การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการใช้แผ่นเยื่อกรอง

Removal of Heavy Metals from Electroplating Wastewater by Membrane

พูลเพชร ธงไชย

Poonphet Thongchai

Order Key 20194
BIB Key 160370

เลขหมู่ TD758.5.H43 พ84 2541 ฉ. 2
เลขทะเบียน
28 มี.ย. 2542

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Environmental Management

Prince of Songkla University

2541

ชื่อวิทยานิพนธ์ การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการใช้แผ่นเยื่อกรอง

ผู้เขียน นางสาวพูลเพชร ธงไชย

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการที่ปรึกษา

....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

....กรรมการ
(ดร.วีระศักดิ์ ทองลิมป์)

คณะกรรมการสอบ

....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

....กรรมการ
(ดร.วีระศักดิ์ ทองลิมป์)

....กรรมการ
(ดร.สมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์)

....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ อรัญนารถ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ก้าน จันทร์พรหมมา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการใช้แผ่นเยื่อกรอง

ผู้เขียน นางสาวพูลเพชร ธงไชย

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรอง ทั้งนี้ได้เลือกศึกษากับแผ่นเยื่อกรอง 2 ชนิด คือแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 0.2 μm ผลิตจาก cellulose acetate และแผ่นเยื่อกรองประเภท อัลตราฟิลเตรชันที่มี MWCO 30 kDa ผลิตจาก polysulfone ได้ทำการศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี แล้วจึงนำส่วนน้ำใสมาเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ซึ่งการทดลองเหล่านี้กระทำภายใต้ความดัน50 100 และ 200 kPa โดยพิจารณาจากความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ โครเมียม ทองแดง นิกเกิล และ สังกะสี ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

พบว่าฟลักซ์ของการทดลองที่ความดัน 200 kPa สูงสุด รองลงมาคือการทดลองที่ความดัน 100 และ50 kPa ตามลำดับ ส่วนค่า Rejection ในการทดลองที่ความดัน 50 kPa สูงสุด รองลงมาคือการทดลองที่ความดัน 100 และ200 kPa ตามลำดับ การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงาน และแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักใกล้เคียงกับแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันในขณะที่ให้ฟลักซ์สูงกว่า โดยการกรองน้ำเสียสังเคราะห์โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมได้ 35.85-55.97% สามารถกำจัดทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงได้มากกว่า 98.67% สามารถกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลได้ 24.00-97.39% สามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีได้ 38.52-86.67% และในน้ำเสียสังเคราะห์รวมสามารถกำจัดโครเมียมได้ 37.07-63.79% สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า 98.28% สามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่า 98.05% สามารถกำจัดสังกะสีได้มากกว่า 98.95%

การกรองน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมได้ 12.39-66.37% สามารถกำจัดทองแดงในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงได้ 79.17-96.67% สามารถกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลได้ 40.12-68.86% สามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีได้ 14.88-34.71% และในน้ำเสียรวมสามารถกำจัดโครเมียมได้ 8.52-32.42% สามารถกำจัดทองแดงได้ 10.14-47.83% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ 8.05-45.98% สามารถกำจัดสังกะสีได้ 10.00-60.00%

สำหรับการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดโครเมียมได้ 44.44-56.57% สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า 98.69% สามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่า 96.72% สามารถกำจัดสังกะสีได้มากกว่า 98.98% และการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดโครเมียมได้ 17.00-36.25% สามารถกำจัดทองแดงได้ 2.82-16.90% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ 21.52-32.91% สามารถกำจัดสังกะสีได้ 33.33-มากกว่า 83.33%

และได้ศึกษาการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง โดยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที พบว่าฟลักซ์หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

Thesis Title	Removal of Heavy Metals from Electroplating Wastewater by Membrane
Author	Miss Poonphet Thongchai
Major Program	Environmental Management
Academic Year	1998

Abstract

This research was to study the treatment of heavy metals in electroplating wastewater with membrane. Two selected membrane types, cellulose acetate microfiltration membrane with pore size 0.2 μm and polysulfone ultrafiltration membrane with MWCO 30 kDa were used in this study. Synthetic and factory electroplating wastewater were used as the samples. The experiments were performed by chemical precipitating both synthetic and factory wastewater in first step and membrane filtrating of supernatant at the pressure of 50, 100 and 200 kPa in the second step. The concentration of chromium, copper, nickel and zinc of treated water were compared with standard value given by Ministry of Industry (MOI)

The experimental results shown that flux was highest at the pressure of 200 kPa and decrease as the pressure decrease. The rejection was highest at the pressure of 50 kPa and decrease as pressure increase. The results from synthetic wastewater were better than those from factory wastewater. The capability of heavy metal removal of microfiltration and ultrafiltration membrane was the same which microfiltration gave more flux.

The heavy metal removal efficiency of microfiltration of synthetic electroplating wastewater process of chromium, copper, nickel and zinc was 35.85-55.97%, >98.67%, 24.00-97.39% and 38.52-86.67% respectively. For composite synthetic wastewater, the removal efficiency of chromium, copper, nickel and zinc was 37.07-63.79%, >98.28%, >98.05% and >98.95% respectively.

For factory electroplating wastewater process the removal of chromium, copper, nickel and zinc was 12.39-66.37%, 79.17-96.67%, 40.12-68.86%, and 14.88-34.71% respectively. The removal efficiency of chromium, copper, nickel and zinc from composite factory wastewater was 8.52-32.42%, 10.14-47.83%, 8.05-45.98% and 10.00-60.00% respectively.

In ultrafiltration of composite synthetic wastewater, the removal efficiency of chromium, copper, nickel and zinc was 44.44-56.57%, >98.69%, >96.72% and >98.98% respectively. For composite factory wastewater, the removal efficiency of chromium, copper, nickel and zinc was 17.00-36.25%, 2.82-16.90%, 21.52-32.91% and 33.33->83.33% respectively.

The results from the study of membrane surface washing shown that little flux increase after washing membrane by stirring with stirring rod at 400 rpm for 30 minutes.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.วีระศักดิ์ ทองลิมป์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าและการเขียนวิทยานิพนธ์ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.สมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ อรัญนารถ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเครือข่ายมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Prof. Dr. Anthony G. Fane และ Prof. Dr. Hans G.L. Coster ผู้อำนวยการ UNESCO Center for Membrane Science and Technology ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษา ณ UNESCO Center for Membrane Science and Technology , University of New South Wales ประเทศออสเตรเลีย เป็นเวลา 4 เดือน

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนสำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณคณะการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อนนักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยด้วยดี

ท้ายสุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ และน้อง ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พูลเพชร ธงไชย

สารบาญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบาญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(16)
รายการตารางภาคผนวก	(20)
ตัวย่อ และสัญลักษณ์	(21)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
ตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	36
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	36
ขอบเขตการวิจัย	37
2. วิธีการวิจัย	38
วัสดุ	38
อุปกรณ์	38
วิธีดำเนินการวิจัย	41
3. ผลการวิจัย	49
ข้อมูลพื้นฐานของโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ทำการศึกษา	49
ปริมาณและลักษณะน้ำเสีย	49
ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันกับน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ	52

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันกับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ	74
ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันกับน้ำเสียสังเคราะห์รวมด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ	97
ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันกับน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ	105
4. บทวิจารณ์	115
การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า	115
ฟลักซ์	117
การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง	119
ความต้านทานของตัวถูกละลาย	121
ปริมาณโลหะหนัก	122
pH สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งแขวนลอย	131
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	133
บทสรุป	133
ข้อเสนอแนะ	136
บรรณานุกรม	138
ภาคผนวก	146
ภาคผนวก ก	147
ภาคผนวก ข	153
ภาคผนวก ค	159
ภาคผนวก ง	162
ภาคผนวก จ	225
ประวัติผู้เขียน	228

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. ช่วงความเข้มข้นของมลสารในโรงงานชุบเคลือบโลหะ	8
2. ปริมาณและลักษณะน้ำเสียจำนวน 20 โรงงานในจังหวัดกรุงเทพมหานคร	10
3. สรุปข้อมูลการทำงานของโรงงานชุบโลหะ	11
4. ผลกระทบของโครเมียมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก	14
5. คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์	15
6. ผลกระทบของนิกเกิลต่อกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์	15
7. สารเคมีและปฏิกิริยาที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหก	16
8. ความต้องการปริมาณสารเคมีทางทฤษฎีในการรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหก 1 มก./ล โดยสมมติว่าสารเคมีมีความบริสุทธิ์ 100%	17
9. ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	18
10. ชนิดของแผ่นเยื่อกรองกับการประยุกต์ใช้งาน	24
11. ผลการวิเคราะห์โลหะหนักและของแข็งแขวนลอย	35
12. ตัวแปรคุณภาพน้ำที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์	42
13. ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ทำการศึกษา	51
14. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	54
15. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	55
16. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	56
17. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	57
18. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	58

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

19. การสูญเสียฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ความดันต่างๆ 59
20. อัตราการกรองของน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ 65
21. ความต้านทานของตัวถูกละลาย ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ 66
22. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ 67
23. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ 67
24. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ 68

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
25. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	68
26. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์รวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน(cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	69
27. การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน(cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	72
28. ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	74
29. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	76
30. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	77
31. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	78
32. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	79
33. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	80
34. การสูญเสียฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ความดันต่างๆ	82

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
35. อัตราการกรองของน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	88
36. ความต้านทานของตัวถูกละลาย ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	89
37. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	90
38. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	90
39. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	91
40. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	91
41. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียรวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	92

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
42. การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	95
43. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	98
44. อัตราการกรองของน้ำเสียสังเคราะห์รวม จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	101
45. ความต้านทานของตัวถูกละลาย ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวม จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	102
46. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์รวม จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	103
47. การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์รวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	105
48. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ	106

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
49. อัตราการกรองของน้ำเสียรวม จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	110
50.ความต้านทานของตัวถูกละลาย ของการกรองน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	110
51. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	112
52. การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ	113
53. ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยแผ่นเยื่อกรอง	126

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.หลักการเบื้องต้นของการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า	4
2. ผลกระทบของทองแดงต่อกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์	13
3. แสดงกลไกการทำงานของ Electrodialysis	26
4. แสดงกลไกการทำงานของ Reverse Osmosis	26
5. แสดงกลไกการทำงานของ Nanofiltration	27
6. แสดงกลไกการทำงานของ Ultrafiltration	27
7. แสดงกลไกการทำงานของ Microfiltration	27
8. โมดูลแบบท่อ (tubular module)	30
9. โมดูลแบบแผ่น (plate and frame or plate module)	31
10. โมดูลแบบม้วน (spiral wound module)	31
11. โมดูลแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module)	32
12. concentration polarization	33
13. แบบจำลองถังตกตะกอน	39
14. เวสเซลเก็บน้ำเสียตัวอย่าง	40
15. เวสเซลติดตั้งแผ่นเยื่อกรอง	40
16. การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น	43
17. ขั้นตอนการทดลองกรองน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	46
18. แบบจำลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง	48
19. ขั้นตอนการทำงานและจุดเก็บตัวอย่างน้ำจากโรงงาน	50
20. แบบจำลองในห้องปฏิบัติการของระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง	52
21. น้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ	53

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22. อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่เวลา และความดันต่างๆ	60
23. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	61
24. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	62
25. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	63
26. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวม โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	64
27. อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่เวลาและความดันต่างๆ	81
28. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	83
29. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	84

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
30. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	85
31. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	86
32. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	87
33. อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่เวลาและความดันต่างๆ	99
34. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่เวลาและความดันต่างๆ	100
35. อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่เวลาและความดันต่างๆ	107
36. ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่เวลาและความดันต่างๆ	108
37. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) กำลังขยาย 6,000 เท่า ของแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน หลังทำการกรองที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	119

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
38. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) กำลังขยาย 10,000 เท่า ของแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)	124

รายการตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวก	หน้า
ง1 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียต่างๆโดยแผ่นเยื่อกรอง	163
ง2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก	187
ง3 ผลการวิเคราะห์ pH	201
ง4 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด	207
ง5 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า	213
ง6 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง	219

ตัวย่อ และสัญลักษณ์

J	= ฟลักซ์
P	= ความดัน
μ	= ความหนืดของน้ำที่ 25°C
Rm	= ความต้านทานของแผ่นเยื่อกรอง
Rs	= ความต้านทานของตัวถูกละลาย
R (%)	= ปริมาณสารที่ตกค้างอยู่ในแผ่นเยื่อกรอง (%)
Cp	= ความเข้มข้นของสารในน้ำเสียที่ออกจากระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง
Cb	= ความเข้มข้นของสารในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง
Cw	= ความเข้มข้นของสารในน้ำเสียบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง
μm	= ไมโครเมตร
nm	= นาโนเมตร
MWCO	= Molecular Weight Cutoff
kDa	= kilodalton
kPa	= kilopascal
BOD	= Biochemical Oxygen Demand
COD	= Chemical Oxygen Demand
mg/l	= มิลลิกรัมต่อลิตร
m^3/d	= ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
g/m^3	= กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
mg/m^3	= มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
mS/m	= มิลลิซีเมนต์ต่อเมตร
$l/m^2.h$	= ลิตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง
$N.s/m^2$	= นิวตัน.วินาที ต่อตารางเมตร

ตัวย่อ และสัญลักษณ์ (ต่อ)

มก./ล	= มิลลิกรัมต่อลิตร
$ม^3$/วัน	= ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
กก./วัน	= กิโลกรัมต่อวัน

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติ ที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิตทั้งมนุษย์ สัตว์ และพืช ซึ่งในอดีตปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพน้ำมีน้อย เนื่องจากแหล่งกำเนิดของสารมลพิษส่วนใหญ่มาจากชุมชนแต่ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนาไปสู่ประเทศอุตสาหกรรม ดังจะเห็นได้จากแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติตั้งแต่ฉบับที่ 1-7 รัฐบาลได้ให้การสนับสนุนทางภาคอุตสาหกรรมแก่เอกชนเป็นอย่างมากทำให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ มีการเติบโตอย่างรวดเร็วซึ่งในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะเกิดของเสียที่ไม่ต้องการควบคู่กันไปส่งผลให้ปริมาณน้ำเสียมีมากขึ้น ซึ่งมักไม่ได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและแรงงานแต่ไม่ให้ผลกำไรทางด้านธุรกิจ ในบางครั้งผู้ประกอบการมีความตั้งใจในการบำบัดน้ำเสียแต่ขาดวิธีการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพทำให้ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียนั้นๆ ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ดังแสดงในภาคผนวก ก

สำหรับอุตสาหกรรมการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าก็ได้ขยายตัวตามอุตสาหกรรมอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ซึ่งอุตสาหกรรมนี้ต้องใช้โลหะหนักต่าง ๆ เช่น โครเมียม (Cr) , ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni), สังกะสี (Zn) ฯลฯ เป็นส่วนประกอบหลักของกระบวนการผลิต ดังนั้นน้ำเสียที่ได้จากโรงงานชุบเคลือบโลหะจึงมีโลหะหนักปะปนอยู่เป็นปริมาณมากซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมทั้งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ จึงจำเป็นต้องได้รับการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพ และมีการควบคุมตรวจสอบสารมลพิษเหล่านี้

ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าในประเทศไทยนั้น สำหรับโรงงานที่ตั้งอยู่ในเขตจังหวัดกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ไม่เป็นปัญหามากนัก เนื่องจากมี

ศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เขตบางขุนเทียน ซึ่งเปิดบริการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 ให้บริการช่วยแบ่งเบาภาระในการบำบัดน้ำเสียแก่ผู้ประกอบการ แต่ในโรงงานที่อยู่ห่างไกล เช่นในจังหวัดสงขลา ไม่สามารถใช้บริการศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำได้ จึงประสบกับปัญหาในการบำบัดน้ำเสีย

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการชุบเคลือบโลหะส่วนใหญ่ ใช้ระบบบำบัดทางเคมีโดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักโดยตรง เกิดการตกตะกอน (precipitation) แต่ก็พบว่าหลังจากบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้มีโลหะหนักหลงเหลืออยู่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานในหลายรายงานการศึกษา เนื่องมาจากโลหะหนักที่ผ่านการตกตะกอนทางเคมีอาจอยู่ในรูปสารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก ในกรณีการบำบัดน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยปะปนอยู่มากนั้นทั่วไปจะใช้สารสร้างตะกอน (coagulant) และสารรวมตะกอน (flocculant) เพื่อให้สารแขวนลอยเหล่านั้นรวมตัวกันเป็นก้อน ซึ่งรีเอเจนต์ (reagent) ที่ใช้ในการสร้างตะกอนและรวมตะกอนอาจส่งผลกระทบคือ สลัดจ์ที่ได้ประกอบไปด้วยรีเอเจนต์ทำให้ยากแก่การบำบัดต่อไป และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วอาจมีสารสร้างตะกอนหลงเหลืออยู่ถ้าการตกตะกอนไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับการควบคุมดูแลที่ดี ดังนั้นจึงมีความต้องการที่จะปรับปรุงคุณภาพและปริมาณของน้ำที่ผ่านการบำบัด อีกทั้งกระแสความนิยมในการใช้กระบวนการผลิตที่ปราศจากมลพิษ (nonpolluting process) ทำให้ความต้องการในการใช้สารเคมีในกระบวนการบำบัดน้ำเสียลดน้อยลงในอนาคต

เทคโนโลยีการใช้แผ่นเยื่อกรอง (membrane technology) เป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียเพื่อสนองความต้องการดังกล่าวข้างต้น โดยที่เลือกขนาดรูพรุน (pore size) หรือ Molecular Weight Cutoff (MWCO) ได้ถูกต้องก็จะสามารถกรองสารมลพิษไว้ได้ทั้งหมดโดยไม่ต้องใช้สารเคมี และสลัดจ์ที่ได้เป็นเพียงสารพิษที่มาจากกระบวนการผลิตเท่านั้น (Scott, 1995) นอกจากนั้นแผ่นเยื่อกรองยังสามารถใช้ร่วมกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดได้อีกด้วย

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นที่จะเสนอแนวทางเลือกใหม่ในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้การกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง (membrane filtration) ซึ่งถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการตอบสนอง

ความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาให้ได้มาซึ่งเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาภาวะมลพิษต่อไป

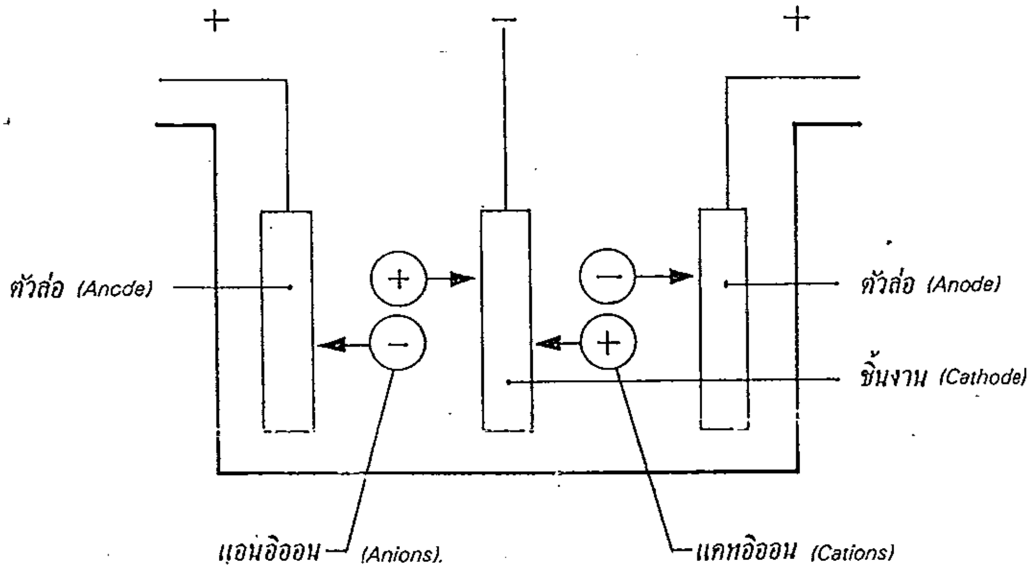
ตรวจเอกสาร

1. การชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นการทำให้ผิวโลหะมีความสวยเงางาม ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงป้องกันสนิม ทนต่อการสึกกร่อน นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มความหนาของชิ้นงานในกรณีชิ้นงานสึกกร่อน

1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.1.1 ตัวนำไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชนิด คือเป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นแต่เพียงสะพานเพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้เท่านั้นเช่นโลหะต่าง ๆ และแกรไฟต์ อีกชนิดคือเป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวของมัน เช่นน้ำเจือกรดและสารละลายเกลือต่าง ๆ เป็นต้น ตัวนำชนิดหลังนี้ในทางวิทยาศาสตร์ใช้ชื่อว่า อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ ที่ใช้แผ่นปลาตินัมเป็นขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ (ions) ไอออนที่วิ่งไปยังขั้วบวก (anode) เรียกว่าแอนไอออน (anions) จะมีประจุไฟฟ้าลบ (-) ประจำตัว ไอออนที่วิ่งไปยังขั้วลบ (cathode) เรียกว่าแคทไอออน (cations) จะมีประจุไฟฟ้าบวก (+) ประจำตัว ขณะที่เกิดการแยกสลายดังกล่าวในสารละลายนั้นเราจะมองไม่เห็นปฏิกิริยาใด ๆ เกิดขึ้นในสารละลายนั้นเลย แต่จะไปเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือขั้วบวกดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 หลักการเบื้องต้นของการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า

ที่มา : อนันต์ ทองมอญ, 2531

1.1.2 ค่าของพีเอช (pH) ค่าของ pH มีอิทธิพลต่อน้ำยาชุบโลหะมาก กล่าวคือถ้า pH น้อยแสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดลดต่ำลง ถ้า pH มากแสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นด่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้การควบคุมค่าของ pH จึงสำคัญมาก น้ำยาทุกชนิดจะมีค่า pH ที่เหมาะสมอยู่โดยเฉพาะที่ค่าหนึ่ง ฉะนั้นจึงควรพยายามควบคุมให้ค่า pH อยู่ในขอบเขตตามที่กำหนดให้ได้ น้ำยาชุบชนิดใดควรมีค่า pH เท่าใดจะทราบได้จากคู่มือการใช้น้ำยาชนิดนั้นๆ

1.1.3 ความหนาแน่นของกระแส (current density) ความหนาแน่นของกระแสของขั้วลบคือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ขั้วลบต่อหนึ่งหน่วยเนื้อที่ ปกติมักจะใช้แอมแปร์ต่อตารางฟุตหรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของแคโทด เพื่อทราบว่าจะจ่ายความหนาแน่นของกระแสแตกต่างกันออกไปและงานแต่ละชิ้นก็มีเนื้อที่ต่าง ๆ กัน ด้วยเหตุนี้กระแสและเนื้อที่จึงควรพิจารณาเป็นอันดับแรกเสมอก่อนที่จะจุ่มชิ้นงานลงในถังเพื่อทำการชุบ ความหนาแน่นของกระแสให้ดูจากคู่มือการใช้น้ำยาแต่ละชนิด

1.2 การชุบโครเมียม โครเมียมเป็นโลหะที่มีสีขาวนวล สุกใส ไม่ขุ่นมัว ไม่ต้องขัดถูบ่อย ๆ มีจุดหลอมตัวสูงที่ 1,615°C เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและไม่เป็นสนิม ประโยชน์ของโครเมียมคือนำ

ไปผสมกับโลหะอื่นๆในอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะ และใช้ชุบเคลือบผิวโลหะชนิดอื่น ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้โลหะนั้นๆ เกิดสนิมและขุ่นมัว การชุบเคลือบผิวบนโลหะอื่นด้วยโครเมียมในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1.2.1 การชุบโครเมียมชนิดบางหรือชุบเพื่อความสวยงาม (decorative chromium) การชุบชนิดนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันไม่ให้โลหะอื่นเป็นสนิมและให้ความสวยงาม ทนต่อการเสียดสีและทนต่อการผุกร่อนการชุบเคลือบในลักษณะนี้มักจะชุบโครเมียมค่อนข้างบางมาก โดยหนาประมาณ 0.00001 ถึง 0.00003 นิ้ว หรือ 0.25 ไมครอน ถึง 0.8 ไมครอน ในการชุบโครเมียมแบบนี้จะต้องชุบบนผิวงานที่ชุบนิกเกิลไว้แล้ว

1.2.2 การชุบโครเมียมชนิดหนา ซึ่งเรียกว่า hard chromium หรือ hard chrome การชุบชนิดนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความหนาให้กับผิวของโลหะนั้น ๆ เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องมือเครื่องจักรที่สึกหรอไปเพราะการใช้งานถ้านำมาชุบโครเมียมให้หนาขึ้น แล้วนำไปเจียรไนก็จะสามารถนำไปใช้งานได้ดีเหมือนเดิม หรือมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผิวโลหะนั้น ๆ มีความแข็งแกร่ง ทนต่อความร้อน ทนต่อการเสียดสี มีความฝืดต่ำ เช่นก้านไฮโดรลิกเป็นต้น การชุบเคลือบในลักษณะนี้ต้องใช้เวลามาก ด้วยเหตุที่ชุบนานจึงได้โลหะโครเมียมหนาและแข็งแกร่งมาก ปรกติแล้วมักจะชุบที่ความหนาตั้งแต่ 0.0001 นิ้วขึ้นไป และโดยมากชุบโครเมียมโดยตรงบนเหล็ก สำหรับส่วนผสมของน้ำยาชุบโครเมียม ดูในภาคผนวก ข

1.3 การชุบทองแดง

ทองแดงมีประโยชน์ในการชุบเคลือบผิวขั้นแรกของโลหะเดิมก่อนที่จะไปชุบอย่างอื่นเช่นใช้ชุบบนงานที่มีรอยบัดกรีและชุบบนสังกะสีผสมก่อนที่จะไปชุบนิกเกิล เพราะถ้าหากเอาชิ้นงานที่มีรอยบัดกรี หรืองานที่มีสังกะสีผสมอยู่ สังกะสีจะละลายในน้ำยานิกเกิลทันที

การชุบทองแดงแบ่งตามสภาพน้ำยาได้ดังนี้

การชุบทองแดงแบบด่าง สารละลายของการชุบทองแดงแบบด่างมีกำลังการเคลือบผิวดีมากและการเกาะจับผิวแน่น การชุบทองแดงแบบด่างนี้เหมาะสำหรับชุบรองพื้นขั้นแรก ก่อนที่จะนำไปชุบทองแดงแบบกรดและนิกเกิลเงา ทองแดงแบบด่างยังแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ แบบสไตรค์ (strike bath) แบบร๊อคเซล (rochelle bath) และแบบมีประสิทธิภาพสูง (high efficiency bath)

การชุบทองแดงแบบกรด การชุบรองพื้นด้วยทองแดงแบบกรด จะได้ผิวทองแดงที่เคลือบเรียบและเป็นเงางาม ชุบให้หนาได้ตามต้องการ การควบคุมน้ำยาก็ง่าย มีกำลังการเคลือบที่ดี และผิวชุบที่ได้จะเป็นทองแดงบริสุทธิ์ มีความเหนียว (ส่วนผสมของน้ำยาชุบทองแดงดูในภาคผนวก ข)

1.4 การชุบนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีสีขาวด้านแต่เวลาชุบใส่น้ำยาเงาเข้าไปด้วย ทำให้ได้ผิวนิกเกิลเป็นสีขาวคล้ายเงิน และมีความเงาสวยงามและทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีมาก มีจุดหลอมตัวที่ 1,452 $^{\circ}C$ ใช้กันแพร่หลายมากในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าเพราะนิกเกิลมีความทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดี ดังนั้นการชุบนิกเกิลบนโลหะอื่นเพื่อรักษาเนื้อโลหะเดิมไม่ให้เกิดสนิมง่ายและยังช่วยทำให้โลหะที่ชุบสวยงามอีกด้วย การชุบนิกเกิลมีหลายแบบด้วยกันเช่น

นิกเกิลด้าน (dull nickel) นิกเกิลด้านโดยทั่วไปใช้ชุบลงบนชิ้นงานก่อนที่จะชุบโครเมียม แต่ชิ้นงานที่ชุบนิกเกิลด้านแล้วจะต้องนำไปขัดด้วยเครื่องมือขัดให้ชิ้นงานขึ้นเงา จึงนำไปชุบโครเมียม

นิกเกิลกึ่งเงา (semi-bright nickel) นิกเกิลกึ่งเงาใช้ชุบรองพื้นบนชิ้นงานที่เป็นหลักโดยเฉพาะชิ้นงานที่ใช้ตากแดดตากฝน เนื่องจากนิกเกิลกึ่งเงาเป็นนิกเกิลที่ทนต่อการเกิดสนิมดีมากและมีความเหนียวชุบแล้วดัดงอได้โดยผิวไม่แตกหรือร่อนออก ชิ้นงานที่จะนำไปชุบโครเมียมจะต้องชุบนิกเกิลกึ่งเงาก่อน

นิกเกิลเงา (bright nickel) นิกเกิลเงาใช้ชุบรองพื้นบนชิ้นงานก่อนชุบโครเมียม ก่อนชุบทองเหลือง และชุบรองพื้นก่อนชุบเงิน และก่อนชุบทอง (ส่วนผสมของน้ำยาชุบนิกเกิลดูในภาคผนวก ข)

1.5 การชุบสังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะชนิดหนึ่งมีสีขาว - เทา ขัดให้เป็นเงาได้แต่เปราะ ในทางชุบโลหะนิยมชุบบนชิ้นงานที่เป็นเหล็ก เพราะสังกะสีทนต่อการเกิดสนิมดีมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางอุตสาหกรรมชุบโลหะทั่ว ๆ ไป การชุบสังกะสีจะมีบทบาทมาก นอกจากทางชุบแล้วโลหะสังกะสียังใช้ผสมกับโลหะชนิดอื่น แล้วอัดหรือฉีดออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเป็นเครื่องใช้เครื่องประดับ เฟอร์นิเจอร์ต่างๆ แต่จะต้องนำไปชุบโครเมียม หรือชุบทองเหลือง-ทองแดง-รมดำ ก่อน

นำไปใช้งาน การชุบสังกะสีนั้นเป็นการทำให้สังกะสีเกาะจับบนชิ้นงานโดยใช้หลักเคมี-ไฟฟ้า เพื่อกันสนิมบนชิ้นงานเหล็ก ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการชุบสังกะสีก็เป็น ซิ้งออกไซด์ (zinc oxide) หรือ ซิ้งไซยาไนด์ (zinc cyanide) อย่างใดอย่างหนึ่ง

น้ำยาชุบสังกะสีชนิดใช้ไซยาไนด์เป็นน้ำยาที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมชุบสังกะสี เพราะการควบคุมน้ำยาง่าย การชุบก็ง่าย แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้องใช้ไซยาไนด์เป็นสารละลาย ซึ่งไซยาไนด์เป็นสารมีพิษส่วนการชุบสังกะสีแบบไม่ใช้ไซยาไนด์ทำให้ลดอันตรายจากสารพิษชนิดนี้แก่ผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม สารเคมีที่ใช้ในการชุบประกอบด้วย ซิ้งออกไซด์, โซดาไฟ และน้ำยาเงา นอกจากนี้ยังมีการชุบสังกะสีแบบกรดซึ่งเหมาะสำหรับชุบงานที่เป็นเหล็กหล่อ และเหล็กที่มีคาร์บอนสูง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยาชุบสังกะสีแบบไซยาไนด์แล้ว น้ำยาชุบสังกะสีแบบกรดนี้กำลังการเคลือบจะต่ำกว่า ฉะนั้นน้ำยาชุบสังกะสีแบบกรดจึงไม่เหมาะที่จะชุบบนชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนและมีร่องหรือซอกลึกมาก ๆ แต่น้ำยาชนิดกรดนี้ไม่มีไซยาไนด์ก็จะตัดปัญหาทางด้านกำจัดน้ำทิ้งจากไซยาไนด์ และปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน (ส่วนผสมของน้ำยาชุบสังกะสีดูในภาคผนวก ข)

2. น้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า

ได้มีการศึกษาปริมาณและลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะไว้มากมาย พบว่าปริมาณและลักษณะน้ำเสียมีการแปรเปลี่ยนเป็นอย่างมาก ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และวิธีการชุบเคลือบโลหะซึ่งมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละโรงงาน หรือแม้แต่ในโรงงานเดียวกันเมื่อศึกษาที่วัน เวลาต่างกัน ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมคนงาน และวิธีการล้างชิ้นงานหลังชุบเป็นต้น ดังที่สาโรช บุญยกิจสมบัติ (2535) ได้อ้างถึงการศึกษาของ Tay (1986) ซึ่งได้สรุปความเข้มข้นของมลสารในโรงงานชุบเคลือบโลหะจำนวน 14 โรงงาน ภายในเขตกรุงเทพมหานคร และสรุปไว้ดังตาราง 1

และได้อ้างถึงผลการศึกษาของ TISTR (1982) ที่ได้เก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจาก 20 โรงงานในเขตกรุงเทพมหานคร สรุปได้ดังตาราง 2

จิระศักดิ์ รัตนไพฑูรย์ (2526) ได้เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจาก 5 โรงงาน สรุปได้ ดังตาราง 3

ตาราง 1 ช่วงของความเข้มข้นของมลสารในโรงงานชุบเคลือบโลหะ

มลสาร	ความเข้มข้น มก./ล
Cyanide	1-50
Chromium	0.25-2,600
Copper	0.74-75
Nickel	0.07-125
Zinc	0.12-140
Lead	0.45-20
Tin	1.0-20
Iron	0.17-300

ที่มา : Tay, 1986 อ้างถึงใน สาโรช บุญยกิจสมบัติ, 2535

2.1 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะ

น้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า มีสารมลพิษเจือปนอยู่คือ โลหะหนัก และไซยาไนด์ ซึ่งการปล่อยสารเหล่านี้ออกสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน รวมทั้งที่อาจเกิดต่อมนุษย์โดยทางอ้อม (ทิพย์ ชัยวิริยกุล, 2536)

2.1.1 ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์, 2538)

โครเมียม (Cr) พวกโครเมตและไดโครเมตมีอันตรายมากที่สุด สารตัวนี้ทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง และมะเร็งปอด ทำให้เกิดการอักเสบต่อตา จมูก ทำให้จมูกแหว่ง ในกรณีเป็นเรื้อรังจะมีอาการหลอดลมอักเสบ และฟันผุ

ทองแดง (Cu) ทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า 'มีทัลฟูมฟีเวอร์' มีอาการคันบนผิวหนัง หนาวสั่น กระหายน้ำ ถ้ากินเข้าไปจะทำให้เกิดน้ำลายฟูมปาก ท้องเดิน มีเลือดออกในระบบทางเดินอาหาร ไตอักเสบ

เหล็ก (Fe) อันตรายของเหล็กขึ้นกับอนุมูลของสารประกอบ ส่วนใหญ่จะมีไข้ตัวเขียวคล้ำ ไอ ตับถูกทำลาย ระบบท่อถูกทำลาย ระบับประสาทส่วนกลางถูกกด คนไข้อาจตายได้ โรคนี้มักเรียกว่า "ซิเดอร์โรซิส"

ตะกั่ว (Pb) สามารถรบกวนการสกัดเม็ดเลือดแดง ทำให้ระบบประสาทส่วนกลางถูกกด เยื่อหุ้มสมองอักเสบ ไตพิการ รบกวนระบบสืบพันธุ์ มีโอกาสทำให้เด็กในครรภ์ตายได้ อาการทั่วไปจะเบื่ออาหาร ปากมีรสหวานของโลหะ ท้องผูก คลื่นไส้ อ่อนเพลีย ปวดตามกล้ามเนื้อ และข้อต่อ มึนงง ซีด ปวดท้อง เกร็ง และอาจตายได้

แมงกานีส (Mn) โลหะตัวนี้มีพิษมาก อาการทั่วไปคือปวดหัว ซึม ง่วงเหงาหาวนอน ผิวหนังระคายเคือง ปอดและหลอดลมอักเสบ ถ้าได้รับนานๆจะมีอาการเรื้อรัง นอนไม่หลับ ประสาทถูกรบกวน มีความสับสน ไม่อยากพูดจา อยากเก็บตัวอยู่เงียบๆ มีอาการทางประสาทอย่างรุนแรง มีอาการหน้าตาย ปลายมือ-เท้า ควบคุมไม่ได้ สั่น คล้ายโรคพาร์คินสัน

ปรอท (Hg) ปรอทและสารประกอบของปรอท โดยเฉพาะปรอทอินทรีย์ จะมีพิษมาก อันตรายมักเกิดกับระบบประสาท มีอาการกระวนกระวาย เบื่ออาหาร น้ำหนักลด มีอาการผิดปกติที่ช่องปาก กล้ามเนื้อกระตุกและสั่นอย่างรุนแรง พฤติกรรมและบุคลิกจะเปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังมีอันตรายต่อไตด้วย

นิกเกิล (Ni) โลหะนิกเกิลมีพิษน้อยแต่ถ้าอยู่ในรูปสารประกอบของเกลือจะเป็นสารก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ทั้งเกลือและฝุ่นของนิกเกิล ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเนื้อเยื่อสารตัวนี้ทำให้เกิดมะเร็งของระบบทางเดินหายใจ และปอด สำหรับก๊าซนิกเกิลคาร์บอนีล ทำให้เกิดเนื้องอกชนิดร้ายแรง และทำให้เกิดหัวใจวายได้

ตาราง 2 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียจำนวน 20 โรงงานในจังหวัดกรุงเทพมหานคร

Factory Name	Plating Activity	Waste Volume (m^3/d)	Waste characteristics, mg/l						
			Cr	Ni	Cu	Zn	Au	Al	CN^-
1. Jintanasuwan	Cr , Au	15	0.05	275	-	-	0.05	-	-
2. Sangjaroen	Cr	1	40.3	27.5	-	-	-	-	-
3. Golden Lamp Co.	Ni , Cu	6	-	1.4	-	-	-	-	100.0
4. Thai-Vasco. Electro. Ltd	Al	8	-	-	-	-	-	345-1,520	-
5. Suthichai chromium	Cr	8	27.3	29.0	4.7	-	-	-	-
6. Sermsarapad	Cr, Zn	3.5	22.5	-	-	91	-	-	5.0
7. Kinhuad	Cr	0.5	2.9	10.8	11.0	-	-	-	-
8. Sawimee	Cr	3	0.9	7.0	-	-	-	-	-
9. Theptip-chromium	Cr	3	96.6	21.3	2.3	-	-	-	-
10. Sahajerawat	Zn	4	-	-	-	0.28	-	-	-
11. Thaijaroenkarnchang	Cr , Zn	20	18.6	24.9	10.0	19.7	-	-	10
12. Ha-senghuad	Cr	4	0.5	2.0	185.5	-	-	-	667
13. Samchai-Usahakarn	Zn	4	-	-	-	467	-	-	1,000
14. Yongwatanaplastic	Cr	2	6.3	5.5	0.2	-	-	-	-
15. Hong-senghuad	Cr	2	94.1	420	-	-	-	-	-
16. Watanakij	Cr	1	12.8	37.8	-	-	-	-	-
17. P.T.I. Battery	Cr	25-30	14.7	57.3	108.4	-	-	-	30
18. D.Bunnag	Cr	6.7	447.9	15.0	4.0	-	-	-	-
19. Sangboon	Cr	3-4	146	7.5	9.5	-	-	-	-
20. Sew-jeng	Au	1.5	-	18.6	-	-	0.1	-	-
Average		6.34	62.0	60.1	37.3	144.5	0.75	933.0	302.0
Range		0.5-30	0.05-447.9	1.4-420.9	0.2-185.5	0.28-467	0.05-0.1	345-1,520	5-1,000

ที่มา : TISTR, 1982 อ้างถึงใน สาโรช บุญยกิจสมบัติ , 2535

ตาราง 3 สรุปข้อมูลการทำงานของโรงงานชุบโลหะ

โรงงาน	ลักษณะงานชุบ	ปริมาณงานชุบ (ชิ้น/วัน)	น้ำทิ้ง ($ม^3$/วัน)	อัตราน้ำทิ้ง (ลิตร/ชิ้น)	ปริมาณโลหะหนักก่อนการบำบัด (มก./ล)					ปริมาณโลหะหนักหลังการบำบัด (มก./ล)					ปริมาณโลหะหนัก 4 ชนิด			
															มก./1,000 ชิ้น		กก./วัน	
					Cr	Ni	Cu	Zn	รวม	Cr	Ni	Cu	Zn	รวม	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด
1	Cr,Ni,Cu,Brass	35,000	26	0.74	3.5	252.0	166.9	10.9	433.3	1.9	41.2	34.0	3.4	80.5	0.12	0.02	11.27	2.09
2	Cr,Ni	200	5.5	27.5	41.9	143.3	16.4	14.1	215.7	3.3	43.4	2.2	2.4	51.3	10.78	2.56	1.19	0.28
3	Cr,Ni,Cu,Zn,Brass	22,500	20	0.89	48.8	15.0	0.8	44.7	109.3	22.9	14.7	1.2	19.4	58.2	0.05	0.03	2.19	1.16
4	Cr,Ni,Zn	750	2.5	3.33	120.2	95.7	4.9	5.4	226.2	45.3	6.0	0.9	0.3	52.5	3.02	0.7	0.56	0.13
5	Cr,Cu,Ni,Brass	130	0.2	1.54	212.3	161.0	22.1	14.4	409.8	73.9	0.2	0.5	0.3	74.9	31.52	5.76	0.08	0.01
	ค่าเฉลี่ย	11,716	10.8	6.8	85.3	133.4	42.2	17.9	278.8	29.5	21.2	7.8	5.1	63.5	9.1	1.81	3.06	0.73

หมายเหตุ : 1. ค่าที่นำมาใช้เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละโรงงาน

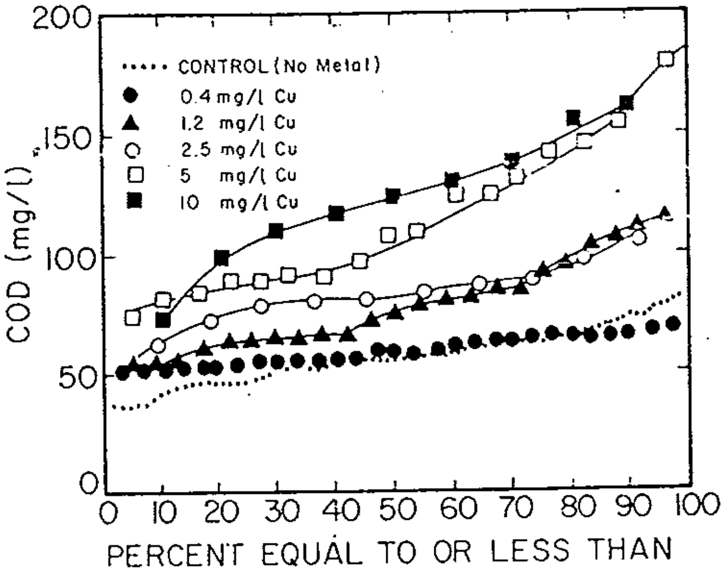
2. โรงงานชุบโลหะโรงที่ 1 รับงานชุบแต่ชิ้นงานขนาดใหญ่

ที่มา : จิระศักดิ์ รัตนไพฑูรย์, 2526

สังกะสี (Zn) สารประกอบในลักษณะเกลือไม่เป็นพิษมากนัก แต่สังกะสีคลอไรด์ ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อผิวหนัง และระบบทางเดินอาหาร สังกะสีออกไซด์ทำให้เกิดโรคมีทัลฟูมฟีเวอร์ซึ่งมีอาการไข้สูง มึนงง เวียนศีรษะ คอแห้ง และปวดหัว นอกจากนี้แล้วสารตัวนี้ยังทำให้เกิดอาการท้องร่วงรุนแรง อาการสั่นและเหนื่อยง่าย

2.1.2 ผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

จากการรวบรวมผลการศึกษาที่ผ่านมาโดยเครนเนล(Krennel, 1973) พบว่าทองแดงมีผลในการยับยั้งกระบวนการทางชีววิทยา ของกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (activated sludge process) และการย่อยแบบแอนแอโรบิก (anaerobic digestion) มากกว่าโลหะหนักตัวอื่น ทั้งในกรณีที่ป้อนทองแดงลงไปในระบบครั้งละน้อยอย่างต่อเนื่องและในกรณีที่ป้อนทองแดงเข้าระบบอย่างทันทีทันใดและเป็นครั้งใหญ่ครั้งเดียว (slug dosage) ดังภาพประกอบ 2 แสดงการป้อนทองแดงลงไปในกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ 0.4, 1.2, 2.5, 5 และ 10 มก./ล ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดน้อยลง โดยใช้ COD เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ นอกจากนั้นยังได้มีการทดลองนำทองแดงที่มีความเข้มข้น 15,30 และ 45 มก./ล ป้อนลงในกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ มีผลทำให้ระบบล้มเหลวในเวลา 6 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 2 ผลกระทบของทองแดงต่อกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

ที่มา : Krennel, 1972

โครเมียมก็มีผลกระทบต่อระบบบำบัดทางชีวภาพด้วยเช่นกัน โดยได้มีการศึกษาผลกระทบของโครเมียมต่อกระบวนการย่อยแบบแอนแอโรบิก ได้ผลดังตาราง 4

สำหรับสังกะสีได้มีการศึกษา โดยป้อนสังกะสีที่มีความเข้มข้น 2.5, 10 และ 20 มก./ล ลงไปในกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ พบว่าที่ความเข้มข้น 2.5 มก./ล ไม่มีผลกระทบต่อระบบบำบัดมากนัก แต่ที่ 10 และ 20 มก./ล มีผลทำให้ค่าตัวแปรต่างๆ สูงขึ้นเล็กน้อย ดังตาราง 5

และมีการศึกษาผลของนิกเกิลที่มีต่อกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ โดยได้ทำการศึกษานิกเกิลที่ความเข้มข้น 1, 2.5, 5 และ 10 มก./ล พบว่าที่ 1 มก./ล ไม่มีผลต่อระบบบำบัดมากนัก แต่ที่ 2.5, 5 และ 10 มก./ล มีผลต่อระบบอย่างเห็นได้ชัด ดังตาราง 6 นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการป้อนนิกเกิลเข้าระบบอย่างทันทีทันใด โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 25, 50 และ 200 มก./ล เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าที่ความเข้มข้น 25 และ 50 มก./ล ไม่มีผลร้ายแรงต่อระบบ แต่

ที่ความเข้มข้น 200 มก./ล มีผลทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพด้อยลงแต่ระบบสามารถฟื้นตัวได้ในเวลา 40 ชั่วโมง

ตาราง 4 ผลกระทบของโครเมียมต่อกระบวนการย่อยแบบแอนแอโรบิก

Concentration of Cr used	Effect on activated sludge	Short time effects on digester	Sustained damage
50 mg/l (continuous feed to activated sludge plant)	BOD removal efficiency dropped about 3%	-	No damage noted
100 mg/l (slug dose to activated sludge plant)	Plant recovered in about 20 h as measured by BOD removal efficiency	-	No damage noted
500 mg/l (slug dose to activated sludge plant)	Plant recovered within 48 h as measured by BOD removal efficiency	-	No
50 mg/l (fed daily to digester: based on digester contents)	-	Gas production dropped off rapidly At end of 42 days only 75 mg/l of volatile solids was being produced	Yes
300 mg/l (slug dose to digester)	-	Gas production ceased to 7 days. Digester then gradually recovered	No
500 mg/l (slug dose to digester)	-	-	Yes, digester never recovered

ที่มา : Krennel, 1972

ตาราง 5 แสดงคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

Zn in sewage (mg/l)	Form of Zn added	BOD	COD	Suspended matter (mg/l, average)	Turbidity (standard turbidity units average)
		(mg/l,average)			
0	Control	13	39	7	18
2.5	$ZnSO_4$	15	40	8	22
0	Control	13	44	10	16
10	$ZnSO_4$	18	49	17	17
10	Complexed Zn	22	57	16	27
0	Control	11	58	7	18
20	$ZnSO_4$	15	68	16	46

ที่มา : Krennel, 1972

ตาราง 6 ผลกระทบของนิกเกิลต่อกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

	Concentration of Ni in sewage feed, $NiSO_4$ (mg/l)							
	0	1	0	2.5	0	5	0	10
Average effluent characteristics								
BOD (mg/l)	21	23	13	26	9	13	9	14
COD (mg/l)	48	51	59	63	40	51	40	54
Suspended solids (mg/l)	8	11	5	9	8	16	8	17
Turbidity (stand)units	25	34	10	29	4	15	4	28

ที่มา : Krennel, 1972

3. การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

3.1 การรีดิวซ์ โครเมียมประจุบวกหก

โครเมียมที่พบในน้ำเสียได้แก่โครเมียมประจุบวกหกและโครเมียมประจุบวกสาม โครเมียมประจุบวกหกในน้ำเสียอยู่ในรูปโครเมต (CrO_4^{-2}) และ ไดโครเมต ($Cr_2O_7^{-2}$) สารประกอบโครเมียมใช้เติมในน้ำหล่อเย็นเพื่อยับยั้งการกัดกร่อนและยังใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่นการผลิตหมึก การผลิตสีย้อม การชุบโลหะเป็นต้น แหล่งที่มาของโครเมียมในน้ำเสียที่สำคัญคือน้ำล้างในการชุบโลหะด้วยโครเมียมและกรดโครมิก การกำจัดโครเมียมประจุบวกหกโดยกระบวนการทางเคมีจำเป็นต้องรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหกให้อยู่ในรูปโครเมียมประจุบวกสามก่อน แล้วจึงตามด้วยการตกตะกอนในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ โดยการปรับpHของน้ำเสียด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ pH เหมาะสม

สารเคมีที่นิยมใช้ในการรีดิวซ์โครเมียมมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีลักษณะการใช้งานและปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกัน ดังตาราง 7

ตาราง 7 สารเคมีและปฏิกิริยาที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหก

สารเคมี	ปฏิกิริยาที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหก
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	$3H_2SO_3 + 2H_2CrO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 5H_2O$
โซเดียมไบซัลไฟท์ ($NaHSO_3$)	$4H_2CrO_4 + 6NaHSO_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow 2Cr_2(SO_4)_3 + 3Na_2SO_4 + 10H_2O$
โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_5$)	$4H_2CrO_4 + 3Na_2S_2O_5 + 3H_2SO_4 \rightarrow 2Cr_2(SO_4)_3 + 3Na_2SO_4 + 7H_2O$
เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$)	$2H_2CrO_4 + 6FeSO_4 + 6H_2SO_4 \rightarrow 3Fe_2(SO_4)_3 + Cr_2(SO_4)_3 + 8H_2O$

ส่วนความต้องการปริมาณสารเคมีทางทฤษฎีที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหกนั้นสามารถคำนวณจากสมการเคมี ในตาราง 7 ได้ดังตาราง 8

ตาราง 8 ความต้องการปริมาณสารเคมีทางทฤษฎีในการรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหก 1 มก./ล โดยสมมติว่าสารเคมีมีความบริสุทธิ์ 100 %

ชนิดของสารริดิวซ์	สูตรเคมี	ปริมาณสารรีดิวซ์ (มก./ล)	ปริมาณกรดซัลฟุริก (มก./ล)
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	SO_2	1.85	0.00
โซเดียมไบซัลไฟท์	$NaHSO_3$	3.00	2.83
โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์	$Na_2S_2O_5$	2.74	1.41
เฟอร์รัสซัลเฟต	$FeSO_4.7H_2O$	16.03	5.66

ที่มา : มงคล ปริญญาปริวัฒน์, 2532

3.2 การตกตะกอนทางเคมีในรูปโลหะไฮดรอกไซด์

สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ คือปูนขาว และโซดาไฟ ในภาวะอิ่มตัวโลหะไฮดรอกไซด์มีผลคูณของความเข้มข้นไอออน ระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์ เท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย (Ksp) ซึ่งแสดงในสมการดังนี้

$$[M^{+n}]\ [(OH^-)^n] = Ksp$$

$[M^{+n}]$ แทนความเข้มข้นไอออนของโลหะในน้ำที่มีประจุ + n

$[OH^-]$ แทนความเข้มข้นไอออนของไฮดรอกไซด์ในน้ำ

Ksp แทนค่าคงที่ผลคูณการละลาย

เมื่อเติมปูนขาวหรือโซดาไฟในน้ำเสียที่มีโลหะละลายอยู่ทำให้ pH น้ำเสีย เพิ่มขึ้น และเพิ่มความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ เมื่อความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์มีค่ามากจนทำให้ผลคูณความเข้มข้นของไอออนระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์ มีค่ามากกว่าค่าคงที่ผลคูณการ

ละลาย ไอออนของโลหะจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ขึ้น และตะกอนจะเพิ่มมากขึ้น จนกว่าผลคูณของไอออนจะเท่ากับค่าKsp ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องแยกออกจากน้ำโดยกระบวนการอื่นต่อไป มิฉะนั้นเมื่อ pH หรือความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ลดลง ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์จะละลายกลับไปอยู่ในน้ำเสียอีก ทำให้การกำจัดโลหะหนักไม่ได้ผล ค่าคงที่ผลคูณการละลายมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิคงที่ ค่าคงที่ผลคูณการละลายแสดงในตาราง 9

ตาราง 9 ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

โลหะไฮดรอกไซด์	ค่าคงที่ผลคูณการละลาย (Ksp)
AgOH	1.5×10^{-8}
$Cd(OH)_2$ *	1.7×10^{-13}
$Cr(OH)_3$	2.0×10^{-20}
$Cu(OH)_2$	3.9×10^{-19}
$Fe(OH)_2$	2.4×10^{-14}
$Fe(OH)_3$	1.0×10^{-35}
$Hg(OH)_2$ *	7.8×10^{-24}
$Mn(OH)_2$ *	4.0×10^{-14}
$Ni(OH)_2$	6.2×10^{-16}
$Pb(OH)_2$ **	2.8×10^{-16}
$Zn(OH)_2$ **	1.3×10^{-17}

หมายเหตุ * =ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

** =ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การใช้ปูนขาวและโซดาไฟในการกำจัดโลหะหนัก สะดวกต่อการทำงานในโรงบำบัดน้ำเสีย เพราะสามารถวัดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในรูปของค่า pH ดังนั้นการทำงานของระบบนี้เพียงติดตั้งเครื่องวัด pH ในถังกวนเร็ว เพื่อคอยควบคุมการสูบจ่ายสารเคมีให้มี pH ของปฏิกิริยา เท่ากับ pH ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะชนิดนั้น ๆ

3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี

3.2.1.1 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะ โลหะไฮดรอกไซด์แต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำที่ pH ต่างๆ ไม่เท่ากัน โลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก (amphoteric) เช่นสังกะสี ทองแดง โครเมียม นิกเกิล จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจนถึง pH ค่าหนึ่ง ที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุด และเมื่อเลย pH นี้แล้ว โลหะแอมโฟ-เทอริกจะกลับละลายน้ำได้มากขึ้นอีก

การกำจัดโลหะออกจากน้ำ โดยการตกตะกอนทางเคมีให้มีปริมาณโลหะละลายเหลือต่ำกว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดเป็นไปได้ยาก ยกเว้นแต่มีการเกิดกลไกอย่างอื่นร่วมด้วย เช่น มีการดูดซับอิออนโลหะบนตะกอนเคมีเป็นต้น

3.2.1.2 pHและปริมาณสารเคมี เนื่องจากสารเคมีที่ใช้เติมเพื่อให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่ปรับ pH ของน้ำเสียด้วย ดังนั้นการควบคุม pH และปริมาณด่างที่ใช้ต้องคำนึงถึง pH ที่ให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดของโลหะที่ต้องการกำจัด ในกรณีที่ต้องการกำจัดโลหะหลายชนิดออกจากน้ำเสียพร้อมกัน จำเป็นต้องทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถกำจัดโลหะส่วนใหญ่ในน้ำเสียได้ผลดี สำหรับโลหะแอมโฟเทอริก การควบคุม pH จะต้องทำอย่างระมัดระวังมิฉะนั้นโลหะอาจไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ตามต้องการ

3.2.1.3 อุณหภูมิ การตกตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ตะกอนจะมีลักษณะเป็นก้อนโต นำไปหมุนเหวี่ยงหรือกรองได้ง่าย

3.2.1.4 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา การตกตะกอนทางเคมีต้องการเวลาในการกวนผสมสารเคมีที่เติมให้กระจายอย่างทั่วถึง และมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างไอออนต่าง ๆ ในน้ำกับสารเคมีที่ใช้ สารเคมีบางชนิด เช่น ปูนขาว ละลายน้ำได้น้อยต้องการเวลาในการกวนผสมนานกว่าโซดาไฟ ซึ่งละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังต้องการเวลาในการกวนผสมอย่างช้า ๆ เพื่อให้ตะกอนที่เกิดมีโอกาสสัมผัสกันเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่มีความเสถียรสูง และสามารถแยกออกจากน้ำ โดยการตกตะกอนได้ง่าย

3.2.1.5 ไอออนเชิงซ้อน ไซยาไนด์ แอมโมเนียและสารคีแลนท์ เช่น EDTA สามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนที่เสถียรกับโลหะหลายชนิดในน้ำเสีย ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ

3.3 การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนักที่ผ่านมา

Mcvaugh และ Wall (1976) ได้ศึกษาผลการกำจัดโลหะหนักโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี กับน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งหนึ่ง น้ำเสียมีคุณสมบัติดังนี้ ของแข็งแขวนลอย 200 มก./ล โครเมียม 26 มก./ล เหล็ก 56 มก./ล ตะกั่ว 8.9 มก./ล และสังกะสี 42 มก./ล การทดลองใช้ปูนขาวเป็นสารเคมีในการตกตะกอนโลหะหนัก และปรับ pH ของน้ำเสีย จากการทดลองพบว่า pH ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งหมดคือ 10.5 โดยคุณภาพน้ำที่ผ่านจากถังตกตะกอนมีปริมาณของแข็งแขวนลอย 28 มก./ล โครเมียม 0.40 มก./ล เหล็ก 1.59 มก./ล ตะกั่ว 0.62 มก./ล และสังกะสี 2.88 มก./ล

Kreye (1978) ได้ศึกษาและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบสลักเกลียวด้วยสังกะสี พบว่าน้ำเสียที่มีโครเมียม สามารถกำจัดได้โดยการปรับ pH ที่ 2.5 โดยกรดซัลฟุริก แล้วใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์เป็นสารรีดิวซ์ ความเข้มข้นโครเมียมประจุบวกหกเริ่มแรก 20 มก./ล ลดลงเหลือ 0 มก./ล โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที น้ำเสียของโรงงานจากบ่อชุบและบ่อล้างต่างๆ รวมทั้งน้ำเสียที่ผ่านการรีดิวซ์ นำมาบำบัดรวมกัน โดยใช้โซดาไฟเป็นสารปรับ pH และตกตะกอนโลหะหนักที่ pH 9.5 รวมทั้งมีการเติมสารโพลิเมอร์ประจุลบที่ความเข้มข้น 1 มก./ล อัตราน้ำล้นผิว 2.0 $ม^3$/ชม. ผลปรากฏว่าตะกอนโลหะหนักจมตัวได้ดีมาก ของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดได้ถึง 96 % สังกะสีลดลงจาก 52.0 มก./ล เหลือ 0.23 มก./ล โครเมียมที่ผ่านการรีดิวซ์แล้วลดลงจาก 5.5 มก./ล เหลือ 0.43 มก./ล และเหล็กลดลงจาก 14.5 มก./ล เหลือ 0.31 มก./ล

Patterson (1985) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักหลายชนิดได้แก่ โครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยการตกตะกอนทางเคมีในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ พบว่าการกำจัดโครเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 2.2-1,300 มก./ล ทำการตกตะกอนที่ pH 8.5-9.5 มีโครเมียมเหลือภายหลังการตกตะกอน 0.02-18 มก./ล การกำจัดทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50-1,000 มก./ล ทำการตกตะกอนที่ pH 10.5 มีทองแดงเหลือ 0.003-0.6 มก./ล การกำจัดนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5.6-159 มก./ล ทำการตกตะกอนที่ pH 10.0-11.0 มี

นิกเกิลเหลือมากกว่า 1.0 มก./ล การกำจัดสังกะสีที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 3-1,500 มก./ล ทำการตกตะกอนที่ pH 7.5-10.5 มีสังกะสีเหลือต่ำกว่า 5.0 มก./ล

มงคล ปริญญาปริวัฒน์ (2532) ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผ่นเหล็กอาบสังกะสี โดยทดลองใช้โซดาไฟ ปูนขาวและสารโพลิเมอร์ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักได้แก่ สังกะสี และโครเมียม พบว่าการใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ให้ประสิทธิภาพในการรีดิวซ์โครเมียมบวกหกในกรดโครมิก สูงกว่าเฟอร์รัสซัลเฟต โดยโครเมียมบวกหกถูกรีดิวซ์หมดเมื่อใช้ความเข้มข้น 1.75 เท่าของค่าทางทฤษฎี ในขณะที่การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.0 เท่าของค่าทางทฤษฎี ยังมีโครเมียมบวกหกเหลือเท่ากับ 0.75 มก./ล และการใช้ปูนขาวให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ผ่านการรีดิวซ์สูงกว่าโซดาไฟโดยมีค่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 9.5 แต่การใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์และปูนขาวที่สภาวะที่เหมาะสมยังไม่สามารถกำจัดโครเมียมในกรดโครมิกได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม

สาโรช บุญยกิจสมบัติ (2535) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียในโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดกลาง และขนาดเล็ก พบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของปูนขาวและโซดาไฟใกล้เคียงกัน โดยการกำจัดโครเมียมค่า pH อยู่ในช่วง 9-11 การกำจัดทองแดงค่า pH อยู่ในช่วง 7.5-11 การกำจัดนิกเกิลค่า pH อยู่ในช่วง 10.5-11 การกำจัดสังกะสีค่า pH อยู่ในช่วง 9.5-11 การกำจัดทองแดงนิกเกิล และสังกะสีค่า pH อยู่ในช่วง 9.5-11 พบว่าการใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ในการรีดิวซ์โครเมียมบวกหกเป็นโครเมียมบวกสาม โครเมียมบวกหกจะถูกรีดิวซ์หมดเมื่อใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์เข้มข้น 2.0 เท่าของค่าทางทฤษฎี นอกจากนั้นยังพบว่าการตกตะกอนไม่สามารถกำจัดโลหะหนัก ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม ยกเว้นสังกะสี

4. การกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง

การกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง หมายถึงกระบวนการต่าง ๆ ที่อาศัยแผ่นเยื่อกรอง (semi-permeable membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว (Flinn, 1970) ความสามารถในการกรองพิจารณาได้จากปัจจัยพื้นฐาน 2 ประการคือ flux และ rejection

ฟลักซ์ (flux) คือ อัตราการซึมผ่านแผ่นเยื่อกรอง เป็นอัตราการไหลของ ของเหลวผ่านแผ่นเยื่อกรอง ต่อหน่วยพื้นที่ของแผ่นเยื่อกรอง ฟลักซ์ขึ้นอยู่กับความต้านทานของแผ่นเยื่อกรอง และความต้านทานของตัวถูกละลาย ดังสมการ

$J = \Delta P / \mu(Rm+Rs)$; J = ฟลักซ์ ($l/m^2.h$)

ΔP = ความดัน (kPa)

μ = ความหนืดของน้ำ ที่ 25 องศาเซลเซียส ($N.s/m^2$)

Rm = ความต้านทานของแผ่นเยื่อกรอง (m^{-1})

Rs = ความต้านทานของตัวถูกละลาย (m^{-1})

Rejection คือส่วน (fraction) ของสารละลายในน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าระบบ ตกค้างอยู่ในแผ่นเยื่อกรอง (Scott, 1996) แผ่นเยื่อกรองที่ดีต้องมีค่า rejection สูง และ flux สูง โดยค่า rejection (%) สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$R(\%) = 100\,[\,1-(Cp/Cb)\,]$

R(%) = ปริมาณสารที่ตกค้างอยู่ในแผ่นเยื่อกรอง (%)

Cp = ความเข้มข้นของสารในน้ำเสียที่ออกจากระบบ (mg/l)

Cb = ความเข้มข้นของสารในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ (mg/l)

ข้อดีของกระบวนการแผ่นเยื่อกรองมีดังนี้ (Fane, 1997)

ไม่ก่อให้เกิดของเสียในรูปแบบใหม่นอกเหนือจากของเสียที่มาจากกระบวนการผลิต

ใช้พลังงานในการเดินระบบไม่มาก

ใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบน้อย

การขยายขนาดของโมดูลทำได้ง่าย

สามารถดำเนินการแบบต่อเนื่อง (continuous) หรือแบบเททีละงวด (batch) ได้ตามความเหมาะสม

ข้อจำกัดของกระบวนการแผ่นเยื่อกรองมีดังนี้ (Fane, 1997)

concentration polarization และ membrane fouling ทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อกรองลดลง

แผ่นเยื่อกรองสังเคราะห์ที่ทำมาจากโพลิเมอร์ต่างๆ ไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง pH ที่สูงหรือต่ำมากๆ และไม่ทนต่อสารเคมีบางชนิด

มักจะไม่สามารถทำให้เกิดการกรองอย่างสมบูรณ์ได้

4.1 ประเภทของกระบวนการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง

กระบวนการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ได้เริ่มนำมาใช้การผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีชีวภาพ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ มากมาย แต่ในปัจจุบันนี้ ได้มีการนำกระบวนการดังกล่าวเข้ามาใช้ในการบำบัดน้ำ และน้ำเสียในชุมชน กระบวนการแผ่นเยื่อกรองที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีหลายประเภท โดยแต่ละประเภทจะมีความสามารถในการแยกสารต่างกันตามขนาดของรูพรุน (pore size) หรือ molecular weight cutoff (MWCO) ของแผ่นเยื่อกรอง ชนิดของอนุภาพที่กำจัดได้และแรงดันที่ใช้สรุปได้ดังตาราง 10

ตาราง 10 ชนิดของแผ่นเยื่อกรองกับการประยุกต์ใช้งาน

Membrane Process	Driving Force	Some Application
Electrodialysis (ED)	Electrical Potential difference	Desalination of brackish water
		Removal of metals in wastewater
Reverse Osmosis (RO)	Pressure difference	Treatment of leachate from a refuse dump
	(2,000-10,000 kPa)	Removal of nitrate from ground water
Nanofiltration (NF)	Pressure difference	Treatment of Electroplating rinse water
	(500-2,000 kPa)	
Ultrafiltration (UF)	Pressure difference	Separation of oil/water emulsions
	(100-1,000 kPa)	Recovery of proteins from whey and milk
		Recovery of electrophoretic paints
Microfiltration (MF)	Pressure difference	Removal of colloids from wastestreams
	(10-100 kPa)	Removal of dust particles from air

ที่มา : Franken and Fane, 1996

4.1.1 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (electrodialysis,ED) เป็นกระบวนการกรอง ที่ใช้ในการแยกสารประกอบที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ออกจากน้ำ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับดัน แต่ไม่สามารถแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำได้ แผ่นเยื่อกรองที่ใช้ในกระบวนการ ED นี้มี 2 ชนิด คือแผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งจะยอมให้เฉพาะไอออน ที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันไหลผ่านดังภาพประกอบ 3

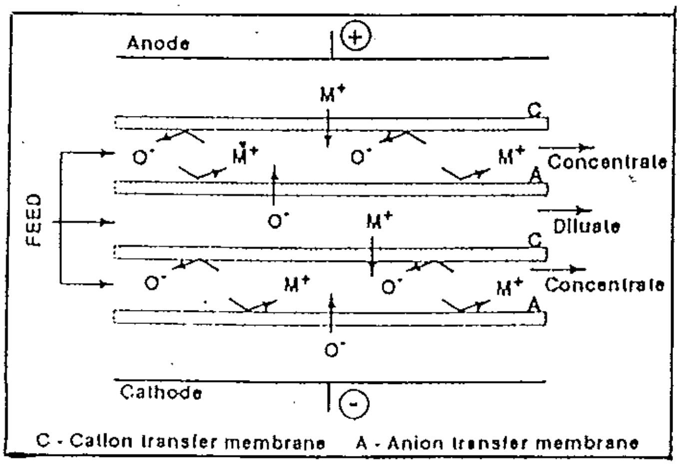
4.1.2 รีเวิร์สออสโมซิส (reverse osmosis,RO) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ เป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันโดยใช้แรงดันที่สูงกว่าแรงดันออสโมซิส ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายทั้งสอง อนุภาคของน้ำและสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดันให้เคลื่อนที่ผ่านแผ่นเยื่อกรองไปยังด้านที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำกว่า ส่วนสารต่างๆที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจะถูกกรองติดค้างอยู่ในช่องว่างของแผ่นเยื่อกรอง (ภาพประกอบ 4) ดังนั้นน้ำที่ผ่านกระบวนการ RO จึงมีความบริสุทธิ์สูงมาก โดยปกติแล้วกระบวนการนี้มักจะใช้ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

4.1.3 นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration,NF) เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุน 2-5 nm สามารถแยกไอออนที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำได้ แต่ไอออนและสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนผ่านแผ่นเยื่อกรองชนิดนี้ได้ดังภาพประกอบ 5

4.1.4 อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration,UF) เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นกรองที่มีขนาดรูพรุน 5-50 nm ดำเนินการที่แรงดัน 100-1,000 kPa สามารถแยกอนุภาคคอลลอยด์, อนุภาคขนาดใหญ่ (macromolecule) และจุลินทรีย์ (microorganism) ดังภาพประกอบ 6

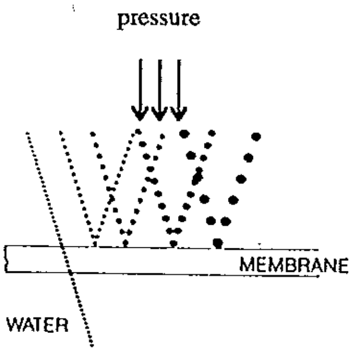
4.1.5 ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration,MF) เป็นกระบวนการกรองโดยแผ่นเยื่อกรองที่ง่ายที่สุด โดยแผ่นเยื่อกรองจะทำหน้าที่คล้ายเครื่องกีดขวาง (barrier) ที่มีรูพรุน ขนาดรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองอยู่ระหว่าง 0.1-10 μm ดำเนินการที่แรงดันต่ำสามารถแยกของแข็งแขวนลอย, อนุภาคขนาดใหญ่ และจุลินทรีย์ออกจากน้ำ ดังภาพประกอบ 7

กระบวนการ MF สามารถผลิตน้ำได้ในอัตราสูงกว่ากระบวนการแผ่นเ ยื่อกรองแบบอื่น โดยใช้แรงดันที่ต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ UF จะพบว่ากระบวนการ MF สามารถผลิตน้ำได้ในอัตราสูงกว่าถึง 10-100 เท่า โดยใช้แรงดันต่ำกว่า จึงทำให้กระบวนการ MF เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำกว่ากระบวนการแผ่นเยื่อกรองแบบอื่น ในขณะที่สามารถผลิตน้ำออกที่มีคุณภาพสูงกว่ากระบวนการแยกสารแบบธรรมดาทั่วไป เช่นการตกตะกอน การหมุนเหวี่ยง หรือการกรองแบบธรรมดา เป็นต้น



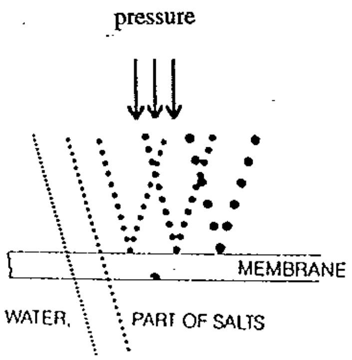
ภาพประกอบ 3 แสดงกลไกการทำงานของ Electrodialysis

ที่มา : Scott, 1995



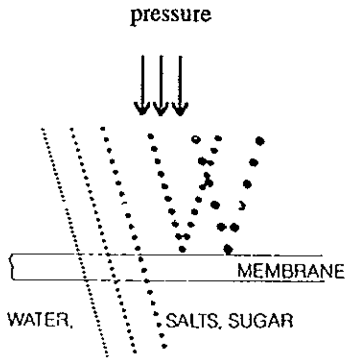
ภาพประกอบ 4 แสดงกลไกการทำงานของ Reverse Osmosis

ที่มา : Scott, 1995



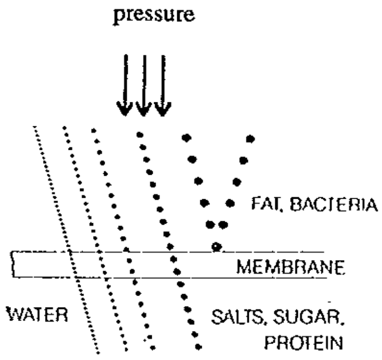
ภาพประกอบ 5 แสดงกลไกการทำงานของ Nanofiltration

ที่มา : Scott, 1995



ภาพประกอบ 6 แสดงกลไกการทำงานของ Ultrafiltration

ที่มา : Scott, 1995



ภาพประกอบ 7 แสดงกลไกการทำงานของ Microfiltration

ที่มา : Scott, 1995

4.2 โพลิเมอร์ที่ใช้ผลิตแผ่นเยื่อกรอง (Brock, nd)

แผ่นเยื่อกรอง สามารถสร้างขึ้นมาจากโพลิเมอร์หลายชนิด เช่น เซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate) โพลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride, PVC) เป็นต้น ซึ่งแผ่นเยื่อกรองที่ผลิตจากโพลิเมอร์ต่างชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันดังนี้

4.2.1 เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) สามารถใช้กับตัวทำละลายส่วนใหญ่ได้ ยกเว้น aliphatic hydrocarbon กรดแก่ ด่างแก่ และอินทรียสาร

4.2.2 เซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate) คล้ายกับ cellulose nitrate แต่มีความทนต่อแอลกอฮอล์ได้สูงกว่า

4.2.3 รีเจนเนอเรต เซลลูโลส (regenerate cellulose) สามารถใช้กับตัวทำละลายส่วนใหญ่ได้ ยกเว้น กรดแก่ ด่างแก่

4.2.4 ไวนิล (vinyl) สามารถทนต่อแอลกอฮอล์และด่างได้แต่ไม่ทนต่อกรด

4.2.5 โพลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloide) สามารถใช้กับตัวทำลายส่วนใหญ่ยกเว้นกรด ketone และ dioxane

4.2.6 อะคริลิก (acrylic) ไม่ทนต่อกรด

4.2.7 ไนลอน (nylon) ใช้กับตัวทำลายส่วนใหญ่ได้ยกเว้นกรด

4.2.8 โพลิคาร์บอเนต (polycarbonate) ทนต่อกรด และตัวทำละลายที่เป็นอินทรียสารได้ ยกเว้น halogenated hydrocarbon และด่างแก่

4.2.9 เทฟฟลอน (teflon,PTEE) สามารถใช้กับตัวทำละลายได้ทุกชนิด

จากคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้การเลือกแผ่นเยื่อกรองไปใช้งานต้องพิจารณาตามเงื่อนไข ความเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามแผ่นเยื่อกรองที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

มีความพรุนสูง

มีความคงตัวที่แรงดันสูง

มีความคงตัวที่อุณภูมิสูง

มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด ด่างได้ในช่วงกว้าง

มีความคงทนเมื่อใช้ในสภาพที่มีสารเคมีต่างๆ

4.3 ชนิดของโมดูลที่ใช้ในกระบวนการเยื่อกรอง

รูปแบบของโมดูลที่ใช้ในกระบวนการแผ่นเยื่อกรองมี 4 ชนิดคือ

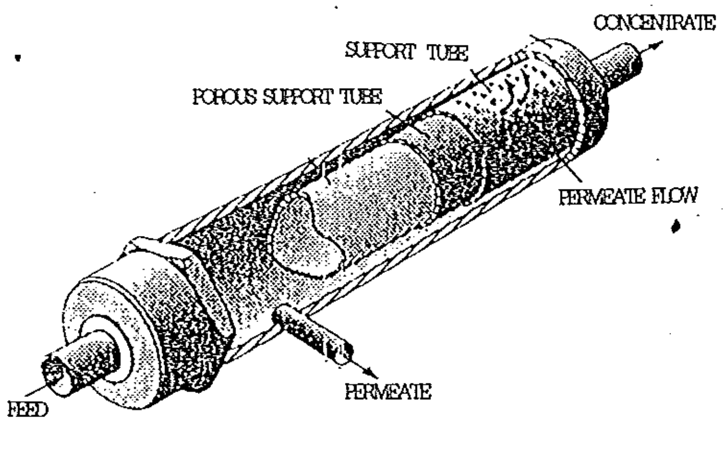
4.3.1 โมดูลแบบท่อ (tubular module) รูปแบบของโมดูลแบบท่อ จะเป็นการม้วนแผ่นเยื่อกรอง ให้มีลักษณะเหมือนหลอด หรือท่อขนาดเล็ก ยึดติดไว้ภายใน ท่ออีกอันหนึ่งที่ทำจากใยสังเคราะห์ ซึ่งทำหน้าที่รองรับแผ่นเยื่อกรองไม่ให้ฉีกขาดขณะใช้งาน และเป็นทางออกของน้ำสะอาดดังภาพประกอบ 8 หลักการทำงานของโมดูลแบบท่อคือ น้ำดิบจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อแรงดันจะทำให้น้ำซึมผ่านแผ่นเยื่อกรองออกสู่ท่อรองรับภายนอก

4.3.2 โมดูลแบบแผ่น (plate and frame or plate module) เป็นรูปแบบของการจัดแผ่นเยื่อกรองที่ง่ายที่สุด โดยแผ่นเยื่อกรองจะถูกจัดวางอยู่บนแผ่นรองรับที่มีรูพรุน หรือมีร่องสำหรับให้น้ำไหลออก แผ่นเยื่อกรองและแผ่นรองรับจะวางซ้อนสลับกันหลายๆชั้น ดังแสดงในภาพประกอบ 9 หลักการทำงานของโมดูลแบบแผ่นจะคล้ายกับ filter press คือน้ำดิบจะถูกสูบผ่านแผ่นเยื่อกรอง ในทิศทางที่ตั้งฉากกับแผ่นเยื่อกรองโดยใช้แรงดันสูง น้ำสะอาดจะซึมผ่านแผ่นเยื่อกรองและแผ่นรองรับแล้วจึงไหลออกจากโมดูล ส่วนคอลลอยด์หรือโมเลกุลของสารจะถูกกรองติดค้างอยู่บนแผ่นเยื่อกรอง

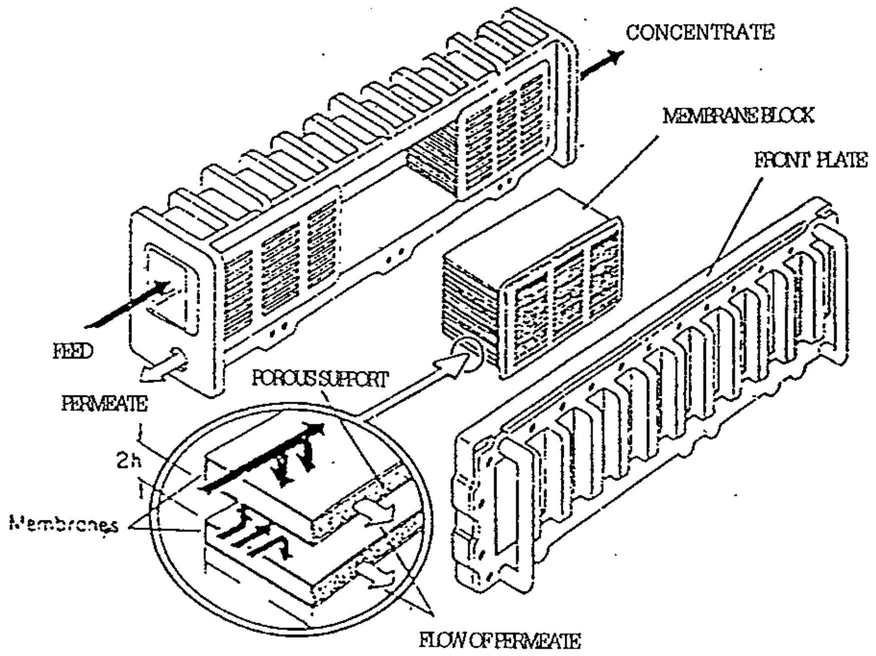
4.3.3 โมดูลแบบม้วน (spiral wound module) รูปแบบของโมดูลแบบม้วนจะคล้ายกับโมดูลแบบแผ่นแต่จะมีการนำแผ่นเยื่อกรองมาม้วนรอบแกนกลาง โครงสร้างของโมดูลแบบม้วนจะประกอบด้วยแผ่นเยื่อกรอง 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุที่มีรูพรุนสอดคั่นกลางอยู่ระหว่างแผ่นเยื่อกรองทั้งสอง จากนั้นจะม้วนแผ่นเยื่อกรองรอบแกนซึ่งเป็นท่อเจาะรูที่ใช้เป็นทาง

ออกของน้ำสะอาด ขอบด้านหนึ่งของแผ่นทั้งสามจะถูกอุดไว้เพื่อไม่ให้น้ำไหลออก อีกด้านหนึ่งจะปล่อยไว้ และยึดติดกับแกนกลางเพื่อให้น้ำสะอาดไหลออกทางท่อที่เจาะรูไว้ ด้านนอกของโมดูลจะถูกคลุมด้วยตะแกรง ดังแสดงในภาพประกอบ 10 หลักการทำงานของโมดูลแบบม้วนคือ น้ำดิบจะถูกบังคับให้ไหลในแนวแกนของโมดูล แรงดันจะทำให้น้ำผ่านแผ่นเยื่อกรองตามแนวรัศมีของโมดูลลงไปถึงแผ่นรองรับซึ่งจะส่งน้ำบริสุทธิ์ออกไปทางท่อเจาะรูต่อไป

4.3.4 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module) ลักษณะโครงสร้างของโมดูลแบบเส้นใยกลวงจะคล้ายกับแบบท่อ ดังแสดงในภาพประกอบ 11 โมดูลแบบเส้นใยกลวงนี้จะมีลักษณะเหมือนกับท่อขนาดเล็ก หรือเส้นผม ด้านในจะมีผิวคล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน เมื่อมองรูปตัดจะเป็นรูปวงแหวน การนำไปใช้งานจะนำเส้นใยมามัดรวมกันเป็นรูปเกือกม้า หรือตัว U บรรจุอยู่ในท่อรูปทรงกระบอก หลักการทำงานคือน้ำดิบจะถูกสูบเข้าในท่อรูปทรงกระบอก แรงดันจะทำให้น้ำซึมผ่านจากผิวด้านนอก เข้าสู่ด้านในของแผ่นเยื่อกรองแล้วไหลไปรวมกันที่ทางออก

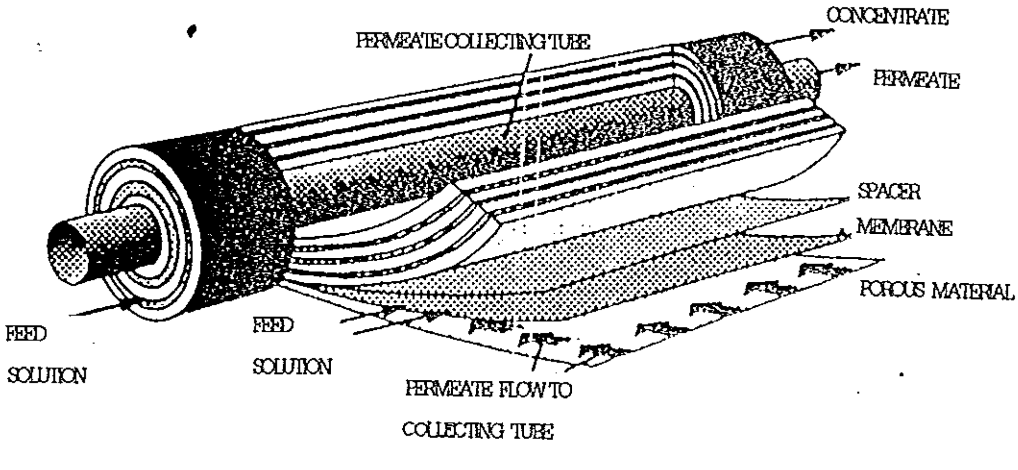


ภาพประกอบ 8 โมดูลแบบท่อ (tubular module)
ที่มา : Scott, 1995



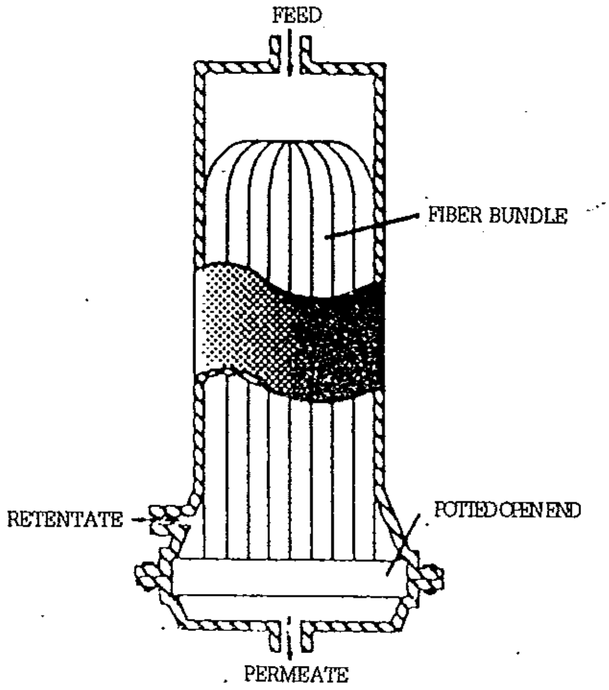
ภาพประกอบ 9 โมดูลแบบแผ่น (plate and frame or plate module)

ที่มา : Scott, 1995



ภาพประกอบ 10 โมดูลแบบม้วน (spiral wound module)

ที่มา : Scott, 1995

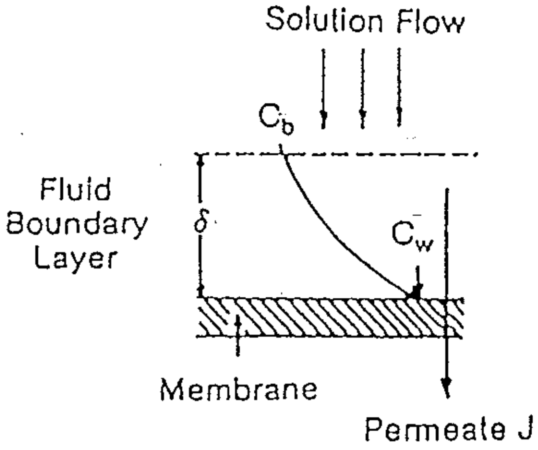


ภาพประกอบ 11 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module)
ที่มา : Scott, 1995

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการกรอง

เนื่องจากกลไกในการกำจัดอนุภาคของแผ่นเยื่อกรองแบบ UF และ MF เป็นการกรองแบบติดค้าง (sieve) ดังนั้นปัญหาที่มักเกิดขึ้นในการทำงานก็คือปัญหาการอุดตันที่เกิดจากสิ่งสกปรกต่างๆที่มีอยู่ในน้ำที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัด ซึ่งเป็นผลทำให้อัตราการผลิตน้ำ (permeate flux) และอายุการใช้งานของแผ่นเยื่อกรองลดลง ลักษณะของการอุดตันเกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆกันดังต่อไปนี้

4.4.1 การอุดตันเนื่องจาก concentration polarization หรือ gel layer เกิดขึ้นเนื่องจากการที่ อนุภาคของสิ่งสกปรกหรือโมเลกุลเคลื่อนที่มาสะสมตัวที่ใกล้ผิวของแผ่นเยื่อกรองในชั้นน้ำที่เรียก ว่า boundary layer ทำให้เกิดการสะสมของสิ่งสกปรกบริเวณผิวของเยื่อกรอง จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของน้ำดิบหลายเท่า และความหนืดเพิ่มขึ้นดังภาพประกอบ 12 เป็นผลให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดลดลง การอุดตันเนื่องจาก concentration polarization นี้สามารถแก้ไขให้คืนสภาพได้ โดยใช้การล้างย้อน (back wash) และการกระแทกเป็นช่วง ๆ ของน้ำ



ภาพประกอบ 12 concentration polarization

(Cb = bulk concentration, Cw = wall concentration)

ที่มา : Scott, 1995

4.4.2 Membrane Fouling คำว่า membrane fouling จะใช้สำหรับอธิบายการสูญเสียสภาพของการกรองแบบไม่สามารถแก้ไขสภาพให้เหมือนเดิมได้โดยใช้แรงดันของน้ำหรือสารเคมี fouling ที่เกิดบนแผ่นเยื่อกรองส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการดูดเกาะของสารอินทรีย์ในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรอง ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นเยื่อกรอง และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้ดีเหมือนเดิม

ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียโดยใช้แผ่นเยื่อกรองมีดังนี้

Kosarek และLouis (1984) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักหลายชนิด และไซยาไนด์ออกจากน้ำโดยแผ่นเยื่อกรอง พบว่าแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันชนิดมีประจุสามารถกำจัดสารหนู (As) ได้ 88-98% แคดเมียม(Cd) 75-92% ทองแดง(Cu) 80-90% ตะกั่ว(Pb) 95-98% ปรอท(Hg) 91-93% นิกเกิล(Ni) 81-89% เซเลเนียม(Se) 85-95% สังกะสี(Zn) 77-90% และการกำจัดโลหะหนักโดยใช้โพลิเมอร์เพื่อเกาะจับกับไอออนโลหะหนักแล้วทำการกรองโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าสามารถกำจัดโครเมียม(Cr)ได้ 82-93% ทองแดง(Cu) 72-93% สังกะสี(Zn) 65% และการกำจัดโลหะหนักโดยใช้แผ่นเยื่อกรองประเภทรีเวอร์สออสโมซิส(RO) พบว่าสามารถกำจัดสารหนู(As) ได้ 90-99% แคดเมียม(Cd) 95-99+% โครเมียม(Cr) 94-99% ทองแดง(Cu) 94-99+% ไซยาไนด์(CN^-)80-96% ตะกั่ว(Pb) 93-99+%

ปรอท(Hg) 95-97% นิกเกิล(Ni) 95-99% เซเลเนียม(Se) 90-98% เงิน(Ag) 94-96% และสังกะสี(Zn) 95-99%

Cartwright (1992) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลโดยใช้ reverse osmosis membrane โดยเลือกศึกษาแผ่นเยื่อกรอง 2 ชนิด คือ spiral wound thin film composite (TFC) membrane และ cellulose acetate (CA) membrane กับน้ำทิ้งซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอื่น เช่น glycol, amine, polyol, fatty acid, ester และ anhydried พบว่า TFC membrane ให้ฟลักซ์ที่ต่ำมาก เนื่องจากสารประกอบ alkylated diphenylamine ทำปฏิกิริยากับโพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตแผ่นเยื่อกรอง ส่วน CA membrane พบว่าค่า rejection (%) ของ TDS, kjeldahl nitrogen, grease/oil อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจแต่ค่า COD สูงไม่เป็นที่น่าพอใจ

Fane และคณะ (1992) ได้ศึกษาการนำโลหะหนักในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยได้ศึกษา nanofilrtation, ultrafiltration couple with ion exchange resin และliquid membrane contactor พบว่า nanofiltration สามารถทำการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ภายในขั้นตอนเดียว ultrafiltration couple with ion exchange resin เป็นการกรองที่มีประสิทธิภาพ ให้ฟลักซ์สูงแต่ต้องทำภายใต้กระบวนการเททีละงวด (batch process) ส่วน liquid membrane contactor มีความสามารถในการแยกโลหะหนักได้ดี แต่ต้องระมัดระวังการรั่วไหลระหว่างชั้นกรอง (phase leakage) ดังนั้นจึงต้องกระทำภายใต้การควบคุมที่ดี

Kim และคณะ (1993) ศึกษาการกรองอนุภาคโลหะเงินแขวนลอยความเข้มข้น 27 มก./ล โดยแผ่นเยื่อกรอง 4 ชนิด คือ PM30 (MWCO 30 kDa) PTHK (MWCO 100 kDa) PTMK (MWCO 300 kDa) และ GVHP (pore size 0.22 μm) พบว่า PM30 PTHK และ PTMK สามารถกรองอนุภาคเงินไว้ได้ทั้งหมด สำหรับ GVHP ไม่สามารถกรองอนุภาคเงินไว้ได้ สำหรับความต้านทานของตัวถูกละลายพบว่า PTHK>PTMK>PM30>GVHP และการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองช่วยปรับปรุงให้ฟลักซ์ดีขึ้น

Enoch และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาในระดับโรงงานนำร่อง เพื่อบำบัดน้ำเสียจาก wet lime (stone)-gypsum flue gas desulphurization plant โดยทำการตกตะกอนโลหะหนักให้เป็นโลหะหนักไฮดรอกไซด์ และซัลไฟท์แล้วตามด้วย crossflow microfiltration

membrane (CMF) ได้ทำการศึกษาแผ่นเยื่อกรอง 2 ชนิด คือ hydrophobic และ hydrophillic membrane พบว่า hydrophillic membrane ให้ฟลักซ์สูงกว่า และพบว่าการ backwash มีผลในทางบวกต่อฟลักซ์

สำหรับประสิทธิภาพของระบบพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ยกเว้น Cd ดังตาราง 11

ตาราง 11 ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก และของแข็งแขวนลอย

Heavy Metals	Raw waste water	Effluent of clarifier	Permeate
As(mg/m^3)	387	250	<20
Cd(mg/m^3)	217	9.6	8
Cr(mg/m^3)	2,623	96	<0.5
Cu(mg/m^3)	1,528	80	<10
Hg(mg/m^3)	133	6.1	<1
Ni(mg/m^3)	7,581	422	<15
Pb(mg/m^3)	1,711	72	<25
Se(mg/m^3)	3,696	470	300
Zn(mg/m^3)	3,690	250	<30
Suspended Solid(g/m^3)	20,380	1500	<20
pH	5.9	9.5	9.5

Kim และคณะ (1994) ศึกษาการกรองอนุภาคโลหะแขวนลอย โดยได้ศึกษาอนุภาคทองที่มีอนุภาค 2 ขนาด คือ 10 nm และ 53.5 nm กรองด้วย GVHP membrane ที่มีขนาดรูพรุน 0.22μm พบว่าอนุภาคทองที่มีขนาด 10 nm ให้ฟลักซ์ต่ำกว่า และการลดลงของฟลักซ์สูงกว่าในการทดลองกับอนุภาคทองขนาด53.5 nm และเมื่อนำฟลักซ์ของอนุภาคทองขนาด10 nm มาเปรียบเทียบกับฟลักซ์ของอนุภาคเงินที่มีขนาด 8.3 nm พบว่าฟลักซ์ของการกรองอนุภาคเงินแขวนลอยต่ำกว่า และความต้านทานของตัวถูกละลายสูงกว่า เมื่อทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง

ด้วยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง ด้วยความเร็ว400รอบต่อนาที มีผลทางบวกต่อฟลักซ์มากกว่าการกวนด้วยความเร็ว200 รอบต่อนาที

Memtec Limited (1996) รายงานว่าแผ่นเยื่อกรองทุกชนิดสามารถกำจัดความขุ่นให้เหลือต่ำกว่า 0.3 NTU ได้ ในการกำจัดไอออนต่างๆพบว่าแผ่นเยื่อกรองประเภทนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดเหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) ได้ดี แผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดเหล็ก (Fe) ได้ 30-50% กำจัดอลูมิเนียม (Al) ได้95% แผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดไอออนต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการเติมสารสร้างตะกอน สำหรับ TOC และ COD พบว่าแผ่นเยื่อกรองประเภทนาโนฟิลเตรชันสามารถทำให้TOC และCOD ลดลงได้90-มากกว่า97% แผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันทำให้ลดลงได้ 5-50% โดยแผ่นเยื่อกรองที่มี MWCO 10 kDa ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพดีที่สุด แผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตรฟิลเตรชันที่มีการบำบัดเบื้องต้นด้วย powdered activated carbon สามารถลด TOC และ COD ลงได้ 20-75%

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปริมาณและลักษณะของสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำเสียจากการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาแนวทางการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณมลพิษทางด้านอนินทรีย์ จำพวกโลหะหนักที่ปรากฏอยู่ในน้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า
2. ทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยการกรองโดยใช้แผ่นเยื่อกรอง
3. ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่ง ในการแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำ ที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลของปริมาณและลักษณะของมลสาร ที่เจือปน อยู่ในน้ำล้าง (rinse water) จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยมุ่งเน้นเกี่ยวกับชนิดและปริมาณของโลหะหนัก ครอบคลุมการชุบโครเมียม,ทองแดง, นิกเกิล และสังกะสี โดยทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ที่เลือกทำการศึกษาจำนวน 1 โรงงาน ในเขตอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

จากนั้นจึงทำการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้การกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่ผลิตจาก cellulose acetate มีขนาดรูพรุน 0.2 μm และแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่ผลิตจาก polysulfone มี MWCO 30 kDa ผลิตโดยบริษัท Satorius,Germany

น้ำเสียที่นำมาเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองเป็นส่วนน้ำใส(supernatant) ของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และน้ำเสียรวมอันประกอบไปด้วยน้ำเสียทั้ง 4 ชนิดข้างต้นผสมกันด้วยอัตราส่วน 1ต่อ1 โดยปริมาตร ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) เป็นตัวปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 9.5-10.5

การทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองศึกษาที่ความดัน 50 100 และ 200 kPa วัดฟลักซ์ทุก1,5,10,20,...,360นาที โดยทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีในทุกๆ 90 นาทีของการกรอง และในแต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำมาเป็นตัวแทน ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

1. น้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ

2. น้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่เลือกทำการศึกษา ตั้งอยู่ในเขตอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

1. อุปกรณ์สำหรับใช้เป็นแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

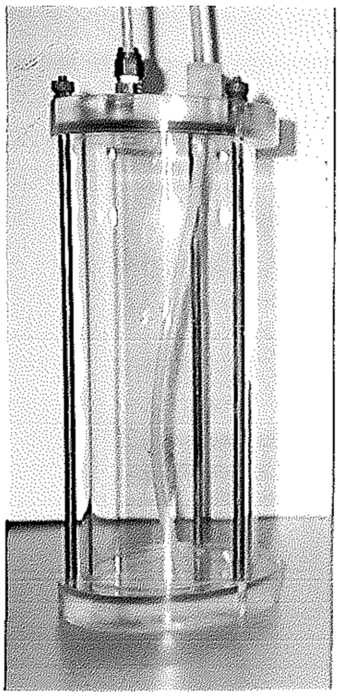
1.1 แบบจำลองถังตะกอน แบบจำลองที่ใช้เป็นถังโพลิโพรพิลีน (polypropylene) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 41 เซนติเมตร สูง 74 เซนติเมตร ด้านล่างใส่ก๊อกน้ำเพื่อง่ายต่อการแยกส่วนน้ำใส (supernatant) มาทำการทดลอง ดังภาพประกอบ 13

1.2 แบบจำลองการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง แบบจำลองที่ใช้ประกอบด้วย เวสเซล(vessel) ทรงกระบอก 2 ขนาด คือเวสเซลเก็บน้ำเสียตัวอย่างที่มีความจุ 2 ลิตร เป็นตัวเก็บน้ำเสียเพื่อป้อนสู่เวสเซลติดตั้งแผ่นเยื่อกรองทำจากเพล็กซิกลาส (plexiglass) ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อความดันด้านบนประกอบไปด้วยวาล์วควบคุมความดัน (pressure relief valve) ท่อรับ-ส่งก๊าซ และท่อส่งน้ำเสียตัวอย่างไปยังเวสเซลติดตั้งแผ่นเยื่อกรอง ดังภาพประกอบ 14

ส่วนเวสเซลติดตั้งแผ่นเยื่อกรองทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน มีความจุ 110 ลบ.ซม. ด้านบนประกอบไปด้วยวาล์วควบคุมความดัน และท่อรับน้ำเสียจากเวสเซลเก็บน้ำเสียตัวอย่าง ด้านในเวสเซลประกอบไปด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirring bar) สำหรับกวนเพื่อล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.4 มิลลิเมตร ยาว 25.4 มิลลิเมตร ติดตั้งสูงจากแผ่นเยื่อกรองประมาณ 2 มิลลิเมตร ด้านล่างเป็นที่ติดตั้งแผ่นเยื่อกรองและท่อทางออกของน้ำที่ผ่านการกรอง ดังภาพประกอบ 15

1.3 ท่อก๊าซไนโตรเจน (N_2) สำหรับอัดความดันให้ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง

ภาพประกอบ 13 แบบจำลองถังตกตะกอน



ภาพประกอบ 14 เวสเซลเก็บน้ำเสียตัวอย่าง

ภาพประกอบ 15 เวสเซลติดตั้งแผ่นเยื่อกรอง

2. อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

- ขวดพลาสติก ขนาด 1 ลิตร
- ถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร
- กล่องโฟมสำหรับแช่ตัวอย่าง

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption spectrophotometer AA 2000) พร้อมหลอดฮอลโลแคโธด (Hollow Cathode Lamp) ของ โลหะหนัก โครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี (Varian, Australia)
- เครื่องอังน้ำ (Water bath)
- เครื่องมือวัดความเป็นกรด เป็นด่าง (pH meter) (Hanna, Singapore)
- เครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity meter) (Hanna, Singapore)
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง (Satorius, Germany)
- เครื่องกรอง (Suction pump) (Wheaton, U.S.A.)
- เครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- ตู้อบความชื้น (Oven)
- ตู้ดูดควัน
- เตาไฟฟ้า (Hot Plate)
- เดสสิเคเตอร์ (Dessicator)
- เครื่องแก้วที่จำเป็นอื่น ๆ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาปริมาณและลักษณะของมลสารที่เจือปนอยู่ในน้ำล้าง (rinse water) จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยการศึกษาด้านปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น ใช้การคำนวณจากปริมาตรของบ่อกักเก็บน้ำล้างจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า สำหรับการศึกษาลักษณะทาง

กายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย จะทำการเก็บน้ำเสียตัวอย่างก่อนถูกปล่อยทิ้ง มาทำการวิเคราะห์ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนในการสังเคราะห์น้ำเสียใช้ในการทดลองต่อไป โดยวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค และตัวแปรคุณภาพน้ำที่ทำการศึกษาแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 ตัวแปรคุณภาพน้ำที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	วิธีการวิเคราะห์
โลหะหนัก (Cr, Cu, Ni และ Zn)	Atomic Absorption Spectrometric Method*
pH	วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัด pH
ความขุ่น	วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความขุ่น
สภาพนำไฟฟ้า	วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสภาพนำไฟฟ้า
ของแข็งทั้งหมด	Gravimetric Method*
ของแข็งแขวนลอย	Gravimetric Method*
ของแข็งละลาย	Gravimetric Method*

หมายเหตุ : * ใช้วิธีวิเคราะห์ตามที่ระบุใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 1992)

2. ทำการสังเคราะห์น้ำเสียเพื่อใช้ในการทดลอง โดยนำค่าโดยประมาณของค่าเฉลี่ยโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้ในข้อ1 มาทำการสังเคราะห์น้ำเสียจากสารเคมีชนิดเดียวกับที่ใช้ในโรงงาน ดังนี้

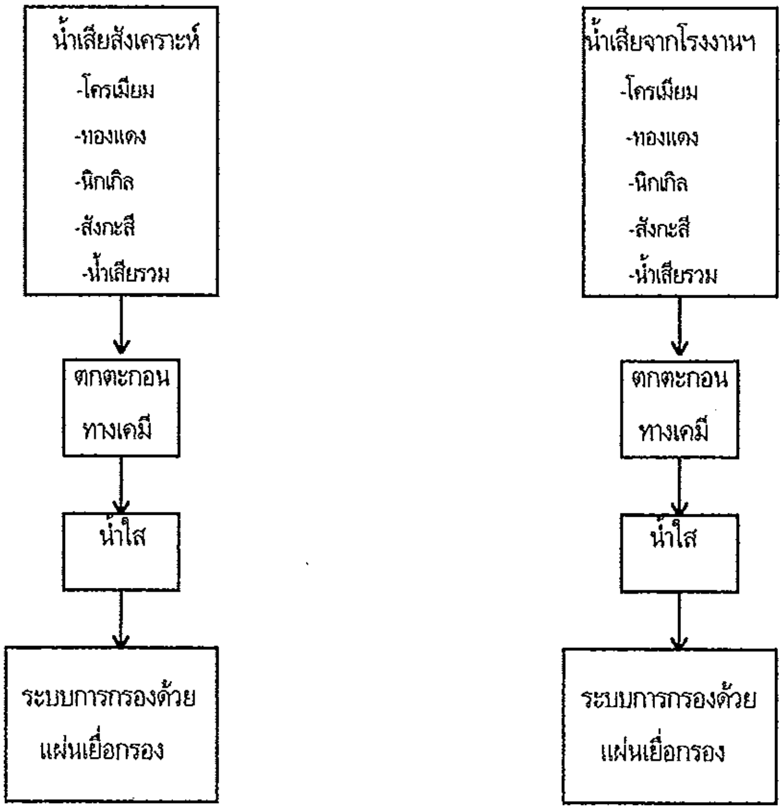
2.1 สังเคราะห์โครเมียมที่มีความเข้มข้น 2,500 มก./ล จาก CrO_3 4.81 กรัม ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร

2.2 สังเคราะห์ทองแดงที่มีความเข้มข้น 1,000 มก./ล จาก $CuSO_4.5H_2O$ 3.93 กรัม ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร

2.3 สังเคราะห์นิกเกิลที่มีความเข้มข้น 100 มก./ล จาก $NiSO_4.6H_2O$ 0.08 กรัม และ $NiCl_2.6H_2O$ 0.02 กรัม ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร

2.4 สังเคราะห์สังกะสีที่มีความเข้มข้น 10 มก./ล จาก ZnO 0.0124 กรัม ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร โดยใช้ Conc. H_2SO_4 5 หยด เพื่อช่วยในการละลาย ZnO

3. ทำการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยน้ำเสียที่นำมาทดลองแบ่งเป็นน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง น้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล น้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสี และน้ำเสียรวมอันประกอบไปด้วยน้ำเสียข้างต้น นำมาผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตกตะกอนโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 9.5-10.5 ตั้งทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 90 นาที แล้วนำส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก pH ของแข็งทั้งหมด และสภาพนำไฟฟ้า ก่อนเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น

4. ศึกษาการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง

4.1 ศึกษาการกรองน้ำเสียสังเคราะห์โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

4.1.1 เตรียมแผ่นเยื่อกรองก่อนนำมาใช้งานตามคู่มือแนะนำการใช้งานของบริษัทผู้ผลิตแผ่นเยื่อกรอง โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่เลือกใช้ ทำจาก cellulose acetate มีขนาดรูพรุน 0.2 µm บริษัทผู้ผลิตคือ Satorius, Germany เตรียมแผ่นเยื่อกรองก่อนนำมาใช้งานโดยแช่ในน้ำกลั่นประมาณ 30 นาที แล้วนำแผ่นเยื่อกรองไปติดตั้งในอุปกรณ์การทดลองที่เตรียมไว้

4.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นส่วนน้ำใสจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีจากข้อ 3 ซึ่งแบ่งเป็น น้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียม น้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดง น้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิล น้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสี และน้ำเสียสังเคราะห์รวม อันประกอบไปด้วยน้ำเสียข้างต้นนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

4.1.3 กรองน้ำกลั่นที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อหาฟลักซ์ของน้ำกลั่น ที่ความดัน 100 kPa (Kim, 1994) แล้วนำมาคำนวณหาความต้านทานของแผ่นเยื่อกรอง (membrane resistance) จากสมการ

$$Rm = \Delta P / \mu . J$$

4.1.4 ทำการทดลองที่ความดัน 50 100 และ 200 kPa แต่ละการทดลองทำซ้ำ3ครั้ง โดยกรองน้ำเสียสังเคราะห์ วัดฟลักซ์ที่เวลา 1,5,10,20,...,90 นาที เก็บรวบรวมน้ำที่ผ่านการกรองตั้งแต่นาทีที่ 1 ถึง 90 ไปทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก pH ของแข็งทั้งหมด และสภาพนำไฟฟ้า

4.1.5 ทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองโดยเทน้ำเสียที่หลงเหลืออยู่ในเวสเซลออก แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในเวสเซลที่ติดตั้งแผ่นเยื่อกรองประมาณ100 มิลลิลิตร กวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที (Kim, 1994) แล้วเทน้ำกลั่นในเวสเซลที่ติดตั้งแผ่นเยื่อกรองออก

4.1.6 ทำการกรองน้ำกลั่นที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 30 วินาที หาฟลักซ์ของน้ำกลั่นหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง นำฟลักซ์ที่ได้มาคำนวณหาความต้านทานของตัวถูกละลาย (solute resistance) จากสมการ

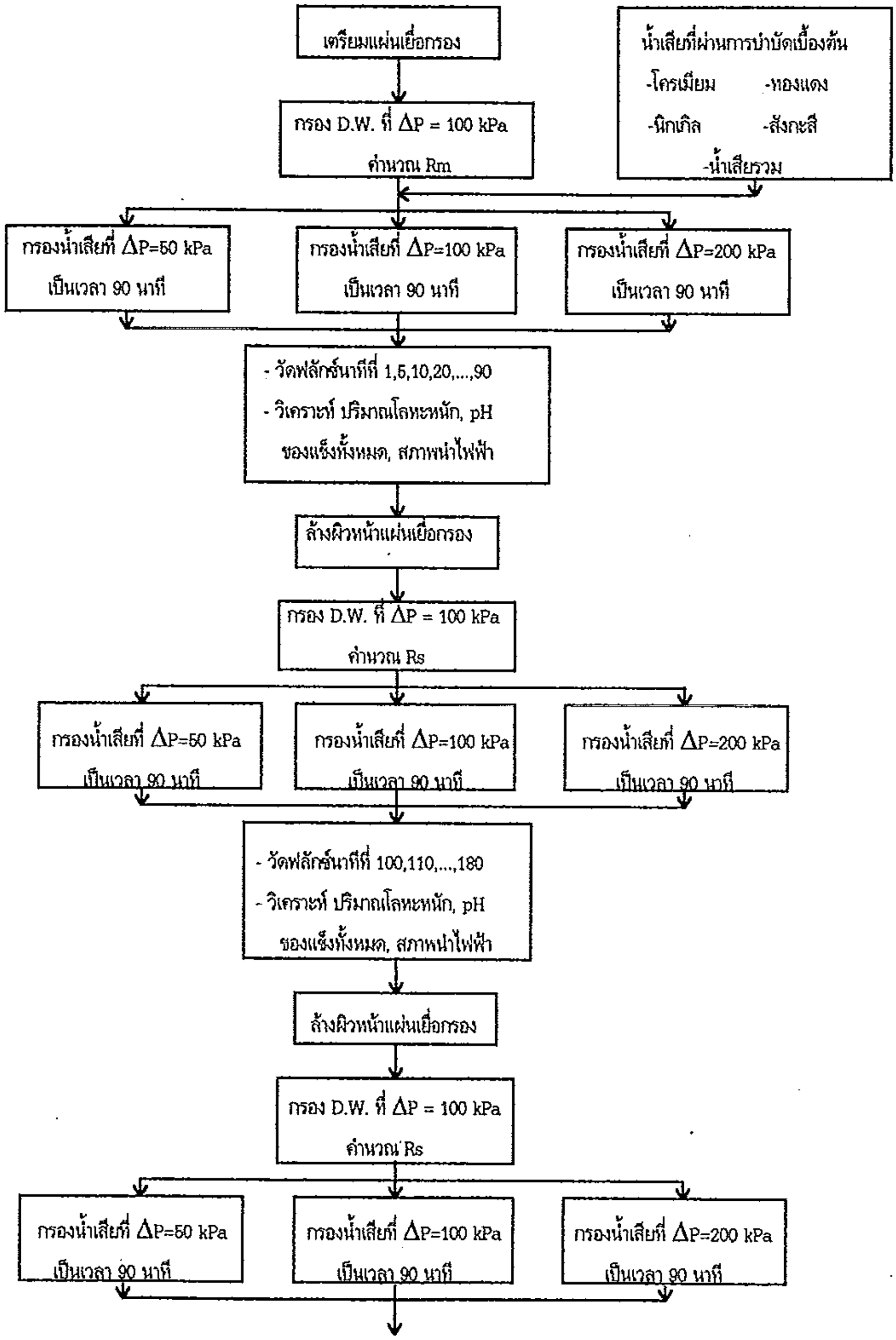
$$Rs = (\Delta P / \mu . J) - Rm$$

4.1.7 ทำการกรองต่อไปอีก 90 นาทีวัดฟลักซ์ทุก 10 นาที โดยบันทึกผลเป็นฟลักซ์ของการกรองนาทีที่100 ถึง 180 ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.1.4 ล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเช่นเดียวกับ 4.1.5 และวัดฟลักซ์ของน้ำกลั่นหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง เพื่อหาความต้านทานของตัวถูกละลายเช่นเดียวกับ 4.1.6

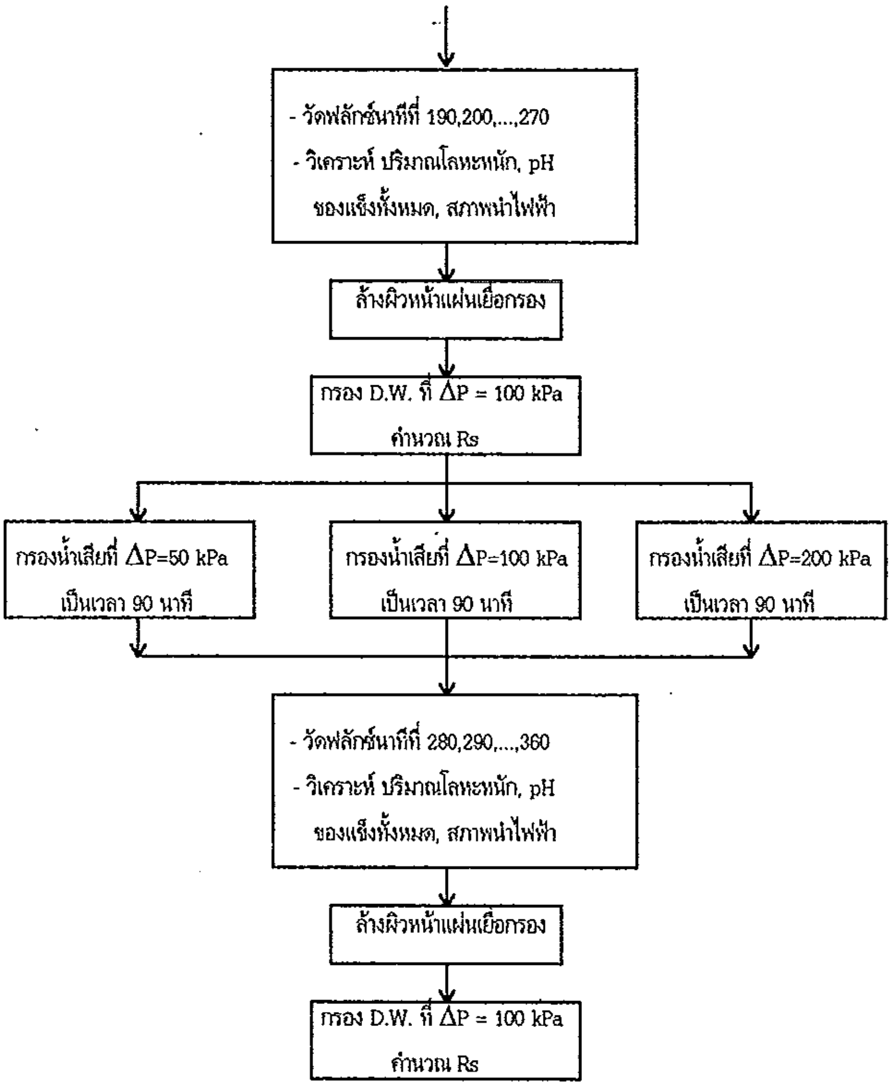
4.1.8 ทำการกรองต่อไปอีก 90 นาทีวัดฟลักซ์ทุก 10 นาที โดยบันทึกผลเป็นฟลักซ์ของการกรองนาทีที่190 ถึง 270 ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.1.4 ล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเช่นเดียวกับ 4.1.5 และวัดฟลักซ์ของน้ำกลั่นหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง เพื่อหาความต้านทานของตัวถูกละลายเช่นเดียวกับ 4.1.6

4.1.9 ทำการกรองต่อไปอีก 90 นาทีวัดฟลักซ์ทุก 10 นาที โดยบันทึกผลเป็นฟลักซ์ของการกรองนาทีที่280 ถึง 360 ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.1.4 ล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเช่นเดียวกับ 4.1.5 และวัดฟลักซ์ของน้ำกลั่นหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง เพื่อหาความต้านทานของตัวถูกละลายเช่นเดียวกับ 4.1.6

4.2 ศึกษาการกรองน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1 แต่ใช้ส่วนน้ำใสของน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากข้อ3 แทนส่วนน้ำใสของน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งน้ำเสียที่ใช้ประกอบไปด้วย น้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง น้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล น้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสี และน้ำเสียรวมอันประกอบไปด้วยน้ำเสียข้างต้นนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ขั้นตอนการกรองน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันแสดงในภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 ขั้นตอนการทดลองกรองน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)



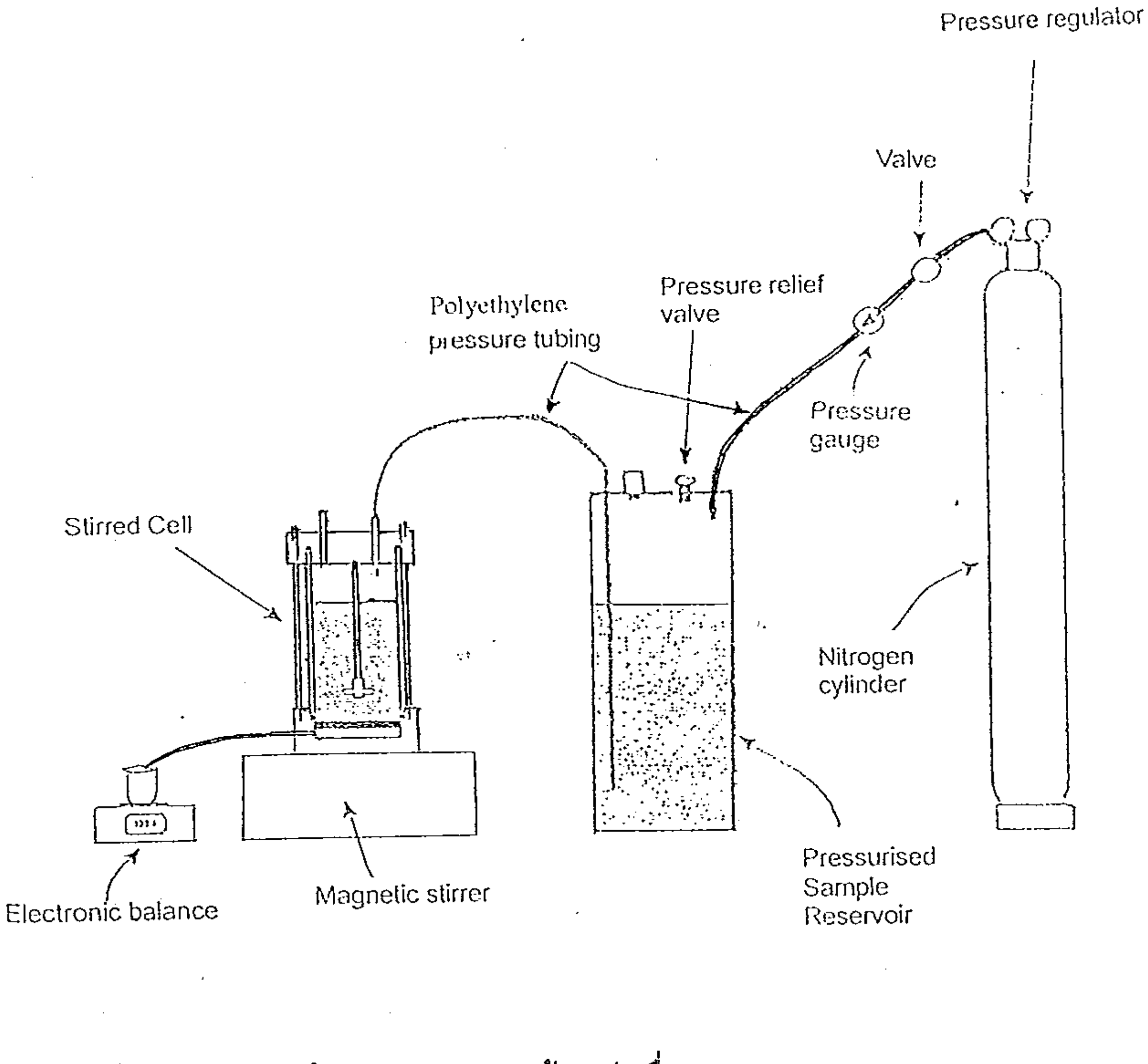
ภาพประกอบ 17 (ต่อ)

4.3 ศึกษาการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน

4.3.1 เตรียมแผ่นเยื่อกรองก่อนนำมาใช้งานตามคู่มือแนะนำการใช้งานของบริษัทผู้ผลิต โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่เลือกใช้ผลิตจาก polysulfone มี MWCO 30 kDa บริษัทผู้ผลิตคือ Satorius, Germany เตรียมแผ่นเยื่อกรองก่อนนำมาใช้งานโดยคว่ำหน้าแผ่นเยื่อกรองด้านที่มีความมัน เงากว่า ลงในน้ำกลั่นประมาณ30 นาที แล้วนำแผ่นเยื่อกรองไปติดตั้งในอุปกรณ์การทดลองโดยหงายแผ่นเยื่อกรองให้ด้านที่มีความมันเงากว่าขึ้นด้านบน

4.3.2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1.3-4.1.9 โดยทำการทดลองกับส่วนน้ำใสของน้ำเสียสังเคราะห์รวมที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีจากข้อ 3 เท่านั้น

4.4 ศึกษาการกรองน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ทำเช่นเดียวกับการทดลองข้อ 4.3 แต่ใช้ส่วนน้ำใสของน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีจากข้อ 3 แทนน้ำเสียสังเคราะห์รวม แบบจำลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองแสดงในภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แบบจำลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง

บทที่ 3

ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษา ข้อมูลพื้นฐานและกระบวนการผลิตของโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าแห่งหนึ่งในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และนำน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบมาทำการศึกษาทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีแผ่นเยื่อกรอง

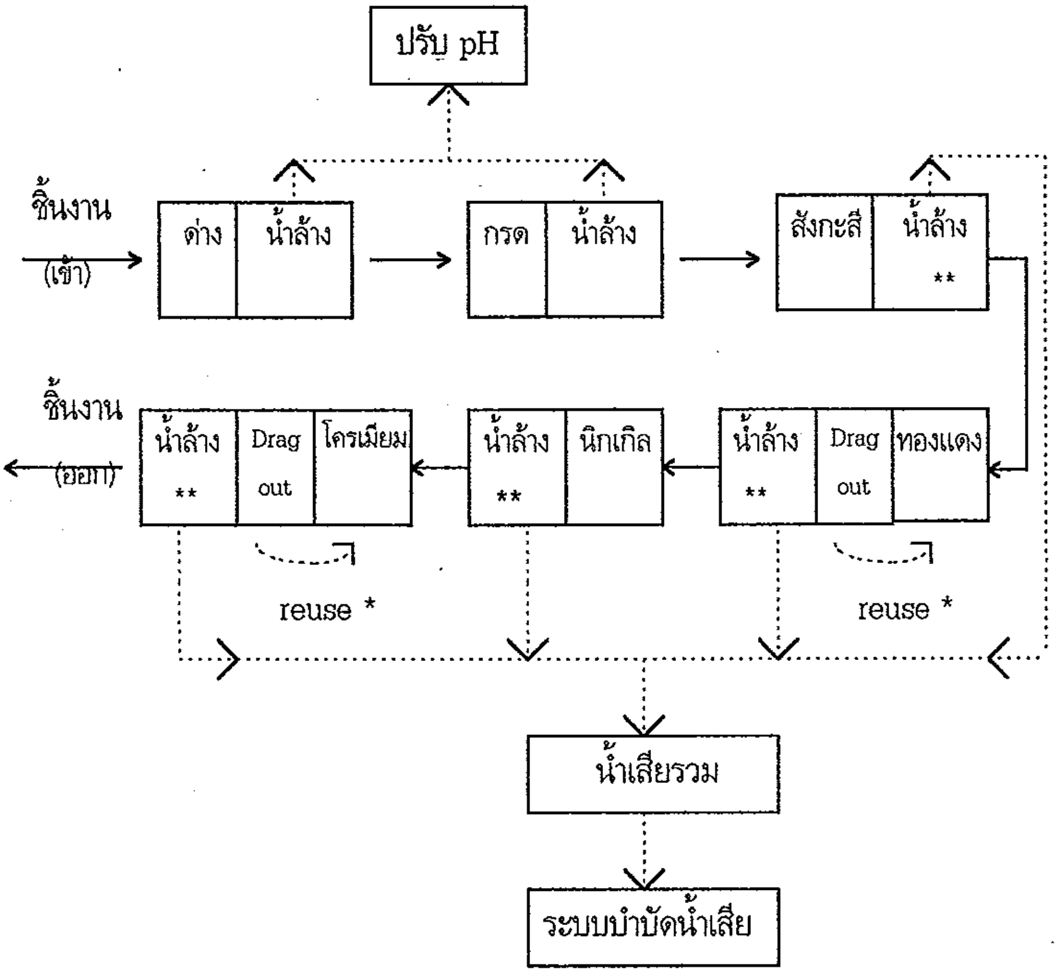
1. ข้อมูลพื้นฐานของโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

โรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่เลือกทำการศึกษาให้บริการชุบส่วนประกอบรถยนต์ เปิดบริการในวันจันทร์ถึงเสาร์ ตั้งแต่เวลา 08.30น. ถึง 17.00น. มีกำลังการผลิต 1,000 ชิ้นงาน/เดือน ส่วนใหญ่เป็นการชุบเคลือบล้อแมกซ์ กระบวนการทำงานโดยสังเขป คือ เมื่อได้รับการสั่งซื้อจากลูกค้าจึงทำการชุบชิ้นงานโดยนำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยการแช่ในน้ำด่างร้อน เพื่อล้างน้ำมันที่ติดที่ผิวชิ้นงาน หลังจากนั้นนำไปแช่ในกรดกำมะถันเจือจางเพื่อกัดสนิม แล้วนำไปชุบสังกะสี, ทองแดง, นิกเกิล และโครเมียมตามลำดับ โดยใช้น้ำยาชุบสังกะสีแบบกรดไม่ใช้ไซยาไนด์ น้ำยาชุบทองแดงแบบกรด น้ำยาชุบนิกเกิลแบบกึ่งเงา และน้ำยาชุบโครเมียมแบบฮาร์ดโครม ซึ่งหลังการชุบแต่ละครั้งชิ้นงานจะถูกนำมาล้างในถังน้ำล้าง ดังภาพประกอบ 19

หลังจากผ่านกระบวนการชุบทุกขั้นตอนแล้ว จะนำชิ้นงานไปตากผึ่งพัดลมให้แห้งแล้วบรรจุเพื่อรอลูกค้ามารับต่อไป

2. ปริมาณและลักษณะน้ำเสีย

จากการศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณและลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ และทางเคมีโดยมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะน้ำเสียหลังการชุบเคลือบโลหะแต่ละขั้นตอน สำหรับการตรวจสอบปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะทำได้โดย ประมาณการจากความจุของถังกักเก็บน้ำล้างที่มีขนาดกว้าง 60เซนติเมตร ยาว 170เซนติเมตร สูง 70เซนติเมตร จำนวน 4ถัง พบว่าปริมาณน้ำเสียหลังการชุบเคลือบโลหะถูกปล่อยทิ้งประมาณ 90 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน



ภาพประกอบ 19 ขั้นตอนการทำงานและจุดเก็บตัวอย่างน้ำจากโรงงาน

หมายเหตุ : * นำกลับไปใช้ในถังชุบใหม่เมื่อมีความเข้มข้นมากพอ

** จุดเก็บตัวอย่างน้ำ

ส่วนลักษณะน้ำเสียเป็นน้ำล้างหลังการชุบเคลือบโลหะซึ่งแยกตามชนิดของโลหะหนัก ดังภาพประกอบ 19 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรคุณภาพน้ำจากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนทำการปล่อยทิ้ง 3 ครั้ง แสดงไว้ในตาราง 13

ตาราง 13 ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

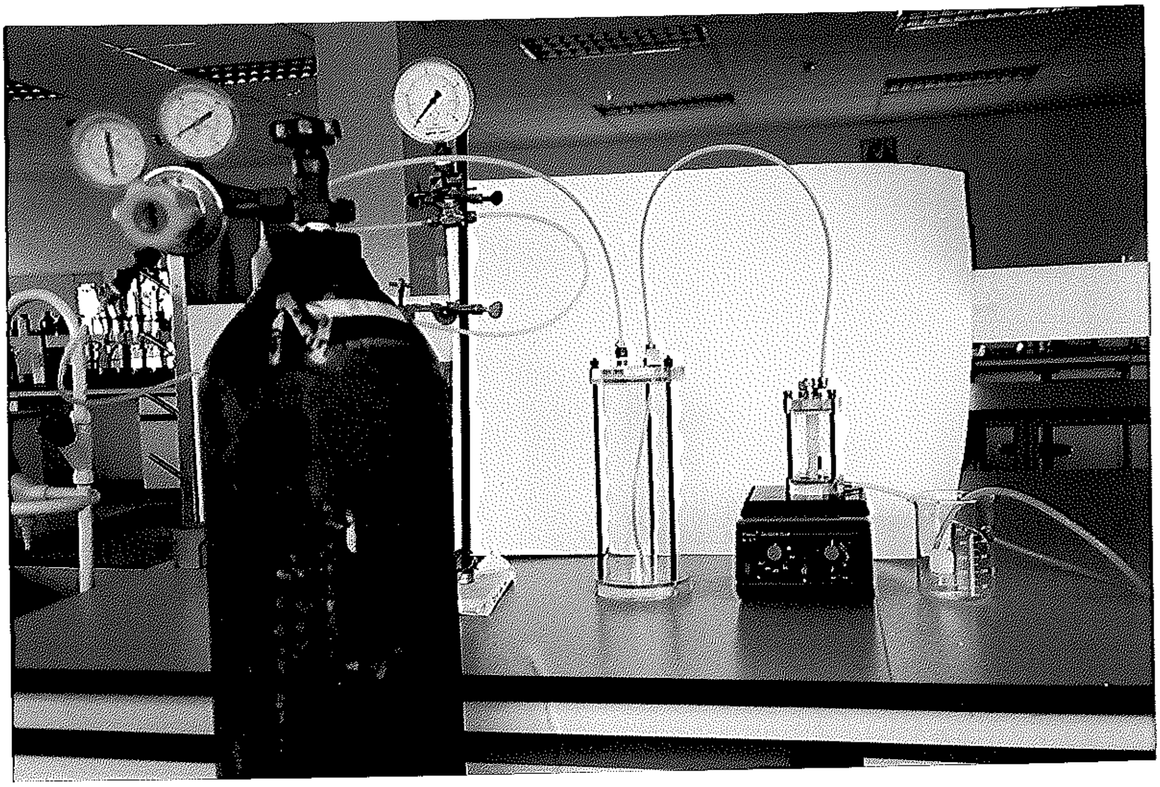
ตัวแปรคุณภาพน้ำ	โครเมียม				ทองแดง				นิกเกิล				สังกะสี			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
Heavy Metals (mg/l)	2,181	2,616	1,612	2,136	964	1,006	1,090	1,020	81.4	113.9	93.0	96.1	10.6	7.4	8.1	8.7
pH	1.61	1.54	1.84	1.66	2.15	1.46	1.68	1.76	5.32	5.12	5.20	5.21	7.50	7.70	7.60	7.60
Conductivity (mS/m)	30.00	32.00	28.00	30.00	7.73	8.12	8.52	8.12	1.05	1.25	1.15	1.15	1.25	0.85	0.90	1.00
Turbidity (NTU)	1.62	1.77	1.47	1.62	0.76	0.68	0.87	0.77	0.59	0.78	0.67	0.68	2.33	2.06	2.15	2.18
TS (mg/l)	6,170	6,590	5,630	6,130	2,970	4,120	3,320	3,470	430	680	480	530	1,460	1,270	1,380	1,370
SS (mg/l)	12	15	9	12	3	5	4	4	2	4	3	3	5	3	4	4
TDS (mg/l)	6,158	6,575	5,621	6,118	2,967	4,115	3,316	3,466	428	676	477	527	1,455	1,267	1,376	1,366

3. ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Microfittration) กับน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

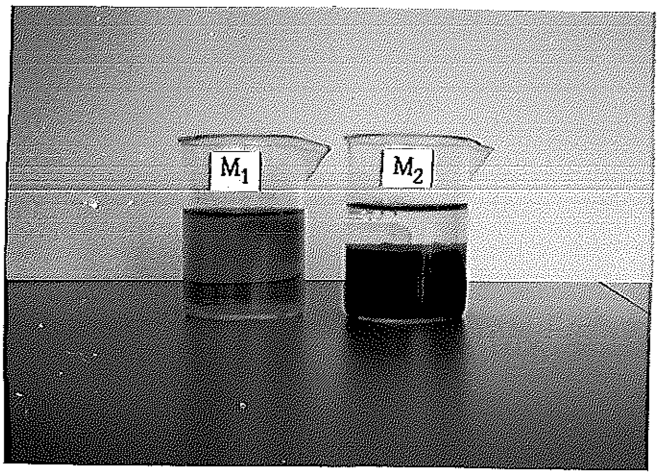
3.1 ฟลักซ์ (Flux)

ทำการเตรียมน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และน้ำเสียรวมอันประกอบด้วยโครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตามที่ระบุไว้ในวิธีการวิจัยข้อ 2 (หน้า 42)

หลังจากนั้นนำไปตกตะกอนทางเคมี โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 9.5-10.5 ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 90 นาที ดังภาพประกอบ 21 ต่อจากนั้นจึงนำส่วนน้ำใส มาเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 50,100 และ 200 kPa วัดฟลักซ์ที่ความดันและเวลาต่าง ๆ แสดงไว้ในตาราง 14-18 สำหรับแบบจำลองในห้องปฏิบัติการของระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองแสดงในภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 แบบจำลองในห้องปฏิบัติการของระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง



ภาพประกอบ 21 น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดย

Cr_1 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบโครเมียมก่อนตกตะกอนทางเคมี

Cr_2 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบโครเมียมหลังตกตะกอนทางเคมี

Cu_1 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบทองแดงก่อนตกตะกอนทางเคมี

Cu_2 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบทองแดงหลังตกตะกอนทางเคมี

Ni_1 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบนิกเกิลก่อนตกตะกอนทางเคมี

Ni_2 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบนิกเกิลหลังตกตะกอนทางเคมี

Zn_1 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบสังกะสีก่อนตกตะกอนทางเคมี

Zn_2 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบสังกะสีหลังตกตะกอนทางเคมี

M_1 คือ น้ำเสียสังเคราะห์รวมก่อนตกตะกอนทางเคมี

M_2 คือ น้ำเสียสังเคราะห์รวมหลังตกตะกอนทางเคมี

ตาราง 14 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	5,993	11,446	19,876	180	1,245	1,615	2,296
5	5,811	10,203	15,399	190	1,123	1,574	2,113
10	5,157	7,585	10,245	200	1,110	1,538	2,039
20	4,169	5,430	7,343	210	1,097	1,537	1,986
30	3,268	4,158	5,628	220	1,096	1,530	1,884
40	2,835	3,513	4,968	230	1,087	1,477	1,800
50	2,541	3,141	4,332	240	1,075	1,453	1,662
60	2,262	2,927	3,983	250	1,069	1,408	1,459
70	2,123	2,619	3,630	260	1,054	1,355	1,337
80	1,973	2,422	3,436	270	1,048	1,316	1,229
90	1,897	2,337	3,331	280	605	1,507	1,038
100	1,440	2,104	2,983	290	603	1,445	986
110	1,423	2,068	2,850	300	600	1,394	944
120	1,402	2,049	2,701	310	595	1,331	868
130	1,387	1,997	2,573	320	594	1,298	778
140	1,371	1,956	2,521	330	592	1,254	701
150	1,325	1,928	2,476	340	587	1,226	675
160	1,307	1,832	2,416	350	579	1,182	586
170	1,294	1,679	2,354	360	574	1,146	527

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm

ตาราง 15 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	5,300	10,969	21,729	180	2,232	2,561	3,227
5	5,151	10,698	17,845	190	1,928	2,001	3,128
10	5,069	10,143	13,806	200	1,892	1,960	3,068
20	4,990	8,948	10,309	210	1,803	1,930	2,950
30	4,713	6,366	9,617	220	1,793	1,881	2,908
40	4,500	5,598	8,286	230	1,724	1,883	2,863
50	4,112	4,868	6,504	240	1,663	1,844	2,832
60	3,788	4,646	6,082	250	1,658	1,815	2,776
70	3,631	4,380	5,586	260	1,642	1,762	2,740
80	3,416	4,142	5,206	270	1,631	1,758	2,730
90	3,219	3,891	4,828	280	1,856	1,600	2,598
100	2,437	3,008	4,510	290	1,788	1,548	2,556
110	2,418	2,899	4,287	300	1,461	1,552	2,522
120	2,389	2,810	4,120	310	1,455	1,547	2,488
130	2,373	2,788	3,812	320	1,451	1,512	2,364
140	2,365	2,759	3,620	330	1,444	1,494	2,290
150	2,359	2,710	3,554	340	1,422	1,465	2,267
160	2,327	2,656	3,480	350	1,403	1,444	2,280
170	2,291	2,600	3,382	360	1,405	1,372	1,960

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm

ตาราง 16 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	4,925	9,404	14,642	180	394	726	686
5	3,712	5,018	5,838	190	362	671	613
10	2,652	3,286	3,754	200	355	641	595
20	1,945	2,348	2,758	210	351	656	587
30	1,265	1,904	2,021	220	348	587	579
40	1,056	1,590	1,723	230	346	566	573
50	929	1,455	1,532	240	344	547	564
60	865	1,255	1,394	250	342	534	558
70	801	1,115	1,289	260	338	516	549
80	754	1,049	1,209	270	337	507	547
90	712	1,009	1,133	280	323	455	546
100	448	911	872	290	317	452	529
110	441	858	844	300	310	440	517
120	423	804	822	310	305	436	514
130	415	787	793	320	299	430	508
140	411	762	768	330	298	451	501
150	406	753	752	340	295	413	499
160	404	744	719	350	292	404	493
170	399	734	696	360	292	388	489

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm

ตาราง 17 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	4,398	9,527	17,987	180	270	293	283
5	3,609	6,498	10,056	190	295	331	299
10	2,524	3,073	3,627	200	273	307	287
20	1,646	1,339	1,508	210	257	294	275
30	1,071	799	897	220	249	281	269
40	831	607	659	230	243	271	260
50	663	513	542	240	237	262	255
60	543	459	478	250	231	256	249
70	451	427	430	260	226	248	259
80	381	395	400	270	223	241	240
90	356	373	376	280	234	260	255
100	476	451	433	290	227	248	247
110	391	406	395	300	221	239	239
120	358	381	359	310	216	231	233
130	342	360	339	320	211	223	231
140	330	343	323	330	208	217	225
150	306	327	311	340	205	209	223
160	291	313	300	350	202	209	219
170	278	303	288	360	199	201	216

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm

ตาราง 18 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	5,774	13,145	21,844	180	1,359	2,061	2,260
5	5,372	10,732	17,218	190	1,281	1,875	2,214
10	5,147	8,550	11,464	200	1,277	1,840	2,150
20	4,627	6,240	7,068	210	1,256	1,819	2,093
30	4,141	4,899	5,365	220	1,198	1,822	2,058
40	3,391	4,150	4,620	230	1,166	1,795	2,020
50	3,069	3,713	4,180	240	1,152	1,770	1,973
60	2,847	3,369	3,811	250	1,131	1,751	1,927
70	2,590	3,079	3,525	260	1,111	1,728	1,904
80	2,482	2,898	3,327	270	1,102	1,701	1,886
90	2,311	2,740	3,169	280	1,707	2,050	2,074
100	1,559	2,404	2,978	290	1,603	2,006	1,987
110	1,547	2,282	2,875	300	1,507	1,878	1,921
120	1,514	2,239	2,774	310	1,401	1,825	1,867
130	1,470	2,193	2,671	320	1,327	1,742	1,825
140	1,453	2,159	2,621	330	1,264	1,723	1,762
150	1,429	2,125	2,510	340	1,194	1,695	1,700
160	1,405	2,104	2,401	350	1,118	1,688	1,672
170	1,367	2,078	2,329	360	1,076	1,678	1,628

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm

จากตารางข้างต้น เห็นได้ว่าฟลักซ์จะแปรผันตามความดัน กล่าวคือเมื่อทำการทดลองที่ความดันต่ำฟลักซ์ต่ำ เมื่อทำการทดลองที่ความดันสูงฟลักซ์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนอัตราการลดลงของฟลักซ์เมื่อนำข้อมูลในตาราง 14-18 มาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และเวลา ดังภาพประกอบ 22 จะพบว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์แปรผันตามความดันด้วยเช่นกัน นั่นก็คือ เมื่อทำการทดลองที่ความดันต่ำอัตราการลดลงของฟลักซ์ต่ำ ในขณะที่ทำการทดลองที่ความดันสูง อัตราการลดลงของฟลักซ์สูง สังเกตได้ว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกของการทดลองจะสูงในทุก ๆ ความดันที่ได้ทำการทดลอง แต่เมื่อทำการกรองต่อไปอัตราการลดลงของฟลักซ์ลดน้อยลง และเมื่อทำการคำนวณการสูญเสียฟลักซ์จากสมการ (Kim et al., 1994)

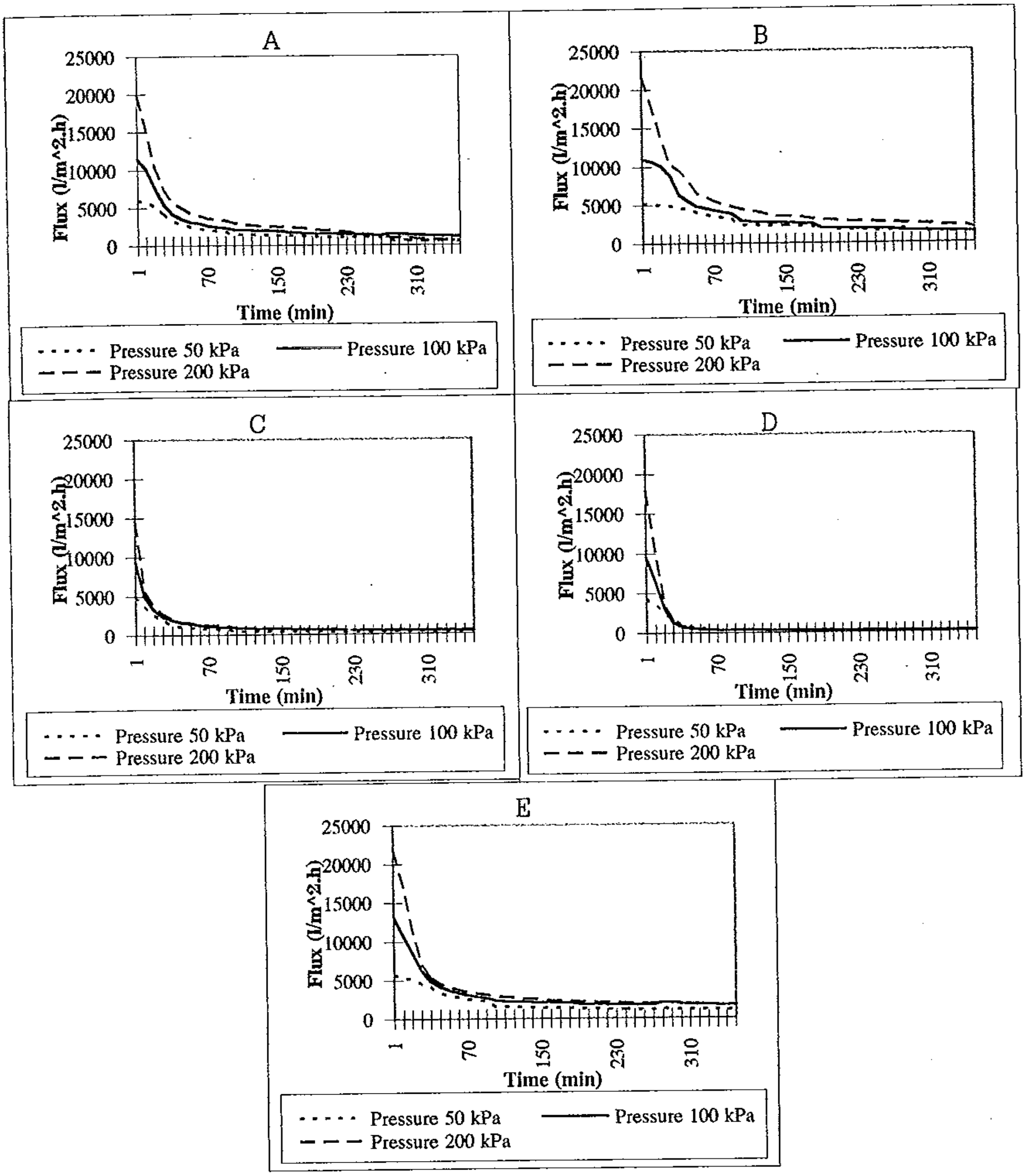
Flux loss (%) = [(initial flux- final flux) / initial flux] x 100

ได้ผลดังตาราง 19

ตาราง 19 การสูญเสียฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ความดันต่างๆ

น้ำเสียสังเคราะห์	การสูญเสียฟลักซ์ (%)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
โครเมียม	90.4	89.9	97.4
ทองแดง	73.5	87.5	91.0
นิกเกิล	94.1	95.9	96.7
สังกะสี	95.5	97.9	98.8
น้ำเสียรวม	81.4	85.7	92.5

จากตารางการสูญเสียฟลักซ์ จะเห็นได้ว่าการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตชันที่ความดัน 50 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ต่ำสุด รองลงมาคือการกรองที่ความดัน 100 kPa ในขณะที่การกรองที่ความดัน 200 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์สูงสุด



ภาพประกอบ 22 อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่เวลาและความดันต่างๆ โดย

A = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบโครเมียม

B = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบทองแดง

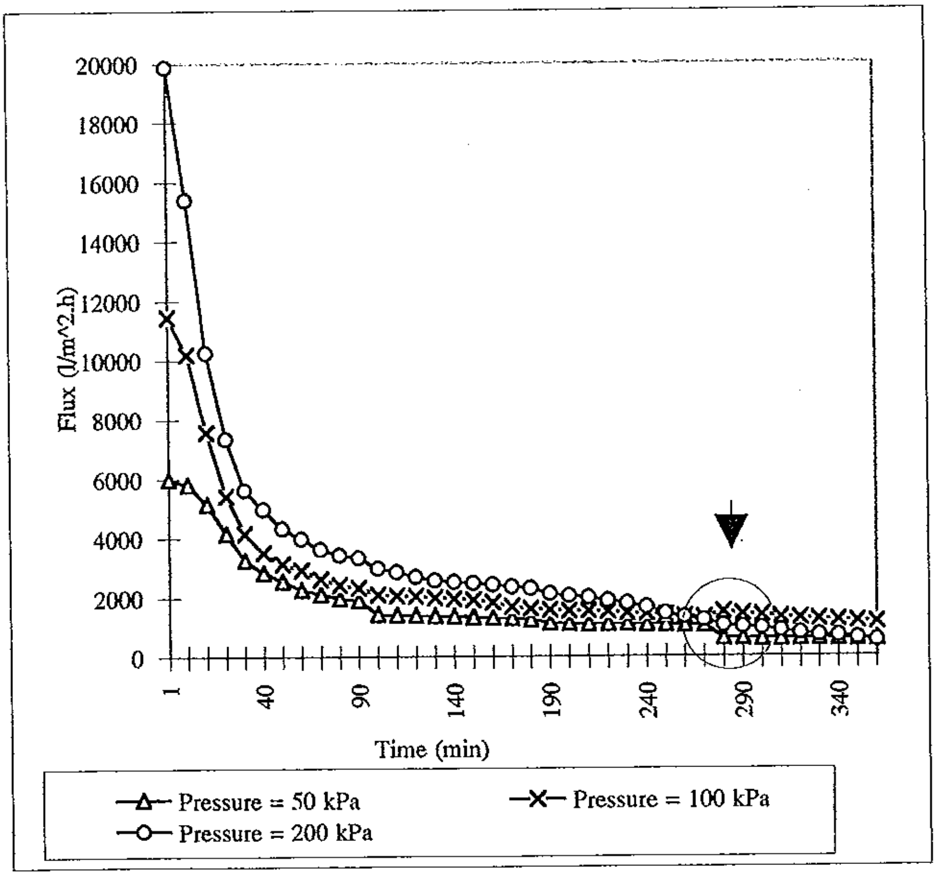
C = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบนิกเกิล

D = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบสังกะสี

E = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวม

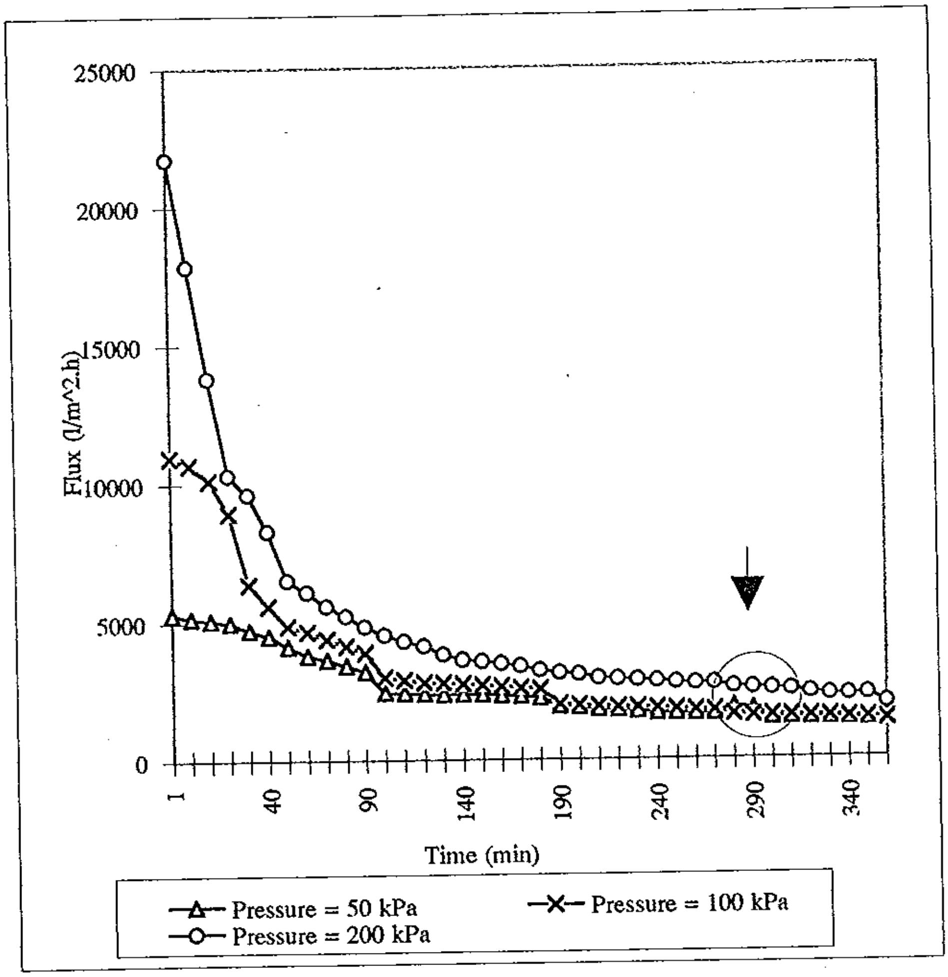
3.2 การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง

ทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองหลังการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ทุก 90 นาที โดยใส่น้ำกลั่นลงไปในเวสเซลที่ติดตั้งแผ่นเยื่อกรอง แล้วทำการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเทน้ำกลั่นออก กรองต่อไปอีก 90 นาที แล้วล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง ทำเช่นนี้ 4 รอบ ใน 1การทดลอง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์จากตาราง 14-18 พบว่าการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองมีผลต่อฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียหลังการชุบโลหะสังเคราะห์ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันดังต่อไปนี้



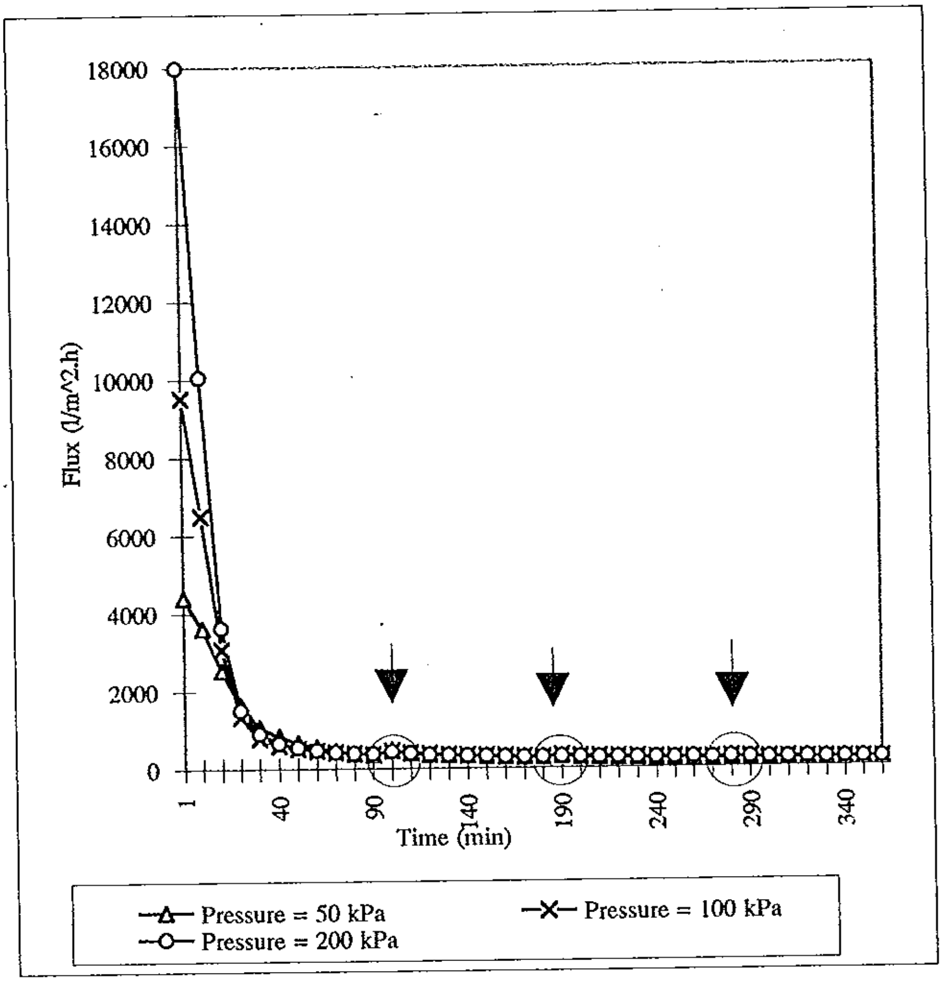
ภาพประกอบ 23 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภท ไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบโครเมียม ที่ความดัน 100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,316 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่270 เป็น 1,507 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280



ภาพประกอบ 24 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

การกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดง พบว่าที่ความดัน50kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,631 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 1,856 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280



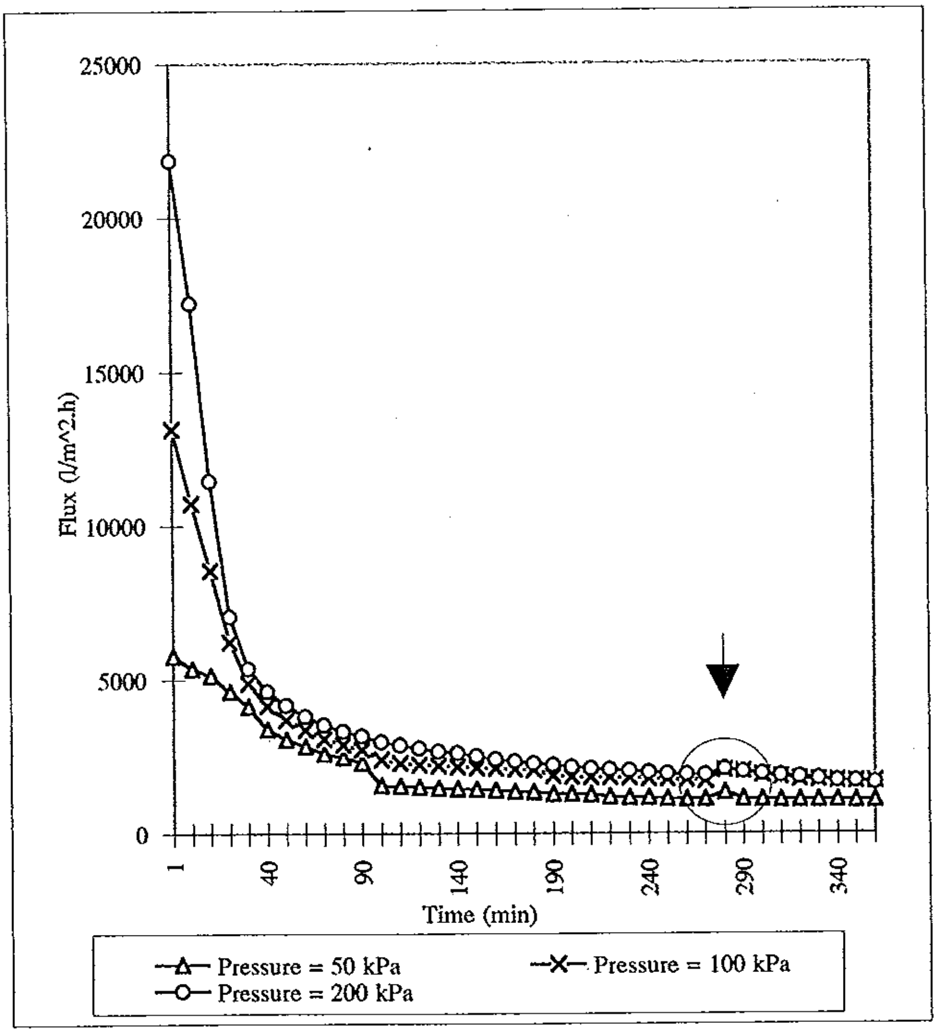
ภาพประกอบ 25 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

การกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 356 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 476 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 270 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 295 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 223ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 234 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

การทดลองที่ความดัน 100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 373 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 451 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 293 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง

ในนาทีที่180 เป็น331 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 241 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่270 เป็น 260 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

การทดลองที่ความดัน 200 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 376 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 433 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 283 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 180 เป็น 299 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 240 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 255 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280



ภาพประกอบ 26 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

การกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวม ที่ความดัน100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,701 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 2,050 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 200 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,886 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 2,074 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าฟลักซ์หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกของการกรอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปฟลักซ์ลดน้อยลง สำหรับอัตราการกรองดังตาราง 20 พบว่าสูงในช่วงแรกของการกรอง ทุกๆความดันที่ได้ทำการทดลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการกรองลดน้อยลง ดังนั้นการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองไม่สามารถทำให้อัตราการกรองเพิ่มสูงขึ้นได้ และเมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลาเดียวกันพบว่าอัตราการกรองแปรผันตามความดัน

ตาราง 20 อัตราการกรองของน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	อัตราการกรอง (ลิตร/ชั่วโมง)														
	โครเมียม			ทองแดง			นิกเกิล			สังกะสี			น้ำเสียรวม		
	50*	100*	200*	50*	100*	200*	50*	100*	200*	50*	100*	200*	50*	100*	200*
90	4.60	6.02	8.45	6.35	9.02	12.29	1.97	2.76	3.17	1.54	1.70	2.19	5.20	6.93	8.44
180	2.06	2.92	3.92	3.59	4.20	5.76	0.63	1.20	1.18	0.51	0.54	0.61	2.22	3.32	3.96
270	1.65	2.23	2.62	2.66	2.85	4.40	0.63	0.88	0.87	0.38	0.42	0.41	1.81	2.73	3.08
360	0.90	1.99	1.20	2.32	2.29	3.61	0.46	0.65	0.78	0.33	0.34	0.35	1.71	2.76	2.78

หมายเหตุ : * = ความดัน (kPa)

3.3 ความต้านทานของตัวถูกละลาย (solute resistance)

จากการทดลอง ภายหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยน้ำกลั่น โดยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่ทุก ๆ 90 นาที แล้วทำการกรองน้ำกลั่นที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 30 วินาที นำข้อมูลที่ได้มาหาฟลักซ์ของน้ำกลั่น เพื่อนำฟลักซ์ของน้ำกลั่นมาใช้คำนวณหาความต้านทานของตัวถูกละลายได้ผลดังตาราง 21

ตาราง 21 ความต้านทานของตัวถูกละลาย ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

Solute Resistance (m^{-1}) / Time (min)	Cr			Cu			Ni			Zn			น้ำเสียรวม		
	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa
90	0.028	0.041	0.059	0.008	0.023	0.037	0.109	0.109	0.281	0.089	0.256	0.491	0.027	0.036	0.060
180	0.037	0.055	0.073	0.019	0.036	0.064	0.135	0.145	0.291	0.226	0.308	0.816	0.032	0.050	0.081
270	0.038	0.047	0.169	0.026	0.055	0.081	0.160	0.204	0.348	0.281	0.452	0.854	0.035	0.050	0.092
360	0.040	0.056	0.254	0.030	0.085	0.129	0.157	0.270	0.405	0.302	0.464	1.102	0.036	0.050	0.111

หมายเหตุ : P = ความดัน (kPa)

จากตาราง 21 พบว่า ความต้านทานของตัวถูกละลายแปรผันตามความดัน กล่าวคือเมื่อความดันต่ำความต้านทานของตัวถูกละลายต่ำ เมื่อความดันสูงความต้านทานของตัวถูกละลายสูง

3.4 ปริมาณโลหะหนัก

ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน โดยเมื่อทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการแล้วนำไปบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดันต่าง ๆ คือ 50, 100 และ 200 kPa ทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทุก ๆ 90นาที มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่หลงเหลืออยู่ได้ผลดังตาราง 22-26

ตาราง 22 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบโครเมียม เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	1.59		1.59		1.59	
90	0.70	55.97	0.80	49.69	0.89	44.03
180	0.71	55.35	0.80	49.69	0.82	48.43
270	0.75	52.83	0.80	49.69	1.02	35.85
360	0.75	52.83	0.83	47.80	0.92	42.14

ตาราง 23 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบทองแดง เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	2.24		2.24		2.24	
90	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67
180	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67
270	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67
360	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67	<0.03	>98.67

ตาราง 24 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบนิกเกิล เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	5.75		5.75		5.75	
90	0.21	96.35	1.94	66.26	3.42	40.52
180	0.16	97.22	2.03	64.70	3.52	38.78
270	0.15	97.39	1.85	67.83	4.36	24.17
360	0.23	96.00	2.01	65.04	4.37	24.00

ตาราง 25 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบสังกะสี เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	1.35		1.35		1.35	
90	0.24	82.22	0.54	60.00	0.80	40.74
180	0.18	86.67	0.52	61.48	0.80	40.74
270	0.19	85.93	0.50	62.96	0.83	38.52
360	0.35	74.07	0.50	62.96	0.76	43.70

ตาราง 26 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์รวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชั่น (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa								ความดัน 100 kPa								ความดัน 200 kPa							
	Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
ก่อนกรอง	1.16		2.33		5.14		0.95		1.16		2.33		5.14		0.95		1.16		2.33		5.14		0.95	
90	0.46	60.34	<0.03	>98.71	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.66	43.10	0.03	98.71	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.73	37.07	0.03	98.73	0.10	98.05	0.01	98.95
180	0.49	57.76	<0.03	>98.71	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.57	50.86	0.04	98.28	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.66	43.10	0.03	98.73	0.10	98.05	0.01	98.95
270	0.52	55.17	<0.03	>98.71	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.55	52.59	0.03	98.71	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.73	37.07	0.03	98.73	0.10	98.05	0.01	98.95
360	0.42	63.79	<0.03	>98.71	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.52	55.17	0.04	98.28	<0.10	>98.05	<0.01	>98.95	0.73	37.07	0.03	98.73	0.10	98.05	0.01	98.95

หมายเหตุ : A = ความเข้มข้น (มก./ล)

B = Rejection (%)

จากตาราง 22-26 จะเห็นได้ว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่วิเคราะห์ได้ มีค่าใกล้เคียงกันทุกช่วงเวลาภายใต้การทดลองที่ความดันเดียวกัน เมื่อทำการเพิ่มความดันที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามความดัน นั่นคือ ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันแปรผันตามความดัน

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ดังแสดงในภาคผนวก ก พบว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียม เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 35.85-55.97% โดยปริมาณโครเมียมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดัน 50 kPa มีความเข้มข้นต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง แต่ที่ความดัน 100 kPa และ 200 kPa มีปริมาณโครเมียม 0.80-1.02 มก./ล ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดง เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วงมากกว่า 98.67% โดยปริมาณทองแดงเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.03 มก./ล ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิล เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดนิกเกิล ได้ในช่วง 24.00-97.39% หรือมีปริมาณนิกเกิล 0.15-4.37 มก./ล โดยปริมาณนิกเกิลเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 50 kPa มีค่า 0.15-0.23 มก./ล ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง แต่ที่ความดัน 100 และ 200 kPa ปริมาณโลหะหนักสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน คืออยู่ในช่วง 1.85-4.37 มก./ล

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสี ภายหลังการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 1.35 มก./ล ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อ

นำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันปริมาณสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 38.52-86.67 % หรือมีปริมาณสังกะสี 0.18-0.83 มก./ล

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์รวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 37.07-63.79 % หรือมีปริมาณโครเมียม 0.42-0.73 มก./ล สามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 98.28-มากกว่า 98.71 % หรือมีปริมาณทองแดงน้อยกว่า 0.03-0.04 มก./ล สามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าหรือเท่ากับ98.05% หรือมีปริมาณนิกเกิล น้อยกว่า 0.10-0.10 มก./ล ซึ่งค่าทั้งหมดที่กล่าวมานั้นต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ในการกำจัดสังกะสีโดยการตกตะกอนทางเคมีมีปริมาณสังกะสีเหลือ 0.95 มก./ล เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันปริมาณสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 98.95 % หรือมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01 มก./ล

3.5 pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน โดยเมื่อทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ตามความเข้มข้นตามต้องการแล้วนำไปบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมด ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดันต่าง ๆ คือ 50,100 และ 200 kPa โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทุก ๆ 90 นาที มาทำการวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดได้ผลดังตาราง 27 จากตารางพบว่า pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ของน้ำเสียสังเคราะห์ทุกชนิดและทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง หลังกรองลดลงเล็กน้อย

ตาราง 27 การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	โครเมียม									ทองแดง									นิกเกิล								
	P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa			P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa			P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ก่อนกรอง	9.65	25.6	3,002	9.65	25.6	3,002	9.65	25.6	3,002	9.59	2.6	178	9.59	2.6	178	9.59	2.6	178	9.95	0.12	7	9.95	0.12	7	9.95	0.12	7
90	9.62	25.6	2,888	9.59	25.4	2,728	9.63	25.6	2,747	9.56	2.5	172	9.57	2.6	174	9.56	2.5	171	7.61	0.10	6	7.64	0.10	7	7.74	0.10	7
180	9.60	25.5	2,607	9.60	25.5	2,625	9.64	25.5	2,777	9.56	2.5	173	9.56	2.6	174	9.55	2.5	171	7.57	0.10	6	7.60	0.10	6	7.73	0.10	7
270	9.60	25.5	2,632	9.58	25.4	2,749	9.64	25.6	2,779	9.56	2.5	173	9.56	2.6	173	9.56	2.5	170	7.59	0.10	7	7.62	0.10	6	7.72	0.10	7
360	9.60	25.4	2,680	9.60	25.6	2,625	9.64	25.5	2,732	9.56	2.5	172	9.57	2.6	172	9.55	2.5	170	7.58	0.10	6	7.64	0.10	6	7.67	0.10	7

ตาราง 27 (ต่อ)

เวลา (นาที)	สังกะสี									น้ำเสียรวม								
	P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa			P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ก่อนกรอง	9.32	0.04	4	9.32	0.04	4	9.32	0.04	4	9.59	12.2	1,133	9.59	12.2	1,133	9.59	12.2	1,133
90	8.29	0.04	4	8.30	0.04	4	8.31	0.04	4	9.55	12.2	1,062	9.57	12.2	1,051	9.57	12.2	1,067
180	8.30	0.04	4	8.29	0.04	3	8.30	0.04	4	9.54	12.2	1,050	9.58	12.2	1,066	9.58	12.2	1,064
270	8.30	0.04	4	8.30	0.04	3	8.31	0.04	4	9.51	12.2	1,057	9.56	12.2	1,058	9.58	12.2	1,056
360	8.30	0.04	4	8.31	0.04	3	8.30	0.04	3	9.54	12.2	1,059	9.58	12.3	1,072	9.57	12.2	1,065

หมายเหตุ : P = ความดัน (kPa)

A = pH

B = สภาพนำไฟฟ้า (mS/m)

C = ของแข็งทั้งหมด (mg/l)

4. ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) กับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

4.1 ฟลักซ์ (Flux)

ทำการเก็บน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นน้ำล้างหลังการชุบเคลือบในแต่ละขั้นตอน โดยแยกน้ำเสียเป็นน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม, ทองแดง, นิกเกิล, สังกะสี และน้ำเสียรวมอันประกอบไปด้วยน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม, ทองแดง, นิกเกิลและสังกะสี ที่ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร โดยจากการวิเคราะห์น้ำเสียได้ผลดังนี้

ตาราง 28 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	โครเมียม	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี	น้ำเสียรวม
HeavyMetals (mg/l)	Cr = 2,865	Cu = 1,057	Ni = 168	Zn = 12.3	Cr = 760 Cu = 302 Ni = 46 Zn = 2.7
pH	1.46	1.96	5.62	7.22	1.88
Conductivity (mS/m)	32.0	8.41	1.6	1.5	20.6
Total solids (mg/l)	8,260	3,730	760	1,465	4,573

นำน้ำเสียดังกล่าวมาทำการตกตะกอนโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 9.5-10.5 ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 90 นาที แล้วจึงนำส่วนน้ำใสมาเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดัน 50,100 และ 200 kPa ได้ฟลักซ์ที่ความดันและเวลาต่าง ๆ ดังตาราง 29-33

จากตาราง 29-33 เห็นได้ว่าฟลักซ์แปรผันตามความดัน กล่าวคือที่ความดันต่ำฟลักซ์ต่ำ ความดันสูงฟลักซ์สูง ส่วนอัตราการลดลงของฟลักซ์เมื่อนำข้อมูลในตาราง 29-33 มาสร้างเป็น

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และเวลาดังภาพประกอบ 27 จะพบว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์แปรผันตามความดันด้วยเช่นกัน นั่นคือที่ความดันต่ำอัตราการลดลงของฟลักซ์ต่ำ ในขณะที่ความดันสูงอัตราการลดลงของฟลักซ์สูงตาม สังเกตได้ว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกของการกรองจะสูงที่ทุก ๆ ความดัน แต่เมื่อทำการกรองต่อไปอัตราการลดลงของฟลักซ์ลดน้อยลง

ตาราง 29 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	6,140	10,449	21,019	180	1,699	1,756	2,339
5	5,824	10,221	13,630	190	1,954	2,682	2,481
10	5,715	9,890	8,757	200	1,889	2,418	2,414
20	5,456	8,108	5,897	210	1,853	2,196	2,376
30	5,197	5,811	4,662	220	1,797	1,962	2,336
40	4,909	4,209	3,844	230	1,761	1,794	2,302
50	4,673	3,468	3,506	240	1,723	1,714	2,288
60	4,348	2,981	3,079	250	1,681	1,621	2,233
70	4,185	2,673	2,783	260	1,671	1,520	2,211
80	3,956	2,501	2,645	270	1,657	1,450	2,160
90	3,848	2,341	2,585	280	1,820	1,577	2,230
100	1,962	3,405	3,852	290	1,781	1,464	2,171
110	1,942	2,823	3,434	300	1,719	1,423	2,130
120	1,878	2,490	3,089	310	1,645	1,329	2,099
130	1,827	2,361	2,744	320	1,594	1,382	2,063
140	1,857	2,213	2,609	330	1,565	1,363	2,025
150	1,796	2,075	2,525	340	1,481	1,363	1,981
160	1,732	1,938	2,429	350	1,406	1,335	1,955
170	1,737	1,875	2,377	360	1,322	1,292	1,850

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm

ตาราง 30 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	5,047	11,526	20,448	180	772	2,409	3,560
5	4,959	10,899	15,805	190	857	2,321	3,350
10	4,524	9,229	11,913	200	851	2,224	3,337
20	3,994	7,126	11,275	210	844	2,173	3,188
30	3,455	5,861	8,861	220	837	2,136	3,097
40	3,043	5,398	7,307	230	826	2,090	3,035
50	2,775	4,605	7,165	240	820	2,044	2,965
60	2,486	4,259	6,499	250	818	2,014	2,924
70	2,359	3,879	5,863	260	815	2,007	2,818
80	2,287	3,568	5,674	270	804	1,971	2,718
90	2,190	3,476	5,359	280	829	1,923	2,624
100	904	3,099	5,000	290	813	1,899	2,599
110	867	2,945	4,575	300	811	1,896	2,555
120	851	2,798	4,369	310	910	1,875	2,474
130	843	2,700	4,163	320	807	1,863	2,433
140	826	2,661	4,088	330	804	1,841	2,387
150	814	2,587	3,866	340	803	1,822	2,363
160	789	2,577	3,796	350	800	1,817	2,326
170	779	2,484	3,701	360	801	1,805	2,281

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm

ตาราง 31 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	4,791	11,426	17,727	180	649	1,041	1,396
5	4,455	8,295	9,759	190	615	1,133	1,467
10	3,753	5,700	5,512	200	607	1,052	1,393
20	2,895	4,184	3,881	210	600	1,022	1,340
30	2,488	3,275	3;153	220	588	997	1,308
40	2,115	2,849	2,777	230	582	973	1,294
50	1,899	2,442	2,542	240	572	956	1,242
60	1,668	2,316	2,267	250	562	933	1,210
70	1,511	2,139	2,109	260	557	904	1,165
80	1,413	2,044	1,847	270	547	895	1,133
90	1,293	1,915	1,764	280	579	878	1,198
100	1,070	1,703	1,850	290	541	861	1,155
110	843	1,601	1,711	300	529	849	1,086
120	785	1,487	1,639	310	524	840	1,072
130	750	1,412	1,587	320	518	832	1,052
140	737	1,242	1,554	330	513	826	1,023
150	709	1,146	1,508	340	505	818	1,012
160	689	1,094	1,452	350	501	806	1,000
170	662	1,077	1,436	360	493	796	983

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm

ตาราง 32 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

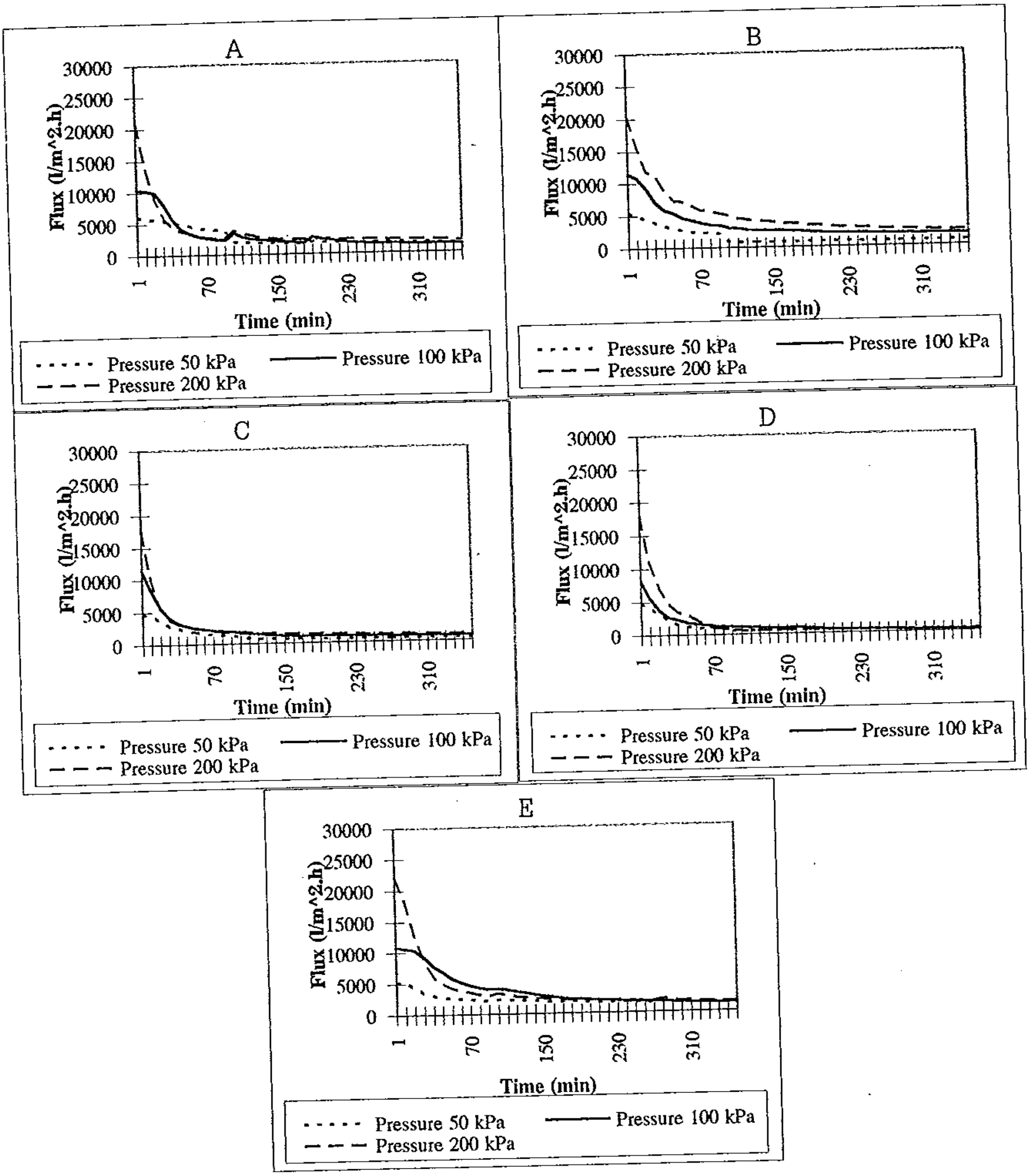
เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	4,907	8,201	18,221	180	485	864	568
5	4,210	5,619	10,854	190	578	671	524
10	3,286	3,801	7,050	200	514	595	508
20	2,253	2,648	4,742	210	492	548	503
30	1,613	2,337	3,559	220	483	535	496
40	1,299	1,843	3,111	230	472	522	492
50	1,146	1,668	2,341	240	458	501	479
60	1,050	1,528	1,455	250	449	487	468
70	999	1,354	1,097	260	433	471	457
80	893	1,261	890	270	426	440	445
90	827	1,216	676	280	514	361	422
100	629	1,135	625	290	469	346	387
110	587	1,048	609	300	444	337	376
120	567	1,010	590	310	423	327	355
130	550	956	588	320	416	318	348
140	538	921	583	330	408	305	340
150	534	894	578	340	403	297	330
160	511	881	574	350	398	288	323
170	499	870	572	360	392	277	315

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm

ตาราง 33 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	5,230	10,907	22,009	180	1,904	2,281	2,176
5	5,133	10,627	18,145	190	1,956	2,339	2,262
10	4,431	10,377	12,600	200	1,778	2,177	2,229
20	3,430	9,299	8,573	210	1,750	2,111	2,139
30	3,086	7,776	6,052	220	1,740	2,056	2,089
40	2,749	6,867	5,006	230	1,713	1,958	2,043
50	2,630	5,733	4,290	240	1,703	1,873	2,008
60	2,552	5,156	3,868	250	1,669	1,800	1,907
70	2,454	4,687	3,602	260	1,631	1,752	1,868
80	2,337	4,275	3,184	270	1,613	1,687	1,828
90	2,214	4,039	2,987	280	1,635	1,711	2,214
100	2,304	4,138	3,338	290	1,617	1,627	1,886
110	2,237	3,898	3,103	300	1,578	1,544	1,817
120	2,235	3,660	2,846	310	1,568	1,512	1,767
130	2,168	3,412	2,696	320	1,548	1,461	1,717
140	2,096	3,108	2,532	330	1,526	1,419	1,679
150	1,979	2,884	2,460	340	1,511	1,405	1,650
160	1,919	2,645	2,361	350	1,471	1,371	1,600
170	1,898	2,480	2,302	360	1,436	1,355	1,577

หมายเหตุ : cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm



ภาพประกอบ 27 อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชั่น (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่เวลาและความดันต่างๆ โดย

A = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม

B = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง

C = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล

D = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสี

E = อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวม

นำข้อมูลเกี่ยวกับฟลักซ์มาคำนวณการสูญเสียฟลักซ์ ได้ผลดังตาราง 34

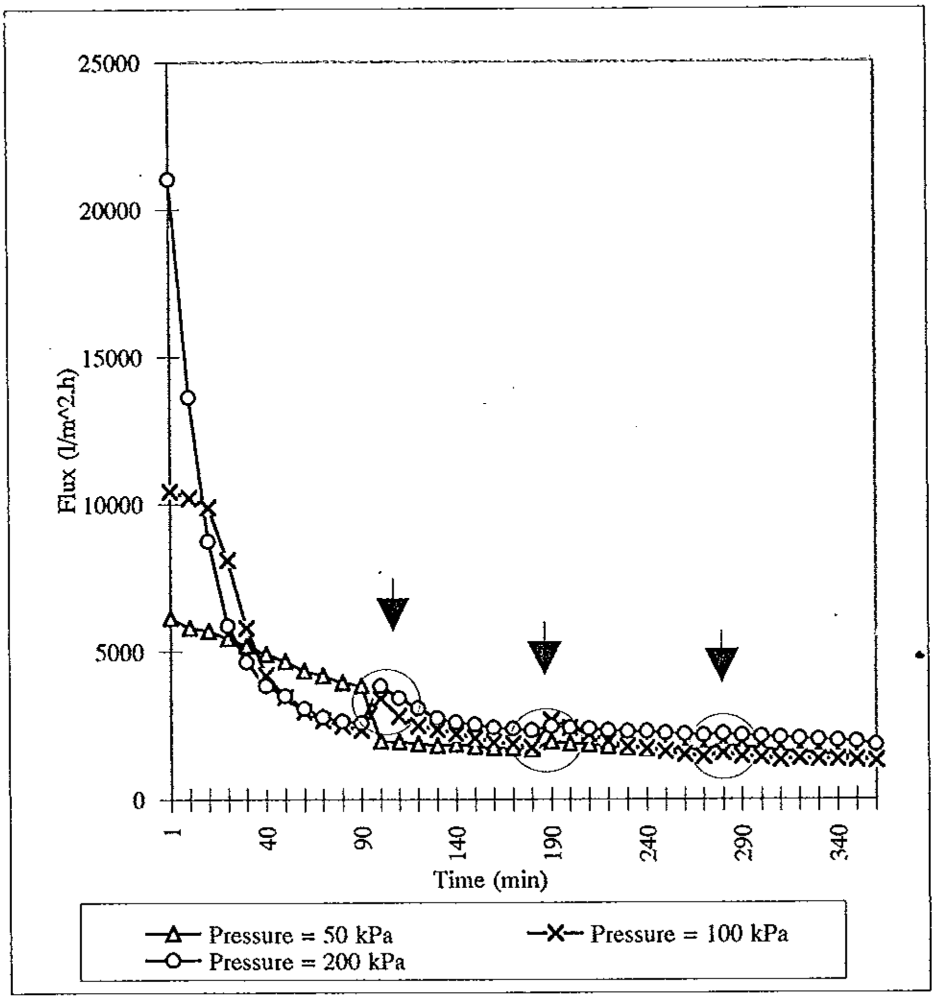
ตาราง 34 การสูญเสียฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ความดันต่างๆ

น้ำเสีย	การสูญเสียฟลักซ์ (%)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
โครเมียม	78.5	87.6	91.2
ทองแดง	84.1	84.3	89.3
นิกเกิล	89.7	93.0	94.5
สังกะสี	92.0	96.6	98.3
น้ำเสียรวม	72.5	87.6	92.8

จากตารางเห็นได้ว่าการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 50 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ต่ำสุด รองมาคือที่ความดัน 100 kPa และที่ความดัน 200 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์สูงสุด

4.2 การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง

ทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองหลังกรองน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าทุก 90 นาที โดยใส่น้ำกลั่นลงไปในเวสเซลที่ติดตั้งแผ่นเยื่อกรอง แล้วทำการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเทน้ำกลั่นออก กรองต่อไปอีก 90 นาที แล้วทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองทำเช่นนี้ 4 รอบ ใน 1 การทดลอง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์จากตาราง 29-33 พบว่าการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองมีผลต่อฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันดังแสดงในภาพประกอบ 28-32

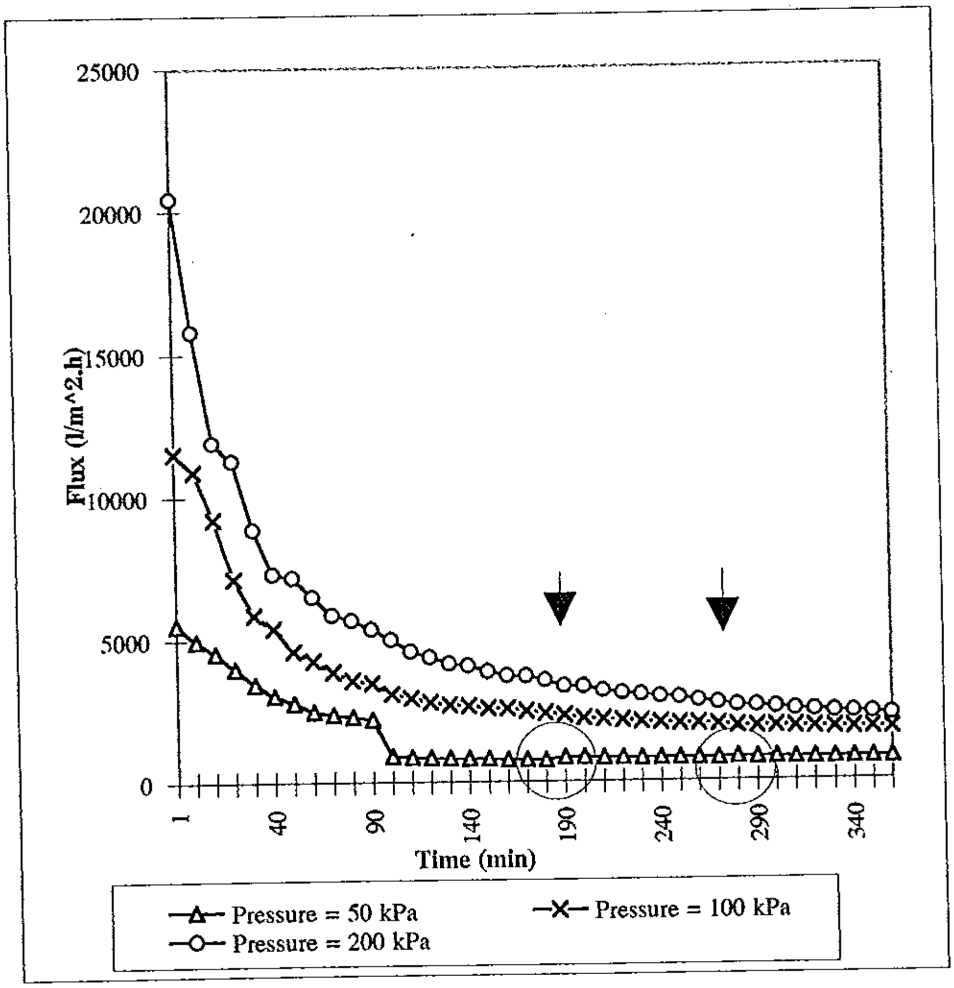


ภาพประกอบ 28 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

การกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมพบว่าที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,699 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 1,954 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,657 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่270 เป็น 1,820 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

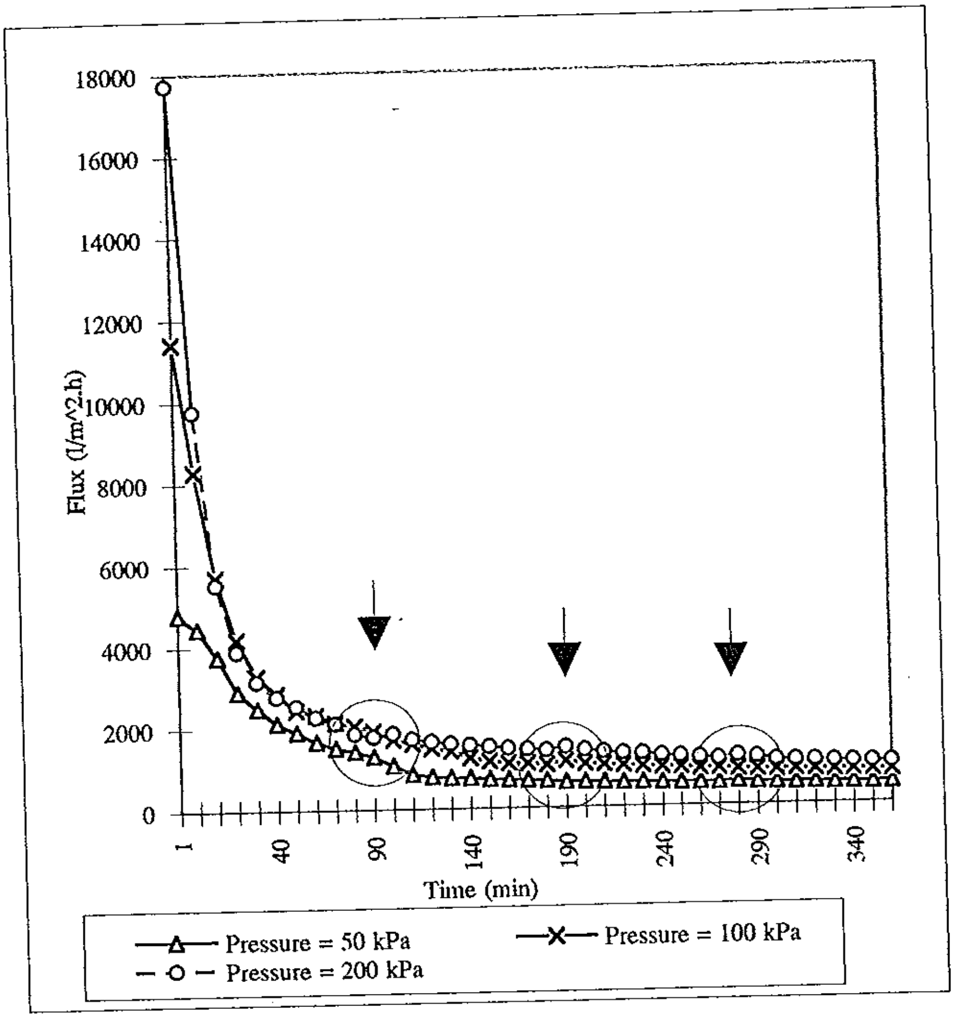
ที่ความดัน 100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2,341 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 3,405 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,756 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 2,682 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,450 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 1,577 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 200 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2,585 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 3,852 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2339 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 2,481 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2,160 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 270 เป็น 2,230 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280



ภาพประกอบ 29 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 02 μm)

การกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงพบว่าที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 772 ลิตร/ ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 857 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 804 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 270 เป็น 829 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 280

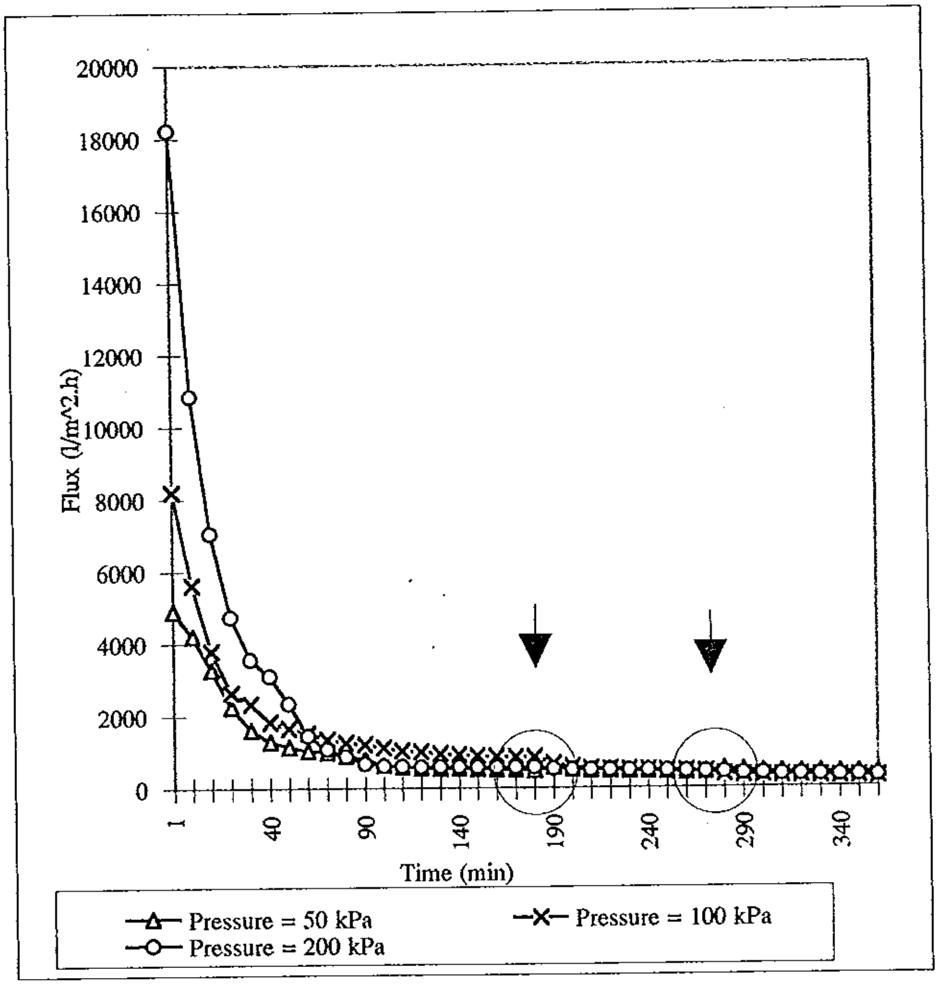


ภาพประกอบ 30 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 02 μm)

การกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลพบว่าที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 547 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 579 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

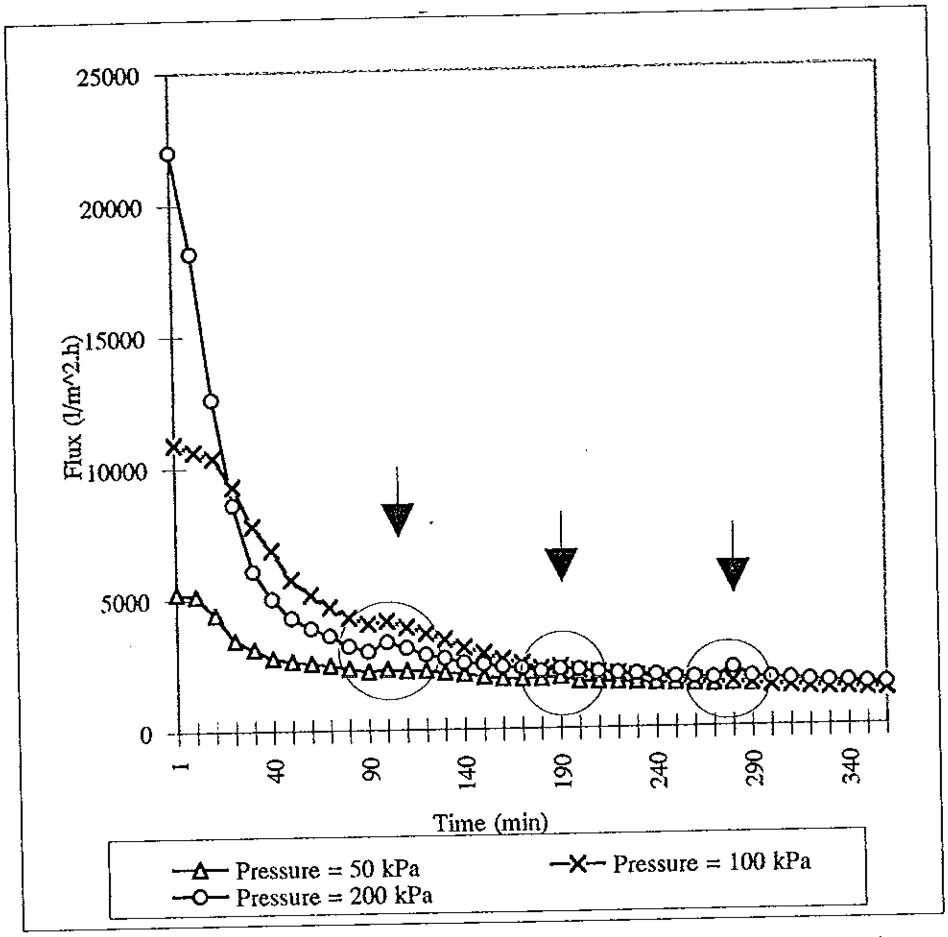
ที่ความดัน 100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,041 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 180 เป็น 1,133 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 190

ที่ความดัน 200 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,764 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 1,850 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,396 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 1,467 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,133 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 1,198 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280



ภาพประกอบ 31 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสี โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 02 μm)

การกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีพบว่า ที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 485 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 578 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 426 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 514 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280



ภาพประกอบ 32 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวม โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

การกรองน้ำเสียรวมพบว่า ที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2,214 ลิตร/ตารางเมตร. ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 2,304 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,904 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 1,956 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,613 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่270 เป็น 1,635 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 4,039 ลิตร/ตารางเมตร. ชั่วโมงในนาทีที่ 90 เป็น 4,138 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2,281 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 2,339 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,687 ลิตร/ตารางเมตร. ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 1,711 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 200 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2,987 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 3,338 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 2,176 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่180 เป็น 2,262 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 1,828 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 2,214 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าฟลักซ์หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกของการกรอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปฟลักซ์ลดน้อยลง สำหรับอัตราการกรองดังตาราง 36 พบว่าสูงในช่วงแรกของการกรอง ทุกๆความดันที่ได้ทำการทดลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการกรองลดน้อยลง ดังนั้นการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองไม่สามารถทำให้อัตราการกรองเพิ่มสูงขึ้นได้

ตาราง 35 อัตราการกรองของน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	อัตราการกรอง (ลิตร/ชั่วโมง)														
	โครเมียม			ทองแดง			นิกเกิล			สังกะสี			น้ำเสียรวม		
	50*	100*	200*	50*	100*	200*	50*	100*	200*	50*	100*	200*	50*	100*	200*
90	7.17	7.14	6.93	4.63	8.17	12.24	3.29	4.82	4.87	2.35	3.19	4.67	4.44	9.88	9.03
180	2.78	3.64	4.30	1.26	4.11	6.28	1.17	2.00	2.39	0.83	1.46	0.89	3.17	4.82	4.03
270	2.71	2.94	3.62	1.26	3.21	4.64	0.88	1.60	2.00	0.73	0.81	0.74	2.63	3.00	3.11
360	2.43	2.12	3.13	1.23	2.83	3.73	0.80	1.27	1.62	0.65	0.48	0.64	2.35	2.27	2.69

หมายเหตุ : * = ความดัน (kPa)

4.3 ความต้านทานของตัวถูกละลาย (solute resistance)

จากการทดลองภายหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยน้ำกลั่น โดยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่ทุก ๆ

90 นาที แล้วทำการกรองน้ำกลั่นที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 30 วินาที นำข้อมูลที่ได้มาหาฟลักซ์ของน้ำกลั่น เพื่อนำมาใช้คำนวณเหาความต้านทานของตัวถูกละลาย ได้ผลดังตาราง 36

ตาราง 36 ความต้านทานของตัวถูกละลายของการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

Solute Resistance (m^{-1}) / Time (min)	Cr			Cu			Ni			Zn			น้ำเสียรวม		
	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa	P=50 kPa	P=100 kPa	P=200 kPa
90	0.013	0.034	0.020	0.022	0.023	0.032	0.066	0.070	0.120	0.057	0.100	0.090	0.010	0.013	0.050
180	0.016	0.040	0.082	0.051	0.036	0.048	0.076	0.084	0.137	0.074	0.216	0.317	0.023	0.036	0.084
270	0.024	0.078	0.097	0.041	0.047	0.066	0.082	0.125	0.178	0.098	0.390	0.744	0.030	0.056	0.108
360	0.027	0.080	0.097	0.050	0.050	0.078	0.085	0.137	0.193	0.102	0.417	0.755	0.041	0.066	0.126

หมายเหตุ : P = ความดัน (kPa)

4.4 ปริมาณโลหะหนัก

ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน โดยนำน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้ามาทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ คือ 50,100 และ 200 kPa โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทุก ๆ 90 นาที มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่หลงเหลืออยู่ได้ผลดังตาราง 37-41

ตาราง 37 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	1.13		1.13		1.13	
90	0.39	65.49	0.64	43.36	0.99	12.39
180	0.38	66.37	0.77	31.86	0.94	16.81
270	0.39	65.49	0.91	19.47	0.99	12.39
360	0.40	64.60	0.85	24.78	0.99	12.39

ตาราง 38 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	1.20		1.20		1.20	
90	0.04	96.67	0.12	90.00	0.19	84.17
180	0.05	95.83	0.20	83.33	0.19	84.17
270	0.06	95.00	0.10	91.67	0.22	81.67
360	0.05	95.83	0.11	90.83	0.25	79.17

ตาราง 39 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	1.67		1.67		1.67	
90	0.53	68.26	0.61	63.47	1.00	40.12
180	0.52	68.86	0.62	62.87	0.99	40.71
270	0.53	68.26	0.61	63.47	1.00	40.12
360	0.53	68.26	0.62	62.87	0.94	43.71

ตาราง 40 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa		ความดัน 100 kPa		ความดัน 200 kPa	
	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)	ความเข้มข้น (มก./ล)	Rejection (%)
ก่อนกรอง	1.21		1.21		1.21	
90	0.80	33.88	0.88	27.27	1.03	14.88
180	0.79	34.71	0.89	26.45	1.01	16.53
270	0.79	34.71	0.87	28.10	1.02	15.70
360	0.79	34.71	0.90	25.62	1.03	14.88

ตาราง 41 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียรวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa								ความดัน 100 kPa								ความดัน 200 kPa							
	Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
ก่อนกรอง	3.64		0.69		0.87		0.10		3.64		0.69		0.87		0.10		3.64		0.69		0.87		0.10	
90	2.61	28.30	0.41	40.58	0.49	43.68	0.06	40.00	2.53	30.49	0.41	40.58	0.75	13.79	0.06	40.00	2.93	19.51	0.49	28.99	0.77	11.49	0.09	10.00
180	2.74	24.73	0.40	42.03	0.50	42.53	0.05	50.00	3.33	8.52	0.41	40.58	0.75	13.79	0.07	30.00	3.16	13.19	0.54	21.74	0.79	9.20	0.09	10.00
270	2.93	19.51	0.39	43.48	0.47	45.98	0.04	60.00	3.08	15.38	0.38	44.93	0.75	13.79	0.07	30.00	3.30	9.34	0.60	13.04	0.80	8.05	0.09	10.00
360	2.89	20.60	0.36	47.83	0.48	44.83	0.04	60.00	2.46	32.42	0.38	44.93	0.74	14.94	0.07	30.00	3.25	10.71	0.62	10.14	0.76	12.64	0.09	10.00

หมายเหตุ : A = ความเข้มข้น (มก./ล)

B = Rejection (%)

จากตาราง 37-41 จะเห็นได้ว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่วิเคราะห์ได้แปรผันตามความดัน เมื่อทำการเพิ่มความดันที่ใช้ในการทดลองปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) พบว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 12.39-66.37% โดยปริมาณโครเมียมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 50 kPa เท่ากับ 0.38-0.40 มก./ล ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง แต่ที่ความดัน 100 kPa สามารถกำจัดโครเมียมให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ใน 90 นาทีแรกเท่านั้น และที่ความดัน 200 kPa ปริมาณโลหะหนักสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคืออยู่ในช่วง 0.94-0.99 มก./ล

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง ภายหลังการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 1.20 มก./ล ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ปริมาณทองแดงลดลงอีกโดยสามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 79.17-96.67 % หรือ มีปริมาณทองแดงที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน เท่ากับ 0.04-0.25 มก./ล

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน มีปริมาณนิกเกิลต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยสามารถกำจัดนิกเกิลได้ 40.12-68.86 % หรือมีปริมาณนิกเกิล 0.52-1.00 มก./ล

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีภายหลังการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 1.21 มก./ล ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันปริมาณสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 14.88-34.71 % หรือมีปริมาณสังกะสี 0.79-1.03 มก./ล

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียรวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 8.52-32.42 % หรือมีปริมาณโครเมียม 2.46-3.30 มก./ล ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง สามารถกำจัดทองแดง นิกเกิล และสังกะสีต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง

โดยการตกตะกอนทางเคมี โดยมีปริมาณทองแดงหลังการตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 0.69 มก./ล ปริมาณนิกเกิลหลังการตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 0.87 มก./ล ปริมาณสังกะสีหลังการตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 0.10 มก./ล เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ปริมาณทองแดง นิกเกิล และสังกะสีลดลงอีกโดยสามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 10.14-47.83% หรือมีปริมาณทองแดง 0.36-0.62 มก./ล กำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 8.05-45.98 % หรือมีปริมาณนิกเกิล 0.47-0.80 มก./ล กำจัดสังกะสีได้ในช่วง 10.00-60.00 % หรือมีปริมาณสังกะสี 0.04-0.09 มก./ล

4.5 pH, สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมด

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน โดยนำน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้ามาทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่ความดันต่างๆ คือ 50,100 และ 200 kPa โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทุกๆ 90 นาที มาทำการวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดได้ผลดังตาราง 42

จากตาราง 42 พบว่า pH ของน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าทุกชนิดสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ซึ่งกำหนดไว้ที่ 5.5-9.0 นอกจากนั้นยังพบว่า pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดของน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ของโลหะหนักทุกชนิด และทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง หลังกรองลดลงเล็กน้อย

ตาราง 42 การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	โครเมียม									ทองแดง									นิกเกิล								
	P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa			P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa			P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ก่อนกรอง	9.38	29.8	3,118	9.38	29.8	3,118	9.38	29.8	3,118	9.34	5.9	452	9.35	5.9	452	9.34	5.9	452	9.47	0.52	39	9.47	0.52	39	9.47	0.52	39
90	9.35	29.4	2,966	9.35	29.4	3,033	9.34	29.4	2,927	9.24	5.8	433	9.23	5.8	433	9.23	5.8	433	9.44	0.51	36	9.44	0.51	36	9.46	0.52	37
180	9.34	29.3	2,964	9.32	29.4	3,019	9.35	29.5	2,966	9.24	5.8	429	9.24	5.8	432	9.24	5.8	432	9.45	0.51	36	9.44	0.51	36	9.44	0.52	36
270	9.35	29.4	2,957	9.34	29.3	2,997	9.34	29.4	2,953	9.24	5.8	433	9.23	5.8	433	9.23	5.8	431	9.44	0.51	36	9.45	0.51	36	9.45	0.51	36
360	9.34	29.4	2,925	9.33	29.4	3,013	9.34	29.3	2,943	9.24	5.8	433	9.24	5.8	433	9.23	5.8	432	9.43	0.51	36	9.44	0.51	36	9.45	0.51	37

ตาราง 42 (ต่อ)

เวลา (นาที)	สังกะสี									น้ำเสียรวม								
	P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa			P=50 kPa			P=100 kPa			P=200 kPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ก่อนทดลอง	9.20	1.05	1,342	9.20	1.05	1,342	9.20	1.05	1,342	9.59	18.4	1,648	9.59	18.4	1,648	9.59	18.4	1,648
90	9.16	1.00	1,324	9.17	1.01	1,326	9.17	1.02	1,334	9.47	18.3	1,603	9.49	18.3	1,562	9.49	18.3	1,618
180	9.15	1.02	1,321	9.16	1.01	1,328	9.17	1.03	1,331	9.49	18.3	1,601	9.48	18.3	1,603	9.49	18.3	1,619
270	9.15	1.00	1,327	9.17	1.03	1,329	9.15	1.02	1,334	9.48	18.3	1,596	9.49	18.3	1,695	9.49	18.3	1,612
360	9.15	1.01	1,328	9.15	1.02	1,330	9.14	1.03	1,330	9.49	18.3	1,585	9.48	18.3	1,584	9.49	18.3	1,613

หมายเหตุ : P = ความดัน (kPa)

A = pH

B = สภาพนำไฟฟ้า (mS/m)

C = ของแข็งทั้งหมด (mg/l)

5. ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) กับน้ำเสียสังเคราะห์รวม ด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

5.1 ฟลักซ์ (Flux)

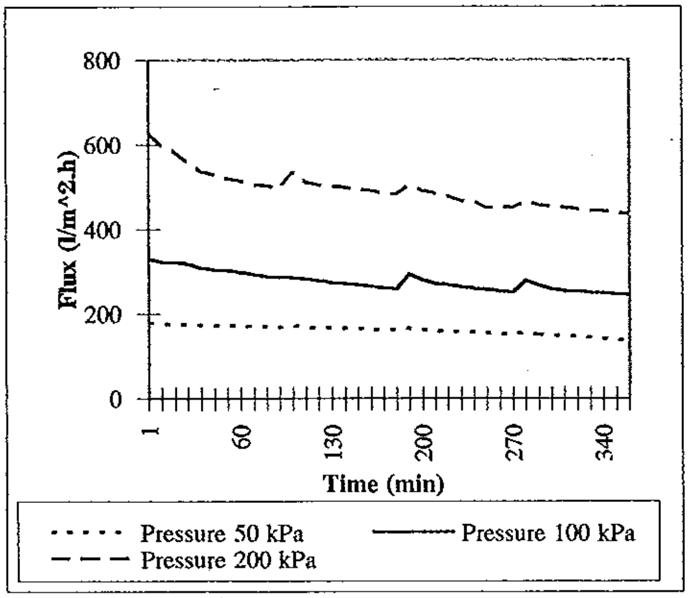
ทำการเตรียมน้ำเสียรวม อันประกอบไปด้วยโครเมียม ที่มีความเข้มข้น 2,500 มก./ล ทองแดง ที่มีความเข้มข้น 1,000 มก./ล นิกเกิลที่มีความเข้มข้น 100 มก./ล และสังกะสีที่มีความเข้มข้น 10 มก./ล ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร หลังจากนั้นนำไปตกตะกอนทางเคมี โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 9.5-10.5 ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 90 นาที แล้วจึงนำส่วนน้ำใส มาเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่ความดัน 50,100 และ 200 kPa ได้ฟลักซ์ที่ความดัน และเวลาต่าง ๆ ดังตาราง 43

ซึ่งจากตารางพบว่าฟลักซ์แปรผันตามความดัน กล่าวคือที่ความดันต่ำฟลักซ์ต่ำ เมื่อความดันสูงขึ้นฟลักซ์เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนอัตราการลดลงของฟลักซ์ดังภาพประกอบ 33 พบว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์แปรผันตามความดันด้วยเช่นกัน สังเกตได้ว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกของการทดลองจะสูงที่ทุก ๆ ความดัน แต่เมื่อทำการกรองต่อไป อัตราการลดลงของฟลักซ์ลดน้อยลง

ตาราง 43 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	180	330	629	180	162	258	482
5	177	324	600	190	165	293	502
10	176	322	582	200	163	280	491
20	175	319	558	210	160	271	485
30	174	309	537	220	158	268	477
40	173	305	529	230	157	263	468
50	172	303	520	240	156	260	465
60	172	298	515	250	155	257	451
70	171	293	507	260	154	253	455
80	170	289	503	270	153	251	451
90	169	287	498	280	155	278	463
100	172	286	534	290	152	267	457
110	170	282	512	300	150	258	453
120	168	279	505	310	148	255	451
130	167	274	502	320	147	253	449
140	166	271	499	330	145	251	445
150	165	268	495	340	142	249	443
160	164	265	491	350	140	247	440
170	163	261	485	360	138	246	436

หมายเหตุ : Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa

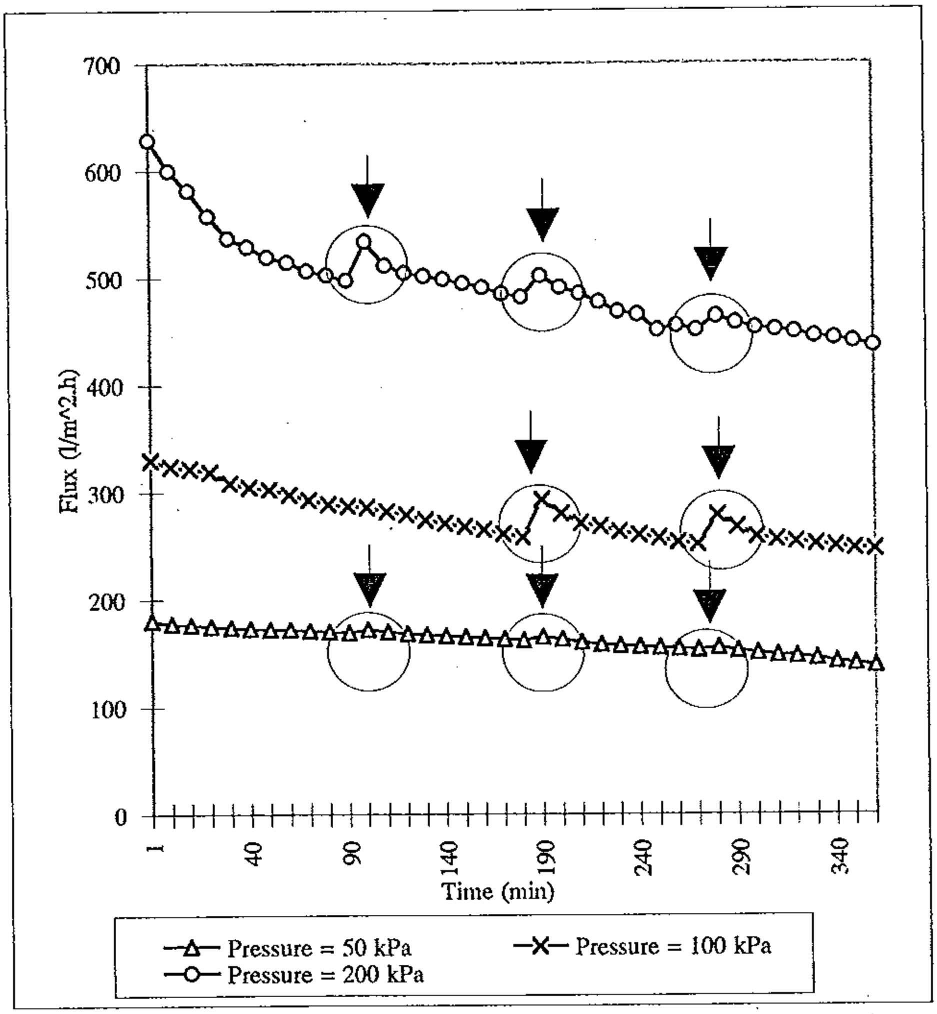


ภาพประกอบ 33 อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่เวลาและความดันต่างๆ

นำข้อมูลเกี่ยวกับฟลักซ์มาคำนวณหาเปอร์เซนต์การสูญเสียฟลักซ์ พบว่าที่ความดัน 50 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ 22.9 % ที่ความดัน 100 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ 25.5 % ที่ความดัน 200 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ 30.8 % ซึ่งพบว่าการทดลองที่ความดัน 50 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ต่ำสุด รองลงมาคือการทดลองที่ความดัน 100 kPa และ 200 kPa ตามลำดับ

5.2 การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง

ทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองหลังทำการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมทุก 90 นาทีโดยใส่น้ำกลั่นลงไปในเวสเซลที่ติดตั้งแผ่นเยื่อกรองแล้วทำการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเทน้ำกลั่นออก กรองต่อไปอีก 90 นาที แล้วล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง ทำเช่นนี้ 4 รอบใน 1 การทดลอง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ จากตาราง 43 พบว่าการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองมีผลต่อฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ดังภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวม ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่เวลาและความดันต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 169 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 90 เป็น 172 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 162 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 180 เป็น 165 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 153 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 270 เป็น 155 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 258 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 293 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง นาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 251 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่270 เป็น 278 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 200 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 498 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 90 ปืน 534 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 482 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 502 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 451 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 270 เป็น 463 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 280

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าฟลักซ์หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกของการกรอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปฟลักซ์ลดน้อยลง สำหรับอัตราการกรองดังตาราง 44 พบว่าสูงในช่วงแรกของการกรอง ทุกๆความดันที่ได้ทำการทดลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการกรองลดน้อยลง ดังนั้นการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองไม่สามารถทำให้อัตราการกรองเพิ่มสูงขึ้นได้ และเมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลาเดียวกันพบว่าอัตราการกรองแปรผันตามความดัน

ตาราง 44 อัตราการกรองของน้ำเสียสังเคราะห์รวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
90	0.26	0.46	0.81
180	0.25	0.41	0.76
270	0.24	0.41	0.72
360	0.22	0.39	0.68

5.3 ความต้านทานของตัวถูกละลาย (solute resistance)

จากการทดลองภายหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยน้ำกลั่น โดยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีที่ทุกๆ 90 นาที แล้วทำการกรองน้ำกลั่นที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 30 วินาที นำข้อมูลที่ได้มาหาฟลักซ์ของน้ำกลั่น เพื่อนำฟลักซ์ของน้ำกลั่นมาใช้คำนวณหาความต้านทานของตัวถูกละลาย ได้ผลดังตาราง 45 ซึ่งพบว่าความต้านทานของตัวถูกละลายต่ำสุดในช่วงแรกของการกรอง เมื่อทำการกรองต่อไป ความต้านทานของตัวถูกละลายเพิ่มสูงขึ้น

ตาราง 45 ความต้านทานของตัวถูกละลายของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

Solute Resistance (m^{-1}) / Time (min)	น้ำเสียสังเคราะห์รวม		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
90	0.135	0.178	0.169
180	0.275	0.225	0.295
270	0.304	0.209	0.300
360	0.314	0.231	0.304

5.4 ปริมาณโลหะหนัก

ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์รวม เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน โดยเมื่อทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ แล้วนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1ต่อ1 โดยปริมาตร หลังจากนั้นจึงนำไปบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดันต่าง ๆ คือ 50, 100 และ 200 kPa โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ทุก ๆ 90 นาทีมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่หลงเหลืออยู่ได้ผลดังตาราง 46

ตาราง 46 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์รวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa								ความดัน 100 kPa								ความดัน 200 kPa							
	Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
ก่อนกรอง	0.99		2.29		5.19		0.98		0.99		2.29		5.19		0.98		0.99		2.29		5.19		0.98	
90	0.47	52.53	<0.03	>98.69	0.11	97.88	<0.01	>98.98	0.52	47.47	0.03	98.69	0.12	97.69	<0.01	>98.98	0.52	47.47	0.03	98.69	0.15	97.11	<0.01	>98.98
180	0.45	54.55	<0.03	>98.69	0.11	97.88	<0.01	>98.98	0.51	48.48	0.03	98.69	0.14	97.30	<0.01	>98.98	0.48	51.52	<0.03	>98.69	0.16	96.92	<0.01	>98.98
270	0.49	50.51	<0.03	>98.69	0.11	97.88	<0.01	>98.98	0.52	47.47	0.03	98.69	0.13	97.50	<0.01	>98.98	0.50	49.49	0.03	98.69	0.16	96.92	<0.01	>98.98
360	0.48	51.52	<0.03	>98.69	0.11	97.88	<0.01	>98.98	0.43	56.57	0.03	98.69	0.12	97.69	<0.01	>98.98	0.55	44.44	0.03	98.69	0.17	96.72	<0.01	>98.98

หมายเหตุ : A = ความเข้มข้น (มก./ล)

B = Rejection (%)

จากตาราง 46 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความดันที่ใช้ในการทดลองปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามความดัน นั่นคือ ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะสังเคราะห์ เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน แปรผันตามความดัน

จากการทดลองพบว่าปริมาณโครเมียม ทองแดง และนิกเกิล ในน้ำเสียสังเคราะห์รวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งในทุกความดัน และทุกช่วงเวลา โดย สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 44.44-56.57% หรือมีปริมาณโครเมียม 0.43-0.55 มก./ล สามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 98.69% หรือมีปริมาณทองแดงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.03 มก./ล สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 96.72-97.88 % หรือมีปริมาณนิกเกิล 0.11-0.17 มก./ล

ส่วนสังกะสีสามารถกำจัดให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งมีปริมาณสังกะสีหลังการตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 0.98 มก./ล เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ปริมาณสังกะสีลดลงอีกโดยสามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วงมากกว่า 98.98% หรือมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 0.01 มก./ล

5.5 pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH, สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์รวม เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน โดยเมื่อทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ความเข้มข้นความต้องการแล้วนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1ต่อ1 โดยปริมาตร หลังจากนั้นจึงนำไปบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่ความดันต่าง ๆ คือ 50,100 และ 200 kPa โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทุก ๆ 90 นาที มาทำการวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ได้ผลดังตาราง 47

ตาราง 47 การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ในน้ำเสียสังเคราะห์รวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	น้ำเสียสังเคราะห์รวม								
	ความดัน 50 kPa			ความดัน 100 kPa			ความดัน 200 kPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ก่อนกรอง	9.40	12.2	1,137	9.40	12.2	1,137	9.40	12.2	1,137
90	9.35	12.1	1,061	9.38	12.1	1,063	9.37	12.1	1,063
180	9.34	12.1	1,057	9.36	12.1	1,064	9.37	12.2	1,064
270	9.34	12.1	1,054	9.36	12.2	1,064	9.36	12.1	1,064
360	9.33	12.1	1,059	9.35	12.2	1,062	9.37	12.2	1,063

หมายเหตุ : A = pH

B = สภาพนำไฟฟ้า (mS/m)

C = ของแข็งทั้งหมด (mg/l)

จากตาราง 47 พบว่า pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์รวมที่ทุกความดัน หลังกรองลดลงเล็กน้อย

6. ผลการทดลองระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) กับน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

6.1 ฟลักซ์ (Flux)

ทำการเก็บน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นน้ำล้างหลังการชุบเคลือบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี นำมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร แล้วทำการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 9.5-10.5 ปล่อยทิ้งให้ตะกอนเป็นเวลา 90 นาที

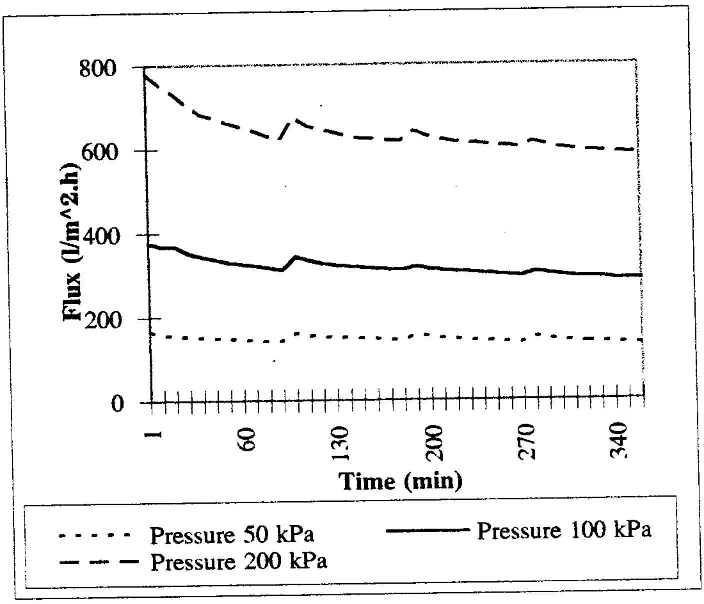
แล้วจึงนำส่วนน้ำใส มาเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่ความดัน 50,100 และ 200 kPa ได้ฟลักซ์ที่เวลาและความดันต่าง ๆ ดังตาราง 48

ตาราง 48 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่เวลาและความดันต่างๆ

เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)			เวลา(นาที)	ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa		ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
1	166	377	781	180	144	310	617
5	158	368	753	190	156	318	641
10	156	368	732	200	152	311	628
20	153	352	706	210	148	309	621
30	151	344	683	220	146	307	616
40	149	337	675	230	144	305	613
50	149	330	663	240	143	303	610
60	146	325	653	250	141	300	607
70	145	322	644	260	139	298	606
80	143	317	631	270	137	295	601
90	142	312	622	280	151	305	616
100	161	344	674	290	146	301	608
110	155	333	654	300	143	298	600
120	153	327	648	310	141	294	597
130	151	322	638	320	139	293	594
140	150	319	629	330	138	292	592
150	148	317	625	340	136	289	589
160	147	314	622	350	135	288	587
170	145	311	619	360	133	287	585

หมายเหตุ : Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa

จากตาราง 48 พบว่าฟลักซ์แปรผันตามความดัน กล่าวคือที่ความดันต่ำ ฟลักซ์ต่ำ ความดันสูง ฟลักซ์สูง ดังแสดงในตาราง 49 ส่วนอัตราการลดลงของฟลักซ์แสดงไว้ในภาพประกอบ 35



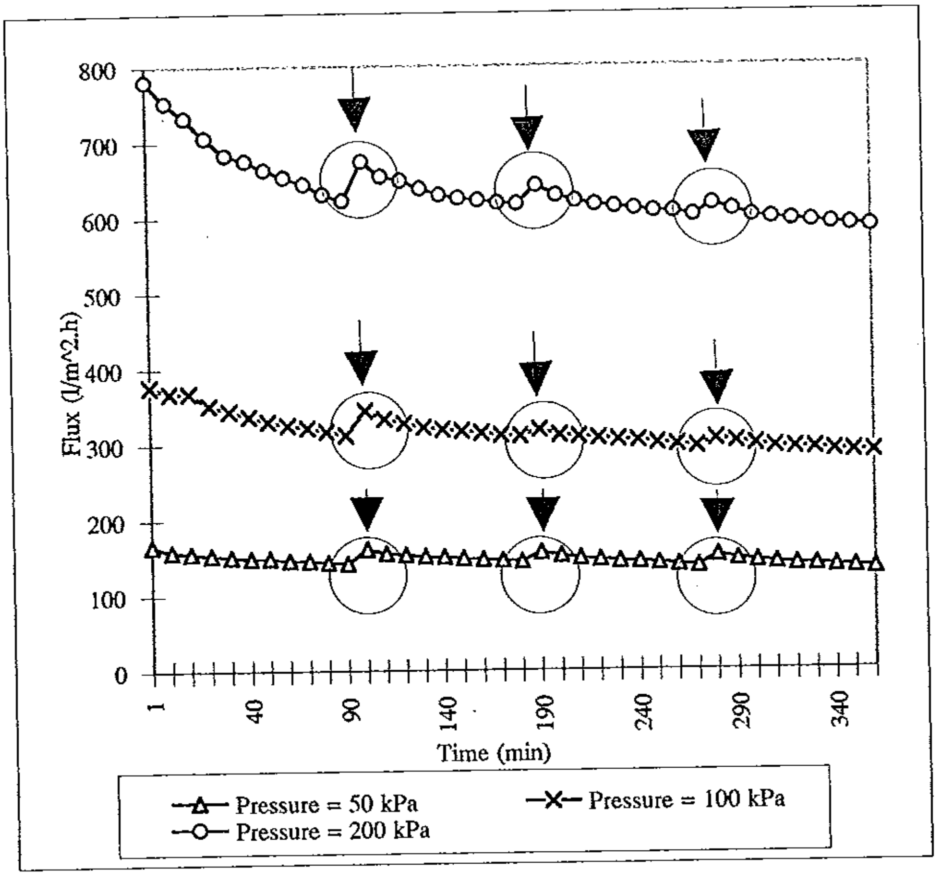
ภาพประกอบ 35 อัตราการลดลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

จากภาพประกอบ 35 พบว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์แปรผันตามความดันด้วยเช่นกัน นั่นคือที่ความดันต่ำอัตราการลดลงของฟลักซ์ต่ำ ในขณะที่ความดันสูงอัตราการลดลงของฟลักซ์ก็จะสูงตามสังเกตได้ว่าอัตราการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกของการทดลองจะสูงที่ทุก ๆ ความดัน แต่เมื่อทำการกรองต่อไป อัตราการลดลงของฟลักซ์ลดน้อยลง

นำข้อมูลเกี่ยวกับฟลักซ์มาคำนวณหาเปอร์เซนต์การสูญเสียฟลักซ์ พบว่าที่ความดัน 50 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ 19.9% ที่ความดัน 100 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ 23.9 % ที่ความดัน 200 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ 25.0% ซึ่งพบว่าการทดลองที่ความดัน 50 kPa มีการสูญเสียฟลักซ์ต่ำสุด รองลงมาคือการทดลองที่ความดัน 100 kPa และ 200 kPa ตามลำดับ

6.2 การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง

ทำการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองหลังทำการกรองน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ทุก 90 นาที โดยใส่น้ำกลั่นลงไปในเวสเซลที่ติดตั้งแผ่นเยื่อกรองแล้วทำการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็ว 400 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเทน้ำกลั่นออก กรองต่อไปอีก 90 นาที แล้วล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง ทำเช่นนี้ 4 รอบ ใน 1 การทดลอง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ จากตาราง 49 พบว่าการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง มีผลต่อฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันดังภาพประกอบ36



ภาพประกอบ 36 ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียรวมด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่เวลาและความดันต่างๆ

การกรองน้ำเสียรวมที่ความดัน 50 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 142 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 90 เป็น 161 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 144 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 180 เป็น 156 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 137 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 270 เป็น 151 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 100 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 312 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 90 เป็น 344 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 310 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 180 เป็น 318 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 295 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 270 เป็น 305 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 280

ที่ความดัน 200 kPa ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 622 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 90 เป็น 674 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 100 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 617 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 180 เป็น 641 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 190 ฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 601 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 270 เป็น 616 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมงในนาทีที่ 280

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าฟลักซ์หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกของการกรอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปฟลักซ์ลดน้อยลง สำหรับอัตราการกรองดังตาราง 49 พบว่าสูงในช่วงแรกของการกรอง ทุกๆความดันที่ได้ทำการทดลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการกรองลดน้อยลง ดังนั้นการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองไม่สามารถทำให้อัตราการกรองเพิ่มสูงขึ้นได้ และเมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลาเดียวกันพบว่าอัตราการกรองแปรผันตามความดัน

6.3 ความต้านทานของตัวถูกละลาย (solute resistance)

จากการทดลองภายหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยน้ำกลั่น โดยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีที่ทุก ๆ 90 นาที แล้วทำการกรองน้ำกลั่นที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 30 วินาที นำข้อมูลที่ได้มาหาฟลักซ์ของน้ำกลั่น เพื่อนำฟลักซ์ของน้ำกลั่นมาใช้คำนวณหาความต้านทานของตัวถูกละลายได้ผลดังตาราง 50

ตาราง 49 อัตราการกรอง (ลิตร/ชั่วโมง) ของน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
90	0.23	0.51	1.02
180	0.23	0.49	0.97
270	0.22	0.46	0.94
360	0.21	0.45	0.91

ตาราง 50 ความต้านทานของตัวถูกละลาย ของการกรองน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลา และความดันต่างๆ

Solute Resistance (m^{-1}) / Time (min)	น้ำเสียรวม		
	ความดัน 50 kPa	ความดัน 100 kPa	ความดัน 200 kPa
90	0.017	0.005	0.036
180	0.133	0.028	0.045
270	0.164	0.122	0.079
360	0.193	0.197	0.115

6.4 ปริมาณโลหะหนัก

ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน โดยนำน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าประกอบไปด้วยโครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี มาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตรมาทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่ความดันต่าง ๆ คือ 50, 100 และ 200 kPa โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทุก ๆ 90 นาที มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่หลงเหลืออยู่ได้ผลดังตาราง 51

จากตาราง 51 พบว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่วิเคราะห์ได้ แปรผันตามความดัน นั่นคือเมื่อทำการเพิ่มความดันที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) พบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำเสียรวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 17.00-36.25 % หรือมีปริมาณโครเมียม 2.55-3.32 มก./ล สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง สามารถกำจัดทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี โดยปริมาณทองแดงหลังตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 0.71 มก./ล นิกเกิลหลังตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 0.79 มก./ล และสังกะสีหลังตกตะกอนทางเคมีเท่ากับ 0.06 มก./ล เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดทองแดง นิกเกิลและสังกะสีได้อีกเล็กน้อยคือสามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 2.82-16.90 % หรือมีทองแดงปริมาณ 0.58-0.69 มก./ล สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 21.52-32.91 % หรือมีนิกเกิลปริมาณ 0.53-0.62 มก./ล และสามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 33.33 - มากกว่า 83.33 % หรือมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 0.01 มก./ล - 0.04 มก./ล

ตาราง 51 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียรวม จากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ประเภทอัลตราฟิลเตรชั่น (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa								ความดัน 100 kPa								ความดัน 200 kPa							
	Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn		Cr		Cu		Ni		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
ก่อนกรอง	4.00		0.71		0.79		0.06		4.00		0.71		0.79		0.06		4.00		0.71		0.79		0.06	
90	2.66	33.50	0.60	15.49	0.54	31.65	<0.01	>83.33	2.99	25.25	0.59	16.90	0.53	32.91	0.03	50.00	3.19	20.25	0.69	2.82	0.61	22.78	0.04	33.33
180	2.89	27.75	0.58	16.90	0.53	32.91	<0.01	>83.33	2.83	29.25	0.58	18.31	0.53	32.91	0.02	66.67	3.25	18.75	0.69	2.82	0.59	25.32	0.02	66.67
270	2.91	27.25	0.60	15.49	0.55	30.38	<0.01	>83.33	2.78	30.50	0.61	14.08	0.53	32.91	<0.01	>83.33	3.23	19.25	0.69	2.82	0.62	21.52	0.02	33.67
360	2.72	32.00	0.59	16.90	0.54	31.65	<0.01	>83.33	2.55	36.25	0.59	16.90	0.53	32.91	0.02	66.67	3.32	17.00	0.68	4.23	0.60	24.05	0.03	50.00

หมายเหตุ : A = ความเข้มข้น (มก./ล)

B = Rejection (%)

6.5 pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด

ศึกษาการเปลี่ยนแปลง pH, สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน โดยเมื่อทำการเก็บน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี มาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตรแล้วนำมาบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี นำเฉพาะส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันที่ความดันต่าง ๆ คือ 50, 100 และ200 kPa ทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทุก ๆ 90 นาที มาทำการวิเคราะห์หา pH, สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมด ได้ผลดังตาราง 52

ตาราง 52 การเปลี่ยนแปลงของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ที่ช่วงเวลาและความดันต่างๆ

เวลา (นาที)	น้ำเสียรวม								
	ความดัน 50 kPa			ความดัน 100 kPa			ความดัน 200 kPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ก่อนกรอง	9.59	17.8	1,645	9.59	17.8	1,645	9.59	17.8	1,645
90	9.44	16.8	1,445	9.43	16.8	1,439	9.43	16.8	1,445
180	9.44	16.8	1,437	9.42	16.8	1,438	9.44	16.8	1,444
270	9.45	16.8	1,441	9.43	16.8	1,439	9.44	16.9	1,447
360	9.44	16.8	1,442	9.43	16.8	1,445	9.44	16.8	1,447

หมายเหตุ : A = pH

B = สภาพนำไฟฟ้า (mS/m)

C = ของแข็งทั้งหมด (mg/l)

จากตาราง 52 พบว่าค่าของ pH, สภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมดของน้ำเสียรวมจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าหลังกรองลดลงเล็กน้อย

บทที่ 4

บทวิจารณ์

1. การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า

จากการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าพบว่า เป็นโรงงานที่ให้บริการชุบเคลือบส่วนประกอบรถยนต์ เช่น ล้อแมกซ์ มีกำลังการผลิต 1,000 ชิ้นงานต่อเดือน เนื่องจากช่วงเวลาที่ได้ทำการศึกษา โรงงานเพิ่งเปิดดำเนินการชุบเคลือบโลหะได้ประมาณ 3 เดือน ประกอบกับประสบปัญหาสภาวะเศรษฐกิจโดยรวม ทำให้มีผู้ใช้บริการจัดส่งชิ้นงานมาทำการชุบเคลือบไม่มาก จึงส่งผลให้การดำเนินงานไม่เต็มกำลังการผลิต ดังนั้นในช่วงที่ศึกษา ปริมาณน้ำเสียในแต่ละเดือนมีน้อย อีกทั้งกระบวนการดำเนินงานของโรงงานใช้วิธีกักน้ำไว้ในถัง แล้วนำชิ้นงานหลังการชุบเคลือบลงล้างในถังนั้นโดยแยกถังน้ำล้างหลังการชุบเคลือบโลหะแต่ละชนิดออกจากกัน ทำให้ไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของชิ้นงานและยังเป็นการใช้น้ำอย่างประหยัด คุ้มค่า ง่ายต่อการควบคุมและบำบัดน้ำเสีย มากกว่าการล้างชิ้นงานโดยวิธีเปิดน้ำล้นตลอดเวลา

การบำบัดน้ำเสียของโรงงานที่ได้ทำการศึกษา ในส่วนน้ำล้างหลังแช่กรดและด่างจะนำมาผสมรวมกันเพื่อปรับ pH ก่อนปล่อยทิ้ง ในขณะที่น้ำล้างหลังกระบวนการชุบเคลือบโลหะ ใช้วิธีบำบัดโดยการตกตะกอนทางเคมี ทิ้งให้ตกตะกอนในถังพัก แล้วทำการปล่อยทิ้งส่วนน้ำใสลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะ และการตรวจสอบน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดของโรงงานนั้นเป็นเพียงการตรวจสอบอย่างง่าย โดยมีการตรวจสอบ pH สังเกตจากลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่า เช่นสี และความขุ่น ก่อนทำการปล่อยทิ้งเท่านั้น ซึ่งยังไม่เพียงพอที่จะบอกได้ว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งหรือไม่ ซึ่งหากน้ำเสียที่ถูกปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมมีปริมาณโลหะหนักปนอยู่มากจะเป็นอันตรายอย่างยิ่ง

สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียซึ่งเป็นน้ำล้างหลังการชุบเคลือบโลหะ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนทำการปล่อยทิ้ง 3 ครั้ง มาทำการวิเคราะห์และหาค่าเฉลี่ยพบว่ามีปริมาณโครเมียมอยู่ในช่วง1,612-2,616 มก./ล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,136 มก./ล มีปริมาณทองแดงอยู่ในช่วง 964-1,090 มก./ล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,020 มก./ล มีปริมาณนิกเกิลอยู่ในช่วง 81.4-113.9 มก./ล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 96.1 มก./ล และมีปริมาณสังกะสีอยู่ในช่วง 7.4-10.6 มก./ล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.7 มก./ล เห็นได้ว่ามีปริมาณโครเมียม ทองแดง และนิกเกิลปนอยู่ในปริมาณสูง ในขณะที่มีสังกะสีปนอยู่ในปริมาณค่อนข้างต่ำ

pH ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเป็นกรด ยกเว้นในน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีซึ่งมีสภาพเป็นกลาง โดยที่น้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม pH อยู่ในช่วง 1.54-1.84 น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง pH อยู่ในช่วง 1.46-2.15 น้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล pH อยู่ในช่วง 5.12-5.32 น้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสี pH อยู่ในช่วง 7.50-7.70 สภาพนำไฟฟ้าในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมอยู่ในช่วง 28.00-32.00 mS/m น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงอยู่ในช่วง 7.73-8.52 mS/m น้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลอยู่ในช่วง 1.05-1.25 mS/m น้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีอยู่ในช่วง 0.90-1.25 mS/m

ความขุ่นไม่มากนัก ลักษณะน้ำเสียเป็นน้ำใสมีสี โดยที่น้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม ความขุ่นอยู่ในช่วง 1.47-1.77 NTU มีสีเหลืองอมส้ม น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง ความขุ่นอยู่ในช่วง 0.68-0.87 NTU มีสีฟ้า น้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล ความขุ่นอยู่ในช่วง 0.59-0.78 NTU มีสีเขียวอ่อน น้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสี ความขุ่นอยู่ในช่วง 2.06-2.33 NTU ไม่มีสี

การวิเคราะห์หาของแข็งในน้ำเสียพบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งละลายน้ำโดยน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมมีของแข็งในรูปของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 5,621-6,575 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 9-15 มก./ล น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงมีของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 2,967-

4,115 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 3-5 มก./ล น้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลมีของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 428-676 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 2-4 มก./ล น้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีมีของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 1,267-1,455 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 3-5 มก./ล

พบว่าสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tay (1986) ซึ่งอ้างถึงโดย สาโรชบุญยกิจสมบัติ (2535) ที่กล่าวไว้ว่าปริมาณและลักษณะน้ำเสียมีการแปรเปลี่ยนเป็นอย่างมากขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และวิธีการชุบเคลือบโลหะ ซึ่งมีความแตกต่างกันไป ในแต่ละโรงงาน โดยพบว่าในแต่ละโรงงานมีการแปรเปลี่ยนทั้งปริมาณและลักษณะน้ำเสียเป็นอย่างมาก หรือแม้แต่ในโรงงานเดียวกันเมื่อศึกษาที่วันเวลาต่างกัน ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของคนงาน วิธีการล้างชิ้นงานหลังชุบเป็นต้น

2. ฟลักซ์

จากผลการทดลองพบว่าฟลักซ์ และอัตราการกรองแปรผันตามความดัน กล่าวคือที่ความดันต่ำฟลักซ์ และอัตราการกรองต่ำ เมื่อความดันสูงขึ้น ฟลักซ์ และอัตราการกรองเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า กับแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน เนื่องจากความดันที่มาจากก๊าซไนโตรเจนเป็นแรงขับดันหลักที่ทำให้น้ำเสียเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเยื่อกรอง

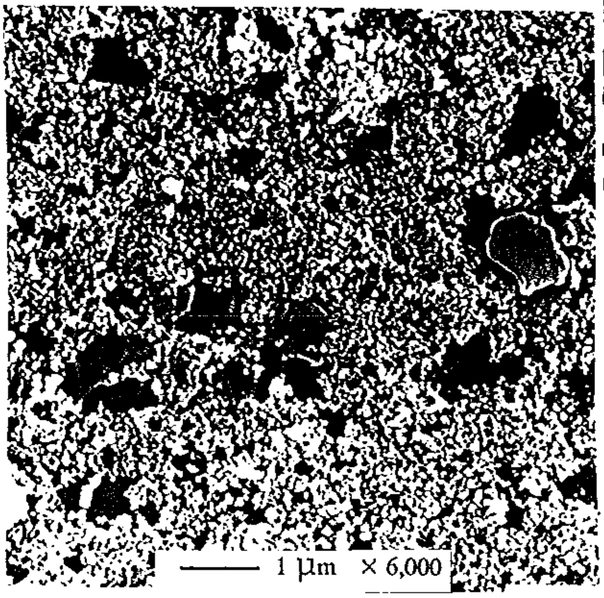
สำหรับอัตราการกรองพบว่าในช่วงแรกของแต่ละการทดลอง สูง และจะค่อยๆลดลงเมื่อทำการกรองต่อไป เนื่องมาจากการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองทำให้อัตราการกรองลดลง แต่การล้างผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรองก็มีผลทำให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย

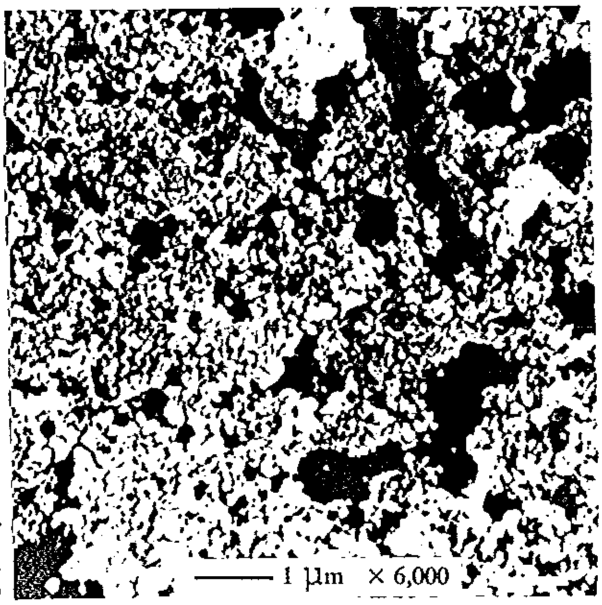
อัตราการลดลงของฟลักซ์และการสูญเสียฟลักซ์ พบว่าแปรผันตามความดันนั่นคือที่ความดันต่ำ อัตราการลดลงของฟลักซ์และการสูญเสียฟลักซ์ต่ำ ที่ความดันสูงอัตราการลดลงของฟลักซ์และการสูญเสียฟลักซ์สูงเนื่องจากความดันที่สูงขึ้นทำให้ฟลักซ์สูงขึ้นเป็นผลให้เกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองมากขึ้น ดังนั้นอัตราการลดลงของฟลักซ์และการสูญเสียฟลักซ์จึงสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการ

ทดลองของ Kim และคณะ (1994)

ในขณะที่อัตราการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกของการทดลองจะสูง ในทุกๆความดันที่ได้ทำการทดลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการลดลงของฟลักซ์ลดน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Visvanathan และคณะ (1989) ที่อธิบายไว้ในการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองโดยอนุภาคเงินแขวนลอยในแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันว่า ในระยะแรกของการกรองอนุภาคแขวนลอยจะไปเกาะอยู่บนผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองระหว่างรูพรุน และเกิดการสะสมตัวขึ้น ต่อมาจึงก่อตัวเป็นรูปร่างคล้ายสะพานพาดอยู่ระหว่างรูพรุนทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนในบางช่วง และการสะสมตัวในรูปแบบคล้ายสะพานนี้นำไปสู่การก่อตัวของชั้นฟิล์มบางๆ บนผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองที่เรียกว่า cake หรือ gel layer เกิด concentration polarization ขึ้นทำให้การลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกสูง และค่อยๆลดน้อยลงในช่วงหลัง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์กับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าพบว่า ฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงกว่าฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งในการทดลองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน เนื่องจากอนุภาคในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี ซึ่งสนับสนุนข้อสันนิษฐานนี้โดยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ดังภาพประกอบ 37 จากการที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่านี้เอง ในการกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองและเกาะติดหรือถูกดูดติดกับผนังภายในรูพรุนเหล่านั้นด้วยแรงต่าง ๆ เช่น Van der Waals attraction, electrical double layer และ hydrodynamic attraction แล้วจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆ ของอนุภาคภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นฟลักซ์จึงน้อยกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Visvanathan และคณะ (1989) และ Kim และคณะ (1994)





A B

ภาพประกอบ 37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) กำลังขยาย 6,000 เท่าของแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) หลังทำการกรองที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

A = น้ำเสียสังเคราะห์รวม

B = น้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ และอัตราการกรอง ของน้ำเสียแต่ละชนิด พบว่า ฟลักซ์และอัตราการกรองทองแดง สูงสุด รองลงมาคือน้ำเสียรวม โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ ทั้งในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคในน้ำเสียนั้นๆ และการอุดตันของแผ่นเยื่อกรอง

3. การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง

การล้างแผ่นเยื่อกรองเพื่อลดการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองและปรับปรุงฟลักซ์ให้ดีขึ้นนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การล้างย้อน (back wash) โดยการกลับด้านแผ่นเยื่อกรอง

แล้วทำการกรองน้ำกลั่น เพื่อพยายามดันเอาอนุภาคที่ติดค้างอยู่บริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองออกมา แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถกระทำได้ที่ความดันสูงกว่า 200 kPa เพราะอาจทำให้แผ่นเยื่อกรองเสียหายได้ (Kim et al., 1994) นอกจากนั้นยังมีการใช้น้ำกลั่นล้างบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง หรือการล้างแผ่นเยื่อกรองด้วยสารเคมีบางชนิด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อจำกัดแตกต่างกันเช่น ค่าใช้จ่ายสูง กรรมวิธียุ่งยาก เสี่ยงต่อความเสียหายอันเกิดกับแผ่นเยื่อกรองเป็นต้น

สำหรับวิธีการล้างแผ่นเยื่อกรองที่ใช้ในการทดลองนี้ ใช้วิธีล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองโดยใส่น้ำกลั่นลงไปในเวสเซลที่บรรจุแผ่นเยื่อกรอง แล้วทำการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเทน้ำกลั่นออกแล้วจึงทำการทดลองต่อไป ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการล้างแผ่นเยื่อกรองที่ไม่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายไม่สูง ไม่เสี่ยงต่อความเสียหายต่อแผ่นเยื่อกรอง และมีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีที่จะลด cake หรือ gel layer ที่เกิดจาก concentration polarization (Kim et al., 1994) จึงได้นำวิธีนี้มาทำการศึกษา

รูปแบบของฟลักซ์ ในการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองโดยปกติเมื่อทำการกรองภายใต้ความดันคงที่พบว่าฟลักซ์ลดลง เมื่อทำการกรองเป็นเวลานานขึ้น แต่จากผลการทดลองพบว่าฟลักซ์ภายหลังการล้างแผ่นเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้น แต่เป็นเพียงระยะเวลาสั้นๆ หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง ซึ่งการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองจะมีผลทางบวกต่อฟลักซ์โดยสามารถลดผลกระทบของ cake หรือ gel layer ที่เกิดจาก concentration polorizationได้ก็ต่อเมื่อมีการสะสมตัวของอนุภาคบนผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองมากพอและการสะสมตัวของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรองไม่เกาะจับตัวกันแน่นเกินไป เนื่องจากแท่งแม่เหล็กที่ใช้ในการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองนั้นอยู่สูงจากผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรองประมาณ 2 มิลลิเมตร ปริมาณและการเกาะจับตัวกันของอนุภาคจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญ

4. ความต้านทานของตัวถูกละลาย

ความต้านทานของตัวถูกละลาย เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อฟลักซ์โดยที่ความต้านทานของตัวถูกละลายสูงทำให้ฟลักซ์ลดลง ความต้านทานของตัวถูกละลายเพิ่มสูงขึ้นได้เนื่องจากเกิดการอุดตันทั้งในบริเวณผิวหน้าและการอุดตันภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรอง หรืออีกนัยหนึ่งค่าความต้านทานของตัวถูกละลาย สามารถบอกได้ถึงการอุดตันของแผ่นเยื่อกรอง การทดลองที่ความดันสูงค่าความต้านทานของตัวถูกละลายจะสูงกว่าการทำการทดลองที่ความดันต่ำทั้งนี้เพราะการทดลองที่ความดันสูงทำให้ฟลักซ์สูง ส่งผลให้เกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองสูงกว่าการทดลองที่ความดันต่ำและเมื่อทำการทดลองต่อไปเรื่อย ๆ พบว่าค่าความต้านทานของตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองเพิ่มขึ้น (Kim et al., 1993)

แต่จากผลการทดลองความต้านทานของตัวถูกละลายที่วิเคราะห์ได้หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง เพื่อบ่งบอกว่าการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง สามารถช่วยลดการอุดตันบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองที่เรียกว่า cake หรือ gel layer ซึ่งเกิดจาก concentration polorization ได้หรือไม่นั้น พบว่าการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง สามารถช่วยลดความต้านทานของตัวถูกละลายได้เล็กน้อยในบางช่วงเวลา เนื่องจากการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กสามารถทำให้อนุภาคที่เกาะจับตัวกันบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองฟุ้งกระจายออกมา ลดผลกระทบของ concentration polarization ส่งผลให้ฟลักซ์หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองสูงขึ้น

การที่การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยการกวนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองไม่สามารถลดความต้านทานของตัวถูกละลายได้มากนัก เนื่องมาจากการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองในการทดลองนี้ส่วนใหญ่เป็นการอุดตันภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรอง

แต่ถ้าต้องการให้ความต้านทานของตัวถูกละลายสามารถอธิบายผลของการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองชัดเจนกว่านี้ ควรทำการวิเคราะห์ความต้านทานของตัวถูกละลายทั้งก่อนและหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

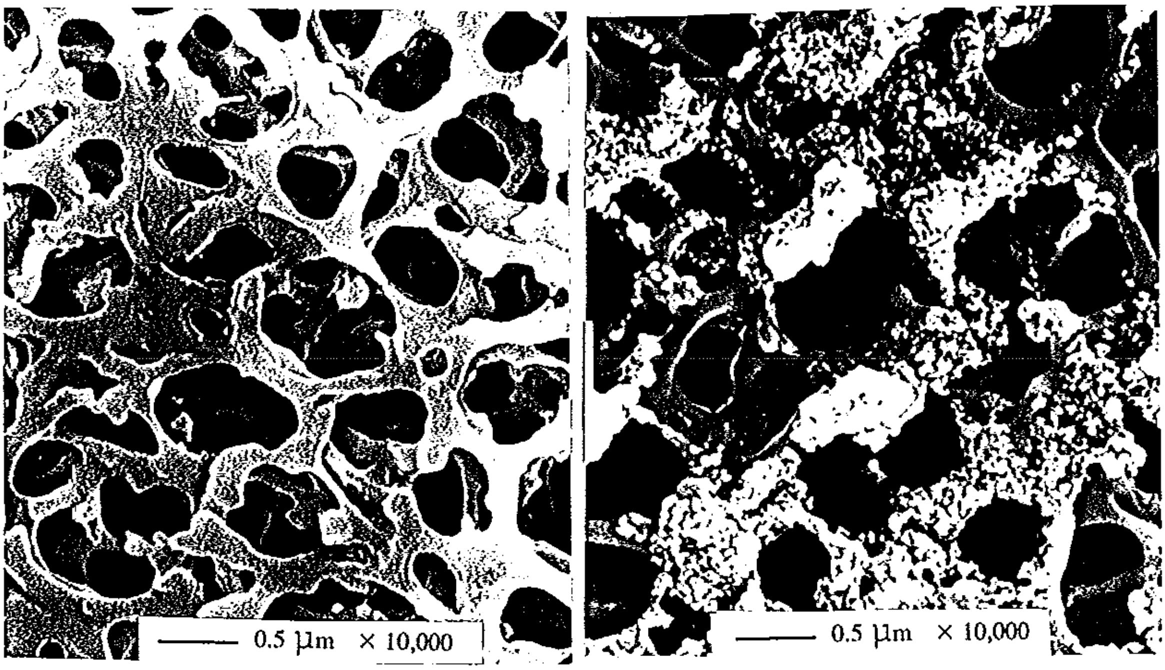
5. ปริมาณโลหะหนัก

ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองทั้งประเภทไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกันทุกช่วงเวลา ภายใต้การทดลองความดันเดียวกัน เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ดังภาพประกอบ 38 เห็นได้ว่าบริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองมีการอุดตันจากอนุภาคต่างๆมากมาย เป็นผลให้รูพรุนของแผ่นเยื่อกรองมีขนาดเล็กลงอย่างมาก แต่ก็ยังมีอนุภาคโลหะหนักเล็ดลอดออกมากับน้ำเสียที่ผ่านการกรองได้ อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนักทำให้เกิดอนุภาคโลหะหนักรวมตัวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบโลหะหนักไฮดรอกไซด์ที่มีขนาดใหญ่ติดค้างอยู่บริเวณผิวหน้าและในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรอง แต่บางส่วนมีขนาดเล็กสามารถผ่านรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองไปได้

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า นำมาพิจารณาควบคู่กับขนาดอนุภาคจากภาพประกอบ 37 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นโดยวิธีตกตะกอนทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ประกอบไปด้วยโลหะหนักและน้ำกลั่นนำมาสังเคราะห์ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการเท่านั้น ดังนั้นเมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการตกตะกอน ตะกอนที่ได้จึงเป็นอนุภาคของโลหะหนักไฮดรอกไซด์ แต่ในขณะที่น้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าประกอบไปด้วยสารเคมีอื่นอีกมากมาย อาทิเช่น น้ำยาเงา, กรดต่างๆ เช่นกรดบอริก กรดซัลฟุริก เป็นต้น เมื่อทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ตกตะกอน อาจเกิดสารประกอบอื่น นอกเหนือไปจากโลหะหนักไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลให้อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าปริมาณโลหะหนักแปรผันตามความดัน นั่นคือเมื่อเพิ่มความดันที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียที่ผ่านการกรองเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากความดันที่สูงจะไปดันให้อนุภาคที่ติดอยู่ภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองหลุดปนออกมากับน้ำ ยิ่งทำการทดลองกับความดันสูงขึ้น โอกาสที่อนุภาคที่ติดอยู่ภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองจะหลุดออกมามากขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Fane และคณะ (1984)

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) พบว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่แยกตามชนิดของโลหะหนักด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ภายใต้การทดลองที่ความดัน 50 kPa สามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมให้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ส่วนทองแดงและสังกะสี มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งในทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง โดยสังกะสีมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี สำหรับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์รวม สามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ที่ทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง และสังกะสีมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี



A B

ภาพประกอบ 38 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) กำลังขยาย 10,000 เท่าของแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

A = ก่อนทำการกรอง

B = หลังทำการกรองน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ที่ความดัน 100 kPa เป็นเวลา 30 นาที

ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่แยกตามชนิดของโลหะหนักด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ภายใต้การทดลองที่ความดัน 50 kPa สามารถกำจัดโครเมียมให้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ และสามารถกำจัดนิกเกิลให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ในทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง ส่วนทองแดงและสังกะสี มีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี สำหรับการทดลองกับน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า

สามารถกำจัด ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ให้มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี ยกเว้นโครเมียม ที่มีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง และการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองไม่สามารถกำจัดให้มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียรวมด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์รวม พบว่าปริมาณสังกะสีต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ในขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี ส่วนโลหะหนักชนิดอื่นไม่สามารถกำจัดให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานได้ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี แต่เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ภายใต้การทดลองที่ความดัน 50 , 100 และ 200 kPa

การทดลองกับน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน ก็ให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองบำบัดน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน นั่นคือสามารถกำจัดทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี ยกเว้นโครเมียมที่มีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง และการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันไม่สามารถกำจัดให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ดังตาราง53

ตาราง 53 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยแผ่นเยื่อกรอง

โลหะหนัก	MF - น้ำเสียสังเคราะห์									MF - น้ำเสียจากโรงงานฯ								
	ความดัน 50 kPa			ความดัน 100 kPa			ความดัน 200 kPa			ความดัน 50 kPa			ความดัน 100 kPa			ความดัน 200 kPa		
	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L
โครเมียม	52.83-55.97		√	47.80-49.69	√		35.85-48.43	√		64.60-66.37		√	19.47-43.36	√		12.39-16.81	√	
ทองแดง	>98.67		√	>98.67		√	>98.67		√	95.00-96.67		√	83.33-91.67		√	79.17-84.17		√
นิกเกิล	96.00-97.39		√	64.70-67.83	√		24.00-40.52	√		68.26-68.86		√	62.87-63.47		√	40.12-43.71		√
สังกะสี	74.07-86.67		√	60.00-62.96		√	38.52-43.70		√	33.88-34.71		√	25.62-28.10		√	14.88-16.53		√
น้ำเสียรวม																		
-โครเมียม	55.17-63.79		√	43.10-55.17		√	37.07-43.10		√	19.51-28.30	√		8.52-32.42	√		9.34-19.51	√	
-ทองแดง	>98.71		√	98.28-98.71		√	98.73		√	40.58-47.83		√	40.58-44.93		√	10.14-28.99		√
-นิกเกิล	>98.05		√	>98.05		√	98.05		√	42.53-45.98		√	13.79-14.94		√	8.05-12.64		√
-สังกะสี	>98.95		√	>98.95		√	98.95		√	40.00-60.00		√	30.00-40.00		√	10.00-25.00		√

ตาราง 53 (ต่อ)

โลหะหนัก	UF - น้ำเสียสังเคราะห์									UF - น้ำเสียจากโรงงานฯ								
	ความดัน 50 kPa			ความดัน 100 kPa			ความดัน 200 kPa			ความดัน 50 kPa			ความดัน 100 kPa			ความดัน 200 kPa		
	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L	Rej.(%)	H	L
โครเมียม	-			-			-			-			-			-		
ทองแดง	-			-			-			-			-			-		
นิกเกิล	-			-			-			-			-			-		
สังกะสี	-			-			-			-			-			-		
น้ำเสียรวม																		
-โครเมียม	50.51-54.55		√	47.47-56.57		√	44.44-51.52		√	27.25-33.50	√		25.25-36.25	√		17.00-20.25	√	
-ทองแดง	>98.69		√	98.69		√	≥ 98.69		√	15.49-16.90		√	14.08-18.31		√	2.82-4.23		√
-นิกเกิล	97.88		√	97.30-97.69		√	96.72-97.11		√	30.38-32.91		√	32.91		√	21.52-25.32		√
-สังกะสี	>98.98		√	>98.98		√	>98.98		√	>83.33		√	50.00->83.33		√	33.33-66.67		√

หมายเหตุ : MF = Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm

UF = Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa

Rej.(%) = Rejection (%)

H = ปริมาณโลหะหนักภายหลังการบำบัด สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง กำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

L = ปริมาณโลหะหนักภายหลังการบำบัด ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง กำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

\- = ไม่ได้ทำการศึกษา

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันที่แยกตามชนิดของโลหะหนัก กับการกำจัดโลหะหนักด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันในน้ำเสียรวมอันประกอบไปด้วย โครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียรวมให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า ในขณะที่การทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่าการกำจัดโลหะหนักที่แยกตามชนิดของโลหะหนักให้ประสิทธิภาพดีกว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียรวม อาจเนื่องมาจาก ในน้ำเสียสังเคราะห์รวมภายหลังการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี เกิดเป็นสารประกอบโลหะหนักไฮดรอกไซด์หลายชนิด เช่น โครเมียมไฮดรอกไซด์($Cr(OH)_3$) คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์($Cu(OH)_2$) นิกเกิลไฮดรอกไซด์($Ni(OH)_2$) ซิงค์ไฮดรอกไซด์($Zn(OH)_2$) ทำให้สามารถเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองได้ดีกว่าการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่แยกตามชนิดของโลหะหนัก ดังนั้นรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองมีขนาดเล็กลงจึงสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพในการกรองจึงดีกว่าการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่แยกตามชนิดโลหะหนัก

ในขณะที่น้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ประกอบไปด้วยโลหะหนักและสารเคมีอื่น เช่น น้ำยาเงา กรดบอริก กรดซัลฟุริก ที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบโลหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบผิวชิ้นงานเป็นต้น ซึ่งน้ำเสียที่แยกตามชนิดของโลหะย่อมมีปริมาณสารเคมีอื่นปนเปื้อนอยู่น้อยกว่าในน้ำเสียรวม เมื่อนำมาบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีนอกจากจะเกิดสารประกอบโลหะหนักไฮดรอกไซด์แล้วยังเกิดเป็นสารประกอบอื่นเนื่องมาจากสารเคมีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้อนุภาคของสารประกอบในน้ำเสียรวมมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคในน้ำเสียที่แยกตามชนิดของโลหะหนัก เมื่อนำไปกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะเกาะจับตัวกันอย่างหลวมๆบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองมากกว่าการอุดตันในรูพรุน ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถเล็ดลอดผ่านรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองไปได้ง่าย ประสิทธิภาพในการกรองจึงต่ำกว่าการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่แยกตามชนิดของโลหะหนัก

เมื่อพิจารณาในแง่ประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนัก ดังตาราง 53 พบว่าการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จะสามารถกำจัดโลหะหนักออกได้มากกว่าการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ทั้งแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน โดยในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่แยกตามชนิดของโลหะหนักด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 35.85-55.97% สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า 98.67% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 24.00-97.39% สามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 38.52-86.67% และในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์รวม ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 37.07-63.79% สามารถกำจัดทองแดงได้ 98.28 ถึงมากกว่า 98.71% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วงมากกว่า 98.05% และสามารถกำจัดสังกะสีได้มากกว่า 98.95%

ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่แยกตามชนิดของโลหะหนักด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 12.39-66.37% สามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 79.17-96.67% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 40.12-68.86% สามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 14.88-34.71% และในการทดลองกับน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 8.52-32.42% สามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 10.14-47.83% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 8.05-45.98% สามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 10.00-60.00%

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์รวมด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 44.44-56.57% สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า 98.69% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 96.72-97.88% สามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วงมากกว่า 98.98% การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน สามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 17.00-36.25% สามารถกำจัดทองแดงได้ใน

ช่วง 2.82-16.90% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 21.52-32.91% สามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 33.33 ถึงมากกว่า 83.33%

ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีมีอนุภาคขนาดเล็กกว่าน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี อนุภาคขนาดเล็กนี้จะถูกดันเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (Hlavacek et al., nd.) ทำให้รูพรุนของแผ่นเยื่อกรองมีขนาดเล็กลง สามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีขึ้น ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียที่ผ่านการกรองแล้วจึงมีน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือได้ฟลักซ์ต่ำกว่า และการลดลงของฟลักซ์สูงกว่า (Kim et al., 1993) และพบว่าการที่จะกรองกักเอาอนุภาคโลหะหนัก และสารประกอบโลหะหนักเหล่านั้นไว้ได้ ต้องอาศัยประโยชน์จากการอุดตันบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองที่เรียกว่า cake หรือ gel layer และการอุดตันภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรอง หรือ fouling ซึ่งจะช่วยทำให้รูพรุนของแผ่นเยื่อกรองมีขนาดเล็กลง สามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กไว้ได้ แต่การอุดตันบริเวณผิวหน้า และภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองก็ยากที่จะควบคุม กล่าวคือเมื่อทำการกรองโดยใช้ระยะเวลานาน อนุภาคที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองอาจหลุดออกมากับน้ำที่ผ่านการกรองได้ หรืออาจเกิดการอุดตันจนไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้อีก

การที่จะเลือกแผ่นเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่านี้เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกรองที่ดีกว่าจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอย่างมากเพราะแผ่นเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุน หรือ MWCO เล็กมาก ราคาก็จะแพงขึ้น และในการดำเนินการต้องกระทำภายใต้ความดันที่สูงมากขึ้น เวสเซลที่ใช้ในการติดตั้งแผ่นเยื่อกรองต้องทำมาจากวัสดุที่สามารถทนต่อความดันสูงๆได้ดี การควบคุมดูแลมีความยุ่งยากซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจไม่จูงใจผู้ประกอบการ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาที่น่าสนใจกว่าจึงควรหาวิธีเพิ่มขนาดอนุภาคของโลหะหนักให้มีขนาดใหญ่ขึ้นในขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้น

เพราะนอกจากจะยืดอายุการใช้งานของแผ่นเยื่อกรองแล้วยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

6. pH สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมด

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า pH , สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมด ของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าหลังการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองลดลงเล็กน้อยทั้งในการทดลองกับแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน โดยทุกช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์พบว่า pH , สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน

pH หลังการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองที่วิเคราะห์ได้สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งกำหนดไว้ที่ 5.5-9.0 ในกรณีที่ pH สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งเช่นนี้อาจแก้ไขได้โดย นำกรดมาเป็นตัวปรับลดpH ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนั้นยังพบว่าในบางการทดลอง pH มีการลดลงเป็นอย่างมาก เช่นการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิล และการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสี จึงได้ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนการ ตกตะกอนทางเคมีแล้วแยกส่วนน้ำใสออกมา ทำการวัด pH ทุกวันเป็นเวลา 5 วัน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ pH พบว่า pH ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และจะคงที่เมื่อ pH อยู่ในช่วงเป็นกลาง จึงสันนิษฐานว่าการที่ pH ปรับตัวลดลง อาจเนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในน้ำเสียที่ถูกตั้งทิ้งไว้เพื่อรอการนำเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์ในเชิงเคมีเพิ่มเติม จึงจะสามารถอธิบายเกี่ยวกับสาเหตุ และการเปลี่ยนแปลงต่างๆเหล่านี้ได้อย่างชัดเจน

สำหรับสภาพนำไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้พบว่าในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าสูงกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งในการทดลองกับแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ประกอบไปด้วยโลหะหนัก และน้ำกลั่น มาสังเคราะห์ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการเท่านั้น ในขณะที่น้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าประกอบไปด้วยสารเคมี

อื่นนอกเหนือจากโลหะหนัก เช่น น้ำยาเงา และกรดต่างๆ ดังนั้นเมื่อนำน้ำเสียเหล่านี้มาทำการตกตะกอนทางเคมีโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะจึงมีของแข็งละลายน้ำปนอยู่มากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เป็นสาเหตุให้มีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่า และเมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าสภาพนำไฟฟ้าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดก็สอดคล้องกับสภาพนำไฟฟ้า นั่นคือในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้ามีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทสรุป

1. การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่เลือกทำการศึกษา ตั้งอยู่ในเขตอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เป็นโรงงานที่ให้บริการชุบส่วนประกอบรถยนต์ เช่น ล้อแมกซ์ มีกำลังผลิต 1,000 ชิ้นงานต่อเดือน น้ำเสียเป็นน้ำล้างหลังกระบวนการชุบเคลือบโลหะมีปริมาณโดยประมาณเท่ากับ 90 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน ทำการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี ปล่อยทิ้งส่วนน้ำใสลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะ ซึ่งหากน้ำที่ถูกปล่อยทิ้งเหล่านี้มีปริมาณโลหะหนักปนอยู่มากจะเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อสิ่งแวดล้อม

2. ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่เลือกทำการศึกษาเป็นน้ำล้างหลังการชุบเคลือบโลหะ จากการวิเคราะห์น้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ก่อนทำการปล่อยทิ้ง 3 ครั้ง พบว่ามีโครเมียม 1,612-2,616 มก./ล ทองแดง 964-1,090 มก./ล นิกเกิล 81.4-113.9 มก./ล และสังกะสี 7.4-10.6 มก./ล pH ของน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมอยู่ในช่วง 1.54-1.84 pH ของน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงอยู่ในช่วง 1.46-2.15 pH ของน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลอยู่ในช่วง 5.12-5.32 pH ของน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีอยู่ในช่วง 7.50-7.70 สภาพนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมอยู่ในช่วง 28.0-32.0 mS/m สภาพนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงอยู่ในช่วง 7.7-8.5 mS/m สภาพนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลอยู่ในช่วง 1.1-1.3 mS/m สภาพนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีอยู่ในช่วง 0.9-1.3 mS/m ความขุ่นของน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมอยู่ในช่วง 1.47-1.77 NTU มีสีเหลืองอมส้ม ความขุ่นของน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงอยู่ในช่วง 0.68-0.87 NTU มีสีฟ้า ความขุ่นของน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลอยู่ในช่วง 0.59-0.78 NTU มีสีเขียวอ่อน ความขุ่นของน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีอยู่ในช่วง 2.06-2.33 NTU ไม่มีสี การวิเคราะห์หาของแข็งในน้ำเสียพบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งละลายน้ำโดยน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมมีของแข็งในรูปของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 5,621-6,575 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 9-15 มก./ล น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงมีของแข็งละลายน้ำอยู่

ในช่วง 2967-4115 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 3-5 มก./ล น้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลมีของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 428-676 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 2-4 มก./ล น้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีมีของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 1,267-1,455 มก./ล ของแข็งแขวนลอย 3-5 มก./ล

3. ฟลักซ์ จากการทดลองพบว่า ฟลักซ์ อัตราการกรอง อัตราการลดลงของฟลักซ์ และการสูญเสียฟลักซ์แปรผันตามความดัน นอกจากนั้นยังพบว่า อัตราการกรอง และอัตราการลดลงของฟลักซ์สูงในช่วงแรกของการทดลอง ลดน้อยลงในช่วงหลังทั้งในการทดลองกับแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ภายใต้ทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ กับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่าฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงกว่าฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งในการทดลองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน ภายใต้ทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง

4. การล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง จากผลการทดลอง พบว่าฟลักซ์ภายหลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในบางช่วงเวลา โดยการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองมีผลทางบวกต่อฟลักซ์ภายใต้เงื่อนไขของการสะสมตัวของอนุภาคบนผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง และการเกาะจับตัวกันของอนุภาคที่สะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อกรอง

5. ความต้านทานของตัวถูกละลาย พบว่าการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองด้วยการกวนบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรองสามารถช่วยลดความต้านทานของตัวถูกละลายลงได้เล็กน้อยในบางช่วงเวลา

6. ปริมาณโลหะหนัก พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกช่วงเวลา ภายใต้การทดลองที่ความดันเดียวกัน ปริมาณโลหะหนักต่ำสุดเมื่อทำการทดลองที่ความดัน 50 kPa รองลงมาคือการทดลองที่ความดัน 100 kPa และการทดลองที่ 200 kPa มีปริมาณโลหะหนักสูงสุด โดย เมื่อพิจารณาในแง่ประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนักด้วยแผ่นเยื่อกรองพบว่า การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้มากกว่าการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ทั้งในการทดลองกับแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) พบว่า การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่

แยกตามชนิดของโลหะหนัก ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ภายใต้การทดลองที่ความดัน 50 kPa สามารถกำจัดโครเมียม และนิกเกิล ให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ แต่ที่ความดัน 100 และ200 kPa ยังคงมีนิกเกิล และโครเมียมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 35.85-55.97% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 24.00-97.39% ส่วนทองแดงมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ในทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง โดยสามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง มากกว่า98.67% สำหรับสังกะสี มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี เมื่อนำมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ปริมาณสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 38.52-86.67% ในการทดลองกับน้ำเสียรวมสังเคราะห์สามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ภายใต้ทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 37.07-63.79% สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า98.28 % สามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่า 98.05% ส่วนสังกะสีมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ขั้นตอนการตกตะกอนทางเคมีเมื่อนำมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ปริมาณสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดสังกะสีได้มากกว่า98.95%

ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่แยกตามชนิดของโลหะหนัก ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ภายใต้การทดลองที่ความดัน 50 kPa สามารถกำจัดโครเมียม ให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ แต่ที่ความดัน 100 และ200 kPa ยังคงมีโครเมียมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 12.39-66.37% สามารถกำจัดนิกเกิลให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ในทุกความดันที่ทำการทดลอง โดยสามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 40.12-68.86% ส่วนทองแดง และสังกะสีมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ขั้นตอนการตกตะกอนทางเคมี เมื่อนำมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ปริมาณทองแดง และสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 79.17-96.67% และ สามารถกำจัด สังกะสีได้ในช่วง 14.88-34.71% ในการทดลองกับน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าสามารถกำจัด ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ให้มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี เมื่อนำมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ปริมาณทองแดง นิกเกิล และสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 10.14-47.83% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 8.05-45.98% และ สามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง

10.00-60.00% สำหรับโครเมียมไม่สามารถกำจัดให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 8.52-32.42%

ส่วนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียรวมด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชันก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือในการทดลองกับน้ำเสียรวมสังเคราะห์ สามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ภายใต้ทุกความดันที่ได้ทำการทดลอง โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 44.44-56.57% สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า98.69% สามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่า96.72% ส่วนสังกะสีมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตั้งแต่ขั้นตอนการตกตะกอนทางเคมีเมื่อนำมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ปริมาณสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง มากกว่า98.98% ในการทดลองกับน้ำเสียรวมจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน สามารถกำจัด ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ให้มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ตั้งแต่ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี เมื่อนำมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง ปริมาณทองแดง นิกเกิล และสังกะสีลดลงอีก โดยสามารถกำจัดทองแดงได้ในช่วง 2.82-16.90% สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในช่วง 21.52-32.91% และ สามารถกำจัดสังกะสีได้ในช่วง 33.33 ถึงมากกว่า 83.33% สำหรับโครเมียมไม่สามารถกำจัดให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยกำจัดโครเมียมได้ในช่วง 17.00-36.25%

7. pH , สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมด พบว่าpH , สภาพนำไฟฟ้า และของแข็งทั้งหมด ของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า ภายหลังการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน ลดลงเล็กน้อย โดยสภาพนำไฟฟ้าและของแข็งทั้งหมด ในน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์

ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อเป็นการลดการใช้น้ำในกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำเสียลดน้อยลง ควรให้ความสำคัญกับการนำน้ำล้างชิ้นงานในถังแรก หรือถังdrag out กลับมาใช้ในถังชุบใหม่ เมื่อมีความเข้มข้นของโลหะในถังมากพอ และในขั้นตอนการล้างชิ้นงานภายหลังการชุบเคลือบ ควร

มีการกักเก็บน้ำไว้ใช้ในภาชนะที่เหมาะสมในการล้างชิ้นงาน ดีกว่าการล้างชิ้นงานโดยวิธีเปิดน้ำล้นตลอดเวลา

2. ควรจัดให้มีเจ้าหน้าที่ดูแลการบำบัดน้ำเสียและมีการตรวจสอบน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็นระยะๆ ในพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่นปริมาณโลหะหนัก

3. ในการทำวิจัยเพิ่มเติมควรศึกษาการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นที่เหมาะสม ก่อนจะนำสู่การกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง เช่นการใช้โพลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

4. ศึกษาวิธีการล้างแผ่นเยื่อกรองที่เหมาะสมเพื่อลดอัตราการสูญเสียฟลักซ์ และยืดอายุการใช้งานของแผ่นเยื่อกรอง

5. ศึกษาการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองโดยวิธี cross flow เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

6. ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะกลับมาใช้ใหม่

บรรณานุกรม

กรรณิการ์ สิริสิงห์. 2525. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. กรุงเทพ : ประยูรวงศ์.

กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์. 2538. "ปริมาณโลหะหนักบางชนิดในลุ่มน้ำคลองวาดจังหวัดสงขลา", วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา)

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2536. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. กรุงเทพ : มิตรนราการพิมพ์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพ : มิตรนราการพิมพ์.

ควบคุมมลพิษ, กรม และ วิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, สมาคม. 2538. ศัพท์บัญญัติและนิยามสิ่งแวดล้อมน้ำ. กรุงเทพ : เรือนแก้วการพิมพ์.

จิระศักดิ์ รัตนไพฑูรย์. 2526. "ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดย่อมภายในเขตราษฎร์บูรณะ กรุงเทพมหานคร", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา)

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2524. พจนานุกรมเคมี. กรุงเทพ : โอเดียนสโตร์.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2525. เคมีสภาวะแวดล้อม. กรุงเทพ : โอเดียนสโตร์.

เถาวียน บัวตุ่ม. 2541. "ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการจับโลหะของไคตินและไคโตแซน", วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ประมง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา).

ทิพย์ ชัยวิริยกุล. 2536. "การนำโลหะนิกเกิลในน้ำเสียจากการชุบโลหะกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา).

ปรีชา แสงพิสิทธิ์. 2531. "การประยุกต์ใช้ระบบการกรองตรง", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา).

มงคล ปริญญาปริวัฒน์. 2532. "การจัดการและบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผ่นเหล็กอาบสังกะสี", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา).

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. 2526. วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพ : ก.วิวรรธน์.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. 2538. วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไมตรี สุทธจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัวเรา. เชียงใหม่ : ดาวคอมพิวเตอร์กราฟิค.

ราชบัณฑิตยสถาน. 2536. ศัพท์วิทยาศาสตร์. กรุงเทพ : สหธรรมิก.

ศิริมา ปัญญาเมธีกุล. 2537. "ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจโดยกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา).

สาโรช บุญยกิจสมบัติ. 2535. "การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมีในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดกลางและเล็ก", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา).

เสริมพล รัตนสุข. 2524. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. กรุงเทพ : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

อนันต์ ทองมอญ. 2531. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพ : ภาพพิมพ์.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2539. "ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่จะระบายออกจากโรงงาน". กรุงเทพ. (สำเนา).

อัมพวัน พงศ์สิทธิศักดิ์. 2539. "ความคุ้มค่าของการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่สำหรับอาคารสูงโดยการกรองตรงหรือดูดติดผิว หรือการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา).

APHA, AWWA and WEF. 1992. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 18th ed. New York : American Public Health Association.

Brock, T.D. nd. Membrane Filtration a User Guide and Reference Manual. London : Science Tech.

Buckley, C.A. 1992. "Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents", Water science. 10(1992), 203-209.

Cartwright, P.S. 1991. "Zero Discharge/ Water Reuse-the Opportunities for Membrane Technologies in Pollution Control", In Desalination and Water Re-use, p.255-242. Balaban, Miriam, ed. New York : Plenum Press.

Chudacek, M.W. and Fane, A.G. 1984. "The Dynamics of Polarisation in Unstirred and Stirred Ultrafiltration", Membrane Science. 21(1984), 145-160.

Coster, G.L. and Chillcott, T.C. 1997. "Fundamental of Membrane Science", In Membrane Science Relevant into Biological and Synthetic Membrane, July 21-August 1, 1997, organized by Prince of Songkhla University. 59-65, Songkhla.

Defilippi, R.P. and Goldsmith, R.L. 1992. "Application and Theory of Membrane Processes for Biological and Other Macromolecular Solution", In International Specialised Conference on Membrane Technology in Wastewater Management, March 2-5, 1992, organized by University of Natal. 33-46. Oxford.

Diels, L., et al. 1995. "The Use of Bacteria Immobilized in Tubular Membrane Reacters for Heavy Metal Recovery and Degradation of Chlorinated Aromatics", Membrane Science. 100(1995), 249-258.

Drioli, E. 1992. "Membrane Operations for the Rationalization of Industrial Productions", Water Science. 10(1992), 107-125.

Enoch, E.D., et al. 1994. "Removal of Heavy Metals and Suspended Solids from Wet Lime(stone)Gypsum Flue Gas Desulphurization Plants by Means of Hydrophobic and Hydrophillic Crossflow Microfiltration Membranes", Membrane Science. 87(1994), 191- 198.

Fane, A.G. 1984. "Ultrafiltration of Suspensions", Membrane Science. 45(1989), 3-15.

Fane, A.G. 1997. "Membranes and Introduction", In Membrane and Membrane Technology, October 3, 1997, organized by Prince of Songkhla University. 1-11. Songkhla.

Fane, A.G. 1997. "Pressure-Driven Membrane Processes Microfiltration, Ultrafiltration and Reverse Osmosis", In Membrane and Membrane Technology, October 3, 1997, organized by Prince of Songkhla University. 12-34. Songkhla.

Fane, A.G., et al. 1992. "Metal Recovery from Wastewater Using Membranes", Water Science Technology. 25(1992), 5-18.

Flinn, J.E. 1970. Membrane Science and Technology. London : Plenum Press.

Franken, A.G.M. and Fane, A.G. 1996. "Environmental Management with Membrane". University of New South Wales, Center for Membrane Science and Technology. (Unpublished).

Hart, O.O. and Buckley, C.A. 1992. Membrane Technology in Wastewater Management. New York : Pergamon press.

Howell, J.A.; Sanchez, V. and Field, R.W. 1993. Membranes in Bioprocessing Theory and Application. Cambridge : Great Britain University.

Kim, K.J.; Chen, V. and Fane, A.G. 1993. "Ultrafiltration of Colloidal Silver Particles : Flux, Rejection and Fouling", Colloid and Interface Science. 155 (1993), 347-359.

Kim, K.J.; Chen, V. and Fane, A.G. 1994. "Characterization of Clean and Fouled Membranes Using Metal Colloids", Membrane Science. 88(1994), 93-101.

Kim, K.J., et al. 1994. "The Microfiltration of Very Dilute Colloidal Suspensions", Colloid and Interface Science. 166(1994), 462-471.

Kosarek, L.J. 1981. "Removal of Various Toxic Heavy Metals and Cyanide from Water by Membrane Processes", In Chemistry in Water Reuse. p.261-280. Cooper, W.J., ed. Michigan : Ann Arbor Science publishers Inc.

Krennel, P.A. 1973. "The Effect of Heavy Metals on Fish and Aquatic Organisms', In International Conference on Heavy Metals in the Aquatic Environment, December 4-7, 1973, organized by The Department of Environmental and Water Resources Engineering at Vanderblit University. 25-32. Tennessee.

Kreye, W.C. 1978. "Treatment of Zinc and Oil Bearing Washer Wastewater", In 33 nd Industrial Waste Conference, April 1-5, 1978, organized by Purdue University. 155-164. Great Britain.

Kunikane, Shoichi., et al. 1995. "A Comparative Study on the Application of Membrane Technology to the Public Water Supply", Membrane Science. 102(1995), 149-154.

Mcvaugh, J. and Wall, W.T. 1976. "Optimization of Heavy Metals Wastewater Treatment Effluent Quality Versus Sludge Treatment", In 31 st Industrial Waste Conference, March 22-26, 1976, organized by Purdue University. 17-25. Great Britain.

Patterson, J.W. 1985. Industrial Wastewater Treatment Technology. 2d ed. London : Butterworth Publishers.

Scott, K. 1995. Handbook of Industrial Membranes. UK : Eiservier Advanced Technology.

Semmens, M.J. and Chang, Y. 1989. "Cyanide Wastes : Treatment and Recover", In International Technical Conference on Membrane Separation Processes, May 24-26, 1989, organized by Brighton. 167. UK.

Shapira, N.I. and Liu, H.L. 1981. "Demonstration of a Cross-Flow Microfiltration System for the Removal of Toxic Heavy Metals from Battery Manufacturing Wastewater Effects", In Chemistry in Water Reuse. p.281-309. Cooper, W.J., ed. Michigan : Ann Arbor Science publishers Inc.

Smith, K.L., et al. 1981. "Coupled Transport Membranes for Removal of Chromium from Electroplating Rinse Solutions", In Chemistry in Water Reuse. p.311-324. Cooper, W.J., ed. Michigan : Ann Arbor Science publishers Inc.

Squires, R.C. 1992. "Removal of Heavy Metals from Industrial Effluent by Crossflow Microfiltratiion", Water Science Technology. 25(1992), 55-67.

Tunay, O. and Kahdasli, N.I. 1994. "Hydroxide Precipitation of Complexed Metals", Water Res. 10(1994), 2117-2124.

Visvanathan, C. and Aim, B.R. 1989. "Studies on Colloidal Membrane Fouling Mechanisms in Microfiltration", Membrane Science. 102(1995), 149-154.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่จะระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

(สำเนา)

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ.2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 ที่ระบุว่า "ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)" รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

2.1 ค่า ทีดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

/2.2 น้ำทิ้ง....

2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า ทีดีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า ทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) โลหะหนักมีค่าดังนี้

4.1 ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า 0.005	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.2 เซเลเนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า 0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.3 แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า 0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.4 ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า 0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.5 อาร์เซนิค (Arsenic)	ไม่มากกว่า 0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6 โครเมียม (Chromium)		
4.6.1 Hexavalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6.2 Trivalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.75	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.7 บาเรียม (Barium)	ไม่มากกว่า 1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.8 นิเกิล (Nickel)	ไม่มากกว่า 1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.9 ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า 2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.10 สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า 5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.11 แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า 5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(6) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

(7) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(8) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(9) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
(10) เพสติไซด์ (Pesticide)	ต้องไม่มี
(11) อุณหภูมิ	ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
(12) สี	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
(13) กลิ่น	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

(14) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

(15) ค่า บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

(16) ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(17) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)

(2) การตรวจสอบค่า ทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fibre Filter Disc)

(4) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิค แอบซอฟชั่น สเปคโตรโฟโตเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไดเร็คแอสไพเรชั่น (Direct Aspiration) หรือวิธีพลาสม่า อีมิสชั่น สเปคโตร์สโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิล พลาสม่า (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิค และเซเลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอฟชั่น สเปคโตร์โฟโตเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์ เจนเนอเรชั่น (Hydride Generation) หรือวิธีพลาสม่า อีมิสชั่น สเปคโตร์สโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิล พลาสม่า (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอฟชั่น โคลด์ เวเปอร์ เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapour Technique)

(5) การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไตเตรท (Titrate)

(6) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีน บาร์บิทูริคแอซิด (Pyridine-Barbituric Acid)

(7) การตรวจสอบค่าฟอร์มาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Spectrophotometry)

(8) การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอล ให้ใช้วิธีกลั่น และตามด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (Distillation, 4-Aminoantipyrine)

(9) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอโดเมตริค (Iodometric Method)

(10) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas-Chromatography)

(11) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

(12) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

(13) การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชั่น (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน หรือวิธีการอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมให้ความเห็นชอบ

(14) การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl)

(15) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยโปตัสเซียม ไดโครเมต (Potassium Dichromate digestion)

ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Associantion และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ.2539
ไชยวัฒน์ สินสุวงศ์
(นายไชยวัฒน์ สินสุวงศ์)
รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

สำเนาถูกต้อง

(นายเสถียร วีระวงศ์)
เจ้าหน้าที่บริหารงานธุรการ 5

ประกาศราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 52 ง วันที่ 27 มิถุนายน 2539

ภาคผนวก ข
ส่วนผสมของน้ำยาชุบเคลือบโลหะ

1. น้ำยาชุบโครเมียม

1.1 น้ำยาชุบโครเมียมแบบบาง

กรดโครมิก	250	กรัม/ลิตร
กรดกำมะถัน	2.5	กรัม/ลิตร
อุณหภูมิ	40-50	°C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	100-140	แอมแปร์/ตารางฟุต
เวลาประมาณ	2-5	นาที
ได้ความหนาประมาณ	0.00001	นิ้ว

ถังน้ำยาชุบ ใช้ถังเหล็ก บุตะกั่ว หรือถังเหล็ก บุ P.V.C.

1.2 น้ำยาชุบโครเมียมแบบหนา

กรดโครมิก	250	กรัม/ลิตร
กรดกำมะถัน	2.5	กรัม/ลิตร
อุณหภูมิ	50-52	°C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	250-300	แอมแปร์/ตารางฟุต
ตัวล่อ	ตะกั่ว	

1.3 น้ำยาชุบโครเมียมแบบ S.R.H.S. (Self Regulating High Speed Chromium)

สูตรนี้เป็นของอเมริกา (The United Chromium Corporation)

กรดโครมิก	100	ส่วนโดยน้ำหนัก
สตรอนเทียมซัลเฟต	3	ส่วนโดยน้ำหนัก
โปตัสเซียมซิลิโคฟลูออไรด์	8	ส่วนโดยน้ำหนัก

United Chromium จะใช้ส่วนผสมของกรดโครมิก ประมาณ 200-500 กรัม/ลิตร อัตราการเคลือบสูงกว่าแบบธรรมดา 50%

2. น้ำยาชุบทองแดง

2.1 น้ำยาชุบทองแดงแบบสไตรค์

คอปเปอร์ไซยาไนด์	30	กรัม/ลิตร
โซเดียมไซยาไนด์	48	กรัม/ลิตร
โซเดียมคาร์บอเนต	15	กรัม/ลิตร
อุณหภูมิ	40-60	°C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	10-30	แอมแปร์/ตารางฟุต
อัตราส่วนของขั้วบวกต่อขั้วลบ	3:1	
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	6	โวลท์

2.2 น้ำยาชุบทองแดงแบบร๊อคเซล

คอปเปอร์ไซยาไนด์	25	กรัม/ลิตร
โซเดียมไซยาไนด์	35	กรัม/ลิตร
ร๊อคเซลซอลท์	45	กรัม/ลิตร
โซเดียมคาร์บอเนต	30	กรัม/ลิตร
ค่า pH	12.5	
อุณหภูมิ	50-60	°C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	2-5	แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร

2.3 น้ำยาชุบทองแดงแบบมีประสิทธิภาพสูง

คอปเปอร์ไซยาไนด์	75	กรัม/ลิตร
โซเดียมไซยาไนด์	93	กรัม/ลิตร
หรือ โปตัสเซียมไซยาไนด์	115	กรัม/ลิตร
โซเดียมไฮดรอกไซด์	30	กรัม/ลิตร
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	10-60	แอมแปร์/ตารางฟุต
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	0.75-4	โวลท์

2.4 น้ำยาชุบทองแดงแบบกรด

คอปเปอร์ซัลเฟต	220	กรัม/ลิตร
กรดกำมะถัน	60	กรัม/ลิตร

น้ำยาเงา ตามคู่มือของน้ำยานั้นๆ

อุณหภูมิ	20-30	°C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	3-4	แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร

3. น้ำยาชุบนิกเกิล

3.1 น้ำยาชุบนิกเกิลด้าน

นิกเกิลซัลเฟต	250	กรัม/ลิตร
นิกเกิลคลอไรด์	60	กรัม/ลิตร
กรดบอริก	40	กรัม/ลิตร
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	20	แอมแปร์/ตารางฟุต
ค่า pH	3.5-4.5	
ตัวล่อ ใช้นิกเกิล		

3.2 น้ำยาชุบนิกเกิลกึ่งเงา

นิกเกิลซัลเฟต	300	กรัม/ลิตร
นิกเกิลคลอไรด์	40	กรัม/ลิตร
กรดบอริก	40	กรัม/ลิตร
น้ำยากึ่งเงา ตามคู่มือของน้ำยานั้นๆ		
อุณหภูมิ	55-60	°C
ค่า pH	4.2	
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	20-40	แอมแปร์/ตารางฟุต

3.3 น้ำยาชุบนิกเกิลเงา

นิกเกิลซัลเฟต	250-300	กรัม/ลิตร
นิกเกิลคลอไรด์	40-60	กรัม/ลิตร
กรดบอริก	35-45	กรัม/ลิตร
น้ำยาเงา ตามคู่มือของน้ำยานั้นๆ		
ตัวล่อ ใช้นิกเกิล		
อุณหภูมิ	45-65	°C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	20-40	แอมแปร์/ตารางฟุต

3.4 น้ำยาชุบนิกเกิลสไตรค์

ชนิดคลอไรด์

นิกเกิลคลอไรด์	240	กรัม/ลิตร
กรดไฮโดรคลอริก	8.6	มิลลิลิตร/ลิตร
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง	
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	3	แอมแปร์/ตารางฟุต
เวลาชุบ	2-3	นาที ใช้งานเป็นขั้วบวก
	6	นาที ใช้งานเป็นขั้วลบ

ชนิดซัลเฟต

นิกเกิลซัลเฟต	250	กรัม/ลิตร
กรดกำมะถัน	25	มิลลิลิตร/ลิตร
อุณหภูมิ	30-40	˚C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	16-22	แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร
เวลาชุบ	5-10	นาที

4. น้ำยาชุบสังกะสี

4.1 น้ำยาชุบสังกะสีแบบใช้ซิงค์ไซยาไนด์

ซิงค์ไซยาไนด์	45	กรัม/ลิตร
โซเดียมไซยาไนด์	90	กรัม/ลิตร
โซเดียมไฮดรอกไซด์	75	กรัม/ลิตร
ตัวยาเงา ตามคู่มือของน้ำยานั้นๆ		
อุณหภูมิ	10-40	˚C
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	2-6	แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร

4.2 น้ำยาชุบสังกะสีแบบกรด

ซิงค์คลอไรด์	120	กรัม/ลิตร
แอมโมเนียคลอไรด์	180	กรัม/ลิตร
น้ำยาเงา ซิงคอล เอส ที	30	มิลลิลิตร/ลิตร
ซิงคอล เอ-1	3	มิลลิลิตร/ลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	1-10	แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร
อุณหภูมิ	20-40	C
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	3-6	โวลท์
ค่า pH	4.5-5.2	

4.3 น้ำยาชุบสังกะสีแบบไม่ใช้ไซยาไนด์

ซิ้งออกไซด์	5-18	กรัม
โซดาไฟ	70-180	กรัม/ลิตร
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	0.5-6	แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร
อุณหภูมิ	20-40	C
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	3-12	โวลท์

น้ำยาเงาใส่ตามคู่มือของน้ำยาเงานั้นๆ

ยาดับกลิ่นซิ้ง

ภาคผนวก ค
วิธีการวิเคราะห์น้ำ

ความเข้มข้นของโลหะหนัก โดยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometry (APHA, AWWA and WEF, 1992)

วิธีวิเคราะห์

1. เลือกหลอดฮอลโลแคโธดของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์นำไปติดตั้งให้เข้าที่ ตามคำแนะนำของคู่มือการใช้เครื่อง
2. ปรับความยาวคลื่นตามชนิดของโลหะที่จะวิเคราะห์ตามคำแนะนำของคู่มือการใช้เครื่อง
3. ปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านหลอดฮอลโลแคโธดให้เหมาะสม
4. ปรับอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนให้เหมาะสม
5. ทำการวิเคราะห์สารละลายโลหะหนักมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น นำมาสร้างเป็นกราฟเส้นตรง โดยใช้แกน Y เป็นค่าแอบซอบแบนซ์ และแกน X เป็นความเข้มข้นของโลหะหนัก
6.นำตัวอย่างที่ต้องการทราบความเข้มข้นมาหาค่าแอบซอบแบนซ์แล้วคำนวณหาปริมาณโลหะหนัก โดยเทียบกับกราฟเส้นตรงที่ได้จากการวัดสารละลายมาตรฐาน

ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) (APHA, AWWA and WEF, 1992)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยกระเบื้องสำหรับระเหย
2. เครื่องอังน้ำ
3. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
4. โถดูดความชื้น
5. เครื่องชั่งชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง

วิธีวิเคราะห์

1. อบถ้วยกระเบื้องสำหรับระเหยในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บไว้ในโถดูดความชื้น นำมาชั่งน้ำหนักเมื่อต้องการใช้
2. นำน้ำตัวอย่างที่ผสมเข้ากันอย่างดี ที่ตวงไว้ใส่ในถ้วยสำหรับระเหย ทำการระเหยน้ำตัวอย่างบนเครื่องอังน้ำจนแห้ง แล้วอบถ้วยสำหรับระเหยซึ่งมีสารเคมีคงค้างจากการระเหยที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น จึงนำมาชั่งน้ำหนัก กระทำการอบซ้ำและทำให้เย็นในโถดูดความชื้นจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่งได้มีความแตกต่างกันไม่มากกว่า 0.5 มิลลิกรัม

<u>การคำนวณ</u>

ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร) $= \dfrac{(A-B) \times 1000}{\text{มิลลิลิตรของตัวอย่าง}}$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของถ้วยสำหรับระเหย + น้ำหนักของสารที่คงค้างบนถ้วยสำหรับระเหย

B คือ น้ำหนักของถ้วยสำหรับระเหย

ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง

ตารางภาคผนวก ง1-1 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	155.70	150.50	158.36	154.85	4.00	292.52	289.16	305.61	295.76	8.69	548.69	556.79	435.29	513.59	67.93
5	599.33	570.67	605.31	591.77	18.52	1016.93	996.74	1103.42	1039.03	56.67	1622.77	1819.23	1262.74	1568.25	282.22
10	651.78	632.13	667.83	650.58	17.88	949.95	953.25	967.57	956.92	9.37	1335.91	1525.38	1016.28	1292.52	257.31
20	1066.81	1003.71	1104.57	1058.36	50.96	1355.63	1242.79	1536.72	1378.38	148.28	1892.39	2046.52	1652.93	1863.95	198.33
30	845.74	784.73	857.92	829.46	39.22	1046.26	976.40	1143.27	1055.31	83.80	1439.67	1637.81	1208.51	1428.66	214.86
40	711.93	710.61	736.05	719.53	14.32	885.16	832.83	957.12	891.70	62.40	1212.67	1471.35	1099.56	1261.19	190.59
50	626.68	612.34	695.71	644.91	44.57	780.31	730.68	880.55	797.18	76.35	1074.69	1256.98	967.41	1099.69	146.40
60	577.08	560.77	585.03	574.29	12.37	716.08	696.57	816.29	742.98	64.23	979.73	1156.56	896.53	1010.94	132.79
70	520.79	517.79	578.15	538.91	34.02	630.96	612.81	750.49	664.75	74.80	908.81	1002.17	853.67	921.55	75.07
80	483.66	452.42	566.37	500.82	58.88	593.72	553.36	697.21	614.76	74.20	837.55	976.93	802.15	872.21	92.40
90	457.45	431.79	555.25	481.50	65.15	566.02	526.79	686.58	593.13	83.27	805.76	954.82	776.18	845.59	95.75
100	324.96	350.23	421.56	365.58	50.10	506.88	487.82	607.59	534.10	64.36	749.36	826.47	695.82	757.22	65.68
110	324.82	349.15	409.75	361.24	43.74	484.27	485.13	605.27	524.89	69.61	722.39	815.11	633.08	723.53	91.02
120	320.90	349.02	397.56	355.83	38.78	474.84	484.95	600.36	520.05	69.73	688.40	794.23	574.11	685.58	110.09
130	314.63	345.62	396.14	352.13	41.14	450.49	483.02	587.17	506.89	71.40	672.95	763.58	522.97	653.17	121.52
140	311.61	337.96	394.32	347.96	42.25	436.77	480.43	571.93	496.38	68.98	650.97	751.51	517.65	640.04	117.31
150	295.56	321.05	392.57	336.39	50.29	428.22	475.26	565.11	489.53	69.55	641.86	747.32	496.27	628.48	126.06
160	296.31	317.82	381.11	331.75	44.08	419.27	432.59	543.32	465.06	68.10	624.26	740.88	474.80	613.31	133.38
170	290.12	315.68	379.65	328.48	46.12	406.63	371.28	500.28	426.06	66.66	607.91	730.96	453.72	597.53	138.91
180	282.40	302.67	362.96	316.01	41.90	399.65	350.16	480.04	409.95	65.55	592.14	719.59	436.62	582.78	141.72

ตารางผนวก ง1-1 (ต่อ)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	278.25	274.39	302.91	285.18	15.47	385.59	345.96	467.16	399.57	61.80	590.23	642.39	376.52	536.38	140.88
200	269.71	274.07	301.65	281.81	17.32	363.41	342.65	465.26	390.44	65.62	559.14	640.54	352.97	517.55	148.23
210	260.51	273.98	300.87	278.45	20.55	364.59	342.02	463.89	390.17	64.84	527.15	637.48	347.56	504.06	146.33
220	263.13	271.65	299.95	278.24	19.28	368.85	340.27	456.40	388.51	60.51	489.86	599.87	345.26	478.33	127.70
230	258.22	270.03	299.17	275.81	21.08	344.43	338.56	441.55	374.85	57.84	469.47	561.05	340.62	457.05	110.74
240	257.39	262.49	298.57	272.82	22.45	332.98	337.36	435.94	368.76	58.22	402.86	523.37	339.01	421.75	93.62
250	257.03	258.64	298.35	271.34	23.41	325.91	315.21	431.21	357.44	64.11	306.56	476.48	327.59	370.21	92.63
260	253.38	251.25	297.79	267.47	26.28	319.08	288.39	424.14	343.87	71.19	255.44	432.28	330.65	339.46	88.75
270	251.97	248.13	297.54	265.88	27.49	319.83	267.11	415.25	334.06	75.09	220.86	397.56	317.28	311.90	88.47
280	149.65	145.03	165.86	153.51	10.94	362.95	318.48	465.71	382.38	75.51	202.99	330.98	256.61	263.53	64.27
290	150.32	144.87	164.18	153.12	9.96	341.42	306.05	452.67	366.71	76.51	186.44	310.27	254.35	250.35	62.01
300	148.43	144.63	163.95	152.34	10.24	327.55	298.92	435.07	353.85	71.78	168.34	295.07	255.67	239.69	64.86
310	146.03	145.01	162.18	151.07	9.63	316.76	282.31	414.53	337.87	68.59	152.21	262.59	245.98	220.26	59.52
320	146.08	144.06	162.05	150.73	9.86	313.58	280.63	393.95	329.39	58.29	141.97	215.26	235.12	197.45	49.06
330	146.01	143.96	160.97	150.31	9.29	308.83	275.26	371.24	318.44	48.71	132.63	198.65	202.78	178.02	39.36
340	145.97	143.21	158.12	149.10	7.93	303.18	263.34	367.30	311.27	52.45	130.95	185.32	197.52	171.26	35.44
350	145.53	141.58	154.04	147.05	6.37	298.62	249.06	352.23	299.97	51.60	126.22	163.89	155.92	148.68	19.85
360	143.76	140.67	152.57	145.67	6.17	298.07	238.75	335.94	290.92	48.99	123.59	151.68	126.14	133.80	15.53

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-2 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	138.84	137.93	134.06	136.94	2.54	272.88	290.82	286.59	283.43	9.38	555.89	568.00	560.55	561.48	6.11
5	515.73	537.43	520.56	524.57	11.39	1070.03	1101.04	1097.51	1089.53	16.98	1904.06	1737.11	1810.95	1817.37	83.66
10	637.51	636.49	644.57	639.52	4.40	1303.33	1239.81	1295.63	1279.59	34.66	1941.80	1503.46	1780.02	1741.76	221.66
20	1231.06	1272.14	1296.66	1266.62	33.15	2112.38	2115.21	2586.02	2271.20	272.64	3038.60	2130.29	2681.72	2616.87	457.61
30	1093.49	1209.22	1286.47	1196.39	97.13	1493.24	1737.35	1617.11	1615.90	122.06	2849.89	1924.57	2549.24	2441.23	472.02
40	1006.89	1205.09	1214.88	1142.29	117.36	1395.23	1480.79	1386.74	1420.92	52.02	2358.01	1650.16	2301.87	2103.35	393.47
50	963.10	1055.56	1112.68	1043.78	75.48	1266.74	1275.93	1164.59	1235.75	61.80	1773.89	1524.96	1653.77	1650.87	124.49
60	839.51	956.12	1089.25	961.63	124.96	1242.50	1154.86	1140.67	1179.34	55.15	1602.38	1436.21	1592.86	1543.82	93.31
70	794.32	940.51	1030.10	921.64	119.02	1198.62	1030.31	1106.41	1111.78	84.28	1471.40	1385.30	1397.41	1418.04	46.61
80	773.75	858.81	969.02	867.19	97.90	1121.95	956.81	1075.69	1051.48	85.19	1366.20	1289.47	1308.72	1321.46	39.92
90	707.34	855.08	888.68	817.03	96.47	1057.20	900.69	1004.86	987.58	79.67	1275.31	1198.02	1203.14	1225.49	43.22
100	667.41	597.77	591.04	618.74	42.28	858.71	699.69	732.68	763.69	83.92	1201.57	1065.41	1167.36	1144.78	70.83
110	658.18	596.04	586.85	613.69	38.80	825.79	649.88	731.75	735.81	88.03	1127.16	1030.70	1106.78	1088.21	50.84
120	635.61	593.78	589.86	606.42	25.36	785.82	626.14	728.08	713.35	80.85	1078.03	1007.58	1052.20	1045.94	35.64
130	634.51	586.79	585.35	602.22	27.98	773.26	621.67	727.96	707.63	77.81	1038.11	897.68	966.95	967.58	70.22
140	632.56	586.20	582.09	600.28	28.03	758.58	611.92	730.59	700.36	77.86	1010.63	840.67	905.71	919.00	85.76
150	632.30	585.12	578.68	598.70	29.28	743.32	593.65	726.37	687.78	81.96	975.55	830.65	900.01	902.07	72.47
160	633.00	582.61	556.57	590.73	38.86	726.26	576.75	719.89	674.30	84.54	952.38	800.57	897.23	883.39	76.85
170	612.74	580.49	550.97	581.40	30.90	714.10	563.16	702.56	659.94	84.01	925.40	792.91	856.88	858.40	66.26
180	609.63	539.75	550.19	566.52	37.69	709.63	542.83	698.04	650.17	93.14	898.69	758.19	800.96	819.28	72.02

ตารางผนวก ง1-2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	521.06	500.00	446.94	489.33	38.19	501.45	496.12	526.39	507.99	16.16	829.64	743.31	809.29	794.08	45.13
200	540.38	498.11	402.37	480.29	70.71	489.45	477.57	525.44	497.49	24.93	810.32	725.87	800.12	778.77	46.10
210	497.87	477.63	397.95	457.82	52.82	482.62	464.12	523.11	489.95	30.17	782.47	708.64	754.97	748.69	37.31
220	491.10	476.90	397.57	455.19	50.40	463.02	446.62	523.07	477.57	40.25	776.94	700.83	736.70	738.16	38.08
230	450.71	464.64	397.26	437.54	35.57	471.26	442.54	520.26	478.02	39.30	757.08	697.92	724.92	726.64	29.62
240	425.99	443.13	396.93	422.02	23.35	458.13	429.63	515.96	467.91	43.99	745.62	693.91	717.04	718.86	25.90
250	424.71	442.31	395.81	420.94	23.48	458.12	414.56	509.43	460.70	47.49	730.51	673.52	709.86	704.63	28.85
260	414.92	441.68	393.42	416.67	24.18	447.73	391.94	502.27	447.31	55.17	718.30	672.54	695.71	695.52	22.88
270	411.29	440.19	390.74	414.07	24.84	439.67	400.10	499.05	446.27	49.80	718.01	671.82	689.05	692.96	23.34
280	365.60	431.60	616.01	471.07	129.79	434.20	356.88	427.26	406.11	42.78	662.82	643.52	671.89	659.41	14.49
290	364.58	415.17	581.64	453.80	113.57	420.10	334.34	424.79	393.08	50.92	645.43	637.18	664.15	648.92	13.82
300	366.60	395.43	350.70	370.91	22.67	416.14	342.76	423.48	394.13	44.64	627.61	629.96	662.97	640.18	19.77
310	367.37	394.62	346.26	369.42	24.24	420.24	337.11	420.56	392.64	48.09	616.14	618.64	660.05	631.61	24.66
320	366.94	394.07	344.12	368.38	25.01	417.39	314.67	419.27	383.78	59.86	612.42	610.42	577.24	600.03	19.76
330	365.78	392.98	341.03	366.60	25.98	415.41	304.78	416.96	379.05	64.32	601.64	609.84	532.33	581.27	42.58
340	349.88	392.59	340.58	361.02	27.74	406.48	297.14	412.11	371.91	64.81	593.45	600.91	531.76	575.37	37.95
350	336.55	392.45	339.45	356.15	31.47	402.84	290.98	405.63	366.48	65.40	623.60	587.49	525.46	578.85	49.64
360	343.95	391.70	334.35	356.67	30.72	359.58	291.12	394.07	348.26	52.40	416.50	578.86	497.21	497.52	81.18

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-3 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	137.90	120.04	123.83	127.26	9.41	258.43	223.43	247.16	243.01	17.87	391.58	323.50	419.94	378.34	49.56
5	377.68	437.10	319.42	378.07	58.84	552.44	460.61	520.07	511.04	46.58	554.49	571.30	657.66	594.48	55.35
10	326.34	399.43	277.84	334.54	61.21	442.81	369.86	430.96	414.54	39.15	457.25	448.36	515.27	473.63	36.34
20	496.74	581.05	403.39	493.73	88.87	666.97	551.02	569.54	595.84	62.29	680.62	651.33	768.74	700.23	61.11
30	186.04	460.49	316.55	321.03	137.28	513.47	441.36	494.71	483.18	37.41	420.61	510.32	608.00	512.98	93.72
40	177.44	359.57	267.11	268.04	91.07	441.99	376.92	391.95	403.62	34.07	362.05	434.97	515.09	437.37	76.55
50	166.17	305.27	235.97	235.80	69.55	395.74	336.83	375.35	369.31	29.92	325.25	376.79	464.68	388.91	70.50
60	166.56	268.46	223.95	219.66	51.09	351.34	307.08	297.40	318.61	28.76	295.75	338.11	428.06	353.97	67.57
70	164.47	241.88	203.56	203.30	38.71	321.60	278.61	248.59	282.93	36.70	274.65	310.66	396.61	327.31	62.66
80	162.13	221.27	190.58	191.33	29.58	293.37	259.13	245.97	266.16	24.47	258.35	287.56	374.45	306.79	60.39
90	158.85	204.85	178.37	180.69	23.09	279.54	244.48	244.13	256.05	20.34	245.45	268.66	348.84	287.65	54.25
100	121.75	114.13	104.78	113.55	8.50	222.54	232.50	238.54	231.19	8.08	225.22	218.28	220.28	221.26	3.57
110	119.40	112.84	103.25	111.83	8.12	225.21	217.53	210.36	217.70	7.43	216.24	211.50	214.74	214.16	2.42
120	116.58	105.96	99.67	107.40	8.55	220.70	205.72	186.32	204.25	17.24	209.07	208.09	208.51	208.56	0.49
130	112.38	105.49	97.73	105.20	7.33	213.98	199.27	185.75	199.67	14.12	201.56	201.14	201.54	201.41	0.24
140	111.98	105.30	95.46	104.25	8.31	196.60	199.10	184.31	193.34	7.92	194.09	195.84	194.79	194.91	0.88
150	111.87	105.01	92.17	103.02	10.00	199.72	189.66	183.94	191.11	7.99	189.19	193.20	190.55	190.98	2.04
160	111.24	104.65	92.21	102.70	9.66	195.64	187.56	182.91	188.70	6.44	181.56	183.14	182.64	182.45	0.81
170	109.93	101.56	92.20	101.23	8.87	189.23	186.97	182.50	186.23	3.42	175.12	178.25	176.84	176.74	1.57
180	107.78	100.36	91.89	100.01	7.95	184.60	185.76	182.19	184.18	1.82	173.15	175.34	174.23	174.24	1.10

ตารางผนวก ง1-3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	90.88	92.80	91.69	91.79	0.96	171.08	165.96	173.83	170.29	3.99	164.22	161.22	141.07	155.50	12.59
200	87.66	91.34	91.49	90.16	2.17	165.67	156.23	165.95	162.62	5.53	158.79	158.24	135.91	150.98	13.05
210	87.04	89.01	90.89	88.98	1.93	189.13	146.78	163.91	166.61	21.30	155.85	156.02	135.25	149.04	11.94
220	87.02	87.44	90.60	88.35	1.96	159.28	140.66	147.19	149.04	9.45	152.55	153.68	135.15	147.13	10.39
230	87.00	86.02	90.29	87.77	2.24	156.37	134.66	140.13	143.72	11.29	151.59	150.74	134.12	145.48	9.85
240	86.99	85.06	90.10	87.38	2.54	153.44	129.10	134.02	138.85	12.87	146.99	148.83	133.97	143.26	8.10
250	86.59	84.31	89.59	86.83	2.65	150.39	125.42	131.03	135.61	13.10	144.70	146.51	133.87	141.69	6.84
260	86.04	82.16	88.90	85.70	3.38	145.10	119.28	128.78	131.05	13.06	140.08	145.19	133.07	139.45	6.08
270	85.99	82.36	88.50	85.62	3.09	145.70	115.41	125.00	128.70	15.48	140.19	143.67	132.85	138.90	5.52
280	82.19	77.90	86.02	82.04	4.06	143.87	107.42	94.82	115.37	25.47	135.08	145.03	135.72	138.61	5.57
290	81.98	75.40	84.30	80.56	4.62	142.58	106.77	94.67	114.67	24.91	126.07	141.42	135.10	134.20	7.71
300	79.86	71.90	84.64	78.80	6.44	139.50	105.90	89.61	111.67	25.44	122.38	136.72	134.91	131.34	7.81
310	78.04	71.19	83.39	77.54	6.12	137.56	104.80	89.72	110.69	24.46	121.02	135.36	134.79	130.39	8.12
320	75.27	70.31	82.14	75.91	5.94	135.75	103.73	88.03	109.17	24.32	119.09	133.25	134.75	129.03	8.64
330	75.14	69.90	81.90	75.65	6.02	134.49	122.51	86.65	114.55	24.89	118.06	128.76	134.74	127.19	8.45
340	75.02	68.04	81.49	74.85	6.73	133.20	96.50	84.65	104.78	25.31	116.23	129.56	134.60	126.80	9.49
350	74.98	66.24	81.30	74.17	7.56	129.60	95.02	82.68	102.43	24.32	112.76	128.09	134.40	125.08	11.13
360	74.49	66.84	81.23	74.19	7.20	120.59	92.56	82.25	98.47	19.84	113.31	124.83	134.35	124.16	10.54

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-4 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	90.49	123.54	126.88	113.64	20.12	260.04	229.74	248.73	246.17	15.31	455.62	518.23	420.53	464.79	49.49
5	222.84	453.56	426.32	367.57	126.08	769.82	544.66	670.79	661.76	112.85	943.46	1191.07	937.67	1024.07	144.66
10	229.69	363.74	361.83	318.42	76.85	509.83	250.40	402.65	387.63	130.37	399.31	519.64	453.98	457.64	60.25
20	396.89	447.99	408.13	417.67	26.85	422.03	240.15	357.66	339.95	92.22	349.15	404.48	394.58	382.74	29.51
30	345.91	252.84	216.98	271.91	66.55	240.52	164.77	202.96	202.75	37.88	209.57	241.55	231.96	227.69	16.41
40	300.72	179.52	152.71	210.98	78.86	174.92	136.28	151.35	154.18	19.48	170.50	165.19	166.14	167.28	2.83
50	238.99	143.59	122.50	168.36	62.07	145.88	119.54	125.33	130.25	13.84	140.75	134.90	137.52	137.72	2.93
60	185.28	123.00	105.09	137.79	42.09	129.34	108.82	111.20	116.45	11.22	124.59	117.43	121.85	121.29	3.61
70	133.33	114.48	95.65	114.49	18.84	117.16	102.44	105.48	108.36	7.77	113.30	105.57	108.95	109.27	3.88
80	101.45	101.09	87.63	96.72	7.88	108.79	95.59	96.55	100.31	7.36	105.31	97.02	102.21	101.51	4.19
90	96.86	92.05	81.98	90.30	7.59	102.63	92.16	89.52	94.77	6.93	99.19	91.31	95.88	95.46	3.96
100	123.50	137.41	101.46	120.79	18.13	144.29	103.30	95.76	114.45	26.12	111.11	108.55	109.85	109.84	1.28
110	95.64	113.06	89.25	99.32	12.32	127.13	95.08	86.93	103.05	21.25	105.80	96.35	98.20	100.12	5.01
120	90.24	100.07	82.37	90.89	8.87	115.91	91.48	82.74	96.71	17.19	93.68	89.16	90.86	91.23	2.28
130	89.53	92.78	77.71	86.67	7.93	107.42	89.50	76.92	91.28	15.33	87.95	84.09	86.12	86.05	1.93
140	87.98	89.20	73.84	83.67	8.54	100.33	86.66	74.19	87.06	13.07	84.15	80.01	81.62	81.93	2.09
150	80.59	82.48	70.32	77.80	6.54	94.60	83.88	70.89	83.12	11.87	81.28	76.27	79.24	78.93	2.52
160	75.23	78.98	67.33	73.85	5.95	89.85	80.68	67.63	79.39	11.17	78.26	73.86	76.68	76.27	2.23
170	72.89	75.24	64.02	70.72	5.92	85.53	78.47	67.00	77.00	9.35	76.61	69.84	72.95	73.13	3.39
180	69.84	72.83	63.24	68.64	4.91	81.77	76.85	64.25	74.29	9.04	74.20	69.87	71.85	71.97	2.17

ตารางผนวก ง1-4 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	79.35	79.59	65.56	74.83	8.03	92.62	89.29	70.22	84.04	12.09	80.00	72.02	75.82	75.95	3.99
200	70.50	73.57	63.81	69.29	4.99	83.02	83.95	66.59	77.85	9.77	75.92	69.41	73.51	72.95	3.29
210	65.35	70.68	59.57	65.20	5.56	78.59	81.15	63.70	74.48	9.42	72.67	66.74	70.25	69.89	2.98
220	64.38	67.34	57.54	63.09	5.03	73.51	78.30	61.94	71.25	8.41	70.12	64.75	69.84	68.24	3.02
230	63.89	65.17	55.57	61.54	5.21	70.86	75.76	60.17	68.93	7.97	68.20	61.51	68.13	65.95	3.84
240	63.08	63.19	54.28	60.18	5.11	68.06	73.10	58.61	66.59	7.36	66.40	60.43	67.59	64.81	3.84
250	60.89	61.61	53.11	58.54	4.71	67.05	71.66	56.31	65.01	7.88	64.78	57.88	67.15	63.27	4.82
260	60.58	60.00	51.77	57.45	4.93	64.06	69.86	55.40	63.11	7.28	62.97	67.06	66.91	65.65	2.32
270	60.12	58.57	50.90	56.53	4.94	61.70	67.83	54.06	61.20	6.90	61.82	54.43	66.53	60.93	6.10
280	61.57	64.20	52.27	59.35	6.27	68.11	72.90	56.86	65.96	8.23	64.73	61.18	68.24	64.72	3.53
290	61.28	61.14	50.46	57.63	6.21	63.98	70.01	54.64	62.88	7.74	62.23	58.53	67.14	62.63	4.32
300	60.53	59.09	49.01	56.21	6.28	61.76	67.25	52.76	60.59	7.32	60.46	56.64	65.28	60.79	4.33
310	59.88	57.01	47.71	54.87	6.36	60.03	65.02	51.31	58.79	6.94	57.42	55.07	65.10	59.20	5.25
320	58.66	55.53	46.71	53.63	6.20	57.90	62.00	49.94	56.61	6.13	57.65	53.66	64.81	58.71	5.65
330	58.36	54.43	45.86	52.88	6.39	56.41	60.34	48.73	55.16	5.91	55.28	51.42	64.37	57.02	6.65
340	57.78	53.15	45.04	51.99	6.45	55.03	57.31	46.60	52.98	5.64	55.10	51.36	63.68	56.71	6.32
350	57.77	52.10	43.91	51.26	6.97	53.77	58.83	46.60	53.07	6.15	54.10	49.83	63.26	55.73	6.86
360	56.12	51.15	44.07	50.45	6.06	50.40	57.18	45.56	51.05	5.84	52.90	49.08	62.97	54.98	7.18

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-5 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียสังเคราะห์รวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	145.34	162.37	139.86	149.19	11.74	308.03	410.67	300.25	339.65	61.63	559.22	617.52	516.59	564.44	50.67
5	552.93	580.72	507.61	547.09	36.90	1076.35	1178.52	1023.95	1092.94	78.61	1749.45	1806.74	1704.31	1753.50	51.33
10	657.75	687.62	602.49	649.29	43.19	1060.63	1154.32	1020.96	1078.64	68.48	1430.55	1521.72	1386.54	1446.27	68.95
20	1168.46	1257.58	1097.23	1174.42	80.34	1578.90	1674.86	1497.84	1583.87	88.61	1790.71	1845.21	1746.39	1794.10	49.50
30	1022.87	1132.65	998.22	1051.25	71.57	1216.36	1314.25	1200.08	1243.56	61.76	1360.42	1410.85	1314.28	1361.85	48.30
40	865.28	899.78	816.74	860.60	41.72	1035.60	1126.87	997.62	1053.36	66.43	1170.46	1220.26	1127.26	1172.66	46.54
50	763.49	851.16	722.58	779.08	65.69	919.41	1007.22	900.50	942.38	56.95	1063.86	1117.59	1002.03	1061.16	57.83
60	720.00	742.31	705.66	722.66	18.47	827.66	932.77	804.86	855.10	68.23	965.31	1024.37	912.47	967.38	55.98
70	641.43	703.57	627.08	657.36	40.66	765.76	854.53	724.12	781.47	66.61	892.23	945.26	846.51	894.67	49.42
80	607.36	686.11	596.56	630.01	48.88	706.96	802.59	697.43	735.66	58.16	843.43	896.59	793.27	844.43	51.67
90	577.88	633.89	547.82	586.53	43.68	669.01	791.81	625.79	695.54	86.13	799.38	855.67	758.44	804.50	48.82
100	363.65	472.59	350.63	395.62	66.97	586.99	676.58	567.31	610.29	58.24	757.84	806.58	703.12	755.85	51.76
110	363.17	465.21	349.17	392.52	63.34	550.35	661.32	526.23	579.30	72.05	727.45	782.65	679.58	729.89	51.58
120	352.48	451.94	348.65	384.36	58.56	542.63	658.12	504.20	568.32	80.11	704.47	754.87	653.47	704.27	50.70
130	350.06	432.65	336.75	373.15	51.95	529.02	641.84	499.38	556.75	75.17	679.01	726.52	628.16	677.90	49.19
140	349.13	431.27	326.18	368.86	55.25	520.73	635.86	487.62	548.07	77.81	665.91	715.19	614.72	665.27	50.24
150	347.72	428.56	311.95	362.74	59.74	511.65	621.18	485.55	539.46	71.96	638.82	685.74	587.38	637.31	49.20
160	345.47	427.27	297.62	356.79	65.56	496.71	620.57	484.93	534.07	75.14	616.64	669.08	542.96	609.56	63.36
170	342.87	415.65	282.61	347.04	66.62	482.31	617.25	482.61	527.39	77.82	593.36	642.76	537.63	591.25	52.60
180	339.46	413.89	281.24	344.86	66.49	474.14	615.36	480.07	523.19	79.88	576.30	615.37	529.84	573.84	42.82

ตารางผนวก ง1-5 (ต่อ)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	312.02	386.53	276.56	325.04	56.13	457.02	547.38	423.67	476.02	64.01	569.44	602.87	513.72	562.01	45.04
200	311.43	385.69	275.14	324.09	56.35	435.93	545.08	420.54	467.18	67.90	548.06	596.32	493.02	545.80	51.69
210	305.08	382.61	268.45	318.71	58.29	424.62	544.73	416.17	461.84	71.91	536.80	575.24	481.46	531.17	47.14
220	302.95	356.95	252.57	304.16	52.20	432.18	539.85	415.63	462.55	67.45	518.12	572.12	476.77	522.34	47.81
230	298.73	342.37	247.02	296.04	47.73	420.46	535.10	411.45	455.67	68.94	508.49	563.44	465.94	512.62	48.88
240	294.14	336.56	246.48	292.39	45.07	412.04	528.66	406.88	449.19	68.87	494.54	557.94	450.39	500.96	54.06
250	293.44	327.68	239.78	286.97	44.31	412.61	526.08	394.92	444.54	71.17	481.85	542.68	442.89	489.14	50.29
260	291.94	326.21	227.90	282.02	49.90	408.57	517.42	390.26	438.75	68.74	472.44	540.27	437.20	483.30	52.39
270	289.31	324.64	224.91	279.62	50.57	400.35	508.57	386.59	431.84	66.81	471.26	536.81	428.33	478.80	54.63
280	325.92	432.65	252.19	336.92	90.73	475.33	631.34	454.17	520.28	96.76	529.14	573.56	476.63	526.44	48.52
290	287.30	351.25	212.36	283.64	69.52	456.74	627.96	443.23	509.31	102.98	490.13	556.97	465.84	504.31	47.19
300	285.38	345.59	210.65	280.54	67.60	438.62	571.27	420.56	476.82	82.30	473.64	532.22	457.23	487.70	39.42
310	284.42	343.94	207.35	278.57	68.48	413.50	563.91	412.22	463.21	87.21	457.66	527.59	436.95	474.07	47.50
320	284.92	341.65	207.19	277.92	67.50	376.80	548.46	401.52	442.26	92.80	444.60	516.08	429.17	463.28	46.37
330	284.12	340.09	206.67	276.96	67.00	373.72	542.26	396.23	437.40	91.50	435.49	492.71	413.78	447.33	40.77
340	283.29	336.63	205.59	275.17	65.90	369.33	528.34	393.17	430.28	85.75	428.15	481.84	384.91	431.63	48.56
350	283.30	335.26	205.36	274.64	65.38	368.26	526.69	390.37	428.44	85.80	418.63	475.11	379.65	424.46	48.00
360	280.30	328.90	210.22	273.14	59.66	365.63	524.27	387.56	425.82	85.96	411.52	463.51	364.77	413.27	49.39

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-6 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	152.28	147.56	176.14	158.66	15.32	271.49	284.97	253.58	270.01	15.75	507.36	625.30	496.74	543.13	71.36
5	571.83	554.72	652.84	593.13	52.41	1028.26	1106.85	987.62	1040.91	60.61	1338.30	1568.75	1257.32	1388.12	161.58
10	699.12	675.38	788.57	721.02	59.69	1218.28	1328.57	1196.16	1247.67	70.93	1052.32	1267.16	994.95	1104.81	143.50
20	1308.57	1293.69	1552.69	1384.98	145.43	2028.86	2158.29	1987.34	2058.16	89.16	1487.67	1635.84	1367.48	1497.00	134.42
30	1312.76	1157.34	1487.39	1319.16	165.12	1458.81	1597.86	1368.25	1474.97	115.66	1134.73	1359.33	1056.27	1183.44	157.29
40	1249.24	1083.60	1405.71	1246.18	161.08	1079.24	1129.61	996.47	1068.44	67.22	946.71	1157.89	822.15	975.58	169.72
50	1183.76	975.74	1398.82	1186.11	211.55	890.05	985.78	765.28	880.37	110.57	841.35	1064.32	764.29	889.99	155.82
60	1113.93	958.01	1239.21	1103.72	140.88	768.68	826.94	674.93	756.85	76.69	759.01	946.24	639.22	781.49	154.74
70	1045.59	946.28	1195.40	1062.42	125.41	699.41	752.39	584.15	678.65	86.02	699.08	832.39	587.76	706.41	122.48
80	977.94	932.15	1102.37	1004.15	88.09	630.69	745.68	527.96	634.78	108.92	645.09	815.74	553.18	671.34	133.23
90	926.18	908.26	1095.87	976.77	103.53	588.36	698.76	495.35	594.16	101.83	618.70	803.27	546.72	656.23	132.33
100	378.16	387.45	728.56	498.06	199.68	890.17	938.14	764.57	864.29	89.63	912.17	1162.79	858.23	977.73	162.52
110	389.89	376.68	712.48	493.02	190.18	650.05	915.64	583.98	716.56	175.55	817.59	1003.64	793.42	871.55	115.03
120	377.08	368.51	684.26	476.62	179.88	553.88	872.96	469.27	632.04	212.89	739.67	958.62	654.19	784.16	157.02
130	368.96	366.56	655.72	463.75	166.26	516.12	853.15	428.39	599.22	224.24	697.94	814.37	576.93	696.41	118.73
140	396.48	364.18	653.71	471.46	158.66	475.50	827.39	382.71	561.87	234.58	658.21	773.50	554.84	662.18	109.38
150	376.24	363.72	627.89	455.95	149.04	438.74	786.82	354.62	526.73	229.14	638.48	751.85	532.77	641.03	109.56
160	363.44	360.85	594.32	439.54	134.05	424.01	744.27	307.93	492.07	225.99	615.34	747.83	486.56	616.58	130.64
170	379.82	359.24	583.74	440.93	124.10	415.68	716.92	295.56	476.05	217.07	598.04	736.94	475.39	603.46	130.86
180	368.89	358.05	567.07	431.34	117.67	396.99	657.74	282.46	445.73	192.33	588.49	725.69	467.22	593.80	129.32

ตารางผนวก ง1-6 (ต่อ)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	453.87	437.52	596.41	495.93	87.40	697.69	796.42	548.56	680.89	124.78	592.36	798.54	498.42	629.77	153.52
200	428.89	425.03	584.32	479.41	90.87	572.96	772.15	496.23	613.78	142.42	568.92	785.29	483.73	612.65	155.46
210	428.97	417.98	563.95	470.30	81.29	497.98	708.55	465.71	557.41	131.88	561.21	776.37	471.95	603.18	156.49
220	412.91	405.69	549.77	456.12	81.18	441.98	655.89	396.16	498.01	138.63	546.32	765.49	466.84	592.88	154.67
230	409.65	396.83	534.29	446.92	75.93	398.74	612.74	354.96	455.48	137.94	532.73	762.81	457.12	584.22	159.22
240	402.07	392.28	518.09	437.48	69.98	383.52	578.66	343.21	435.13	125.92	535.16	757.91	449.61	580.89	159.16
250	397.10	385.97	497.03	426.70	61.16	365.21	543.27	325.87	411.45	115.84	521.85	742.46	435.87	566.73	158.14
260	395.35	381.84	495.59	424.26	62.14	345.72	519.32	292.56	385.87	118.59	518.12	737.63	428.25	561.33	159.15
270	393.46	379.91	488.16	420.51	58.98	332.73	485.62	285.74	368.03	104.51	509.18	721.89	413.69	548.25	157.77
280	411.15	408.67	565.89	461.90	90.06	366.07	526.59	307.96	400.21	113.24	514.20	746.58	437.26	566.01	161.04
290	402.78	395.27	558.21	452.09	91.98	301.58	517.82	295.74	371.71	126.57	501.36	725.66	426.57	551.20	155.65
300	405.64	386.83	516.84	436.44	70.26	291.01	506.35	286.59	361.32	125.62	495.92	703.98	422.09	540.66	146.17
310	371.06	374.11	507.66	417.61	78.00	290.95	499.18	221.77	337.30	144.40	490.24	694.72	413.83	532.93	145.23
320	367.50	362.97	483.09	404.52	68.08	288.48	498.27	265.82	350.86	128.17	479.85	685.69	405.91	523.82	144.98
330	356.75	358.56	476.59	397.30	68.67	288.34	492.56	257.31	346.07	127.81	481.42	662.36	398.56	514.11	134.90
340	352.22	322.45	453.27	375.98	68.57	287.39	485.87	264.54	345.93	121.73	474.21	650.45	384.35	503.00	135.37
350	332.48	307.01	431.65	357.05	65.85	281.60	476.77	258.48	338.95	119.91	469.19	647.12	372.92	496.41	139.11
360	307.03	296.40	402.99	335.47	58.71	274.44	462.34	247.35	328.04	117.09	411.15	633.01	364.59	469.58	143.43

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-7 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	142.99	145.69	138.59	142.42	3.58	288.40	308.56	296.57	297.84	10.14	552.73	546.68	487.29	528.90	36.16
5	508.70	518.74	487.64	505.03	15.87	1051.08	1151.08	1127.82	1109.99	52.33	1566.58	1587.74	1674.23	1609.52	57.03
10	573.76	586.52	552.08	570.79	17.41	1128.91	1227.45	1136.46	1164.27	54.84	1475.80	1526.15	1506.87	1502.94	25.40
20	1006.51	1036.98	998.43	1013.97	20.33	1776.37	1854.93	1795.14	1808.81	41.03	2910.16	2856.36	2819.65	2862.06	45.52
30	877.95	896.59	856.77	877.10	19.92	1433.74	1571.86	1457.93	1487.84	73.76	2204.46	2136.24	2407.18	2249.29	140.92
40	776.61	798.82	742.05	772.49	28.61	1328.44	1436.51	1345.62	1370.19	58.07	1859.10	1748.96	1956.59	1854.88	103.88
50	697.34	716.59	699.12	704.35	10.64	1127.11	1237.74	1141.74	1168.86	60.10	1830.42	1699.74	1925.87	1818.68	113.52
60	635.56	642.74	614.56	630.95	14.64	1034.98	1156.18	1052.35	1081.17	65.54	1634.73	1527.86	1786.23	1649.61	129.83
70	605.16	587.79	603.12	598.69	9.49	959.67	1027.35	967.15	984.72	37.10	1478.08	1421.16	1565.46	1488.23	72.68
80	591.73	563.84	586.11	580.56	14.75	868.37	974.32	874.79	905.83	59.40	1411.37	1396.59	1512.59	1440.18	63.14
90	565.33	547.81	554.38	555.84	8.85	833.49	956.44	856.63	882.19	65.34	1363.08	1281.63	1436.25	1360.32	77.35
100	221.98	257.39	208.96	229.44	25.06	753.24	864.13	742.85	786.74	67.22	1247.23	1194.97	1365.74	1269.31	87.50
110	213.57	241.57	205.48	220.21	18.94	711.57	824.56	706.57	747.57	66.73	1167.04	1056.63	1259.82	1161.16	101.72
120	209.01	240.96	198.54	216.17	22.10	681.10	774.21	675.63	710.31	55.40	1101.76	1028.48	1197.23	1109.16	84.62
130	207.07	239.51	195.38	213.99	22.86	655.30	758.96	642.01	685.42	64.03	1067.55	996.32	1106.57	1056.81	55.90
140	198.92	237.64	192.74	209.77	24.34	648.53	746.32	631.85	675.57	61.84	1034.95	992.71	1085.64	1037.77	46.53
150	195.00	235.87	189.06	206.64	25.48	622.97	731.59	615.47	656.68	64.99	953.25	987.64	1003.44	981.44	25.66
160	194.45	221.66	185.13	200.41	18.98	622.98	730.61	608.76	654.12	66.63	931.40	982.56	976.56	963.51	27.97
170	193.72	220.94	178.71	197.79	21.41	599.09	687.48	605.11	630.56	49.39	909.33	954.48	954.63	939.48	26.11
180	192.31	219.67	176.24	196.07	21.96	589.88	642.39	602.43	611.57	27.42	837.23	936.57	937.18	903.66	57.53

ตารางผนวก ง1-7(ต่อ)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	239.52	257.69	218.49	238.57	19.62	566.92	614.87	585.63	589.14	24.17	829.53	854.29	867.45	850.42	19.25
200	238.04	254.37	215.56	235.99	19.49	532.23	603.72	557.82	564.59	36.22	834.34	850.54	856.24	847.04	11.36
210	234.60	242.83	206.94	228.12	18.80	524.44	596.57	534.19	551.73	39.13	798.40	794.72	834.59	809.24	22.03
220	226.04	229.14	197.82	217.67	17.26	504.63	594.38	527.31	542.11	46.67	777.89	781.93	798.69	786.17	11.03
230	223.45	228.58	196.02	216.02	17.51	497.89	587.04	506.86	530.60	49.09	753.33	775.52	782.15	770.33	15.09
240	221.01	227.19	194.37	214.19	17.44	483.55	576.29	496.42	518.75	50.24	719.63	758.49	779.47	752.53	30.36
250	219.48	226.98	190.67	212.38	19.17	471.27	574.65	487.39	511.10	55.62	703.89	746.36	776.37	742.21	36.42
260	215.01	225.44	188.47	209.64	19.06	473.27	568.92	486.11	509.43	51.92	686.69	702.89	756.21	715.26	36.37
270	213.91	223.91	186.74	208.19	19.23	463.80	551.47	485.93	500.40	45.59	649.32	665.96	754.39	689.89	56.47
280	272.56	269.52	236.41	259.50	20.05	468.35	524.81	471.27	488.14	31.79	655.80	646.54	695.45	665.93	25.98
290	270.98	265.87	232.52	256.46	20.89	455.50	521.24	469.53	482.09	34.62	654.87	636.95	687.23	659.68	25.48
300	269.48	261.49	230.91	253.96	20.36	455.13	519.65	468.73	481.17	34.01	634.67	625.64	685.57	648.63	32.31
310	263.11	254.03	228.53	248.56	17.93	444.75	515.86	467.51	476.04	36.31	627.59	618.72	638.27	628.19	9.79
320	254.49	253.16	226.67	244.77	15.69	444.44	513.42	460.82	472.89	36.04	615.08	615.69	621.54	617.44	3.57
330	252.57	250.37	223.55	242.16	16.16	435.91	507.61	458.41	467.31	36.67	607.82	603.72	605.87	605.80	2.05
340	249.09	249.87	217.49	238.82	18.47	430.93	498.49	457.81	462.41	34.01	602.49	596.21	600.22	599.64	3.18
350	246.64	248.90	212.98	236.17	20.12	430.54	497.11	456.22	461.29	33.57	598.24	574.39	598.73	590.45	13.91
360	244.97	245.59	200.45	230.34	25.88	422.42	496.25	455.96	458.21	36.97	597.79	552.49	586.56	578.95	23.59

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-8 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	122.24	130.57	118.59	123.80	6.14	282.04	307.58	296.15	295.26	12.79	429.62	427.98	516.58	458.06	50.69
5	446.38	498.03	416.73	453.71	41.14	822.50	876.12	835.84	844.82	27.92	945.11	963.61	1072.82	993.85	69.02
10	467.96	527.24	425.38	473.53	51.16	691.32	738.96	727.14	719.14	24.81	644.38	657.14	784.68	695.40	77.58
20	712.58	823.58	668.94	735.03	79.73	1001.29	1157.78	1026.75	1061.94	83.97	953.21	951.32	1051.09	985.21	57.06
30	569.35	798.14	527.51	631.67	145.68	759.05	967.54	767.48	831.36	118.01	731.69	726.87	942.73	800.43	123.26
40	488.01	657.53	464.78	536.77	105.22	650.51	856.95	662.36	723.27	115.92	625.42	634.93	854.62	704.99	129.67
50	458.94	544.12	443.27	482.11	54.27	569.13	732.81	557.81	619.92	97.93	552.14	587.64	796.37	645.38	131.96
60	401.03	477.81	391.56	423.47	47.30	518.68	718.39	526.47	587.85	113.12	505.64	513.27	707.54	575.48	114.43
70	364.78	453.07	332.95	383.60	62.23	478.41	684.07	466.39	542.96	122.36	470.94	482.56	652.35	535.28	101.55
80	340.82	421.36	313.62	358.60	56.03	444.90	659.23	452.21	518.78	121.69	433.58	425.02	547.96	468.85	68.64
90	312.49	385.82	286.11	328.14	51.66	420.31	605.80	431.93	486.01	103.90	413.97	412.65	516.91	447.84	59.82
100	275.64	318.21	220.81	271.55	48.83	359.50	574.38	362.84	432.24	123.11	432.55	441.52	534.88	469.65	56.67
110	181.05	286.57	174.56	214.06	62.88	342.07	518.63	358.30	406.33	97.59	400.43	400.37	502.15	434.32	58.75
120	177.79	254.77	165.39	199.32	48.42	320.10	486.55	325.62	377.42	94.55	388.22	396.54	463.79	416.18	41.44
130	168.91	242.89	159.58	190.46	45.64	303.45	457.16	314.55	358.39	85.72	374.62	372.30	461.54	402.82	50.87
140	165.55	238.07	157.43	187.02	44.40	256.18	425.70	264.17	315.35	95.65	357.59	367.56	458.19	394.45	55.43
150	162.95	221.92	155.27	180.05	36.47	229.12	396.48	247.13	290.91	91.87	345.46	344.93	457.73	382.71	64.97
160	162.28	215.67	146.39	174.78	36.29	219.49	394.27	219.56	277.77	100.89	334.78	322.76	448.23	368.59	69.23
170	162.95	198.58	142.51	168.01	28.38	219.33	392.56	208.39	273.43	103.32	329.54	327.56	436.84	364.65	62.53
180	156.52	196.95	140.85	164.77	28.95	215.64	370.58	206.54	264.25	92.19	316.61	317.28	429.52	354.47	65.00

ตารางผนวก ง1-8 (ต่อ)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	153.10	176.36	138.54	156.00	19.08	238.91	396.72	226.87	287.50	94.78	334.44	326.95	455.87	372.42	72.37
200	151.69	174.52	136.14	154.12	19.30	214.05	369.22	217.93	267.07	88.49	318.44	315.74	426.35	353.51	63.10
210	152.23	172.64	132.08	152.32	20.28	207.29	354.84	215.80	259.31	82.84	307.90	304.62	408.22	340.21	58.92
220	149.59	171.05	127.52	149.39	21.77	210.01	336.57	212.36	252.98	72.40	299.71	298.98	397.58	332.09	56.72
230	147.27	168.84	126.95	147.69	20.95	207.35	324.86	208.84	247.02	67.42	293.33	295.47	396.42	328.41	58.91
240	146.65	165.39	123.74	145.26	20.86	204.51	319.03	203.99	242.51	66.27	282.84	287.56	375.74	315.38	52.33
250	143.31	163.71	120.83	142.62	21.45	211.15	296.75	202.43	236.78	52.12	275.89	275.64	369.93	307.15	54.37
260	143.10	162.56	118.55	141.40	22.05	199.90	287.98	200.18	229.35	50.77	270.32	264.96	351.66	295.65	48.58
270	139.38	161.34	115.46	138.73	22.95	198.15	286.15	197.45	227.25	51.01	265.10	251.58	346.35	287.68	51.26
280	145.74	166.57	128.72	147.01	18.96	197.27	274.81	196.56	222.88	44.97	275.34	268.57	368.14	304.02	55.64
290	138.23	158.66	114.67	137.19	22.01	193.59	266.82	195.17	218.53	41.83	262.29	262.35	354.73	293.12	53.35
300	133.39	157.32	112.54	134.42	22.41	191.62	261.29	193.64	215.52	39.65	256.93	257.68	312.68	275.76	31.97
310	131.77	156.69	110.83	133.10	22.96	190.28	258.73	190.38	213.13	39.49	254.53	255.96	305.76	272.08	29.17
320	130.94	154.50	108.64	131.36	22.93	188.84	257.51	187.64	211.33	40.00	252.53	253.84	294.49	266.95	23.86
330	130.54	152.78	107.11	130.14	22.84	186.75	256.33	185.79	209.62	40.45	254.31	251.71	273.11	259.71	11.68
340	130.01	148.11	106.88	128.33	20.67	184.26	255.96	182.52	207.58	41.91	250.53	250.36	269.87	256.92	11.22
350	129.99	146.79	104.99	127.26	21.03	181.17	254.37	178.57	204.70	43.03	250.25	248.92	262.34	253.84	7.39
360	126.88	144.58	103.76	125.07	20.47	176.66	253.38	176.36	202.13	44.38	245.30	245.77	257.85	249.64	7.11

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-9 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	127.68	116.67	136.01	126.79	9.70	190.80	257.69	187.23	211.91	39.69	451.40	428.36	532.76	470.84	54.85
5	423.68	405.81	456.84	428.78	25.89	547.54	632.41	536.74	572.23	52.40	1058.79	1009.24	1248.16	1105.40	126.09
10	408.14	397.42	437.99	414.52	21.02	442.68	568.31	427.61	479.53	77.25	830.59	800.56	1037.12	889.42	128.79
20	588.24	521.75	605.74	571.91	44.31	628.77	782.34	605.52	672.21	96.08	1165.09	1089.18	1356.87	1203.71	137.96
30	408.03	394.56	426.32	409.64	15.94	468.38	675.49	635.49	593.12	109.86	882.19	823.74	1004.28	903.40	92.12
40	328.71	317.83	342.57	329.70	12.40	387.50	645.73	369.82	467.68	154.45	716.43	698.50	954.32	789.75	142.80
50	293.14	276.15	303.21	290.83	13.68	344.74	598.11	327.19	423.35	151.60	512.05	527.35	743.87	594.42	129.65
60	270.51	232.16	296.44	266.37	32.34	305.57	563.29	294.37	387.74	152.13	296.22	366.11	445.98	369.44	74.94
70	258.98	224.59	277.15	253.57	26.69	275.29	522.94	232.86	343.70	156.67	210.46	254.99	369.67	278.37	82.14
80	227.04	206.82	246.39	226.75	19.79	246.93	497.87	215.23	320.01	154.84	175.13	206.34	296.58	226.02	63.07
90	207.57	193.64	228.42	209.88	17.50	232.77	483.19	209.76	308.57	151.66	147.80	156.03	210.64	171.49	34.15
100	156.81	143.07	179.11	159.66	18.19	213.81	452.77	197.84	288.14	142.80	138.29	142.67	195.29	158.75	31.72
110	139.32	142.85	164.62	148.93	13.70	186.37	435.81	175.64	265.94	147.21	137.15	138.84	187.64	154.54	28.68
120	133.27	138.29	160.38	143.98	14.42	178.68	427.50	163.28	256.49	148.30	136.73	137.52	175.23	149.83	22.00
130	132.76	127.56	158.73	139.68	16.70	167.61	413.25	147.19	242.68	148.07	136.22	136.95	174.55	149.24	21.92
140	129.40	125.19	155.47	136.69	16.40	159.09	405.69	136.58	233.79	149.30	135.59	135.67	173.02	148.09	21.59
150	127.78	124.63	153.85	135.42	16.04	149.33	397.58	134.29	227.07	147.86	134.64	134.11	171.86	146.87	21.64
160	121.33	116.22	151.61	129.72	19.13	144.62	395.42	130.67	223.57	148.99	133.29	133.73	170.22	145.75	21.20
170	116.99	113.79	148.93	126.57	19.43	138.37	394.69	129.22	220.76	150.70	132.72	133.24	169.53	145.16	21.10
180	113.56	110.52	145.77	123.28	19.53	135.08	393.84	128.73	219.22	151.26	131.18	132.96	168.27	144.14	20.92

ตารางผนวก ง1-9 (ต่อ)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	141.80	134.21	163.97	146.66	15.46	129.73	256.74	124.65	170.37	74.84	123.21	128.57	147.51	133.10	12.77
200	125.15	123.78	142.32	130.42	10.33	121.42	224.58	107.43	151.14	63.98	120.51	125.66	140.67	128.95	10.47
210	120.55	116.47	137.54	124.85	11.17	115.62	197.97	103.54	139.04	51.39	118.74	124.72	139.88	127.78	10.90
220	116.81	114.75	136.25	122.60	11.86	109.82	195.86	101.87	135.85	52.12	115.10	124.03	138.54	125.89	11.83
230	112.50	112.21	134.81	119.84	12.97	105.38	193.23	98.93	132.51	52.68	113.21	123.56	137.27	124.68	12.07
240	107.86	110.56	130.28	116.23	12.24	101.35	182.58	97.45	127.13	48.06	107.69	120.89	136.27	121.62	14.30
250	106.75	104.81	129.87	113.81	13.94	97.58	176.64	96.81	123.68	45.87	102.74	117.96	135.91	118.87	16.60
260	102.61	98.43	128.51	109.85	16.29	95.53	168.82	94.07	119.47	42.74	97.00	115.42	135.78	116.07	19.40
270	100.45	96.37	127.74	108.19	17.06	90.36	151.55	93.51	111.81	34.45	92.90	110.68	134.29	112.62	20.76
280	127.52	115.84	148.13	130.50	16.35	88.95	100.46	85.47	91.63	7.85	90.87	103.04	127.62	107.18	18.72
290	119.65	108.19	129.67	119.17	10.75	84.75	97.09	82.11	87.98	8.00	85.14	98.75	110.98	98.29	12.93
300	115.00	100.49	123.08	112.86	11.45	81.45	96.22	79.69	85.79	9.08	80.54	97.52	108.75	95.60	14.20
310	110.93	98.53	112.49	107.32	7.65	78.61	95.29	75.25	83.05	10.73	76.57	96.81	97.28	90.22	11.82
320	107.16	97.95	111.67	105.59	6.99	74.91	94.67	72.83	80.80	12.05	73.24	96.24	95.64	88.37	13.11
330	103.71	96.52	110.44	103.56	6.96	72.56	90.58	68.96	77.37	11.58	70.07	95.67	93.15	86.30	14.11
340	101.78	95.71	109.65	102.38	6.99	69.67	88.81	67.75	75.41	11.64	67.18	94.39	89.66	83.74	14.54
350	99.61	94.87	108.99	101.16	7.19	67.14	86.55	65.81	73.17	11.61	64.51	93.12	88.70	82.11	15.40
360	98.36	93.24	107.48	99.69	7.21	64.88	85.69	60.07	70.21	13.62	61.97	92.55	85.29	79.94	15.98

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-10 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	131.92	145.86	127.64	135.14	9.53	282.54	285.36	277.64	281.85	3.91	567.24	569.08	569.84	568.72	1.34
5	514.94	552.86	500.37	522.72	27.10	1080.61	1093.61	1072.39	1082.20	10.70	1840.98	1856.21	1846.37	1847.85	7.72
10	551.15	593.51	532.68	559.11	31.19	1307.12	1324.63	1295.48	1309.08	14.67	1581.42	1597.23	1590.11	1589.59	7.92
20	856.26	936.24	819.54	870.68	59.67	2374.47	2406.82	2300.27	2360.52	54.63	2160.26	2202.84	2165.74	2176.28	23.16
30	748.77	897.72	703.15	783.21	101.76	1992.50	2003.74	1925.60	1973.95	42.24	1569.27	1465.39	1574.39	1536.35	61.51
40	677.88	757.88	657.28	697.68	53.14	1706.77	1824.51	1698.21	1743.16	70.58	1254.88	1298.17	1259.24	1270.76	23.83
50	672.78	734.63	595.39	667.60	69.76	1477.65	1465.29	1423.05	1455.33	28.63	1077.03	1105.46	1084.76	1089.08	14.70
60	635.38	728.14	579.67	647.73	75.00	1301.21	1327.62	1297.94	1308.92	16.27	952.96	1008.65	984.22	981.94	27.91
70	626.91	716.79	524.88	622.86	96.02	1221.53	1150.97	1196.87	1189.79	35.81	858.79	987.42	896.57	914.26	66.11
80	596.10	685.39	498.17	593.22	93.64	1117.02	1039.56	1099.23	1085.27	40.57	797.59	824.12	803.21	808.31	13.98
90	573.47	630.02	482.52	562.00	74.42	1050.11	1021.13	1004.12	1025.12	23.25	734.72	783.56	756.18	758.15	24.48
100	590.66	654.81	508.76	584.74	73.20	1077.14	1056.85	1017.33	1050.44	30.42	839.61	859.79	842.76	847.39	10.86
110	566.22	639.37	497.83	567.81	70.78	995.34	998.26	974.65	989.42	12.87	776.12	793.65	793.43	787.73	10.06
120	576.96	628.66	496.52	567.38	66.59	929.88	954.32	902.81	929.00	25.77	709.01	746.16	712.28	722.48	20.57
130	542.15	623.14	485.37	550.22	69.24	864.90	897.55	835.77	866.07	30.91	675.30	682.63	695.49	684.47	10.22
140	513.98	617.29	464.71	531.99	77.87	792.21	822.17	752.48	788.95	34.96	639.91	645.17	643.17	642.75	2.66
150	478.89	613.64	414.82	502.45	101.48	723.26	764.21	708.61	732.03	28.82	615.75	632.92	624.37	624.35	8.59
160	458.29	594.59	408.64	487.17	96.28	664.11	723.46	626.74	671.44	48.77	593.77	604.11	600.14	599.34	5.22
170	461.68	586.93	397.10	481.90	96.52	612.66	676.74	599.20	629.53	41.43	568.77	587.42	596.63	584.27	14.19
180	471.39	582.22	396.59	483.40	93.40	578.67	604.94	553.14	578.92	25.90	544.67	562.81	549.22	552.23	9.44

ตารางผนวก ง1-10(ต่อ)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	490.44	593.65	405.64	496.58	94.16	580.70	632.87	567.46	593.68	34.58	570.26	584.36	568.12	574.25	8.82
200	400.67	576.28	376.92	451.29	108.89	546.12	587.69	524.39	552.73	32.16	567.01	575.94	554.37	565.77	10.84
210	391.25	565.60	375.68	444.18	105.44	526.94	574.13	506.55	535.87	34.66	547.66	553.59	527.81	543.02	13.50
220	391.06	559.82	374.25	441.71	102.63	504.64	563.52	497.86	522.01	36.11	522.10	547.72	520.95	530.26	15.13
230	387.62	543.57	373.77	434.99	94.29	486.55	528.91	475.71	497.06	28.11	508.22	536.51	510.69	518.47	15.67
240	386.89	537.65	372.63	432.39	91.44	475.18	497.38	454.11	475.56	21.64	493.86	548.06	487.27	509.73	33.36
250	380.44	519.24	371.09	423.59	82.97	458.97	472.11	439.70	456.93	16.30	481.24	491.33	479.73	484.10	6.31
260	374.00	498.10	370.28	414.13	72.75	440.21	465.28	428.65	444.71	18.73	475.95	482.19	464.28	474.14	9.09
270	371.54	487.32	369.12	409.33	67.56	424.62	453.91	406.20	428.24	24.06	461.34	477.66	453.15	464.05	12.48
280	379.15	493.85	372.11	415.04	68.35	428.14	462.39	411.94	434.16	25.76	489.99	492.65	703.65	562.10	122.60
290	372.14	490.64	368.74	410.51	69.42	403.59	437.25	398.09	412.98	21.20	477.31	486.34	472.63	478.76	6.97
300	358.13	478.17	365.39	400.56	67.31	393.16	396.16	386.45	391.92	4.97	455.75	463.18	464.96	461.30	4.89
310	355.04	475.69	363.53	398.09	67.34	389.57	389.65	372.41	383.88	9.93	435.89	457.31	452.17	448.46	11.18
320	350.23	466.32	362.19	392.91	63.85	370.49	385.22	356.50	370.74	14.36	429.25	443.27	435.28	435.93	7.03
330	347.16	453.78	360.69	387.21	58.05	359.49	378.38	342.82	360.23	17.79	422.95	435.09	420.54	426.19	7.80
340	343.26	449.16	358.76	383.73	57.19	356.38	374.72	338.64	356.58	18.04	410.97	428.76	417.03	418.92	9.04
350	337.10	430.72	352.35	373.39	50.23	350.70	365.45	327.37	347.84	19.20	395.86	421.95	400.51	406.11	13.92
360	322.91	427.10	343.64	364.55	55.15	340.22	364.77	327.11	344.03	19.12	403.25	400.37	397.28	400.30	2.99

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-11 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียรวมสังเคราะห์โดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน

(Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	4.75	4.63	4.57	4.65	0.09	8.45	9.17	7.98	8.53	0.60	16.13	15.24	17.44	16.27	1.11
5	18.63	17.82	17.62	18.02	0.53	33.54	34.12	31.26	32.97	1.51	61.57	59.62	61.98	61.06	1.26
10	22.96	21.95	21.70	22.20	0.67	41.13	42.29	38.64	40.69	1.86	73.27	72.87	74.23	73.46	0.70
20	45.95	43.91	43.41	44.42	1.35	82.45	82.93	77.72	81.03	2.88	141.83	140.59	142.71	141.71	1.07
30	45.69	43.66	43.15	44.17	1.34	78.13	79.54	77.61	78.43	1.00	136.62	135.21	137.24	136.36	1.04
40	45.44	43.41	42.90	43.92	1.34	77.23	78.65	76.04	77.31	1.31	133.57	134.98	134.25	134.27	0.71
50	45.18	43.15	42.65	43.66	1.34	76.89	77.78	75.82	76.83	0.98	131.17	130.86	133.74	131.92	1.58
60	45.44	42.90	42.65	43.66	1.54	75.68	76.30	74.85	75.61	0.73	131.47	130.01	130.56	130.68	0.74
70	45.18	42.90	42.39	43.49	1.49	74.22	75.82	73.14	74.39	1.35	127.92	128.57	129.64	128.71	0.87
80	44.93	42.65	41.88	43.15	1.59	73.68	74.23	72.55	73.49	0.86	127.24	127.43	128.70	127.79	0.79
90	44.68	42.39	41.63	42.90	1.59	72.94	73.77	71.68	72.80	1.05	125.88	125.14	127.84	126.29	1.40
100	45.44	43.15	42.39	43.66	1.59	72.83	73.46	71.55	72.61	0.97	135.23	134.62	137.15	135.67	1.32
110	44.93	42.90	41.63	43.15	1.66	71.52	72.35	70.69	71.52	0.83	129.09	127.59	133.20	129.96	2.90
120	44.42	42.14	41.38	42.65	1.58	70.76	71.79	69.85	70.80	0.97	128.02	126.31	130.56	128.30	2.14
130	44.17	41.88	41.12	42.39	1.59	70.28	70.12	68.43	69.61	1.03	126.70	125.83	129.78	127.44	2.08
140	44.17	41.63	40.61	42.14	1.83	69.16	69.81	67.72	68.90	1.07	126.47	124.76	128.65	126.63	1.95
150	43.91	41.38	40.36	41.88	1.83	68.11	68.42	67.14	67.89	0.67	125.03	124.12	127.38	125.51	1.68
160	43.66	41.12	40.11	41.63	1.83	67.15	67.78	66.68	67.20	0.55	124.28	123.54	126.27	124.70	1.41
170	43.41	41.12	39.60	41.38	1.92	66.16	67.34	65.53	66.34	0.92	122.55	122.36	124.53	123.15	1.20
180	43.15	40.87	39.35	41.12	1.91	65.37	66.59	64.21	65.39	1.19	122.12	121.68	123.74	122.51	1.08

ตารางผนวก ง1-11 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	44.17	41.63	39.85	41.88	2.17	74.02	75.87	72.83	74.24	1.53	127.03	126.75	128.53	127.44	0.96
200	43.66	41.38	39.09	41.38	2.29	70.16	72.48	69.68	70.77	1.50	122.79	124.82	126.24	124.62	1.73
210	41.88	41.12	38.84	40.61	1.58	69.13	70.38	67.13	68.88	1.64	121.26	123.39	124.86	123.17	1.81
220	41.12	40.36	38.84	40.11	1.16	67.70	68.93	66.92	67.85	1.01	119.52	120.57	123.14	121.08	1.86
230	40.87	40.11	38.58	39.85	1.17	66.47	67.12	66.50	66.70	0.37	118.51	116.38	121.77	118.89	2.71
240	40.61	39.85	38.33	39.60	1.16	65.72	66.27	65.74	65.91	0.31	117.44	115.91	120.63	117.99	2.41
250	40.36	39.60	38.08	39.35	1.16	65.04	65.86	64.67	65.19	0.61	110.76	114.53	118.25	114.51	3.75
260	39.85	39.35	38.08	39.09	0.91	64.22	65.19	63.54	64.32	0.83	115.47	113.37	117.59	115.48	2.11
270	39.60	39.09	37.82	38.84	0.92	63.91	64.75	62.35	63.67	1.22	114.75	112.63	116.21	114.53	1.80
280	40.11	39.35	38.58	39.35	0.77	70.65	71.89	69.37	70.64	1.26	116.09	115.95	120.27	117.44	2.45
290	38.84	38.58	38.33	38.58	0.26	67.06	69.04	67.58	67.89	1.03	115.09	114.38	118.17	115.88	2.01
300	38.33	37.82	38.08	38.08	0.26	65.43	66.39	64.39	65.40	1.00	114.54	113.17	117.38	115.03	2.15
310	38.08	37.57	37.57	37.74	0.29	64.18	65.56	64.14	64.63	0.81	113.78	112.86	116.84	114.49	2.08
320	37.82	37.31	37.31	37.48	0.29	63.30	65.11	63.86	64.09	0.93	113.45	112.23	116.13	113.94	2.00
330	37.57	36.55	36.81	36.98	0.53	63.32	64.87	63.32	63.84	0.89	112.21	111.56	115.39	113.05	2.05
340	36.30	35.79	36.05	36.05	0.26	62.93	64.54	62.57	63.35	1.05	111.84	110.73	114.82	112.46	2.12
350	35.79	35.28	35.54	35.54	0.26	62.38	64.03	61.95	62.79	1.10	111.21	110.01	113.64	111.62	1.85
360	35.28	34.78	35.03	35.03	0.25	62.47	63.51	61.57	62.52	0.97	110.57	109.24	112.57	110.79	1.68

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ง1-12 ผลการทดลองการกรองน้ำเสียรวมโดยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
1	4.38	4.17	4.35	4.30	0.11	9.75	9.52	9.96	9.74	0.22	20.02	19.64	20.84	20.17	0.61
5	15.97	16.05	16.28	16.10	0.16	37.41	37.16	37.74	37.44	0.29	76.89	76.13	77.05	76.69	0.49
10	19.78	19.14	19.87	19.60	0.40	46.38	46.07	46.65	46.37	0.29	92.22	92.14	92.86	92.41	0.39
20	39.60	36.95	39.58	38.71	1.52	89.34	89.11	89.96	89.47	0.44	177.40	176.28	184.37	179.35	4.38
30	39.37	36.58	39.36	38.44	1.61	86.71	87.64	87.82	87.39	0.60	171.40	170.94	178.13	173.49	4.02
40	38.24	36.04	38.92	37.73	1.51	85.39	84.72	86.36	85.49	0.82	169.78	168.82	175.66	171.42	3.70
50	38.07	35.82	39.36	37.75	1.79	83.16	82.59	85.74	83.83	1.68	166.26	165.71	172.93	168.30	4.02
60	37.64	35.68	38.18	37.17	1.32	82.60	80.64	84.28	82.51	1.82	164.81	163.26	169.56	165.88	3.28
70	37.47	35.16	37.82	36.82	1.45	80.95	79.84	83.91	81.57	2.10	161.76	162.54	165.93	163.41	2.22
80	36.64	34.75	37.65	36.35	1.47	79.99	78.65	82.77	80.47	2.10	159.12	158.69	162.47	160.09	2.07
90	36.19	34.27	37.21	35.89	1.49	78.20	78.12	81.54	79.29	1.95	156.90	155.47	161.21	157.86	2.99
100	42.78	37.45	41.87	40.70	2.85	87.75	85.64	88.46	87.28	1.47	170.95	168.72	173.48	171.05	2.38
110	41.62	35.28	41.38	39.43	3.59	83.49	82.53	87.58	84.53	2.68	163.99	163.64	170.67	166.10	3.96
120	41.06	34.95	40.65	38.89	3.42	82.87	80.73	85.73	83.11	2.51	162.83	161.53	168.96	164.44	3.97
130	40.47	34.47	39.74	38.23	3.27	81.91	80.37	82.94	81.74	1.29	161.75	158.27	165.59	161.87	3.66
140	40.10	34.18	39.52	37.93	3.26	81.02	79.82	82.17	81.00	1.18	160.82	155.29	162.78	159.63	3.88
150	39.76	33.86	39.13	37.58	3.24	80.09	79.26	81.76	80.37	1.27	159.64	154.36	162.16	158.72	3.98
160	39.31	33.59	38.93	37.28	3.20	79.67	78.91	80.53	79.70	0.81	158.26	153.77	161.84	157.96	4.04
170	39.05	33.12	38.26	36.81	3.22	78.74	78.02	80.18	78.98	1.10	157.93	153.51	160.25	157.23	3.42
180	38.73	32.91	37.84	36.49	3.14	78.56	77.58	79.86	78.67	1.14	157.46	153.03	159.18	156.56	3.17

ตารางผนวก ง1-12 (ต่อ)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.	น.น.(ซ้ำ1)	น.น.(ซ้ำ2)	น.น.(ซ้ำ3)	เฉลี่ย	S.D.
190	42.65	35.27	40.86	39.59	3.85	80.62	78.64	82.93	80.73	2.15	164.37	160.43	163.56	162.79	2.08
200	42.21	33.89	39.74	38.61	4.27	79.46	77.19	80.46	79.04	1.68	162.58	155.28	160.15	159.34	3.72
210	41.06	32.76	38.62	37.48	4.27	78.85	76.82	79.65	78.44	1.46	160.77	153.94	158.42	157.71	3.47
220	40.82	32.34	37.93	37.03	4.31	78.34	75.78	79.18	77.77	1.77	159.24	151.74	158.01	156.33	4.02
230	40.15	32.06	37.52	36.58	4.13	78.07	75.14	78.84	77.35	1.95	158.59	150.68	157.64	155.64	4.32
240	39.57	31.97	37.17	36.24	3.89	77.81	74.89	78.27	76.99	1.83	157.02	150.42	156.98	154.81	3.80
250	39.12	31.64	36.81	35.86	3.83	76.53	74.32	77.65	76.17	1.69	156.14	150.12	156.22	154.16	3.50
260	38.65	31.18	36.24	35.36	3.81	76.29	73.75	76.49	75.51	1.53	155.32	149.96	155.75	153.68	3.23
270	37.24	30.76	36.05	34.68	3.45	75.81	73.29	75.21	74.77	1.32	154.17	149.34	154.65	152.72	2.94
280	41.56	33.67	39.46	38.23	4.09	77.39	75.42	79.64	77.48	2.11	158.76	152.89	157.49	156.38	3.09
290	40.22	32.48	38.79	37.16	4.12	76.04	74.86	78.23	76.38	1.71	156.54	150.74	155.38	154.22	3.07
300	39.78	31.68	37.58	36.35	4.19	75.63	73.82	77.56	75.67	1.87	155.83	148.21	152.99	152.34	3.85
310	39.14	31.24	36.82	35.73	4.06	75.40	72.14	76.39	74.64	2.22	154.72	147.63	152.13	151.49	3.59
320	38.67	30.86	36.43	35.32	4.02	74.92	71.87	76.03	74.27	2.15	153.94	147.25	151.64	150.94	3.40
330	38.25	30.54	36.19	34.99	3.99	74.58	71.51	75.84	73.98	2.23	152.76	146.89	150.83	150.16	2.99
340	37.69	30.29	35.94	34.64	3.87	74.19	71.09	75.26	73.51	2.17	152.11	146.56	150.16	149.61	2.82
350	37.05	30.03	35.41	34.16	3.67	73.74	70.66	75.03	73.14	2.25	151.86	146.07	149.39	149.11	2.91
360	36.84	29.81	34.72	33.79	3.61	73.55	70.29	74.77	72.87	2.32	150.75	145.96	148.77	148.49	2.41

หมายเหตุ น.น. = น้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรอง (กรัม) ; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางผนวก ง2-1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก(มก./ล)ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อผ่านการกรอง ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.50	1.56	1.70	1.59	0.10	1.50	1.56	1.70	1.59	0.10	1.50	1.56	1.70	1.59	0.10
90	0.68	0.67	0.74	0.70	0.04	0.81	0.72	0.88	0.80	0.08	0.96	1.07	0.64	0.89	0.22
180	0.58	0.63	0.93	0.71	0.19	0.78	0.80	0.82	0.80	0.02	0.73	0.71	1.03	0.82	0.18
270	0.58	0.85	0.81	0.75	0.15	0.74	0.70	0.96	0.80	0.14	1.06	0.87	1.14	1.02	0.14
360	0.84	0.72	0.68	0.75	0.08	0.75	0.83	0.90	0.83	0.08	0.84	0.95	0.96	0.92	0.07

ตารางผนวก ง2-2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อผ่านการกรอง ด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	2.25	2.24	2.24	2.24	0.01	2.25	2.24	2.24	2.24	0.01	2.25	2.24	2.24	2.24	0.01
90	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00
180	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00
270	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00
360	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00

ตารางผนวก ง2-3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล)ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	5.66	5.75	5.84	5.75	0.09	5.66	5.75	5.84	5.75	0.09	5.66	5.75	5.84	5.75	0.09
90	0.20	0.21	0.22	0.21	0.01	1.68	1.98	2.15	1.94	0.24	3.80	3.86	2.61	3.42	0.71
180	0.15	0.13	0.20	0.16	0.04	1.83	2.02	2.23	2.03	0.20	3.88	3.96	2.73	3.52	0.69
270	0.10	0.17	0.17	0.15	0.04	1.90	1.30	2.35	1.85	0.53	4.10	4.08	4.90	4.36	0.47
360	0.10	0.29	0.29	0.23	0.11	1.99	1.52	2.52	2.01	0.50	3.77	4.30	5.03	4.37	0.63

ตารางผนวก ง2-4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล)ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.35	1.34	1.36	1.35	0.01	1.35	1.34	1.36	1.35	0.01	1.35	1.34	1.36	1.35	0.01
90	0.08	0.37	0.26	0.24	0.15	0.53	0.56	0.54	0.54	0.02	0.77	0.82	0.82	0.80	0.03
180	0.14	0.26	0.14	0.18	0.07	0.57	0.46	0.53	0.52	0.06	0.75	0.87	0.79	0.80	0.06
270	0.26	0.16	0.15	0.19	0.06	0.47	0.48	0.54	0.50	0.04	0.76	0.89	0.83	0.83	0.07
360	0.34	0.36	0.34	0.35	0.01	0.48	0.50	0.53	0.50	0.03	0.79	0.63	0.87	0.76	0.12

ตารางผนวก ง2-5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล) ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(โครเมียม) (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.11	1.17	1.21	1.16	0.05	1.11	1.17	1.21	1.16	0.05	1.11	1.17	1.21	1.16	0.05
90	0.43	0.42	0.53	0.46	0.06	0.57	0.71	0.69	0.66	0.08	0.76	0.73	0.71	0.73	0.03
180	0.51	0.53	0.43	0.49	0.05	0.48	0.69	0.55	0.57	0.11	0.53	0.62	0.83	0.66	0.15
270	0.43	0.51	0.62	0.52	0.01	0.64	0.52	0.49	0.55	0.08	0.69	0.73	0.77	0.73	0.04
360	0.41	0.39	0.46	0.42	0.04	0.37	0.63	0.57	0.52	0.14	0.76	0.82	0.62	0.73	0.10

ตารางผนวก ง2-5 (ต่อ)

(ทองแดง)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	2.32	2.32	2.36	2.33	0.02	2.32	2.32	2.36	2.33	0.02	2.32	2.32	2.36	2.33	0.02
90	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01
180	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01
270	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01
360	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00

ตารางผนวก ง2-5 (ต่อ)

(นิกเกิล)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	5.16	5.13	5.14	5.14	0.02	5.16	5.13	5.14	5.14	0.02	5.16	5.13	5.14	5.14	0.02
90	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	0.10	0.11	0.10	0.10	0.01
180	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	0.10	0.10	0.11	0.10	0.01
270	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	0.11	0.10	0.10	0.10	0.01
360	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.00	0.10	0.10	0.11	0.10	0.01

ตารางผนวก ง2-5 (ต่อ)

(สังกะสี)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.97	0.95	0.92	0.95	0.03	0.97	0.95	0.92	0.95	0.03	0.97	0.95	0.92	0.95	0.03
90	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
180	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
270	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
360	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00

ตารางผนวก ง2-6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล)ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.11	1.14	1.13	1.13	0.02	1.11	1.14	1.13	1.13	0.02	1.11	1.14	1.13	1.13	0.02
90	0.42	0.37	0.38	0.39	0.03	0.46	0.90	0.56	0.64	0.23	1.04	0.90	1.03	0.99	0.08
180	0.32	0.33	0.48	0.38	0.09	0.42	0.90	0.99	0.77	0.31	1.00	0.90	0.93	0.94	0.05
270	0.35	0.44	0.39	0.39	0.05	0.89	0.87	0.96	0.91	0.05	0.93	1.03	1.02	0.99	0.06
360	0.31	0.40	0.48	0.40	0.09	0.87	0.86	0.83	0.85	0.02	0.98	1.04	0.96	0.99	0.04

ตารางผนวก ง2-7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล)ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.19	1.20	1.20	1.20	0.01	1.19	1.20	1.20	1.20	0.01	1.19	1.20	1.20	1.20	0.01
90	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	0.08	0.17	0.10	0.12	0.05	0.09	0.28	0.20	0.19	0.10
180	0.06	0.04	0.06	0.05	0.01	0.16	0.23	0.22	0.20	0.04	0.17	0.28	0.11	0.19	0.09
270	0.05	0.05	0.07	0.06	0.01	0.19	0.06	0.04	0.10	0.08	0.28	0.11	0.28	0.22	0.10
360	0.03	0.04	0.07	0.05	0.02	0.06	0.10	0.16	0.11	0.05	0.27	0.21	0.27	0.25	0.03

ตารางผนวก ง2-8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.66	1.63	1.71	1.67	0.04	1.66	1.63	1.71	1.67	0.04	1.66	1.63	1.71	1.67	0.04
90	0.53	0.52	0.53	0.53	0.01	0.59	0.61	0.64	0.61	0.03	1.06	0.88	1.05	1.00	0.10
180	0.53	0.53	0.51	0.52	0.01	0.63	0.62	0.62	0.62	0.01	0.86	1.05	1.07	0.99	0.12
270	0.52	0.52	0.55	0.53	0.02	0.63	0.58	0.61	0.61	0.03	1.02	1.01	0.97	1.00	0.03
360	0.53	0.54	0.53	0.53	0.01	0.63	0.63	0.59	0.62	0.02	0.98	0.97	0.87	0.94	0.06

ตารางผนวก ง2-9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.22	1.21	1.21	1.21	0.01	1.22	1.21	1.21	1.21	0.01	1.22	1.21	1.21	1.21	0.01
90	0.83	0.79	0.77	0.80	0.03	0.93	0.86	0.86	0.88	0.04	1.09	0.99	1.00	1.03	0.06
180	0.79	0.78	0.79	0.79	0.01	0.90	0.90	0.87	0.89	0.02	1.03	0.97	1.03	1.01	0.03
270	0.78	0.82	0.78	0.79	0.02	0.86	0.86	0.90	0.87	0.02	0.99	1.09	0.97	1.02	0.06
360	0.78	0.77	0.81	0.79	0.02	0.86	0.92	0.93	0.90	0.04	0.97	1.03	1.09	1.03	0.06

ตารางผนวก ง2-10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล) ในน้ำเสียรวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm) (โครเมียม)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	3.51	3.8	3.61	3.64	0.15	3.51	3.8	3.61	3.64	0.15	3.51	3.8	3.61	3.64	0.15
90	2.34	2.59	2.90	2.61	0.28	1.63	3.21	2.76	2.53	0.81	2.95	3.25	2.60	2.93	0.33
180	2.56	2.50	3.16	2.74	0.36	2.91	3.93	3.16	3.33	0.53	3.41	2.86	3.20	3.16	0.28
270	3.15	2.52	3.13	2.93	0.36	3.25	3.06	2.93	3.08	0.16	2.81	3.62	3.48	3.30	0.43
360	3.00	2.89	2.78	2.89	0.11	2.37	2.70	2.32	2.46	0.21	3.22	3.12	3.40	3.25	0.14

ตารางผนวก ง2-10 (ต่อ)

(ทองแดง)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.68	0.68	0.70	0.69	0.01	0.68	0.68	0.70	0.69	0.01	0.68	0.68	0.70	0.69	0.01
90	0.41	0.40	0.41	0.41	0.01	0.42	0.40	0.40	0.41	0.01	0.45	0.59	0.44	0.49	0.08
180	0.40	0.41	0.40	0.40	0.01	0.40	0.41	0.42	0.41	0.01	0.59	0.44	0.59	0.54	0.09
270	0.39	0.39	0.39	0.39	0.00	0.39	0.39	0.37	0.38	0.01	0.60	0.59	0.62	0.60	0.02
360	0.37	0.36	0.36	0.36	0.01	0.36	0.36	0.42	0.38	0.03	0.63	0.63	0.59	0.62	0.02

ตารางผนวก ง2-10 (ต่อ)

(นิกเกิล)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.89	0.86	0.85	0.87	0.02	0.89	0.86	0.85	0.87	0.02	0.89	0.86	0.85	0.87	0.02
90	0.51	0.48	0.49	0.49	0.02	0.75	0.73	0.76	0.75	0.02	0.66	0.82	0.83	0.77	0.10
180	0.48	0.48	0.53	0.50	0.03	0.75	0.77	0.74	0.75	0.02	0.81	0.78	0.77	0.79	0.02
270	0.48	0.46	0.48	0.47	0.01	0.74	0.75	0.75	0.75	0.01	0.82	0.77	0.81	0.80	0.03
360	0.48	0.50	0.45	0.48	0.03	0.75	0.73	0.75	0.74	0.01	0.76	0.78	0.75	0.76	0.02

ตารางผนวก ง2-10 (ต่อ)

(สังกะสี)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.08	0.09	0.12	0.10	0.02	0.08	0.09	0.12	0.10	0.02	0.08	0.09	0.12	0.10	0.02
90	0.08	0.05	0.05	0.06	0.02	0.06	0.07	0.06	0.06	0.01	0.09	0.11	0.12	0.11	0.02
180	0.05	0.03	0.06	0.05	0.02	0.06	0.06	0.08	0.07	0.01	0.10	0.09	0.09	0.09	0.01
270	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.06	0.07	0.08	0.07	0.01	0.09	0.08	0.13	0.10	0.03
360	0.03	0.04	0.06	0.04	0.02	0.05	0.07	0.08	0.07	0.02	0.08	0.11	0.08	0.09	0.02

ตารางผนวก ง2-11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล) ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) (โครเมียม)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.98	0.98	1.01	0.99	0.02	0.98	0.98	1.01	0.99	0.02	0.98	0.98	1.01	0.99	0.02
90	0.43	0.46	0.51	0.47	0.04	0.41	0.63	0.51	0.52	0.11	0.56	0.48	0.51	0.52	0.04
180	0.46	0.45	0.44	0.45	0.01	0.42	0.54	0.57	0.51	0.08	0.48	0.47	0.49	0.48	0.01
270	0.47	0.47	0.54	0.49	0.04	0.46	0.52	0.59	0.52	0.07	0.55	0.48	0.46	0.50	0.05
360	0.43	0.52	0.48	0.48	0.05	0.41	0.41	0.48	0.43	0.04	0.52	0.54	0.59	0.55	0.04

ตารางผนวก ง2-11 (ต่อ)

(ทองแดง)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	2.31	2.29	2.27	2.29	0.02	2.31	2.29	2.27	2.29	0.02	2.31	2.29	2.27	2.29	0.02
90	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
180	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00
270	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
360	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00

ตารางผนวก ง2-11 (ต่อ)

(นิกเกิล)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	5.22	5.17	5.17	5.19	0.03	5.22	5.17	5.17	5.19	0.03	5.22	5.17	5.17	5.19	0.03
90	0.10	0.10	0.14	0.11	0.02	0.10	0.13	0.12	0.12	0.02	0.13	0.16	0.16	0.15	0.02
180	0.10	0.11	0.11	0.11	0.01	0.13	0.13	0.16	0.14	0.02	0.15	0.16	0.17	0.16	0.01
270	0.10	0.11	0.11	0.11	0.01	0.12	0.11	0.15	0.13	0.02	0.14	0.16	0.19	0.16	0.03
360	0.10	0.10	0.12	0.11	0.01	0.12	0.11	0.12	0.12	0.01	0.17	0.15	0.18	0.17	0.02

ตารางผนวก ง2-11 (ต่อ)

(สังกะสี)

เวลา (นาที)	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.00	0.98	0.96	0.98	0.02	1.00	0.98	0.96	0.98	0.02	1.00	0.98	0.96	0.98	0.02
90	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00
180	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00
270	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00
360	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00

ตารางผนวก ง2-12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล) ในน้ำเสียรวมเมื่อผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) (โครเมียม)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	3.48	4.36	4.17	4.00	0.46	3.48	4.36	4.17	4.00	0.46	3.48	4.36	4.17	4.00	0.46
90	2.31	3.29	2.37	2.66	0.55	2.89	2.65	3.43	2.99	0.40	2.80	3.18	3.58	3.19	0.39
180	2.80	3.21	2.67	2.89	0.28	2.98	3.18	2.34	2.83	0.44	3.00	3.68	3.07	3.25	0.37
270	2.71	3.64	2.37	2.91	0.66	3.16	2.60	2.57	2.78	0.33	2.99	3.54	3.17	3.23	0.28
360	2.32	3.44	2.41	2.72	0.62	2.37	0.26	3.01	2.55	0.41	3.13	3.51	3.33	3.32	0.19

ตารางผนวก ง2-12(ต่อ)

(ทองแดง)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.73	0.68	0.72	0.71	0.03	0.73	0.68	0.72	0.71	0.03	0.73	0.68	0.72	0.71	0.03
90	0.59	0.62	0.58	0.60	0.02	0.58	0.61	0.58	0.59	0.02	0.69	0.69	0.70	0.69	0.01
180	0.58	0.58	0.57	0.58	0.01	0.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.68	0.69	0.69	0.69	0.01
270	0.61	0.58	0.61	0.60	0.02	0.62	0.59	0.62	0.61	0.02	0.69	0.70	0.69	0.69	0.01
360	0.58	0.62	0.57	0.59	0.03	0.58	0.62	0.58	0.59	0.02	0.68	0.68	0.69	0.68	0.01

ตารางผนวก ง2-12 (ต่อ)

(นิกเกิล)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.79	0.78	0.79	0.79	0.01	0.79	0.78	0.79	0.79	0.01	0.79	0.78	0.79	0.79	0.01
90	0.53	0.54	0.54	0.54	0.01	0.52	0.54	0.52	0.53	0.01	0.59	0.63	0.60	0.61	0.02
180	0.52	0.53	0.53	0.53	0.01	0.54	0.53	0.53	0.53	0.01	0.58	0.57	0.63	0.59	0.03
270	0.54	0.54	0.56	0.55	0.01	0.52	0.54	0.52	0.53	0.01	0.64	0.61	0.61	0.62	0.02
360	0.55	0.53	0.53	0.54	0.01	0.53	0.54	0.51	0.53	0.02	0.61	0.61	0.58	0.60	0.02

ตารางผนวก ง2-12 (ต่อ)

(สังกะสี)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01
90	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
180	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
270	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01
360	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01

ภาคผนวก ง2-13 Recovery (%) ของการวิเคราะห์โครเมียม

sample (mg/l)	sample+std.Cr 1.0 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Cr 0.5 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Cr 0.1 mg/l	Recovery (%)
4.16	5.23	101.36	4.58	98.28	4.21	98.83
3.21	4.52	107.36	3.76	101.35	3.34	100.91
3.93	4.86	98.58	4.41	99.55	4.00	99.26
3.06	4.10	100.99	3.69	103.65	3.15	99.68
2.70	3.68	99.46	3.11	97.19	2.78	99.29
1.10	1.98	94.29	1.68	105.00	1.13	94.17
1.04	2.17	106.37	1.41	91.56	1.17	102.63
1.00	2.31	115.50	1.39	92.67	1.07	97.27
0.93	1.85	95.85	1.45	101.40	1.00	97.09
0.98	1.94	97.98	1.56	105.41	1.06	98.15

หมายเหตุ : std.Cr = สารละลายโครเมียมมาตรฐาน

ภาคผนวก ง2-14 Recovery (%) ของการวิเคราะห์ทองแดง

sample (mg/l)	sample+std.Cu 1.0 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Cu 0.1 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Cu 0.05 mg/l	Recovery (%)
0.68	1.63	97.02	0.75	96.15	0.75	102.74
0.40	1.32	94.29	0.52	104.00	0.47	104.44
0.41	1.29	91.49	0.46	90.20	0.44	95.65
0.39	1.42	102.16	0.45	91.84	0.42	95.45
0.36	1.39	102.21	0.42	91.30	0.39	95.12
1.22	2.24	100.90	1.35	102.27	1.26	99.21
0.09	1.12	102.75	0.17	89.47	0.12	85.71
0.17	1.25	106.84	0.24	88.89	0.20	90.91
0.28	1.20	93.75	0.36	94.74	0.34	103.03
0.27	1.24	97.64	0.39	105.41	0.30	93.75

หมายเหตุ : std.Cu = สารละลายทองแดงมาตรฐาน

ภาคผนวก ง2-15 Recovery (%) ของการวิเคราะห์นิกเกิล

sample (mg/l)	sample+std.Ni 1.0 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Ni 0.5 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Ni 0.1 mg/l	Recovery (%)
0.85	1.78	96.22	1.30	96.30	0.93	97.89
0.73	1.70	98.27	1.29	104.88	0.80	96.39
0.77	1.79	101.13	1.21	95.28	0.89	102.30
0.75	1.69	96.57	1.19	95.20	0.81	95.29
0.73	1.75	101.16	1.22	99.19	0.80	96.39
1.63	2.58	98.10	2.15	100.94	1.75	101.16
1.06	2.02	98.06	1.48	94.87	1.13	97.41
0.86	1.72	92.47	1.35	99.26	0.94	97.92
1.02	2.13	105.45	1.54	101.32	1.09	97.32
0.98	1.95	98.48	1.52	102.70	1.00	92.59

หมายเหตุ : std.Ni = สารละลายนิกเกิลมาตรฐาน

ภาคผนวก ง2-16 Recovery (%) ของการวิเคราะห์สังกะสี

sample (mg/l)	sample+std.Zn 1.0 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Zn 0.1 mg/l	Recovery (%)	sample+std.Zn 0.05 mg/l	Recovery (%)
0.09	1.00	91.74	0.20	105.26	0.13	92.86
0.07	0.98	91.59	0.14	82.35	0.14	116.67
0.06	0.92	86.79	0.13	81.25	0.10	90.91
0.07	1.02	95.33	0.15	88.24	0.12	100.00
0.07	1.10	102.80	0.17	100.00	0.10	83.33
1.21	2.15	97.29	1.34	102.29	1.24	98.41
1.09	2.14	102.39	1.22	102.52	1.13	99.12
1.03	2.01	99.01	1.11	98.23	1.17	108.33
0.99	1.87	93.97	1.05	96.33	1.03	99.04
0.97	1.83	92.89	1.08	100.93	1.10	107.84

หมายเหตุ : std.Zn = สารละลายสังกะสีมาตรฐาน

ตารางผนวก ง3-1 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.04	9.92	9.98	9.65	0.53	9.04	9.92	9.98	9.65	0.53	9.04	9.92	9.98	9.65	0.53
90	9.03	9.90	9.93	9.62	0.51	9.03	9.89	9.84	9.59	0.48	9.03	9.90	9.97	9.63	0.52
180	9.02	9.89	9.89	9.60	0.50	9.02	9.90	9.87	9.60	0.50	9.04	9.93	9.96	9.64	0.52
270	9.01	9.88	9.92	9.60	0.51	9.02	9.86	9.86	9.58	0.48	9.04	9.91	9.98	9.64	0.52
360	9.04	9.87	9.89	9.60	0.49	9.03	9.90	9.86	9.60	0.49	9.03	9.92	9.96	9.64	0.53

ตารางผนวก ง3-2 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.69	9.93	9.14	9.59	0.41	9.69	9.93	9.14	9.59	0.41	9.69	9.93	9.14	9.59	0.41
90	9.65	9.92	9.10	9.56	0.42	9.66	9.92	9.12	9.57	0.41	9.65	9.91	9.12	9.56	0.38
180	9.64	9.91	9.12	9.56	0.40	9.65	9.91	9.11	9.56	0.41	9.66	9.90	9.10	9.55	0.39
270	9.63	9.92	9.14	9.56	0.39	9.66	9.90	9.13	9.56	0.39	9.64	9.92	9.11	9.56	0.37
360	9.63	9.91	9.13	9.56	0.40	9.67	9.92	9.12	9.57	0.41	9.65	9.91	9.10	9.55	0.38

ตารางผนวก ง3-3 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.95	9.96	9.95	9.95	0.01	9.95	9.96	9.95	9.95	0.01	9.96	9.96	9.95	9.95	0.01
90	7.57	7.64	7.62	7.61	0.04	7.93	7.58	7.41	7.64	0.22	7.75	7.53	7.95	7.74	0.17
180	7.42	7.64	7.65	7.57	0.13	7.83	7.53	7.44	7.60	0.17	7.72	7.53	7.95	7.73	0.17
270	7.53	7.60	7.63	7.59	0.05	7.80	7.63	7.42	7.62	0.16	7.68	7.56	7.92	7.72	0.15
360	7.56	7.62	7.57	7.58	0.03	7.84	7.64	7.43	7.64	0.17	7.65	7.52	7.83	7.67	0.13

ตารางผนวก ง3-4 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.25	9.53	9.18	9.32	0.19	9.25	9.53	9.18	9.32	0.19	9.25	9.53	9.18	9.32	0.19
90	8.23	8.50	8.15	8.29	0.18	8.23	8.51	8.15	8.30	0.15	8.24	8.52	8.17	8.31	0.19
180	8.22	8.51	8.16	8.30	0.19	8.21	8.50	8.17	8.29	0.15	8.23	8.51	8.16	8.30	0.19
270	8.23	8.52	8.16	8.30	0.19	8.22	8.52	8.16	8.30	0.16	8.23	8.52	8.17	8.31	0.19
360	8.23	8.51	8.15	8.30	0.19	8.23	8.52	8.17	8.31	0.15	8.24	8.51	8.16	8.30	0.18

ตารางผนวก ง3-5 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.59	9.59	9.60	9.59	0.01	9.59	9.59	9.60	9.59	0.01	9.59	9.59	9.60	9.59	0.01
90	9.52	9.57	9.57	9.55	0.03	9.59	9.57	9.56	9.57	0.01	9.58	9.56	9.58	9.57	0.01
180	9.50	9.55	9.58	9.54	0.04	9.58	9.58	9.58	9.58	0.00	9.57	9.58	9.59	9.58	0.01
270	9.44	9.54	9.56	9.51	0.06	9.56	9.56	9.57	9.56	0.01	9.60	9.57	9.57	9.58	0.01
360	9.52	9.55	9.56	9.54	0.02	9.59	9.57	9.58	9.58	0.01	9.58	9.56	9.58	9.57	0.01

ตารางผนวก ง3-6 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.38	9.38	9.38	9.38	0.00	9.38	9.38	9.38	9.38	0.00	9.38	9.38	9.38	9.38	0.00
90	9.36	9.34	9.36	9.35	0.01	9.35	9.35	9.36	9.35	0.01	9.33	9.35	9.34	9.34	0.01
180	9.35	9.32	9.35	9.34	0.01	9.31	9.32	9.34	9.32	0.01	9.36	9.36	9.32	9.35	0.02
270	9.36	9.35	9.34	9.35	0.01	9.32	9.34	9.35	9.34	0.01	9.32	9.34	9.35	9.34	0.01
360	9.32	9.35	9.35	9.34	0.01	9.34	9.32	9.32	9.33	0.01	9.31	9.35	9.36	9.34	0.02

ตารางผนวก ง3-7 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.34	9.35	9.34	9.34	0.01	9.34	9.35	9.34	9.34	0.01	9.34	9.35	9.34	9.34	0.01
90	9.23	9.24	9.25	9.24	0.01	9.22	9.24	9.22	9.23	0.01	9.25	9.22	9.22	9.23	0.01
180	9.25	9.22	9.24	9.24	0.02	9.23	9.25	9.23	9.24	0.01	9.24	9.24	9.25	9.24	0.01
270	9.26	9.23	9.23	9.24	0.02	9.22	9.22	9.24	9.23	0.01	9.24	9.2	9.24	9.23	0.02
360	9.22	9.24	9.25	9.24	0.02	9.24	9.24	9.23	9.24	0.01	9.23	9.23	9.22	9.23	0.01

ตารางผนวก ง3-8 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.47	9.47	9.48	9.47	0.01	9.47	9.47	9.48	9.47	0.01	9.47	9.47	9.48	9.47	0.01
90	9.44	9.44	9.44	9.44	0.00	9.44	9.45	9.44	9.44	0.01	9.45	9.46	9.46	9.46	0.01
180	9.44	9.45	9.46	9.45	0.00	9.46	9.43	9.43	9.44	0.01	9.44	9.45	9.44	9.44	0.01
270	9.43	9.44	9.45	9.44	0.01	9.46	9.46	9.44	9.45	0.01	9.45	9.46	9.45	9.45	0.01
360	9.43	9.43	9.44	9.43	0.01	9.44	9.44	9.43	9.44	0.01	9.44	9.45	9.45	9.45	0.01

ตารางผนวก ง3-9 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.19	9.20	9.20	9.20	0.01	9.19	9.20	9.20	9.20	0.01	9.19	9.20	9.20	9.20	0.01
90	9.18	9.15	9.15	9.16	0.02	9.18	9.16	9.17	9.17	0.01	9.16	9.20	9.14	9.17	0.02
180	9.16	9.16	9.14	9.15	0.01	9.16	9.15	9.16	9.16	0.01	9.17	9.18	9.17	9.17	0.01
270	9.15	9.14	9.16	9.15	0.01	9.18	9.17	9.15	9.17	0.01	9.14	9.15	9.15	9.15	0.01
360	9.15	9.15	9.15	9.15	0.00	9.15	9.15	9.14	9.15	0.01	9.13	9.17	9.13	9.14	0.02

ตารางผนวก ง3-10 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียรวมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน

(Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.59	9.58	9.59	9.59	0.01	9.59	9.58	9.59	9.59	0.01	9.59	9.58	9.59	9.59	0.01
90	9.47	9.46	9.48	9.47	0.01	9.48	9.49	9.49	9.49	0.01	9.50	9.49	9.48	9.49	0.01
180	9.47	9.50	9.50	9.49	0.02	9.49	9.47	9.47	9.48	0.01	9.48	9.50	9.49	9.49	0.01
270	9.50	9.48	9.47	9.48	0.02	9.47	9.50	9.50	9.49	0.01	9.49	9.48	9.50	9.49	0.01
360	9.49	9.50	9.47	9.49	0.02	9.50	9.48	9.47	9.48	0.01	9.48	9.50	9.49	9.49	0.01

ตารางผนวก ง3-11 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน

(Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.38	9.41	9.40	9.40	0.02	9.38	9.41	9.40	9.40	0.02	9.38	9.41	9.40	9.40	0.02
90	9.36	9.34	9.35	9.35	0.01	9.38	9.38	9.38	9.38	0.00	9.38	9.38	9.36	9.37	0.01
180	9.36	9.32	9.34	9.34	0.02	9.36	9.36	9.36	9.36	0.00	9.36	9.38	9.38	9.37	0.01
270	9.34	9.33	9.35	9.34	0.01	9.36	9.36	9.36	9.36	0.00	9.36	9.36	9.36	9.36	0.00
360	9.34	9.33	9.33	9.33	0.01	9.36	9.34	9.35	9.35	0.01	9.38	9.38	9.36	9.37	0.01

ตารางผนวก ง3-12 ผลการวิเคราะห์ pH ในน้ำเสียรวมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน

(Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	9.59	9.59	9.60	9.59	0.01	9.59	9.59	9.60	9.59	0.01	9.59	9.59	9.60	9.59	0.01
90	9.44	9.45	9.43	9.44	0.01	9.44	9.42	9.43	9.43	0.01	9.43	9.44	9.43	9.43	0.01
180	9.43	9.43	9.45	9.44	0.01	9.42	9.43	9.42	9.42	0.01	9.45	9.43	9.45	9.44	0.01
270	9.46	9.45	9.44	9.45	0.01	9.44	9.44	9.42	9.43	0.01	9.44	9.44	9.44	9.44	0.00
360	9.44	9.44	9.45	9.44	0.00	9.43	9.43	9.42	9.43	0.01	9.43	9.45	9.43	9.44	0.01

ตารางผนวก ง4-1 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	3035	3101	2869	3002	119.54	3035	3101	2869	3002	119.54	3035	3101	2869	3002	119.54
90	2966	2856	2843	2888	67.57	2465	2968	2750	2728	252.24	2725	2652	2865	2747	108.24
180	2398	2691	2732	2607	182.16	2444	2760	2672	2625	163.09	2774	2693	2863	2777	85.03
270	2343	2967	2587	2632	314.46	2461	2987	2798	2749	266.45	2848	2856	2632	2779	127.08
360	2592	2731	2717	2680	76.53	2491	2861	2522	2625	205.26	2683	2762	2750	2732	42.57

ตารางผนวก ง4-2 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	168	187	179	178	9.54	168	187	179	178	9.54	168	187	179	178	9.54
90	163	182	170	172	9.61	165	176	180	174	7.77	165	179	168	171	7.37
180	165	181	173	173	8.00	166	176	180	174	7.21	168	177	167	171	5.51
270	165	182	172	173	8.54	166	175	179	173	6.66	165	179	167	170	7.57
360	162	180	175	172	9.29	164	176	177	172	7.23	162	179	168	170	8.62

ตารางผนวก ง4-3 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	6	8	7	7	1.00	6	8	7	7	1.00	6	8	7	7	1.00
90	6	7	6	6	0.58	6	7	7	7	0.58	6	7	7	7	0.58
180	6	7	6	6	0.58	6	6	7	6	0.58	6	7	7	7	0.58
270	6	8	7	7	1.00	6	6	6	6	0.00	6	7	7	7	0.58
360	5	8	6	6	1.53	6	6	6	6	0.00	6	8	7	7	1.00

ตารางผนวก ง4-4 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	4	4	4	4	0.00	4	4	4	4	0.00	4	4	4	4	0.00
90	3	4	4	4	0.58	4	3	4	4	0.58	4	4	4	4	0.00
180	3	4	4	4	0.58	3	3	4	3	0.58	4	3	4	4	0.58
270	4	4	4	4	0.00	3	3	4	3	0.58	4	4	4	4	0.00
360	4	4	4	4	0.00	3	3	3	3	0.00	3	4	3	3	0.58

ตารางผนวก ง4-5 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1135	1131	1134	1133	2.08	1135	1131	1134	1133	2.08	1135	1131	1134	1133	2.08
90	1033	1075	1077	1062	24.85	1033	1073	1046	1051	20.40	1076	1050	1076	1067	15.01
180	1027	1057	1066	1050	20.42	1052	1070	1076	1066	12.49	1061	1067	1064	1064	3.00
270	1077	1033	1062	1057	22.37	1062	1063	1048	1058	8.39	1053	1058	1057	1056	2.65
360	1040	1054	1083	1059	21.93	1080	1059	1077	1072	11.36	1077	1069	1050	1065	13.87

ตารางผนวก ง4-6 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	3117	3105	3131	3118	13.01	3117	3105	3131	3118	13.01	3117	3105	3131	3118	13.01
90	2958	2968	2971	2966	6.81	3073	3022	3003	3033	36.20	2911	2974	2897	2927	41.02
180	2985	2942	2965	2964	21.52	3094	2982	2981	3019	64.95	2972	2960	2967	2966	6.03
270	2918	2990	2962	2957	36.30	3071	2954	2966	2997	64.37	2981	2937	2942	2953	24.09
360	2915	2908	2953	2925	24.21	3079	2982	2979	3013	56.89	2975	2974	2879	2943	55.14

ตารางผนวก ง4-7 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	450	453	453	452	1.73	450	453	453	452	1.73	450	453	453	452	1.73
90	432	433	433	433	0.58	435	432	433	433	1.53	434	433	432	433	1.00
180	427	430	430	429	1.73	436	430	430	432	3.46	433	432	430	432	1.53
270	433	432	433	433	0.58	434	428	436	433	4.16	429	433	432	431	2.08
360	431	436	432	433	2.65	436	433	430	433	3.00	433	430	433	432	1.73

ตารางผนวก ง4-8 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	39	38	39	39	0.58	39	39	39	39	0.00	39	39	39	39	0.00
90	36	37	36	36	0.58	36	36	36	36	0.00	37	37	37	37	0.00
180	36	36	36	36	0.00	36	36	36	36	0.00	37	36	36	36	0.58
270	36	36	36	36	0.00	37	36	36	36	0.58	36	37	36	36	0.58
360	36	36	36	36	0.00	36	36	36	36	0.00	37	37	37	37	0.00

ตารางผนวก ง4-9 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1340	1341	1345	1342	2.65	1340	1341	1345	1342	2.65	1340	1341	1345	1342	2.65
90	1325	1320	1327	1324	3.61	1327	1331	1320	1326	5.57	1344	1323	1335	1334	10.54
180	1327	1317	1319	1321	5.29	1315	1337	1332	1328	11.53	1336	1318	1339	1331	11.36
270	1336	1313	1332	1327	12.29	1335	1319	1333	1329	8.72	1328	1349	1325	1334	13.08
360	1317	1340	1327	1328	11.53	1340	1326	1324	1330	8.72	1315	1336	1339	1330	13.08

ตารางผนวก ง4-10 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียรวมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1654	1642	1648	1648	6.00	1654	1642	1648	1648	6.00	1654	1642	1648	1648	6.00
90	1604	1613	1592	1603	10.54	1506	1598	1582	1562	49.15	1617	1624	1613	1618	5.57
180	1594	1586	1622	1601	18.90	1596	1610	1603	1603	7.00	1617	1618	1621	1619	2.08
270	1586	1604	1598	1596	9.17	1591	1576	1617	1595	20.74	1615	1608	1614	1612	3.79
360	1571	1597	1588	1585	13.20	1572	1582	1597	1584	12.58	1604	1614	1622	1613	9.02

ตารางผนวก ง4-11 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน

(Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1138	1136	1137	1137	1.00	1138	1136	1137	1137	1.00	1138	1136	1137	1137	1.00
90	1062	1057	1064	1061	3.61	1069	1053	1067	1063	8.72	1045	1076	1068	1063	16.09
180	1062	1052	1057	1057	5.00	1075	1065	1052	1064	11.53	1070	1053	1069	1064	9.54
270	1068	1052	1042	1054	13.11	1066	1079	1047	1064	16.09	1065	1075	1052	1064	11.53
360	1049	1063	1065	1059	8.72	1052	1075	1059	1062	11.79	1069	1053	1067	1063	8.72

ตารางผนวก ง4-12 ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (มก./ล) ในน้ำเสียรวมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน

(Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1649	1644	1641	1645	4.04	1649	1644	1641	1645	4.04	1649	1644	1641	1645	4.04
90	1448	1442	1446	1445	3.06	1448	1439	1430	1439	9.00	1448	1444	1443	1445	2.65
180	1440	1440	1430	1437	5.77	1440	1443	1431	1438	6.24	1442	1443	1448	1444	3.21
270	1442	1440	1441	1441	1.00	1440	1438	1439	1439	1.00	1443	1446	1451	1447	4.04
360	1446	1441	1440	1442	3.21	1454	1441	1441	1445	7.51	1443	1452	1447	1447	4.51

ตารางผนวก ง5-1 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	25.8	25.4	25.7	25.6	0.21	25.8	25.4	25.7	25.6	0.21	25.8	25.4	25.7	25.6	0.21
90	25.8	25.5	25.5	25.6	0.17	25.4	25.4	25.5	25.4	0.06	25.6	25.3	25.5	25.5	0.15
180	25.7	25.3	25.5	25.5	0.20	25.4	25.5	25.5	25.5	0.06	25.5	25.4	25.7	25.5	0.15
270	25.5	25.4	25.6	25.5	0.10	25.5	25.3	25.4	25.4	0.10	25.7	25.4	25.5	25.5	0.15
360	25.5	25.3	25.6	25.4	0.12	25.7	25.4	25.5	25.5	0.15	25.6	25.3	25.6	25.5	0.17

ตารางผนวก ง5-2 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	2.7	2.6	2.5	2.6	0.10	2.7	2.6	2.5	2.6	0.10	2.7	2.6	2.5	2.6	0.10
90	2.6	2.5	2.4	2.5	0.10	2.6	2.6	2.5	2.6	0.06	2.5	2.5	2.5	2.5	0.00
180	2.5	2.5	2.4	2.5	0.06	2.6	2.6	2.5	2.6	0.06	2.5	2.5	2.4	2.5	0.06
270	2.6	2.4	2.4	2.5	0.12	2.6	2.6	2.5	2.6	0.06	2.5	2.5	2.5	2.5	0.00
360	2.6	2.5	2.4	2.5	0.10	2.6	2.6	2.5	2.6	0.06	2.5	2.5	2.5	2.5	0.00

ตารางผนวก ง5-3 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00
90	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
180	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
270	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
360	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00

ตารางผนวก ง5-4 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00
90	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00
180	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00
270	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00
360	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00

ตารางผนวก ง5-5 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	12.2	12.3	12.2	12.2	0.06	12.2	12.3	12.2	12.2	0.06	12.2	12.3	12.2	12.2	0.06
90	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00
180	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00
270	12.1	12.2	12.2	12.2	0.06	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00
360	12.3	12.2	12.2	12.2	0.06	12.2	12.3	12.2	12.2	0.06	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00

ตารางผนวก ง5-6 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	29.8	29.8	29.8	29.8	0.00	29.8	29.8	29.8	29.8	0.00	29.8	29.8	29.8	29.8	0.00
90	29.4	29.5	29.3	29.4	0.10	29.3	29.5	29.4	29.4	0.10	29.6	29.2	29.3	29.4	0.21
180	29.2	29.3	29.5	29.3	0.15	29.3	29.3	29.5	29.4	0.12	29.4	29.4	29.6	29.5	0.12
270	29.4	29.5	29.2	29.4	0.15	29.4	29.3	29.2	29.3	0.10	29.4	29.5	29.4	29.4	0.06
360	29.5	29.4	29.3	29.4	0.10	29.5	29.2	29.4	29.4	0.15	29.4	29.3	29.1	29.3	0.15

ตารางผนวก ง5-7 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	5.9	5.9	5.9	5.9	0.00	5.9	5.9	5.9	5.9	0.00	5.9	5.9	5.9	5.9	0.00
90	5.8	5.8	5.9	5.8	0.01	5.9	5.8	5.8	5.8	0.01	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00
180	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00
270	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00
360	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00	5.8	5.8	5.8	5.8	0.00

ตารางผนวก ง5-8 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิลเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	0.52	0.52	0.52	0.52	0.00	0.52	0.52	0.52	0.52	0.00	0.52	0.52	0.52	0.52	0.00
90	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00	0.52	0.51	0.51	0.51	0.01	0.52	0.52	0.51	0.52	0.01
180	0.52	0.51	0.51	0.51	0.01	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00	0.52	0.52	0.52	0.52	0.00
270	0.51	0.51	0.52	0.51	0.01	0.51	0.52	0.51	0.51	0.01	0.51	0.52	0.51	0.51	0.01
360	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00

ตารางผนวก ง5-9 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสีเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	1.04	1.05	1.05	1.05	0.01	1.04	1.05	1.05	1.05	0.01	1.04	1.05	1.05	1.05	0.01
90	1.00	1.02	0.98	1.00	0.02	1.01	1.03	1.02	1.01	0.01	1.03	1.02	1.01	1.02	0.01
180	1.03	1.01	1.02	1.02	0.01	1.00	1.02	1.01	1.01	0.01	1.04	1.02	1.03	1.03	0.01
270	1.01	0.99	1.00	1.00	0.01	1.02	1.03	1.04	1.03	0.01	1.03	1.01	1.02	1.02	0.01
360	1.02	1.00	1.01	1.01	0.01	1.01	1.02	1.03	1.02	0.01	1.03	1.03	1.03	1.03	0.00

ตารางผนวก ง5-10 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียรวมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	18.4	18.4	18.4	18.4	0.00	18.4	18.4	18.4	18.4	0.00	18.4	18.4	18.4	18.4	0.00
90	18.3	18.4	18.3	18.3	0.06	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00
180	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00
270	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00
360	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00	18.3	18.3	18.3	18.3	0.00

ตารางผนวก ง5-11 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียรวมสังเคราะห์เมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชั่น (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	12.3	12.2	12.2	12.2	0.06	12.3	12.2	12.2	12.2	0.06	12.3	12.2	12.2	12.2	0.06
90	12.1	12.0	12.1	12.1	0.06	12.0	12.1	12.1	12.1	0.06	12.1	12.1	12.1	12.1	0.00
180	12.1	12.1	12.0	12.1	0.06	12.1	12.0	12.1	12.1	0.06	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00
270	12.0	12.1	12.1	12.1	0.06	12.2	12.1	12.2	12.2	0.06	12.1	12.1	12.1	12.1	0.00
360	12.1	12.1	12.0	12.1	0.06	12.1	12.2	12.2	12.2	0.06	12.2	12.2	12.2	12.2	0.00

ตารางผนวก ง5-12 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า (mS/m) ในน้ำเสียรวมเมื่อกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชั่น (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa)

เวลา	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(นาที)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	17.9	17.9	17.6	17.8	0.17	17.9	17.9	17.6	17.8	0.17	17.9	17.9	17.6	17.8	0.17
90	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	16.9	16.8	0.06
180	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	16.9	16.8	0.06
270	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	17	16.9	0.12
360	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00	16.8	16.8	16.8	16.8	0.00

ตารางผนวก ง6-1 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียม ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	12961	12061	11173	12065	894.01	13379	12146	11862	12462	806.46	11720	11879	11632	11744	125.19
1	3092	2902	3113	3036	116.23	2265	2143	2342	2250	100.34	1662	1720	1562	1648	79.92
2	2421	2336	2480	2412	72.39	1736	1647	1860	1748	106.98	1343	1488	1262	1364	114.50
3	2377	2374	2302	2351	42.46	1962	1956	2134	2017	101.08	602	730	559	630	88.95
4	2115	2302	2381	2266	136.61	1692	1658	1807	1719	78.08	420	461	401	427	30.66

ตารางผนวก ง6-2 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบทองแดง ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11485	11058	11817	11453	380.49	10791	11554	11356	11234	395.94	11620	11964	11645	11743	191.80
1	8426	5415	5133	6325	1825.26	3739	3106	3446	3430	316.79	2529	2264	2476	2423	140.22
2	4055	3934	3857	3949	99.81	2730	2127	2456	2438	301.92	1772	1160	1627	1520	319.81
3	2920	3412	3180	3171	246.13	1775	1630	1755	1720	78.58	1371	1082	1288	1247	148.80
4	2505	3144	2847	2832	319.76	1131	1256	1150	1179	67.36	804	817	812	811	6.56

ตารางผนวก ง6-3 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบนิกเกิล ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	12018	10767	11512	11432	629.29	11707	10647	11010	11121	538.70	11138	11379	11522	11346	194.07
1	933	966	950	950	16.50	986	1029	817	944	112.07	318	426	413	386	58.96
2	725	793	813	777	46.13	698	725	755	726	28.51	352	360	407	373	29.72
3	666	643	675	661	16.50	617	465	494	525	80.70	304	340	298	314	22.72
4	723	642	655	673	43.50	466	395	342	401	62.22	250	272	290	271	20.03

ตารางผนวก ง6-4 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบสังกะสี ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11170	10968	10544	10894	319.49	10572	10381	10959	10637	294.49	10092	11111	11222	10808	622.84
1	1186	1297	898	1127	205.94	528	371	367	422	91.82	258	175	238	224	43.32
2	476	519	434	476	42.50	363	356	340	353	11.79	132	140	137	136	4.04
3	434	415	310	386	66.79	253	234	243	243	9.50	128	132	131	130	2.08
4	321	380	380	360	34.06	243	259	209	237	25.53	103	87	112	101	12.66

ตารางผนวก ง6-5 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์รวม ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11401	11566	11693	11553	146.41	12700	11648	11542	11963	640.17	12107	11619	11689	11805	263.87
1	3058	3132	2998	3063	67.12	2522	2583	2350	2485	120.83	1653	1653	1559	1622	54.27
2	2698	2821	2505	2675	159.29	1921	2011	1750	1894	132.58	1243	1279	1219	1247	30.20
3	4113	4187	3765	4022	225.34	3953	4105	3596	3885	261.29	1705	1824	1582	1704	121.01
4	3658	3958	3739	3785	155.20	1976	1940	1803	1906	91.28	950	973	868	930	55.19

ตารางผนวก ง6-6 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate mocrofiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11630	11587	11665	11627	39.07	11839	11701	11661	11734	93.39	11783	11725	11568	11692	111.23
1	5065	4722	5193	4993	243.54	2585	2716	2447	2583	134.52	3608	4242	3419	3756	431.09
2	4366	4270	4436	4357	83.34	5746	5181	4825	5251	464.44	1236	1287	1175	1233	56.07
3	3256	3193	3423	3291	118.85	1266	1333	1260	1286	40.53	1051	1126	989	1055	68.60
4	3096	2999	3083	3059	52.65	1249	1281	1217	1249	32.00	1089	1057	1016	1054	36.59

ตารางผนวก ง6-7 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm) ในการทดลองกับน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11350	11623	11705	11559	185.87	11465	11477	11523	11488	30.62	11377	11636	11588	11534	137.78
1	3546	3549	3422	3506	72.47	3435	3423	3432	3430	6.24	2778	2601	2670	2683	89.21
2	1920	1838	1768	1842	76.08	2461	2519	2395	2458	62.04	2058	1883	1948	1963	88.46
3	2283	2250	2125	2219	83.34	1938	1989	2013	1980	38.30	1509	1420	1525	1485	56.57
4	2567	2356	2511	2478	109.30	1876	1894	1886	1885	9.02	1336	1282	1249	1289	43.92

ตารางผนวก ง6-8 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 µm) ในการทดลองกับน้ำเสียจากกระบวนการชุบนิกเกิล ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11817	11647	11676	11713	90.94	12001	11831	11693	11842	154.28	11139	11640	11651	11477	292.48
1	1515	1675	1300	1497	188.17	1406	1488	1360	1418	64.84	847	822	921	863	51.48
2	1341	1326	1253	1307	47.08	1185	1250	1165	1200	44.44	754	744	794	764	26.46
3	1237	1277	1154	1223	62.74	727	1060	724	837	193.13	596	574	624	598	25.06
4	1185	1283	1089	1186	97.00	788	794	713	765	45.13	554	540	572	555	16.04

ตารางผนวก ง6-9 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียจากกระบวนการชุบสังกะสี ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11599	11552	11721	11624	87.23	11200	11643	11554	11466	234.34	11461	11641	11596	11566	93.67
1	1709	1571	1764	1681	99.43	1006	1095	975	1025	62.29	1117	1090	1165	1124	37.99
2	1351	1255	1406	1337	76.42	503	557	435	498	61.13	347	336	349	344	7.00
3	1060	970	1105	1045	68.74	291	330	221	281	55.23	144	152	150	149	4.16
4	1031	923	1053	1002	69.58	303	270	215	263	44.46	159	140	141	147	10.69

ตารางผนวก ง6-10 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน (Cellulose acetate microfiltration membrane, pore size 0.2 μm) ในการทดลองกับน้ำเสียรวม ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	11612	11670	11757	11680	72.98	11223	11712	11670	11535	271.01	10413	11563	11589	11188	671.58
1	5877	5932	5534	5781	215.67	4895	4906	4813	4871	50.82	1893	1902	1816	1870	47.27
2	3479	3594	3349	3474	122.58	2495	2476	2397	2456	51.97	1174	1247	1169	1197	43.66
3	2911	2917	2672	2833	139.75	1750	1761	1662	1724	54.26	950	970	928	949	21.01
4	2767	2800	2645	2737	81.65	1477	1569	1422	1489	74.27	826	851	807	828	22.07

ตารางผนวก ง6-11 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์รวม ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	357	368	339	355	14.64	312	294	291	299	11.36	277	272	296	282	12.66
1	239	279	230	249	26.08	208	206	195	203	7.00	203	193	197	198	5.03
2	198	202	171	190	16.86	198	182	180	187	9.87	153	146	186	162	21.36
3	181	196	166	181	15.00	195	196	185	192	6.08	166	154	162	161	6.11
4	252	256	235	248	11.15	251	260	232	248	14.29	216	173	197	195	21.55

ตารางผนวก ง6-12 ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง) ของน้ำกลั่น วัดที่ความดัน 100 kPa หลังการล้างผิวหน้าแผ่นเยื่อกรองประเภทอัลตราฟิลเตรชัน (Polysulfone ultrafiltration membrane, MWCO 30 kDa) ในการทดลองกับน้ำเสียรวม ที่ความดันต่างๆ

การล้าง	ความดัน 50 kPa					ความดัน 100 kPa					ความดัน 200 kPa				
(รอบที่)	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ3	เฉลี่ย	S.D.
ก่อนกรอง	363	370	374	369	5.57	352	337	347	345	7.64	363	364	362	363	1.00
1	357	349	343	350	7.02	341	320	360	340	20.01	322	320	332	325	6.43
2	260	260	252	257	4.62	312	305	338	318	17.39	312	313	327	317	8.39
3	246	230	245	240	8.96	250	245	259	251	7.09	290	286	292	289	3.06
4	231	231	215	226	9.24	217	203	224	215	10.69	273	257	266	265	8.02

ภาคผนวก จ

การคำนวณ

การคำนวณฟลักซ์

จากสูตร $J = V/(A \times T)$ โดยที่ J = ฟลักซ์ ($l/m^2.h$)

V = ปริมาตร (l)

A = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเยื่อกรอง (m^2)

T = เวลา (h)

จากผลการทดลองน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง อยู่ในรูปน้ำหนัก ต้องทำการเปลี่ยนน้ำหนักเป็นปริมาตร จากสูตร

$V = m/\rho$ โดยที่ V = ปริมาตร (l)

m = มวล (g)

ρ = ความหนาแน่น (g/l)

ให้ ρ ของน้ำที่ผ่านการกรองโดยแผ่นเยื่อกรอง เท่ากับ ρ ของน้ำที่ 25°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากถือว่าน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรองมีสารอื่นเจือปนอยู่ปริมาณน้อย

ทำการคำนวณเพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเยื่อกรอง จากสูตร

$A = \Pi r^2$ โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเยื่อกรอง (m^2)

r = รัศมีของแผ่นเยื่อกรอง (m)

แผ่นเยื่อกรองที่ใช้มี $r = 0.022$ m

$\therefore A = 0.00152\ m^2$

<u>ตัวอย่างการคำนวณฟลักซ์</u>

ทำการคำนวณฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการชุบโครเมียม ในการกรองเป็นเวลา 1 นาที ได้น้ำที่ผ่านการกรองหนัก 154.85 กรัม

$J = (154.85/1000)/((0.00152 \times (1/60))$ $l/m^2.h$

$= 5993$ $l/m^2.h$

การคำนวณ Rm และ Rs

จากสูตร $J = \Delta P/\mu\,(Rm+Rs)$ โดยที่ J = ฟลักซ์ ($l/m^2.h$)

ΔP = ความดัน (kPa)

μ = ความหนืดของน้ำที่ 25°C = 0.89 $N.s/m^2$

Rm = ความต้านทานของแผ่นเยื่อกรอง (m^{-1})

Rs = ความต้านทานของตัวถูกละลาย (m^{-1})

วัดฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ความดัน 100 kPa ก่อนทำการกรองน้ำเสีย เพื่อคำนวณ Rm โดยในขั้นตอนนี้ Rs เท่ากับ 0

เช่น ฟลักซ์ของน้ำกลั่น ที่ความดัน 100 kPa เท่ากับ 12000 $l/m^2.h$ ทำการคำนวณค่า Rm จากสูตร

$$J = \Delta P/\mu\,(Rm+Rs)$$

$$12000 = 100/0.89 \times Rm$$

$$Rm = 0.0094 \quad m^{-1}$$

เมื่อทำการกรองน้ำเสียแล้วจึงทำการคำนวณค่า Rs ได้

เช่น จากตัวอย่างข้างต้น ได้ทำการกรองน้ำเสียเป็นเวลา 90 นาที แล้วทำการวัดฟลักซ์ของน้ำกลั่น ที่ความดัน 100 kPa เท่ากับ 5400 $l/m^2.h$ ทำการคำนวณค่า Rs จากสูตร

$$J = \Delta P/\mu\,(Rm+Rs)$$

$$5400 = 100/0.89\,(0.0094+Rs)$$

$$Rs = 0.01 \quad m^{-1}$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวพูลเพชร ธงไชย

วัน เดือน ปีเกิด 8 มีนาคม 2515

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (พยาบาล)	คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	พ.ศ. 2537

ทุนการศึกษาที่ได้รับระหว่างการศึกษา

ทุนสนับสนุนโครงการแลกเปลี่ยนนักศึกษาและบุคลากรไทยกับต่างประเทศของทบวงมหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2539