก ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม คือ 5, 8 และ 11 วัน จากภาพประกอบที่ 4.10 (ภาคผนวก ข) เมื่อพิจารณาถึงขนาดของอนุภาคนํ้าอย่างที่ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม 5 และ 8 วัน พบว่ามีขนาดเท่ากับ  $0.951 \pm 0.751$  และ  $1.018 \pm 0.805$  ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคนํ้าอย่างมีขนาดใกล้เคียงกันและมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคนํ้าอย่างที่ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม 11 วัน ( $0.631 \pm 0.515$  ไมโครเมตร) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของ SDS ที่เข้าไปล้อมรอบอนุภาคนํ้าอย่างมากขึ้นเมื่อเวลาการบ่มนานขึ้นจนถึงระดับหนึ่งซึ่งเวลาที่นานเกินไปทำให้ผลของการเติม SDS ไม่เกิดประสิทธิผล ดังเห็นจากขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนํ้าอย่างกลับมามีค่าปกติ ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มที่เหมาะสมคือ 5 วัน เนื่องจากอนุภาคนํ้าอย่างมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ใช้ระยะเวลาในการบ่มที่น้อยกว่า ทั้งนี้แล้วหากประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาจไม่ต้องทำการบ่มนํ้าอย่าง เนื่องจากข้อจำกัดของสถานที่เก็บ แต่ในกรณีที่นํ้าอย่างไม่สามารถเข้าระบบกรองได้ครั้งเดียวหมดก็สามารถที่จะวางพักไว้ได้โดยที่นํ้าอย่างไม่เกิดการเสียสภาพและส่งผลให้อนุภาคนํ้าอย่างในนํ้าอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพประกอบที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคนํ้าอย่างและระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม  
หมายเหตุ: \* นับจนถึงวันที่ทำการวิเคราะห์

#### 4.4.1 การทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ )

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าฟลักซ์โดยทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) เป็นวิธีที่สามารถลดระดับการเกิดฟาวลิงได้ โดยทดสอบกรองห้าน้ำยาง (%DRC ประมาณร้อยละ 5) และน้ำยางที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 10 และ 20 (เจือจางจากน้ำยางสดที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 30) ที่เติม SDS ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และบ่มไว้เป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพห้าน้ำยางด้วยสารเคมี โดยใช้การเดินระบบกรองแบบไหลขวาง และทำการเดินระบบกรองที่ความเร็วไหลขวางคงที่ 3 m/s ที่อุณหภูมิห้อง โดยการเพิ่มความดันขับทุก 30 นาที และติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์ จากการทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ของห้าน้ำยาง พบว่า ห้าน้ำยางที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 5 มีค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ประมาณ 48.3 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ที่ความดันขับ 0.2 บาร์ และเมื่อทดสอบน้ำยางที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 10 พบว่ามีค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ประมาณ 21.4 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ที่ความดันขับ 0.15 บาร์ และน้ำยางที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 20 พบว่ามีค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ประมาณ 7.4 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ที่ความดันขับ 1.25 บาร์ ดังภาพประกอบที่ 4.11 โดยค่าฟลักซ์วิกฤตเป็นจุดที่มีค่าฟลักซ์ต่ำกว่าจุดที่ค่าฟลักซ์เริ่มลดลง (Field, *et al.*, 1995)



ภาพประกอบที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันขับของห้าน้ำยางที่มี %DRC ร้อยละ 5 และน้ำยางที่มี %DRC ประมาณร้อยละ 10 และ 20 ที่ความเร็วไหลขวางคงที่ 3 m/s ที่อุณหภูมิห้อง

จากนั้นทำการเดินระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์คงที่ 2 ค่า คือ  $50\% J_{crit}$  และ  $J_{crit}$  โดยทำการเดินระบบกรองที่ความเร็วไหลขวาง  $3 \text{ m/s}$  ที่อุณหภูมิห้อง แบบต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้องานจากเริ่มต้นที่ % DRC ประมาณร้อยละ 5 จนถึงระดับ % DRC ประมาณร้อยละ 20

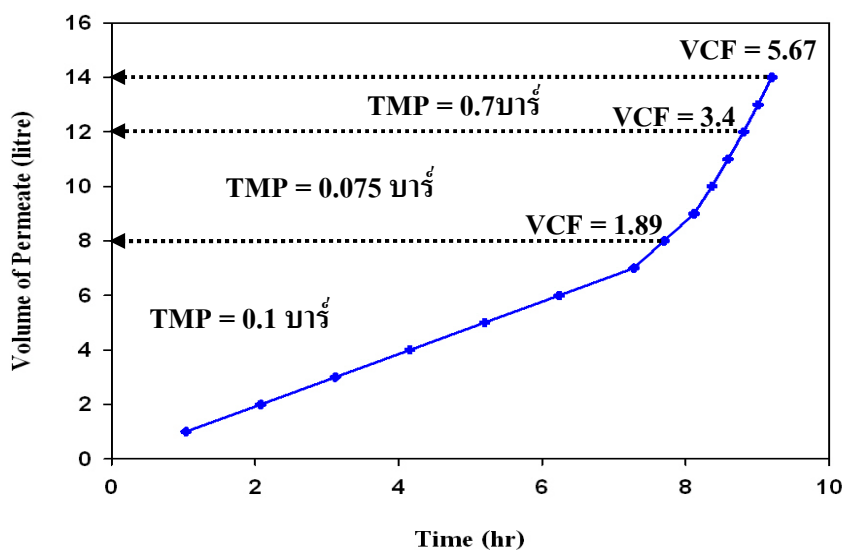
#### 4.4.2 สมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางแบบต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้องาน

ทำการเดินระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง ในสเกลระดับห้องปฏิบัติการ (cross flow microfiltration lab scale unit) โดยหางน้ำยาที่ใช้ในการศึกษานั้นจะผ่านการเติม SDS ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และบ่มไว้เป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl ก่อนการป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์คงที่ 2 ค่า คือ  $50\% J_{crit}$  และ  $J_{crit}$  ที่ความดันขับต่างกันซึ่งปรับให้สอดคล้องกับค่าฟลักซ์ที่  $50\% J_{crit}$  และ  $J_{crit}$  และค่า % DRC ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าฟลักซ์  $50\% J_{crit}$  ทำการเดินระบบที่ความดันขับประมาณ 0.1, 0.075 และ 0.7 บาร์ และที่ค่าฟลักซ์  $J_{crit}$  ทำการเดินระบบที่ความดันขับประมาณ 0.2, 0.15 และ 1.25 บาร์ ดังภาพประกอบที่ 4.12 โดยการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นในส่วนของรีเทนเททในระหว่างการกรอง ซึ่งสามารถหาได้จากค่าแฟคเตอร์ความเข้มข้นเชิงปริมาตร (Volumetric concentration factor : VCF) ดังสมการที่ (4.6) (Krstic, *et al.*, 2004)

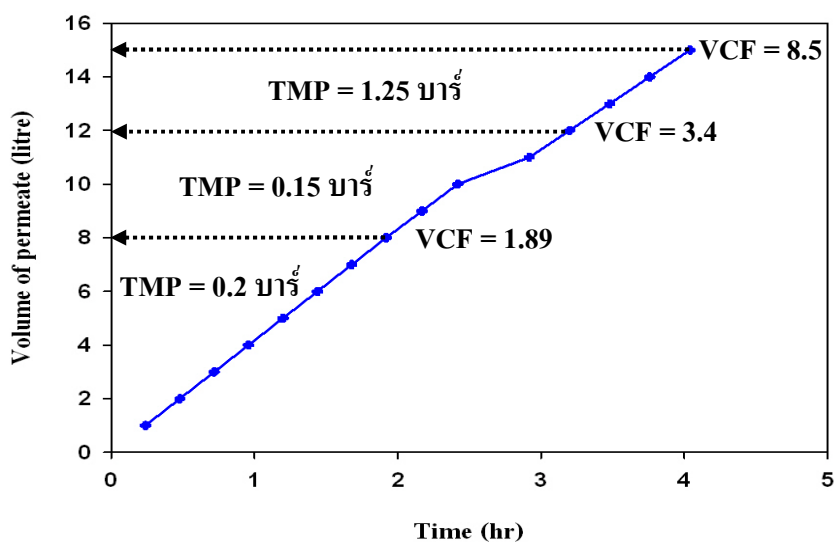
$$VCF = \frac{V_{feed,i}}{V_{ret,t}} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $V_{feed,i}$  = ปริมาตรของสารป้อนที่เริ่มเดินระบบ ( $\text{m}^3$ )  
 $V_{ret,t}$  = ปริมาตรของรีเทนเททที่เวลาใดๆ ( $\text{m}^3$ )





ก) ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$



ข) ค่าฟลักซ์  $J_{crit}$

ภาพประกอบที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาตรของเพอเมอเท (น้ำซีรัม)

#### 4.4.2.1 ผลของสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อเยื่อที่ค่าฟลักซ์ 50% $J_{crit}$

สำหรับผลทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรน พบว่าประสิทธิภาพการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัม โดยการแยกด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  ส่งผลให้หางน้ำยังมี

ลักษณะขุ่นขึ้น คือ มีค่า %DRC ร้อยละ 12.84 (%DRC ของทางน้ำยางเริ่มต้นมีค่าประมาณร้อยละ 4) ในขณะที่ค่า VFA บ่งชี้ถึงสถานะการเสถียรภาพ คือ การสูญเสียสภาพการเป็นคอลลอยด์ มีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.03 (น้ำยางสดที่มีคุณภาพควรมีค่า VFA ต่ำกว่าร้อยละ 0.04) และเมื่อวิเคราะห์เพอมีเอท (น้ำซีรัม) พบว่า น้ำซีรัมมีค่า Turbidity เหลืออยู่น้อยมาก คือประมาณ 22.85 NTU โดยน้ำซีรัมมีลักษณะสีเหลืองใส ดังภาพประกอบที่ 4.13 ก) และในน้ำซีรัมพบว่ามีโปรตีนทั้งหมดอยู่ประมาณ 530 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่า TKN ซึ่งเป็นปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจน พบว่ามีค่าประมาณ 3,444 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 4.5



ก) ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$



ข) ค่าฟลักซ์  $J_{crit}$

ภาพประกอบที่ 4.13 ลักษณะทางกายภาพของทางน้ำยางหลังผ่านกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

**ตารางที่ 4.5** ผลวิเคราะห์ตัวอย่างเมื่อกรองด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  (ความเร็วไหลขวาง 3 m/s)

พารามิเตอร์	สารป้อน (หางน้ำยาง)	เพอมีเอท (ซีรัม)	รีเทนเทท (เนื้อยางที่เข้มข้นขึ้น)
pH	8.14*	8.44	8.47
Turbidity (เอ็นทียู)	60,000	22.85	-
Total Solids Content (เปอร์เซ็นต์)	8.17	-	16.89
Dry Rubber Content (เปอร์เซ็นต์)	4.05	-	12.84**
VFA (เปอร์เซ็นต์)	0.01	-	0.03
TKN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4,368	3,444	-
Viscosity (เซนติพอยท์)	3.5	-	4.5
Protein (มิลลิกรัมต่อลิตร)	667	530	-
Alkalinity (as $NH_3$ ) (เปอร์เซ็นต์)	0.29	-	0.04
TP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	2.53	-

หมายเหตุ: \* หลังการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl ก่อนการป้อนเข้าระบบการกรอง

\*\*แยกเพอมีเอทออกมา 14 ลิตร จากหางน้ำยางป้อนเข้าระบบ 17 ลิตร และหากสารป้อนเริ่มต้นมีค่ามากกว่านี้ ความเข้มข้นของยางที่ได้หลังการกรองก็จะมีค่ามากกว่านี้เช่นกัน

#### 4.4.2.2 ผลของสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อยางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ )

ผลทดสอบการแยกเนื้อยางออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรน ส่งผลให้หางน้ำยางมีลักษณะเข้มข้นขึ้น คือ มีค่า %DRC เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณร้อยละ 4 เป็นร้อยละ 19.49 ในขณะที่ค่า VFA บ่งชี้ถึงสถานะการเสียดสภาพ คือ การสูญเสียสภาพการเป็นคอลลอยด์ มีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.02 (น้ำยางสดที่มีคุณภาพควรมีค่า VFA ต่ำกว่าร้อยละ 0.04) และผลการวิเคราะห์น้ำเพอมีเอท (ซีรัม) พบว่า น้ำซีรัมมีค่า turbidity เหลืออยู่ประมาณ 47.4 NTU ดังภาพประกอบที่ 4.13 ข) และพบว่าในน้ำซีรัมมีโปรตีนทั้งหมดอยู่ประมาณ 475 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาปริมาณสารอินทรีย์ในโตรเจนด้วยการวิเคราะห์ค่า TKN พบว่ามีค่า ประมาณ 3,360 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างเมื่อกรองด้วยเมมเบรนที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) (ความเร็วไหลขวาง 3 m/s)

พารามิเตอร์	สารป้อน (หางน้ำยาง)	เพอมีเอท (ซีรัม)	รีเทนเทท (เนื้อเยื่อที่เข้มข้นขึ้น)
pH	8.48*	8.88	8.9
Turbidity (เอ็นทียู)	60,000	47.4	-
Total Solids Content (เปอร์เซ็นต์)	8.17	-	23.54
Dry Rubber Content (เปอร์เซ็นต์)	4.05	-	19.49**
VFA (เปอร์เซ็นต์)	0.01	-	0.02
TKN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4,368	3,360	-
Viscosity (เซนติพอยท์)	3.5	-	7.5
Protein (มิลลิกรัมต่อลิตร)	667	475	-
Alkalinity (as NH <sub>3</sub> ) (เปอร์เซ็นต์)	0.29	-	0.07
TP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	1.25	-

หมายเหตุ: \* หลังการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl ก่อนการป้อนเข้าระบบการกรอง

\*\*แยกเพอมีเอทออกมา 15 ลิตร จากหางน้ำยางป้อนเข้าระบบ 17 ลิตร และหากสารป้อนเริ่มต้นมีค่ามากกว่านี้ ความเข้มข้นของยางที่ได้หลังการกรองก็จะมีค่ามากกว่านี้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการเดินระบบกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์คงที่ 2 ค่า คือ 50%  $J_{crit}$  และ  $J_{crit}$  พบว่า ที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  ใช้เวลาในการเดินระบบประมาณ 9.30 ชั่วโมง ในการแยกน้ำซีรัมออกมา 14 ลิตร ในขณะที่เมื่อเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ใช้เวลาในการเดินระบบประมาณ 4 ชั่วโมง ในการแยกน้ำซีรัมออกมา 15 ลิตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ใช้เวลาในการเดินระบบน้อยกว่าการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  ประมาณ 2 เท่า และในส่วนของชุดการทดลองที่กำหนดให้มีการเติมอากาศ (บทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1 ข้อที่ (6)) นั้นได้ทดสอบแล้วพบว่า การเติมอากาศเข้าระบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันและลดระดับฟาวลิง เนื่องจากต้องการให้เกิดรูปแบบการไหลของหางน้ำยางเมื่อผสมกับอากาศเป็นแบบ slug flow (ลักษณะรูปร่างของฟองอากาศมีลักษณะใหญ่ใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และอาจมีฟองอากาศเล็กๆปะปนอยู่ด้วย โดยอัตราการป้อนฟองอากาศแบบ slug flow (injection factor,  $\epsilon$ ) ควรมีค่าระหว่าง  $0.2 < \epsilon < 0.9$  (Cabassud, et al., 2001)) พบว่าทำให้หางน้ำยางมีการไหลลื่นออกนอกระบบซึ่งสาเหตุเกิดจากสารปรับสภาพ (SDS) ที่เติมในหางน้ำยางมีคุณสมบัติทำให้เกิดฟอง และเมื่อรวมกับฟองอากาศที่เติมเข้าระบบ จึงส่งผลให้เกิดฟองท่วมสูงและล้นออกจากถังป้อน ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะทำการเติมอากาศต่อได้ ดังภาพประกอบที่ 4.14



ภาพประกอบที่ 4.14 ภาพแสดงการล้นของฟองออกนอกระบบ ขณะเดินระบบกรองในชุดการทดลองที่กำหนดให้มีการเติมอากาศ

#### 4.4.3 ประเภทและระดับของค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง

ฟาวลิงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกรองสารผ่านเมมเบรน ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะและขีดความสามารถในการแยกลดลง ฟาวลิงที่เกิดขึ้นมีหลายลักษณะขณะเดินระบบเมมเบรน ลักษณะหลักๆของฟาวลิงที่เกิดขึ้น คือ เกิดจากการสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเมมเบรน (cake layer) การสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่บริเวณช่องเปิดของรูกรอง (pore blockage) และการบดบังของอนุภาค-โมเลกุลภายในรูพรุนและการอุดตันภายในรูกรอง (interior pore fouling) โดยที่ cake layer และ pore blockage เป็นฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพได้หรือแบบผันกลับได้ (reversible fouling) ด้วยการทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเมมเบรน โดยอาศัยเทคนิคทางไฮดรอดนามิกส์ ส่วนการอุดตันภายในรูกรองนั้นเป็นฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพไม่ได้หรือแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible fouling) จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ โดยที่ฟลักซ์มีความสัมพันธ์กับแรงดันขับ (pressure driving force) และความต้านทาน (resistance) การไหลดังสมการที่ (4.7)

$$J = \frac{TMP}{\mu \cdot R_t} \quad (4.7)$$

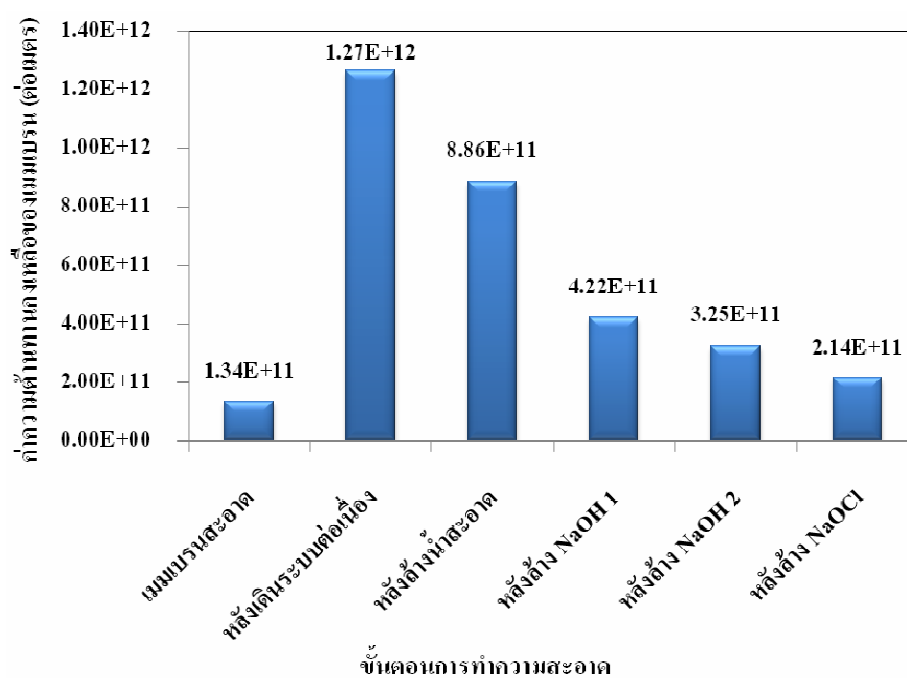
เมื่อ	$J$	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอท ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )
	$TMP$	=	ความแตกต่างของความดัน (Pa)
	$\mu$	=	ความหนืดของเพอมีเอท (Pa.s)
	$R_t$	=	ความต้านทานรวม ( $\text{m}^{-1}$ )

โดยที่  $R_t = R_m + R_f$  (4.8)

$$R_f = R_{rev} + R_{irr}$$
 (4.9)

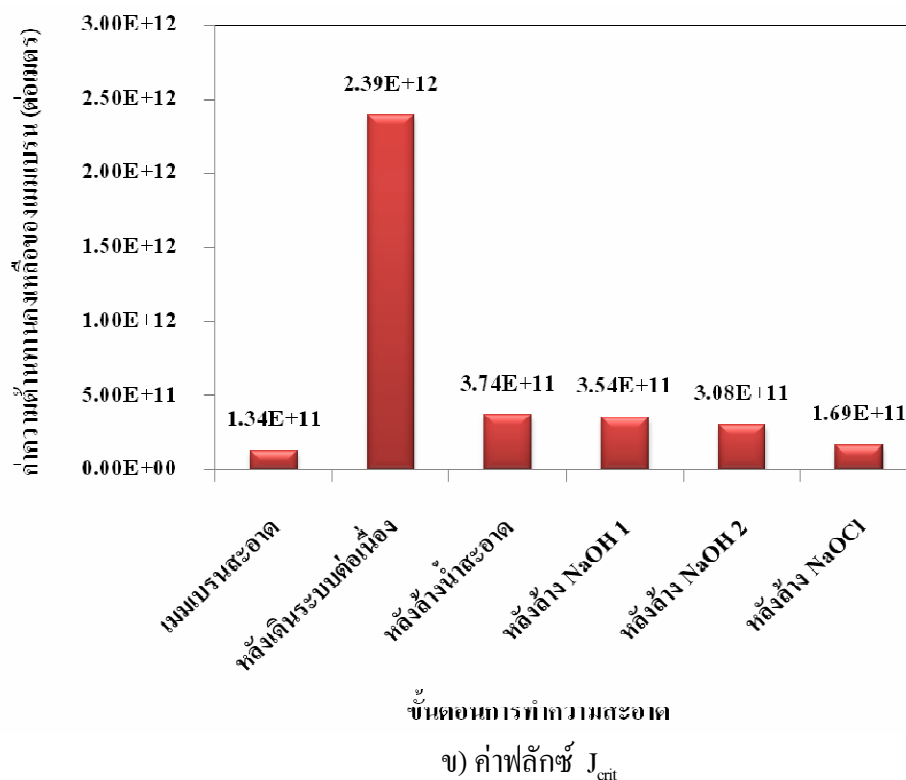
- เมื่อ  $R_t$  = ความต้านทานรวม ( $m^{-1}$ )  
 $R_m$  = ความต้านทานของเมมเบรน ( $m^{-1}$ )  
 $R_f$  = ความต้านทานของการเกิดฟาวลิงทั้งหมด ( $m^{-1}$ )  
 $R_{rev}$  = ความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับได้ (reversible fouling) ( $m^{-1}$ )  
 $R_{irr}$  = ความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible fouling) ( $m^{-1}$ )

จากการกรองหาน้ำยางด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์คงที่ 2 ค่า คือ ที่ 50%  $J_{crit}$  และ  $J_{crit}$  สามารถแสดงผลการคำนวณค่าความต้านทานได้ดังภาพประกอบที่ 4.15

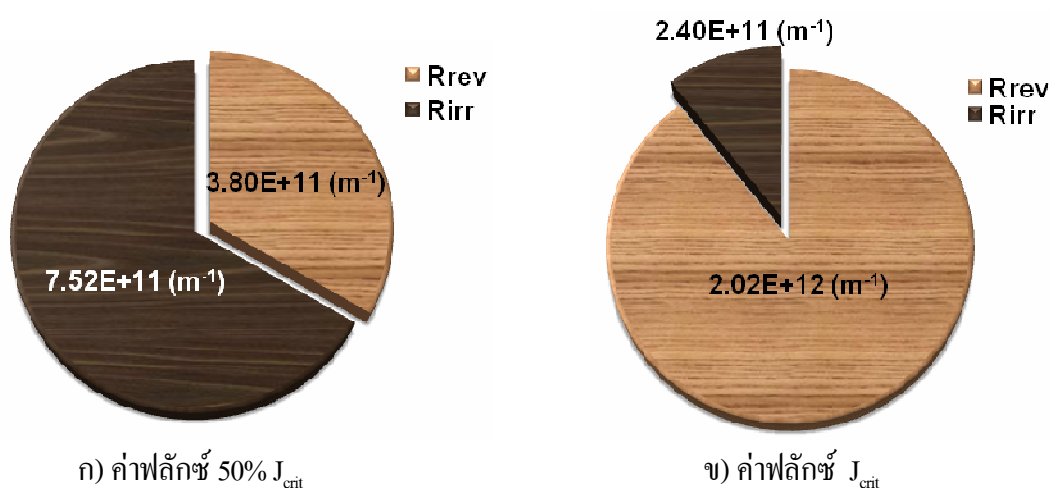


ก) ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$

ภาพประกอบที่ 4.15 ค่าความต้านทานคงเหลือค้างของเมมเบรนหลังการล้างด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง (ต่อเนื่อง) ที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  (ก) และที่ค่าฟลักซ์ที่  $J_{crit}$  (ข)



ภาพประกอบที่ 4.15 (ต่อ) ค่าความต้านทานคงเหลือค้างของเมมเบรนหลังการล้างด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง (ต่อเนื่อง) ที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  (ก) และที่ค่าฟลักซ์ที่  $J_{crit}$  (ข)



ภาพประกอบที่ 4.16 ค่าความต้านทานเนื่องจากเกิดฟาวลิง ทั้งแบบผันกลับได้ ( $R_{rev}$ ) และแบบผันกลับไม่ได้ ( $R_{irr}$ ) เมื่อสิ้นสุดการกรองแบบไหลขวาง (ต่อเนื่อง) ที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  (ก) และที่ค่าฟลักซ์ที่  $J_{crit}$  (ข)

จากภาพประกอบที่ 4.15 ก) เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานเริ่มต้นของเมมเบรนสะอาด ( $R_m$ ) พบว่ามีค่าเท่ากับ  $1.34 \times 10^{11}$  ต่อเมตร และหลังจากสิ้นสุดการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  ทำการหาค่าความต้านทานรวมคงเหลือค้างของเมมเบรน มีค่าเท่ากับ  $1.27 \times 10^{12}$  ต่อเมตร และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของเมมเบรนที่เกิดขึ้นตามประเภทการเกิดฟาวลิง ซึ่งฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพได้หรือแบบผันกลับได้ (reversible fouling) นั้นเกิดจากการสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเมมเบรน (cake layer) สามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยการทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนโดยอาศัยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ โดยค่าความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับได้ มีค่าเท่ากับ  $3.80 \times 10^{11}$  ต่อเมตร และฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพไม่ได้หรือแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible fouling) จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ พบว่าค่าความต้านทานฟาวลิงแบบนี้ มีค่าเท่ากับ  $7.52 \times 10^{11}$  ต่อเมตร ดังภาพประกอบที่ 4.16 ก) ซึ่งจากภาพประกอบที่ 4.16 ก) เห็นได้ว่าฟาวลิงที่เกิดขึ้นในการการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  ส่วนใหญ่เป็นแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 66.46 ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาคเล็กเข้าไปอุดตันภายในรูกรอง

และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานรวมคงเหลือค้างของเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) พบว่ามีค่าเท่ากับ  $2.39 \times 10^{12}$  ต่อเมตร ดังภาพประกอบที่ 4.15 ข) และจากภาพประกอบที่ 4.16 ข) พบว่าค่าความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับได้ มีค่าเท่ากับ  $2.02 \times 10^{12}$  ต่อเมตร ในขณะที่ค่าความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับไม่ได้มีค่าเท่ากับ  $2.40 \times 10^{11}$  ต่อเมตร ดังนั้นฟาวลิงที่เกิดขึ้นในการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ส่วนใหญ่เป็นแบบผันกลับได้ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 89.38 ซึ่งการเดินระบบที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าฟลักซ์วิกฤตจะไม่เกิดการสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเมมเบรน (cake layer) แต่พบว่าการเดินระบบที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าฟลักซ์วิกฤตส่งผลเกิดการสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเมมเบรนขึ้น (cake layer) (Madaeni, 1997) แต่จากการทดสอบเป็นการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ดังนั้นส่งผลให้การสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเมมเบรน (cake layer) ไม่หนาและไม่แน่นมาก จึงสามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยการทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนโดยอาศัยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์

ผลการทดสอบการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง พบว่าผลการศึกษาที่ได้จากรีเทนเทน (เนื้อเยื่อที่เข้มข้นขึ้น) สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น เช่น ผลิตภัณฑ์นมควั่น ยางแท่งจากหางน้ำยาง ซึ่งอาจนำไปผลิตรองเท้าผ้าใบ หรือพื้นรองเท้า หรืออาจนำไปเป็น



วัตถุดิบสำหรับผลิตกาวยาต่างๆ แทนที่จะผลิตเป็นสกิมบล็อก หรือ สกิมเกรพ ซึ่งเป็นยางที่มีคุณภาพ และราคาต่ำ ในขณะที่เพอมีเอท (น้ำซีรัม) พบว่ามีสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีประโยชน์อยู่มาก และพบว่าในน้ำซีรัมของน้ำยางธรรมชาติมีสารอินทรีย์ชื่อ L-quebrachitol ซึ่งประโยชน์ของสาร L-quebrachitol สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ยาต้านมะเร็ง สารเคมีทางการเกษตร และเป็นสารให้ความชุ่มชื้นในเครื่องสำอาง รวมถึงใช้เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลแก่ผู้ป่วยโรคเบาหวาน ([http://www.trf.or.th/News/Content.asp?Art\\_ID=505](http://www.trf.or.th/News/Content.asp?Art_ID=505))

จากข้อมูลระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ ระดับและประเภทของฟาวลิ่งรวมถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์ คือ หางน้ำยางที่ขึ้นขึ้น สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมที่พิจารณาเลือกคือ การเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) เนื่องจากใช้เวลาในการเดินระบบน้อยกว่า 2 เท่าของการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  ได้เนือยงเข้มข้นเพิ่มจากเดิมประมาณร้อยละ 4 เป็น ร้อยละ 19.49 และพบว่าฟาวลิ่งที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบผันกลับได้ ซึ่งอาจเกิดจากแรงดันขับที่ป้อนเมื่อกรองที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) จะมีค่าสูงกว่าที่กรองที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  จึงส่งผลให้อนุภาคยางเกิดการทับถมที่ผิวหน้าเมมเบรน โดยอาจมีบางส่วนที่สามารถเข้าไปอุดตันหรือสะสมภายในรูกรอง (เป็นฟาวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้)

#### 4.4.4 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้อยางออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนือยง

การใช้จ่ายในการเดินระบบเป็นข้อพิจารณาหนึ่งที่สำคัญ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้อยางออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนือยง ในที่นี้ไม่ได้คำนวณค่าใช้จ่ายในส่วนของกรดที่ใช้ในการปรับ pH เนื่องจากถ้าใช้ในอุตสาหกรรมไม่จำเป็นต้องทำการปรับ pH (ทำการปรับ pH เพื่อทดสอบหางน้ำยางในสภาวะที่หางน้ำยางมีค่า pH ลดลงจากการเก็บหางน้ำยางไว้นาน) โดยการผสม SDS เข้ากับหางน้ำยางนั้น ซึ่งไม่จำเป็นต้องกวนตลอดเวลาแค่เพียงกวนให้หางน้ำยางผสมกับสาร SDS โดยเวลาในการกวนประมาณ 5 นาที แล้วพักไว้ หากอุตสาหกรรมมีการเลือกใช้เครื่องกวนผสมสารก็อาจมีค่าใช้จ่ายส่วนนี้เพิ่มขึ้น หรือใช้แรงงานในการกวนซึ่งค่าใช้จ่ายส่วนนี้เป็นค่าใช้จ่ายปกติเดิมของโรงงาน ดังนั้นการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นจึงพิจารณาเฉพาะสารเคมีปรับสภาพและสารเคมีที่ใช้ในการล้างเมมเบรน และค่าไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.7 (ภาคผนวก ค แสดงรายละเอียดการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น)

ตารางที่ 4.7 ผลประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อเยื่อ

รายการ	ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ	
	ค่าฟลักซ์ 50% $J_{crit}$	ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ )
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบฯ (บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้ง)	17.89	11.89
ค่าสารเคมีชนิด SDS สำหรับปรับสภาพหางน้ำยาง (บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้ง)	0.59	0.59
ค่าสารเคมีสำหรับล้างเมมเบรน (บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้ง)	3.48	3.48
<b>รวมค่าใช้จ่าย (บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้ง)</b>	<b>21.96</b>	<b>15.96</b>

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าไฟฟ้าประมาณ 17.89 บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง และเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้สำหรับปรับสภาพหางน้ำยางและใช้สำหรับล้างพื้นสภาพเมมเบรน พบว่ามีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีประมาณ 4.07 บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง ซึ่งเมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  มีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นประมาณ 21.96 บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง และเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าไฟฟ้าประมาณ 11.89 บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้สำหรับปรับสภาพหางน้ำยางและใช้สำหรับล้างพื้นสภาพเมมเบรนมีค่าใช้จ่ายประมาณ 4.07 บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง และเมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) มีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นประมาณ 15.96 บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายในการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  มีค่าใช้จ่ายมากกว่าการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ซึ่งเมื่อเทียบกับการเก็บเกี่ยวเนื้อเยื่อในหางน้ำยางรูปแบบทั่วไปโดยใช้กรดซัลฟูริก พบว่ามีค่าใช้จ่ายประมาณ 3 บาทต่อกิโกรัมเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง (คำนวณจากเกณฑ์การป้องกันมลพิษ คือ กรดซัลฟูริก 200 กิโลกรัมต่อตันเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง และราคากรดซัลฟูริก เท่ากับ 15 บาทต่อกิโกรัม (<http://www.vcharkarn.com/include/vcafe/showkratoo.php?Pid=38886>)) แต่การเก็บเกี่ยวเนื้อเยื่อในหางน้ำยางรูปแบบทั่วไปนั้น ส่งผลให้น้ำเสียมีค่า pH ต่ำเนื่องจากมี

ปริมาณกรดซัลฟูริกที่เติมขณะแยกเพื่อเก็บเกี่ยวเนื้อยางออกจากยางน้ำยางและน้ำเสียนที่เข้าระบบ บำบัดยังคงมีเนื้อยางส่วนที่หลงเหลืออยู่จากการเก็บเกี่ยวไม่หมด ซึ่งส่งผลให้น้ำเสียนมีปริมาณ สารอินทรีย์สูง และไม่สามารถนำน้ำซีรัมกลับมาใช้ประโยชน์หรือเพิ่มมูลค่าได้ และการเก็บเกี่ยว เนื้อยางในยางน้ำยางรูปแบบทั่วไปมีค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียนร่วมด้วย พบว่ามีค่าใช้จ่าย ระหว่าง 15,300-173,500 บาทต่อเดือน (กำลังผลิตอยู่ในช่วง 2-300 ตันผลผลิตต่อวัน) (สมทิพย์ คำานธีรวนิชย์ และคณะ, 2545)

## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้การกรองด้วยเยื่อกรองแบบพันทางสำหรับการแยกเนื้อเยื่อออกจากหางน้ำยางโดยใช้เทคนิคร่วมในการปรับสภาพหางน้ำยางก่อนป้อนเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชัน ซึ่งทดลองในสเกลระดับห้องปฏิบัติการ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ (1) การปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี (2) การทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันในชุดกรองขนาดเล็ก และ (3) การทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่รูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง ผลการทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติของหางน้ำยางก่อนการปรับสภาพด้วยสารเคมี พบว่า pH มีค่าเฉลี่ย  $9.55 \pm 0.21$  ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง และลักษณะทางกายภาพของหางน้ำยางในส่วนของ turbidity มีค่าสูง ระหว่าง  $60,000 \pm 4,242$  NTU โดยขนาดอนุภาคในหางน้ำยางมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.77 \pm 0.56$  ไมโครเมตร และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่า %TSC มีค่า  $9.89 \pm 1.57$  เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ %DRC มีค่าเป็น  $6.09 \pm 0.06$  เปอร์เซ็นต์ และพบว่าหางน้ำยางมีค่า alkalinity เท่ากับ  $0.28 \pm 0.02\%$  (as  $\text{NH}_3$ ) ในขณะที่ค่า VFA มีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ  $0.0084 \pm 0.0017$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า COD, TKN และ TP พบว่ามีค่าระหว่าง  $179,682 \pm 31,891$ ,  $1,372 \pm 930$  และ  $61 \pm 34.75$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในหางน้ำยางมีปริมาณโปรตีนรวมระหว่าง  $667 \pm 1.46$  มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ผลการศึกษาการปรับสภาพหางน้ำยางโดยการปรับ pH และตามด้วยการเติมสารเคมี (SDS, SLES, PACI และ PQA) พบว่า หางน้ำยางมีการแยกออกเป็น 2 เฟส คือ เฟสเข้มข้นและเฟสเจือจาง โดยเฟสเข้มข้นพบอนุภาคขนาดใหญ่กว่าขนาดเฉลี่ยในหางน้ำยางก่อนเติมสารเคมี และเฟสเจือจาง และการเติมสาร PQA ที่ความเข้มข้นสูง ส่งผลให้หางน้ำยางเสถียรอย่างชัดเจน คือ เนื้อเยื่อในหางน้ำยางมีการจับตัวกันเป็นก้อน แยกจากส่วนซีรัมซึ่งมีลักษณะสีเหลือง

3. ผลการวิเคราะห์สมบัติของหางน้ำยางหลังการปรับสภาพด้วยสารเคมี ส่วนใหญ่พบว่า ที่ปริมาณความเข้มข้น 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสารเคมีที่ทดสอบ (SDS, SLES, PACI และ PQA) พบว่า ลักษณะหางน้ำยางหลังเติมสารเคมีที่ค่าความเข้มข้นสูง (10 มิลลิกรัมต่อลิตร) เช่น turbidity, TSC, DRC, COD, TP และ viscosity ไม่มีความแตกต่างกันมากเปรียบเทียบกับลักษณะหางน้ำยางหลังเติมสารเคมีที่ค่าความเข้มข้นต่ำ

4. การใช้ SDS ที่ความเข้มข้นสูง คือ ประมาณร้อยละ 1 (ตามด้วยการปรับ pH) มีผลต่อการยึดอายุของหางน้ำยาง คือ ทำให้หางน้ำยางคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ (colloid dispersion) เป็นระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นประมาณ 1 สัปดาห์

5. ผลการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกเบื้องต้นด้วยเมมเบรนโดยใช้ชุดกรองขนาดเล็ก พบว่าการเติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และการใช้ความเร็วในการกวนขณะกรองส่งผลบวกต่อการเพิ่มค่าฟลักซ์ขณะกรอง โดยหางน้ำยางที่เติมสาร SDS 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที มีค่าฟลักซ์เริ่มต้นสูงที่สุด คือ 18.15 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร และหางน้ำยางที่ไม่เติมสาร SDS ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที มีค่าฟลักซ์เริ่มต้นต่ำที่สุด คือ 10.08 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ทั้งนี้ค่าฟลักซ์สิ้นสุดการกรองมีค่าใกล้เคียงกัน คือ  $6.69 \pm 0.55$  ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร และเมื่อทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนโดยการเติมสาร SDS SLES และ PACI ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในหางน้ำยางที่ไม่ผ่านการปรับ pH ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที พบว่า ค่าฟลักซ์ที่ได้ค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7-9 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร

6. ผลวิเคราะห์น้ำเพอมีเอท (ซีรัม) พบว่า น้ำซีรัมของตัวอย่างหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH มีค่า Turbidity ลดลงกว่าร้อยละ 99 เมื่อเทียบกับค่า Turbidity เริ่มต้นของหางน้ำยาง โดยมีค่า Turbidity เหลืออยู่ประมาณ  $7.8 \pm 3.8$  NTU และไม่มีความแตกต่างกันของค่า pH และ TP ในตัวอย่างที่ไม่เติมและเติมสาร SDS เมื่อทดสอบกรองที่ความเร็วรอบต่างกัน ในขณะเดียวกัน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันของค่า COD เมื่อทดสอบกรองที่ความเร็วรอบต่างกันทั้งในตัวอย่างที่ไม่เติมและเติมสาร SDS แต่ค่า COD ในน้ำเพอมีเอทของหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH แต่ไม่เติมสาร SDS, SLES และ PACI มีค่ามากกว่าค่า COD น้ำเพอมีเอทของหางน้ำยางที่เติมสาร SDS, SLES และ PACI ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ประมาณ 2 เท่าตัว และมีค่าโปรตีนทั้งหมดอยู่ประมาณ  $406 \pm 79$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่แตกต่างกันในตัวอย่างน้ำซีรัมที่ผ่านการเติมและไม่เติมสารปรับสภาพ และเมื่อเปรียบเทียบน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางที่ผ่านการปรับค่า pH กับน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางในสถานะที่ไม่มีการปรับ pH พบว่าค่าโปรตีนของน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางที่ผ่านการปรับค่า pH มีค่าต่ำกว่าน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางในสถานะที่ไม่มีการปรับ pH ประมาณ 1 เท่า ซึ่งโปรตีนในน้ำซีรัมส่วนใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 25-40 กิโลดาลตัน และในน้ำซีรัมที่กรองได้จากตัวอย่างหางน้ำยางในสถานะที่ไม่ผ่านการปรับ pH พบว่ามีค่า Turbidity เหลืออยู่น้อยมาก คือประมาณ  $33 \pm 29$  NTU

7. ผลการทดสอบเพิ่มเติมที่ความเข้มข้นของ SDS ที่ปริมาณสูง โดยใช้กรดต่างชนิดกันในการปรับ pH หางน้ำยาง และทดสอบผลของลำดับการเติม (ก่อน-หลัง) SDS และ กรดที่

ใช้ สำหรับการปรับสภาพของหางน้ำยาง พบว่า การปรับสภาพหางน้ำยางด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.5-1) รวมถึงลำดับการเติม SDS ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ส่งผลต่อการรักษาระดับของค่าฟลักซ์ขณะกรองให้มีความสม่ำเสมอ คือ มีค่าอยู่ในช่วง 8-10 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร และเมื่อพิจารณาถึงการเสียดสภาพของหางน้ำยางร่วมด้วย พบว่า หางน้ำยางที่เติม SDS ร้อยละ 1 ก่อนและตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl สามารถคงสภาพความเป็นคอลลอยด์ (colloid dispersion) หรือ สารแขวนลอย (suspension) ได้ยาวนานและดีที่สุด และจากผลวิเคราะห์น้ำเพอมีเอท (ซีรัม) พบว่า ค่า Turbidity และ COD ของหางน้ำยางที่ปรับสภาพด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.5-1) มีค่าสูงกว่าหางน้ำยางที่ปรับสภาพด้วย SDS ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ (2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

8. ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิงโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ พบว่า ทุกสภาวะที่ทดสอบส่วนใหญ่มีแนวโน้มสอดคล้องกับรูปแบบการอุดปิดรูกรองอย่างสมบูรณ์ (complete pore blocking) แต่อย่างไรก็ตามพบลักษณะฟาวลิงแบบอื่นๆร่วมอยู่ด้วย

9. ผลการวิเคราะห์ฟาวลิงโดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\alpha W$ ) พบว่า หางน้ำยางที่เติม SDS ก่อนและตามด้วยการปรับ pH มีค่า  $\alpha W$  น้อยกว่าหางน้ำยางที่ผ่านการปรับ pH ก่อน และตามด้วยการเติม SDS ประมาณ 3-14 เท่า เนื่องจากมีอนุภาคยางจำนวนน้อยที่ออรรวมกันบนผิวเมมเบรนขณะกรองแบบปิดตายหรือตายตัว ซึ่งส่งผลให้ชั้นเค้กสะสมน้อยกว่าและ/หรือไม่อัดตัวแน่น

10. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพหางน้ำยางด้วยสารเคมี ในการเดินระบบกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางในสเกลระดับห้องปฏิบัติการ (cross flow microfiltration lab scale unit) คือ หางน้ำยางที่เติม SDS ร้อยละ 1 และบ่มไว้เป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นตามด้วยการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8-8.5 ด้วย HCl

11. ผลทดสอบการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) มีประสิทธิภาพและสมรรถนะการแยกด้วยเมมเบรนดีกว่ารูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  โดยรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ส่งผลให้หางน้ำยางมีลักษณะขุ่นขึ้น คือ มีค่า %DRC เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณร้อยละ 4 เป็นร้อยละ 19.49 และฟาวลิงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบผันกลับได้ คิดเป็นร้อยละ 89.38 ซึ่งสามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยการทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนโดยอาศัยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ ในขณะที่รูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ 50%  $J_{crit}$  หางน้ำยางที่เข้มข้นขึ้นมีค่า %DRC ประมาณร้อยละ 12.84 และฟาวลิงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบผันกลับไม่ได้ (ร้อยละ 66.46)

12. การแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำชีรั้มด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) ใช้เวลาในการเดินระบบน้อยกว่าการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์  $50\% J_{crit}$  ประมาณ 2 เท่า

13. สถานะการเดินระบบที่เหมาะสมที่พิจารณาเลือกคือ การเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ )

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองนี้ พบว่าในทางน้ำยางดิบจากโรงงานอุตสาหกรรมมีส่วนของเศษยางที่เกิดการเสียดสีสภาพปนเปื้อนอยู่ ดังนั้นจึงควรเพิ่มตะแกรงเพื่อกำจัดส่วนของเศษยางที่เกิดการเสียดสีออกจากทางน้ำยางดิบก่อนป้อนเข้าระบบกรองด้วยเมมเบรน เพื่อป้องกันการอุดตันภายในปั๊ม และตะแกรงยังช่วยดักจับเศษยางที่หลุดออกมาจากการล้างเมมเบรนไม่ให้วนกลับเข้าไปในระบบอีกครั้ง

2. การทดลองนี้ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับน้ำชีรั้มที่แยกออกมาได้จากกระบวนการกรอง เพื่อเพิ่มมูลค่าของน้ำชีรั้ม

## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. คู่มือแนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมน้ำยางข้น.
- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2551. สารลดแรงตึงผิว. (ออนไลน์) / 14 มีนาคม 2551. ค้นหาได้จาก [http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/cp\\_7\\_2548\\_surfactant.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf).
- กรมโรงงานอุตสาหกรรมและD<sup>๓</sup>N<sup>๓</sup>ED. 2544. หลักปฏิบัติเพื่อการป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตสะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขา: อุตสาหกรรมน้ำยางข้น อุตสาหกรรมยางแท่งมาตรฐาน เอสทีอาร์ 20.
- การไฟฟ้านครหลวง. 2549. อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่างๆ (ออนไลน์) / 8 ตุลาคม 2552. ค้นหาได้จาก <http://www.mea.or.th>.
- กัลยา ศรีสุวรรณ. 2540. รายงานการวิจัยเรื่องการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงาน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ขันทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โครงการเผยแพร่ความรู้ประสบการณ์จากงานวิจัยด้านการจัดการมลพิษอุตสาหกรรมยางพารา. 2550. การใช้สารจับยางในทางน้ำยางทดแทนการใช้กรดซัลฟูริก. (ออนไลน์) / 25 พฤศจิกายน 2550. ค้นหาได้จาก [http://www2.envi.psu.ac.th/PSU\\_ER/images/stories/P/O/News%20and%20Events/RUBBERSEMIN/R/latex4.pdf](http://www2.envi.psu.ac.th/PSU_ER/images/stories/P/O/News%20and%20Events/RUBBERSEMIN/R/latex4.pdf).
- ชวลิต รัตนธรรมสกุล และภาศัลย์ ใจรังสี. 2548. โครงการการวิจัยและพัฒนากระบวนการเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



เจิดชัย ตั้งอมรสขสันต์. 2537. การศึกษาเยื่อแผ่นไดนามิกบนเยื่อแผ่นอนินทรีย์แบบไมโครฟิลเตร  
 ชั้นในการกรองน้ำสับประรด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม  
 อาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ฐปณีย์ ฤทธิไพโรจน์. 2548. ปัจจัยที่มีผลต่อฟลักซ์ ค่าการกักเก็บ และฟาวลิงระหว่างกระบวนการ  
 กรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
 เทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประชาคมวิจัย. 2550. ซีรัม. (ออนไลน์) / 1 พฤษภาคม 2550. ค้นหาได้จาก [http://rescom2006.trf.or.th/  
 display/show\\_colum\\_p.php?id\\_salaban=27](http://rescom2006.trf.or.th/display/show_colum_p.php?id_salaban=27).

ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์. 2545. พอลิเมอร์คอลลอยด์. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์.  
 มหาวิทยาลัยมหิดล.

ปาริชาติ ดิยปรัชญา. 2544. การพัฒนาสูตรและกระบวนการผลิตน้ำผักผสมผลไม้โดยใช้เทคโนโลยี  
 เมมเบรน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการ  
 อาหาร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางข้น. 2551. (ออนไลน์) / 1 พฤษภาคม 2551. ค้นหาได้จาก [http://polymer.  
 igetweb.com/php?mo=3&art=4158](http://polymer.igetweb.com/php?mo=3&art=4158).

พงศ์นรินทร์ ปรายนคร. 2543. การบำบัดน้ำเสียขั้นต้นโดยวิธีการลอยตัวของตะกอนในบ่อดักยาง  
 สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำยางข้น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร  
 มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พัชราภรณ์ จำแก้ว. 2546. การบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำยางข้นด้วยระบบตะกอนเร่ง. วิทยานิพนธ์  
 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2551. หางน้ำยาง. (ออนไลน์) / 1 พฤษภาคม 2551. ค้นหาได้จาก [http://phoenix.eng.psu.ac.th/chem/File/polngan/2548/paiboon/copy %20of% 201..pdf](http://phoenix.eng.psu.ac.th/chem/File/polngan/2548/paiboon/copy%20of%201..pdf).

รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วารสารณ์ ขจรไชยกูล และพรธษา ช่วยปล้อง. 2530. วิธีการทดสอบน้ำยาง. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง. ศูนย์วิจัยยางสงขลา.

วารสารณ์ ขจรไชยกูล. 2531. น้ำยาง. ศูนย์วิจัยยางสงขลา.

วารสารณ์ ขจรไชยกูล. 2536. ยาง. สถาบันวิจัยยาง.

วารสารณ์ ขจรไชยกูล. 2549. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน (Natural Rubber : Production and Applications). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).

วิชาการดอทคอม. 2552. ราคากรดซัลฟูริก. (ออนไลน์) / 5 พฤศจิกายน 2552. ค้นหาได้จาก <http://www.vcharkam.com/include/vcafe/showkratoo.php?Pid=38886>

วันชัย แก้วยอด. 2540. การตรวจสอบการจัดการน้ำเสียโรงงานยาง: กรณีศึกษาจังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สมทิพย์ ด่านธีรวณิชย์, อุดมผล พีชไพบูลย์, จรรย์ บุญกาญจน์, เสาวลักษณ์ รุ่งตะวันเรืองศรี, นิตศน์ เพรมาแก้ว, อัญญาฐ หิรัญรักษ์, สุวลักษณ์ วิสุนทร, วิบูลย์ ป้องกันภัย และนฤเทพ บุญเรืองขาว. 2545. การตรวจสอบการจัดการของเสียของโรงงานน้ำยางข้น. โครงการวิจัยเรื่องการจัดการของเสียอุตสาหกรรมน้ำยางข้น. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สถาบันวิจัยยาง. สถิติยางไทย. 2552. (ออนไลน์) / 5 พฤศจิกายน 2552. ค้นหาได้จาก <http://www.rubberthai.com/rubberthai/>.

- สมาชิกลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าแห่งประเทศไทย. 2550. น้ำยางข้น. (ออนไลน์) / 23 พฤศจิกายน 2550. ค้นหาได้จาก <http://www.dsutures.co.th/?cid=3&pid=18>.
- สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง. 2552. ราคาน้ำยางสด. (ออนไลน์) / 5 พฤศจิกายน 2552. ค้นหาได้จาก <http://www.rubber.co.th/menu5.php>.
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2552. น้ำซีรัม. (ออนไลน์) / 5 พฤศจิกายน 2552. ค้นหาได้จาก [http://www.trf.or.th/News/Content.asp?rt\\_ID=505](http://www.trf.or.th/News/Content.asp?rt_ID=505).
- ศิโรตม์ บุญราศรี. 2543. การแก้ปัญหาการไม่จับตัวของน้ำยางสกิมจากการทำน้ำยางข้น. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศูนย์การศึกษานอกโรงเรียนภาคใต้. 2550. ชนิดของสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง. (ออนไลน์) / 27 ธันวาคม 2550. ค้นหาได้จาก <http://south.nfe.go.th/LearnSquare/courses/43/03parakeep002.htm>.
- อำไพ ชนะไชย. 2536. การศึกษาการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสาวรศ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Hamad bin Ibrahim. 1982. "Treatment and Utilization of Rubber Factory Effect", RRIM. Training Manual and National Rubber Processing.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater**. 21<sup>th</sup> edition. American Public Health Association. Washington D. C. USA
- Baker R.W. 2000. **Membrane Technology and Applications**. 1<sup>st</sup> edition. The Mc Graw Hill Companies, Inc. USA

- Bottino □, Capannelli □, Borghi □D., Colombino M. and Conio O. 2001. “Water treatment for drinking purpose: ceramic microfiltration application”, **Desalination**. 141: 75-79.
- Bruijn J., Venegas □ and Borquez R. 2002. “Influence of crossflow ultrafiltration on membrane fouling and apple juice quality”, **Desalination**. 148: 131-136.
- Abassud □, Laborie S., Durand-Bourlier L., and Lainé J.M. 2001. “Air sparging in ultrafiltration hollow fibers: relationship between flux enhancement, cake characteristics and hydrodynamic parameters”, **J. Membrane Sci.** 181: 57–69.
- Carneiro L., Sa I.S., Gomes F.S., Matta V.M. and Abbral L.M. □ 2002. “Cold sterilization and clarification of pineapple juice by tangential microfiltration”, **Desalination**. 148: 93-98.
- Cheryan M. 1998. **Ultrafiltration and Microfiltration Handbook**. Technomic Publishing □. Inc. Lancaster. US □
- Cross Flow Filtration. 2551. (ออนไลน์) / 2 กุมภาพันธ์ 2551. ค้นหาได้จาก <http://www.spectrapor.com/filtration/Edge.html>.
- Decloux M., Lameloise M., Brocard □, Bisson E., Parmentier M. and Spiraers □ 2007. “Treatment of acidic wastewater arising from the refining of vegetable oil by crossflow microfiltration at very low transmembrane pressure”, **Process Biochemistry**. 42: 693–699.
- Durham B., Bourbigot M.M. and Pankratz T. 2001. “Membranes as pretreatment to desalination in wastewater reuse: operating experience in the municipal and industrial sectors”, **Desalination**. 138: 83-90.
- Espamer L., Pagliero □, Ochoa □ and Marchese J. 2006. “Clarification of lemon juice using membrane process”, **Desalination**. 200: 565–567.

- Field R.W., Wu D., Howell J.□ and Gupta B.B. 1995. “Critical flux concept for microfiltration fouling”, **J. Membrane Sci.** 100: 259-272.
- Gesan-Guiziou G., Boyaval E. and Daufin G. 1999. “Critical stability conditions in crossflow microfiltration of skimmed milk: transition to irreversible deposition”, **J. Membrane Sci.** 158: 211-222.
- Gesan-Guiziou G., Wakeman R.J. and Daufin G. 2002. “Stability of latex crossflow filtration: cake properties and critical conditions of deposition”, **J. Chemical Engineering.** 85: 27-34.
- Guerra □, Jonsson G., Rasmussen □ Nielsen E.W. and Edelsten D. 1997. “Low cross-flow velocity microfiltration of skim milk for removal of bacterial spores”, **Int. Dairy Journal.** 7: 849-861.
- He Y., Ji Z. and Li S. 2007. “Effective clarification of apple juice using membrane filtration without enzyme and pasteurization pretreatment”, **Separation Purification Technology.** 57: 366–373.
- Howell J.□, Sanchez V. and Field R.W. 1993. **Membranes in bioprocessing: theory and applications.** Chapman&Hall, London, UK.
- Howell J.□ 1995. “Sub-critical flux operation of microfiltration”, **J. Membrane Sci.** 107: 165-171.
- Howell J.□ 2004. “Future of membranes and membrane reactors in green technologies and for water reuse”, **Desalination.** 162: 1-11.
- Hu B. and Scott K. 2008. “Microfiltration of water in oil emulsions and evaluation of fouling mechanism”, **Chemical Engineering.** 136: 210-220.

- Hua F.L., Tsang Y.F., Wang Y.J., Chan S.Y., Hua H. and Sin S.N. 2007. "Performance study of ceramic microfiltration membrane for oily wastewater treatment", **J. Chemical Engineering**, 128: 169–175.
- Jones K.L. and Ó Melia R. 2000. "Protein and humic acid adsorption onto hydrophilic membrane surfaces : effects of pH and ionic strength", **J. Membrane Sci.** 165: 31-46.
- Konieczny K. and Bodzek M. 1996. "Ultrafiltration of latex wastewater", **Desalination**, 104: 75-82.
- Krstic D.M., Tekic M.N., Jarić M.D. and Milanovic S.D. 2004. "Static turbulence promoter in cross-flow microfiltration of skim milk", **Desalination**, 163: 297-309.
- Madaeni S.S. 1997. "An investigation of the mechanism of critical flux in membrane filtration using electron microscopy", (ออนไลน์) / 8 ตุลาคม 2552. ค้นหาได้จาก <http://www.springerlink.com/content/p4q274r710181271/fulltext.pdf?page=1>.
- Mänttari M. and Nyström M. 2000. "Critical flux in NF of high molar mass polysaccharides and effluents from the paper industry", **J. Membrane Sci.** 170: 257–273.
- Membrane Technology. 2551. (ออนไลน์) / 28 มกราคม 2551. ค้นหาได้จาก <http://www.lenntech.com/membrane-technology.htm>.
- Mulder M. 1991. **Basic principles of membrane technology**. Kluwer Academic Publishers.
- Nakatsuka S., Nakate I. and Miyano T. 1996. "Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow fiber membranes", **Desalination**, 106: 55-61.
- Nambiar. J. 1993. "Concentration of epoxidised NR latex by ultrafiltration", Proc. International Rubber Technology Conf. Kuala Lumpur.

- Novalic S., Heisler G. and Lahnsteiner J. 1997. “Cross-flow filtration of latex emulsion on a pilot scale using organic and inorganic membranes with different cut-off values”, **J. Membrane Sci.** 130: 1-5.
- Pafylas I., Cheryan M., Mehaia M. and Saglam N. 1996. “Microfiltration of milk with ceramic membranes”, **Food Research International.** 29: 141-146.
- Pouliot M., Pouliot Y. and Britten M. 1996. “On the Conventional Cross-Flow Microfiltration of Skim Milk for the Production of Native Phosphocaseinate”, **Int. Dairy Journal.** 6: 105-111.
- Principles of Membrane Filtration. 2551. (ออนไลน์) / 2 กุมภาพันธ์ 2551. ค้นหาได้จาก <http://www.egr.msu.edu/~steffe/handbook/fig643.html>.
- Salazar F.N., Bruijn J.P.F., Seminario L., Guell and Lopez F. 2007. “Improvement of wine crossflow microfiltration by a new hybrid process”, **J. Food Engineering.** 79: 1329-1336.
- Samuelsson G., Dejmek P., Tragardh G. and Paulsson M. 1997. “Minimizing Whey Protein Retention in Cross-flow Microfiltration of Skim Milk”, **Int. Dairy Journal.** 7: 237-242.
- Somtip D., Chalermpong I., Porntip S. and Suwaluk W. 2008. “Preliminary Concentration of Skim Latex and Its Wastewater Using Plate Sheet Microfiltration”, The 6<sup>th</sup> Regional Symposium on Membrane Science & Technology (MST 2008), book of abstract and CD proceeding, Phuket graceland and spa, Phuket, Thailand, August 13-15.
- Sondhi R. and Bhave R. 2001. “Role of backpulsing in fouling minimization in crossflow filtration with ceramic membranes”, **J. Membrane Sci.** 186: 41–52.
- Sridang P., Pottier, Wisniewski, and Grasmick 2008. Performance and microbial surveying in submerged membrane bioreactor for seafood processing wastewater treatment. **J. Membrane. Sci.** 317: 43–49.

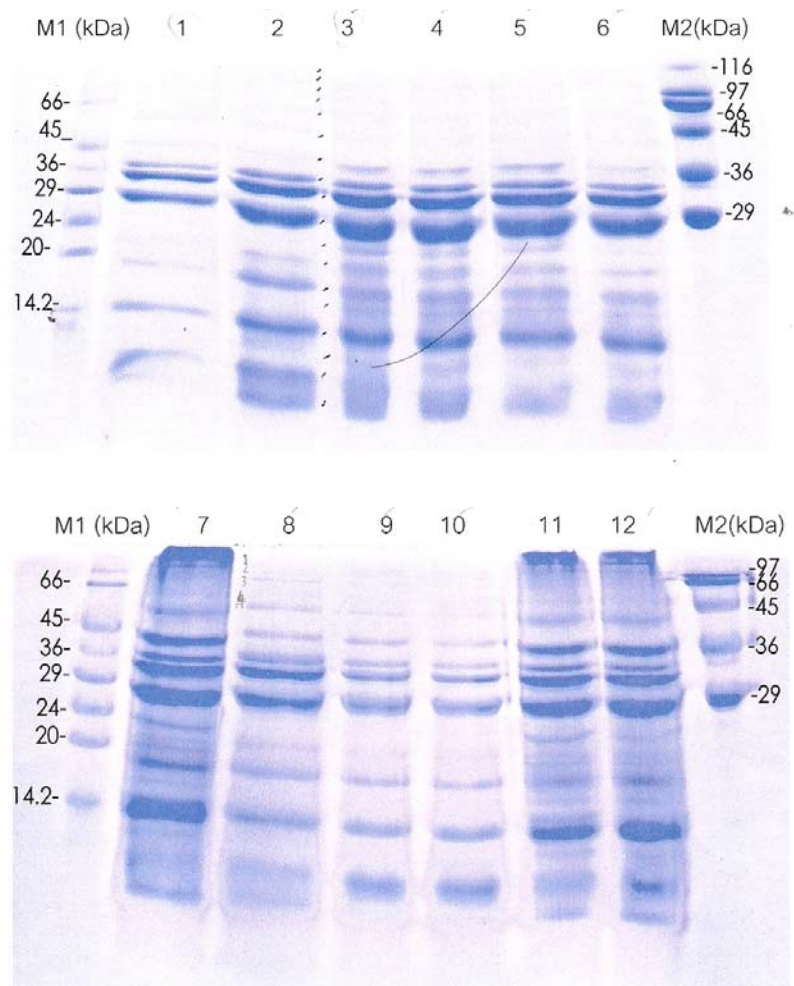
- Sulaiman M.Z., Sulaiman N. M. and Yih L. S. 1998. "Limiting permeate flux in the clarification of untreated starfruit juice by membrane ultrafiltration", **J. Chemical Eng.** 69: 145-148.
- Sulaiman H.N., and Foua, M.K. 2002. "Cake layer reduction by gas sparging cross flow ultrafiltration of skim latex serum", **J. Sci. Technology** . 24: 947-953.
- Tansel B., Regula J. and Shalewitz R. 1995. "Treatment of fuel oil and crude oil contaminated waters by ultrafiltration membranes", **Desalination**. 102: 301-311.
- Tishchenko G., Hilke R., Brecht W., Schauer J., Luetzow K., Pientka Z. and Bleha M. 2002. "Ultrafiltration and microfiltration membranes in latex purification by diafiltration with suction", **Separation Purification Technology**. 30: 57-68.
- Veerasamy D., Sulaiman N.M., Nambiar J., Ziz Y. "Environment friendly natural rubber latex concentration by membrane separation technology", [www.membrane.unsw.edu.au/imstec03/content/papers/IND/imstec208.pdf](http://www.membrane.unsw.edu.au/imstec03/content/papers/IND/imstec208.pdf).
- Vela M.V., Blanco S., Garcia J.L. and Rodriguez E.B. 2008. "Analysis of membrane pore blocking models applied to the ultrafiltration of PEG", **Separation and Purification Technology**. 62: 489-498.
- Wakeman R.J. and Williams J. 2002. "Additional techniques to improve microfiltration", **Separation Purification Technology**. 26: 3-18.
- Wang W.K. 2001. **Membrane separations in biotechnology**. 2<sup>nd</sup> edition, Revised and Expanded. Marcel Dekker Inc. New York. [www.lenntech.com/membrane-technology.htm](http://www.lenntech.com/membrane-technology.htm).
- Zahka J. and Mir L. 1977 . "Ultrafiltration of latex emulsions", **Chem. Eng. Progress**. 73, Dec.



Zhang J., Sun Y., Zhang Q., Liu X. and Meng G. 2006. "Improvement of crossflow microfiltration performances for treatment of phosphorus-containing wastewater", **Desalination**. 194: 182-191.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
น้ำหนักโมเลกุล ของโปรตีน



M1 = Protein Low molecular weight marker (Sigma)

M2 = Protein High molecular weight marker (Sigma)

ภาคผนวก ก ภาพแสดงน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในน้ำซีรัมโดยวิธี SDS-PAGE

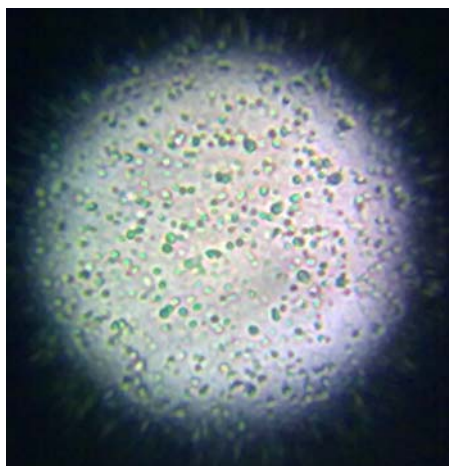
รายละเอียดของแถบโปรตีนที่วิเคราะห์ได้แสดงเป็นหมายเลข 1-12 กำกับบนภาพ ซึ่งเป็นข้อมูลโปรตีนที่สถานะที่มีการปรับและไม่ปรับสภาพทางน้ำยาดังนี้

1. skim + ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 300 rpm
2. skim + SDS 10 mg/l + ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 300 rpm

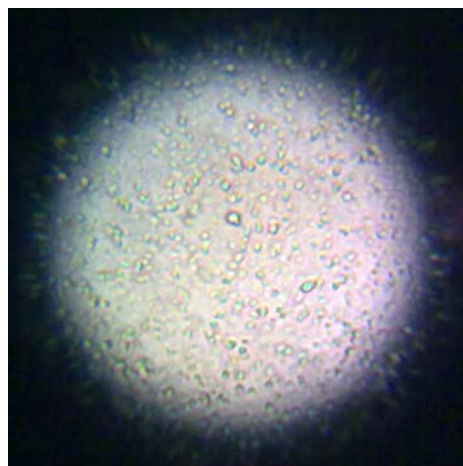
3. skim + ไม่ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 300 rpm
4. skim + SDS 10 mg/l + ไม่ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 300 rpm
5. skim + SLES 10 mg/l + ไม่ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 300 rpm
6. skim + PACI 10 mg/l + ไม่ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 300 rpm
7. skim + PQA 1 ml + ปรับ pH
8. skim + ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 150 rpm
9. skim + SDS 8 mg/l + ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 150 rpm
10. skim + SDS 10 mg/l + ปรับ pH กวนด้วยความเร็ว 150 rpm
11. skim + PQA 2 ml + ปรับ pH
12. skim + PQA 4 ml + ปรับ pH

### ภาคผนวก ข

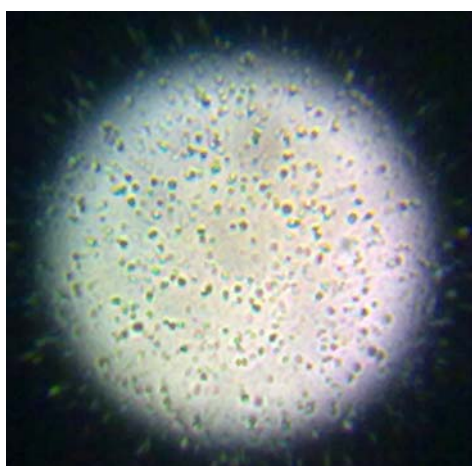
ภาพอนุภาคทางน้ำยาง (กำลังขยาย 400 เท่า) ที่ระยะเวลาในการบ่มต่างกัน



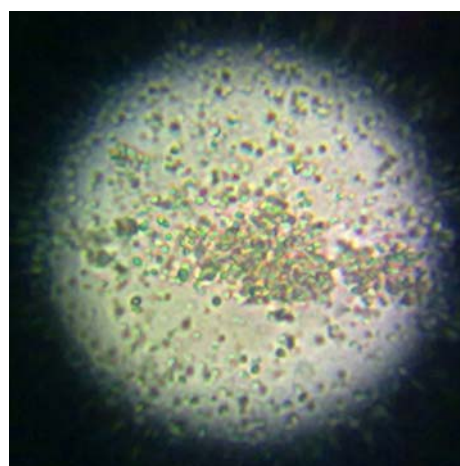
ภาคผนวก ข-1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม 5 วัน



ภาคผนวก ข-2 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม 8 วัน



ภาคผนวก ข-3 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม 11 วัน



ภาคผนวก ข-4 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม 11 วัน

จากภาคผนวก ข-3 และภาคผนวก ข-4 จะเห็นได้ว่ามีระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเท่ากัน คือ 11 วัน แต่มีบางส่วนที่ยังคงสภาพเป็นคอลลอยด์ และมีบางส่วนที่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มของอนุภาคยาง

### ภาคผนวก ก

#### การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรน

ผลการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการแยกเนื้อเยื่อออกจากน้ำซีรัมด้วยเมมเบรนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นเนื้อเยื่อ โดยศึกษาด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบและค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้สำหรับปรับสภาพทางน้ำยาและใช้สำหรับล้างเมมเบรน

#### 1. พิจารณาค่าใช้จ่ายในด้านกำลังไฟฟ้าที่ใช้

การเดินระบบการกรองด้วยเมมเบรนชนิดรูพรุนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูปแบบการเดินระบบกรองแบบไหลขวาง ในสเกลระดับห้องปฏิบัติการ (cross flow microfiltration lab scale unit) ใช้ปั๊มลมจำนวน 1 เครื่อง ในการทำงานของปั๊มไดอะแฟรมที่ใช้ในระบบ โดยทำการป้อนทางน้ำยาเข้าระบบครั้งละ 17 กิโลกรัม มีปริมาตรส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อทั้งหมดในทางน้ำยาประมาณร้อยละ  $4.69 \pm 1.01$  คิดเป็นประมาณ 0.8 กิโลกรัมเนื้อเยื่อแห้งในทางน้ำยา

$$\text{สูตรหาค่าไฟฟ้า} = \text{จำนวนหน่วย} \times \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)}$$

$$\text{จำนวนหน่วย} = \text{จำนวนวัตต์ (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)}$$

\*อัตรากระแสไฟฟ้าต่อหน่วย 3.62 บาท (อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff : TOU Tariff)) (การไฟฟ้านครหลวง, 2549)

##### 1) การเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์ $50\% J_{crit}$

● ปั๊มลม 2 แรงม้า (1 แรงม้าเท่ากับ 0.746 กิโลวัตต์) 1 เครื่อง คิดเป็น 1.492 กิโลวัตต์/เครื่อง โดยตลอดระยะเวลาในการเดินระบบปั๊มทำงานทั้งหมดเป็นเวลา 2.65 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้าของปั๊มที่ใช้} &= \text{จำนวนวัตต์ (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)} \times \text{ค่าไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)} \\ &= 1.492 \times 2.65 \times 3.62 \\ &= 14.31 \text{ บาทต่อครั้ง (0.8 กิโลกรัมเนื้อเยื่อแห้งในทางน้ำยา)} \\ &= 17.89 \text{ บาทต่อกิโลกรัมเนื้อเยื่อแห้งในทางน้ำยา} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทำงานของปั๊มลมในการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์  $50\% J_{crit}$  คิดเป็นเงิน 14.31 บาทต่อครั้ง หรือ 17.89 บาทต่อกิโลกรัมเนื้อเยื่อแห้งในทางน้ำยา

## 2) การเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ )

● ป๊อลม 2 แรงแม่ (1 แรงแม่เท่ากับ 0.746 กิโลวัตต์) 1 เครื่อง คิดเป็น 1.492 กิโลวัตต์/เครื่อง โดยตลอดระยะเวลาในการเดินระบบป๊อทำงานทั้งหมดเป็นเวลา 1.76 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้าของป๊อที่ใช้} &= \text{จำนวนวัตต์ (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)} \times \text{ค่าไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)} \\ &= 1.492 \times 1.76 \times 3.62 \\ &= 9.5 \text{ บาทต่อครั้ง (0.8 กิโลกรัมเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง)} \\ &= 11.89 \text{ บาทต่อกิโลกรัมเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทำงานของป๊อลมในการเดินระบบกรองแบบไหลขวางที่ค่าฟลักซ์วิกฤต ( $J_{crit}$ ) คิดเป็นเงิน 9.5 บาทต่อครั้ง หรือ 11.89 บาทต่อกิโลกรัมเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง

## 2. พิจารณาค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้สำหรับปรับสภาพหางน้ำยางและใช้สำหรับล้างทำความสะอาดเมมเบรน

**2.1 พิจารณาค่าใช้จ่ายสารเคมีที่ใช้สำหรับปรับสภาพหางน้ำยาง** ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้สารเคมีระดับทางการค้า (Commercial grade) โดยสารเคมีที่ใช้สำหรับปรับสภาพหางน้ำยาง คือ Sodium dodecyl (lauryl) sulfate (SDS) ซึ่งมีราคาประมาณ 75 บาทต่อกิโลกรัม SDS 1 กิโลกรัม สามารถเตรียม SDS ความเข้มข้น 300 กรัมต่อลิตร ได้ประมาณ 3 ลิตร โดยในชุดการทดลองใช้ SDS ความเข้มข้น 300 กรัมต่อลิตรประมาณ 0.5 ลิตรต่อหางน้ำยาง 17 กิโลกรัม คิดเป็นเงินทั้งสิ้น 12.50 บาทต่อหางน้ำยาง 17 กิโลกรัม หรือ 0.59 บาทต่อกิโลกรัมเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง

**2.2 พิจารณาค่าใช้จ่ายสารเคมีที่ใช้สำหรับในการล้างทำความสะอาดเมมเบรน** ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้สารเคมีระดับทางการค้า (Commercial grade) โดยสารเคมีที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการล้างทำความสะอาดเมมเบรนมีดังนี้

### 1) ปริมาณ NaOH ที่ใช้เทียบกับค่าใช้จ่าย

NaOH 30 ลิตร ราคาประมาณ 1000 บาท โดยในการล้างเมมเบรน 1 ครั้ง ต้องเตรียม NaOH 2%  $\square$  จาก NaOH 50% โดยน้ำหนัก โดยในชุดการทดลองใช้น้ำ 17 ลิตร จะมี NaOH 0.6 ลิตร ดังนั้น NaOH ที่ใช้ในการล้างเมมเบรน 1 ครั้งคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 20 บาทต่อสารละลาย 17 ลิตร หรือ 0.94 บาทต่อกิโลกรัมเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง

## 2) ปริมาณ NaOCl ที่ใช้เทียบกับค่าใช้จ่าย

NaOCl 25 ลิตร ราคาประมาณ 800 บาท โดยในการล้างแมมเบรน 1 ครั้ง ต้องเตรียม NaOCl 1%  จาก NaOCl 10% โดยน้ำหนัก โดยในชุดการทดลองใช้น้ำ 17 ลิตร จะมี NaOCl 1.7 ลิตร ดังนั้น NaOCl ที่ใช้ในการล้างแมมเบรน 1 ครั้งคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 54 บาทต่อสารละลาย 17 ลิตร หรือ 2.54 บาทต่อกิโลกรัมเนื้อเยื่อแห้งในทางน้ำยาง





membrane filtration: application to recovery valued compound and to concentrate latex particle". The 7<sup>th</sup> International Conference on Membrane Science & Technology (MST 2009) "Sustainable Technology for Energy, Water and Environment" Corus Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia 13<sup>th</sup>-15<sup>th</sup> May 2009.