

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ  
(กรณีศึกษา : การใช้น้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต)

นายสุนทร แสนหอม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2550

**APPLICATION OF CLEANER TECHNOLOGY IN A  
METAL FINISHING INDUSTRY (CASE STUDY :  
WATER USAGE IN PHOSPHATING PROCESS)**

**Soonthorn Sanhoom**

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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2007**

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ  
(กรณีศึกษา : การใช้น้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุจิตต์ กระจิต)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.ปิยะรัตน์ ปริย์มาโนช)

กรรมการ

(อ. ดร.ฉัตรเพชร ยศพล)

กรรมการ

(รศ. ดร.เสาวณี รัตนพานิช)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุนทร แสนหุม : การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ  
(กรณีศึกษา : การใช้น้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต) (APPLICATION  
OF CLEANER TECHNOLOGY IN A METAL FINISHING INDUSTRY  
(CASE STUDY : WATER USAGE IN PHOSPHATING PROCESS))

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร, 147 หน้า.

อุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญและเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ การตกแต่งโลหะสำเร็จมีการใช้น้ำในปริมาณมากโดยเฉพาะขั้นตอนการล้างชิ้นงานในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ในอดีตได้มีการศึกษาวิธีการลดการใช้น้ำและลดการเกิดน้ำเสีย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดี แต่ยังคงมีแนวทางอื่นที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการใช้น้ำและลดปริมาณน้ำเสียได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาลดการใช้น้ำและนำน้ำที่กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

การล้างสวนกระแสในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตมีสองช่วง คือ การล้างล้างก่อนชุบเคลือบฟอสเฟตประกอบด้วยสองบ่อน้ำล้าง และการล้างหลังชุบเคลือบฟอสเฟตประกอบด้วยสี่บ่อน้ำล้าง บ่อน้ำล้างแต่ละบ่อจะถูกควบคุมค่าปนเปื้อนในรูปแบบของค่าสภาพต่าง ค่าสภาพกรด และค่าสภาพการนำไฟฟ้า ซึ่งพบว่าถ้าการล้างชิ้นงานในการเคลือบฟอสเฟตมีจำนวนบ่อน้ำล้างเพิ่มขึ้น คุณลักษณะของน้ำล้างจะมีค่าปนเปื้อนลดลง นอกจากนี้การควบคุมอัตราน้ำล้างสวนกระแส 150 ลิตรต่อชั่วโมง ในช่วงการล้างหลังชุบฟอสเฟตสามารถควบคุมค่าความปนเปื้อนในน้ำล้างของแต่ละบ่อน้ำล้างไม่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานควบคุม และมีค่าความปนเปื้อนในน้ำล้างสม่ำเสมอด้วย จากผลการศึกษาพบว่าสามารถลดการใช้น้ำประปา และน้ำอาร์โอได้ร้อยละ 66 และ 55 ตามลำดับ และลดการปล่อยปริมาณน้ำเสียได้ร้อยละ 68 ในขณะที่เวลาน้ำเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการล้างหลังชุบเคลือบฟอสเฟตยังสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำประปาในขั้นตอนการล้างล้างก่อนชุบเคลือบฟอสเฟตได้โดยตรง โดยการควบคุมค่าสภาพการนำไฟฟ้าในบ่อน้ำล้างสุดท้ายไม่เกิน 200 ไมโครซีเมนต์ต่อเซ็นติเมตร ซึ่งพบว่าการยึดติดสีบนผิวชิ้นงานไม่มีความแตกต่างกัน การนำน้ำเสียดังกล่าวกลับมาใช้ซ้ำสามารถลดการใช้น้ำประปาได้เพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 13 และลดการปล่อยปริมาณน้ำเสียได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 16 ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ปีละ 402,480 บาท โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

การนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านเครื่องกรองเมมเบรนระบบอาร์โอด้วยอัตราการกรอง 31.6 ลิตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง สามารถลดการปล่อยน้ำทิ้งได้ร้อยละ 60 ที่ประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าร้อยละ 99 ซึ่งน้ำอาร์โอที่ผลิตได้มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 11.3 ไมโครซีเมนต์ต่อเซ็นติเมตร การนำน้ำทิ้งดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่สามารถลดการใช้

น้ำประปาได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 12 ในขณะที่น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการกรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ และชุดกรองคาร์บอน

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

SOONTHORN SANHOOM : APPLICATION OF CLEANER  
TECHNOLOGY IN A METAL FINISHING INDUSTRY (CASE STUDY :  
WATER USAGE IN PHOSPHATING PROCESS). THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. BOONCHAI WICHITSATHIAN, Ph.D. 147 PP.

CLEANER TECHNOLOGY / CLEANING METHOD /  
PHOSPHATING PROCESS / RECYCLE / REUSE

Metal finishing industry is an important industry related to others. This kind of industry consumed a large amount of water, especially workpiece rinsing in phosphating process. There were previous studies about reducing water consumption and wastewater that could have been well applied. Nevertheless, there are still many ways to enhance efficiency of reducing water consumption and wastewater. Thus this research had been studied about reducing water consumption and reusing wastewater in phosphating process.

There were two stages of counter current rinsing in phosphating process. The first one was alkaline rinsing in two rinsing tanks at pre - phosphate coating and the second was rinsing in four tanks at post - phosphate coating. Each tank was contaminative controlled in forms of alkalinity, acidity and conductivity. It was found that if quantity of tanks were increased in workpiece rinsing during phosphating process, then properties of rinsing water would have decreased contaminative value. Moreover, counter current rinsing control at 150 liters per hour at post - phosphate coating could control contaminative value in rinsing water of each tank not exceeded than standard value and also had steady contaminative value in rinsing water. The

research found that it could reduce tap water consumption and RO water with 66% and 55% respectively, and reduce 68% of wastewater quantity. At the same time wastewater that happened in rinsing at post - phosphate coating stage could directly reuse instead of tap water in alkaline rinsing at pre - phosphate coating stage by controlling conductivity value in the last rinsing tank at maximum 200  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . It was found that there were not any differences in adhesion of paint on workpieces surface. Reusing such wastewater could reduce tap water consumption 13% and reduce wastewater drainage 16% more that saved annual expenses 402,480 bahts without any investment costs.

Reusing RO concentrate through membrane filters of RO system with permeate flux rate of 31.6 liters/ $\text{m}^2\cdot\text{h}$  can reduce water drainage 60% at efficiency of conductivity rejecting 99% and produced RO water had average conductivity at 11.3  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Reusing RO concentrate can reduce tap water consumption up to 12% while effluents from wastewater treatment system could have been reused through disc filters and cartridge filters.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature\_\_\_\_\_

Advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินการวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตต์ ทรุจิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.ปิยะรัตน์ ปรีย์มานิช และ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชา ส่วนอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุน

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาอนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่สำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรและเพื่อนบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ขอขอบคุณ คุณเฉลิมพล จิงตระกูลวงศ์ คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภรรยา คุณสรินยา และบุตรสาว เจนิสา แสนหุม ที่ให้กำลังใจเสมอมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา คุณพ่อบุญนันทน์ แสนหุม มารดา คุณแม่เหลา แสนหุม และครอบครัวแสนหุม ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม และส่งเสริมการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สุนทร แสนหุม



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ต
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา .....	3
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสะอาด .....	4
2.1.1 ความหมายของเทคโนโลยีสะอาด .....	4
2.1.2 หลักการของเทคโนโลยีสะอาด.....	4
2.1.3 ประโยชน์ของเทคโนโลยีสะอาด .....	5
2.1.4 ขั้นตอนการทำเทคโนโลยีสะอาด.....	5
2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ .....	8
2.2.1 วิธีการตกแต่งโลหะสำเร็จ .....	8
2.2.2 กระบวนการตกแต่งโลหะสำเร็จ .....	9
2.3 กระบวนการเคลือบฟอสเฟต .....	12
2.3.1 ขั้นตอนของกระบวนการเคลือบฟอสเฟต .....	12
2.3.2 สารเคมีที่ใช้ในบ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟต .....	15

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 การล้างจิ้งจาง	16
2.4 แหล่งน้ำเสียและการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ	17
2.4.1 แหล่งน้ำเสีย	17
2.4.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ	20
2.5 การลดการใช้น้ำในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ	
โดยอาศัยเทคโนโลยีสะอาด	25
2.5.1 การลดสารละลายเคมีจากบ่อกระบวนการที่จะปนเปื้อนในน้ำล้าง	26
2.5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง	27
2.6 เทคนิคการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ	31
2.7 ระบบกรองเมมเบรน	34
2.7.1 โมดูลเมมเบรน	35
2.7.2 ระบบการกรองของเมมเบรน	37
2.7.3 การทำความสะอาดเมมเบรน	41
2.8 การประยุกต์ใช้เมมเบรน	42
2.8.1 การประยุกต์ใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน	42
2.8.2 การประยุกต์ใช้ระบบอาร์โอ	43
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	<b>46</b>
3.1 สภาพของโรงงานที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา	46
3.2 สภาพปัญหาที่เกิดขึ้น	51
3.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย	51
3.4 สํารวจโรงงานและศึกษาสมดุลมวลน้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต	53
3.5 ศึกษาคุณลักษณะของน้ำ	54
3.6 ศึกษาการลดการใช้น้ำ	56
3.6.1 การนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ	56
3.6.2 การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่	59
3.6.2.1 ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งอาร์โอเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่	59

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.2.2	ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่.....	63
3.7	วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ.....	66
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	68
4.1	สำรวจโรงงานและศึกษาสมมูลมวลน้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต.....	68
4.2	ศึกษาคุณลักษณะของน้ำ.....	70
4.2.1	คุณลักษณะของน้ำใช้และน้ำล้าง.....	70
4.2.1.1	คุณลักษณะของน้ำใช้และน้ำล้างที่เกี่ยวข้องกับ การล้างสารละลายต่าง.....	70
4.2.1.2	คุณลักษณะของน้ำใช้และน้ำล้างที่เกี่ยวข้องกับ การล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต.....	72
4.2.2	คุณลักษณะของน้ำเสียและน้ำทิ้งจากระบบบำบัด.....	77
4.3	ศึกษาการลดการใช้น้ำ.....	79
4.3.1	ศึกษาการนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ.....	79
4.3.2	ศึกษาการนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่.....	83
4.3.2.1	คุณลักษณะของน้ำ.....	83
4.3.2.2	สถานะที่เหมาะสมของระบบอาร์โอ.....	85
4.3.2.3	การเดินระบบอาร์โอต้นแบบ.....	89
4.3.2.4	เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตน้ำอาร์โอ.....	93
4.3.2.5	การลดการใช้น้ำประปาจากการนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่.....	95
4.3.3	ศึกษาการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่.....	95
4.3.3.1	คุณลักษณะของน้ำ.....	95
4.3.3.2	ความเหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชัน.....	96
4.4	ประเมินความเป็นไปได้.....	98
4.4.1	ลดการใช้น้ำในระบบล้างสวนกระแส.....	98
4.4.2	ล้างสวนกระแสแบบนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ.....	99

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.3 การนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ .....	101
4.4.4 การนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ .....	103
4.5 สรุปผลการทดลอง.....	105
<b>5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>111</b>
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	111
5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์.....	112
5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	113
รายการอ้างอิง .....	114
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดเพิ่มเติมวิธีการทดลอง.....	118
ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง .....	122
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	145
ประวัติผู้เขียน .....	147

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณลักษณะน้ำประปาและน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ ..... 11
2.2	สถานะควบคุมในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ..... 15
2.3	ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ ..... 20
2.4	ข้อดีและข้อเสีย ของเทคนิคทางเคมี - กายภาพในการกำจัดโลหะหนัก ..... 22
2.5	อัตราน้ำล้างไหลสวนกระแสน้ำตามลำดับการล้าง ..... 30
2.6	การป้องกันเมมเบรน NF และ RO อุคตัน ..... 36
2.7	ตัวอย่างสารละลายเคมีที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรน ..... 42
3.1	ความเข้มข้นของสารละลายเคมีในบ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟตของโรงงาน ..... 49
3.2	ระดับความปนเปื้อนในการปล่อยน้ำล้างทิ้งของโรงงาน ..... 49
3.3	การควบคุมกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองตามมาตรฐานของโรงงาน ..... 58
3.4	รายละเอียดของอาร์โอที่ใช้ในชุดทดลอง ..... 60
3.5	ความถี่ของการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องระหว่างการเดินระบบอาร์โอ ..... 63
3.6	รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในชุดทดลอง ..... 64
3.7	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ ..... 66
4.1	ค่าสภาพต่างของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายต่างที่กระบวนการผลิตจริง ..... 70
4.2	ค่าสภาพกรดของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ที่กระบวนการผลิตจริง ..... 73
4.3	ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ที่กระบวนการผลิตจริง ..... 75
4.4	คุณลักษณะน้ำเสียและน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ..... 78
4.5	ลักษณะน้ำประปาและน้ำเสียที่ใช้ในการล้างล้างในระบบล้างสวนกระแสจำลอง ในห้องปฏิบัติการ ..... 80
4.6	คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 ในระบบการล้างล้างจำลองในห้องปฏิบัติการ ..... 81
4.7	คุณลักษณะน้ำระหว่างการทดลองเดินระบบอาร์โอต้นแบบ ..... 83

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบอาร์โอ.....	86
4.9 การประมาณการต้นทุนการผลิตน้ำอาร์โอจากน้ำประปาด้วยระบบอาร์โอต้นแบบ .....	94
4.10 ค่าความขุ่นของน้ำ .....	95
4.11 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการลดการใช้น้ำในระบบล้างสวนกระแส .....	99
4.12 ประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุงสำหรับน่าน้ำเสียจากระบบการล้างสวนกระแสแบบหลายขั้นตอนมาใช้ซ้ำ.....	100
4.13 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการน่าน้ำเสียจากระบบการล้างสวนกระแสแบบหลายขั้นตอนมาใช้ซ้ำ.....	101
4.14 ประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุงสำหรับน่าน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่.....	102
4.15 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการน่าน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่.....	102
4.16 ประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุงสำหรับน่าน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ใหม่ .....	104
4.17 ประมาณการค่าต้นทุนการกรองสำหรับน่าน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ใหม่.....	104
4.18 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการน่าน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ใหม่ .....	105
4.19 สรุปประเมินปริมาณการใช้น้ำและการเกิดน้ำเสียของแต่ละทางเลือก.....	109
4.20 สรุปความเป็นไปได้ของทางเลือกในการลดการใช้น้ำ .....	110
ข1 ข้อมูลวิเคราะห์สมดุลมวลน้ำในระบบการล้างในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต .....	123
ข2 คุณลักษณะสารละลายต่างบ่อที่ 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	124
ข3 คุณลักษณะสารละลายต่างบ่อที่ 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	124
ข4 คุณลักษณะสารละลายต่างบ่อที่ 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	124
ข5 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	125
ข6 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	125



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ข20	คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	130
ข21	คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	130
ข22	คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	130
ข23	คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	131
ข24	คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	131
ข25	คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต (พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ).....	131
ข26	ค่าเฉลี่ยคุณลักษณะน้ำล้างและสารละลายเคมีในบ่อกระบวนการ เคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ.....	132
ข27	คุณลักษณะน้ำล้างในบ่อน้ำล้าง ก - 1 ของการล้างสารละลายต่าง ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ .....	133
ข28	คุณลักษณะน้ำล้างในบ่อน้ำล้าง ก - 2 ของการล้างสารละลายต่าง ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ .....	134
ข29	คุณลักษณะน้ำล้างในบ่อน้ำล้าง ข - 1 และ ข - 4 ของการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ .....	135
ข30	ผลของแรงขับเคลื่อนต่อฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน สำหรับระบบอาร์ไอต้นแบบ (กรณีน้ำประปาเป็นน้ำป้อน) .....	136
ข31	ผลของแรงขับเคลื่อนต่อฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน สำหรับระบบอาร์ไอต้นแบบ (กรณีน้ำทิ้งอาร์ไอเป็นน้ำป้อน) .....	137



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข32 ผลของเปอร์เซ็นต์แยกกลับต่อคุณภาพน้ำอาร์โอ สำหรับระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำประปาเป็นน้ำป้อน) .....	138
ข33 ผลของเปอร์เซ็นต์แยกกลับต่อคุณภาพน้ำอาร์โอ สำหรับระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำทิ้งอาร์โอเป็นน้ำป้อน) .....	139
ข34 แรงขับเคลื่อนและลักษณะน้ำในระหว่างเดินระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำประปาเป็นน้ำป้อน) .....	140
ข35 แรงขับเคลื่อนและลักษณะน้ำในระหว่างเดินระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำทิ้งอาร์โอเป็นน้ำป้อน) .....	141
ข36 ลักษณะน้ำเสีย น้ำทิ้ง และน้ำกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน .....	142
ข37 สภาพการซึมผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย (เพอมีเอทฟลักซ์ 87.5 ล./ตร.ม.ชม.) .....	143
ข38 สภาพการซึมผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย (เพอมีเอทฟลักซ์ 100.0 ล./ตร.ม.ชม.) .....	143
ข39 สภาพการซึมผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย (เพอมีเอทฟลักซ์ 112.5 ล./ตร.ม.ชม.) .....	144

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการทำเทคโนโลยีสะอาด ..... 5
2.2	หลักการของเทคโนโลยีสะอาด ..... 7
2.3	ตัวอย่างกระบวนการเคลือบสี ..... 14
2.4	การล้างแบบสวนกระแส ..... 30
2.5	ระบบการนำน้ำล้างกลับคืน ..... 31
2.6	ลักษณะการไหลของน้ำในระบบกรองเมมเบรน ..... 37
2.7	ระบบกรองเมมเบรนแบบกะ ..... 38
2.8	ระบบกรองเมมเบรนแบบต่อเนื่องขั้นตอนเดียว ..... 38
2.9	การจัดเรียงโมดูลเมมเบรนแบบอนุกรม มีการวนกลับ ..... 39
2.10	การจัดเรียงโมดูลเมมเบรนแบบอนุกรมไหลผ่านครั้งเดียว ..... 39
3.1	ผังกระบวนการพ่นสีชิ้นงานเหล็กของโรงงานที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา ..... 47
3.2	ตัวอย่างห้องสเปรย์ บ่อกระบวนการ และตัวอย่างชิ้นงาน ..... 48
3.3	ระบบการล้างสวนกระแสสำหรับล้างสารละลายต่างของโรงงาน ..... 50
3.4	ระบบการล้างสวนกระแสสำหรับล้างสารละลายฟอสเฟตของโรงงาน ..... 50
3.5	ประเมินปริมาณน้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตของโรงงาน ..... 52
3.6	ลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน ..... 53
3.7	ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับศึกษาคุณลักษณะของน้ำ ..... 55
3.8	การจำลองการปนเปื้อนและการล้างสวนกระแสของกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลอง .... 57
3.9	ลำดับขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งอาร์โอเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ..... 60
3.10	ตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ..... 61
3.11	อุปกรณ์ทดลองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ..... 62
3.12	ลำดับขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ..... 65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 สมดุลมวลน้ำในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตของโรงงาน.....	69
4.2 ค่าสภาพต่างในน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง .....	71
4.3 ค่าสภาพกรดในน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง.....	71
4.4 ค่าสภาพกรดในน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง.....	73
4.5 ค่าสภาพกรดในน้ำล้างบ่อที่ ข - 2 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง.....	74
4.6 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง .....	76
4.7 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง .....	76
4.8 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตแล้วเคลือบสี .....	82
4.9 เพลมิเอทพลาซึ่มกับแรงขับเคลื่อนสำหรับหาความต้านทานเมมเบรนอาร์โอใหม่.....	85
4.10 ผลของแรงขับเคลื่อนต่อเพลมิเอทพลาซึ่มของระบบอาร์โอต้นแบบ สำหรับตัวอย่างน้ำประปาและน้ำทิ้งอาร์โอ .....	87
4.11 ผลของแรงขับเคลื่อนต่อร้อยละการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าของระบบอาร์โอต้นแบบ .....	88
4.12 ผลของเปอร์เซ็นต์แยกกลับต่อค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอ .....	89
4.13 แรงขับเคลื่อนของน้ำในระบบอาร์โอของโรงงาน.....	90
4.14 แรงขับเคลื่อนของน้ำในระบบอาร์โอต้นแบบ.....	91
4.15 ร้อยละการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าของระบบอาร์โอต้นแบบ(น้ำทิ้งอาร์โอ).....	91
4.16 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนและรีเทนเททในระบบอาร์โอต้นแบบ.....	92
4.17 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอในระบบอาร์โอต้นแบบ.....	93
4.18 แรงขับเคลื่อนน้ำผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 50.....	97
4.19 ลักษณะการใช้น้ำและการเกิดน้ำเสียในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต.....	108

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

กก./ลบ.ม.	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ชม.	=	ชั่วโมง
ชม./วัน	=	ชั่วโมงต่อวัน
ซีโอดี	=	Chemical Oxygen Demand
ตร.ม.	=	ตารางเมตร
บีโอดี	=	Biochemical Oxygen Demand
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
มก./ล. As CaCO <sub>3</sub>	=	มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต
ไมโครซีเมนต์/ชม.	=	ไมโครซีเมนต์ต่อเซ็นต์เมตร
มม.	=	มิลลิเมตร
มล.	=	มิลลิลิตร
ล.	=	ลิตร
ล./ตร.ม.ชม.	=	ลิตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง
ล./ตร.ม.ชม.(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	=	ลิตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง
ลบ.ม.	=	ลูกบาศก์เมตร
ลบ.ม./วัน	=	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
อีดีทีเอ	=	Ethylene Diamine Tetraacetic Acid
Ca <sup>+2</sup>	=	แคลเซียมไอออน
Cl <sup>-</sup>	=	คลอรีนไอออน
H <sup>+</sup>	=	ไฮโดรเจนไอออน
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	=	กรดซัลฟูริก
K <sup>+</sup>	=	โพแทสเซียมไอออน
MF	=	ไมโครฟิลเตรชัน
MWCO	=	molecular weight cut off
Na <sup>+</sup>	=	โซเดียมไอออน

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

NaCl	=	โซเดียมคลอไรด์
NF	=	นาโนฟิลเตรชัน
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	=	ไนเตรตไอออน
OH <sup>-</sup>	=	ไฮดรอกไซด์ไอออน
PAN	=	polyacrylonitrile
PS	=	polysulfone
RO	=	รีเวอร์สออสโมซิส
S.D.	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
UF	=	อัลตราฟิลเตรชัน
U.S.EPA	=	United States Environmental Protection Agency

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในภาคอุตสาหกรรมทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งทางด้านมลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ และกากของเสีย รวมทั้งการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและคุณภาพชีวิต กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงได้ผลักดันให้ภาคอุตสาหกรรมนำหลักการของเทคโนโลยีสะอาดมาใช้ โดยเฉพาะกลุ่มผู้ประกอบการอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมให้สามารถลดหรือกำจัดมลพิษที่แหล่งกำเนิด มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ในการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ การใช้วัตถุดิบ สารเคมี พลังงาน และน้ำ

อุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญและมีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ ประกอบรถจักรยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ และที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ทั้งนี้เพราะการตกแต่งโลหะสำเร็จมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและเพิ่มความสวยงาม กระบวนการเคลือบพอสเฟตเป็นกระบวนการตกแต่งโลหะที่ผลิตจากเหล็กและเหล็กอบสังกะสี เป็นกระบวนการที่ใช้ก่อนกระบวนการเคลือบสี ซึ่งจะให้โครงสร้างที่เหมาะสมกับการยึดติดสีและเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนด้วย ทั้งนี้การเคลือบสีบนผิวโลหะโดยไม่มีการเคลือบพอสเฟตก่อนจะทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวชิ้นงานได้เร็ว (นิสา จิตพิพัฒนกุล, 2545) ในประเทศไทยมีโรงงานที่ประกอบกิจการด้าน การทา พ่น หรือเคลือบสี ซึ่งข้อมูล ณ วันที่ 15 ธันวาคม 2549 มีโรงงานที่ขึ้นทะเบียนกับกรมโรงงาน จำนวน 171 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

กระบวนการหลักของการตกแต่งโลหะสำเร็จ ได้แก่ การทำความสะอาด การชุบเคลือบ และการอบแห้ง โดยการทำความสะอาด (ใช้สารเคมี) และการชุบเคลือบจะจุ่มโลหะผ่านสารละลายเคมีแล้วตามด้วยการล้างน้ำ จึงต้องมีการใช้น้ำสำหรับการเตรียมสารละลายเคมีและล้างสารละลายเคมีออกจากชิ้นงาน น้ำที่ใช้ปริมาณมาก คือ น้ำล้าง โดยใช้น้ำประปา ซึ่งบางส่วนนำไปปรับปรุงเป็นน้ำอาร์โอและน้ำปราศจากไอออนก่อนนำไปใช้ในการล้างหลังการชุบเคลือบ เมื่อน้ำผ่านการใช้งานแล้วจะระบายออกจากกระบวนการ ทำให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วย น้ำมัน ไขมัน สารละลายเคมี และโลหะหนัก ซึ่งจะต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยทิ้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992; U.S. EPA., 1996)

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่า มีความจำเป็นต่อกระบวนการผลิต ความต้องการใช้น้ำมีปริมาณมากขึ้น แต่นับวันจะหาน้ำที่สะอาดได้ยากขึ้นและมีต้นทุนที่สูงขึ้น ถ้าให้ความสำคัญในการใช้น้ำโดยใช้น้ำล้างอย่างมีประสิทธิภาพ นำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ จะช่วยลดปริมาณน้ำสะอาดที่ต้องใช้ ลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำสะอาด ลดอัตราการเกิดน้ำเสีย ลดภาระในการบำบัดน้ำเสีย ลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสีย และถ้านำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่จะเป็นการหมุนเวียนน้ำภายในกระบวนการผลิต

แนวทางการลดการใช้น้ำที่ได้มีการศึกษามาแล้ว ได้แก่ การลดสารละลายเคมีจากกระบวนการที่จะไปปนเปื้อนในบ่อน้ำล้าง การเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง การควบคุมการปนเปื้อนของน้ำล้าง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992; U.S. EPA., 1996) ใช้เทคโนโลยีในการแยกน้ำสะอาดออกจากน้ำเสียแล้วนำน้ำสะอาดกลับไปใช้ใหม่ (PRC Environmental Management, 1989; Qin และคณะ, 2004; Castelblanque และ Salimbeni, 2004)

การลดการใช้น้ำไปพร้อมกับการเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง เป็นหลักการล้างสวนกระแสแบบหลายขั้นตอน ซึ่งสามารถลดการใช้น้ำได้มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับการล้างขั้นตอนเดียว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992; U.S. EPA., 1996) ขั้นตอนการทำความสะอาดนั้น จะทำความสะอาดด้วยการจุ่มชิ้นงานผ่านสารละลายต่างแล้วล้างต่างออกด้วยน้ำ บางกระบวนการอาจจะเพิ่มขั้นตอนการกัดสนิมด้วยกรดต่อจากการล้างต่าง โดยจุ่มชิ้นงานผ่านสารละลายกรด แล้วล้างกรดออกด้วยน้ำ ซึ่งสามารถนำน้ำเสียจากการล้างกรด กลับมาใช้ซ้ำในขั้นตอนการล้างต่างได้ (PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992) นอกจากนี้ น้ำเสียจากการล้างหลังการชุบนิกเกิลสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำในขั้นตอนการล้างกรดได้เช่นเดียวกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) สำหรับการเคลือบฟอสเฟตนั้น การทำความสะอาดจะไม่มีขั้นตอนการกัดสนิมด้วยกรดเนื่องจากในบ่อชุบเคลือบฟอสเฟตมีปฏิกิริยาการกัดสนิมเหล็กเกิดขึ้น น้ำเสียจากการล้างหลังชุบเคลือบฟอสเฟต ยังไม่มีผลการทดลองว่าสามารถนำไปใช้ซ้ำสำหรับล้างต่างได้

ดังนั้นเพื่อส่งเสริมให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาแนวทางการลดการใช้น้ำเพิ่มเติมจากที่ได้มีการศึกษามาแล้ว ได้แก่ การลดการใช้น้ำในระบบการล้างสวนกระแส การนำน้ำเสียจากการล้างหลังชุบเคลือบฟอสเฟตมาใช้ซ้ำต่อเนื่องสำหรับล้างต่าง การนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์ไอ และน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการศึกษา ณ โรงงานตัวอย่าง ซึ่งจะเกิดประโยชน์สำหรับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จทั่ว ๆ ไปที่ใช้วิธีการล้างชิ้นงานแบบสวนกระแส และที่ใช้ระบบอาร์ไอเพื่อผลิตน้ำสะอาดสำหรับล้างชิ้นงาน นอกจากนี้การนำน้ำเสียจากการล้าง

หลังซบเคลือบฟอสเฟตมาใช้ซ้ำต่อเนื่องสำหรับล้างล้าง จะเป็นทางเลือกเพิ่มเติมสำหรับผู้ประกอบการที่ใช้วิธีการตกแต่งโลหะสำเร็จด้วยกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ส่วนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จทั่ว ๆ ไป ที่ยังไม่ได้นำวิธีการล้างสวนกระแสมาใช้ สามารถนำแนวทางลดการใช้น้ำในงานวิจัยนี้ไปช่วยในการตัดสินใจได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาความเหมาะสมการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จสำหรับกระบวนการเคลือบฟอสเฟต โดยการลดการใช้น้ำ และนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษา ณ โรงงานแห่งหนึ่ง ตั้งอยู่ที่อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร ซึ่งเป็นโรงงานรับตกแต่งชิ้นส่วนสำเร็จของรถจักรยานยนต์ด้วยวิธีการเคลือบสี ทางโรงงานใช้วิธีการเตรียมผิวชิ้นงานหลักด้วยกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ใช้วิธีการล้างชิ้นงานแบบสวนกระแสมหลายขั้นตอน และใช้ระบบอาร์โอสำหรับผลิตน้ำสะอาด ส่วนน้ำเสียที่เกิดจากการล้างชิ้นงานทางโรงงานใช้วิธีการบำบัดด้วยวิธีเคมี - กายภาพ

1.3.2 ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพของกระบวนการเคลือบฟอสเฟตเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ในการลดการใช้น้ำและนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยพิจารณาปัจจัยควบคุมการปนเปื้อน ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าสภาพต่าง ค่าสภาพกรด และค่าสภาพการนำไฟฟ้า

1.3.3 ศึกษาการลดการใช้น้ำ โดยจำลองการปนเปื้อนของน้ำล้างในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต โดยใช้สารละลายต่างและสารละลายฟอสเฟตในน้ำล้างของกระบวนการเคลือบฟอสเฟต โดยควบคุมค่าสภาพการนำไฟฟ้าของบ่อน้ำล้างสุดท้ายตั้งแต่ 50 - 200 ไมโครซีเมนต์/ซม. และทดสอบประสิทธิภาพการยึดติดสีบนผิวชิ้นงานด้วยวิธี Cross - Cut Tape Test

1.3.4 ศึกษาการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ด้วยระบบอาร์โอต้นแบบ โดยใช้น้ำทิ้งจากระบบอาร์โอเปรียบเทียบกับน้ำประปาในด้านของเปอร์เซ็นต์แยกกลับ และแรงขับดันที่เหมาะสม โดยควบคุมค่าเพมิเอทพลักซ์ และค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอ

1.3.5 ประเมินการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการกรองเพื่อลดความขุ่นของน้ำไม่เกิน 5 NTU ด้วยการกรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ ชุดกรองคาร์บอนิก และเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ตามลำดับ



## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสะอาด

##### 2.1.1 ความหมายของเทคโนโลยีสะอาด

เทคโนโลยีสะอาด คือ การปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์เพื่อให้การใช้วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากรธรรมชาติเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้เปลี่ยนเป็นของเสียน้อยที่สุดหรือ ไม่มีเลย จึงเป็นการลดมลพิษที่แหล่งกำเนิด ทั้งนี้ รวมถึงการเปลี่ยนวัตถุดิบ การใช้ซ้ำ และการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนการผลิตไปพร้อม ๆ กัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992)

##### 2.1.2 หลักการของเทคโนโลยีสะอาด

การบำบัดมลพิษเป็นเพียงการเปลี่ยนสถานะหนึ่ง ไปเป็นอีกสถานะหนึ่งเท่านั้น เช่น เปลี่ยนจากสถานะของเหลวไปเป็นสถานะของแข็ง เพื่อนำไปกลบฝัง ซึ่งการบำบัดมีค่าใช้จ่ายสูง เป็นการลงทุนที่ไม่ก่อให้เกิดผลกำไร เป็นผลให้ไม่เกิดประโยชน์โดยรวมต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงทำให้ความสนใจและจุดเน้นเปลี่ยนไปจากวิธีบำบัดมาเป็นการพยายามในการลดปริมาณของเสียที่จะเกิดขึ้น โดยมุ่งเน้นที่เป็นการจัดการที่สามารถก่อให้เกิดประโยชน์ ทั้งผู้ก่อมลพิษและการรักษาสิ่งแวดล้อม เช่น ลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ลดลง เป็นผลให้มีการลดของเสีย จึงทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสีย และยังส่งผลถึงการลดการใช้ทรัพยากรโดยรวม จึงเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมไปด้วย ดังนั้นหลักการของเทคโนโลยีสะอาด คือ ใช้หลักการป้องกันมลพิษ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต การใช้ทรัพยากร และลดการเกิดมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยการลดของเสียที่แหล่งกำเนิดให้เหลือน้อยที่สุด หากยังมีของเสียเกิดขึ้นต้องพยายามนำของเสียเหล่านั้นกลับมาใช้ซ้ำหรือนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้มีของเสียที่ต้องทำการบำบัดหรือปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992)

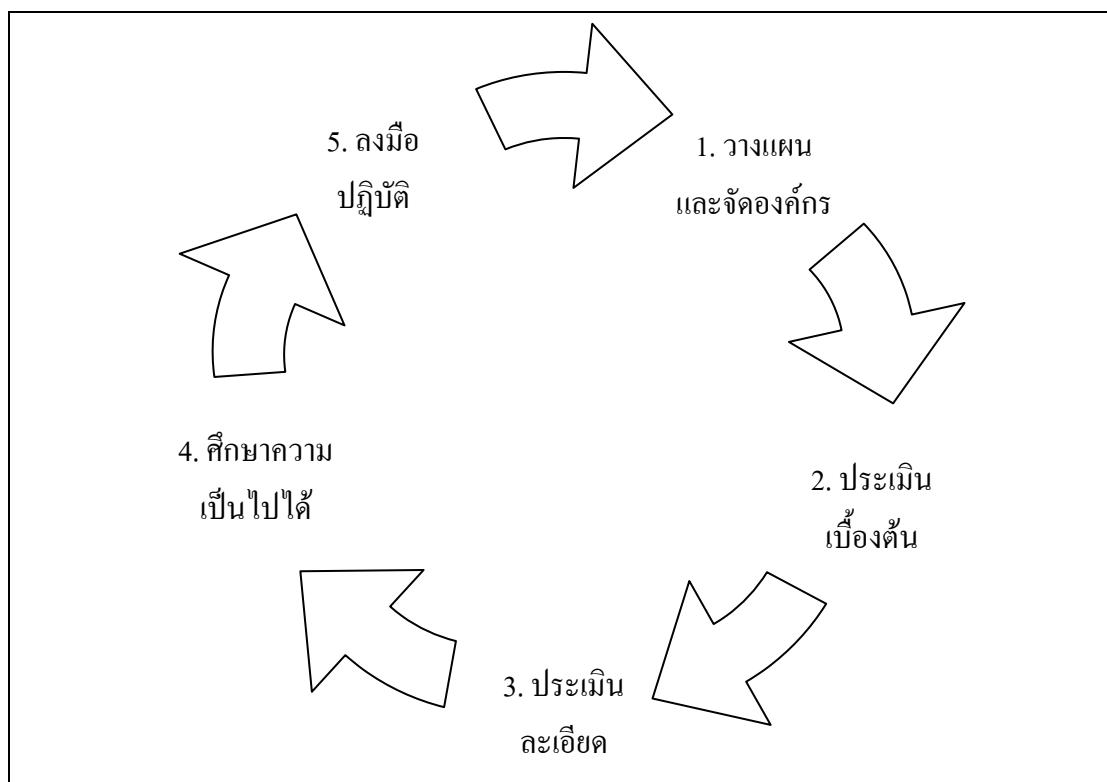
### 2.1.3 ประโยชน์ของเทคโนโลยีสะอาด

เทคโนโลยีสะอาดเป็นเครื่องมือแสดงถึงความสามารถได้เปรียบทางธุรกิจ เพื่อป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมก่อนที่จะเกิด โดยการลดมลพิษและลดของเสียที่แหล่งกำเนิด เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และที่สำคัญก็คือ ช่วยลดต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการผลิต (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992) ผลจากการใช้เทคโนโลยีสะอาดสามารถช่วยให้

1. ลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เนื่องจากใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ
2. ลดของเสียจากวัตถุดิบที่ใช้ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย
3. เพิ่มผลผลิตและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์
4. ประหยัดพลังงาน
5. เป็นไปตามกฎหมายควบคุมสิ่งแวดล้อมของทางราชการ

### 2.1.4 ขั้นตอนการทำเทคโนโลยีสะอาด

วิธีการทำเทคโนโลยีสะอาดในองค์กรให้ประสบผลสำเร็จ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการทำเทคโนโลยีสะอาด

### ขั้นตอนที่ 1 การวางแผนและการจัดองค์กร

เพื่อให้ผู้บริหารและพนักงานขององค์กร ได้ตระหนักถึงความจำเป็นที่จะต้องนำเทคโนโลยีสะอาดมาประยุกต์ใช้ โดยผู้บริหารควรออกนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นทางการ และแจ้งให้พนักงานทุกคนได้รับทราบ จากนั้นจัดตั้งทีมเทคโนโลยีสะอาดแล้วเลือกหัวหน้าทีม พร้อมทั้งกำหนดเป้าหมาย ซึ่งเป้าหมายควรเป็นไปได้ และสูงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดความพยายาม หลังจากนั้นจัดทำแผนงานพร้อมระยะเวลาดำเนินงาน แบ่งความรับผิดชอบ และกำหนดวันสิ้นสุดโครงการ (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992) ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ

1. ได้รับความร่วมมือ และการสนับสนุนจากผู้บริหาร
2. ผู้บริหารและพนักงานทราบถึงวัตถุประสงค์ของการตรวจประเมิน
3. ได้ทีมงานตรวจประเมิน
4. มีงบประมาณ และกำลังคนเพื่อดำเนินกิจกรรมของโครงการ
5. มีการกำหนด และติดต่อแหล่งข้อมูลที่จำเป็น
6. มีการกำหนดเป้าหมายที่ชัดเจน

### ขั้นตอนที่ 2 การประเมินเบื้องต้น

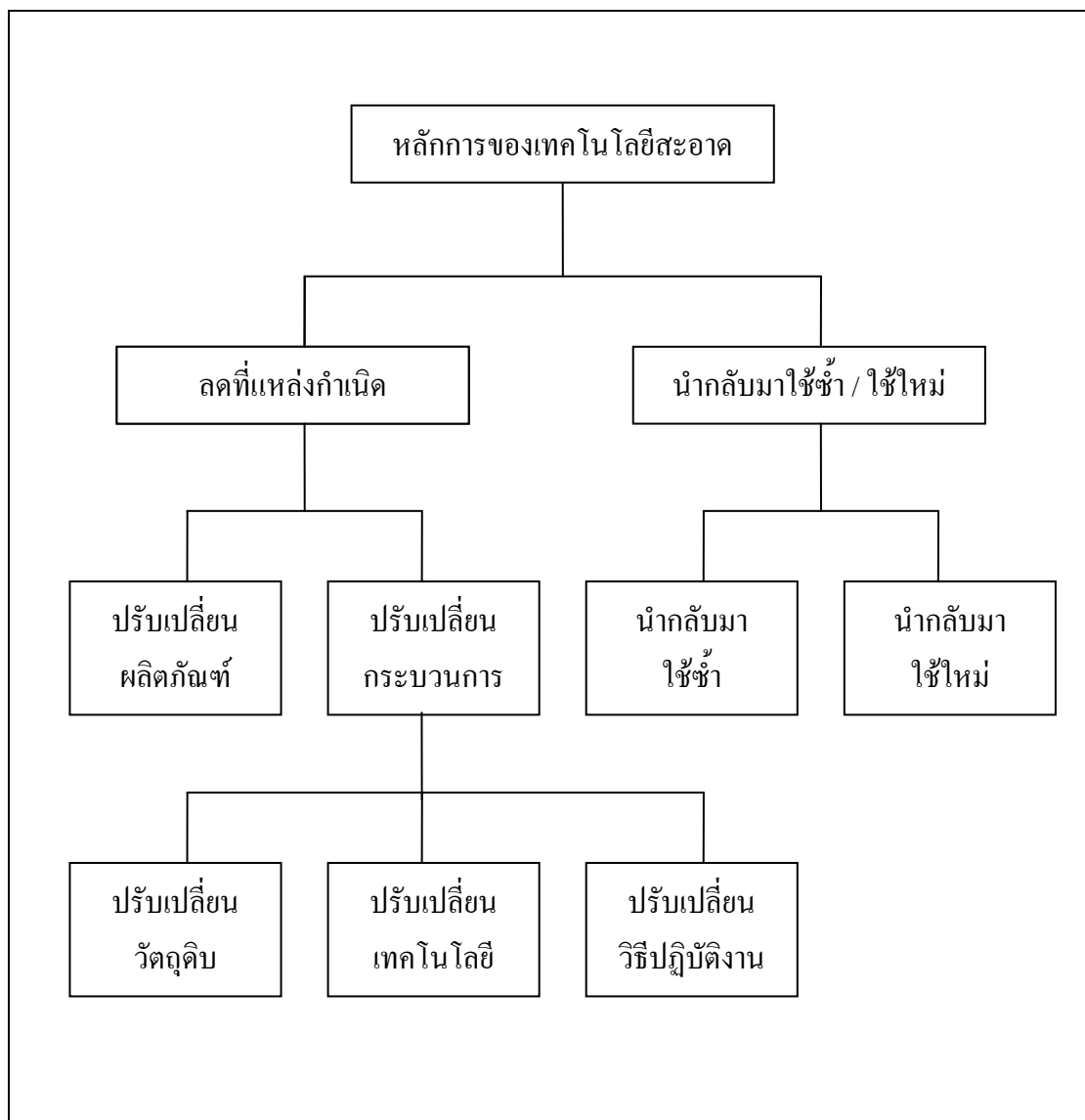
เพื่อเลือกหัวข้อเน้นในการประเมินละเอียด โดยเริ่มจากการรวบรวมเอกสาร ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แผนผังของโรงงาน แผนภาพกระบวนการผลิต ข้อมูลการใช้วัตถุดิบ น้ำ ไฟฟ้า เชื้อเพลิง ผลิตภัณฑ์ และของเสียที่เกิดขึ้น รวมทั้งการบำบัด จากนั้นประเมินสมดุลมวลเข้าออกของแต่ละกระบวนการทั้งหมดอย่างคร่าว ๆ จากนั้นเลือกข้อเน้นสำหรับการตรวจประเมินละเอียด ซึ่งพิจารณาจากกระบวนการที่มีของเสียเกิดขึ้นมาก มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงหรือมีการใช้พลังงานสูง (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992) ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ

1. ได้แผนภาพกระบวนการผลิต
2. ได้ข้อเน้นในการตรวจประเมินละเอียด
3. มีการเตรียมข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบก่อน และหลังการดำเนินโครงการ
4. ได้ข้อเสนอเทคโนโลยีสะอาดที่เห็นได้ชัดเจน ประเภทไม่ต้องลงทุน หรือลงทุนต่ำ

### ขั้นตอนที่ 3 การประเมินละเอียด

เพื่อสร้างข้อเสนอเทคโนโลยีสะอาดที่ปฏิบัติได้ทันทีหรือที่ต้องศึกษารายละเอียดเพิ่มเติม โดยจัดทำสมดุลมวลเข้าออกอย่างละเอียด รวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องด้วย ซึ่งจะทำการทราบแหล่งกำเนิดและสาเหตุของการเกิดของเสีย โดยสาเหตุอาจเกิดขึ้นจากการใช้ทรัพยากร

ผลิตภัณฑ์ วิธีปฏิบัติงาน และเทคโนโลยีที่ใช้อยู่ จากนั้นหาแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่มีความเป็นไปได้ ซึ่งพิจารณาจากหลักการของเทคโนโลยีสะอาด (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการของเทคโนโลยีสะอาด

1. การเปลี่ยนหรือปรับเปลี่ยนวัตถุดิบ เช่น ใช้วัตถุดิบที่สะอาด มีคุณภาพดี หรือใช้วัตถุดิบอื่นที่ก่อให้เกิดมลพิษน้อยกว่ามาทดแทน
2. การเปลี่ยนหรือปรับเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ เช่น การเปลี่ยนมาตรฐานคุณภาพ เปลี่ยนองค์ประกอบ ทำผลิตภัณฑ์อื่นทดแทน
3. การปรับปรุงวิธีปฏิบัติงาน หมายถึง การดูแลและจัดการที่เหมาะสม โดยไม่ต้องลงทุน หรือลงทุนเพียงเล็กน้อย เช่น การจัดระบบบริหารบุคคล ฝึกอบรมพนักงาน ใช้เทคนิคการป้องกันการสูญเสีย ตลอดจนการวางแผนการผลิตที่เหมาะสม
4. การเปลี่ยนหรือปรับปรุงเทคโนโลยี โดยการตัดแปลงอุปกรณ์หรือกระบวนการผลิต เช่น การใช้ระบบอัตโนมัติ
5. การใช้ซ้ำหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ สามารถทำได้ตลอดเวลาเมื่อมีโอกาส ซึ่งจะช่วยให้ลดค่าใช้จ่าย และลดของเสียได้มาก

#### ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาความเป็นไปได้

เพื่อเลือกเทคโนโลยีสะอาดสำหรับการลงมือปฏิบัติ โดยประเมินละเอียดในแต่ละข้อของข้อเสนอเทคโนโลยีสะอาด ได้แก่ การประเมินทางเทคนิค ประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (คำนวณค่าลงทุน ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ และระยะเวลาคืนทุน) ประเมินทางสิ่งแวดล้อม (ลดการใช้ทรัพยากร ลดการเกิดมลพิษ) ทำให้ได้ข้อเสนอเทคโนโลยีสะอาดที่เป็นไปได้ และผลที่คาดว่าจะได้จากแต่ละข้อเสนอเทคโนโลยีสะอาด (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992)

#### ขั้นตอนที่ 5 การลงมือปฏิบัติ

เพื่อลงมือปฏิบัติตามข้อเสนอของเทคโนโลยีสะอาดที่มีความเป็นไปได้ โดยรวบรวมข้อมูล ระยะเวลา เงินทุน และกำลังคนที่ต้องการ และวางแผนการดำเนินงานตามข้อเสนอของเทคโนโลยีสะอาด ในบางข้อเสนอจำเป็นต้องอบรมพนักงานให้พร้อมด้วย จากนั้นลงมือปฏิบัติและติดตามประเมินความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการปฏิบัติจริงกับผลที่คาดว่าจะได้รับจากขั้นตอนการศึกษาความเป็นไปได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; Theodore และ McGuinn, 1992)

## 2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ

### 2.2.1 วิธีการตกแต่งโลหะสำเร็จ

การตกแต่งโลหะสำเร็จ หมายถึง การนำชิ้นงาน โลหะที่ประกอบเป็นรูปร่างสำเร็จแบบต่าง ๆ แล้ว มาผ่านกระบวนการเคลือบโลหะและ/สีลงบนผิวของชิ้นงาน ทั้งนี้มีจุดประสงค์

เพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เพิ่มความสวยงาม และทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะลื่น (U.S. EPA, 1999) ส่วนมากแล้วผู้ให้บริการจะได้รับชิ้นงานจากลูกค้า แล้วดำเนินการตกแต่งตามที่ลูกค้ากำหนด โดยปกติกระบวนการตกแต่งโลหะสำเร็จ ได้แก่ การชุบอะโนไดซิง (anodizing) การเคลือบด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (chemical conversion coating) การชุบด้วยกระแสไฟฟ้า (electroplating) การชุบโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (electroless plating) และการเคลือบสี (painting)

การชุบอะโนไดซิง เป็นวิธีการที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น กรด เป็นสื่อกลาง ทำให้โลหะที่จะเคลือบเคลื่อนตัวไปยังโลหะที่ต้องการเคลือบ โดยกระบวนการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้เกิดการเคลือบ โลหะที่เป็นชิ้นงานจะอยู่ขั้วลบ โลหะที่จะใช้เคลือบอยู่ที่ขั้วบวก

การเคลือบด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เคลือบโครเมต เคลือบฟอสเฟต หลักการ คือ สารละลายกรดที่มีโลหะละลายอยู่จะใช้เป็นน้ำยาเคลือบ เมื่อผิวชิ้นงานโลหะสัมผัสกับน้ำยาจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชั้นรอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานโลหะกับสารละลาย โดยเปลี่ยนจากเกลือที่สามารถละลายน้ำได้เป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ จึงเกิดการเคลือบที่ผิวชิ้นงาน

การชุบด้วยกระแสไฟฟ้า โดยวิธีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง นำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบต่อกับขั้วลบ ส่วนขั้วบวกจะใช้แผ่นสแตนเลสแล้วจุ่มอยู่ในสารละลายไอออนที่ประกอบไปด้วยไฮยาไนด์ กรด โลหะ ต่าง เมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในเซลล์ จะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนและอนุภาคที่มีประจุ โดยที่ประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงาน ทำให้สารละลายรอบ ๆ ขั้วลบมีสภาพเป็นด่าง ค่าพีเอชจะสูงขึ้นทำให้เกิดการเคลือบผิวชิ้นงาน ส่วนไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้สารละลายรอบ ๆ ขั้วบวกมีสภาพเป็นกรด

การชุบโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า จะใช้กับชิ้นงานที่ไม่ใช่โลหะ เช่น พลาสติก โดยจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายชุบที่มีไอออนโลหะละลายอยู่ ทำให้เกิดผิวบาง ๆ ของโลหะเคลือบบนผิวชิ้นงาน โดยมากมักใช้โลหะสังกะสีหรือเงิน

การเคลือบสี เป็นการเคลือบสีบนผิวชิ้นงาน ทำได้ทั้งการพ่นสี และการชุบเคลือบสีด้วยกระแสไฟฟ้า โดยสีเป็นส่วนผสมของเรซินและผงสี ซึ่งอาจอยู่ในรูปของ ผงแห้ง และสารละลาย ทั้งทำละลายด้วยตัวทำละลาย เช่น ทินเนอร์ และทำละลายด้วยน้ำ

### 2.2.2 กระบวนการตกแต่งโลหะสำเร็จ

กระบวนการตกแต่งโลหะสำเร็จมีขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน ขั้นตอนการชุบเคลือบโลหะ ขั้นตอนการล้าง และขั้นตอนการอบแห้ง

1) ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน : ชิ้นงานที่ประกอบเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ แล้วมักจะมีผิวหยาบ ขรุขระ มีรอยขีดข่วน หรือเป็นสนิม และมักจะทาน้ำมัน ไขมัน เอาไว้เพื่อป้องกันการเกิดสนิมในระหว่างรอการตกแต่ง ดังนั้นก่อนที่จะทำการตกแต่ง จึงจำเป็นต้องขัด ทำให้ผิวชิ้นงานเรียบ

ไม่ขรุขระ และทำความสะอาดผิวโลหะเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมออก เช่น ไขมัน น้ำมันหรือ ออกไซด์ต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานหลังการชุบด้วยโลหะมีคุณภาพดี คือ ผิวชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอและการเกาะติดของโลหะจะแน่น การขัดผิวชิ้นงาน นิยมใช้เครื่องมือขัด ได้แก่ งานขัด ล้อขัด สายพานขัด และกระดาษทราย การกำจัดไขมัน น้ำมัน นิยมใช้สารละลายทำความสะอาด คือ ค้าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารเคมีอื่น ๆ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต แอนไอออนิกเซอร์แฟกแตนท์ และนอนไอออนิกเซอร์แฟกแตนท์ โดยระหว่างการผลิตจะควบคุมอุณหภูมิในบ่อสารละลายต่างให้สารละลายต่างร้อน (ปกติควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 64 - 80 องศาเซลเซียส) ส่วนการกำจัดสนิมนิยมใช้สารละลายกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสนิมได้สูง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; U.S. EPA, 1996)

2) ขั้นตอนการชุบเคลือบโลหะ : เป็นการชุบเคลือบโลหะลงบนผิวชิ้นงานตามวิธีการตกแต่งโลหะสำเร็จที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 2.2.1 ในบ่อสารละลายเคมี จะประกอบไปด้วยสารละลายโลหะชนิดที่ต้องการเคลือบบนผิวชิ้นงาน โดยทำละลายโลหะด้วยกรด โดยระหว่างการผลิตจะควบคุมอุณหภูมิ ความเข้มข้น และค่าพีเอชในบ่อชุบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะที่เหมาะสมตามชนิดของโลหะที่ใช้เคลือบผิว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; นิสา จิตพิพัฒน์กุล, 2545; U.S. EPA, 1996)

3) ขั้นตอนการล้าง : เป็นการใช้น้ำล้างผิวชิ้นงานให้สะอาดเพื่อลดการปนเปื้อนจากขั้นตอนหนึ่งไปยังขั้นตอนอื่น โดยขั้นตอนการล้างมีอยู่ในทุก ๆ ส่วนของกระบวนการตกแต่งโลหะสำเร็จ ได้แก่

1. การล้างหลังจากการขัดผิว
2. การล้างหลังจากการล้างไขมันด้วยด่าง
3. การล้างหลังจากการกำจัดสนิมด้วยกรด
4. การล้างหลังการชุบโลหะ

น้ำที่ใช้ล้างมีทั้งใช้น้ำประปาและน้ำปราศจากไอออน ขึ้นอยู่กับมาตรฐานและความสะอาดของแต่ละโรงงาน โดยขั้นตอนการล้างถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีการใช้น้ำในปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่น ๆ ทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; U.S. EPA, 1996) ตัวอย่างของลักษณะน้ำประปาและน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในขั้นตอนการล้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 น้ำปราศจากไอออนจะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้า และของแข็งละลายต่ำถือว่ามีความบริสุทธิ์สูง

4) ขั้นตอนการอบแห้ง : เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการตกแต่งโลหะ โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบโลหะ และผ่านขั้นตอนการล้างแล้วไปอบด้วยความร้อนให้ชิ้นงานแห้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; U.S. EPA, 1996)

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะน้ำประปาและน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในอุตสาหกรรมตกแต่ง  
โลหะสำเร็จ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำประปา		น้ำปราศจาก ไอออน (ประเทศสิงคโปร์) <sup>ก</sup>
		ประเทศไทย <sup>ก</sup>	ประเทศ สิงคโปร์ <sup>ข</sup>	
พีเอช	ไม่มีหน่วย	7.12 - 7.48	7.20	-
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์ /ซม.	214.00 - 266.00	334.00	5.80
สภาพค่าทั้งหมด	มก./ล.	76.00 - 89.00	-	-
ของแข็งละลาย	มก./ล.	129.00 - 160.00	-	-
ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล.	94.00 - 109.00	-	-
โปแตสเซียม	มก./ล.	-	5.83	0.20
โซเดียม	มก./ล.	-	23.00	0.25
คลอไรด์	มก./ล.	2.00 - 12.00	39.50	0.14
ซัลเฟต	มก./ล.	13.00 - 26.00	47.50	0.44
ฟอสฟอรัส	มก./ล.	-	0.03	0.02
ไนเตรทในรูปไนเตรท	มก./ล.	0.45 - 2.09	0.64	ไม่พบ
แคลเซียม	มก./ล.	29.93 - 26.67	31.80	ไม่พบ
เหล็ก	มก./ล.	-	<0.003	ไม่พบ
แมงกานีส	มก./ล.	ไม่พบ	-	ไม่พบ
แมกนีเซียม	มก./ล.	6.91 - 8.24	4.15	-
ตะกั่ว	มก./ล.	ไม่พบ	-	ไม่พบ
โครเมียม	มก./ล.	0.00 - 0.01	-	ไม่พบ
ทองแดง	มก./ล.	ไม่พบ	-	ไม่พบ



ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะน้ำประปาและน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในอุตสาหกรรมตกแต่ง โลหะสำเร็จ (ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำประปา		น้ำปราศจากไอออน (ประเทศสิงคโปร์) <sup>ก</sup>
		ประเทศไทย <sup>ข</sup>	ประเทศสิงคโปร์ <sup>ค</sup>	
สังกะสี	มก./ล.	ไม่พบ	-	ไม่พบ
อลูมิเนียม	มก./ล.	-	-	ไม่พบ
นิกเกิล	มก./ล.	-	0.04	ไม่พบ

<sup>ก</sup>คุณภาพน้ำประปาเฉลี่ย ปีงบประมาณ 2549 ข้อมูลจากเว็บไซต์ของการประปานครหลวง

<sup>ข</sup>คุณภาพน้ำประปาเฉลี่ยที่ใช้ในกระบวนการชุบนิกเกิล ข้อมูลจาก Qin และคณะ (2004)

<sup>ค</sup>คุณภาพน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในกระบวนการชุบนิกเกิล ข้อมูลจาก Wong และคณะ (2002)

## 2.3 กระบวนการเคลือบฟอสเฟต

### 2.3.1 ขั้นตอนของกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

เนื่องจากหากเคลือบสีบนผิวโลหะโดยตรงนั้นได้ไม่ดี จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวชิ้นงาน จึงต้องมีการเคลือบผิวฟอสเฟตบนผิวชิ้นงานก่อน เพื่อให้โครงสร้างที่เหมาะสมกับการยึดติดสีและเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนด้วย การเคลือบสีจะดำเนินการหลังจากชิ้นงานได้ผ่านกระบวนการตกแต่งด้วยการเคลือบฟอสเฟตและอบแห้งมาแล้ว โดยนำสารเคลือบสีที่อยู่ในรูปของสารละลายไปพ่นหรือชุบบนผิวชิ้นงาน จากนั้นทำให้แห้งจะได้ฟิล์มพลาสติกบาง ๆ เคลือบผิวโลหะเอาไว้ การเคลือบสีอาจจัดให้มีการเคลือบหลายชั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพที่ต้องการและจุดประสงค์ของการนำชิ้นงานที่ตกแต่งสำเร็จไปใช้ (นิสา จิตพิพัฒน์กุล, 2545; U.S. EPA, 1996)

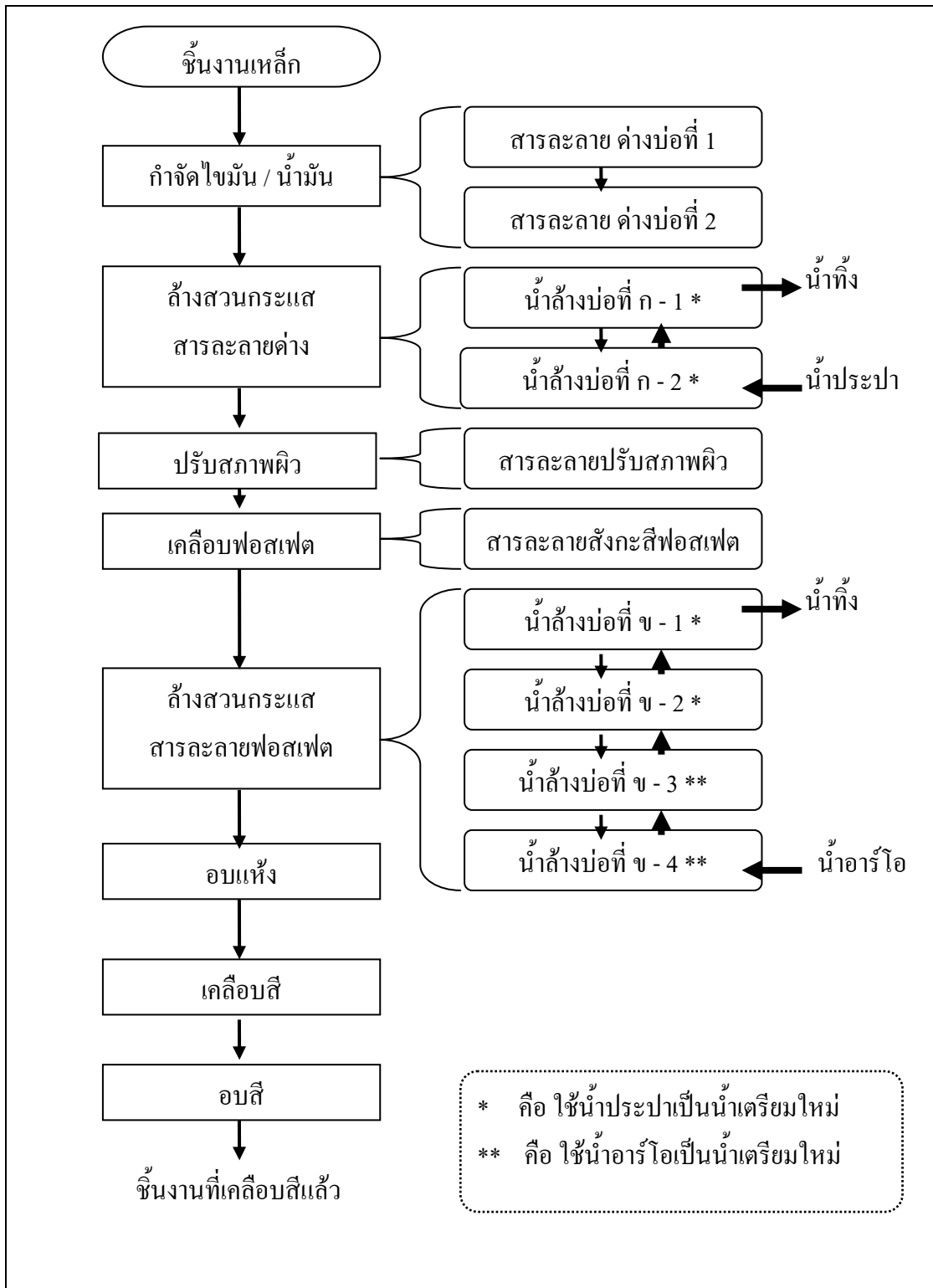
การตกแต่งผิวโลหะที่ทำจากเหล็กหรือเหล็กชุบสังกะสี นิยมใช้วิธีการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต ซึ่งเป็นการปรับปรุงผิวชิ้นงานโลหะด้วยสารละลายเจือจางของกรดฟอสฟอริกที่มีส่วนประกอบหลัก คือ อีออนลบของฟอสเฟต อีออนบวกของโลหะ ส่วนประกอบเหล่านี้จะอยู่ในรูปเกลือฟอสเฟตที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อจุ่มผิวชิ้นงานโลหะในน้ำยาชุบฟอสเฟต ผิวชิ้นงานโลหะจะทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำยาชุบ เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชั้นรอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานโลหะกับสารละลาย โดยเปลี่ยนจากเกลือที่สามารถละลายน้ำได้เป็นเกลือฟอสเฟตที่ไม่สามารถละลายน้ำ เข้าเคลือบผิวชิ้นงาน (นิสา จิตพิพัฒน์กุล, 2545; U.S. EPA, 1996)

กระบวนการเคลือบฟอสเฟตประกอบด้วย การกำจัดสิ่งสกปรก คราบไขมัน น้ำมัน ออกจากชิ้นงานด้วยสารละลายด่าง แล้วล้างชิ้นงานให้สะอาด เพื่อลดสารละลายด่างที่ติดชิ้นงานไป

ปนเปื้อนสารละลายสังกะสีฟอสเฟต จากนั้นจึงนำชิ้นงาน ไปจุ่มในสารละลายปรับสภาพผิว ก่อนจุ่มในสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ซึ่งจะมีผลต่อชิ้นงานเมื่อจุ่มผ่านบ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต คือทำให้ผลึกสังกะสีฟอสเฟตมีขนาดเล็ก และที่เวลาจุ่มนานสองนาที่ผลึกสังกะสีฟอสเฟตก็ปกคลุมทั่วผิวชิ้นงาน ถ้าไม่ผ่านสารละลายปรับสภาพผิวจะต้องใช้เวลานาน และได้ผลึกสังกะสีฟอสเฟตที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งให้การยึดติดของสีไม่ค่อยดี (นิสา จิตพิพัฒน์กุล, 2545) จากนั้นจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายสังกะสีฟอสเฟตแล้วล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตออกให้สะอาด ก่อนนำไปอบแห้ง แล้วจึงทำการเคลือบและอบสีต่อไป

การจัดเรียงบ่อกระบวนการ การควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมเวลา ลักษณะการล้างมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการเคลือบฟอสเฟต ขั้นตอนการล้างสารละลายต่าง และล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ควรมือน้อยสองและสี่ขั้นตอน ตามลำดับ จึงจะทำให้มีประสิทธิภาพการล้างที่เหมาะสม (U.S. EPA, 1996) ตัวอย่างการจัดเรียงบ่อกระบวนการ และสถานะควบคุมในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ ขั้นตอนการล้างสารละลายต่าง เป็นการล้างแบบสวนกระแสสองขั้นตอน (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2) ใช้น้ำประปาเป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายทั้งสองขั้นตอน และใช้น้ำประปาเป็นน้ำล้างสวนกระแส ส่วนขั้นตอนการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต เป็นการล้างแบบสวนกระแสสี่ขั้นตอน (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึง ข - 4) ใช้น้ำประปาเป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายในสองขั้นตอนแรก (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 และ ข - 2) และใช้น้ำอาร์โอเป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายในสองขั้นตอนสุดท้าย (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4) และใช้น้ำอาร์โอเป็นน้ำล้างสวนกระแส

ในระหว่างการเดินระบบการผลิต จะมีการควบคุมอุณหภูมิของบ่อกระบวนการ ได้แก่ บ่อสารละลายต่าง บ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต และบ่อน้ำล้างบ่อสุดท้าย (บ่อน้ำล้าง ข - 4) ทั้งนี้เพื่อลดความหนืดของสารละลายต่าง ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไขมัน น้ำมัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; U.S. EPA, 1996) นอกจากนี้ความร้อนประมาณ 45 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดผิวสังกะสีฟอสเฟตเคลือบบนผิวชิ้นงานได้เร็ว และให้ขนาดของผลึกที่เหมาะสมสำหรับการยึดติดของสี (นิสา จิตพิพัฒน์กุล, 2545) การใช้น้ำร้อนล้างครั้งสุดท้าย จะทำให้ผลึกฟอสเฟตแห้งเร็ว (U.S. EPA, 1996)



หมายเหตุ จากมาตรฐานการควบคุมของโรงงานที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกระบวนการเคลือบสี

ตารางที่ 2.2 สภาวะควบคุมในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

บ่อกระบวนการ	สภาวะควบคุม		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการล้าง	เวลายุ่มชิ้นงาน (วินาที)
สารละลายต่างบ่อที่ 1	40 - 60	ระบบสเปรย์	75
สารละลายต่างบ่อที่ 2	40 - 60	ระบบสเปรย์	135
น้ำล้างบ่อที่ ก - 1	อุณหภูมิห้อง	ระบบสเปรย์	72
น้ำล้างบ่อที่ ก - 2	อุณหภูมิห้อง	ระบบสเปรย์	90
สารละลายปรับสภาพผิว	อุณหภูมิห้อง	ระบบสเปรย์	72
สารละลายสังกะสีฟอสเฟต	45 - 55	ระบบสเปรย์	126
น้ำล้างบ่อที่ ข - 1	อุณหภูมิห้อง	ระบบสเปรย์	72
น้ำล้างบ่อที่ ข - 2	อุณหภูมิห้อง	ระบบสเปรย์	72
น้ำล้างบ่อที่ ข - 3	อุณหภูมิห้อง	ระบบสเปรย์	30
น้ำล้างบ่อที่ ข - 4	45 - 60	ระบบสเปรย์	30

หมายเหตุ จากมาตรฐานการควบคุมของโรงงานที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

### 2.3.2 สารเคมีที่ใช้ในบ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

สารเคมีที่ใช้ในบ่อกระบวนการแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ต่างและกรด โดยเตรียมใช้ในรูปของสารละลายต่าง ใช้สำหรับกำจัดสิ่งสกปรก คราบไขมัน น้ำมัน ซึ่งสิ่งสกปรกส่วนใหญ่ที่ติดมากับชิ้นงาน จะเป็นน้ำมัน และ/หรือไขมันจากการขึ้นรูป และ/หรือการรักษาชิ้นงานไม่ให้เกิดคราบสนิมในระหว่างรอนำเข้ากระบวนการตกแต่งผิวโลหะ ส่วนสารละลายกรด จะใช้สำหรับทำให้โลหะที่ใช้ในการตกแต่งอยู่ในรูปของสารละลาย

#### ก. สารละลายต่าง

คุณสมบัติทางเคมีของสารละลายต่างทำความสะอาดนั้น Bird (1995) กล่าวไว้ว่า โดยทั่วไปสารละลายต่างทำความสะอาดประกอบไปด้วยสารที่เป็นด่าง (alkalis) และสารลดแรงตึงผิว (surfactant) สารที่เป็นด่างมีไว้เพื่อรักษาสภาพความเป็นด่างของสารละลาย และมีคุณสมบัติในการกระจาย ช่วยปรับสภาพความเป็นกรด - ด่างของสิ่งสกปรกที่เป็นกรดให้เป็นกลาง และช่วยกำจัดสิ่งสกปรก ส่วนสารลดแรงตึงผิว โดยปกติเป็นสารซักฟอกสังเคราะห์ มีไว้เพื่อช่วยทำให้ชิ้นงานเปียก และมีคุณสมบัติรวมสารละลายสองอย่างที่ไม่ละลายเข้าด้วยกันให้เป็นเนื้อเดียวกัน

และยังป้องกันการกลับมาสะสมใหม่ของสิ่งสกปรก ในแง่ของผลกระทบของสารต่าง ๆ ที่มีความสะอาดที่มีต่อชิ้นงานนั้น ส่วนมากแล้วการกัดกร่อนระหว่างการทำความสะอาดจะเกิดขึ้นน้อย

#### ข. สารละลายกรด

สารละลายสังกะสีฟอสเฟต จะใช้กรดเป็นสารทำละลายไอออนโลหะ เช่น กรดไนตริก และกรดฟอสฟอริก ส่วนโลหะที่เติมลงไปนั้น เช่น สังกะสี (Zn), นิกเกิล (Ni) และแมงกานีส (Mn) ขึ้นอยู่กับความจำเป็นของกระบวนการ ซึ่งนิกเกิลมีบทบาทหลักในเรื่องของการป้องกันการกัดกร่อนที่ได้ผล และช่วยเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการ ส่วนแมงกานีสนั้นช่วยปรับปรุงคุณสมบัติลื่น (sliding property) ส่วนโลหะอื่น ๆ อาจเติมเพิ่มเข้าไปได้ เพื่อสร้างคุณสมบัติเฉพาะ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาจะเติม เพื่อเร่งความเร็วของปฏิกิริยา ลดการเกิดไฮโดรเจน (ในระหว่างปฏิกิริยากัดกร่อนจะเกิดไฮโดรเจนขึ้น) และควบคุมการก่อตะกอน (โลหะไอออนของชิ้นงานเหล็กที่ละลายออกจากผิวชิ้นงานนั้น จะออกซิไดซ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นตะกอนสะสม ตะกอนนี้ปกติจะทำการกรองออก) ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไนไตรต์ไนเตรต (Donofrio, 2000)

นิสา จิตพิพัฒน์กุล (2545) ศึกษาผลของสภาวะที่เหมาะสมในการชุบเคลือบผิวสังกะสีฟอสเฟตบนผิวโลหะผสมสังกะสีนิกเกิลต่าง ๆ ต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน และการยึดติดกับสี พบว่าในสารละลายชุบสังกะสีฟอสเฟต ที่ประกอบด้วยไอออนโลหะของ สังกะสี นิกเกิล และแมงกานีส เท่ากับ 0.03, 0.02, 0.04 โมลต่อลิตร ตามลำดับ กรดฟอสฟอริก 20 กรัมต่อลิตร โซเดียมไนเตรต 2 กรัมต่อลิตร และค่าพีเอชประมาณ 2.5 จะให้ผิวสังกะสีฟอสเฟตที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุด และให้การยึดติดสีดีที่สุดในที่สุด

### 2.3.3 การล้างชิ้นงาน

การล้างชิ้นงานในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต จะมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นการล้างสารละลายต่าง มีสองขั้นตอน (จากรูปที่ 2.1 คือ บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2) ใช้น้ำประปาเป็นน้ำล้าง ส่วนช่วงที่ 2 เป็นการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต มีสี่ขั้นตอน (จากรูปที่ 2.1 คือ บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึง ข - 4) ใช้น้ำประปาเป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายในการล้างสองขั้นตอนแรก (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 และ ข - 2) และใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายในการล้างสองขั้นตอนสุดท้าย (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4) และใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำล้างสวนกระแส

#### ก. ล้างด้วยน้ำประปา

สารละลายต่าง ๆ ที่ติดมากับชิ้นงาน จะไปเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ซึ่งจะค่อย ๆ ปรับสภาพสารละลายสังกะสีฟอสเฟตให้เป็นกลาง จะทำให้สารละลายสังกะสีฟอสเฟตเสียหายได้หรือประสิทธิภาพค่อย ๆ ลดลง ส่งผลถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ตกแต่งสำเร็จด้วย ดังนั้นจึงล้างสารละลายต่าง สารลดแรงตึงผิว และสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ออกจากชิ้นงาน น้ำที่ใช้ล้างนิยมใช้น้ำประปา (U.S. EPA, 1996)

## ข. การล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน

การใช้น้ำปราศจากไอออน (น้ำ DI) นั้นควรใช้สำหรับบ่อน้ำล้างหลังบ่อกำจัดไขมันในการล้างขั้นตอนที่สอง เพื่อล้างสารละลายต่างๆที่ยังคงหลงเหลืออยู่ ซึ่งใช้น้ำปราศจากไอออนจะเหมาะสมกว่าใช้น้ำประปา ทั้งนี้เนื่องจากปกติน้ำประปามีค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูง คุณภาพของน้ำประปามีความแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับแหล่งผลิต ปกติมีสารเจือปน ได้แก่ ไอออนของ โซเดียม แมกนีเซียม เหล็ก แคลเซียม โพรแตสเซียม คลอรีน ซัลเฟต คาร์บอนเนต และไนเตรท เมื่อน้ำระเหยออกจากผิวชิ้นงาน ไอออนเหล่านี้คงติดอยู่ที่ผิวชิ้นงาน และเป็นสาเหตุของการกัดกร่อน ส่วนน้ำปราศจากไอออน มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าต่ำ และเป็นกลาง จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นน้ำล้าง อย่างไรก็ตามน้ำ DI เป็นน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงในการล้าง แต่มีต้นทุนการผลิตที่แพงกว่าน้ำประปา จึงมีข้อจำกัดเรื่องอัตราการล้าง ในขณะที่น้ำประปามีราคาถูกกว่า จึงสามารถเพิ่มอัตราการล้างได้ (U.S. EPA, 1996)

การล้างหลังเคลือบฟอสเฟต เป็นการกำจัดพวกกรดที่ไม่ทำปฏิกิริยา ตะกอนที่สะสมเกลือซึ่งกัดกร่อน และสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ซึ่งการเคลือบผิวจะมีคุณภาพดีนั้น ชิ้นงานจะต้องปราศจากสิ่งปนเปื้อนให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในระบบการล้างหลังเคลือบฟอสเฟต น้ำประปาไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นน้ำล้าง เนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ นอกจากนี้ น้ำประปามีค่าพีเอชเป็นค่าเล็กน้อย เมื่อใช้เป็นน้ำล้างจะทำให้ผิวของชิ้นงานถูกปรับสภาพให้เป็นกลาง ซึ่งไม่เป็นผลดีเพราะความเป็นกรดเล็กน้อยที่ผิวชิ้นงาน จะเพิ่มประสิทธิภาพของการยึดเกาะครั้งแรก (initial adhesion) ของสารเคลือบผิว รวมถึงการป้องกันการกัดกร่อนในระยะยาวด้วย ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าพีเอชของผิวชิ้นงานให้เป็นกลาง (U.S. EPA, 1996) นอกจากนี้ก็จะมีการล้างขั้นสุดท้ายที่เรียกว่า seal rinse ทั้งนี้เพื่อกำจัดสารละลายสังกะสีฟอสเฟตที่ไม่ทำปฏิกิริยา สิ่งปนเปื้อนที่เหลือ จุดต่างป้องกันการผิวโลหะไม่ให้เกิดคราบสนิมที่เร็วเกินไป และเพิ่มประสิทธิภาพความทนทานต่อเกลือ ซึ่งน้ำล้างขั้นสุดท้ายนี้นิยมใช้น้ำปราศจากไอออน เพราะว่ามีสิ่งปนเปื้อนน้อยมาก ซึ่งจะไม่ลดอายุของสารเคลือบด้วย (Gruss, 2000)

## 2.4 แหล่งน้ำเสียและการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ

### 2.4.1 แหล่งน้ำเสีย

การตกแต่งโลหะนั้น ชิ้นงานจะต้องผ่านการบำบัดเบื้องต้นก่อน จึงจะนำเข้าสู่สารละลายเคมีตกแต่ง การบำบัดเบื้องต้นได้แก่ ใช้สารละลายด่าง (กำจัดไขมัน น้ำมัน คราบสกปรก) ใช้สารละลายกรด (กำจัดสนิม) ส่วนสารละลายเคมีตกแต่ง ซึ่งจะมีโลหะหนักที่ใช้สำหรับตกแต่งผิวชิ้นงานละลายอยู่ จึงมีลักษณะเป็นกรด เพื่อให้โลหะหนักอยู่ในสภาพสารละลาย เมื่อนำชิ้นงานผ่านสารละลายเคมีแต่ละชนิดแล้ว จะต้องทำการล้างด้วยน้ำให้สะอาด น้ำล้างจะต้องระบายทิ้ง เพราะ

ปนเปื้อนด้วยสารละลายเคมี นอกจากนี้สารละลายเคมีนั้น เมื่อใช้ไปได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วจะมีประสิทธิภาพลดลง จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่าย จึงเกิดน้ำเสียขึ้น นอกจากนี้ น้ำเสียยังเกิดจากแหล่งอื่น เช่น บ่อชุบสี ฟันสี ล้างอุปกรณ์ ดังนั้น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่ง โลหะสำเร็จสามารถจำแนกได้เป็นสามประเภท คือ

#### ประเภทที่ 1 น้ำล้างทำความสะอาดชิ้นงาน

น้ำล้างทำความสะอาดชิ้นงาน ใช้สำหรับล้างสารละลายเคมี และสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ที่ติดมากับชิ้นงานออกให้สะอาด ก่อนส่งต่อไปยังบ่อกระบวนการถัดไป น้ำที่ใช้ในการทำความสะอาด ได้แก่ น้ำล้างก่อนชุบเคลือบ และน้ำล้างหลังชุบเคลือบ

##### ก. น้ำล้างก่อนชุบเคลือบ

คุณสมบัติของน้ำล้างก่อนชุบเคลือบ จะขึ้นกับวัสดุชิ้นงาน เช่น กรรมวิธีในการขึ้นรูป ชิ้นงานที่เป็น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปแบบงานปั๊ม งานกลึง มักมีน้ำมันหล่อลื่นติดบนผิวชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานผ่านการขัด จะมีไขมันจากยาขัดติดบนผิว หรือชิ้นงานที่ผ่านการตะไบตกแต่ง จะมีเศษผงติดบนผิว ชิ้นงานที่มีไขมันหรือน้ำมันติดอยู่มาก มักจะล้างด้วยสารละลายกำจัดไขมัน เช่น สารละลายด่าง ชิ้นงานที่มีสนิม จะมีการเอาสนิมออก โดยแช่ชิ้นงานในกรดไฮโดรคลอริก ดังนั้นคุณสมบัติของน้ำล้างก่อนการชุบเคลือบโดยทั่วไปจึงมีการปนเปื้อนของไขมัน น้ำมัน ซึ่งจากผลการศึกษาของ Qin และคณะ (2002) พบว่ามีความเข้มข้นของไขมัน และน้ำมันที่สูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (60 มิลลิกรัมต่อลิตร) นอกจากนี้ยังมีตะกอนแขวนลอยของผงวัสดุของชิ้นงาน ตลอดจนสารเคมีที่ใช้เดิม น้ำล้างมักมีสภาพเป็นกรด - ด่างสูง รวมทั้งมีความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำอยู่มาก ดังนั้น น้ำเสียดังกล่าวนี้ควรแยกการบำบัดด้วยวิธีการกำจัดไขมัน และน้ำมัน

##### ข. น้ำล้างหลังชุบเคลือบ

คุณสมบัติของน้ำล้างหลังการชุบเคลือบ โดยทั่วไปจะมีโลหะตามชนิดของการชุบเคลือบชิ้นงานนั้น มีค่าความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำสูง โดยเฉพาะน้ำล้างชิ้นงานบ่อแรก ตัวอย่างของโลหะได้แก่ นิกเกิล ทองแดง สังกะสี แมงกานีส โครเมียม นอกจากนี้ น้ำล้างยังปนเปื้อนสารละลายเคมีในบ่อชุบเคลือบด้วย (Qin และคณะ, 2002) ดังนั้น น้ำเสียดังกล่าวนี้ควรแยกการบำบัดด้วยวิธีการกำจัดโลหะหนักในแต่ละชนิด

#### ประเภทที่ 2 สารละลายเคมีที่หมดสภาพแล้ว

โดยปกติสารละลายเคมีที่ใช้ในบ่อกระบวนการควรมีการบำรุงรักษา ควบคุมอัตราส่วนต่าง ๆ อยู่ในพิสัยที่กำหนดไว้ สารละลายเคมีอาจได้รับการปนเปื้อนหรือเกิดตะกอนของแข็ง เช่น ในบ่อเคลือบฟอสเฟต จะเกิดตะกอนเหล็กฟอสเฟตขึ้น ปกติจะทำการแยกตะกอนออก แต่จะมีตะกอน และสารละลายบางส่วนที่หลงเหลืออยู่ภายในบ่อฟอสเฟต ซึ่งจะถูกล้างออก

ไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย (U.S. EPA., 1996) นอกจากนี้เมื่อมีการใช้สารละลายเคมีไปประยะหนึ่ง จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่าย โดยระยะเวลาในการเปลี่ยนถ่ายขึ้นอยู่กับสารปนเปื้อน สารละลายที่ถ่ายทิ้ง จะมีความเข้มข้นของสารต่าง ๆ โดยเฉพาะโลหะหนักที่ใช้ในปริมาณสูง จึงจำเป็นต้องมีถังเก็บก่อนนำไปจัดการโดยวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไป (PRC Environmental Management, 1989)

### ประเภทที่ 3 น้ำเสียจากจุดกำเนิดอื่น ๆ

จากการสำรวจโรงงานที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา พบว่าน้ำเสียอาจเกิดขึ้นเป็นครั้งคราว จากจุดกำเนิดอื่น ๆ เช่น โรงงานที่ใช้วิธีการเคลือบสีด้วยกระแสไฟฟ้า อาจมีการทำความสะอาดบ่อชุบสี จะทำให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารละลายสี ในกรณีโรงงานที่ใช้วิธีการพ่นเคลือบสี ซึ่งมีการใช้ม่านน้ำดักจับสี เมื่อมีการระบายน้ำในส่วนนี้ออกเพื่อทำความสะอาดก็จะปนเปื้อนเป็นน้ำเสีย นอกจากนี้น้ำเสียยังเกิดจากการล้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต เช่น อุปกรณ์ผสมสี การล้างทำความสะอาดบ่อกระบวนการ การล้างหัวสเปรย์

นอกจากนี้ น้ำเสียยังเกิดจากระบบการผลิตน้ำปราศจากไอออน เช่น ใช้ระบบอาร์โอ และถ้าต้องการความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น ก็ตามด้วยระบบเรซินแลกเปลี่ยนไอออน การใช้ระบบเรซินนั้น เมื่อใช้ไปประยะหนึ่งจะต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพ ซึ่งถ้าเป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก จะใช้กรดไฮโดรคลอริก และถ้าเป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นจะต้องตามด้วยการล้างน้ำสะอาด น้ำทิ้งจากการฟื้นฟูสภาพนี้ จะมีสภาพความเป็นกรด - ด่างสูง และจำเป็นต้องผ่านการบำบัด โดยปรับสภาพให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ในส่วนของระบบอาร์โอ นั้นจะมีน้ำทิ้งส่วนที่เข้มข้น เรียกว่า รีเทนเทท ขณะที่ระบบทำงานจะถูกปล่อยออกตลอดเวลา เมื่อมีการใช้งานระบบนี้ไปประยะหนึ่ง เมมเบรนจะเกิดการอุดตัน จำเป็นต้องทำการล้างเมมเบรนด้วยสารละลายต่าง และกรด คล้ายกับการฟื้นฟูสภาพของเรซิน ซึ่งจะเกิดน้ำเสียในลักษณะเดียวกัน

กระบวนการที่ใช้น้ำมาก และเกิดน้ำเสียมากที่สุด คือ การล้างชิ้นงาน ซึ่งจะปนเปื้อนด้วยสารละลายต่าง สารละลายกรด ไขมัน น้ำมัน สารประกอบอินทรีย์ โลหะหนัก เช่น โครเมียม ทองแดง สังกะสี นิกเกิล เหล็ก และโลหะอื่น ๆ ลักษณะน้ำเสีย ขึ้นอยู่กับสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับชิ้นงาน และองค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในบ่อกระบวนการ (Qin และคณะ, 2002) ตัวอย่างของลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งพบว่าจะมีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในความเข้มข้นที่เกินกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดน้ำเสีย จึงมุ่งเน้นการปรับสภาพความเป็นกรด - ด่าง การกำจัดไขมัน น้ำมัน การกำจัดโลหะหนักเป็นหลัก



ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ

พารามิเตอร์	หน่วย	ขุบนิกเกิล <sup>A</sup>	ขุบอลโลหะ <sup>B</sup>	โรงงานผลิตชิป <sup>C</sup>	มาตรฐานน้ำทิ้ง
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.16	-	10.60	5.50 - 9.00
ของแข็งละลาย	มก./ล.	-	337.97 - 1,964.54	-	≤ 3,000.00
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	761.00	-	-	-
ไซยาไนด์	มก./ล.	-	0.40 - 14.30	<0.02	ไม่เกิน 0.20
โครเมียม	มก./ล.	-	2.95 - 20.10	<0.03	ไม่เกิน 1.00
ทองแดง	มก./ล.	-	1.80 - 89.52	7,309.00	ไม่เกิน 2.00
นิกเกิล	มก./ล.	2.72	2.37 - 12.32	99.80	ไม่เกิน 1.00
สังกะสี	มก./ล.	-	7.49 - 93.60	49.10	ไม่เกิน 5.00

<sup>A</sup> ผลการศึกษาของ Qin และคณะ (2004)

<sup>B</sup> ผลการศึกษาของ Benito and Ruiz (2002)

<sup>C</sup> ผลการศึกษาของ พรพรหม อินทวงศ์ (2544)

#### 2.4.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ

การกำจัดไขมัน น้ำมัน มักใช้วิธีการทำให้ลอยแล้วตักออก เนื่องจากไขมันหรือน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ จึงลอยตัวอยู่บนน้ำ ส่วนน้ำเสียที่มีน้ำมัน หรือไขมันละลายอยู่ไม่สามารถใช้ถังคัก หรือแยกน้ำมันได้ เนื่องจากน้ำมันจับเป็นเนื้อเดียวกับน้ำเสีย วิธีแก้ไขคือต้องทำให้น้ำมัน และน้ำเสียแยกตัวจากกัน โดยใช้สารเคมีช่วยเสียก่อน จากนั้นจึงใช้ถังคักหรือแยกไขมัน และน้ำมัน หรืออาจใช้วิธีทำให้ลอยตัว (กรมโรงงานอุตสาหกรรมและ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

เทคนิคการบำบัดน้ำเสียทางเคมี - กายภาพสำหรับน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักเป็นหลัก เช่น โครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี นั้น Kurmiawan และคณะ (2006) ได้รวบรวมไว้โดยมุ่งเน้นเทคนิคทางด้าน การก่อตะกอนเคมี (chemical precipitation) การโคแอกกูเลชัน - ฟลอคกูเลชัน (coagulation - flocculation) การทำให้ลอย (flotation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และระบบการกรองด้วยเมมเบรน (membrane filtration) ผลการรวบรวมจาก 124 สิ่งพิมพ์ตั้งแต่ปี 1980 - 2006 สรุปได้ว่า เทคนิคที่มีการศึกษากันมากที่สุด และนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก คือ เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน และเทคนิค

การกรองด้วยเมมเบรน ส่วนเทคนิคก่อนตะกอนเคมีด้วยปูนขาว เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมากเช่นกัน และใช้กันอย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะใช้ในประเทศไทย และตุรกี

เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน ใช้หลักการสับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมาระหว่างตัวกลางสองชนิด คือ ตัวกลางของเหลว และตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของตัวกลางของแข็ง โลหะไอออนจะถูกจับไว้โดยสารแลกเปลี่ยนที่เรียกว่าเรซิน น้ำที่ผ่านเรซินจะมีปริมาณของโลหะไอออนลดลง เมื่อใช้งานไปเรื่อย ๆ โลหะไอออนจะถูกจับไว้เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งได้ระยะเวลาหนึ่ง สารเรซินจะอิ่มตัวด้วยโลหะไอออน ทำให้น้ำที่ผ่านเรซินมีโลหะไอออนเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องฟื้นฟูสภาพของเรซิน โดยใช้กรด และด่าง (ตามชนิดของเรซิน) ไปแลกเปลี่ยนให้โลหะไอออนออกมาจากเรซิน ทำให้เรซินมีความสามารถที่จะจับโลหะไอออนได้อีก แต่การฟื้นฟูสภาพเรซิน จะมีโลหะไอออนเจือปนในน้ำล้าง ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงนิยมใช้เทคนิคนี้สำหรับวัตถุประสงค์เพื่อนำโลหะไอออนที่ได้จากการฟื้นฟูสภาพเรซินกลับไปใช้ใหม่ ข้อจำกัดของเทคนิคนี้ คือ น้ำที่จะนำมาผ่านเรซิน จะต้องผ่านการกำจัดของแข็งแขวนลอยก่อน เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย นอกจากนี้ต้องเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะไอออนที่ต้องการกำจัดด้วย (Kurniawan และคณะ, 2006)

เทคนิคการกรองด้วยเมมเบรน ใช้หลักการความแตกต่างของแรงขับเคลื่อน และลักษณะโครงสร้างของเมมเบรน เพื่อแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ และสารอนินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ ถ้าใช้เมมเบรนชนิดที่มีรูพรุน เช่น อัลตราฟิลเตรชัน (UF) จะใช้หลักการกักกันอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน หลักการ คือ ต้องทำให้โลหะไอออนอยู่ในรูปของอนุภาค เช่น การก่อตะกอนทางเคมี ถ้าใช้เมมเบรนชนิดที่ไม่มีรูพรุน เช่น เมมเบรนอาร์โอ (RO) จะใช้หลักการยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน ส่วนไอออนต่าง ๆ ไม่สามารถผ่านเมมเบรนอาร์โอได้ ข้อจำกัดของเทคนิคนี้ คือ น้ำที่จะนำมาผ่านระบบ จะต้องผ่านการกำจัดของแข็งแขวนลอยก่อน เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย นอกจากนี้น้ำส่วนที่ถูกกักกันไม่ให้ผ่านเมมเบรนอาร์โอ จะมีความเข้มข้นของโลหะไอออนที่สูง และเมื่อเมมเบรนเกิดการอุดตัน จะมีการใช้สารละลายกรด และด่างช่วยในการล้าง ทำให้น้ำล้างมีความเป็นกรด - ด่างสูง เทคนิคนี้นิยมนำมาใช้สำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากจะมีความคุ้มค่ากว่า (Kurniawan และคณะ, 2006)

การก่อตะกอนทางเคมี คือ วิธีการเติมสารเคมีลงในน้ำ เพื่อให้ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ เกิดเป็นตะกอนจมตัวลงมาแล้วจึงแยกออกจากน้ำด้วยวิธีการกรอง สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ปูนขาว และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากราคาถูก และใช้งานง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้ พบว่าขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ซึ่งโลหะแต่ละชนิด จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอชต่าง ๆ เทคนิคการก่อตะกอนทางเคมี จะ

เกิดปฏิกิริยาช้า ตกตะกอนไม่ดี มีปัญหาเรื่องการรวมตะกอน จึงได้มีการนำเทคนิคการ โคลแอก - กูเลชัน - ฟลอคกูเลชัน เข้ามาช่วย เช่น ใช้เกลือเฟอร์ริก เกลือสารส้ม จากนั้นใช้สารพอลิเมอร์เป็นตัวช่วยทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นรวมตัวเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น ทำให้การตกตะกอนดีขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ เพิ่มค่าใช้จ่าย เพิ่มปริมาณตะกอน (พรพรม อินทวงศ์, 2544; Eckenfelder, 2000; Kurniawan และคณะ, 2006; Palmer และคณะ, 1988) สำหรับน้ำเสียโรงงานที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา ซึ่งเป็นน้ำล้างรวมจากกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต ประกอบด้วยน้ำล้างสารละลายต่าง และน้ำล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต โรงงานเลือกใช้เทคนิคการก่อก้อนไฮดรอกไซด์ด้วยปูนขาว

เทคนิคทางเคมี - กายภาพ ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี การโคลแอกกูเลชัน - ฟลอคกูเลชัน การแลกเปลี่ยนไอออน และระบบกรองอาร์โอ มีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคทางเคมี - กายภาพในการกำจัดโลหะหนัก<sup>ก)</sup>

เทคนิคการบำบัด	เป้าหมายของการกำจัด	ข้อดี	ข้อเสีย
ตกตะกอนทางเคมี	- โลหะหนัก - โลหะประจุสองบวก	- ต้นทุนต่ำ - ดำเนินการง่าย	- เกิดปริมาณตะกอนมาก - เพิ่มค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน
โคลแอกกูเลชัน - ฟลอคกูเลชัน	- โลหะหนัก - สารแขวนลอย	- ตกตะกอนเร็ว	- เพิ่มปริมาณตะกอน - เพิ่มค่าใช้จ่ายเรื่องสารเคมีและการกำจัดตะกอน
แลกเปลี่ยนไอออน	- สารประกอบละลายที่มีประจุบวก/ลบ	- ไม่เกิดตะกอน - ใช้เวลานำบัดน้อย	- ต้นทุนสูง - เรซินแต่ละชนิดมีความจำเพาะกับโลหะบางชนิด
ระบบกรองอาร์โอ	- สารประกอบอินทรีย์ - สารประกอบอนินทรีย์	- ใช้พื้นที่น้อย	- ใช้พลังงานมาก - มีแนวโน้มเกิดการอุดตันได้ง่าย - ต้นทุนสูง

<sup>ก)</sup> สรุปลจาก Kurniawan และคณะ (2006)

การตกตะกอนทางเคมีในรูปไฮดรอกไซด์นั้น ในสารละลายที่เกิดสภาวะอิ่มตัวของ โลหะไฮดรอกไซด์ จะมีผลคูณของความเข้มข้นไอออนระหว่างโลหะ และไฮดรอกไซด์เท่ากับ ค่าคงที่ผลคูณการละลาย ( $K_{sp}$ ) ซึ่งแสดงในสมการดังนี้



$$K_{sp} = [M^{n+}] [OH^-]^n \quad (2.2)$$

โดยที่	$K_{sp}$	คือ	ค่าคงที่ผลคูณการละลาย (solubility product constant)
	$[M^{n+}]$	คือ	ความเข้มข้นไอออนของโลหะในน้ำ มีประจุ +n
	$[OH^-]$	คือ	ความเข้มข้นไอออนของไฮดรอกไซด์ในน้ำ

เมื่อเติมปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่มีโลหะละลายอยู่ ทำให้พีเอชน้ำเสียเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์มีค่ามากขึ้น จนทำให้ผลคูณความเข้มข้นของไอออนระหว่างโลหะ และไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่าค่า  $K_{sp}$  ส่งผลให้ไอออนของโลหะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ขึ้น และตะกอนจะเพิ่มมากขึ้นจนกว่าค่าผลคูณของไอออนจะเท่ากับค่า  $K_{sp}$  ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น จำเป็นต้องแยกออกจากน้ำโดยกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป เช่น ตกตะกอน กรอง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพีเอชหรือความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ลดลง ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์จะละลายกลับไปอยู่ในน้ำเสียอีก ทำให้การกำจัดโลหะหนักไม่ได้ผล (พรพรหม อินทวงศ์, 2544; Eckenfelder, 2000; Palmer และคณะ, 1988)

ช่วงค่าพีเอชที่โลหะหนักอยู่ในสถานะที่ละลายน้ำได้น้อยที่สุด จะมีความแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนัก ในกรณีโลหะทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) นิกเกิล (Ni) และแมงกานีส (Mn) ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมประมาณ 9.0 - 10.0, 9.0 - 10.0, 10.0 - 11.0 และมากกว่า 9.4 ตามลำดับ ส่วนการลดโครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ ( $Cr^{+6}$ ) นั้นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ ( $Cr^{+3}$ ) ที่สภาวะกรดเสียก่อน (ค่าพีเอชต่ำกว่า 3.0) โดยใช้สารให้อิเล็กตรอน (reducing agents) ส่วนใหญ่จะใช้เฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ( $Na_2S_2O_3$ ) หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) จากนั้นจึงปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 8.0 - 10.0 เพื่อให้เกิดการก่อตะกอนไฮดรอกไซด์ (Eckenfelder, 2000)

พรพรหม อินทวงศ์ (2544) ได้ศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตชิป โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีในรูปไฮดรอกไซด์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลจากการศึกษาโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลเป็น 10.6 ซึ่งเริ่มต้นมีนิกเกิล (II) ไอออนอยู่ 22.01 มก./ล. สามารถลดปริมาณลงเหลือ 0.26 มก./ล. (ไม่เกิน 1.0 มก./ล. ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม) มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 98.8 ส่วนโลหะสังกะสี และคอปเปอร์ (II) ไอออนนั้น พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัด คือ 9.0 ซึ่งเริ่มต้นมีโลหะสังกะสี และคอปเปอร์ (II) ไอออน อยู่ 7.38 และ 108.87 มก./ล. ตามลำดับ สามารถลดปริมาณลงเหลือต่ำกว่า 0.11 และ 1.16 มก./ล. ตามลำดับ (ไม่เกิน 5.0 และ 2.0 มก./ล. ตามลำดับ ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม) มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 98.5 และ 98.9 ตามลำดับ ถ้าน้ำเสียมีโครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ ( $Cr^{+6}$ ) ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ ( $Cr^{+3}$ ) ก่อน โดยทำการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2.0 (ใช้กรดซัลฟิวริก) จากนั้นเติมสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งสามารถทำการควบคุมได้ด้วยค่าไออาร์พีเท่ากับ 465 มิลลิโวลต์ (ค่าไออาร์พี คือ ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ซึ่งสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตจะเปลี่ยน  $Cr^{+6}$  ให้อยู่ในรูปของ  $Cr^{+3}$  จากนั้นสามารถตกตะกอน  $Cr^{+3}$  โดยการปรับพีเอชขึ้นเป็น 8.5 ซึ่งเริ่มต้นมีโครเมียมอยู่ 25.13 มก./ล. สามารถลดปริมาณลงเหลือ 0.24 มก./ล. (ไม่เกิน 1.0 มก./ล. ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม) มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.0

จากผลการศึกษาของพรพรหม อินทวงศ์ (2544) พบว่าช่วงค่าพีเอชที่สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง สังกะสี และโครเมียม คือ 9.0 - 11.0 ส่วนโลหะนิกเกิลนั้น ควรให้ค่าพีเอชไม่ต่ำกว่า 10.6 ดังนั้นผลการศึกษาจึงมีความสอดคล้องกับ Eckenfelder (2000) และจากการรวบรวมข้อมูลของ Kurniawan และคณะ (2006) ซึ่งพบว่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 11.0 ดังนั้นถ้าทำการบำบัดโลหะนิกเกิล เพื่อให้ได้มาตรฐานแล้ว จะทำให้โลหะอื่น ๆ ได้แก่ ทองแดง สังกะสี และโครเมียม รวมถึง แมงกานีส มีความเข้มข้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมด้วย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ อาจจะมีค่าซีโอดีด้วย เนื่องจากสิ่งสกปรกที่ติดมากับชิ้นงาน เช่น คราบไขมัน น้ำมัน ที่ทำชิ้นงานเอาไว้หลังจากที่ขึ้นรูปเสร็จแล้ว การกำจัดซีโอดีสามารถใช้เมมเบรนอาร์โอได้ จุฑารัตน์ อริยะธรรมถาวร (2546) ได้ทำการศึกษานำน้ำล้างแรกหลังการข้อมผ้าของอุตสาหกรรมฟอกข้อมสิ่งทอ มากรองด้วยเมมเบรนอาร์โอ ผลการศึกษา พบว่าน้ำเสียมีความเข้มข้นของสารแขวนลอย สารละลาย บีโอดี และซีโอดีสูงอยู่ในช่วง 29 - 531, 1560 - 2642, 521 - 1503 และ 1437 - 2975 มก./ล. ตามลำดับ น้ำที่กรองผ่านเมมเบรนอาร์โอมีความเข้มข้นของสารแขวนลอย สารละลาย บีโอดี และซีโอดี ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม คือ มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.8 - 3.0, 30 - 51, 3 - 4 และ 6 มก./ล. ตามลำดับ มี

ประสิทธิภาพการกักกันสารแขวนลอย สารละลาย บีโอดี และซีโอดี ในช่วง 97.2 - 99.4, 98, 99.4 - 99.7 และ 99.6 - 99.8 ตามลำดับ

Benito และ Ruíz (2002) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ โดยใช้เมมเบรนอาร์โอ เพื่อกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย น้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็นน้ำล้างที่รวบรวม มาจากกระบวนการชุบด้วยกระแสไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า เมมเบรนอาร์โอมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนัก เช่น เริ่มต้นมีความเข้มข้นของนิกเกิล สังกะสี โครเมียม และทองแดง เท่ากับ 3.9, 46.1, 17.5 และ 28.8 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อกรองผ่านเมมเบรนอาร์โอแล้ว คงเหลือ เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.2 และ 1.7 มก./ล. ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 95, 99, 99 และ 94 ตามลำดับ

Juang และ Shiau (2000) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง และ สังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้โคโรซานเป็นสารสร้างตะกอนเชิงซ้อนกับโลหะหนัก แล้วกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ผลการศึกษาพบว่า การสร้างตะกอนเชิงซ้อนกับโลหะหนักนั้น ควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 8.5 - 9.5 ซึ่งเริ่มต้นมีความเข้มข้นของทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 79 และ 81 มก./ล. ตามลำดับ ระบบมีประสิทธิภาพร้อยละ 100 และ 95 ตามลำดับ

Sapari, Idris และ Hisham (1996) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ซึ่งเริ่มต้นมีความเข้มข้นของสังกะสี และโครเมียม เท่ากับ 5.4 และ 12.4 มก./ล. ตามลำดับ ทำการบำบัดโดยให้น้ำเสียไหลผ่านเรซินประจุบวกชนิดกรดแก่ในรูปไฮโดรเจน จากนั้นให้น้ำไหลผ่านเรซินประจุลบชนิดต่างแก่ในรูปไฮดรอกไซด์ ผลการศึกษาพบว่า ระบบเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะสังกะสี และโครเมียมได้ร้อยละ 100

## 2.5 การลดการใช้ในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จโดยอาศัยเทคโนโลยีสะอาด

การล้างชิ้นงานต้องการปริมาณน้ำล้างจำนวนมาก เกิดน้ำเสียปริมาณมาก และปนเปื้อนด้วย น้ำมัน ไขมัน สารเคมี โลหะหนัก ซึ่งมีความเข้มข้นที่เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องทำการบำบัด ก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ดังนั้นการลดปริมาณการใช้น้ำ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดมลพิษที่เกิดจากอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ การลดปริมาณการใช้น้ำ สามารถทำได้โดยการลดสารละลายเคมีจากกระบวนการที่จะไปปนเปื้อนในบ่อน้ำล้าง และการเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992; U.S. EPA., 1996)

### 2.5.1 การลดสารละลายเคมีจากบ่อกระบวนการที่จะปนเปื้อนในน้ำล้าง

การลดสารละลายเคมีจากบ่อกระบวนการ ที่จะไปปนเปื้อนในบ่อน้ำล้างได้แก่ ลดความหนืดของสารละลายเคมี ออกแบบการแขวนชิ้นงานให้เกิดการระบายน้ำได้ดี ควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานให้ช้า ๆ จัดให้มีแผ่นรองหยดแบบเอียงให้สารละลายเคมีไหลกลับเข้าบ่อกระบวนการ จัดให้มีถังรองหยดเพื่อนำสารละลายเคมีกลับเข้าบ่อกระบวนการ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

การลดความหนืดของสารละลายเคมีในบ่อกระบวนการ ได้แก่ การควบคุมความเข้มข้นของสารละลายเคมีให้ต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ใช้อุณหภูมิที่สูง ใช้สารช่วยเปียก ซึ่งโดยทั่วไปสารละลายเคมีที่มีความเข้มข้นที่มากกว่า จะมีความหนืดมากกว่า ทำให้เกิดฟิล์มที่หนาเกาะที่ผิวชิ้นงาน จึงหยดออกจากชิ้นงานช้า ส่วนการควบคุมอุณหภูมิในบ่อสารละลายเคมีให้สูงกว่าปกติ และพอเหมาะ จะช่วยลดความหนืด ลดแรงตึงผิวของสารละลายเคมีได้ แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้น สำหรับการใส่สารช่วยเปียก จะช่วยลดแรงตึงผิว ซึ่งจะช่วยลดปริมาณสารละลายเคมีที่ติดไปกับชิ้นงาน (แครกเอาท์) ได้สูงถึงร้อยละ 50 แต่บางครั้งอาจทำให้เกิดปัญหาการเกิดฟองอากาศขึ้น หรืออาจทำให้เกิดผลเสียทางด้านเคมีแก่สารละลายเคมีในกระบวนการได้ สารช่วยเปียกที่เหมาะสมที่สุด จะเป็นสารเคมีประเภทที่ไม่มีไอออน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

การออกแบบการแขวนชิ้นงานให้เกิดการระบายน้ำได้ดี จะช่วยลดปริมาณแครกเอาท์ที่ติดไปกับชิ้นงาน โดยพยายามจัดตำแหน่ง และลักษณะของการแขวนเพื่อให้น้ำสารละลายเคมีไหลออกจากชิ้นงานได้สะดวก และพยายามจัดตำแหน่งการแขวนให้เรียงไปตามแนวระดับมากกว่าในแนวตั้ง เนื่องจากชิ้นงานที่อยู่ส่วนล่างตามแนวตั้งลงไป จะได้รับสารละลายเคมีที่หยดออกจากชิ้นงานที่อยู่เหนือขึ้นไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

ควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานให้ช้า ๆ เป็นการเพิ่มเวลาให้สารละลายเคมีได้หยดออกจากชิ้นงานได้มากขึ้น ถ้าระบบเคลื่อนชิ้นงานเป็นแบบอัตโนมัติ ควรปรับความเร็วของสายพานลำเลียงให้ช้าที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

จัดให้มีแผ่นรองหยด อาจใช้แผ่นพลาสติก หรือแผ่นสแตนเลส วางระหว่างบ่อกระบวนการ โดยวางแบบเอียงไปยังบ่อที่เป็นจุดเริ่มต้น เมื่อสารละลายเคมีหรือของเหลวหยดลงแผ่น ก็จะไหลกลับไปสู่บ่อนั้น ๆ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปัญหาเรื่องสารละลายเคมีที่ติดไปกับชิ้นงาน หยดลงบ่อกระบวนการถัดไปแล้ว ยังจะช่วยลดปัญหาสารละลายเคมีหยดลงพื้น แล้วจะถูกชะล้าง

ไปยังบ่อบำบัดด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

หากชิ้นงานมีลักษณะที่อุ้มน้ำ และมีการหยดของสารละลายเคมีตลอดเวลา ควรจัดให้มีถังรองหยดก่อนที่ชิ้นงานจะเข้าสู่ถังล้าง เพื่อให้สารละลายเคมีไหลออกจากชิ้นงานไปได้มากที่สุด แล้วสารละลายเคมีที่สะสมไว้ดังกล่าว จะสามารถนำไปเติมกลับในบ่อสารละลายเคมีได้ การเร่งให้สารละลายเคมีไหลออกจากชิ้นงานให้เร็วขึ้น อาจใช้การสเปรย์ละอองน้ำโดยใช้น้ำประเภทเดียวกันกับที่เติมในบ่อสารละลายเคมี ซึ่งเมื่อละอองน้ำกระทบกับผิวชิ้นงานจะทำการชะล้าง และเจือจางความเข้มข้นของสารละลายเคมีที่ติดไปกับชิ้นงานได้ โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อผิวชิ้นงาน ละอองน้ำนี้จะใช้น้ำปริมาณน้อย จึงทำให้สารละลายที่อยู่ในถังรองหยดมีความเข้มข้นมากเพียงพอที่จะนำกลับไปเติมได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

การใช้บ่อล้างวนกลับ เป็นการจัดให้มีบ่อน้ำล้างหนึ่งหลังบ่อสารละลายเคมีแบบที่เติมด้วยน้ำประเภทเดียวกับน้ำที่ใช้ในบ่อสารละลายเคมี ซึ่งน้ำจะชะล้างสารละลายเคมีที่ติดมากับชิ้นงานออก เมื่อชิ้นงานผ่านบ่อน้ำล้างนี้เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเคมีเพิ่มมากขึ้น รอจนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายเคมีไม่เพิ่มขึ้นอีก จึงนำสารละลายเคมีนี้ไปเก็บไว้รอนำมาเติมกลับสู่บ่อสารละลายเคมีเมื่อต้องการผสมสารละลายเคมีใหม่ หรืออาจเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้นโดยใช้เทคนิคเช่น การระเหยน้ำออก เรซินแลกเปลี่ยนไอออน หรือระบบอาร์โอ การใช้บ่อล้างวนกลับนี้ช่วยลดการสูญเสียสารละลายเคมีที่ติดไปกับชิ้นงานได้ และสามารถนำสารละลายเคมีในบ่อล้างวนกลับเติมกลับสู่บ่อเพื่อชะล้างน้ำที่หายไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

### 2.5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง

การล้างที่เพียงพอขึ้นกับ (1) ความปั่นป่วนระหว่างชิ้นงานกับน้ำล้าง (2) เวลาสัมผัสที่เพียงพอ (3) ปริมาตรที่เพียงพอของน้ำล้าง เทคนิคต่อไปนี้จะช่วยลดการใช้ น้ำล้าง และเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง

การฉีดน้ำล้างเป็นสเปรย์ เป็นการล้างชิ้นงานด้วยหัวฉีดน้ำความเร็วสูง การใช้วิธีนี้จะใช้น้ำระหว่างร้อยละ 15 ถึง 25 ของการล้างแบบจุ่ม แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อล้างชิ้นงานที่มีจุดอับ หรือพื้นที่ที่มีการทับซ้อนกัน จะมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีนัก จึงต้องจัดชิ้นงานให้เหมาะสมเพื่อให้ฉีดล้างอย่างทั่วถึง หรืออาจใช้การล้างแบบจุ่มตามหลังการล้างแบบสเปรย์อีก จะทำให้ประสิทธิภาพการล้างดีขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992; U.S. EPA., 1996)

เพิ่มความปั่นป่วนระหว่างชิ้นงานกับน้ำล้าง จะทำให้ประสิทธิภาพของการล้างจะดีขึ้นอีก เช่นถ้าเป็นการล้างแบบจุ่มให้ใช้ลมเป่ากวนน้ำให้เกิดการหมุนวนน้ำ เชื่อกันว่าการใช้อากาศ



จะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่ตีที่ที่สุด และเป็นการล้างชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพมาก โดยฟองอากาศจะช่วยไล่น้ำสารละลายเคมีออกจากผิวชิ้นงาน โดยมากจะเป่าลมผ่านเข้าทางด้านล่างของถังน้ำล้าง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992; U.S. EPA., 1996)

การควบคุมอัตราการไหลของน้ำล้างโดยติดตั้งตัวควบคุมการไหล (flow restrictor) ทำให้ควบคุมอัตราน้ำล้างได้ดีขึ้น และสม่ำเสมอตามความต้องการ จึงเป็นการควบคุมการใช้น้ำให้เกิดความเหมาะสม จะช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งเครื่องควบคุมวาล์วปิดและเปิดน้ำเติมเข้าถังน้ำล้างได้อัตโนมัติ โดยใช้เครื่องวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า หรืออาจใช้เครื่องวัดค่าพีเอช จุ่มอยู่ในบ่อน้ำล้างตลอดเวลา แล้วกำหนดค่าสภาพการนำไฟฟ้า หรือค่าพีเอชของน้ำล้างไว้ที่ระดับสูงสุด และระดับต่ำสุดที่ยอมรับได้ เมื่อน้ำล้างได้รับการปนเปื้อนด้วยน้ำสารละลายเคมี จะทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้า หรือค่าพีเอชในน้ำล้างเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าที่ตั้งเอาไว้ เครื่องวัดจะส่งสัญญาณไปทำให้วาล์ว (ที่ควบคุมการปิด - เปิดด้วยกระแสไฟฟ้า) เปิดวาล์วเติมน้ำเข้าบ่อน้ำล้าง ทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้า หรือค่าพีเอชของน้ำล้างค่อย ๆ ลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งเอาไว้ เครื่องควบคุมจึงสั่งปิดวาล์วน้ำ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

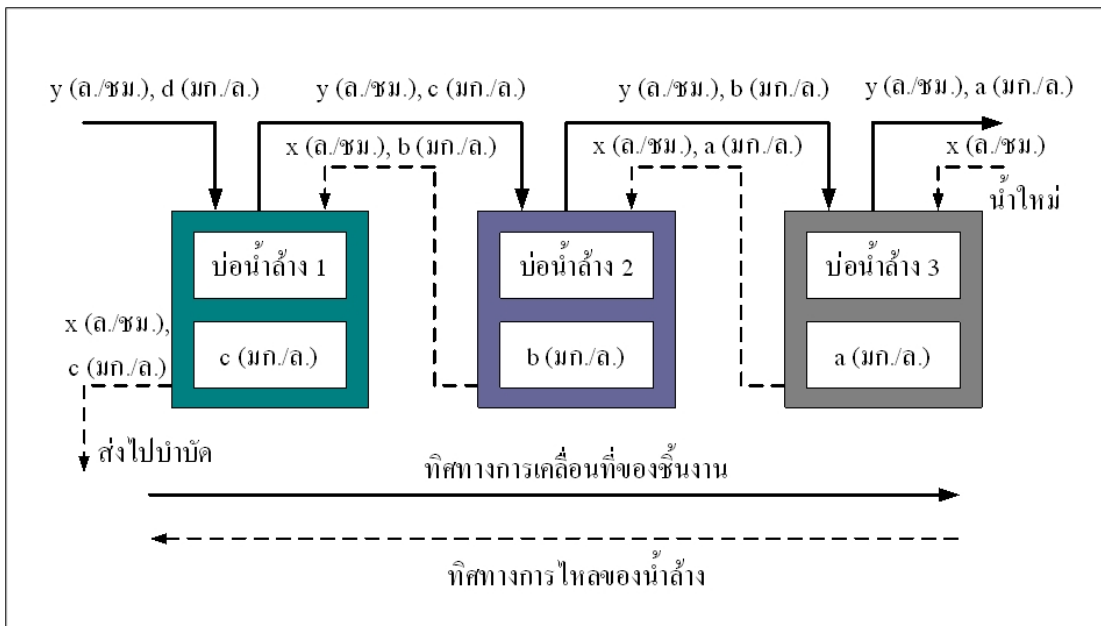
การปล่อยน้ำในบ่อน้ำล้างทิ้งตามระดับความปนเปื้อนที่ยอมรับได้แทนการกำหนดเป็นเวลา จะสามารถลดปริมาณการใช้น้ำได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว น้ำในบ่อน้ำล้างจะรักษาระดับความปนเปื้อนโดยการระบายน้ำออก และเติมน้ำใหม่เข้าไปแทน ถ้าการปล่อยน้ำล้างทิ้งดำเนินการโดยกำหนดระดับความปนเปื้อนสารละลายเคมีของน้ำล้างไว้สูงสุดที่ไม่มีผลกระทบต่อชิ้นงาน จะเป็นการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในกระบวนการผลิตจะต้องทำการตรวจวิเคราะห์ความปนเปื้อนของน้ำล้าง แล้วนำข้อมูลมาประกอบในการวางแผนการระบายน้ำล้างทิ้งตามความปนเปื้อน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; U.S.EPA., 1996)

น้ำล้างที่ได้รับการปนเปื้อน สามารถนำไปใช้เป็น้ำล้างที่บ่อกระบวนการอื่น ๆ ที่มีความต้องการระดับความปนเปื้อนที่มากกว่า เช่น จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2548) พบว่ามีโรงงานตัวอย่างได้นำน้ำทิ้งจากการล้างสวนกระแสหลังบ่อชุบนิเกิล ที่มีความเข้มข้นของนิเกิลไม่เกิน 300 ส่วนในล้านส่วน และไม่มีตะกอนของนิเกิล หรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ มาใช้ซ้ำเป็นน้ำล้างสวนกระแสหลังบ่อจุ่มกรดซึ่งอยู่ก่อนหน้าบ่อชุบนิเกิล ทำให้เกิดการประหยัดน้ำล้างเพิ่มขึ้น และไม่มีผลเสียหายต่อชิ้นงาน การดำเนินการนี้เป็นการนำน้ำล้างที่ผ่านการใช้งานแล้ว และมีค่าความเป็นกรด (ในบ่อชุบต้องมีค่าพีเอชต่ำเพื่อให้โลหะชุบอยู่ในสภาพละลาย) ไปใช้ซ้ำเป็นน้ำเติมใหม่ในการล้างหลังบ่อจุ่มกรด ซึ่งน้ำล้างมีความเป็นกรดเช่นกัน จึงเป็นการใช้น้ำทิ้งจากบ่อน้ำล้างหนึ่งไปใช้ซ้ำเป็นน้ำล้างที่บ่อกระบวนการก่อนหน้า ทำให้ไม่ต้องเติมน้ำล้างใหม่ในบ่อน้ำล้างนี้

นอกจากนี้ น้ำทิ้งจากระบบล้างหลังปอกัดกรด สามารถนำมาใช้ซ้ำเป็นน้ำล้างในระบบน้ำล้างหลังปอกัดสารละลายต่าง ซึ่งจะมีผลดี คือ เกิดการปรับสภาพให้เป็นกลาง และช่วยลดความหนืดของฟิล์มสารละลายต่าง นอกจากนี้ สารละลายต่าง หรือสารละลายกรดที่หมดสภาพการใช้งานแล้ว สามารถเก็บเอาไว้สำหรับปรับค่าความเป็นกรด - ด่างในระหว่างบำบัดน้ำเสีย แต่จะไม่ใช้ปรับค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำที่ผ่านการบำบัด เพราะอาจมีการปนเปื้อนมากกว่า (PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

ระบบการล้างสวนกระแสแบบการใช้ถังล้างหลายขั้นตอน ช่วยเพิ่มเวลาสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับน้ำล้าง ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการล้างสูงขึ้น และจะเกิดความประหยัดมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับการล้างสวนกระแสแบบขั้นตอนเดียว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548; PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992; U.S. EPA., 1996) การล้างแบบสวนกระแส เป็นการล้างที่ทิศทางการไหลของน้ำล้างตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตามลำดับขั้นตอนการล้าง มีผลทำให้ชิ้นงานได้รับน้ำล้างที่สกปรกมากกว่าไปสู่ น้ำล้างที่สะอาดกว่า โดยเติมน้ำล้างใหม่ลงที่บ่อล้างสุดท้าย น้ำจะไหลขึ้นไปยังบ่อที่อยู่ก่อนหน้าตามลำดับลักษณะการล้างสวนกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ประสิทธิภาพของการล้างด้วยระบบการล้างสวนกระแสนี้ ขึ้นอยู่กับการรักษาอัตราส่วนเจือจาง (dilution ratio) ของค่าความเข้มข้นระหว่างสารละลายเคมีที่บ่อกระบวนการกับบ่อน้ำล้างสุดท้าย (ตามรูปที่ 2.4 คือ d กับ a) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการล้าง (x) และอัตราน้ำที่ติดมากับชิ้นงานไหลลงไปบ่อล้าง หรือเรียกว่าแคร์กอินท์ (y) เช่น ถ้าความเข้มข้นของสารละลายต่างทำความสะอาดเท่ากับ 1 มก./ล. และถ้าสารละลายนี้หนึ่งลิตรไหลออกจากชิ้นงานไปยังบ่อน้ำล้างที่มีปริมาตร 99 ลิตร ถ้าสมมติว่าความเข้มข้นของสารละลายต่างทำความสะอาดในบ่อน้ำล้างเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ จะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายต่างทำความสะอาดในบ่อล้างเท่ากับ 1 มก.ต่อน้ำ 100 ลิตร และมีอัตราส่วนเจือจาง 100 : 1 ถ้าอัตราส่วนเจือจางมาก และ/หรืออัตราที่น้ำติดมากับชิ้นงานไหลลงไปบ่อล้างเพิ่มขึ้น ก็จะต้องการอัตราน้ำล้างมากขึ้น การลดอัตราน้ำล้างลงแต่ต้องการรักษาอัตราส่วนเจือจางไว้ สามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนบ่อล้างขึ้น ซึ่งจะช่วยลดอัตราน้ำล้างลงได้มากกว่าร้อยละ 90 (U.S. EPA., 1996) ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.5



หมายเหตุ จาก Manual Pollution in the Paints and Coatings Industry (179), U.S. EPA, 1996, Washington, DC : U.S. EPA.

รูปที่ 2.4 การล้างแบบสวนกระแส

ตารางที่ 2.5 อัตราน้ำล้างไหลสวนกระแสตามลำดับการล้าง

อัตราส่วน เจือจาง	อัตราน้ำล้าง (ลิตรต่อนาที)		
	น้ำล้างบ่อที่ 1	น้ำล้างบ่อที่ 2	น้ำล้างบ่อที่ 3
100 : 1	99.0	9.5	4.3
1,000 : 1	999.0	31.1	9.6
2,000 : 1	1,999.0	44.2	12.2
5,000 : 1	4,999.0	70.2	16.7
10,000 : 1	9,999.0	99.5	21.2
20,000 : 1	19,999.0	140.9	26.8

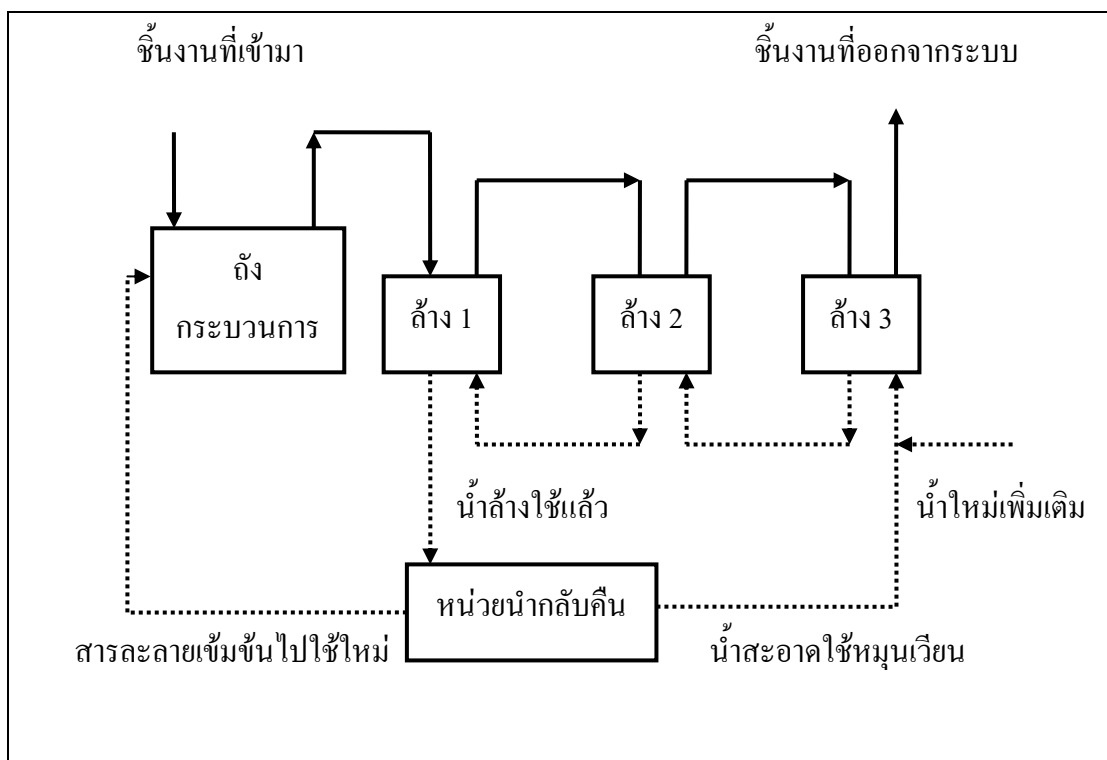
หมายเหตุ จาก Manual Pollution in the Paints and Coatings Industry (59), U.S. EPA, 1996, Washington, DC : U.S. EPA.

จากตารางที่ 2.5 อัตราส่วนเจือจาง 100 : 1 ถ้าใช้บ่อน้ำล้างสวนกระแสบ่อเดียว จะใช้น้ำล้างในอัตรา 99 ลิตรต่อนาที แต่ถ้าเพิ่มเป็น 2 และ 3 บ่อ จะใช้น้ำเพียง 9.5 และ 4.3 ลิตรต่อนาที

ตามลำดับ ทำให้ลดอัตราการใช้น้ำลงร้อยละ 90 และ 96 ตามลำดับ และถ้าเพิ่มอัตราส่วนเจือจางมากขึ้น อัตราการใช้น้ำของการที่มีบ่อน้ำล้างบ่อที่ 2 และ 3 จะลดลงมากขึ้น เช่นที่อัตราส่วนเจือจาง 20,000 : 1 อัตราการใช้น้ำจะลดลงร้อยละ 99.3 และ 99.9 ตามลำดับ

### 2.6 เทคนิคการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ

เมื่อน้ำล้างได้รับการปนเปื้อนจนถึงระดับที่ยอมรับได้แล้ว จะถูกระบายออกจากบ่อน้ำล้างส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย ตะกอนจากการบำบัดเป็นขยะอันตราย เพราะมีโลหะหนักปนเปื้อน นอกจากนี้ยังเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่า และนับวันจะหาน้ำที่มีความบริสุทธิ์ได้ยากลำบากมากขึ้น จึงได้มีการนำเทคนิคที่จะนำน้ำล้าง และ/หรือน้ำสารละลายโลหะหนักกลับคืนจากน้ำล้าง แล้วนำกลับเข้าบ่อกระบวนการ ซึ่งเรียกว่าหน่วยนำกลับคืน โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ เช่น น้ำล้างบ่อแรก หลังผ่านการชุบโลหะ น้ำล้างบ่อสุดท้าย และน้ำล้างรวม ตัวอย่างระบบการประยุกต์ใช้หน่วยนำกลับคืน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบการนำน้ำล้างกลับคืน

ชั้นงานจะผ่านการชุบ โลหะที่ถังกระบวนการ ซึ่งมีสารละลายเคมีที่ใช้สำหรับชุบชั้นงาน แล้วล้าง 3 ขั้นตอน การล้างเป็นการล้างแบบสวนกระแส ทำให้บ่อล้าง 1 มีความเข้มข้นของสารละลายจากบ่อชุบมากที่สุด นำน้ำล้างจากบ่อล้าง 1 มาผ่านหน่วยนำกลับคืน ซึ่งจะเกิดการแยกน้ำที่มีความสะอาดมากพอที่จะนำกลับไปใช้เป็นน้ำล้างใหม่ได้ ส่วนน้ำล้างนั้นเมื่อมีการแยกน้ำออกจะทำให้ น้ำล้างมีความเข้มข้นของสารละลายจากบ่อชุบมากขึ้น และสามารถเพิ่มความเข้มข้นถึงขั้นที่สามารถนำกลับเข้าไปเติมในถังกระบวนการได้ จึงเป็นการนำสารละลายจากบ่อชุบกลับคืนไม่ให้ปล่อยไปเป็นน้ำเสีย และยังสามารถนำน้ำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้อีก ส่วนน้ำใหม่จะเติมเพียงเพื่อชดเชยส่วนที่สูญเสียไประหว่างกระบวนการเท่านั้น

หน่วยนำกลับคืนที่ได้ประสบผลสำเร็จในการนำโลหะ และเกลือโลหะกลับคืน ได้แก่ ระบบการระเหย ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ไตรโคอะไลท์ ระบบแลกเปลี่ยนไอออน และ ระบบอาร์โอ (PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

ระบบการระเหยนั้น มักจะนำไปใช้สำหรับการนำสารละลายเคมีจากถังชุบกลับคืน โดยจะให้น้ำระเหยจากน้ำล้าง เพื่อให้ได้สารละลายเคมีเข้มข้นพอที่จะนำไปใช้ใหม่ได้ โดยค้ำน้ำให้ระเหยแล้วควบแน่นเอาน้ำไปใช้เป็นน้ำล้าง ส่วนสารละลายเคมีที่มีความเข้มข้นนำกลับเข้าสู่ระบบบ่อกระบวนการใหม่ การระเหยนิยมทำภายใต้แรงสุญญากาศ เพื่อป้องกันการย่อยสลายของสารเติมแต่งเนื่องจากอุณหภูมิสูง ระบบนี้ประหยัดเมื่อใช้กับระบบการล้างสวนกระแสหลายขั้นตอน เพราะจะลดน้ำล้างได้ แต่ระบบนี้จะใช้พลังงานมาก ต้องมีระบบดูดสุญญากาศช่วยจึงใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าได้ (PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ไตรโคอะไลท์ซิส เป็นระบบที่ใช้แผ่นเมมเบรนที่เลือกผ่านแบบประจุบวก และประจุลบ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการแยกสารประจุบวก และประจุลบออกจากกระแส น้ำ ระบบจะมีแผ่นเมมเบรน ซึ่งมีประจุบวก และประจุลบ ติดตั้งวางสลับกันเป็นชั้น ๆ น้ำจะถูกส่งเข้าไปในช่องระหว่างแผ่นเมมเบรน (แบบช่องเว้นช่อง) และปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแผ่นเมมเบรน โดยเมมเบรนประจุบวกจะยอมให้ไอออนประจุบวกผ่านไป และเมมเบรนประจุลบก็ยอมให้ไอออนประจุลบผ่านไปได้เช่นกัน แต่เนื่องจากเมมเบรนยอมให้ไอออนที่มีประจุเดียวกันเคลื่อนผ่าน ส่วนประจุตรงข้ามจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นจะเกิดช่องที่มีสารละลายเข้มข้นด้วยไอออน กับช่องที่มีสารละลายไอออนเจือจาง สลับกันแบบช่องเว้นช่อง (ไพศาล วีรกิจ, 2549; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543; Amjad, 1993) ระบบนี้ไม่ค่อยนิยม เพราะเกิดปัญหาตะกรันเกาะติดบนแผ่นเมมเบรนทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามาก และต้องทำความสะอาดบ่อย (ไพศาล วีรกิจ, 2549) ในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จมักใช้ระบบนี้ในการแยกไอออนที่มีความเข้มข้นสูงออกจากน้ำล้าง (PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

ระบบแลกเปลี่ยนไอออนนั้น ใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุระหว่างไอออนที่อยู่ในของเหลว หรือน้ำกับไอออนที่อยู่ในเรซิน ระบบจะมีเรซินประจุบวก และประจุลบ ใช้แลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบ ตามลำดับ โดยน้ำที่มีไอออนละลายอยู่จะผ่านถึงกรองที่มีเรซินบรรจุอยู่ ถ้ามีเรซินประจุบวกบรรจุอยู่จะทำให้เรซินปล่อยไอออนประจุบวกที่เรซินชอบน้อยออกมา แล้วไอออนประจุบวกที่ละลายอยู่ในน้ำที่เรซินชอบมากกว่าจะเข้าไปแทนที่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนประจุบวกที่เรซินปล่อยออกมากับไอออนประจุลบที่อยู่ในน้ำ และเกิดเป็นสารประกอบใหม่ละลายออกไปกับน้ำที่ผ่านเรซิน ส่วนถ้าถึงกรองมีเรซินประจุลบบรรจุอยู่จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุลบด้วยหลักการเดียวกัน เรซินจะแลกเปลี่ยนไอออนไปได้จนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่ง เรซินจะลดอัตราแลกเปลี่ยนไอออน และในที่สุดจะหมดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจึงต้องล้างคืนประจุให้เรซินได้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ใหม่ โดยใช้สารละลายเข้มข้นของกรดแก่ (เช่น  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ) และด่างแก่ (เช่น  $NaOH$ ) สำหรับคืนสภาพให้กับ เรซินประจุบวก และประจุลบ ตามลำดับ (ยกเว้นเรซินประจุบวกแบบสารโซเดียมจะใช้  $NaCl$  ในการคืนสภาพ) การคืนสภาพให้เรซิน จะใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนเช่นเดียวกัน ทำให้ไอออนที่เรซินจับเอาไว้ถูกปล่อยออกมา แล้วทำปฏิกิริยากับไอออนประจุตรงข้ามในสารละลายคืนสภาพเรซิน ซึ่งจะมีไอออนความเข้มข้นสูงมากละลายออกมา ดังนั้นจำเป็นต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีการอื่น หรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ตามวัตถุประสงค์ (ไพศาล วิรกิจ, 2549; มั่นสิน ตันฑุลเวศม์, 2542; Eckenfelder, 2000; Wachinski และ Etzel, 1997) เรซินจะมีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออนต่าง ๆ จากน้ำ โดยปกติเรซินสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายกับไอออนที่มีวาเลนซ์ และมีน้ำหนักอะตอมสูง ดังนั้นไอออนที่เรซินชอบ จะแลกเปลี่ยนได้ก่อน และเร็ว ส่วนการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะใช้ไอออนที่เรซินชอบน้อยที่สุด แต่จะต้องใช้ความเข้มข้นที่สูงจึงจะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่เรซินชอบได้ เช่น  $Na^+$ ,  $H^+$ ,  $OH^-$  (มั่นสิน ตันฑุลเวศม์, 2542; Eckenfelder, 2000; Wachinski และ Etzel, 1997) ระบบกรองเรซินนี้สามารถนำไปใช้ได้กับระบบน้ำล้างที่ได้รับการปนเปื้อนไม่มาก น้ำที่ผ่านเรซินจะมีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำกลับไปใช้เป็นน้ำล้าง โดยทั่วไประบบนี้ใช้ในการนำโลหะโครเมียมกลับคืนจากน้ำล้างหลังบ่อชุบโครเมียม ทั้งนี้เพราะเรซินประจุลบชอบโครเมียมเป็นลำดับต้น ๆ ระบบแลกเปลี่ยนไอออนทำให้เกิดปริมาณสารที่ใช้ฟื้นฟูสภาพและใช้น้ำล้างมาก ซึ่งอาจจะเพิ่มภาระให้ระบบบำบัด (PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

ระบบอาร์โอ เป็นกระบวนการแยกสารละลาย โดยใช้เยื่อแผ่นเมมเบรนชนิดไม่มีรูพรุนอาศัยความแตกต่างของความดันระหว่างเยื่อแผ่นเมมเบรนเป็นแรงขับเคลื่อน เยื่อแผ่นเมมเบรนที่ใช้จะเป็นแบบกึ่งซึมได้ โดยจะยอมให้น้ำผ่านเท่านั้น จึงแยกน้ำออกจากตัวถูกละลาย ทำให้ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น และไม่ผ่านเยื่อแผ่นเมมเบรน ส่วนน้ำที่ผ่านเยื่อแผ่นเมมเบรนจะมีความ

บริสุทธิ์สูง ระบบอาร์โอสามารถกำจัดสารละลาย และสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้เนื่องจากยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน ส่วนไอออนต่าง ๆ ของเกลือถูกผลักดันออกไป ส่วน โมเลกุลของสารอินทรีย์นั้นไม่ถูกผลัก แต่ถูกกำจัดโดยการกรองติดค้างอยู่บนผิวของเยื่อแผ่นเมมเบรน การผลักไอออนต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับจำนวนวาเลนซ์ของไอออน โดยวาเลนซ์สูงจะถูกผลักได้ไกลกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับหนึ่ง เช่น  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  จะถูกผลักให้ห่างจากผิวของแผ่นเมมเบรนประมาณหนึ่งไมครอน หรือห่างเท่ากับน้ำสองโมเลกุลต่อกัน ซึ่งถูกผลักดันน้อยที่สุด จึงอยู่ใกล้ผิวของเยื่อแผ่นเมมเบรนมากที่สุด และรั่วไหลผ่านเยื่อแผ่นเมมเบรนได้ (มันสิน ตันฑกุลเวศม์, 2542) ระบบอาร์โอนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกน้ำออกจากน้ำล้าง แล้วนำกลับไปใช้เป็นน้ำล้างใหม่ ส่วนน้ำหรือสารละลายเคมีที่ไม่ผ่านเยื่อแผ่นเมมเบรนอาจจะนำกลับไปใช้หรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับสิ่งปนเปื้อนในน้ำล้าง (PRC Environmental Management, 1989; Theodore และ McGuinn, 1992)

## 2.7 ระบบกรองเมมเบรน

การกรองด้วยเมมเบรนใช้แรงขับดันทำให้เกิดการแยก โดยสามารถแยกสาร หรือเพิ่มความเข้มข้น หรือ ทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น สามารถแยกสารแขวนลอยจนกระทั่งสารละลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเมมเบรน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) เมมเบรนแบบรูพรุน ซึ่งใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และไมโครฟิลเตรชันเป็นหลัก 2) เมมเบรนแบบแน่นที่ใช้ในกระบวนการอาร์โอ และนาโนฟิลเตรชัน เมมเบรนแบบมีรูพรุน จะใช้แรงขับดันต่ำ และนำไปใช้แยกสารแขวนลอย หรืออนุภาคขนาดเล็ก ส่วนเมมเบรนแบบแน่นไม่มีรูพรุน จะใช้แรงดันสูงกว่า และนำไปใช้แยกสารละลาย

ไมโครฟิลเตรชัน (MF) เป็นการกรองเพื่อกักกันสารแขวนลอย อนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชัน สามารถกรองสารขนาดเล็กได้ถึง 0.06 ไมโครเมตร สามารถกรองแบคทีเรียได้เกือบหมด และสามารถกรองไวรัสบางส่วนได้ ใ้กรอง MF จะมี 2 แบบ คือ ใ้กรองแบบทรงกลมรูปกระบอก ผลิตจากพลาสติก โลหะ หรือวัสดุธรรมชาติ เช่น ผ้าใย ใ้กรองแบบนี้ใช้แล้วทิ้ง และราคาถูก ส่วนใ้กรองอีกแบบหนึ่งจะเป็นแบบเมมเบรน เมื่ออุดตันสามารถล้างกลับได้ แต่มีราคาแพงกว่า (ไพศาล วิริกิจ, 2549) MF แบบเมมเบรนมีรูพรุน 0.10 - 10.00 ไมโครเมตร มีความสามารถกรองสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300,000 ขึ้นไป (MWCO 300,000 ขึ้นไป) ใช้แรงขับดัน 15 - 74 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

อัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นการกรองเพื่อกักกันคอลลอยด์ สามารถกรองสารต่าง ๆ ได้เล็กถึง 0.002 ไมโครเมตร สามารถกรองแบคทีเรีย ไวรัส และสารอินทรีย์ได้ทั้งหมด วัสดุที่ใช้ทำใ้กรองจะมีอยู่ 2 แบบ คือ ใ้กรองเซรามิก ซึ่งจะมีรูปแบบกลมยาว และใ้กรองแบบเมมเบรน ซึ่งจะ

ทำในรูปของเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน UF จะสามารถล้างกลับได้เมื่ออุดตัน ยกเว้นแบบท่อม้วนจะล้างกลับไม่ได้ (ไพศาล วิริกิจ, 2549) UF แบบเมมเบรนมีรูพรุน 0.002 - 0.020 ไมโครเมตร มีความสามารถกรองสารที่มีน้ำหนักโมเลกุล 500 - 300,000 (MWCO 500 - 300,000) ใช้แรงขับเคลื่อนประมาณ 29 - 147 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

นาโนฟิลเตรชัน (NF) ใช้หลักการละลาย และการแพร่เพื่อกักกันสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยจะสามารถกักกันสารที่มีวาลเลนซ์สองขึ้นไปได้ดี เช่น  $Ca^{+2}$  ซึ่งเป็นสาเหตุของความกระด้าง จึงเรียกเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันอีกชื่อหนึ่งว่า เมมเบรนทำน้ำอ่อน นอกจากนี้มีความสามารถกรองสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ใหญ่กว่า 200 (MWCO 200) ได้ และสามารถกักกันสารที่มีวาลเลนซ์หนึ่งได้ แต่จะสามารถกักกันได้น้อยกว่าเมมเบรนอาร์โอ รูปแบบของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน จะทำอยู่ในรูปแบบของท่อยาว แบบเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน การล้างทำความสะอาดต้องใช้สารเคมี น้ำที่จะเข้ามากรองผ่านเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน จะต้องผ่านการกรองสารแขวนลอยก่อน เพื่อลดการอุดตันในเมมเบรน (ไพศาล วิริกิจ, 2549) เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันส่วนใหญ่เป็นเยื่อแผ่นเชิงประกอบ คือ ประกอบด้วยชั้นผิวที่มีโครงสร้างแน่นอยู่บนชั้นรองรับที่เป็นรูพรุน ใช้แรงขับเคลื่อน 142 - 285 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

ออสโมซิสผันกลับ (RO) ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารโมเลกุลเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 โดยใช้หลักการละลาย และการแพร่ สามารถกักกันสารละลายได้ทั้งสารวาลเลนซ์หนึ่ง และวาลเลนซ์สองได้มากกว่าร้อยละ 98 รูปแบบของ RO จะทำอยู่ในรูปแบบของท่อยาว แบบแผ่น แบบเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน การล้างทำความสะอาดต้องใช้สารเคมี น้ำที่จะเข้ามากรองผ่าน RO จะต้องผ่านการกรองสารแขวนลอยก่อน เพื่อลดการอุดตันในเมมเบรนอาร์โอ เมมเบรนอาร์โอเป็นเยื่อแผ่นเชิงประกอบ โครงสร้างแน่นไม่มีรูพรุน ใช้แรงขับเคลื่อน สำหรับน้ำกร่อย 285 - 569 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับน้ำทะเล 569 - 1,138 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

เมมเบรน NF และ RO มีโครงสร้างแบบแน่นไม่มีรูพรุน จึงมีโอกาสที่จะเกิดการอุดตันได้ง่าย ดังนั้นน้ำที่จะส่งเข้ากรองจะต้องมีคุณภาพดี ไม่มีสิ่งแขวนลอยที่จะเข้าไปอุดตันเมมเบรน ต้องไม่มีแบคทีเรียเข้าไปติดค้างเจริญเติบโต และทำลายเมมเบรน ต้องไม่มีสารเกลือแร่ที่จะเกิดการตกตะกอนเคลือบผิวหน้าเมมเบรน ต้องไม่มีคลอรีนหลงเหลือ ต้องไม่มีสารประเภทไขมันเข้าไปทำลายและอุดตันเมมเบรน (ไพศาล วิริกิจ, 2549; มั่นสิน ตันฑกุลเวศม์, 2542; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543; Amjad, 1993; Filmtec, 2005) การป้องกันสิ่งต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาสามารถดำเนินการป้องกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

### 2.7.1 โมดูลเมมเบรน

โมดูลเป็นอุปกรณ์สำหรับบรรจุหรือประกอบเมมเบรนไว้ก่อนนำไปใช้งาน โมดูลแบ่งตามรูปร่างได้ 4 แบบ คือ แบบแผ่นหรือกรอบ แบบท่อ แบบเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน



โมดูลแบบแผ่นหรือกรอบ (plate and frame module) เมมเบรนสองแผ่นประกบกัน เป็นคู่ สารละลายป้อนไหลผ่านระหว่างคู่ของแผ่นเมมเบรน ในแต่ละโมดูลจะมีแผ่นเมมเบรนหลาย คู่วางซ้อนกันหรือเรียงกันเป็นชั้น ๆ มีอุปกรณ์กำหนดทิศทางการไหลของเพอมีเอท และรีเทนเทท (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

ตารางที่ 2.6 การป้องกันเมมเบรน NF และ RO อุดตัน

ประเภทของฟาวลิง	การบำบัดเบื้องต้น
ตะกอน (scaling)	- เติมน้ำที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับต่ำ ๆ - ปรับค่าพีเอชของน้ำป้อนให้อยู่ในสภาพกรด - เติมน้ำด้านตะกอน
อนุภาคและคอลลอยด์ (particulate and colloidal)	- ใช้ระบบการกรอง เช่น ถังกรองทราย กรองคาร์บอน ไมโครฟิลเตรชัน (MF) อัลตราฟิลเตรชัน (UF) - เติมน้ำที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับต่ำ ๆ - เติมน้ำที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับต่ำ ๆ
สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (microorganisms)	- เติมน้ำฆ่าเชื้อโรค เช่น คลอรีน แล้วกำจัดคลอรีนตกค้างด้วย เติมสารโซเดียมไบซัลไฟด์ หรือแยกด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)
สารอินทรีย์ (organics)	- ใช้วิธีการก่อกองไฮดรอกไซด์แล้วกรองออก นอกจากนี้ สามารถใช้ MF และ UF ตลอดจนแยกด้วยถ่านกัมมันต์ได้

โมดูลแบบท่อ (tubular module) เมมเบรนเป็นแบบท่อโดยตัวบรรจุ (housing) จะประกอบด้วยท่อเมมเบรนหลาย ๆ ท่อ (ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเมมเบรนที่ต้องการ) สารป้อนไหลเข้าทางด้านในท่อเมมเบรน (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

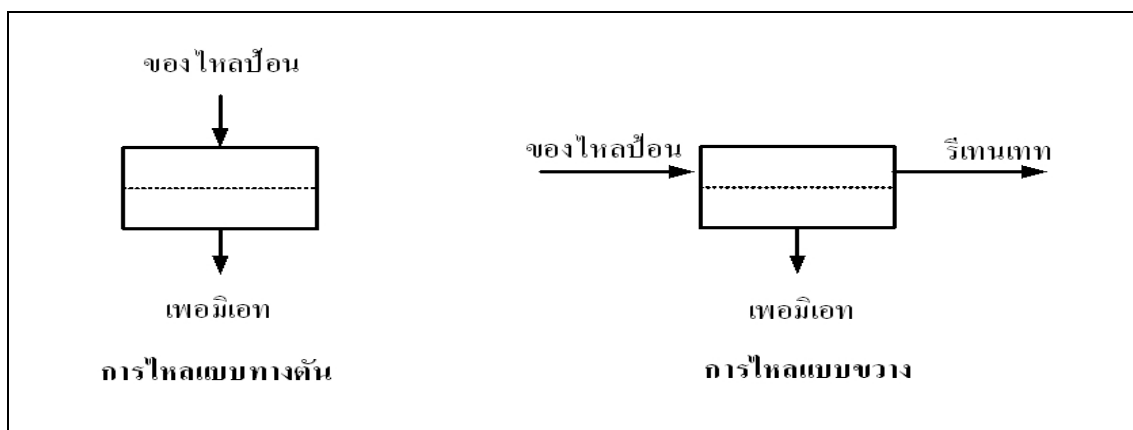
โมดูลแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module) เมมเบรนมีรูกลวงไม่มีชั้นรองรับ ปลายของเส้นใยสองด้านฝังอยู่ในชั้นฐานซึ่งอาจเป็นเรซิน โพลียูรีเทนหรือซิลิโคนรับเบอร์ แล้วบรรจุเส้นใยในตัวบรรจุ สารป้อนไหลเข้าด้านในหรือด้านนอกก็ได้ ขึ้นอยู่กับชั้นผิวเมมเบรนว่าอยู่ด้านไหน (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

โมดูลแบบท่อม้วน (spiral - wound module) เป็นการนำแผ่นเมมเบรนมาม้วนรอบแกนโดยต้องมีแผ่นกั้นแยกช่องของรีเทนเทท และเพอมีเอท โดยช่องที่เป็นของเพอมีเอทจะรับน้ำเพอมีเอทให้ไหลไปรวมกันที่ท่อรวบรวมซึ่งอยู่แกนกลาง ในแต่ละม้วนของแผ่นเมมเบรนจะ

สามารถเดินระบบที่ 8 - 10 เปอร์เซ็นต์แยกกลับ ดังนั้นเพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่มากขึ้น จะต้องเพิ่มจำนวนม้วนของแผ่นเมมเบรนขึ้น โดยต่อเรียงอนุกรมกันในโมดูล (Amjad, 1993)

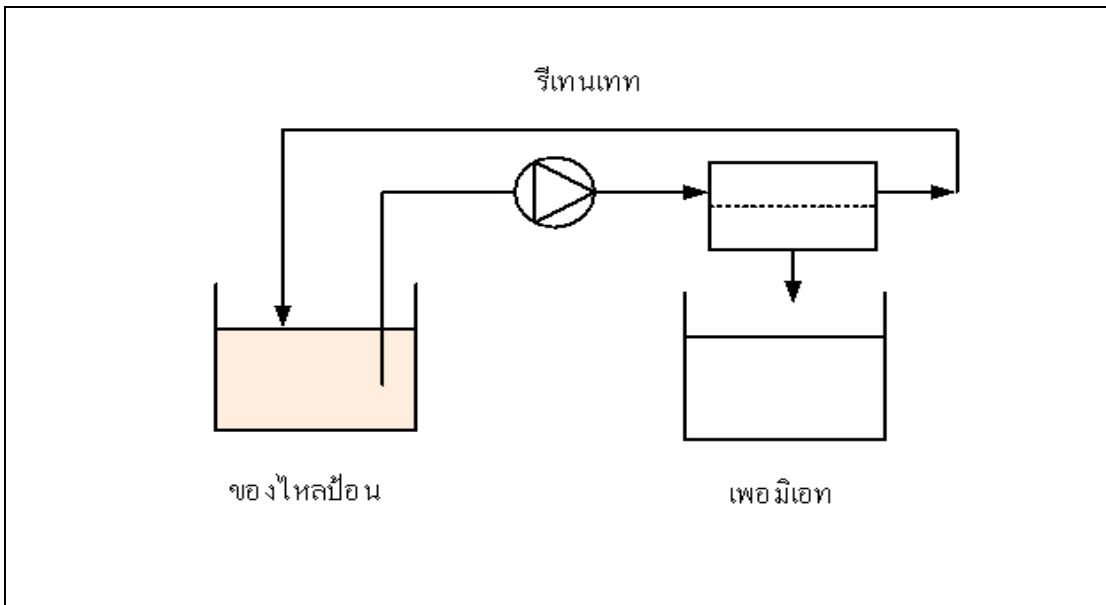
## 2.7.2 ระบบการกรองของเมมเบรน

โมดูลเมมเบรนอาจมีการออกแบบให้มีลักษณะการไหลผ่านผิวเมมเบรน 2 แบบ คือ การไหลในทิศทางตั้งฉากกับผิวเมมเบรน เรียกว่าการไหลแบบทางตัน (dead end) และการไหลในทิศทางขนานกับผิวเมมเบรน เรียกว่าไหลขวาง (cross flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การไหลแบบทางตันจะทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนได้ง่าย และเร็วเนื่องจากเกิดการสะสมบนผิวเมมเบรนอย่างต่อเนื่อง ส่วนการไหลแบบขวางจะดีกว่าเนื่องจากแรงเฉือนระหว่างของไหลกับผิวเมมเบรนช่วยลดการสะสมบนผิวเมมเบรน จึงเป็นที่นิยมมากกว่า

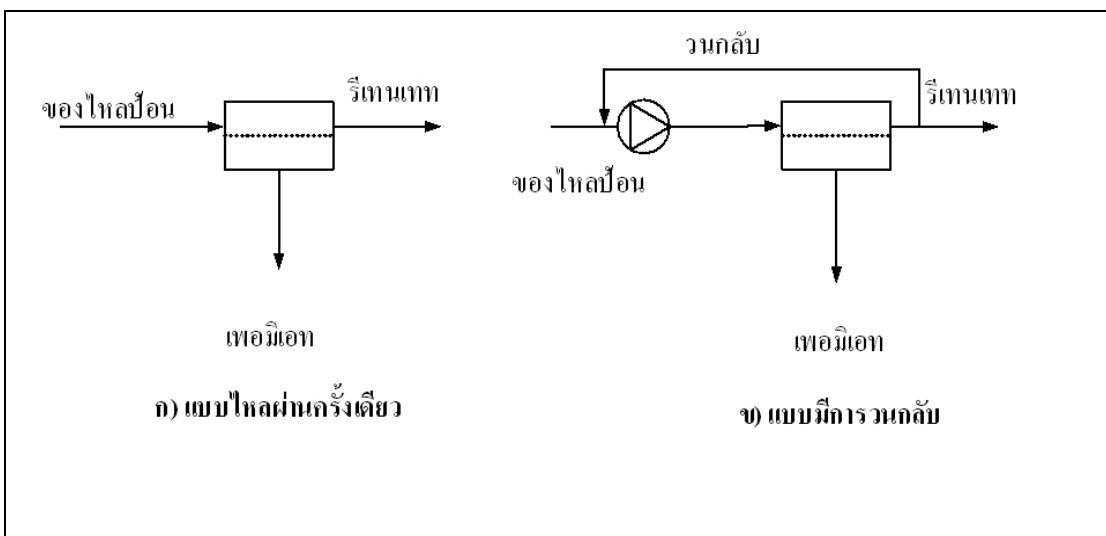


รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลของน้ำในระบบกรองเมมเบรน

ระบบการกรองของเมมเบรนแบ่งเป็น 2 ระบบหลัก ๆ คือ ระบบแบบกะ (batch) และระบบกรองแบบต่อเนื่อง (continuous) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ ระบบแบบกะใช้แยกสารละลายปริมาณไม่มาก ระบบนี้มีส่วนที่เป็นรีเทนเททกลับเข้าถังป้อน และแยกส่วนของเพอมีเอทออก ทำให้ปริมาตรของสารละลายลดลง จึงทำให้ความเข้มข้นของน้ำป้อนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ระบบนี้จึงมักนิยมใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ส่วนระบบต่อเนื่องนั้นสามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง และได้อัตราการผลิตสูงเพราะสามารถนำโมดูลมาต่อหรือจัดเรียงเพื่อขยายขนาดได้ ระบบต่อเนื่องยังแบ่งเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว (น้ำรีเทนเททไม่มีการวนกลับ) และการไหลแบบมีการวนกลับ (น้ำรีเทนเททวนกลับ) ซึ่งจะช่วยให้ น้ำรีเทนเททมีความเข้มข้นสูงขึ้น และเพิ่มเปอร์เซ็นต์แยกกลับได้โดยไม่ทำให้อัตราหน้าไหลขวางลดลง



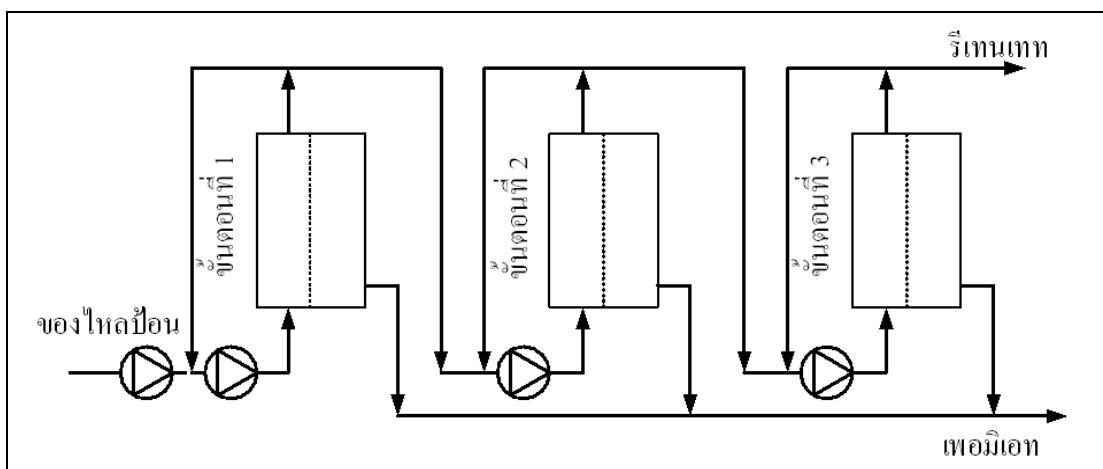
รูปที่ 2.7 ระบบกรองของเมมเบรนแบบกะ



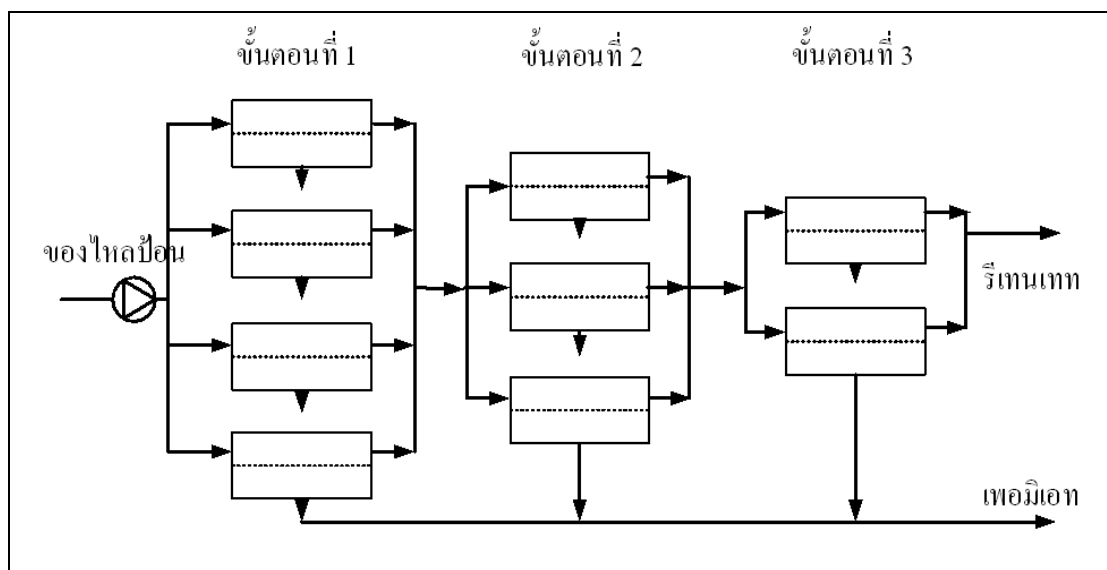
รูปที่ 2.8 ระบบกรองของเมมเบรนแบบต่อเนื่องขั้นตอนเดียว

ในระบบต่อเนื่องนิยมทำเป็นหลายขั้นตอน โดยการนำโมดูลมาต่อเรียงกันแบบอนุกรม ซึ่งมีทั้งแบบวนกลับ และแบบไหลผ่านครั้งเดียว โดยจะนำส่วนที่เป็นรีเทนเททจากขั้นตอนที่หนึ่งเป็นน้ำป้อนในขั้นตอนที่สอง และรีเทนเททจากขั้นตอนที่สองเป็นน้ำป้อนในขั้นตอนที่สามต่อไป ในแต่ละขั้นตอนจะมีการต่อโมดูลแบบขนาน ส่วนที่เป็นเพอมีเอทของแต่ละโมดูลอาจจะ

แยกกันหรือรวมกันก็ได้ ถ้าแต่ละชั้นตอนมีการวนกลับค่าฟลักซ์จะสูงสุดในชั้นตอนแรก และต่ำสุดในชั้นตอนสุดท้าย ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นในแต่ละชั้นตอนสูงขึ้นตามลำดับของชั้นตอนด้วย ถ้าแต่ละชั้นตอนไม่มีการวนกลับ จะทำให้อัตราการไหลลดลงตามจำนวนชั้นตอนที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถลดพื้นที่ผิวเมมเบรนลงได้ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543; Filmtec, 2005) การจัดเรียงโมดูลเมมเบรนแบบอนุกรมมีการวนกลับ และแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงโมดูลเมมเบรนแบบอนุกรมมีการวนกลับ



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงโมดูลเมมเบรนแบบอนุกรมไหลผ่านครั้งเดียว

พารามิเตอร์แสดงสมรรถนะของระบบเมมเบรนนั้น ได้แก่ เปอร์เซ็นต์กักกันเพอมีอเทฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์แยกกลับ

1) เปอร์เซ็นต์กักกัน หมายถึง จำนวนเปอร์เซ็นต์ที่เมมเบรนสามารถกักตัวถูกละลายเอาไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรน คำนวณตามสมการ 2.3

$$R = 1 - (C_p / C_f) \quad (2.3)$$

โดยที่ R	คือ	อัตราการกักกันตัวถูกละลายออกจากน้ำ
$C_p$	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในน้ำเพอมีอเท
$C_f$	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในน้ำป้อนเมมเบรน

2) เพอมีอเทฟลักซ์ หมายถึง อัตราการไหลของน้ำเพอมีอเทผ่านพื้นที่ผิวเมมเบรน มีหน่วยเป็นปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อเวลา มีความสัมพันธ์กับแรงขับเคลื่อน และสภาพการซึมผ่านเมมเบรนของตัวทำละลาย คำนวณตามสมการ 2.4 และ 2.5

$$J = (\Delta P - \Delta \pi) / (\mu R) \quad (2.4)$$

$$J = L_p \cdot \Delta P \quad (2.5)$$

โดยที่ J	คือ	ฟลักซ์ของสารละลายผ่านเมมเบรน (ลบ.ม./ตร.ม.วินาที)
$\Delta P$	คือ	ผลต่างความดันที่ให้กับสารละลาย (ปาสคาล)
$L_p$	คือ	สภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำ (ลบ.ม./ตร.ม.วินาที.ปาสคาล)
$\Delta \pi$	คือ	ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (ปาสคาล) ใช้กรณี NF และ RO
$\mu$	คือ	ความหนืดของสารละลาย (ปาสคาล.วินาที)
R	คือ	ความต้านทานต่อการไหลผ่าน (ต่อเมตร)

สำหรับน้ำบริสุทธิ์ และสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่ค่า  $\Delta \pi$  มีค่าเป็น 0 และน้อยกว่า  $\Delta P$  มาก ๆ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถตัด  $\Delta \pi$  ทิ้งได้ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ดังสมการ 2.6 และ 2.7

$$J = (\Delta P) / (\mu R) \quad (2.6)$$

$$\Delta P = J \cdot \mu \cdot R \quad (2.7)$$

3) เปอร์เซ็นต์แยกกลับ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำสะอาดที่ผลิตได้ต่อปริมาตรของน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำสะอาด คำนวณตามสมการ 2.8

$$\% R = 100 * (Q_p / Q_f) \quad (2.8)$$

โดยที่ %R คือ เปอร์เซ็นต์แยกกลับ  
 $Q_p$  คือ อัตราไหลของน้ำเพอมีเอท  
 $Q_f$  คือ อัตราไหลของน้ำดิบที่เข้าระบบ

### 2.7.3 การทำความสะอาดเมมเบรน

การนำเมมเบรนไปใช้งานในการแยกสารละลายที่เป็นของเหลวจะเกิดการอุดตัน จึงมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสมเป็นระยะๆ เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงเมมเบรนใหม่มากที่สุด และเพื่อยืดอายุการใช้งาน วิธีทำความสะอาดแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีกายภาพและวิธีเคมี (รัตน จิระรัตนานนท์, 2543; Amjad, 1993; filmtec, 2005)

วิธีกายภาพ : เป็นวิธีการทำความสะอาดที่ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานเป็นหลัก วิธีกายภาพที่แพร่หลาย และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ การล้างกลับทางหรือการล้างย้อน ซึ่งทำได้โดยการป้อนสารละลายหรือฟองอากาศ ภายใต้อัตราดันเข้าทางด้านเพอมีเอท ซึ่งจะทำให้สารละลายดันสารอุดตันหลุดออกจากเมมเบรน การล้างกลับทางอาจทำระหว่างการกรองหรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรอง วิธีการล้างกลับใช้ได้ผลดีกรณีที่มีการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าการอุดตันในรูพรุน (รัตน จิระรัตนานนท์, 2543; Amjad, 1993; filmtec, 2005)

วิธีเคมี : การทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีนั้น สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออกหรือสารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ กรด ด่าง เอ็นไซม์ สารลดแรงตึงผิว สารฆ่าเชื้อ และสารทำความสะอาดกำหนดสูตร การเลือกสารทำความสะอาดจะต้องทราบข้อมูลของเมมเบรน ว่ามีความคงทนต่อสารเคมีที่จะเลือกใช้เพียงใด และข้อมูลของสารอุดตันด้วย แต่การล้างเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานหนึ่ง ๆ เป็นการลองผิดลองถูกในระดับหนึ่ง

(รัตน จิระรัตนานนท์, 2543; Amjad, 1993; filmtec, 2005) ตัวอย่างสารละลายเคมีที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรน ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างสารละลายเคมีที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรน<sup>1</sup>

สารทำความสะอาด	สารออกตัน		
	ตะกรัน เกลือ ออกไซด์ ของโลหะ	คอลลอยด์/ อนุภาค	จุลินทรีย์
กรดเกลือเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	/		
กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผสมกับ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (พีเอช 4)	/		
กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	/		
โซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอช 11 - 12		/	/
ไตรโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผสมกับเกลือ โซเดียมของอิดีทีเอเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอช 11 - 12		/	/
โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	/		
กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักผสม แอมโมเนียมไบฟลูออไรด์เข้มข้นร้อยละ 2.5 โดย น้ำหนัก	/	/	

<sup>1</sup>สรุปข้อมูลจากรัตนา จิระรัตนานนท์, 2543; Amjad, 1993

## 2.8 การประยุกต์ใช้เมมเบรน

### 2.8.1 การประยุกต์ใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

เมมเบรน UF ทำหน้าที่กักกัน คอลลอยด์ โปรตีน แบคทีเรีย และสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่ ตัวอย่างการนำ UF มาใช้ เช่น ใช้สำหรับกักกันอิมัลชัน ใช้บำบัดน้ำล้าง ใช้เป็นจุดบำบัดเบื้องต้นของระบบอาร์โอ

Glucina และคณะ (2000) ใช้เมมเบรน UF ที่มี MWCO 10,000 ที่ผลิตจากเซลลูโลส (cellulose) พื้นที่การกรอง 64 ตารางเมตร กรองน้ำผิวดินจากแม่น้ำ ใช้สภาพการซึมผ่านเมมเบรน

ของน้ำเริ่มต้น 15.5 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) น้ำป้อนมีความขุ่นเฉลี่ย 10 NTU น้ำเพอมีเอทมีความขุ่นเฉลี่ย 0.10 NTU รักษาสภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำ ( $L_p$ ) ด้วยการล้างย้อนทุก ๆ 30 - 40 นาที

Kim และคณะ (2002) ใช้เมมเบรน UF กรองน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ น้ำป้อนมีความขุ่นประมาณ 9 - 11 NTU น้ำเพอมีเอทมีความขุ่นประมาณ 0.6 - 1.2 NTU รักษาสภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำ ด้วยการล้างย้อนทุก ๆ 4 ชั่วโมง เป็นเวลานาน 5 นาที (ล้างผิวหน้าเมมเบรน 5 นาที ก่อนการล้างย้อน)

การทดลองของ Qin และคณะ (2003) พบว่าขนาดช่องเปิดของเมมเบรน UF ที่ผลิตจาก polyacrylonitrile พื้นที่การกรอง 64 ตารางเมตร มีผลต่อสภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำ คือขนาดช่องเปิด (MWCO) 13,000, 50,000 และ 100,000 จะได้สภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำสะอาด 10.3, 37.9 และ 16.6 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ตามลำดับ นำเมมเบรนไปกรองน้ำล้างรวมจากกระบวนการชุบนิเกิลด้วยกระแสไฟฟ้าได้สภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำ 6.1, 14.6 และ 9.3 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ตามลำดับ ดังนั้นเมมเบรน UF ที่มี MWCO 50,000 จะมีความเหมาะสมกว่า แต่เมมเบรน UF ที่มี MWCO 100,000 ก็สามารถใช้ได้

## 2.8.2 การประยุกต์ใช้ระบบอาร์โอ

ระบบอาร์โอทำหน้าที่ในการกักกันสารละลาย แต่ยอมให้น้ำผ่านได้ จึงมีการนำระบบอาร์โอ มาประยุกต์ใช้กับการผลิตน้ำสะอาด

ภาณุมาศ เหลืองปัญญากุล (2545) นำน้ำเสียที่เป็นคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตกรดอะมิโน มากรองผ่านระบบอาร์โอ เพื่อนำน้ำเพอมีเอทกลับไปใช้ใหม่เป็นน้ำล้างหอระเหินที่มีในกระบวนการผลิต ซึ่งน้ำเสียมีลักษณะ คือ มีความเข้มข้นของของแข็งละลาย ซีโอดี บีโอดี และไนโตรเจนทั้งหมด อยู่ในปริมาณที่สูง แต่สารแขวนลอยต่ำ ใช้ระบบอาร์โอที่ผลิตจากโพลีเอไมด์ (polyamide) พื้นที่การกรอง 28 ตารางเมตร ความคุมระบบที่ 50 เปอร์เซนต์แยกกลับ เพอมีเอทฟลักซ์ 17 ล./ตร.ม.ชม. สภาพการซึมผ่านเมมเบรนอาร์โอของน้ำเริ่มต้นที่ 0.12 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ทดลองเดินระบบ 98 วัน พบว่าควรทำการล้างระบบอาร์โอทุก ๆ 20 วัน (เพอมีเอท - ฟลักซ์ลดลงประมาณร้อยละ 25) ระบบมีประสิทธิภาพการกักกัน แอมโมเนียไนโตรเจน ทีเคเอ็น บีโอดี และ ซีโอดี ร้อยละ 90.7, 88.4, 82.0 และ 81.1 ตามลำดับ

Glucina และคณะ (2000) ใช้น้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรน UF (MWCO 100,000) กรองผ่านระบบอาร์โอที่จัดเรียงระบบเป็น 3:2:1 (ระบบอาร์โอจัดเรียงอนุกรมจำนวนสามขั้นตอน ต่อเมมเบรนขนานกันในขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 จำนวน 3, 2 และ 1 โมดูล) เดินระบบกรองแบบไม่มีการวนกลับ และได้เปอร์เซนต์แยกกลับร้อยละ 85 ใช้ระบบอาร์โอที่ผลิตจากโพลีเอไมด์ พื้นที่การกรอง 237 ตารางเมตร โดยเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเฉลี่ย 30 ล./ตร.ม.ชม.



สภาพการซึมผ่านระบบบอาร์โอของน้ำเริ่มต้นที่ 0.25 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ระบบมีประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าร้อยละ 98 จากการทดลองเดินระบบ 60 วัน พบการลดลงของสภาพการซึมผ่านเมมเบรนบอาร์โอของน้ำในแต่ละขั้นตอน เป็นไปในทางเดียวกัน ถ้าสมมุติว่าจะทำการล้างระบบบอาร์โอเมื่อสภาพการซึมผ่านเมมเบรนบอาร์โอของน้ำลดลงร้อยละ 10 - 20 ประมาณระยะเวลาสะสมของการเดินระบบของขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 82 - 164, 91 - 182 และ 88 - 175 วัน ตามลำดับ หรือ 2.8 - 5.5, 3.0 - 6.0, 2.9 - 5.8 เดือน ตามลำดับ จึงจะล้างระบบบอาร์โอ ดังนั้นควรล้างระบบบอาร์โอทุก ๆ 3 - 6 เดือน

Benito และ Ruiz (2002) ได้ทำการศึกษาระดับต้นแบบ ถึงการนำระบบบอาร์โอมาใช้ ในการปรับปรุงน้ำล้างจากอุตสาหกรรมชุบด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำล้างที่ใช้ทดลองประกอบด้วย กรดเข้มข้น กรดเจือจาง ต่างเข้มข้น ต่างเจือจาง นำมาผสมรวมกัน ใช้ระบบบอาร์โอที่ผลิตจากโพลีเอไมด์ พื้นที่การกรอง 24 ตารางเมตร โมดูลแบบท่อม้วน จัดเรียงระบบแบบสองขั้นตอน 2 : 2 มีการวนกลับ ควบคุมระบบที่เพอมีเอทฟลักซ์ 41.7 ล./ตร.ม.ชม. สภาพการซึมผ่านเมมเบรนบอาร์โอของน้ำ เริ่มต้นที่ 0.12 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ผลการทดลอง พบว่าระบบบอาร์โอมีประสิทธิภาพการกักกันค่าของแข็งละลายค่อนข้างสูงคงที่ถึงร้อยละ 97 - 99 โดยประสิทธิภาพไม่แปรเปลี่ยนตามเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เพิ่มขึ้น

Qin และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาระดับต้นแบบในการปรับปรุงน้ำล้างรวมจากกระบวนการชุบนิเกิล แล้วนำน้ำกลับไปใช้ใหม่เป็นน้ำล้างแทนน้ำประปา ใช้ UF แบบเส้นใย กลวงมี MWCO 50,000 เป็นระบบกรองเบื้องต้น เดินระบบที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 90 ใช้แรงขับดัน 7 - 11 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใช้ระบบอัตโนมัติในการควบคุมการกรองสลับกับการล้างย้อน เพื่อลดการอุดตัน ใช้ระบบบอาร์โอที่ผลิตจากโพลีเอไมด์ พื้นที่การกรอง 47.4 ตารางเมตร โมดูลแบบท่อม้วน จัดเรียงระบบแบบสองขั้นตอน 2 : 1 มีการวนกลับ ควบคุมระบบที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับ ร้อยละ 70 เพอมีเอทฟลักซ์ 29.5 ล./ตร.ม.ชม. สภาพการซึมผ่านระบบบอาร์โอของน้ำเริ่มต้นที่ 0.29 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) พบว่าระบบบอาร์โอมีประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าประมาณร้อยละ 98 และคงที่ การเดินระบบในระยะยาว พบว่าคุณภาพของน้ำเพอมีเอทมีเสถียรภาพ แต่ควรทำความสะอาดระบบบอาร์โอทุก ๆ 168 - 504 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำป้อน

Lee และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบอาร์โอ ในการกักกัน สารละลายของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหล็กที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี - กายภาพ มาแล้ว น้ำดังกล่าวมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูง (2,700 - 3,000 ไมโครซีเมนต์ต่อชม.) แต่มีค่า สารอินทรีย์ต่ำ เมมเบรนบอาร์โอผลิตจากโพลีเอไมด์ พื้นที่การกรอง 2.5 ตารางเมตร โมดูลแบบท่อ ม้วน จัดระบบกรองแบบมีการวนกลับ ควบคุมระบบที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 70 เพอมีเอท-

พลักซ์ 24 ล./ตร.ม.ชม. สภาพการซึมผ่านระบบอาร์โอของน้ำเริ่มต้นที่ 0.11 ล./ตร.ม.ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) พบว่าระบบอาร์โอมีประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 99

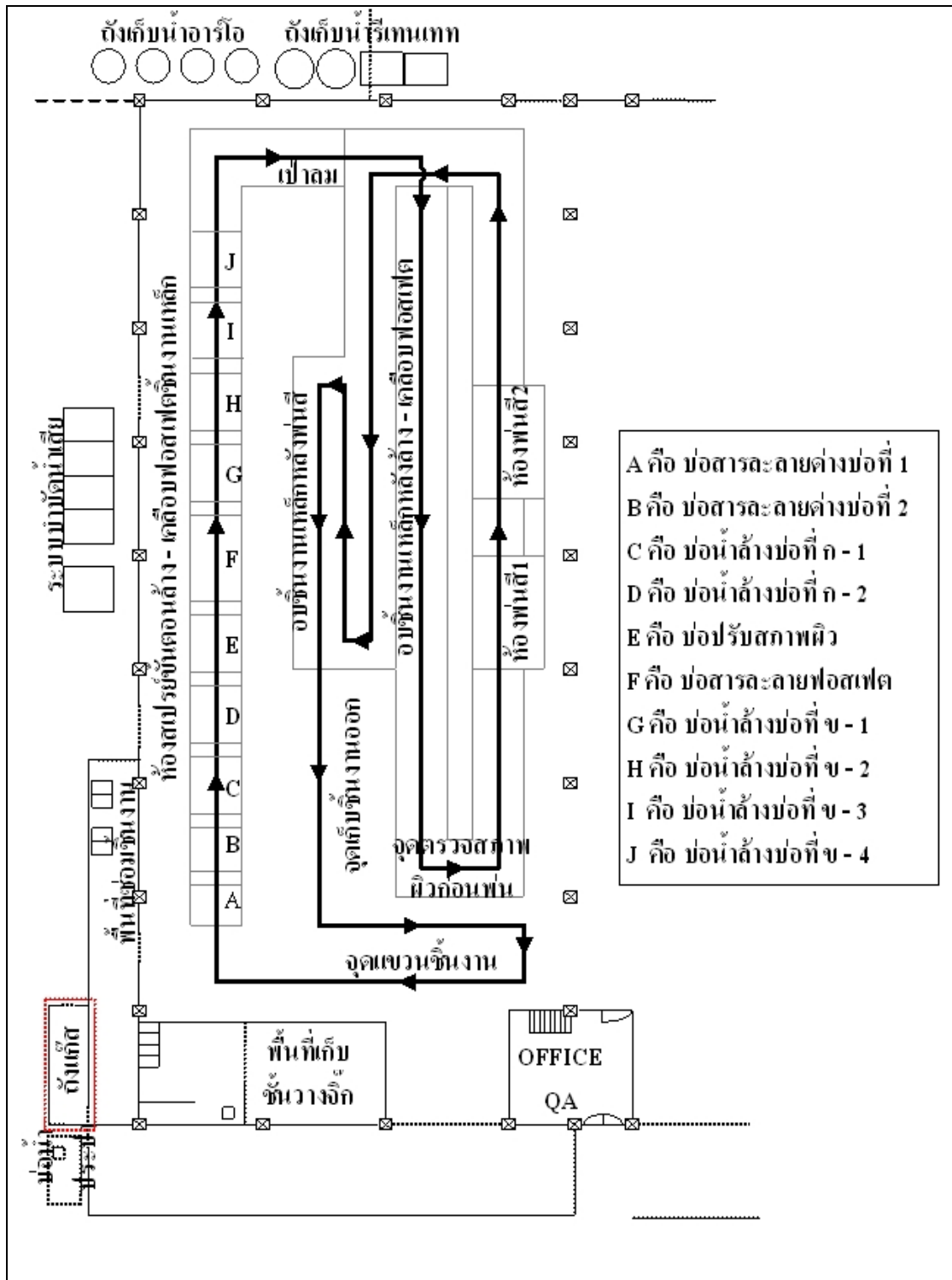
Ipek (2005) ได้ทำการศึกษาในระดับต้นแบบใช้ระบบอาร์โอ บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิล และสังกะสีเป็นองค์ประกอบ ใช้ระบบอาร์โอที่ผลิตจากโพลีเอไมด์ พื้นที่การกรอง 3.72 ตารางเมตร โมดูลแบบท่อหมุน ทดลองเพิ่มความเข้มข้นของ NaCl พบว่าจะทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำด้านเพอมีเอทเพิ่มขึ้นด้วย แต่ประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าคงที่

## บทที่ 3

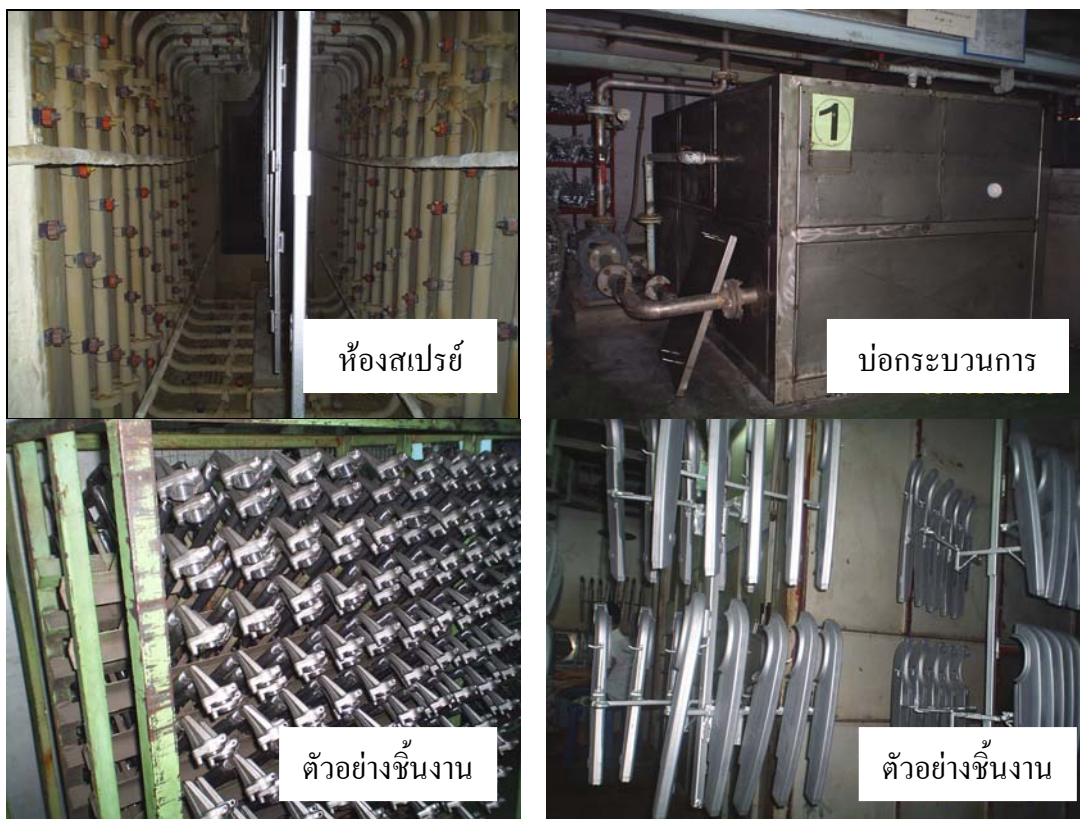
### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สภาพของโรงงานที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา

โรงงานที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษาเป็นโรงงานแห่งหนึ่งในอำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร ซึ่งประกอบกิจการเกี่ยวกับทำชิ้นส่วนอุปกรณ์รถจักรยานยนต์ และพ่นสี รวมถึงรับพ่นสีชิ้นงานสำเร็จประเภทชิ้นส่วนที่ใช้สำหรับประกอบเป็นรถจักรยานยนต์ ชิ้นงานที่ผลิตจากเหล็กจะผ่านขั้นตอนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตก่อน เพื่อใช้เป็นตัวกลางของการยึดเกาะระหว่างผิวชิ้นงานกับสารเคลือบสี กระบวนการเคลือบสีที่โรงงานใช้นั้น เป็นกระบวนการทั่วไปตามที่ได้นำเสนอมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ จัดให้จุดแขวนชิ้นงานและจุดนำชิ้นงานออกเป็นจุดที่ต่อเนื่องกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทั้งนี้เนื่องจากใช้ระบบโซ่ลำเลียงทำให้เกิดความต่อเนื่องในการผลิต ชิ้นงานจะนำขึ้นแขวน และตรวจนับที่จุดแขวนชิ้นงาน โซ่ลำเลียงจะนำชิ้นงานเคลื่อนผ่านห้องสเปรย์ ซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ภายในห้องสเปรย์จะติดตั้งหัวสเปรย์ให้ทิศทางของน้ำสเปรย์สัมผัสกับชิ้นงานมากที่สุด ความยาวของห้องสเปรย์ และจำนวนหัวสเปรย์ จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ชิ้นงานจะต้องได้รับการสัมผัสกับน้ำสเปรย์ การส่งน้ำ และสารละลายเคมี จะใช้ปั๊มสูบจากบ่อกระบวนการผ่านหัวสเปรย์ไปสัมผัสกับชิ้นงานแล้วไหลกลับลงบ่อกระบวนการ ในระหว่างบ่อกระบวนการ จะมีแผ่นรองหยดติดตั้งแบบเอียงให้น้ำ และ/หรือสารละลายเคมีไหลกลับเข้าบ่อกระบวนการเดิม บ่อกระบวนการที่ต้องควบคุมอุณหภูมิ จะติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ภายในบ่อ ซึ่งใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง และมีระบบควบคุมอุณหภูมิ เมื่อชิ้นงานผ่านบ่อน้ำล้างสุดท้ายแล้ว จะใช้ลมแรงดันสูงเป่าน้ำที่ยังคงติดอยู่ตามจุดอับของชิ้นงานออก จากนั้นชิ้นงานจะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการพ่นสี คือ ผ่านห้องอบแห้งก่อนพ่นสีห้องพ่นสี และอบสี ตามลำดับ ตัวอย่างผังห้องสเปรย์ บ่อกระบวนการ และตัวอย่างชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ผังกระบวนการหนีไฟของโรงเรียนที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษา



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างห้องสเปรย์ บ่อกระบวนการ และตัวอย่างชิ้นงาน

สารเคมีที่ใช้ในบ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟตนั้น จะเตรียมใช้ในรูปของสารละลาย บ่อกระบวนการที่ใช้สารเคมี ได้แก่ บ่อกำจัดไขมัน บ่อปรับสภาพผิว และบ่อฟอสเฟต โรงงานได้ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายเคมีให้อยู่ในช่วงที่กำหนด โดยระหว่างการเดินระบบผลิต ทำการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นทุก ๆ 2 ชั่วโมง คำนวณชี้วัดความเข้มข้นของสารละลายต่าง และกรดคือ ค่าสภาพความเป็นด่าง และสภาพความเป็นกรด ตามลำดับ สารละลายเคมีที่ใช้นั้นควบคุมความเข้มข้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ระบบการล้างชิ้นงานเป็นการล้างสวนกระแสแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ระบบล้างสวนกระแสสำหรับล้างสารละลายต่างออกจากชิ้นงานก่อนเข้าบ่อปรับสภาพผิว คือบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และระบบล้างสวนกระแสสำหรับล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตออกจากชิ้นงานก่อนส่งไปบ่อแห้ง คือบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึง ข - 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในแต่ละบ่อน้ำล้างได้กำหนดค่าระดับความปนเปื้อนของสารเคมีไว้ ซึ่งพนักงานจะคอยควบคุมไม่ให้ระดับความปนเปื้อนมากเกินไปเกินกว่าที่กำหนด วิธีการควบคุม คือ ควบคุมอัตราน้ำล้างสวนกระแสให้มีอัตราที่คงที่ แล้วตรวจวัดระดับความปนเปื้อนของสารเคมีในบ่อน้ำล้างทุก ๆ 4 ชั่วโมง อัตราน้ำล้างสวนกระแส

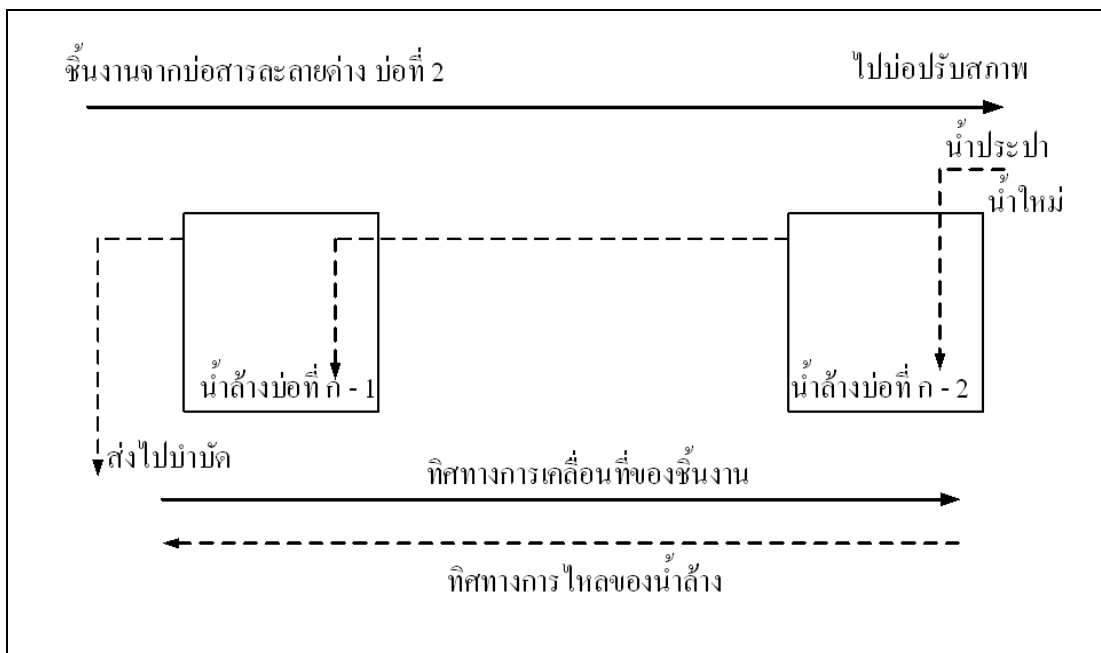
เป็นอัตราที่ใช้เพื่อควบคุมระดับความปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำล้างในแต่ละบ่อไม่ให้เกินกว่าที่กำหนด เมื่อสิ้นสุดการผลิตจะปล่อยน้ำล้างในแต่ละบ่อทิ้ง เพื่อล้างทำความสะอาดบ่อแล้วเติมน้ำล้างใหม่ ระดับความปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำล้าง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของสารละลายเคมีในบ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟตของโรงงาน

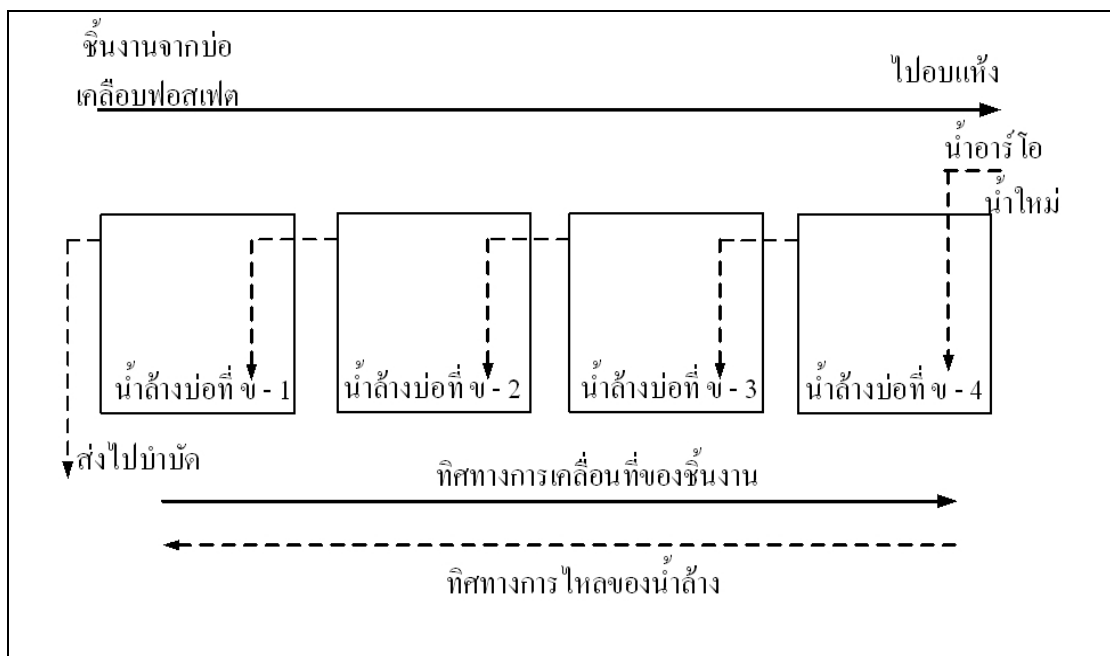
บ่อกระบวนการ	ความเข้มข้นสารละลายเคมี (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )		
	ค่าสภาพต่างทั้งหมด	ค่าสภาพกรดทั้งหมด	ค่าสภาพกรดแปร
กำจัดไขมัน 1	12,500 - 15,000	-	-
กำจัดไขมัน 2	10,000 - 12,500	-	-
ปรับสภาพผิว	300 - 700	-	-
เคลือบถังกะสีฟอสเฟต	-	6,500 - 8,500	150 - 350

ตารางที่ 3.2 ระดับความปนเปื้อนในการปล่อยน้ำล้างทิ้งของโรงงาน

บ่อน้ำล้าง	ระดับความปนเปื้อนที่ควบคุม		
	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)	ค่าสภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	ค่าสภาพกรดทั้งหมด (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )
น้ำล้างบ่อที่ ก - 1	-	≤ 3,500	-
น้ำล้างบ่อที่ ก - 2	-	≤ 1,000	-
น้ำล้างบ่อที่ ข - 1	-	-	≤ 2,500
น้ำล้างบ่อที่ ข - 2	-	-	≤ 1,000
น้ำล้างบ่อที่ ข - 3	≤ 100	-	-
น้ำล้างบ่อที่ ข - 4	≤ 100	-	-



รูปที่ 3.3 ระบบการล้างสวนกระแสสำหรับล้างสารละลายต่างของโรงงาน



รูปที่ 3.4 ระบบการล้างสวนกระแสสำหรับล้างสารละลายฟอสเฟตของโรงงาน

### 3.2 สภาพปัญหาที่เกิดขึ้น

การใช้น้ำ และการเกิดน้ำเสียปริมาณมากในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตนั้น เกิดขึ้นที่ขั้นตอนการล้างชิ้นงาน การล้างชิ้นงานต้องการน้ำสองชนิด คือ น้ำประปา และน้ำอาร์โอ (น้ำอาร์โอผลิตจากน้ำประปาโดยใช้ระบบอาร์โอ ซึ่งจะมีน้ำทิ้งอาร์โอเกิดขึ้นด้วย) โรงงานได้นำเทคโนโลยีสะอาดซึ่งเป็นแนวทางที่ได้ศึกษามาแล้ว มาประยุกต์ใช้เพื่อลดการใช้น้ำ และลดการเกิดน้ำเสีย ได้แก่ ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายเคมีให้เหมาะสม ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายเคมีให้เหมาะสม ติดตั้งแผ่นรองหยด ติดตั้งหัวฉีดสเปรย์ ล้างชิ้นงานด้วยระบบล้างสวนกระแสน้ำแบบหลายขั้นตอน

จากการประเมินเบื้องต้นพบว่า โรงงานใช้น้ำประปาทั้งหมด 19,444 ลิตร/วัน โดยใช้ล้างชิ้นงานด้วยน้ำประปา 6,826 ลิตร/วัน และใช้น้ำประปา 12,618 ลิตร/วัน สำหรับผลิตน้ำอาร์โอเพื่อนำไปล้างชิ้นงาน 7,887 ลิตร/วัน น้ำล้างทั้งหมดเกิดเป็นน้ำเสีย 14,713 ลิตร/วัน ส่วนระบบอาร์โอจะเกิดน้ำทิ้งอาร์โอ 4,732 ลิตร/วัน ผลการประเมินเบื้องต้นของการใช้น้ำ และการเกิดน้ำเสียในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 3.5

โรงงานใช้ระบบการล้างสวนกระแสน้ำจำนวนสองชุด คือ สำหรับล้างสารละลายต่าง และสำหรับล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ในการล้างแต่ละชุด จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นจากการปล่อยน้ำล้างสวนกระแสน้ำที่ออกจากบ่อน้ำล้างแรกตลอดเวลาเมื่อมีการเดินระบบผลิต และเกิดจากการปล่อยน้ำล้างทิ้งทุกบ่อเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบผลิตในแต่ละวัน ดังนั้นจึงพิจารณาแนวทางที่จะสามารถลดการใช้น้ำ และลดการเกิดน้ำเสียเพิ่มเติมจากที่ได้มีการศึกษามาแล้ว ได้แก่ ลดการปล่อยน้ำล้างในบ่อน้ำล้างทิ้ง นำน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการปล่อยน้ำล้างสวนกระแสน้ำที่ออกจากบ่อน้ำล้างแรกตลอดเวลาเมื่อมีการเดินระบบผลิตมาใช้ซ้ำ และนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมาผลิตน้ำอาร์โอใหม่ นอกจากนี้ น้ำทิ้งจากการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการเคลือบฟอสเฟตอาจสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

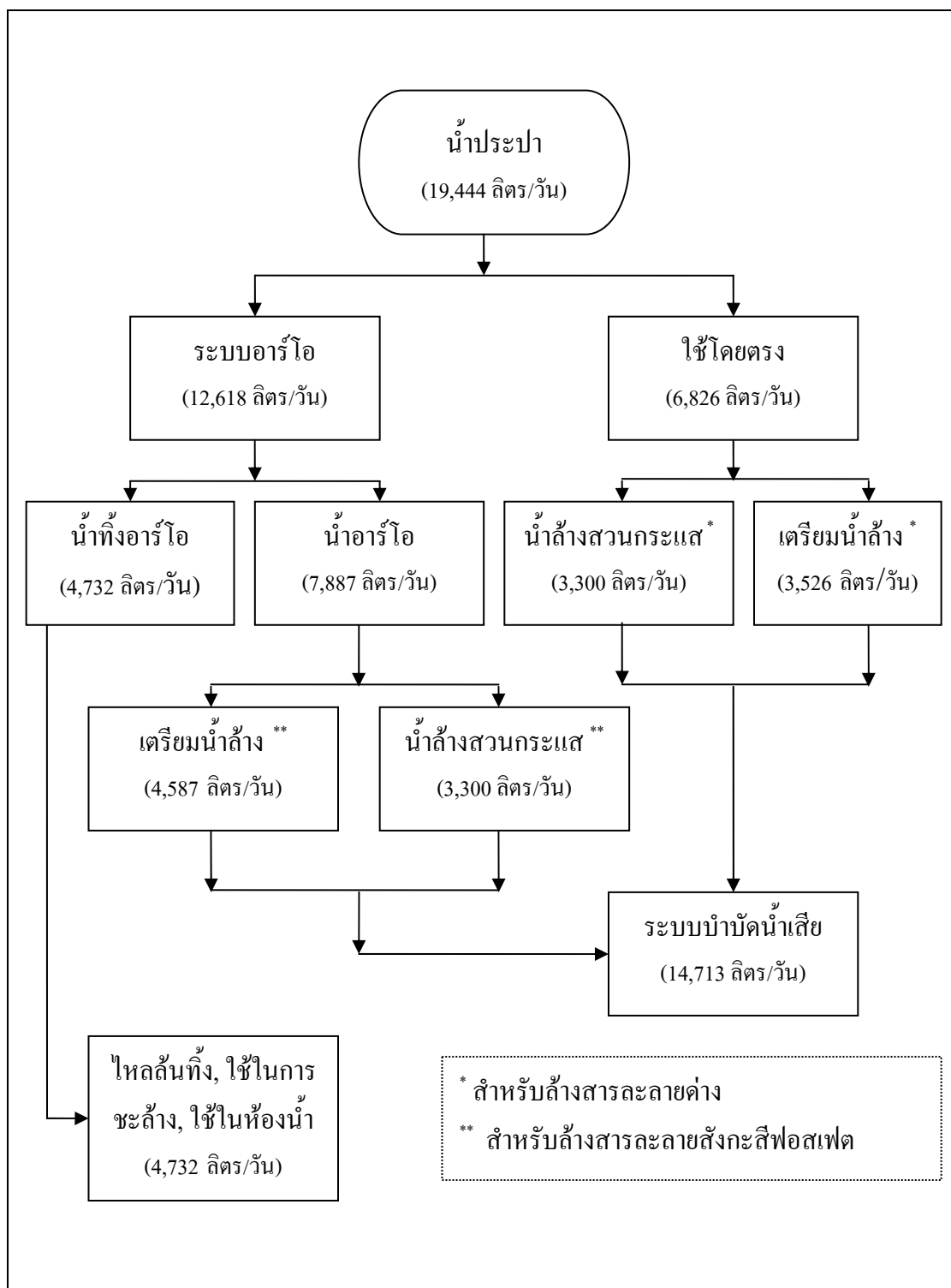
### 3.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดการใช้น้ำและนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการศึกษาในกระบวนการล้างสวนกระแสน้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ลำดับขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยสรุปได้ดังนี้

ลำดับที่หนึ่ง สำรวจโรงงานในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

ลำดับที่สอง ศึกษาสมมูลมวลน้ำที่ระบบน้ำล้างสวนกระแสน้ำ เพื่อใช้ประกอบการประเมินความเป็นไปได้ในการลดการใช้น้ำ และนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่



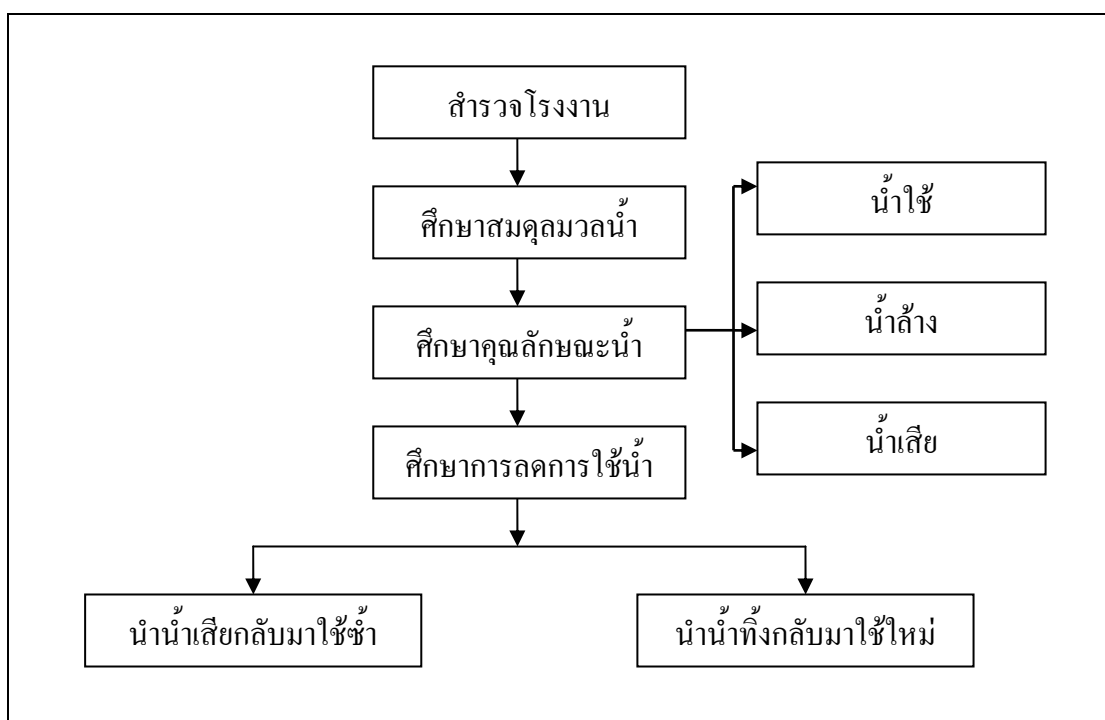


รูปที่ 3.5 ประเมินปริมาณน้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตของโรงงาน

ลำดับที่สาม วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำในบ่อน้ำล้างในระบบล้างสวนกระแส เพื่อใช้พิจารณาในการลดการใช้น้ำล้างในระบบการล้างสวนกระแส

ลำดับที่สี่ ศึกษาการลดการใช้น้ำ โดยการใช้ซ้ำในขั้นตอนการล้างชิ้นงานในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

ลำดับที่ห้า ศึกษาการลดการใช้น้ำ โดยการนำน้ำที่กลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ การนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ด้วยระบบอาร์โอต้นแบบ และการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ด้วยการลดความขุ่นเพื่อนำกลับไปใช้แทนน้ำประปาในการล้างทำความสะอาดบ่อน้ำล้าง โดยกรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ กรองคาร์บอน และเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ลำดับขั้นตอนการศึกษา

### 3.4 ตรวจสอบโรงงานและศึกษาสมดุลมวลน้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

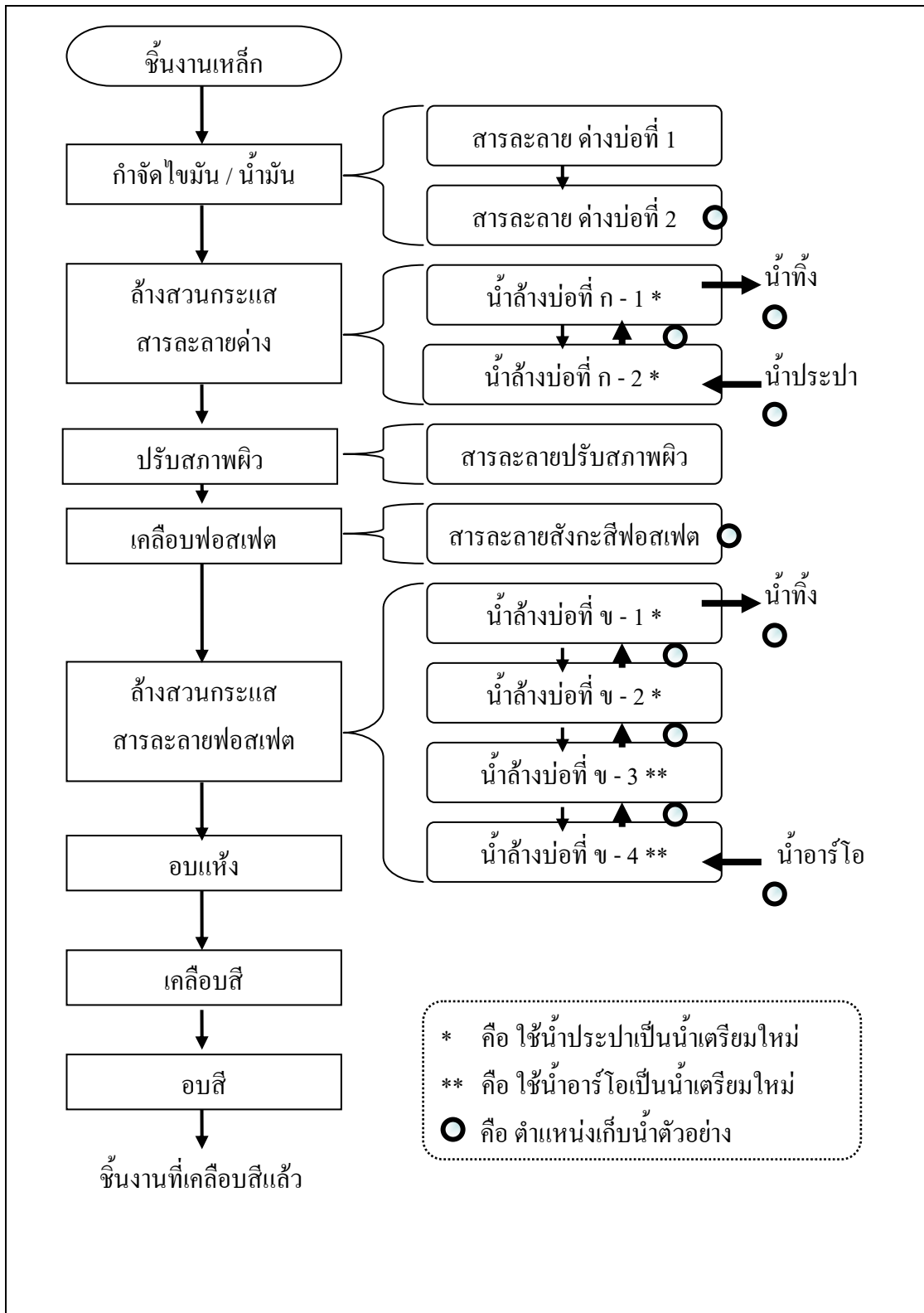
การประเมินแนวทางการลดการใช้น้ำ และการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตของงานวิจัยนี้ จำเป็นที่จะต้องทราบปริมาณการใช้น้ำ และปริมาณการเกิดน้ำเสีย หรือน้ำทิ้งในระบบที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระบบอาร์โอ ระบบบ่อน้ำล้างสวนกระแส ดังนั้นดำเนินการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อ 3.5 โดยสำหรับระบบบ่อน้ำล้างนั้น วัดปริมาณน้ำในบ่อน้ำล้างแต่ละบ่อ (เติมน้ำประปาผ่านมาตรวัดน้ำ) ซึ่งจะทราบปริมาณน้ำ

ในบ่อน้ำล้าง ส่วนปริมาณการใช้ น้ำล้างสวนกระแสสามารถอ่านได้จากมาตรวัดน้ำ และมาตรวัด อัตราการไหล ส่วนระบบบอร์โอนั้น เมื่อทราบปริมาณการใช้ น้ำอาร์โอในระบบบ่อน้ำล้างแล้ว สามารถประเมินปริมาณน้ำที่อาร์โอจากเปอร์เซ็นต์แยกกลับของระบบบอร์โโอ ส่วนการเก็บข้อมูล นั้น ทำการบันทึกเลขหน่วยน้ำจากมาตรวัดน้ำในช่วงเวลา ก่อน และหลังการเดินระบบการผลิตของ โรงงานในแต่ละวัน ทำการประเมินอัตราการใช้น้ำ และการเกิดน้ำเสียต่อพื้นที่ผิวชั้นงานโดย ค่าเฉลี่ย

### 3.5 ศึกษาคุณลักษณะของน้ำ

ในกระบวนการผลิตจริงนั้น ชั้นงานมีหลากหลายรูปแบบ และขนาดที่แตกต่างกัน ทำให้ อัตราที่สารละลายเคมีหรือน้ำ ไหลหยดออกจากชั้นงานไม่เท่ากัน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ คุณลักษณะของน้ำล้าง แต่หลักการของการล้างสวนกระแสนั้น ประสิทธิภาพของการล้างขึ้นอยู่กับ การควบคุมอัตราส่วนเจือจางระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคมีในบ่อกระบวนการกับความ เข้มข้นที่ปนเปื้อนในบ่อน้ำล้างสุดท้าย (ตัวอย่างเช่น บ่อสารละลายต่างบ่อที่ 2 กับบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 และบ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต กับบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4) ดังนั้นจึงดำเนินการศึกษา คุณลักษณะของน้ำที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลือบฟอสเฟต โดยตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำได้แก่ น้ำประปา น้ำอาร์โอ น้ำล้าง และน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.7

สำหรับน้ำล้างนั้น วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะน้ำล้างกับพื้นที่ผิวชั้นงานที่ผ่าน บ่อน้ำล้าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินความเป็นไปได้ในการลดการใช้ น้ำ โดย ดำเนินการเก็บตัวอย่างสารละลายเคมี และน้ำล้างจากบ่อกระบวนการในระหว่างที่ทางโรงงานเดิน ระบบการผลิต โดยเก็บตัวอย่างในช่วงระยะเวลา 2 สัปดาห์ เพื่อเป็นตัวแทน จำนวนไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ตัวอย่างน้ำล้างที่เก็บ ได้แก่ บ่อกำจัดไขมัน (บ่อสารละลายต่างบ่อที่ 2) บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 บ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึงบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 โดยทุกครั้งที่เก็บตัวอย่าง บันทึกเวลาเพื่อนำไปใช้สำหรับตรวจติดตามประเภท และจำนวนของ ชั้นงานที่ผ่านบ่อกระบวนการแต่ละบ่อ ซึ่งจะ ใช้ข้อมูลที่บันทึกไว้ที่จุดแขวนชั้นงาน นำไปคำนวณ พื้นที่ผิวชั้นงาน ซึ่งชั้นงานแต่ละแบบจะใช้ข้อมูลพื้นที่ผิวชั้นงานจากข้อมูลของ โรงงาน



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับศึกษาคุณลักษณะของน้ำ

พารามิเตอร์ที่ใช้ติดตามความปนเปื้อนของน้ำล้างนั้น U.S. EPA. (1996) ได้แนะนำค่าพีเอช หรือค่าสภาพการนำไฟฟ้า แต่เนื่องจากโรงงานใช้ค่าสภาพค่าสำหรับสารละลายต่าง และน้ำล้าง หลังบ่อสารละลายต่าง และใช้ค่าสภาพกรดสำหรับสารละลายสังกะสีฟอสเฟต และน้ำล้างหลังบ่อ สารละลายสังกะสีฟอสเฟต (ยกเว้นที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4 ใช้ค่าสภาพการนำไฟฟ้า) ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมทุกพารามิเตอร์ทำการวิเคราะห์ ค่าพีเอช ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของทุกบ่อ ดังที่กล่าวมา ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ จะวิเคราะห์เหมือน โรงงาน และวิเคราะห์ค่าสภาพกรดเพิ่มเติม ที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4

### 3.6 ศึกษาการลดการใช้ซ้ำ

#### 3.6.1 การนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ

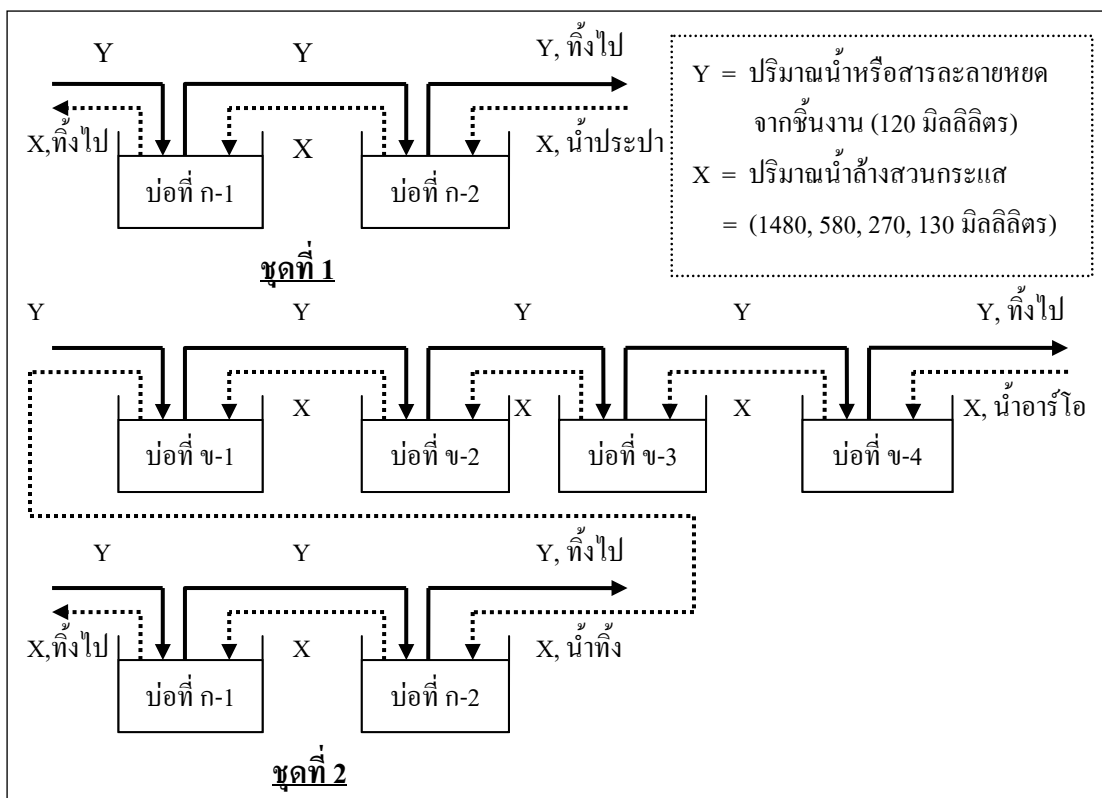
หลักการของการทดลองนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการใช้น้ำล้าง ที่หมดสภาพแล้วจากการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต (ซึ่งจะเป็นน้ำเสียไม่สามารถนำกลับมาใช้ เป็นน้ำล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตได้อีก) กลับมาใช้ซ้ำสำหรับล้างสารละลายต่าง ซึ่งเป็น ขั้นตอนการล้างก่อนหน้าที่ชิ้นงานจะผ่านบ่อปรับสภาพผิว โดยใช้หลักการของการล้างสวนกระแส ดังนั้นจึงใช้บ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลอง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำประปา น้ำอาร์ไอ และ สารละลายเคมีในบ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจากกระบวนการผลิตจริง นำมาวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ค่าสภาพค่า ค่าสภาพกรด เพื่อใช้ในการทดลอง จากนั้นจำลองการปนเปื้อน โดยให้สารละลายต่างปนเปื้อนในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 และให้สารละลายสังกะสี ฟอสเฟตปนเปื้อนในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึง ข - 4 แล้วจึงจำลองการล้างสวนกระแส จากนั้น ทดลองนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลอง และนำไปอบแห้ง พันสีตาม กระบวนการต่อไป

#### ก. อุปกรณ์ชุดทดลองนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ

การทดลองจะใช้น้ำล้างที่หมดสภาพแล้วจากการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต กลับมาใช้ซ้ำสำหรับล้างสารละลายต่าง โดยใช้หลักการของการล้างสวนกระแส โดยใช้บ่อ กระบวนการเคลือบฟอสเฟต ที่จำลองมาจากระบบบ่อกระบวนการที่ใช้จริง รวมถึงควบคุมอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทดลอง ใช้ปริมาตรย่อยอัตราส่วน 1,000 เท่า การล้างในชุดทดลอง ใช้วิธีการจุ่ม แทนการล้างแบบหัวสเปรย์ ควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้ขดลวดความร้อนและเทอร์โมมิเตอร์ ในแต่ละ การทดลองควบคุม ปริมาตร อุณหภูมิ และเวลา บ่อกระบวนการจำลองใช้ถังทรงสี่เหลี่ยมขนาด 12 x 12 x 20 เซนติเมตร จำนวน 10 ถัง จัดเรียงบ่อตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ข. วิธีการทดลอง

กระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองนั้น มีทิศทางการจำลองการปนเปื้อน และการล้างสวนกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การจำลองการปนเปื้อนและการล้างสวนกระแสดของกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลอง

เริ่มต้นการทดลองใช้น้ำอาร์โอเป็นน้ำล้างเริ่มต้นของบ่อน้ำล้างทุกบ่อ โดยมีปริมาตรที่ระบุไว้ตามตารางที่ 3.3 จากนั้นจำลองการปนเปื้อน โดยสมมติว่า อัตราน้ำหรือสารละลายหยดจากชั้นงาน (แคโรกิ้นท์) เท่ากันทุกบ่อ คือ 120 มิลลิลิตร (จากรูปที่ 3.8 คือ Y) โดยสารละลายต่างเติมลงที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 จำนวน 2 ชุด ซึ่งเป็นการจำลองการปนเปื้อนสารละลายต่างในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 ทั้ง 2 ชุด (ใช้สำหรับการเปรียบเทียบ) ส่วนสารละลายสังกะสีฟอสเฟตเติมลงที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 เฉพาะชุดที่ 2 ซึ่งเป็นการจำลองการปนเปื้อนสารละลายสังกะสีฟอสเฟตในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึง ข - 4 (เพื่อให้บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าประมาณ 280 ไมโครซีเมนต์/ซม.) ในส่วนของการจำลองการล้างสวนกระแสนั้น ใช้น้ำประปาเติมลงที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 (เฉพาะชุดที่ 1) และเติมน้ำอาร์โลงที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 (เฉพาะชุดที่ 2)

ตารางที่ 3.3 การควบคุมกระบวนการเคลื่อนฟอสเฟตจำลองตามมาตรฐานของโรงงาน

ลำดับบ่อ กระบวนการ	ชื่อบ่อกระบวนการ	ปริมาตร (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาจุ่ม (วินาที)
1	บ่อสารละลายต่างบ่อที่ 1	2,900	40 - 60	75
2	บ่อสารละลายต่างบ่อที่ 2	2,900	40 - 60	135
3	บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1	1,700	อุณหภูมิห้อง	72
4	บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2	1,700	อุณหภูมิห้อง	90
5	บ่อสารละลายปรับสภาพผิว	1,900	อุณหภูมิห้อง	72
6	บ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต	2,900	45 - 55	126
7	บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1	1,400	อุณหภูมิห้อง	72
8	บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 2	1,600	อุณหภูมิห้อง	72
9	บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3	900	อุณหภูมิห้อง	30
10	บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4	1,600	45 - 60	30

จะได้น้ำล้างที่ปนเปื้อนสารละลายสังกะสีฟอสเฟตจากบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ไปเติมลงที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 (ชุดที่ 2) ในการทดลอง ใช้ปริมาณน้ำล้างสวนกระแสจำนวน 4 ค่า คือ 1480, 580, 270 และ 130 มิลลิเมตร (จากรูปที่ 3.8 คือ X) ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้น้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ซึ่งเป็นบ่อน้ำล้างบ่อสุดท้ายมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเท่ากับ 50, 100, 150 และ 200 ไมโครซีเมนต์/ซม. (มาตรฐานของโรงงานกำหนดไว้ไม่เกิน 100 ไมโครซีเมนต์/ซม.) เมื่อจำลองการล้างสวนกระแสแล้วเสร็จในแต่ละปริมาณน้ำล้างสวนกระแส เก็บตัวอย่างน้ำล้างในแต่ละบ่อ มาวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ค่าสภาพต่าง ค่าสภาพกรด เพื่อวิเคราะห์ผลของการควบคุมค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่บ่อน้ำล้างสุดท้าย ที่มีต่อคุณภาพของน้ำล้างในบ่อน้ำล้างที่ ก - 1 และ ก - 2 โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้น้ำประปา และน้ำเสียจากการล้างหลังบ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต จากนั้นทดลองเปรียบเทียบผลของคุณภาพน้ำล้างที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่กล่าวมา ที่อาจจะมีผลกระทบต่อการใช้ของสีบนผิวชิ้นงานเหล็ก โดยการทดลองเคลื่อนสังกะสีฟอสเฟตชิ้นงานเหล็กในกระบวนการจำลอง แล้วนำไปเข้ากระบวนการเคลื่อนสี โดยนำชิ้นงานเหล็กขนาด 7 x 8 เซนติเมตร จำนวน 6 แผ่น (ใช้สำหรับการทดสอบ 1 ครั้ง) มาผ่านขั้นตอนการเคลื่อนสังกะสีฟอสเฟตโดยจุ่มชิ้นงานลงในบ่อกระบวนการเรียงตามลำดับ และควบคุมเวลา และอุณหภูมิตามตารางที่ 3.3 โดยชิ้นงานจำนวน 6

แผ่นจุ่มผ่านบ่อสารละลายต่างบ่อที่ 1 และ 2 จากนั้นแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ชุด ๆ ละ 3 แผ่น จุ่มผ่านบ่อกระบวนการที่ปนเปื้อนสารละลายต่าง คือ บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 ในบ่อชุดที่ 1 และ 2 จากนั้นรวมชิ้นงานทั้ง 6 แผ่น จุ่มผ่านบ่อสารละลายปรับสภาพผิว บ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต แล้วจุ่มผ่านบ่อน้ำล้างที่ปนเปื้อนสารละลายฟอสเฟต คือ บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึง ข - 4 (ในบ่อชุดที่ 2) เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตแล้ว นำไปเข้าขั้นตอนการเคลือบสี ตามมาตรฐานของโรงงาน คือนำไปเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปพ่นสีแล้วนำมาอบสีที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วอบสีต่ออีกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที นำชิ้นงานที่อบสีแล้วไปทดสอบการยึดติดของสี โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน Cross - Cut Tape Test (นิสา จิตพิพัฒน์กุล, 2545)

### 3.6.2 การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่

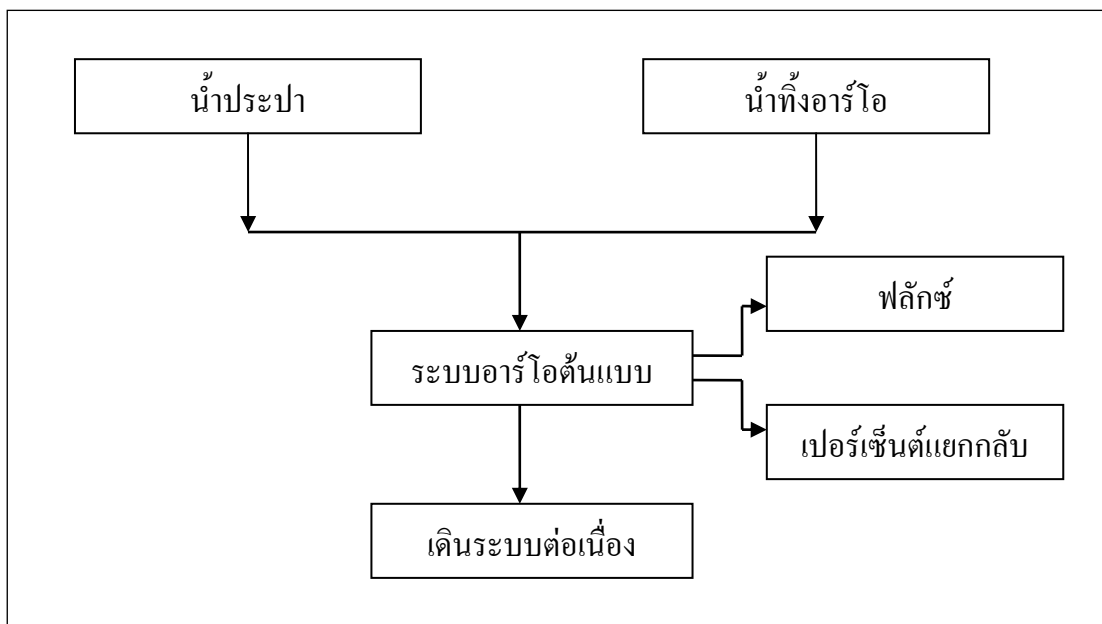
#### 3.6.2.1 ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งอาร์โอเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

น้ำทิ้งจากระบบอาร์โอของโรงงานนั้น เก็บกักไว้ในถังเก็บแสงปริมาตรความจุประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร การทดลองได้นำน้ำทิ้งอาร์โอ และน้ำประปามาผ่านระบบอาร์โอต้นแบบ สีขาวฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เหมาะสม ทั้งนี้กำหนดเงื่อนไขว่าน้ำอาร์โอจากระบบอาร์โอต้นแบบ มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าประมาณ 12 ไมโครซีเมนต์/ซม. ซึ่งเป็นค่าที่ทางโรงงานควบคุมในระบบอาร์โอของโรงงาน จากนั้นทดลองเดินระบบโดยควบคุม ฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เหมาะสม เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ ทั้งนี้ลำดับขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งอาร์โอเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

#### ก. อุปกรณ์ชุดทดลอง

การทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งอาร์โอ ใช้ชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ (ขนาดช่องเปิด 100 ไมโครเมตร) และใช้ชุดกรองคาร์บอน (ขนาดช่อง 5 ไมโครเมตร ทำจากผ้าฝ้าย) เป็นชุดกรองเบื้องต้นก่อนที่จะให้น้ำผ่านระบบอาร์โอ เพื่อป้องกันสารแขวนลอยไปอุดตันผิวหน้าของเมมเบรนอาร์โอ เมมเบรนอาร์โอที่ใช้ทดลองนั้น ผลิตจากโพลีเอไมด์ ชนิดเยื่อแผ่นเชิงประกอบโมดูลแบบท่อม้วน ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ทั้งกับน้ำเสีย น้ำประปา น้ำบาดาล และน้ำผิวดิน นอกจากนี้ระบบอาร์โอของโรงงานใช้อาร์โอชนิดนี้ในการผลิตน้ำอาร์โอด้วย รายละเอียดของอาร์โอที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.4 วัสดุอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย วาล์ว บั้มสูบน้ำ มาตรวัดแรงดัน มาตรวัดอัตราการไหล สวิตช์แรงดัน ชุดวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า ถังพักน้ำ ตำแหน่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 รูปชุดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.11





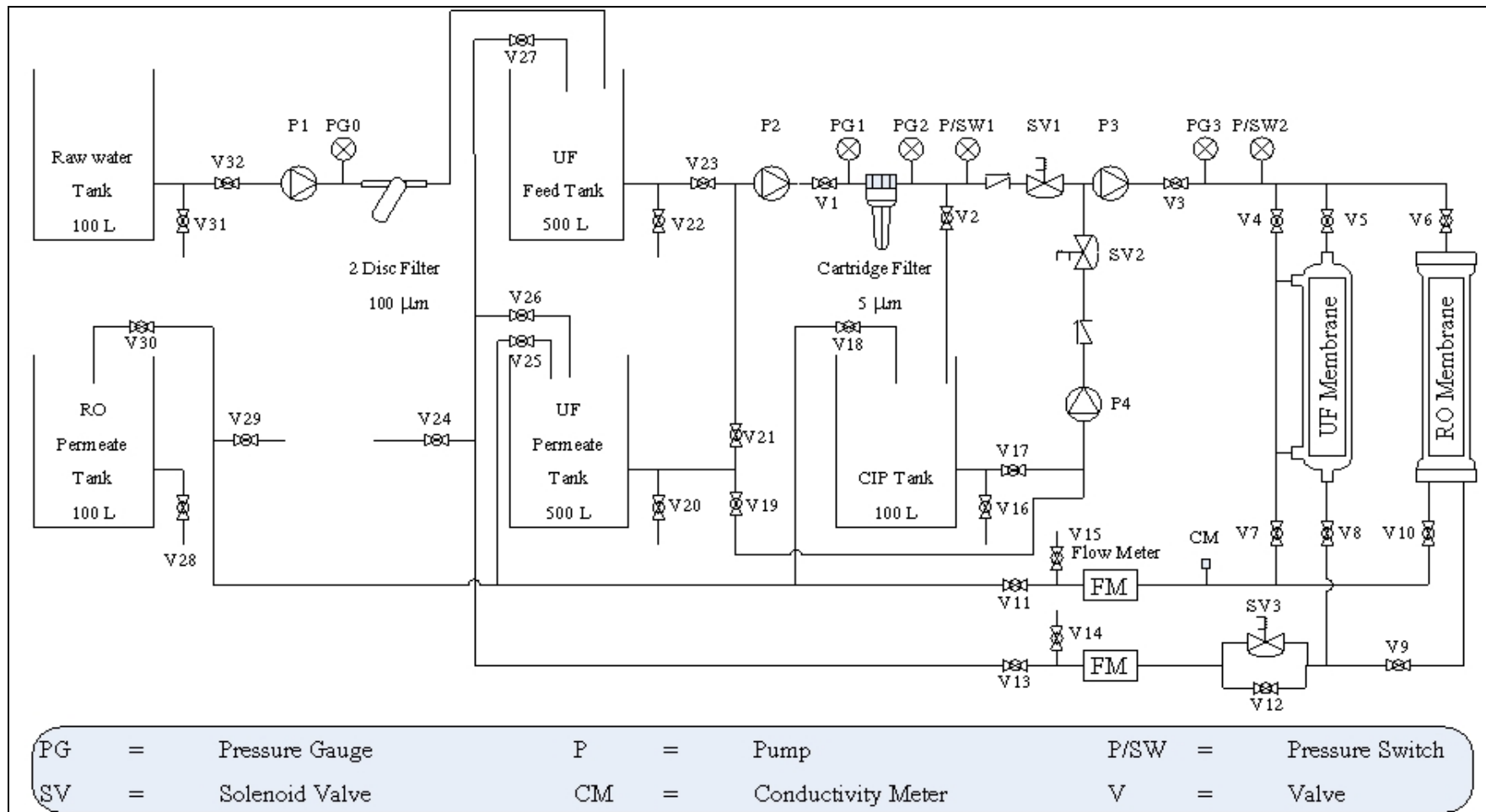
รูปที่ 3.9 ลำดับขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งอาร์โอเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของอาร์โอที่ใช้ในชุดทดลอง<sup>๑</sup>

ขนาด	ยาว X เส้นผ่านศูนย์กลาง	1,016 มม. (40 นิ้ว) X 100 มม. (4 นิ้ว)
	พื้นที่ผิวการกรอง	7.60 ตร.ม.
สมรรถนะ	อัตราน้ำเพอมีอเท*	6.31 ลิตรต่อนาที
	การกักกันเกลือ *	ร้อยละ 99.5
	เปอร์เซ็นต์แยกกลับทั้งหมด	ร้อยละ 15
ข้อจำกัด	อุณหภูมิสูงสุดขณะเดินระบบ	113 องศาฟาเรนไฮด์ (45 องศาเซลเซียส)
	แรงดันสูงสุดขณะเดินระบบ	600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
	อัตราน้ำป้อนสูงสุด	60 ลิตรต่อนาที
	แรงดันลดสูงสุด	15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
	ช่วงค่าพีเอชขณะเดินระบบ	2 - 11
	ช่วงค่าพีเอชขณะทำความสะอาด	1 - 12
	ช่วงค่าคลอรีนอิสระ	< 0.10 ส่วนในล้านส่วน

<sup>๑</sup>โมดูลรุ่น BW30 - 4040 ของบริษัท Filmtec

\* ภาวะทดสอบ : 2,000 (NaCl) ส่วนในล้านส่วน, แรงดัน 225 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (15.5 บาร์), 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, 15 เปอร์เซ็นต์แยกกลับ



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ทดลองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

#### ข. วิธีการทดลอง

วิธีการควบคุมระบบสำหรับศึกษาฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เหมาะสม แสดงไว้ในภาคผนวก ก ทดลองเดินระบบ โดยควบคุมฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เหมาะสม เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ แต่ไม่ทดสอบระยะเวลาอุดตันของระบบอาร์โอ เนื่องจากระบบอาร์โอที่ทางโรงงานใช้อยู่ไม่มีรอบการล้างทำความสะอาดทุก ๆ 3 เดือน

เมื่อเดินระบบต่อเนื่องจนบันทึกข้อมูลตามระยะเวลา ได้แก่ ความดันน้ำ ด้านป้อน อัตราน้ำทิ้งอาร์โอ อัตราน้ำอาร์โอ และเก็บตัวอย่างน้ำ ได้แก่ น้ำป้อน น้ำอาร์โอ และน้ำทิ้งอาร์โอ นำมาวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ค่าความขุ่น ค่าสภาพต่าง และค่าสภาพกรด นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ความกระด้าง เป็นจำนวนสามครั้งในระหว่างที่เดินระบบต่อเนื่อง ความถี่ของการเก็บข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ความถี่ของการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องระหว่างการเดินทางระบบอาร์โอ

พารามิเตอร์	หน่วย	ตำแหน่งบ่งชี้	ความถี่
ความดันน้ำด้านป้อน	psi	PG3	2 ชั่วโมง
อัตราน้ำทิ้งอาร์โอ	ลิตร ต่อ นาที	FM (Reject Water)	2 ชั่วโมง
อัตราน้ำอาร์โอ	ลิตร ต่อ นาที	FM (Product Water)	2 ชั่วโมง
อัตราน้ำทิ้งอาร์โอที่ปล่อยทิ้ง	ลิตร ต่อ นาที	วาล์ว V14	ปรับก่อนเริ่มเดินระบบ
ตัวอย่างน้ำป้อน		Raw Water Tank	4 ชั่วโมง
ตัวอย่างน้ำทิ้งอาร์โอ		วาล์ว V14	4 ชั่วโมง
ตัวอย่างน้ำอาร์โอ		วาล์ว V29	4 ชั่วโมง

### 3.6.2.2 ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

น้ำล้างจากระบวนการเคลือบฟอสเฟต รวบรวมมายังบ่อพักแล้วสูบเข้าระบบบำบัด การบำบัดใช้วิธีการบำบัดเป็นชุด ๆ โดยการกวนเร็ว กวนช้า และตกตะกอน หลังจากตกตะกอนแล้วปล่อยตะกอนไปกรองผ่านลานทราย น้ำส่วนใสนำมาปรับค่าพีเอชแล้วนำมากรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ (ขนาดช่องเปิด 100 ไมโครเมตร) และชุดกรองคาร์บอน (ขนาดช่องเปิด 5 ไมโครเมตร) แล้วจึงนำมากรองผ่านอัลตราฟิลเตรชัน ตามลำดับ

#### ก. อุปกรณ์ชุดทดลอง

การทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย ใช้ชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ เป็นชุดกรองเบื้องต้น เพื่อกรองตะกอนออกจากน้ำทิ้ง จากนั้นปรับปรุงคุณภาพด้วยชุดกรองคาร์บอน แล้วปรับปรุงคุณภาพด้วยอัลตราฟิลเตรชัน

อัลตราฟิลเตรชัน (UF) ที่ใช้ในการทดลองนี้ ผลิตจากโพลีซัลโฟน (PS) โมดูลแบบเส้นใยกลวง ซึ่งในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตนี้ ไม่ได้ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์จึงสามารถใช้ UF ที่ผลิตจาก PS ได้ นอกจากนี้ PS ยังสามารถใช้งานในช่วงค่าความเป็นกรดเป็นด่างได้กว้าง รายละเอียดของ UF ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.6 วัสดุอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย วาล์ว ปัมป์สูบน้ำ มาตรวัดแรงดัน มาตรวัดอัตราการไหล สวิตช์แรงดัน ถังพักน้ำ ใช้ร่วมกันกับอุปกรณ์ในระบบอาร์โอต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10

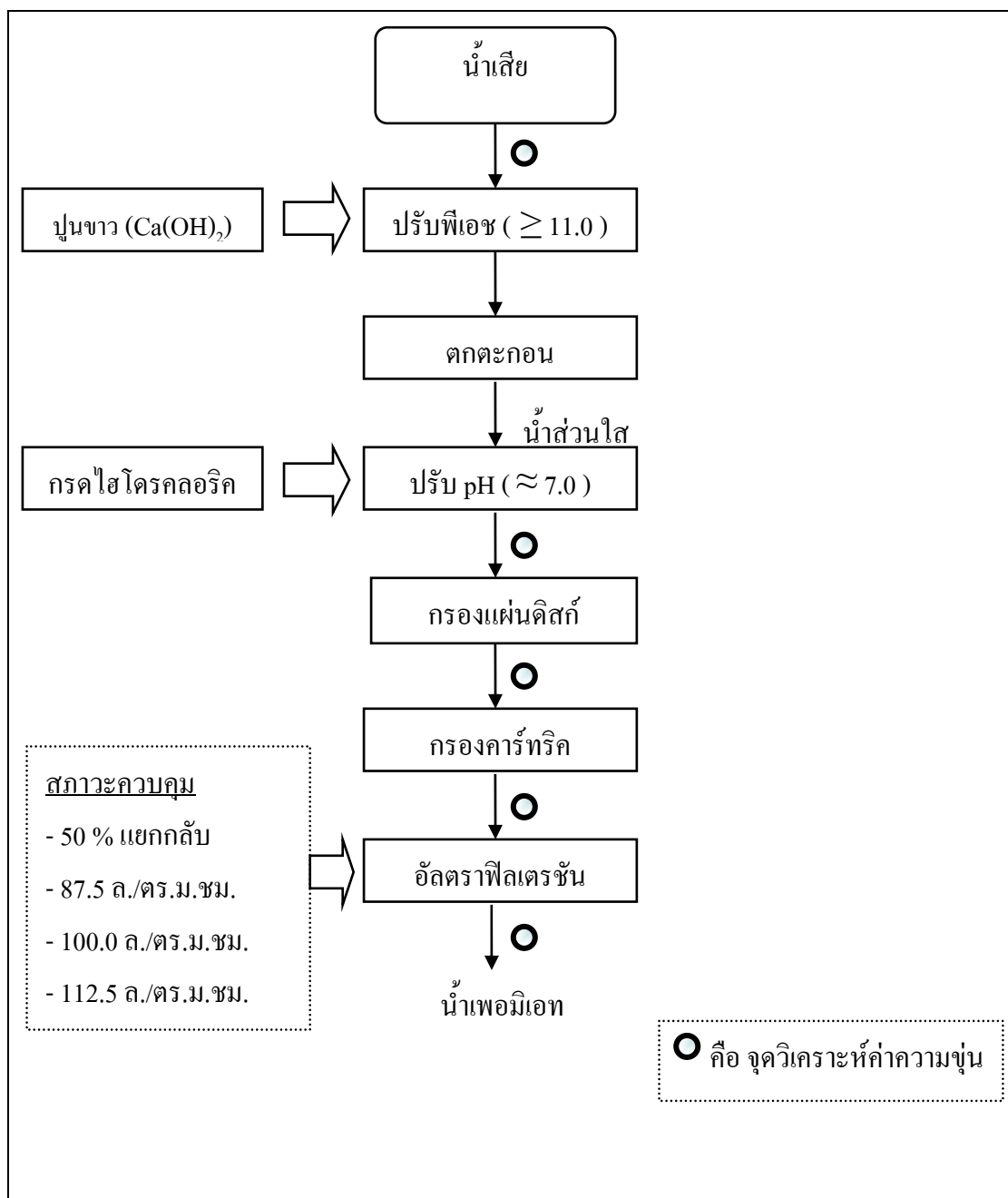
ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในชุดทดลอง<sup>ก</sup>

ลักษณะการกรอง		จากข้างนอกผ่านเข้าข้างใน
ขนาด	โมดูลยาว	1,115 มม.
	เส้นผ่านศูนย์กลางโมดูล	90 มม.
พื้นที่การกรอง		4.80 ตร.ม.
สมรรถนะ	ช่วงน้ำหนักโมเลกุลที่กักกัน (MWCO)	6,000 - 30,000
	อัตราน้ำเพอมีเอท	25.0 - 8.3 ลิตรต่ออนาที
ข้อจำกัด	ช่วงแรงดันเดินระบบ	30 - 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
	แรงดันล้างย้อน	≤ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
	ช่วงอุณหภูมิใช้งาน	3 - 60 องศาเซลเซียส
	ช่วงค่าพีเอชใช้งาน	2 - 13

<sup>ก</sup>โมดูลรุ่น 901115 - ABS ของบริษัท Vifil

#### ข. วิธีการทดลอง

ดำเนินการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ใช้สารละลายปูนขาว ควบคุมค่าพีเอชให้มากกว่า 11 (พรพรหม อินทวงศ์, 2544; Eckenfelder, 2000; Kurniawan และคณะ, 2006) เพื่อตกตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี นิกเกิล และแมงกานีส ทำการกวน 30 นาที แล้วทิ้งให้ตกตะกอน 2 ชั่วโมง นำน้ำส่วนใสมาปรับค่าพีเอชให้มีค่าสภาพเป็นกลาง แล้วนำมากรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ และชุดกรองคาร์บอนิก แล้วทดลองนำมากรองผ่านอัลตราฟิลเตรชัน ตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ค่าความขุ่น ได้แก่ น้ำเสีย น้ำทิ้ง น้ำกรองผ่านคาร์บอนิก และน้ำผ่านอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อประเมินแนวทางนำน้ำกลับไปใช้ใหม่ สำหรับอัลตราฟิลเตรชันนั้น ควบคุมระบบที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 50 ควบคุมสภาพการซึมผ่าน เมมเบรนของน้ำทิ้ง ได้แก่ 87.5, 100.0 และ 112.5 ล./ตร.ม.ชม. เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการใช้อัลตราฟิลเตรชัน ลำดับขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลำดับขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย  
เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

### 3.7 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำ

สำหรับวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการตาม standard methods for the examination of water and wastewater (APHA และคณะ, 1998) โดยพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ / วิธีวิเคราะห์	สิ่งรบกวนการวิเคราะห์	สถานที่วิเคราะห์
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	-	โรงงาน
ความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น	ตัวอย่างน้ำที่มีสี	โรงงาน
ของแข็งละลาย	ระเหยแห้งที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส	แคลเซียม, แมกเนเซียม, คลอไรด์ และซัลเฟต ที่มี ปริมาณสูง ๆ	ห้องปฏิบัติการที่ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
ของแข็งแขวนลอย	ระเหยแห้งที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส	เศษชิ้นส่วนที่ลอยน้ำ และน้ำที่มีของแข็ง ละลายมาก ๆ	ห้องปฏิบัติการที่ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
สภาพการนำ ไฟฟ้า	เครื่องวัดค่า สภาพการนำไฟฟ้า	-	โรงงาน
ความกระด้าง	ไตเตรตด้วยอีดีทีเอ	ไอออนโลหะ	โรงงาน
สภาพด่าง	ไตเตรตด้วยกรด ไฮโดรคลอริก	สี, ความขุ่น	โรงงาน

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำ (ต่อ)

พารามิเตอร์	เครื่องมือ / วิธีวิเคราะห์	สิ่งรบกวนการวิเคราะห์	สถานที่วิเคราะห์
สภาพกรด	ไตเตรตด้วยด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์	สี, ความขุ่น	โรงงาน
ซีโอดี	รีฟลักซ์แบบเปิด	คลอไรด์, ไนไตรต์, ซัลไฟด์	ห้องปฏิบัติการที่ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
ไขมัน และน้ำมัน	สกัดด้วยกรวยแยก	สารอินทรีย์บางชนิดที่ ละลายในเฮกเซน	ห้องปฏิบัติการที่ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
โลหะหนัก	Atomic Adsorption Spectrometric Method	-	ห้องปฏิบัติการที่ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

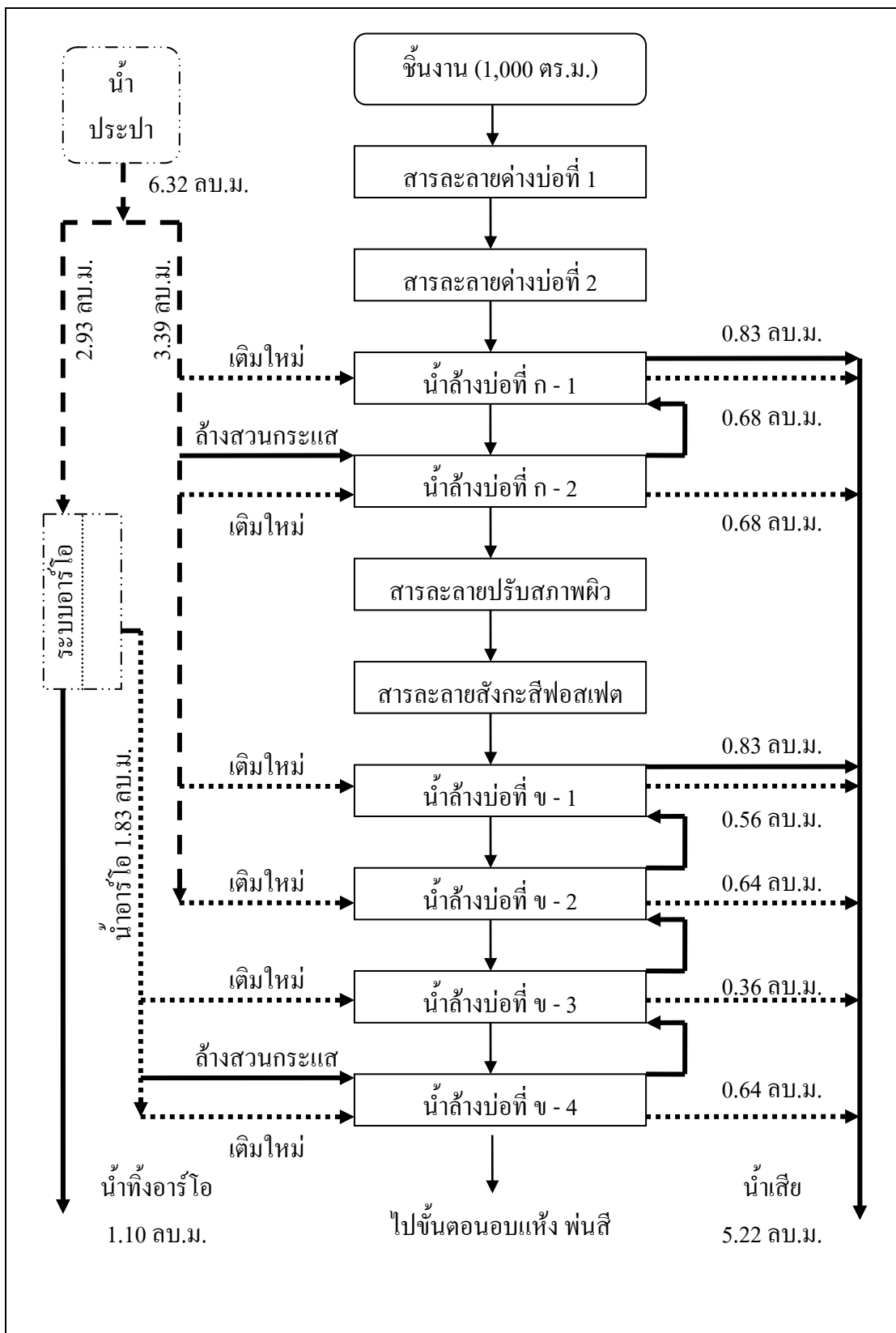
#### 4.1 ตำรวจโรงงานและศึกษาสมดุลมวลน้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

เก็บข้อมูลปริมาณการใช้น้ำ และปริมาณน้ำทิ้งที่บ่อน้ำล้างในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต จำนวน 11 วัน กำหนดระยะเวลาการเดินระบบ 174 ชั่วโมง จำนวนชิ้นงานผ่านบ่อกระบวนการ 12,554 ชิ้น กำหนดพื้นที่ผิวรวม 38,478 ตร.ม. สมดุลมวลน้ำในแต่ละบ่อน้ำล้างมีทั้งน้ำเปลี่ยนถ่าย (ไม่ได้เติมต่อเนื่อง) และน้ำล้างสวนกระแสน้ำ (เปิดใช้เมื่อเริ่มกระบวนการผลิต) เมื่อวิเคราะห์อัตรา การใช้น้ำล้างต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงาน 1,000 ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข้อมูลวิเคราะห์สมดุลมวล น้ำในระบบการล้างในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข1) พบว่าใช้น้ำ ประปาทั้งหมด และใช้น้ำอาร์โอเฉลี่ย 6.32 และ 1.83 ลบ.ม. ตามลำดับ ทำให้เกิดน้ำเสียจากการ ล้างชิ้นงาน 5.22 ลบ.ม. และเมื่อคำนวณอัตราน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอ ซึ่งควบคุมเปอร์เซ็นต์แยกกลับ ประมาณร้อยละ 62.5 จะมีน้ำทิ้งเฉลี่ยประมาณ 1.10 ลบ.ม.

การล้างสารละลายต่างออกจากชิ้นงาน (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2) ใช้น้ำประปาเฉลี่ย 2.19 ลบ.ม. โดยใช้ใน 2 ลักษณะ คือ ใช้น้ำประปาเติมใหม่หลังจากที่เปลี่ยนถ่ายน้ำล้างออกจาก บ่อแล้ว 1.36 ลบ.ม. หรือร้อยละ 62 ของน้ำที่ใช้ล้างสารละลายต่าง และล้างสวนกระแสน้ำ 0.83 ลบ.ม. หรือร้อยละ 38 ของน้ำที่ใช้ล้างสารละลายต่าง พบว่าปริมาณการใช้น้ำประปาสำหรับเปลี่ยนถ่ายนั้น มากกว่าที่ใช้น้ำสำหรับล้างสวนกระแสน้ำ

การล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตออกจากชิ้นงาน (บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ถึง ข - 4) ใช้น้ำประปาเปลี่ยนถ่ายที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 และ ข - 2 เฉลี่ย 1.20 ลบ.ม. ใช้น้ำอาร์โอเปลี่ยนถ่ายที่ บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4 เฉลี่ย 1.00 ลบ.ม. ใช้น้ำอาร์โอล้างสวนกระแสน้ำที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ถึง ข - 1 เฉลี่ย 0.83 ลบ.ม. ดังนั้นปริมาณน้ำเติมใหม่เฉลี่ย 2.20 ลบ.ม. ซึ่งมากกว่าน้ำอาร์โอล้างสวน กระแสน้ำ

ปริมาณน้ำเติมใหม่ขึ้นอยู่กับปริมาณเก็บกักของบ่อน้ำล้าง และความถี่ในการเปลี่ยนถ่าย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะลดปริมาณน้ำเปลี่ยนถ่าย โดยพิจารณาจากระดับความปนเปื้อนของ น้ำล้างในแต่ละบ่อ



รูปที่ 4.1 สมดุลมวลน้ำในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตของโรงงาน

## 4.2 ศึกษาคุณลักษณะของน้ำ

### 4.2.1 คุณลักษณะของน้ำใช้และน้ำล้าง

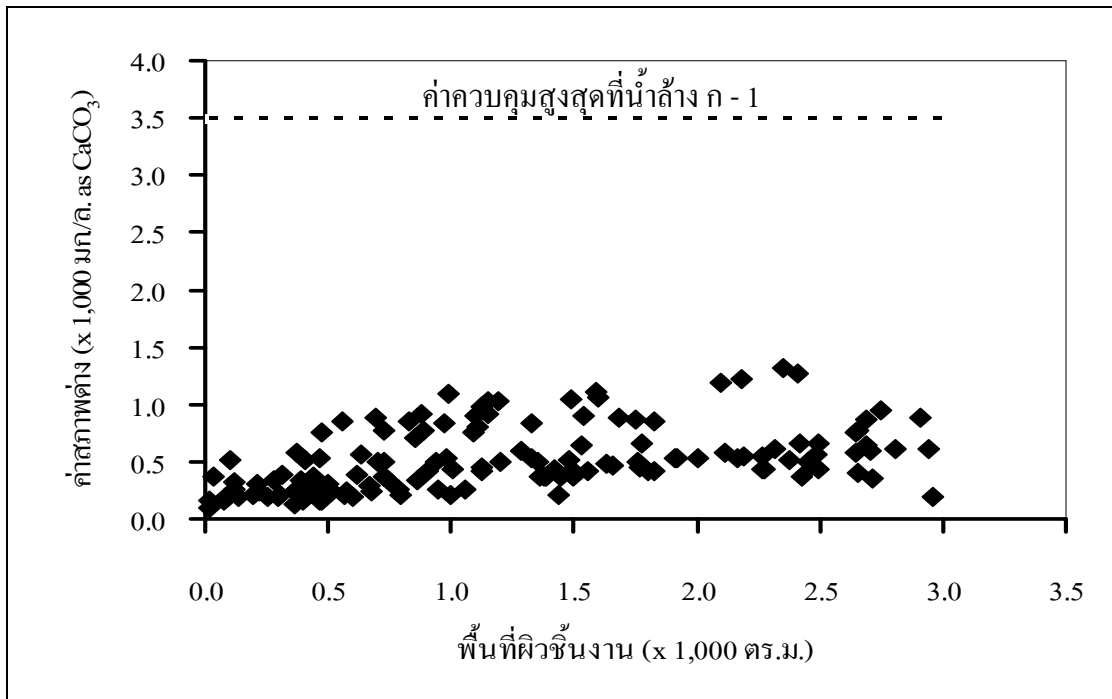
ในช่วงที่โรงงานเดินระบบการผลิต 11 วัน จำนวนระยะเวลาการเดินระบบ 174 ชั่วโมง หรือ 15.81 ชั่วโมงต่อวัน จำนวนชิ้นงานผ่านบ่อกระบวนการ 12,554 ชิ้น จำนวนพื้นที่ผิวรวม 38,478 ตร.ม. เฉลี่ยประมาณ 3,498 ตร.ม.ต่อวัน หรือ 221 ตร.ม.ต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำที่บ่อน้ำล้างประมาณ 144 ตัวอย่างต่อบ่อน้ำล้าง ทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง และแบ่งช่วงข้อมูลออกเป็น 3 ช่วง ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อกระบวนการ ได้แก่ 0 - 1000, 1001 - 2000, 2001 - 3000 ตร.ม. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย โดยช่วงที่ 1, 2, 3 มีจำนวนข้อมูลประมาณ 64, 47, 30 ตัวอย่างตามลำดับ

#### 4.2.1.1 คุณลักษณะของน้ำใช้และน้ำล้างที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายต่าง

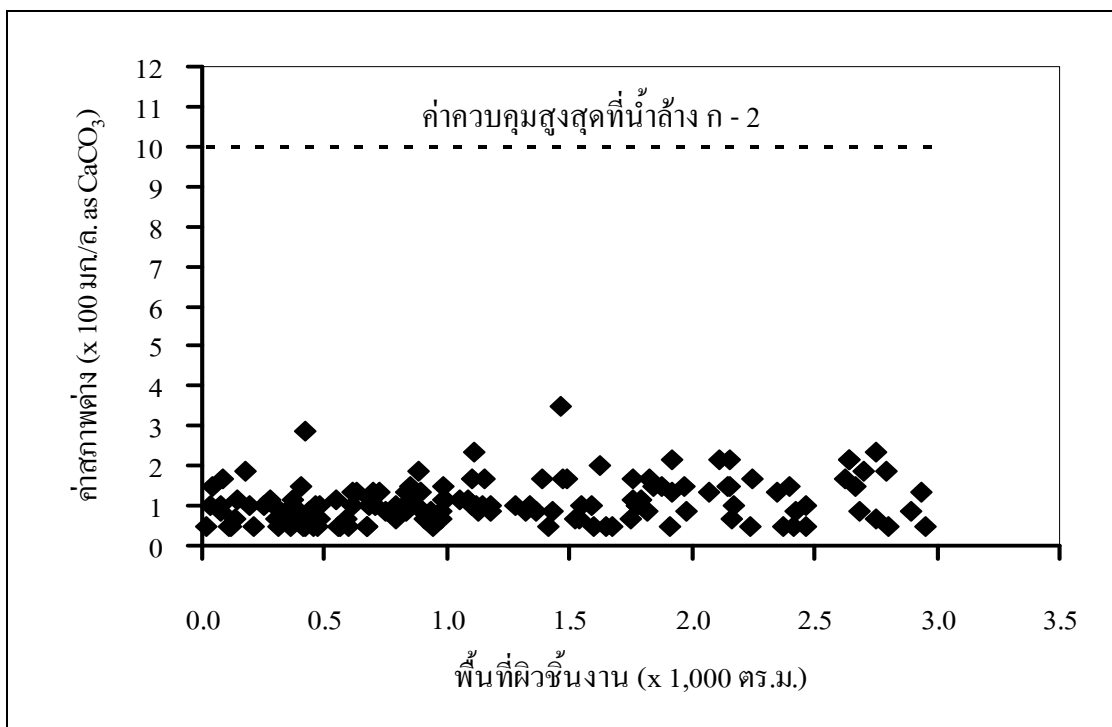
การล้างสารละลายต่าง ได้มีการกำหนดให้ค่าสภาพต่างเป็นดัชนีบ่งชี้ความปนเปื้อนของสารละลายต่างในน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 คือ สูงสุดไม่เกิน 3,500 และ 1,000 มก./ล. as CaCO<sub>3</sub> ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของน้ำล้างที่วิเคราะห์ได้นั้น มีค่าสภาพต่างต่ำกว่าที่กำหนดไว้มาก มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 16 และ 11 ของค่าสภาพต่างที่ควบคุมไว้สูงสุด ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ผลวิเคราะห์ แสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข2 - ข10) ค่าสภาพต่างที่ปนเปื้อนสะสมอยู่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 ที่ทำการวิเคราะห์ได้ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพต่างของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายต่างที่กระบวนการผลิตจริง

พารามิเตอร์	ช่วงพื้นที่ผิวชิ้นงาน (ตร.ม.)	สารละลายต่างบ่อที่ 2	น้ำล้างบ่อที่ ก - 1	น้ำล้างบ่อที่ ก - 2	น้ำประปา
ค่าสภาพต่าง (ค่าควบคุม) (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )		11,250	≤3,500	≤1,000	
ค่าสภาพต่างเฉลี่ย (ค่าที่วิเคราะห์ได้) (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	0 - 1,000	11,190	382	96	
	1,001 - 2,000	11,118	615	119	
	2,001 - 3,000	11,441	654	127	
	ค่าเฉลี่ย	11,250	551	114	95



รูปที่ 4.2 ค่าสภาพต่างในน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง



รูปที่ 4.3 ค่าสภาพต่างในน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง

จากรูปที่ 4.2 ค่าสภาพด่างที่สะสมในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 1,000 ตร.ม. แรกของพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้างนี้ จากนั้นจะมีแนวโน้มสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากก่อนเริ่มต้นการผลิตในแต่ละวัน น้ำในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 จะเป็นน้ำใหม่คือ น้ำประปา ทำให้ค่าสภาพด่างมีค่าต่ำในช่วงแรก แล้วค่อย ๆ สะสมจนเข้าสู่สมดุล เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูล พบว่ามีการกระจาย ซึ่งรูปร่างของชิ้นงานที่แตกต่างกันทำให้มวลสารที่ติดมากับชิ้นงานมีไม่เท่ากัน เป็นเหตุทำให้มวลเข้า และมวลออกของสารละลายด่างในบ่อน้ำล้าง มีการเปลี่ยนแปลง แต่ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายด่าง และควบคุมอัตราน้ำล้างสวนกระแสให้คงที่ อีกทั้งประเภทของชิ้นงานที่นำเข้ากระบวนการผลิต จะมีไม่หลากหลายจึงเกิดการซ้ำประเภทชิ้นงาน ดังนั้นจึงทำให้ค่าสภาพด่างที่สะสมในบ่อน้ำล้างนี้ มีการเปลี่ยนแปลงแบบมีแนวโน้มสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 จะลดการใช้ น้ำประปาได้ 0.68 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชิ้นงาน 1,000 ตร.ม.

จากรูปที่ 4.3 ค่าสภาพด่างที่สะสมในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 มีแนวโน้มสม่ำเสมอ อีกทั้งข้อมูลก็มีการกระจายในลักษณะคล้ายกัน ด้วยหลักการเดียวกันกับค่าสภาพด่างที่สะสมอยู่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 จะลดการใช้ น้ำประปาได้ 0.68 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชิ้นงาน 1,000 ตร.ม.

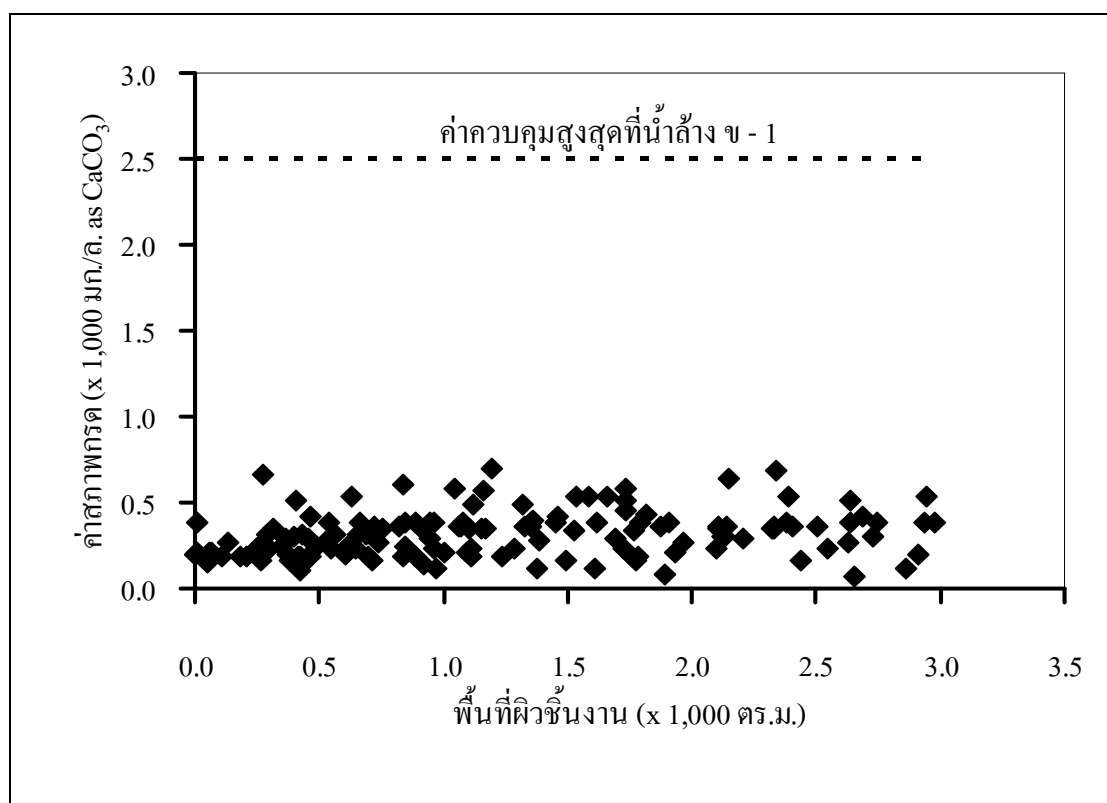
การล้างสารละลายด่างออกจากชิ้นงานแบบล้างสวนกระแสจำนวนสองขั้นตอนตามที่โรงงานตัวอย่างดำเนินการอยู่นั้น ผลวิเคราะห์ค่าสภาพด่าง ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ความปนเปื้อน พบว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างใหม่ในบ่อน้ำล้าง จึงลดการใช้ น้ำประปาที่บ่อน้ำล้างทั้งสองขั้นตอน ที่เคยเปลี่ยนถ่ายใหม่ทุกวันลงได้ รวมเป็นปริมาณ 1.36 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชิ้นงาน 1,000 ตร.ม.

#### 4.2.1.2 คุณลักษณะของน้ำใช้และน้ำล้างที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต

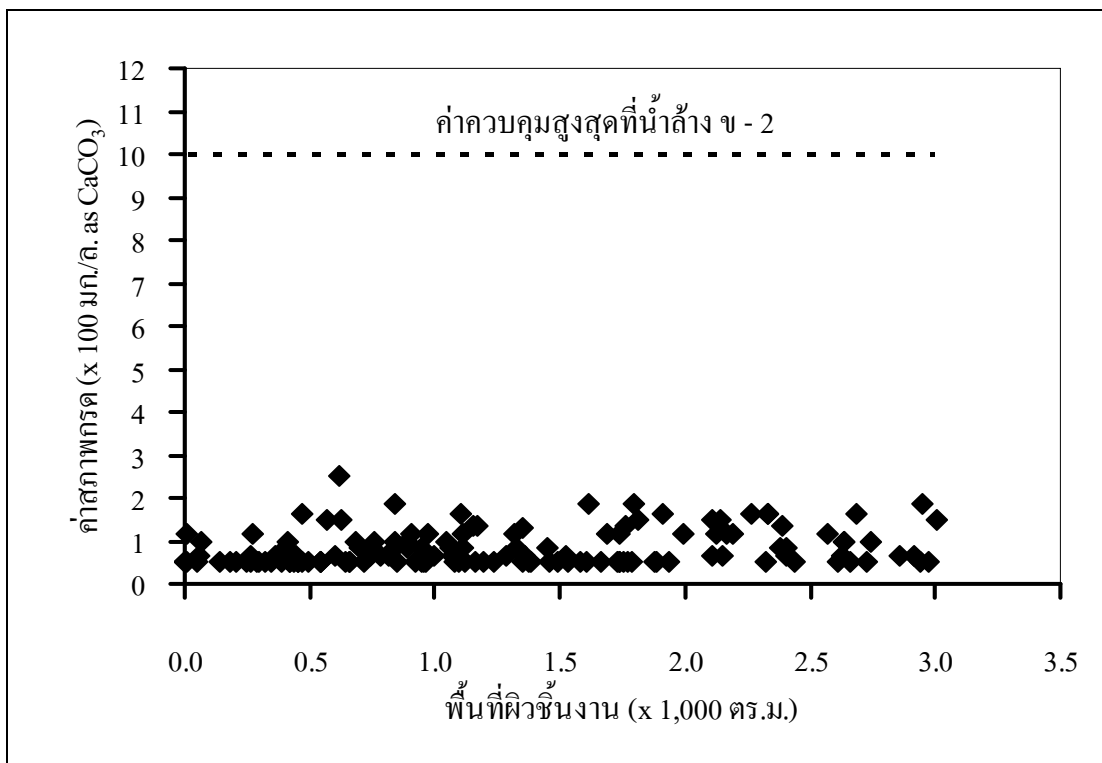
การล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ได้มีการกำหนดให้ค่าสภาพกรดเป็นดัชนีบ่งชี้ความปนเปื้อนของสารละลายสังกะสีฟอสเฟตในน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 และ ข - 2 คือ สูงสุดไม่เกิน 2,500 และ 1,000 มก./ล. as  $\text{CaCO}_3$  ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของน้ำล้างที่วิเคราะห์ได้นั้น มีค่าสภาพกรดต่ำกว่าที่กำหนดไว้มาก มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 13 และ 9 ของค่าสภาพกรดที่ควบคุมไว้สูงสุดตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ผลวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข11 - ข19) ค่าสภาพกรดที่ปนเปื้อนสะสมอยู่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 และ ข - 2 ที่ทำการวิเคราะห์ได้ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพกรดของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต  
ที่กระบวนการผลิตจริง

พารามิเตอร์	ช่วงพื้นที่ ผิวชิ้นงาน (ตร.ม.)	สารละลาย สังกะสี ฟอสเฟต	น้ำล้าง บ่อที่ ข - 1	น้ำล้าง บ่อที่ ข - 2	น้ำ อาร์โอ
ค่าสภาพกรด (ค่าควบคุม) (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )		7,500	≤2,500	≤1,000	
ค่าสภาพกรดเฉลี่ย (ค่าที่วิเคราะห์ได้) (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	0 - 1,000	7,686	275	74	
	1,001 - 2,000	7,467	347	82	
	2,001 - 3,000	7,458	353	98	
	ค่าเฉลี่ย	7,537	325	85	5



รูปที่ 4.4 ค่าสภาพกรดในน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง



รูปที่ 4.5 ค่าสภาพกรดในน้ำล้างบ่อที่ ข - 2 ตามพื้นที่ผิวชั้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง

จากรูปที่ 4.4 ค่าสภาพกรดที่สะสมในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 มีแนวโน้มสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูล พบว่ามีการกระจาย ซึ่งรูปร่างของชั้นงานที่แตกต่างกัน ทำให้มวลสารที่ติดมากับชั้นงานมีไม่เท่ากัน เป็นเหตุทำให้มวลเข้า และมวลออกของสารละลายสังกะสีฟอสเฟตในบ่อน้ำล้าง มีการเปลี่ยนแปลง แต่ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีฟอสเฟต และควบคุมอัตราน้ำล้างสวนกระแสน้ำให้คงที่ อีกทั้งประเภทของชั้นงานที่นำเข้ากระบวนการผลิต จะมีไม่หลากหลายจึงเกิดการซ้ำประเภทชั้นงาน ดังนั้นจึงทำให้ค่าสภาพกรดที่สะสมในบ่อน้ำล้างนี้ มีการเปลี่ยนแปลงแบบมีแนวโน้มสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 จะลดการใช้น้ำประปาสำหรับเติมใหม่ลงได้ 0.56 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชั้นงาน 1,000 ตร.ม.

จากรูปที่ 4.5 ค่าสภาพกรดที่สะสมในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 2 มีแนวโน้มสม่ำเสมอ อีกทั้งข้อมูลก็มีการกระจายในลักษณะคล้ายกันด้วยหลักการเดียวกันกับค่าสภาพกรดที่สะสมอยู่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 2 จะลดการใช้น้ำประปาได้ 0.64 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชั้นงาน 1,000 ตร.ม.

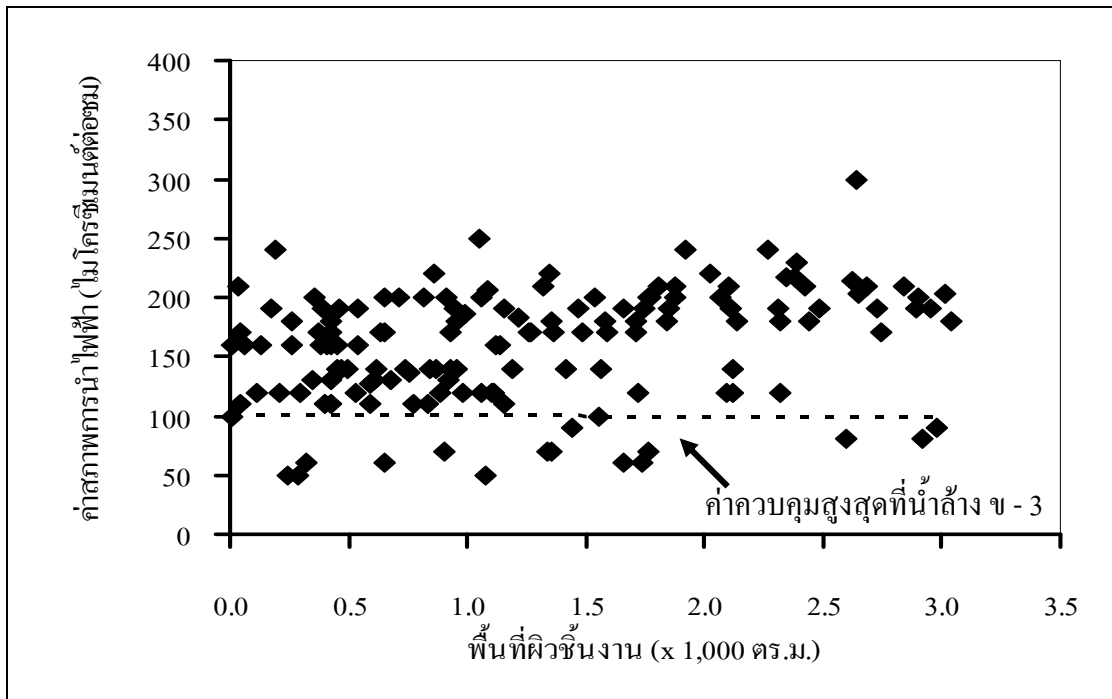
สำหรับการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตในการล้างขั้นตอนที่สาม และขั้นตอนที่สี่ ได้มีการกำหนดให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเป็นดัชนีบ่งชี้ความปนเปื้อนของสารละลายสังกะสีฟอสเฟตในน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4 คือ สูงสุดไม่เกิน 100 และ 100 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของน้ำล้างที่วิเคราะห์ได้นั้น มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเกินกว่าที่กำหนดไว้คือ มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าควบคุมเฉลี่ยร้อยละ 64 และ 13 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 (ผลวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข20 - ข25) ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ปนเปื้อนสะสมอยู่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4 ที่ทำการวิเคราะห์ได้ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต  
ที่กระบวนการผลิตจริง

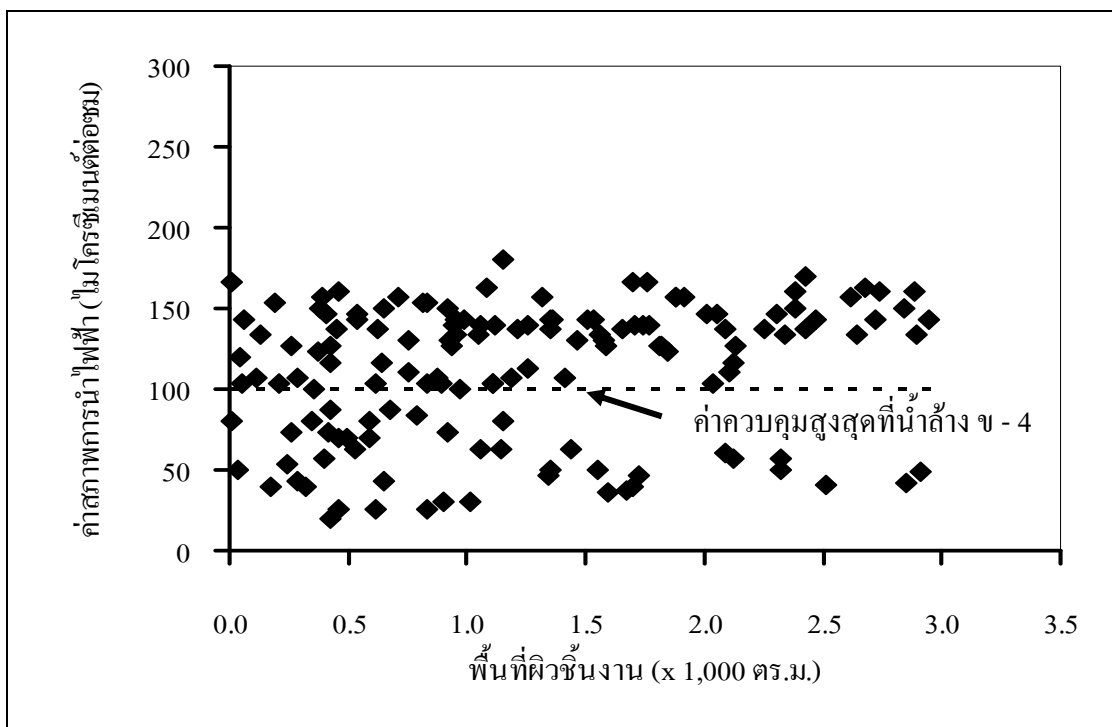
พารามิเตอร์	ช่วงพื้นที่ ผิวชิ้นงาน (ตร.ม.)	สารละลาย สังกะสี ฟอสเฟต	น้ำล้าง บ่อที่ ข - 3	น้ำล้าง บ่อที่ ข - 4	น้ำ อาร์โอ
ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ค่าควบคุม) (ไมโครซีเมนต์ต่อชม.)			$\leq 100$	$\leq 100$	
ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย (ค่าที่วิเคราะห์ได้) (ไมโครซีเมนต์ต่อชม.)	0 - 1,000	24,259	148	103	
	1,001 - 2,000	24,119	159	115	
	2,001 - 3,000	24,830	184	121	
	ค่าเฉลี่ย	24,403	164	113	80

จากรูปที่ 4.6 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่สะสมในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 มีแนวโน้มสม่ำเสมอ ข้อมูลมีการกระจายในลักษณะคล้ายกันด้วยหลักการเดียวกันกับค่าสภาพกรดที่สะสมอยู่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 (แต่ค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีการกระจายมากกว่าค่าสภาพกรดเนื่องจากค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีความละเอียดกว่าค่าสภาพกรด) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 จะลดการใช้ น้ำอาร์โอลงได้ 0.36 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชิ้นงาน 1,000 ตร.ม.





รูปที่ 4.6 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง



รูปที่ 4.7 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ตามพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านบ่อน้ำล้าง

จากรูปที่ 4.7 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่สะสมในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 มีแนวโน้มสม่ำเสมอ ข้อมูลมีการกระจายในลักษณะคล้ายกันด้วยหลักการเดียวกันกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ลดการใช้น้ำอาร์โอลงได้ 0.64 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชั้นงาน 1,000 ตร.ม.

ค่าควบคุมความปนเปื้อนในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 และ ข - 4 คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ซึ่งกำหนดให้มีค่าสูงสุดเท่ากันไม่เกิน 100 ไมโครซีเมนต์/ซม. แต่จากผลการตรวจวิเคราะห์ พบว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าควบคุม (แต่จากการตรวจสอบคุณภาพชั้นงาน โดยโรงงาน พบว่าชั้นงานมีคุณภาพดี) ทั้งนี้ตามหลักการของการล้างสวนกระแสนั้น ความปนเปื้อนของน้ำล้างในบ่อน้ำล้างที่อยู่ก่อนหน้า จะต้องมากกว่า ดังนั้นค่าสภาพการนำไฟฟ้าในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 จึงมีค่าสูงกว่าบ่อน้ำล้าง ข - 4 ส่วนค่าสภาพการนำไฟฟ้าในบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 มีค่าเกินกว่า 100 ไมโครซีเมนต์/ซม. เป็นผลมาจากค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอที่ใช้ล้างสวนกระแสน กล่าวคือ ปกติแล้วจะควบคุมน้ำอาร์โอให้มีค่าไม่เกินกว่า 20 ไมโครซีเมนต์/ซม. แต่ในช่วงเวลาของการทดลองนี้ น้ำอาร์โอมีค่าเฉลี่ย 80 ไมโครซีเมนต์/ซม. เนื่องมาจากระบบอาร์โอมีการรั่วไหลของน้ำป้อนเข้าไปผสมในน้ำอาร์โอ

การล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตแบบล้างสวนกระแสน้ำจำนวนสี่ชั้นตอนตามที่โรงงานตัวอย่างดำเนินการอยู่นั้น ผลวิเคราะห์ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในบ่อน้ำล้างสองชั้นตอนแรก ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ความปนเปื้อน พบว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างใหม่ในบ่อน้ำล้าง จึงลดการใช้น้ำประปา ที่บ่อน้ำล้างสองชั้นตอนแรก ที่เคยเปลี่ยนถ่ายใหม่ทุกวันลงได้ รวมเป็นปริมาณ 1.20 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชั้นงาน 1,000 ตร.ม. ส่วนการล้างชั้นตอนที่สาม และชั้นตอนที่สี่ ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างใหม่ในบ่อน้ำล้าง จึงลดการใช้น้ำอาร์โอที่เคยเปลี่ยนถ่ายใหม่ทุกวันลงได้ รวมเป็นปริมาณ 1.00 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชั้นงาน 1,000 ตร.ม.

#### 4.2.2 คุณลักษณะของน้ำเสียและน้ำทิ้งจากระบบบำบัด

จากการทดลองบำบัดน้ำเสีย เพื่อเตรียมตัวอย่างน้ำทิ้งสำหรับการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำการบำบัดสามครั้ง วิธีบำบัดใช้สารละลายปูนขาว เพื่อก่อตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ ได้แก่ สังกะสี และนิกเกิล โดยปรับค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าประมาณ 11 (พรพรม อินทวงศ์, 2544; Eckenfelder, 2000; Kurmiawan และคณะ, 2006) เก็บตัวอย่างน้ำเสีย และน้ำทิ้งหลังตกตะกอนสองชั่วโมง คุณลักษณะของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะน้ำเสีย และน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

พารามิเตอร์	คุณลักษณะน้ำเสีย			คุณลักษณะน้ำทิ้ง หลังตกตะกอน 2 ชั่วโมง			ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง
	1	2	3	1	2	3	
พีเอช (ไม่มีหน่วย)	7.2	7.2	7.0	11.6	11.7	11.5	5.5 - 9.0
ความขุ่น (NTU)	75.0	359.0	89.0	16.0	14.0	5.0	
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	48.0	109.0	120.0	140.0	6.0	ไม่พบ	$\leq 50.0$
ของแข็งละลาย (มก./ล.)	591.0	631.0	571.0	990.0	1,051.0	918.0	$\leq 3,000.0$
สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อซม.)	623.0	603.0	480.0	2,960.0	3,250.0	1,980.0	
ซีโอดี (มก./ล.)	428.0	1,395.0	1,228.0	394.0	977.0	958.0	$\leq 120.0$
ไขมัน และน้ำมัน (มก./ล.)	5.4	23.7	47.9	4.5	2.8	2.4	$\leq 5.0$
สังกะสี (มก./ล.)	3.7	28.8	36.4	0.5	2.0	0.3	$\leq 5.0$
นิกเกิล (มก./ล.)	58.0	ไม่พบ	39.9	1.5	2.9	2.7	$\leq 1.0$

น้ำเสียมีความเข้มข้นของ สารแขวนลอย ซีโอดี น้ำมัน ไขมัน โลหะหนัก สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และมีความขุ่นสูง ทั้งนี้เนื่องจากการชะล้างความสกปรกที่ติดมากับชิ้นงาน และในสารละลายสังกะสีฟอสเฟตจะมีโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี และนิกเกิล เมื่อน้ำเสียผ่านการเติมสารละลายปูนขาว และทิ้งให้ตกตะกอนแล้ว จะมีความเข้มข้นของ สารแขวนลอย ซีโอดี น้ำมัน ไขมัน โลหะหนัก และความขุ่นลดลง แต่ค่าของแข็งละลาย และค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารละลายปูนขาว แต่ของแข็งละลายมีความเข้มข้นไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ น้ำเสียที่ผ่านการก่อกอง โลหะไฮดรอกไซด์

ด้วยปูนขาว และผ่านการตกตะกอนแล้ว มีประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี และนิกเกิล เหลือร้อยละ 19.9 และ 95.3 ตามลำดับ แต่ยังคงมีความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานกำหนด

ค่าคงที่การละลาย ( $K_{sp}$ ) ของสังกะสีไฮดรอกไซด์ และนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เท่ากับ  $2 \times 10^{-17}$  และ  $1 \times 10^{-15}$  ตามลำดับ แต่จากผลการทดลอง พบว่าค่าผลคูณของความเข้มข้นของ ไอออนสังกะสีกับไฮดรอกไซด์ มีค่าอยู่ในช่วง  $0.5 - 7.5 \times 10^{-10}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า  $K_{sp}$  ของสังกะสีไฮดรอกไซด์ ส่วนผลคูณของความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลกับไฮดรอกไซด์ มีค่าอยู่ในช่วง  $4.1 - 12.3 \times 10^{-10}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า  $K_{sp}$  ของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ดังนั้นสารละลายจะเกิดการอิ่มตัวด้วยยิ่ง และยังคงเกิดตะกอนไปอีกจนกว่าค่าผลคูณของ ไอออนโลหะกับ ไอออนไฮดรอกไซด์จะเท่ากับค่า  $K_{sp}$  ของโลหะไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงควรเพิ่มระยะเวลาทวนซ้ำ เพื่อให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล ซึ่งจะมีผลให้ความเข้มข้นของโลหะสังกะสี และนิกเกิลลดลง และมีความเข้มข้นผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ ซึ่งการก่อกองไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 11.5 ถ้าผ่านการตกตะกอน และกรองแล้ว จะมีนิกเกิลละลายอยู่ประมาณ 0.15 มก./ล. (Eckenfelder, 2000) แต่อย่างไรก็ตามถ้าทำการบำบัดโลหะสังกะสี และนิกเกิลไปพร้อมกันที่ค่าพีเอชเดียวกัน จะทำให้ความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลมีค่ามากกว่าโลหะสังกะสี ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $K_{sp}$  ของนิกเกิลไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่า

Karakulski และ Morawski (2002) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำล้างไขมัน น้ำมัน ที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตสายไฟฟ้า พบว่าน้ำเสียมีความเข้มข้นของไขมัน น้ำมัน ซีโอดี และทองแดงสูงมากเกินมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จึงทำการบำบัด โดยกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (MWCO 50,000 - 100,000) แล้วกรองด้วยเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน พบว่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถกักกั้นน้ำมัน ไขมัน ได้เกือบหมด และกักกั้นซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 58 ส่วนเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันสามารถกักกั้นทองแดง และซีโอดีได้เกือบทั้งหมด ดังนั้นซีโอดีที่ยังคงเหลืออยู่หลังผ่านการบำบัดด้วยการก่อกองไฮดรอกไซด์แล้ว สามารถบำบัดได้ด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน และเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน

## 4.3 ศึกษาการลดการใช้ น้ำ

### 4.3.1 ศึกษาการนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ

การล้างสวนกระแส จะเติมน้ำใหม่เข้าที่บ่อน้ำล้างชั้นตอนสุดท้าย น้ำล้างจะไหลลงไปยังบ่อน้ำล้างก่อนหน้า แล้วไหลล้นออกจากบ่อน้ำล้างชั้นตอนแรก เกิดเป็นน้ำเสีรวบรวมไปยังระบบบำบัด การล้างต่าง จะเติมน้ำประปาเข้าที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 แล้วไหลล้นออกที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 การล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต จะเติมน้ำอาร์โอเข้าที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 แล้วไหลล้นออกที่บ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 การล้างต่างจะดำเนินการก่อนการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงใช้หลักการของการล้างสวนกระแส โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ นำน้ำเสียที่

ไหลล้นออกจากระบบการล้างสวนกระแสของการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตไปใช้ซ้ำ ให้ไหลต่อเนื่องไปเข้าระบบการล้างสวนกระแสของการล้างล้าง

ตัวอย่างน้ำประปา น้ำอาร์โอ และสารละลายเคมีที่ใช้ในการทดลอง นำมาจากกระบวนการผลิตจริงของโรงงาน นำมาวิเคราะห์ ค่าพีเอช ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ค่าสภาพค่า สภาพกรด มีคุณลักษณะ ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข26 ตัวอย่างน้ำเสียที่ไหลล้นทิ้งออกจากบ่อน้ำล้างชั้นตอนแรกของการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตได้จากการจำลองระบบการล้างสวน กระแสที่แปรเปลี่ยนปริมาณน้ำล้างจำนวนสี่ค่า คือ 1480, 580, 270 และ 130 มล. เพื่อควบคุมค่า สภาพการนำไฟฟ้าที่บ่อน้ำล้างสุดท้าย คือ บ่อที่ ข - 4 ให้มีค่าเป็น 50, 100, 150 และ 200 ไมโคร ซีเมนต์ต่อชม. ตามลำดับ โดยทำการทดลองสามซ้ำรวมเป็นจำนวนสิบสองครั้ง การที่ทดลองสาม ซ้ำ เนื่องจากในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจริงจะมีการรักษาความเข้มข้นของสารละลายเคมีใน บ่อกระบวนการให้อยู่ในช่วงที่คงที่อยู่เสมอ ดังนั้นคุณลักษณะน้ำล้างที่เตรียมในแต่ละครั้งจะไม่ แตกต่างกัน ตัวอย่างน้ำประปา และน้ำเสียมียุคุณลักษณะ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ลักษณะน้ำประปาและน้ำเสียที่ใช้ในการล้างล้างในระบบล้างสวนกระแสจำลอง ในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำ ประปา	น้ำเสียจากบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1			
			ปริมาณน้ำล้างสวนกระแส (มิลลิเมตร)			
			1,480	580	270	130
พีเอช	ไม่มีหน่วย	6.9	3.7	3.6	3.2	3.3
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์ต่อชม.	454	1,828	3,127	4,427	5,450
สภาพค่าทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	95	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	10	983	1,040	1,180	1,270

จากตารางที่ 4.5 น้ำเสียจากบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 มีค่าพีเอช ค่าสภาพกรด และค่า สภาพการนำไฟฟ้าสูงกว่าน้ำประปา ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำล้างสวนกระแส จะลดความเข้มข้นของ สารละลายสังกะสีฟอสเฟตในน้ำเสียลง เป็นผลให้น้ำเสียมียุค่าพีเอชเพิ่มขึ้น มีค่าสภาพกรด และค่า สภาพการนำไฟฟ้าลดลง

น้ำน้ำประปา และน้ำเสียจากบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ที่เตรียมได้ ไปใช้เป็นน้ำล้างสวน กระแสในระบบบ่อน้ำล้างล้าง คือ บ่อน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 โดยควบคุมให้ปริมาณสารละลาย ล้างหยดออกจากชิ้นงานด้วยปริมาณคงที่ คือ 120 มล. แต่แปรเปลี่ยนปริมาณน้ำล้างสวนกระแส คือ

1480, 580, 270 และ 130 มล. ซึ่งในแต่ละปริมาณน้ำล้างสวนกระแส ได้วิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 จำนวนสามซ้ำ รวมเป็นจำนวน 12 ครั้ง ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 (ผลวิเคราะห์ ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข27 - ข28) และได้ทดสอบการยึดติดสีบนผิวชิ้นงานเหล็กที่จุ่มผ่านบ่อกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตจำลอง จำนวนหกชิ้นงานต่อการทดลองหนึ่งครั้ง รวมจำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ 72 ชิ้น

ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 ในระบบการล้างล้างจำลองในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	หน่วย	ชนิดน้ำล้างสวนกระแส	คุณลักษณะน้ำล้าง	
			บ่อที่ ก - 1	บ่อที่ ก - 2
พีเอช	ไม่มีหน่วย	น้ำประปา	10.1 - 9.8	9.6 - 8.8
		น้ำเสีย	9.8 - 7.6	6.6 - 5.1
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์ต่อชม.	น้ำประปา	4,390 - 1,533	1,378 - 625
		น้ำเสีย	4,697 - 2,260	2,590 - 1,472
สภาพค่า	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	น้ำประปา	2,338 - 773	637 - 262
		น้ำเสีย	2,210 - 717	443 - 45
สภาพกรด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	น้ำประปา	ไม่พบ	ไม่พบ
		น้ำเสีย	ไม่พบ	240 - 387

หมายเหตุ ปริมาณน้ำล้างสวนกระแส 130 - 1,480 มิลลิลิตร

จากตารางที่ 4.6 พบว่า น้ำล้างบ่อที่ ก - 1 จะมีค่าพีเอช ค่าสภาพค่า ค่าสภาพการนำไฟฟ้า อยู่ในช่วงที่สูงกว่าน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 เนื่องจากน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 เป็นบ่อน้ำล้างแรกของการล้างค่า จึงได้รับการปนเปื้อนสารละลายค่าด้วยความเข้มข้นที่มากกว่าน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 การเพิ่มปริมาณน้ำล้างสวนกระแส จะทำให้น้ำล้างในบ่อน้ำล้างมีค่าพีเอช ค่าสภาพค่า ค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากได้รับการเจือจางจากปริมาณน้ำล้างสวนกระแส เมื่อพิจารณาน้ำล้างที่บ่อน้ำล้าง ก - 1 พบว่าถ้าใช้น้ำเสีล้างสวนกระแส จะทำให้น้ำล้างของน้ำล้างลดลง แต่เพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้าบ้าง ส่วนค่าสภาพค่าไม่มีความแตกต่างจากที่ใช้น้ำประปา ส่วนน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 นั้น ถ้าใช้น้ำเสีล้างสวนกระแส จะทำให้น้ำล้างของน้ำล้างลดลงมาก จากที่อยู่ในช่วงค่าแกมมาอยู่ในช่วงกรดอ่อน เป็นผลให้ค่าสภาพค่าลดลง แต่น้ำล้างมีค่าสภาพกรด และมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.9 ถึง 2.4 เท่ากว่าที่ใช้น้ำประปา

ผลการทดสอบการยึดเกาะของสีเคลือบกับผิวชิ้นงานเหล็ก ที่มีผลึกสังกะสีฟอสเฟตเป็นตัวเชื่อม ผลการทดสอบปรากฏว่าสีเคลือบยึดติดกับผิวชิ้นงานเหล็กได้ดีมากในระดับสูงสุด คือ 5A และชิ้นงานผ่านน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 และ ก - 2 ที่ผ่านการเตรียม โดยใช้ น้ำประปาหรือน้ำเสีย เป็นน้ำล้างสวนกระแสในทุกการทดลอง พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ประสิทธิภาพการยึดเกาะของสีเคลือบกับผิวชิ้นงานเหล็ก ที่มีผลึกสังกะสีฟอสเฟตเป็นตัวกลางนั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายสังกะสีฟอสเฟต (นิสา จิตพิพัฒนกุล, 2545) ซึ่งในการทดลองนี้ ไม่มีส่วนของการทดลองใด ๆ ที่ไปรบกวนสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายสังกะสีฟอสเฟต อีกทั้งก่อนที่ชิ้นงานจะจุ่มลงในสารละลายสังกะสีฟอสเฟต จะต้องจุ่มผ่านสารละลายปรับสภาพผิวก่อน เพื่อเร่งให้เกิดผลึกสังกะสีฟอสเฟตเร็วขึ้น ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตและอบสี ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตแล้วเคลือบสี

ดังนั้นสามารถใช้น้ำเสียจากบ่อน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ไปใช้ซ้ำเป็นน้ำล้างสวนกระแสสำหรับล้างต่างแทนการใช้น้ำประปาได้ ซึ่งจะช่วยให้ปรับค่าพีเอช และค่าสภาพด่างในน้ำล้างให้ต่ำลง แต่จะทำให้ น้ำล้างมีค่าสภาพกรด และค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่จะไม่รบกวนสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายสังกะสีฟอสเฟต และไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการยึดเกาะของสีเคลือบบนผิวชิ้นงาน การใช้น้ำเสีล้างสวนกระแสแทนการใช้น้ำประปาในการล้างต่างออกจากชิ้นงาน จะทำให้ลดการใช้น้ำประปาลงได้อีก 0.83 ลบ.ม. ต่อชิ้นงาน 1,000 ตารางเมตร

#### 4.3.2 ศึกษาการนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่

##### 4.3.2.1 คุณลักษณะของน้ำ

ในระหว่างการทดลองเดินระบบบอร์โอต้นแบบ โดยใช้ระยะเวลาการเดินระบบสำหรับน้ำประปา และน้ำทิ้งอาร์โอเป็นน้ำป้อน จำนวน 50 ชั่วโมง (ประมาณสองวัน) และ 256 ชั่วโมง (ประมาณ 10 วัน) ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำ 25 และ 64 ครั้ง ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ ได้แก่ น้ำประปา น้ำทิ้งอาร์โอ และน้ำอาร์โอ ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7 (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข30 - ข35)

ตารางที่ 4.7 คุณลักษณะน้ำระหว่างการทดลองเดินระบบบอร์โอต้นแบบ

พารามิเตอร์	หน่วย	ชนิดน้ำป้อน	คุณลักษณะน้ำ		
			น้ำป้อน	น้ำอาร์โอ	น้ำรีเทนเทท
พีเอช	ไม่มีหน่วย	น้ำประปา	7.1	6.4	7.6
		น้ำทิ้งอาร์โอ	7.5	6.6	7.8
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์ต่อชม.	น้ำประปา	345	10.5	1,271
		น้ำทิ้งอาร์โอ	681	11.3	1,545
ความกระด้าง	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	น้ำประปา	129	0.5	521
		น้ำทิ้งอาร์โอ	234	0.5	590
สภาพด่าง	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	น้ำประปา	132	5.0	352
		น้ำทิ้งอาร์โอ	189	5.0	410

##### ก. น้ำป้อน

น้ำประปาที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำที่ผลิตจากน้ำผิวดิน โดยระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค จึงเปรียบเสมือนน้ำผิวดินได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นมาแล้ว ส่วนน้ำทิ้งอาร์โอ เป็นน้ำทิ้งจากระบบบอร์โอของโรงงานที่ใช้น้ำประปาเป็นน้ำป้อน ดังนั้นน้ำทิ้งอาร์โอจึงมีค่าพีเอช ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ค่าความกระด้าง และค่าสภาพด่างสูงกว่าน้ำประปา ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำประปามีค่าต่ำกว่าน้ำผิวดิน ที่ใช้ในการทดลองระบบบอร์โอของ Glucina และคณะ (2000) ซึ่งมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าในช่วง 503 ถึง 536 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ส่วนค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งอาร์โอ มีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนเข้าระบบบอร์โอ (น้ำป้อนผสมรวมกับน้ำวนกลับ) ที่ขั้นตอนแรกในชุดทดลองของ Qin และคณะ (2004) ซึ่งมีค่าประมาณ 806 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. และมีค่าใกล้เคียงกับน้ำทิ้งอาร์โอที่ออกจาก



ขั้นตอนแรกแล้วเป็นน้ำป้อนของขั้นตอนที่สองของระบบอาร์โอในชุดทดลองของ Glucina และคณะ (2000) ซึ่งมีค่าประมาณ 901 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. (จากการคำนวณสมมูลมวลในระบบ)

#### ข. น้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอ

ระบบอาร์โอที่มีการจัดระบบแบบมีการวนกลับ จะสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์แยกกลับได้ โดยนำน้ำรีเทนเททบางส่วนกลับมาผสมน้ำป้อนตามสัดส่วนที่ควบคุม ด้วยเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เหมาะสม แล้วส่งเข้าไปยังโมดูลอาร์โอ เรียกน้ำผสมนี้ว่าน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอ การเพิ่มเปอร์เซ็นต์แยกกลับ จะทำให้น้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอมีความเข้มข้นของเกลือมากขึ้น ในการทดลองนี้หาความเข้มข้นเฉลี่ยของเกลือในน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอ โดยใช้วิธีการคำนวณด้วยหลักของสมมูลมวล โดยใช้ความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำป้อน และตรวจเช็คการคำนวณด้วยความเข้มข้นของน้ำอาร์โอ ผลการคำนวณ พบว่าเมื่อใช้น้ำประปา (เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 75) และใช้น้ำทิ้งอาร์โอ เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 60) เป็นน้ำป้อน จะทำให้น้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 966 และ 1,207 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ตามลำดับ และน้ำเพอมีเอทมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 10.5 และ 11.3 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ตามลำดับ พบว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากการควบคุมค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอให้มีค่าใกล้เคียงกัน ประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ยร้อยละ 98.9 และ 99.1 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอที่ได้จากการคำนวณนี้ มีค่าใกล้เคียงกับน้ำทิ้งอาร์โอที่ออกจากระบบอาร์โอขั้นตอนแรก และเป็นน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอในขั้นตอนที่สองในชุดทดลองของ Qin และคณะ (2004) ซึ่งคำนวณได้ประมาณ 1,054 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. แต่มีค่าน้อยกว่าน้ำทิ้งอาร์โอที่ออกจากระบบอาร์โอขั้นตอนที่สอง และเป็นน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอในขั้นตอนที่สามในชุดทดลองของ Glucina และคณะ (2000) ซึ่งคำนวณได้ประมาณ 1,755 ไมโครซีเมนต์ต่อชม.

#### ค. น้ำอาร์โอ

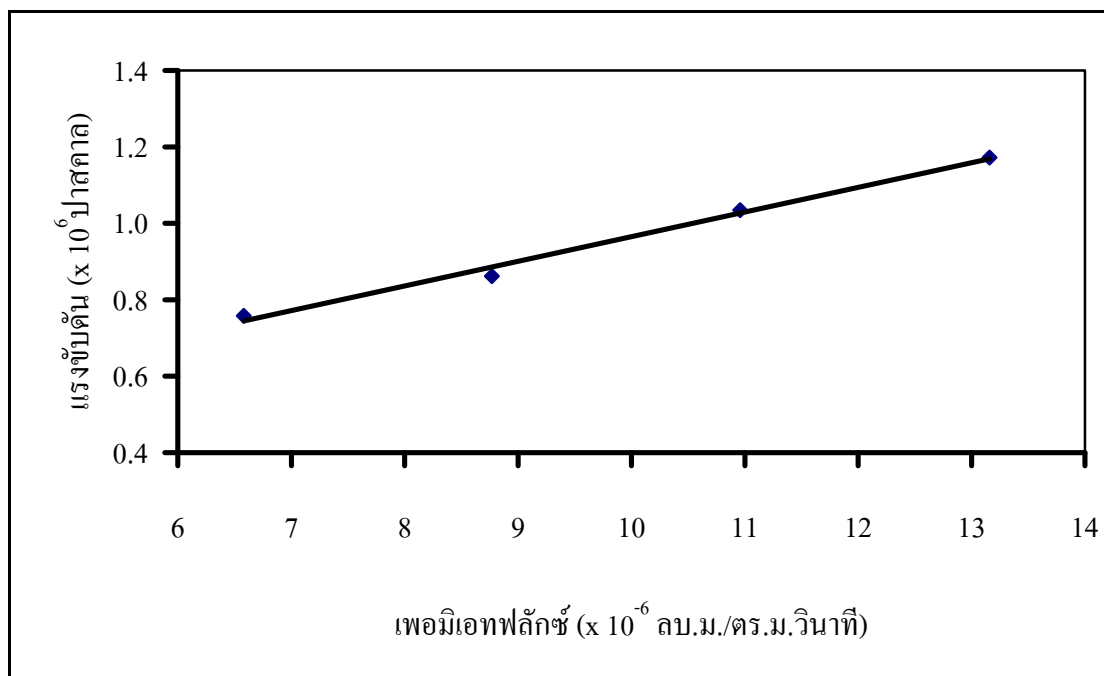
น้ำอาร์โอที่ต้องการนั้น ต้องมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าไม่เกิน 12 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้น้ำประปา และใช้น้ำทิ้งอาร์โอเป็นน้ำป้อน คุณลักษณะของน้ำอาร์โอที่วิเคราะห์ได้ในช่วงเวลาเดินระบบ มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 10.5 และ 11.3 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่โรงงานต้องการ นอกจากนี้ความกระด้างน้อยกว่า 0.5 มก./ล. as CaCO<sub>3</sub> และมีค่าพีเอช 6.4 และ 6.6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะน้ำอาร์โอใกล้เคียงกัน และจัดเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง

#### 4.3.2.2 สถานะที่เหมาะสมของระบบอาร์โอ

วิเคราะห์หาความต้านทานของอาร์โอจากสมการ (4.1) ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับแรงขับเคลื่อนของอาร์โอที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยใช้ น้ำประปา และใช้น้ำที่อาร์โอเป็นน้ำทดสอบ ผลดังแสดงในรูปที่ 4.9 สามารถคำนวณค่า R เท่ากับ  $7.55 \times 10^{13}$  ต่อเมตร ซึ่งจากการทดลองเดินระบบอาร์โอด้วยน้ำประปา และน้ำที่อาร์โอ จำนวน 50 และ 256 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้ววัดความต้านทานของเมมเบรนอาร์โอ พบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลง บ่งชี้ว่ายังไม่เกิดการอุดตัน

$$\Delta P = J \cdot \mu \cdot R \quad (4.1)$$

โดยที่ J	คือ	ฟลักซ์ของสารละลายผ่านเมมเบรน (ลบ.ม./ตร.ม.วินาที)
$\Delta P$	คือ	ผลต่างความดันที่ให้กับสารละลาย (ปาสคาล)
$\mu$	คือ	ความหนืดของสารละลาย (ปาสคาล.วินาที)
R	คือ	ความต้านทานต่อการไหลผ่าน (ต่อเมตร)



รูปที่ 4.9 เพอมีเอทฟลักซ์กับแรงขับเคลื่อนสำหรับหาความต้านทานเมมเบรนอาร์โอใหม่

### ก. ประสิทธิภาพการกักกัน

การกรองน้ำผ่านระบบอาร์โอนั้น สารละลายเกลือต่าง ๆ จะถูกกักกันออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกักกันคำนวณได้จากสมการ 2.3 ในการทดลองนี้ ใช้วิธีคำนวณสมมูลมวลสำหรับหาความเข้มข้นของเกลือที่มีอยู่ในน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอ โดยใช้ความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำป้อน และตรวจเช็คการคำนวณด้วยความเข้มข้นของน้ำอาร์โอ ผลการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบอาร์โอ

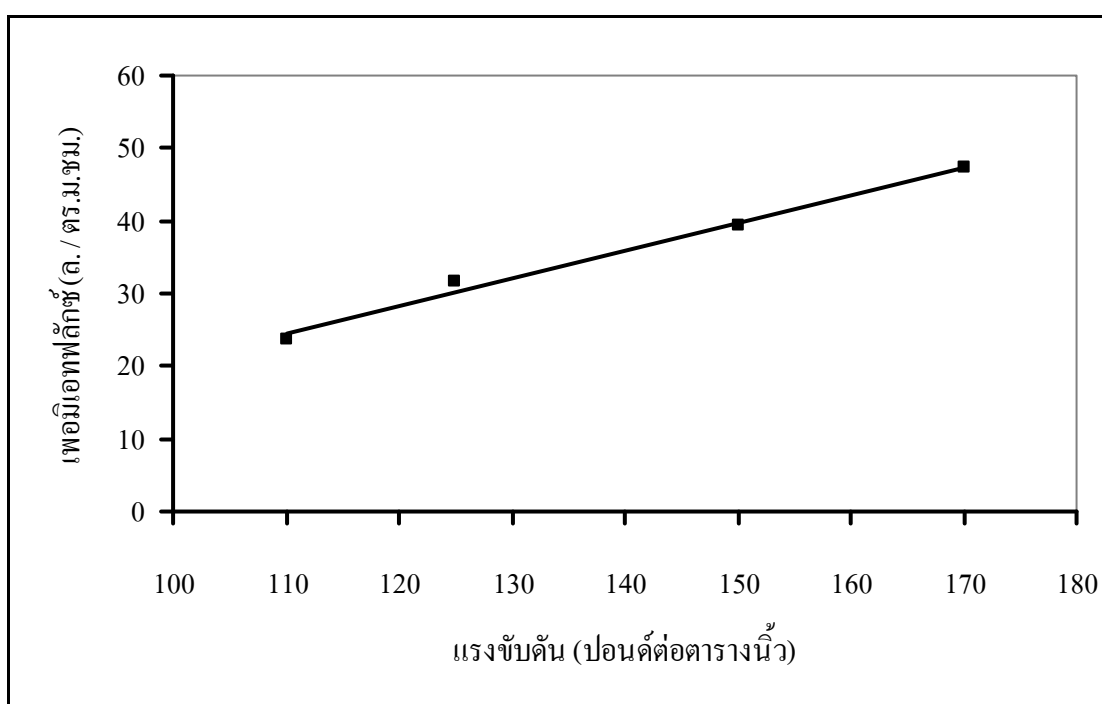
ตัวอย่าง น้ำป้อน	เปอร์เซ็นต์ แยกกลับ	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อซม.)			ความกระด้าง (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )		
		น้ำ ป้อน	น้ำ อาร์โอ	ประสิทธิ ภาพ (ร้อยละ)	น้ำ ป้อน	น้ำ อาร์โอ	ประสิทธิ ภาพ (ร้อยละ)
น้ำประปา	75	966	10.5	98.9	368	0.5	99.9
น้ำทิ้งอาร์โอ	60	1,208	11.3	99.1	418	0.5	99.9

จากตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้า และความกระด้าง เฉลี่ยประมาณร้อยละ 99.0 และ 99.9 ตามลำดับ ซึ่งอาร์โอชนิดที่ใช้ทดลองนี้ มีประสิทธิภาพการกักกันตัวถูกละลายในรูปของเกลือหนึ่งประจุ (NaCl) ที่ความเข้มข้นทดสอบ 2,000 ส่วนในล้านส่วน ได้ประมาณร้อยละ 99.5 ความกระด้างเป็นเกลือสองประจุ จึงถูกกักกันได้มากกว่า ผลการศึกษานี้ มีความสอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่มที่ใช้เมมเบรนอาร์โอชนิดเดียวกันนี้ ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าประมาณร้อยละ 97 ถึง 99 (Benito และ Ruiz, 2002; Qin และคณะ, 2004; Glucina และคณะ, 2000) ซึ่งใช้น้ำป้อน คือ น้ำล้างรวมจากกระบวนการตกแต่งโลหะสำเร็จ น้ำล้างรวมจากกระบวนการชุบนิเกิล และน้ำฝิวดินตามลำดับ

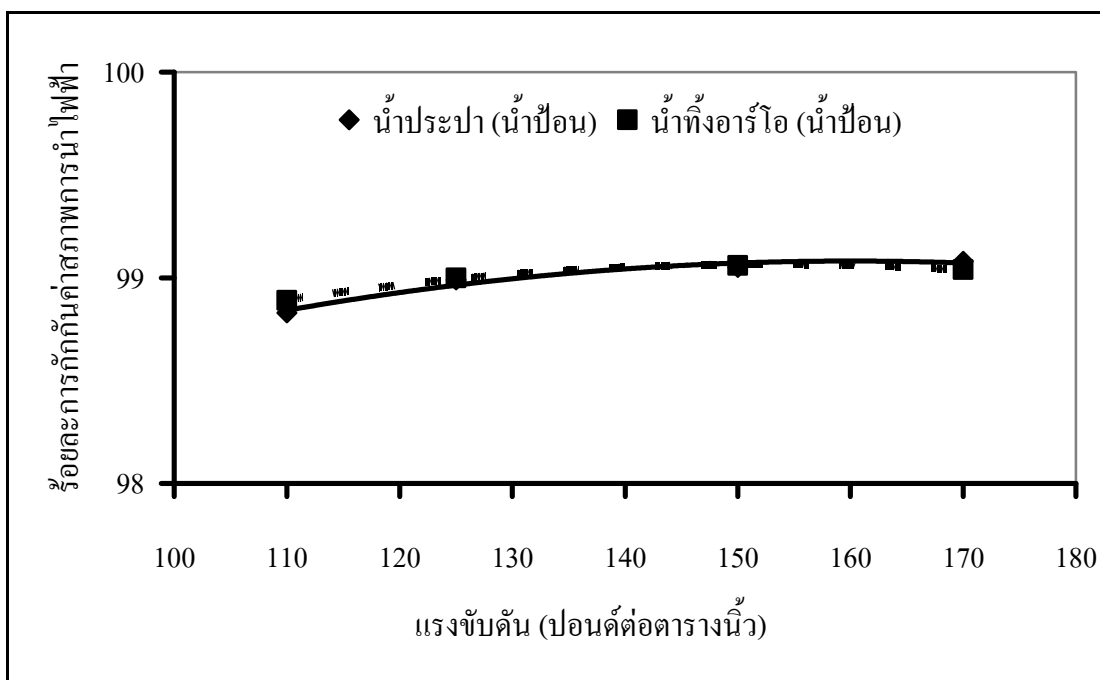
### ข. เพอมิเอทฟลักซ์

Glucina และคณะ (2000) , Qin และคณะ (2004) และระบบอาร์โอของโรงงาน ใช้เมมเบรนอาร์โอชนิดเดียวกัน และพื้นที่ผิวต่อโมดูลเท่ากับเมมเบรนอาร์โอที่ใช้ทดลอง เติมน้ำระบบอาร์โอ โดยควบคุมให้เพอมิเอทฟลักซ์ 30.0, 29.5 และ 31.7 ล./ตร.ม.ชม. ตามลำดับ

ผลการศึกษา พบว่าทั้งน้ำประปา และน้ำทิ้งอาร์โอที่ควบคุมให้อัตราน้ำป้อน และเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากัน จะใช้แรงขับเคลื่อนเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยที่แรงขับเคลื่อน 125, 150, 170 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ให้ประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกัน ประมาณร้อยละ 99 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังนั้นจึงเลือกเพอมีเอทฟลักซ์ที่ใช้พลังงานต่ำ และได้ประสิทธิภาพการกักกันสูง และใกล้เคียงกับเพอมีเอทฟลักซ์ของระบบอาร์โอของโรงงาน จึงเลือกอัตราน้ำป้อนที่ 14 ลิตรต่อนาที ควบคุมอัตราน้ำเพอมีเอทไว้ที่ 4 ลิตรต่อนาที ใช้แรงขับเคลื่อนประมาณ 125 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ 31.6 ล./ตร.ม.ชม.



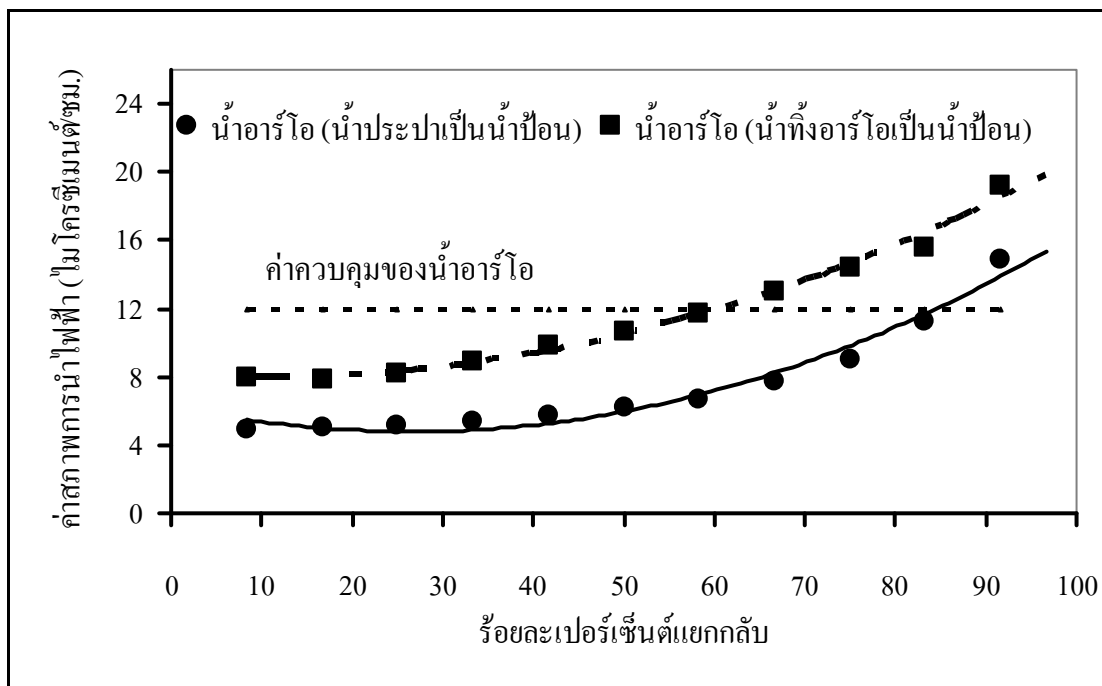
รูปที่ 4.10 ผลของแรงขับเคลื่อนต่อเพอมีเอทฟลักซ์ของระบบอาร์โอต้นแบบ สำหรับตัวอย่างน้ำประปาและน้ำทิ้งอาร์โอ



รูปที่ 4.11 ผลของแรงขับเคลื่อนต่อร้อยละการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าของระบบอาร์โอต้นแบบ

#### ค. เปอร์เซ็นต์แยกกลับ

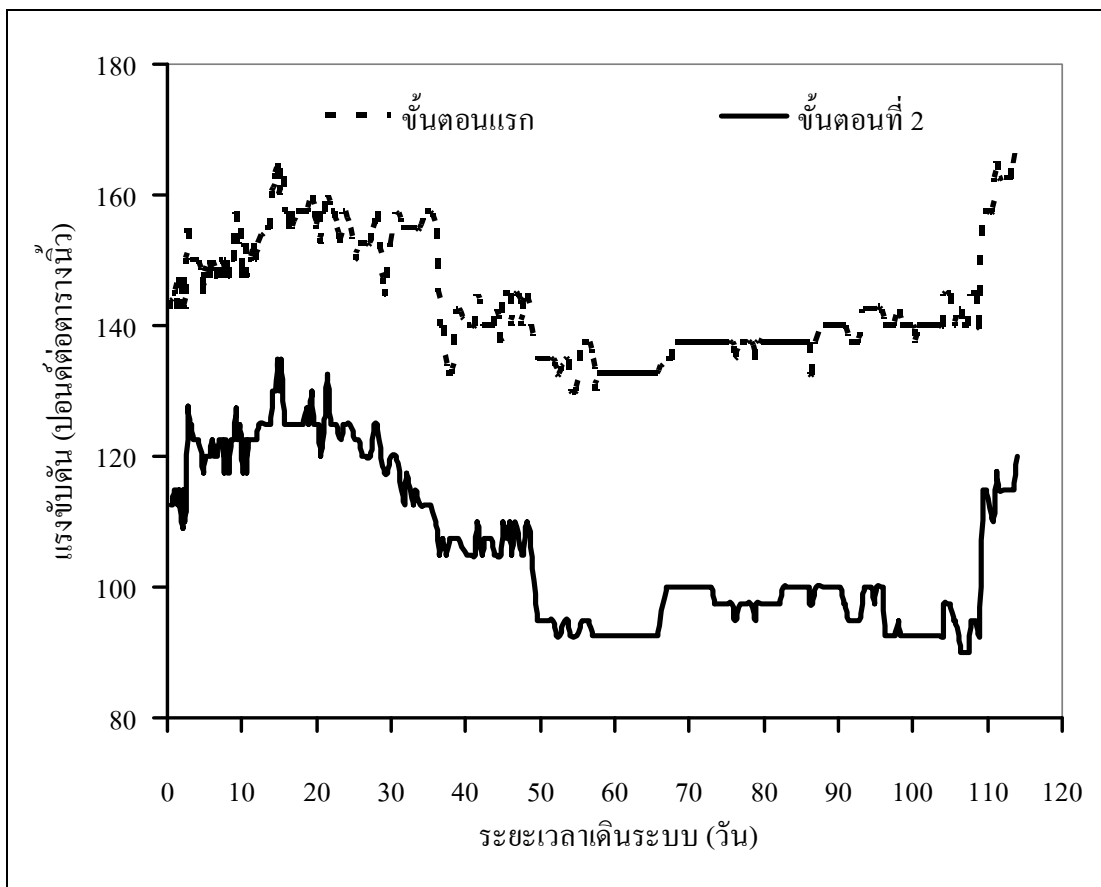
การเพิ่มเปอร์เซ็นต์แยกกลับจะทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้น้ำอาร์โอมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการกักกันมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งเมมเบรนอาร์โอที่ใช้ทดลองนี้มีประสิทธิภาพการกักกันประมาณร้อยละ 99 ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงปรับเปอร์เซ็นต์แยกกลับเพื่อเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอให้มีค่าประมาณ 1,200 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. เพื่อให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอมีค่าประมาณ 12 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. จากการศึกษา พบว่าสำหรับตัวอย่างน้ำประปา และน้ำทิ้งอาร์โอ ค่าเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เหมาะสม คือร้อยละ 85 และ 60 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แต่ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์แยกกลับอาจเปลี่ยนแปลงได้เพราะขึ้นกับคุณภาพของน้ำป้อนด้วย ดังนั้นเปอร์เซ็นต์แยกกลับจะปรับให้เหมาะสมเมื่อเดินระบบกรองแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.12 ผลของเปอร์เซ็นต์แยกกลับต่อค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอ

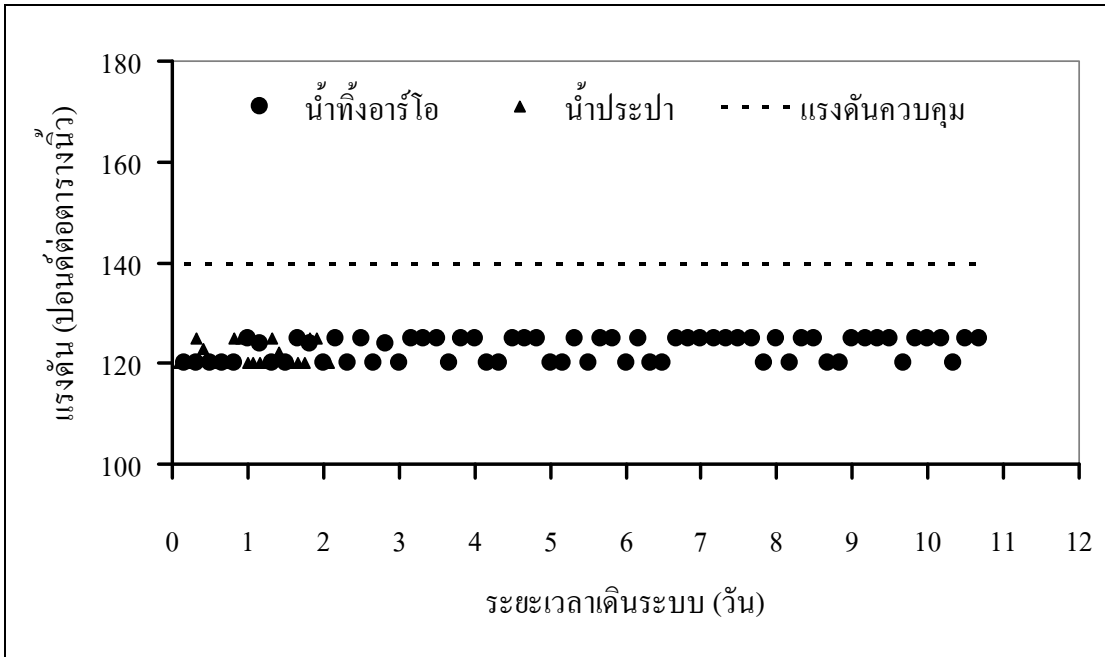
#### 4.3.2.3 การเดินระบบอาร์โอต้นแบบ

Glucina และคณะ (2000) ใช้น้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น มากรองด้วยระบบอาร์โอ จัดเรียงระบบเป็น 3 ขั้นตอนแบบไม่มีการวนกลับ โดยเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเฉลี่ย 30.0 ล./ตร.ม.ชม. พบว่าแนวโน้มการอุดตันของเมมเบรนในแต่ละขั้นตอนเป็นไปในทางเดียวกัน ส่วนระบบอาร์โอของโรงงาน ใช้น้ำประปาที่ผลิตจากน้ำผิวดินเป็นน้ำป้อน กรองผ่านระบบอาร์โอที่จัดเรียงระบบเป็น 2 ขั้นตอนแบบไม่มีการวนกลับ และควบคุมเปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 62.5 โดยเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเฉลี่ย 31.7 ล./ตร.ม.ชม. จากข้อมูลที่ทางโรงงานบันทึกเอาไว้ตั้งแต่เปลี่ยนเมมเบรนอาร์โอใหม่จนถึงระยะเวลาเดินระบบสะสม 115 วัน พบการเปลี่ยนแปลงของแรงขับดันในแต่ละขั้นตอนเป็นไปในทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งการทดลองนี้ใช้น้ำทิ้งอาร์โอมากรองผ่านระบบอาร์โอชุดใหม่ จึงเปรียบเสมือนกับเป็นการเพิ่มขั้นตอนการกรองของระบบอาร์โอชุดเดิมที่มีอยู่แล้ว ซึ่งคาดว่าระบบอาร์โอต้นแบบจะมีแนวโน้มการอุดตันคล้ายกับระบบอาร์โอของโรงงาน ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงไม่ได้ทดสอบหาระยะเวลาที่ควรจะต้องทำความสะอาดระบบอาร์โอ

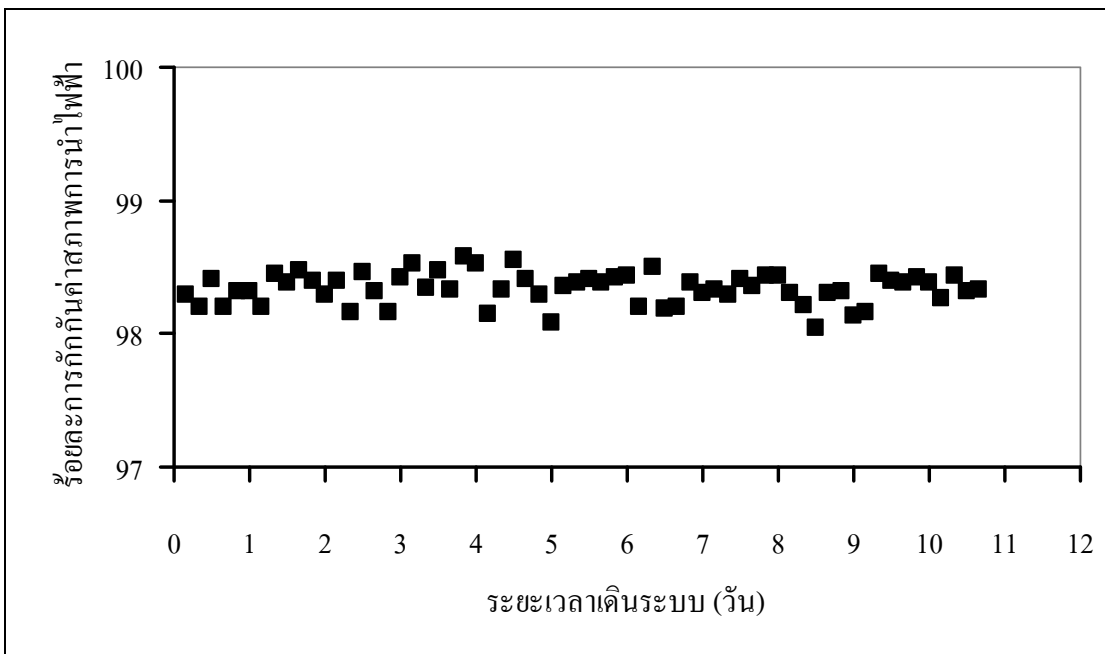


รูปที่ 4.13 แรงขับดันของน้ำในระบบอาร์โอของโรงงาน

การเดินระบบอาร์โอต้นแบบนั้น ได้ควบคุมเพอมีอเทฟลักซ์ให้มีค่าคงที่ 31.6 ล./ตร.ม.ชม. และเปอร์เซ็นต์แยกกลับสำหรับน้ำป้อนที่เป็นน้ำประปา และน้ำทิ้งอาร์โอเท่ากับ ร้อยละ 75 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งจะเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอให้มีค่าประมาณ 1,200 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ดังนั้นน้ำป้อนทั้งที่ใช้น้ำประปา และน้ำทิ้งอาร์โอจะมีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน ลักษณะการเดินระบบจะเป็นช่วง ๆ แต่ระหว่างทำการทดสอบเดินระบบอาร์โอจะไม่มีการล้างทำความสะอาดเมมเบรนอาร์โอ ช่วงระยะเวลาทดสอบประมาณ 60 วัน และระยะเวลาเดินระบบสะสมสำหรับน้ำประปา และน้ำทิ้งน้ำอาร์โอ คือ 50 ชั่วโมง (ประมาณสองวัน) และ 256 ชั่วโมง (ประมาณ 10 วัน) ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่าแรงขับดันของน้ำมีแนวโน้มคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ร้อยละการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าของระบบ (เทียบน้ำอาร์โอกับน้ำป้อน) ค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



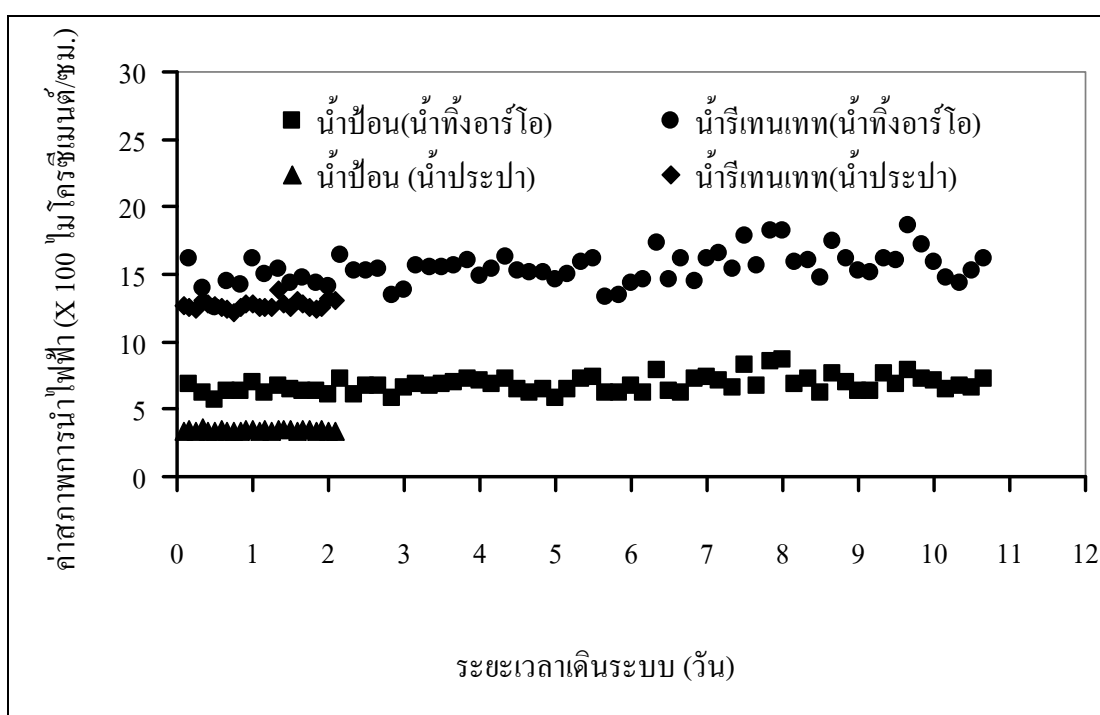
รูปที่ 4.14 แรงขับเคลื่อนของน้ำในระบบอาร์โอต้นแบบ



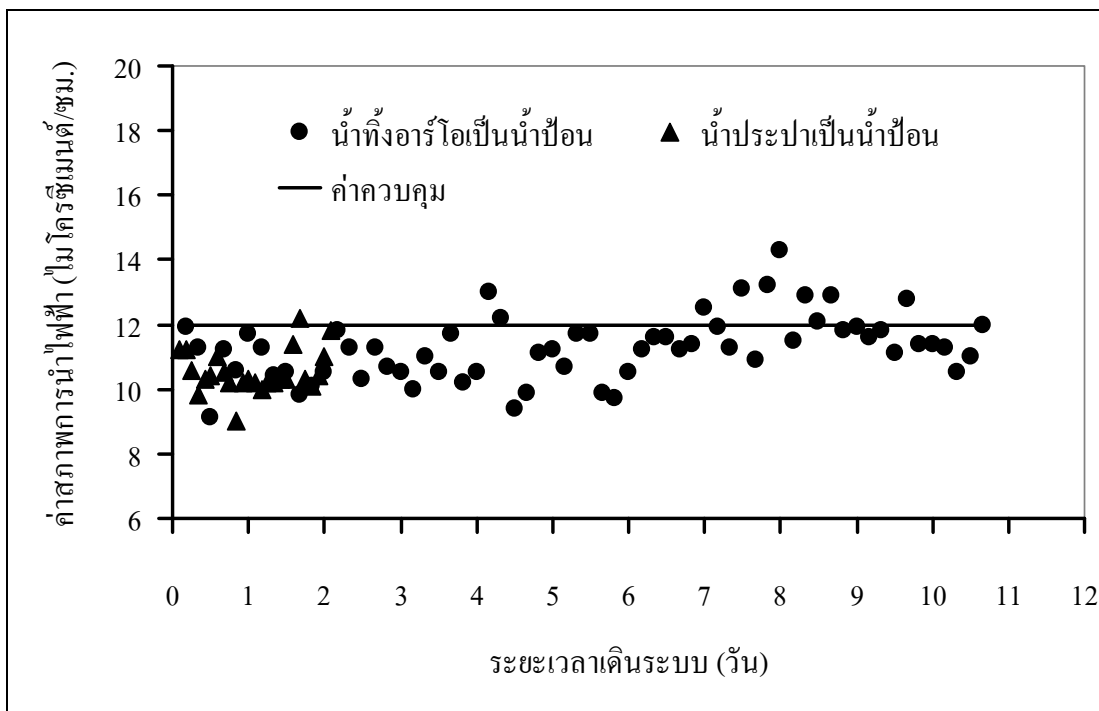
รูปที่ 4.15 ร้อยละการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าของระบบอาร์โอต้นแบบ (น้ำที่อาร์โอ)



ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งอาร์โอ มีความแปรปรวน ส่งผลให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในระบบ ได้แก่ น้ำรีเทนเทท น้ำอาร์โอ แปรปรวนตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ความแปรปรวนดังกล่าว จะแปรเปลี่ยนไปในทางเดียวกัน เนื่องจากหลักของสมดุลมวล ถ้าน้ำทิ้งอาร์โอมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเกินกว่า 681 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. จะมีผลทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนเข้าระบบอาร์โอ และน้ำอาร์โอมีค่าเกินกว่า 1,200 และ 12 ไมโครซีเมนต์ต่อชม. ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นไปตามหลักสมดุลมวล และประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าของเมมเบรนอาร์โอ



รูปที่ 4.16 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนและรีเทนเททในระบบบอร์โอต้นแบบ



รูปที่ 4.17 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอในระบบบอร์โอต้นแบบ

#### 4.3.2.4 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตน้ำอาร์โอ

น้ำทิ้งอาร์โอสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบบอร์โออีกชุดหนึ่งได้ ทั้งนี้ปริมาณน้ำอาร์โอที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ขึ้นอยู่กับค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งอาร์โอ และน้ำอาร์โอ สำหรับการศึกษานี้ น้ำประปา และน้ำทิ้งอาร์โอมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าในช่วง  $345 \pm 2$  และ  $681 \pm 15$  ไมโครซีเมนต์ต่อซม. ตามลำดับ สามารถผลิตเป็นน้ำอาร์โอได้ร้อยละ 75 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งน้ำอาร์โอมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าในช่วง  $10.5 \pm 0.3$  และ  $11.3 \pm 0.2$  ไมโครซีเมนต์ต่อซม. ตามลำดับ โดยใช้แรงขับเคลื่อนเท่ากัน คือ 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลิตน้ำอาร์โอได้เท่ากัน คือ 240 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 5,760 ลิตรต่อวัน แต่มีปริมาณน้ำที่ออกจากระบบไม่เท่ากัน คือ ถ้าใช้น้ำประปาผลิตจะทิ้งน้ำ 1,920 ลิตรต่อวัน (ต้องใช้น้ำประปาป้อนระบบเท่ากับ 7,680 ลิตรต่อวัน) ถ้าใช้น้ำทิ้งอาร์โอผลิตจะทิ้งน้ำ 3,840 ลิตรต่อวัน (ต้องใช้น้ำทิ้งอาร์โอป้อนระบบเท่ากับ 9,600 ลิตรต่อวัน) แต่เนื่องจากน้ำประปามีต้นทุนประมาณ 22 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่น้ำทิ้งอาร์โอไม่มีต้นทุนค่าน้ำป้อน ดังนั้นการใช้น้ำประปามาผลิตน้ำอาร์โอจึงมีค่าใช้จ่ายน้ำป้อนประมาณ 169 บาทต่อน้ำอาร์โอ 5.76 ลูกบาศก์เมตร หรือ 29.34 บาทต่อน้ำอาร์โอหนึ่งลูกบาศก์เมตร สำหรับต้นทุนด้านอื่น ๆ จะเท่ากัน คือ ประมาณ 322 บาทต่อน้ำอาร์โอ 5.76 ลูกบาศก์เมตร หรือ 55.84 บาท

ต่อน้ำอาร์โอหนึ่งลูกบาศก์เมตร รายละเอียดการประมาณการต้นทุนการผลิตน้ำอาร์โอจากน้ำประปาด้วยระบบอาร์โอต้นแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การประมาณการต้นทุนการผลิตน้ำอาร์โอจากน้ำประปาด้วยระบบอาร์โอต้นแบบ

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
<b>ต้นทุนน้ำป้อน (ประเมินหนึ่งวัน)</b>				
น้ำประปาป้อนระบบ	7.7	ลบ.ม.	22	169
รวมค่าใช้จ่ายน้ำป้อนต่อน้ำอาร์โอ 5.8 ลบ.ม.ต่อวัน				169
ต้นทุนน้ำป้อนต่อน้ำอาร์โอหนึ่งลบ.ม.	29 บาท / ลบ.ม.			
<b>ต้นทุนอื่น ๆ (ประเมินหนึ่งวัน)</b>				
ไฟฟ้าสำหรับขับปั๊มสูบน้ำ	54	หน่วย	3	162
ค่าเสื่อมราคาของเมมเบรนอาร์โอที่เปลี่ยน ทุก ๆ 60 เดือน จำนวน 1 ท่อน ๆ ละ 12,000 บาท (6.7 บาท/วัน)	1	วัน	6.7	6.7
ค่าเสื่อมราคาของชุดกรองคาร์บอน 5 ไมครอน ที่เปลี่ยนทุก ๆ 3 เดือน จำนวน 1 ท่อน ๆ ละ 250 บาท (2.8 บาท/วัน)	1	วัน	2.8	2.8
ค่ากรด - ด่างสำหรับล้างเมมเบรนอาร์โอทุก ๆ 3 เดือน ครั้งละ 15 บาท (0.2 บาท/วัน)	1	วัน	0.2	0.2
ค่าพนักงานดูแลเครื่อง	1	คน	150	150
รวมค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ต่อน้ำอาร์โอ 5.8 ลบ.ม.ต่อวัน				322
ต้นทุนอื่น ๆ ต่อน้ำอาร์โอหนึ่งลบ.ม.	56 บาท / ลบ.ม.			
<b>ต้นทุนรวม</b>				
ต้นทุนรวมต่อน้ำอาร์โอหนึ่งลบ.ม.	85 บาท / ลบ.ม.			

หมายเหตุ: คำนวณจากการผลิตอาร์โอ 5.8 ลบ.ม.ต่อวัน ที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 75

#### 4.3.2.5 การลดการใช้น้ำประปาจากการนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่

การนำน้ำทิ้งอาร์โอจากระบบอาร์โอชุดแรกกลับมาใช้ใหม่ จึงมีความเป็นไปได้ในทางเทคนิค และทางด้านเศรษฐศาสตร์ ลดต้นทุนการผลิตน้ำอาร์โอลงได้ประมาณ 29 บาทต่อลบ.ม. เมื่อพิจารณาระบบอาร์โอชุดแรกร่วมกับระบบอาร์โอชุดใหม่ พบว่าสามารถผลิตน้ำอาร์โอโดยรวมประมาณร้อยละ 85 คือ ระบบอาร์โอชุดแรกร้อยละ 62.5 ระบบอาร์โอชุดใหม่ร้อยละ 22.5 (ร้อยละ 60 ของน้ำทิ้งอาร์โอ) เป็นผลทำให้มีน้ำทิ้งอาร์โอโดยรวมประมาณร้อยละ 15 (ร้อยละ 40 ของน้ำทิ้งอาร์โอ) ซึ่งจากรูปที่ 4.1 จะเหลือน้ำทิ้งอาร์โอเพียง 0.32 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชั้นงาน 1,000 ตร.ม. (จากที่มีน้ำทิ้งอาร์โอจากระบบอาร์โอชุดแรก 1.10 ลบ.ม.) มีผลให้ลดปริมาณการใช้น้ำประปา 0.78 ลบ.ม. ต่อพื้นที่ผิวชั้นงาน 1,000 ตร.ม.

#### 4.3.3 ศึกษาการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

##### 4.3.3.1 คุณลักษณะของน้ำ

ในระหว่างการศึกษาการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ เก็บตัวอย่างน้ำ เพื่อวิเคราะห์ค่าความขุ่นของน้ำ ได้แก่ น้ำเสีย น้ำทิ้ง น้ำผ่านกรองคาร์บอนิก และน้ำผ่านกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 (รายละเอียดผลวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข36)

ตารางที่ 4.10 ค่าความขุ่นของน้ำ

ตัวอย่างน้ำ	ค่าความขุ่น (NTU)
น้ำเสีย	75 - 359
น้ำทิ้ง	5 - 16
น้ำผ่านกรองคาร์บอนิก	2.6 - 2.9
น้ำผ่านกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน	0.7 - 1.4

##### ก. น้ำเสีย

น้ำเสียเป็นน้ำล้างรวม เกิดขึ้นจากการล้างชั้นงาน และจากการล้างทำความสะอาด สะอาดบ่อน้ำล้าง ลักษณะของน้ำเสียในการทดลองนี้ มีความขุ่นสูง คือ 75 - 359 NTU มีสภาพเป็นกลาง แต่มีสภาพการนำไฟฟ้าไม่สูงมาก คือ 480 - 623 ไมโครซีเมนต์ต่อซม. ความกระด้างไม่สูงมาก คือ 80 - 280 มก./ล. as CaCO<sub>3</sub>

#### ข. น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียเมื่อเติมปูนขาว เพื่อก่อตะกอนแล้วทิ้งให้ตกตะกอน น้ำส่วนใสจะมีความขุ่นลดลงเหลือ 5 - 16 NTU แต่มีสภาพเป็นด่าง (พีเอชเฉลี่ย 11.6) มีสภาพการนำไฟฟ้า และมีค่าความกระด้างเพิ่มขึ้น เมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริก เพื่อปรับสภาพให้เป็นกลาง พบว่ามีค่าสภาพการนำไฟฟ้า 1,356 - 1,932 ไมโครซีเมนต์ต่อซม. และความกระด้าง 370 - 530 มก./ล. as CaCO<sub>3</sub>

#### ค. น้ำผ่านกรองคาร์ทริก

น้ำทิ้งที่ผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลาง แล้วกรองผ่านชุดกรองแผ่นดิสก์ แล้วกรองผ่านชุดกรองคาร์ทริกที่มีช่องเปิดขนาด 100 และ 5 ไมโครเมตร ตามลำดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อกักกันอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นชุดกรองเบื้องต้นก่อนส่งน้ำผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน น้ำที่ผ่านชุดกรองคาร์ทริกมีความขุ่น 2.6 - 2.9 NTU จัดเป็นน้ำที่มีความใส เพราะมีความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU ตามมาตรฐานน้ำประปาการประปานครหลวง สามารถนำไปใช้เป็นน้ำล้างทำความสะอาดบ่อน้ำล้างแทนการใช้น้ำประปาได้

#### ง. น้ำผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลองนี้ สามารถกักกันสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับหรือใหญ่กว่า 6,000 - 30,000 ดาลตัน อย่างน้อยร้อยละ 90 น้ำเพอมีเอทมีความขุ่น 0.7 - 1.4 NTU ซึ่งใกล้เคียงกับความขุ่นของน้ำทิ้งอาร์โอของโรงงาน และน้ำประปา คือ 0.5 - 1.2 NTU และ 0.7 - 1.1 NTU ตามลำดับ และใกล้เคียงกับน้ำเพอมีเอทจากการทดลองของ Kim และคณะ (2002) คือ 0.6 - 1.2 NTU แต่ระบบอัลตราฟิลเตรชันไม่มีคุณสมบัติในการกักกันสารละลาย แต่มีความเหมาะสมสำหรับเป็นชุดบำบัดเบื้องต้นของระบบอาร์โอ ดังนั้นน้ำเพอมีเอทยังคงมีค่าสภาพการนำไฟฟ้ามากกว่าน้ำทิ้งอาร์โอ และมีความกระด้างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมปูนขาว จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นน้ำอาร์โอ

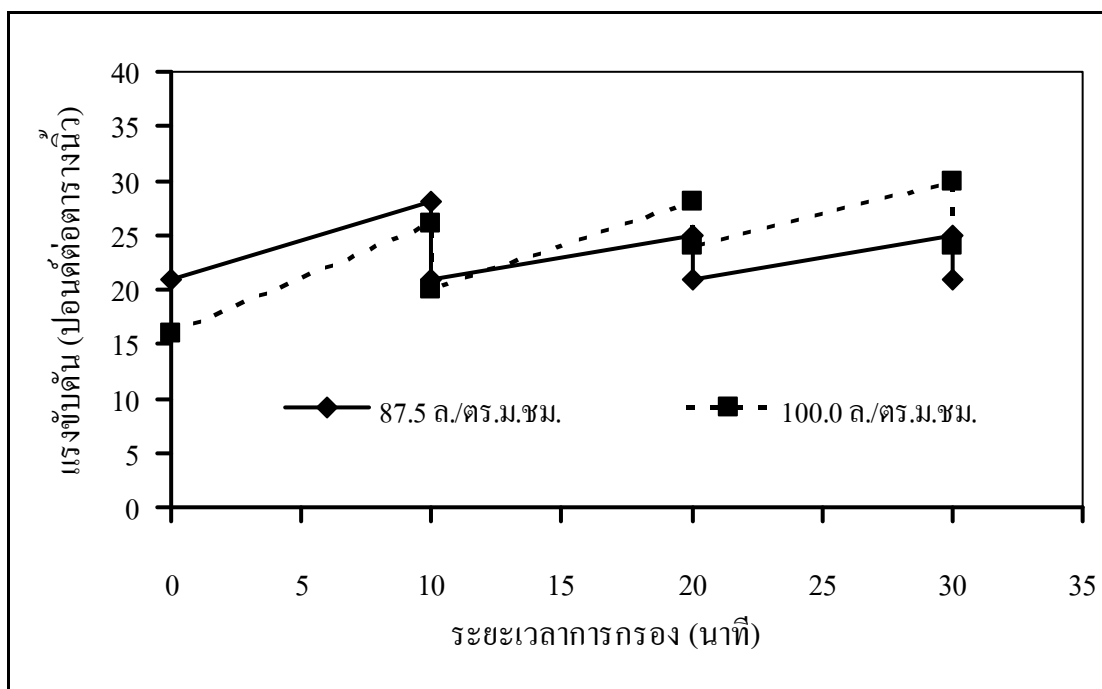
#### 4.3.3.2 ความเหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชัน

การทดลองของ Qin และคณะ (2003) พบว่าขนาดช่องเปิดของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน มีผลต่อสภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำ คือ ขนาดช่องเปิด (MWCO) 13,000, 50,000 และ 100,000 จะได้สภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำสะอาด 10.3 37.9 และ 16.6 ล./ตร.ม. ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ตามลำดับ สำหรับในการทดลองนี้ ใช้เมมเบรนที่มี MWCO 6,000 - 30,000 ทดสอบสภาพการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำสะอาด (น้ำประปา) เท่ากับ 8.3 ล./ตร.ม. ชม. (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็น

ผลวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของแรงขับเคลื่อนน้ำผ่านเมมเบรนของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยควบคุมเปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 50 เมื่อควบคุมเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 87.5 ล./ตร.ม. ชม. พบว่าทุก 10 นาทีแรงขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 19 - 33 และล้างทำความสะอาดด้วยการล้าง

ย่อน 60 - 75 นาที เมื่อควบคุมเพอมีอเทฟลักซ์เท่ากับ 100.0 ล./ตร.ม.ชม. พบว่าทุก 10 นาทีแรงขับดันเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 - 63 และล้างทำความสะอาดด้วยการล้างย้อน 30 - 45 นาที ส่วนเมื่อควบคุมเพอมีอเทฟลักซ์เท่ากับ 112.5 ล./ตร.ม.ชม. พบว่าทุก 3 นาทีแรงขับดันเพิ่มขึ้นร้อยละ 8 - 17 และล้างทำความสะอาดด้วยการล้างย้อน 30 นาที ลักษณะการเพิ่มขึ้นของแรงขับดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 การล้างย้อนเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ใช้เวลานานกว่าระยะเวลาการกรองมาก ซึ่งไม่มีความเหมาะสมทั้งในด้านของระยะเวลา และใช้ปริมาณน้ำล้างย้อนมากกว่าปริมาณน้ำที่กรองได้ ทั้งนี้เกิดจากอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตรได้เข้าไปอุดตันสะสมอยู่ในรูพรุนของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีเคมี - กายภาพ เมื่อปรับค่าพีเอชสามารถนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้ ด้วยการนำมารองผ่านคาร์ทริกที่มีขนาดช่องเปิด 5 ไมโครเมตร ซึ่งจะมีความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU แล้วสามารถนำไปใช้เป็นน้ำล้างทำความสะอาดแทนการใช้น้ำประปา เช่น ล้างบ่อน้ำล้างได้



รูปที่ 4.18 แรงขับดันน้ำผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่เปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 50

## 4.4 ประเมินความเป็นไปได้

### 4.4.1 ลดการใช้น้ำในระบบล้างสวนกระแส

จากการศึกษาคุณลักษณะน้ำล้างในระบบการล้างสวนกระแสจำนวนสองชุด คือ ชุดที่หนึ่ง เป็นระบบล้างสวนกระแสใช้สำหรับการล้างต่าง (มีการล้างสองขั้นตอน ๆ ละหนึ่งบ่อน้ำล้าง) และชุดที่สอง เป็นระบบล้างสวนกระแสใช้สำหรับล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต (มีการล้างสี่ขั้นตอน ๆ ละหนึ่งบ่อน้ำล้าง) ซึ่งใช้วิธีการล้างด้วยหัวฉีดสเปรย์ การล้างสวนกระแสในแต่ละชุดจะปล่อยน้ำล้างใหม่ลงไปบ่อน้ำล้างสุดท้าย แล้วไหลกลับไปยังบ่อน้ำล้างที่อยู่ลำดับก่อนหน้า แล้วไหลล้นทั้งออกจากบ่อน้ำล้างบ่อแรกอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราคงที่ โดยในแต่ละวันหลังหยุดการผลิตจะปล่อยน้ำในบ่อน้ำล้างในแต่ละบ่อทิ้งไป แล้วเติมน้ำใหม่ ซึ่งใช้น้ำประปา และน้ำอาร์โอเทียบต่อพื้นที่ผิวชิ้นงานเป็นปริมาณ 2.56 และ 1.00 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. ตามลำดับ จากการศึกษา พบว่าความปนเปื้อนของสารละลายเคมีในน้ำล้าง จะมีแนวโน้มคงที่ตามหลักของสมมูลมวล จึงไม่มีความจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างใหม่ ซึ่งจะทำให้ลดการใช้น้ำสำหรับเปลี่ยนถ่ายในบ่อน้ำล้างลงได้ ส่งผลทำให้ลดปริมาณน้ำประปาได้ 4.16 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. ลดน้ำอาร์โอได้ 1.00 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. ลดน้ำทิ้งอาร์โอ 0.60 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. ลดปริมาณน้ำเสีย 3.56 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. ดังนั้นจึงประเมินความเป็นไปได้ดังนี้

#### ก. ความเป็นไปได้ทางเทคนิค

ไม่ทำการเปลี่ยนน้ำในบ่อน้ำล้างทุกบ่อทิ้ง แต่ควบคุมอัตราน้ำล้างสวนกระแสให้คงที่เพื่อรักษาระดับความปนเปื้อนของสารละลายเคมีในน้ำล้าง โดยสามารถดำเนินการได้ทันทีไม่มีการปรับแต่งกระบวนการใด ๆ ในกระบวนการผลิต

#### ข. ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

โรงงานตัวอย่างผลิตชิ้นงานประมาณ 3,498 ตร.ม./วัน ถ้าในหนึ่งปีดำเนินการ 300 วัน จะผลิตชิ้นงานได้ประมาณ 1,049,400 ตร.ม./ปี ลดการใช้น้ำประปา 4,366 ลบ.ม./ปี และลดการใช้น้ำอาร์โอ 1,049 ลบ.ม./ปี ลดปริมาณน้ำเสีย 3,736 ลบ.ม./ปี ดังนั้นจะประมาณค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการลดการใช้น้ำได้ประมาณ 185,217 บาท/ปี และการบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 160,648 บาท/ปี รวมค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้ประมาณ 345,865 บาท/ปี รายละเอียดการประมาณการ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

#### ค. ความเป็นไปได้ทางสิ่งแวดล้อม

สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปา 4,366 ลบ.ม./ปี และลดปริมาณการเกิดน้ำเสียได้ 3,736 ลบ.ม./ปี

ตารางที่ 4.11 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการลดการใช้น้ำในระบบล้างสวนกระแส

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
<b>1. ประหยัดค่าใช้จ่ายการใช้น้ำต่อปี</b>				
ปริมาณน้ำประปา	4,366	ลบ.ม.	22	96,052
ปริมาณน้ำอาร์โอ	1,049	ลบ.ม.	85	89,165
สามารถประหยัดค่าน้ำได้				185,217
<b>2. ประหยัดค่าใช้จ่ายการบำบัดน้ำเสียต่อปี</b>				
ปริมาณน้ำเสีย	3,736	ลบ.ม.	43	160,648
- ใ้ปูนขาว 0.5 กก./ลบ.ม. ราคา กิโลกรัมละ 7 บาท ดังนั้นลดค่าปูนขาว 3.5 บาท/ลบ.ม.				
- ค่ากำจัดกากตะกอนอันตราย 15 กก./ลบ.ม. ราคา กิโลกรัมละ 2.2 บาท (ไม่รวมค่าขนส่งไปยังศูนย์กำจัดกากแสมดำ) ดังนั้นลดค่ากำจัดกาก 33 บาท/ลบ.ม.				
- ใช้ไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์.ชั่วโมง/ลบ.ม. ราคา กิโลวัตต์.ชั่วโมงละ 3 บาท ดังนั้นลดค่าไฟฟ้า 6.6 บาท/ลบ.ม. รวมค่าใช้จ่ายที่ลดได้ 43 บาท/ลบ.ม.				
<u>หมายเหตุ</u> : ประมาณการจากข้อมูลของโรงงาน ตัวอย่าง				
<b>รวมค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปี</b>				<b>345,865</b>

#### 4.4.2 ล้างสวนกระแสบนนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ

จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ พบว่าน้ำเสียที่ไหลล้นทิ้งออกจากระบบการล้างสวนกระแสชุดที่สอง ซึ่งเป็นระบบล้างสวนกระแสใช้สำหรับล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต (มีการล้างสี่ขั้นตอน ๆ ละหนึ่งบ่อน้ำล้าง) จะสามารถนำมาใช้เป็นน้ำล้างสวนกระแสที่ระบบการล้างสวนกระแส ชุดที่หนึ่งได้ ซึ่งเป็นระบบล้างสวนกระแสใช้สำหรับการล้างต่าง (มีการล้างสองขั้นตอน ๆ หนึ่งบ่อน้ำล้าง) โดยจะช่วยลดค่าสภาพต่างในบ่อน้ำล้าง และไม่ทำให้ประสิทธิภาพการ



ขีดคิดของสปีนผิวชิ้นงานลดลง จะสามารถลดการใช้น้ำประปา และลดปริมาณน้ำเสียลงได้ 0.83 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. ดังนั้นจึงประเมินความเป็นไปได้ดังนี้

ก. ความเป็นไปได้ทางเทคนิค

นำน้ำไหลล้นทิ้งออกจากบ่อน้ำล้างแรกของระบบล้างสวนกระแสใช้สำหรับล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตไปใช้ต่อเนื่องโดยเติมเข้าที่บ่อน้ำล้างสุดท้ายของระบบล้างสวนกระแส ใช้สำหรับการล้างต่าง โดยใช้ท่อพีวีซีขนาดสองนิ้ว ระยะความยาวประมาณห้าเมตร เชื่อมระหว่างบ่อน้ำล้าง

ข. ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

โรงงานตัวอย่างผลิตชิ้นงานประมาณ 3,498 ตร.ม./วัน ถ้าในหนึ่งปีดำเนินการ 300 วัน จะผลิตชิ้นงานได้ประมาณ 1,049,400 ตร.ม./ปี ลดการใช้น้ำประปาสำหรับระบบล้างสวนกระแสในการล้างต่างประมาณ 871 ลบ.ม./ปี ดังนั้นจะประมาณค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการใช้น้ำได้ประมาณ 19,162 บาท/ปี และการบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 37,453 บาท/ปี รวมค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้ประมาณ 56,615 บาท/ปี โดยมีค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบท่อประมาณ 360 บาท ซึ่งจะคืนทุนภายใน 2 วัน (คำนวณจากการดำเนินงาน 300 วัน/ปี) รายละเอียดการประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุง และค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

ค. ความเป็นไปได้ทางสิ่งแวดล้อม

สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปา 871 ลบ.ม./ปี และลดปริมาณการเกิดน้ำเสียได้ 871 ลบ.ม./ปี

ตารางที่ 4.12 ประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุงสำหรับนำน้ำเสียจากระบบการล้างสวนกระแสแบบหลายขั้นตอนมาใช้ซ้ำ

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
<b>ค่าดำเนินการปรับปรุง</b>				
- ค่าต่อท่อพีวีซีขนาดสองนิ้ว ระยะความยาวประมาณห้าเมตร	2	ท่อน	140	280
- ค่าอุปกรณ์รวมค่าแรง ร้อยละ 30 ของราคาท่อ	1	เหมา	80	80
<b>รวมค่าปรับปรุง</b>				<b>360</b>

ตารางที่ 4.13 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการนำน้ำเสียจากระบบการล้างสวนกระแสแบบหลายขั้นตอนมาใช้ซ้ำ

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
1. ประหยัดค่าใช้จ่ายการใช้น้ำต่อปี ปริมาณน้ำประปา	871	ลบ.ม.	22	19,162
2. ประหยัดค่าใช้จ่ายการบำบัดน้ำเสียต่อปี ปริมาณน้ำเสีย	871	ลบ.ม.	43*	37,453
<b>รวมค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปี</b>				<b>56,615</b>

\*ประมาณการต้นทุนการบำบัดน้ำเสียดังรายการจากตารางที่ 4.11

#### 4.4.3 การนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่

น้ำทิ้งอาร์โอ และน้ำประปาสามารถผลิตน้ำอาร์โอได้ร้อยละ 60 และ 75 ตามลำดับ เมื่อคำนวณด้วยหลักสมดุลอัตราการไหล พบว่าระบบอาร์โอต้นแบบสามารถเพิ่มการผลิตน้ำอาร์โอโดยรวมอีกร้อยละ 22.5 คือ เพิ่มจากร้อยละ 62.5 เป็นร้อยละ 85 ดังนั้นจะสามารถลดการใช้น้ำประปาสำหรับผลิตน้ำอาร์โอเทียบต่อพื้นที่ผิวชิ้นงานเป็นปริมาณ 0.78 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. และนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ได้ประมาณ 0.66 ลบ.ม./1,000 ตร.ม. ซึ่งมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าที่ใช้น้ำประปาผลิต 29 บาท/ลบ.ม. ดังนั้นจึงประเมินความเป็นไปได้ดังนี้

##### ก. ความเป็นไปได้ทางเทคนิค

นำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอชุดใหญ่ที่มีอยู่เดิมมาผลิตเป็นน้ำอาร์โอ แล้วเดิมกลับเข้าไปรวมกับน้ำอาร์โอจากระบบอาร์โอชุดใหญ่ที่ถึงพักน้ำอาร์โอ โดยติดตั้งระบบอาร์โอที่มีอัตราการผลิตน้ำอาร์โอ 240 ลิตรต่อชั่วโมง

##### ข. ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

โรงงานตัวอย่างผลิตชิ้นงานประมาณ 3,498 ตร.ม./วัน ถ้าในหนึ่งปีดำเนินการ 300 วัน จะผลิตชิ้นงานได้ประมาณ 1,049,400 ตร.ม./ปี ลดการใช้น้ำประปาสำหรับผลิตน้ำอาร์โอประมาณ 819 ลบ.ม./ปี นำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ได้ 693 ลบ.ม./ปี (เนื่องจากมีน้ำทิ้งอาร์โอประมาณ 1,154 ลบ.ม./ปี) ดังนั้นจะประมาณค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการลดการใช้น้ำประปาได้ประมาณ 18,018 บาท/ปี และประหยัดค่าใช้จ่ายจากการนำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ประมาณ 20,097 บาท/ปี รวมค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้ประมาณ 38,115 บาท/ปี โดยมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

ระบบบอร์โอประมาณ 160,000 บาท ซึ่งจะคืนทุนภายใน 4.2 ปี (คำนวณจากการดำเนินงาน 300 วัน/ปี) นอกจากนี้ถ้านำน้ำทิ้งบอร์โอกลับมาใช้ใหม่ให้มากขึ้น จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น และจะคืนทุนได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระบบบอร์โอดันแบบมีความสามารถผลิตน้ำบอร์โอได้ประมาณ 1,728 ลบ.ม./ปี (5.76 ลบ.ม./วัน) รายละเอียดการประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุง และค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

ก. ความเป็นไปได้ทางสิ่งแวดล้อม

สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ 819 ลบ.ม./ปี

ตารางที่ 4.14 ประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุงสำหรับนำน้ำทิ้งบอร์โอกลับมาใช้ใหม่

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
<b>ค่าระบบบอร์โอ</b> อัตราการผลิตน้ำบอร์โอ 1,152 ลบ.ม./ปี (ผลิต 16 ชม./วัน ระยะเวลา 300 วัน/ปี)	1	ชุด	160,000	160,000

ตารางที่ 4.15 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการนำน้ำทิ้งบอร์โอกลับมาใช้ใหม่

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
<b>1. ประหยัดค่าใช้จ่ายการใช้น้ำต่อปี</b> ปริมาณน้ำประปา	819	ลบ.ม.	22	18,018
<b>2. ประหยัดค่าใช้จ่ายต้นทุนน้ำป้อนระบบบอร์โอต่อปี</b> ปริมาณน้ำบอร์โอ	693	ลบ.ม.	29	20,097
<b>รวมค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปี</b>				<b>38,115</b>

#### 4.4.4 การนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

ถ้าสมมติว่าโรงงานตัวอย่างทำความสะอาดบ่อกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต สัปดาห์ละหนึ่งครั้งหรือสี่ครั้งต่อเดือนหรือ 48 ครั้งต่อปี การทำความสะอาดในแต่ละครั้งจะมีกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำ ได้แก่ ล้างบ่อน้ำล้าง ล้างบ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ล้างห้องสเปรย์ ล้างพื้น โดยน้ำที่นำมาใช้นั้นเป็นน้ำประปา น้ำจากการล้างบ่อน้ำล้าง ล้างบ่อสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ล้างห้องสเปรย์ จะรวบรวมไหลกลับเข้าไปยังบ่อพักน้ำเสีย รอการบำบัดด้วยวิธีการเคมี - กายภาพต่อไป ถ้าการทำทำความสะอาดแต่ละครั้ง ใช้น้ำประปาประมาณ 2 ลบ.ม. จะใช้น้ำประปาประมาณ 96 ลบ.ม./ปี ถ้านำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ปรับค่าพีเอช และกรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ และกรองผ่านชุดกรองคาร์บอนิก ซึ่งมีค่าความขุ่นไม่เกิน 5 NTU มาใช้ล้างทำความสะอาดแทนการใช้น้ำประปา ดังนั้นจึงประเมินความเป็นไปได้ดังนี้

##### ก. ความเป็นไปได้ทางเทคนิค

สูบน้ำจากบ่อพักน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับค่าพีเอชแล้ว มากรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ และกรองผ่านชุดกรองคาร์บอนิก แล้วส่งไปพักไว้ที่ถังพักที่มีความจุประมาณสามลูกบาศก์เมตร และติดตั้งระบบกรองที่มีอัตราการกรองน้ำ 4,200 ลิตรต่อชั่วโมง

##### ข. ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ลดการใช้น้ำประปาสำหรับการล้างทำความสะอาดบ่อกระบวนการ ประมาณ 96 ลบ.ม./ปี ดังนั้นจะประมาณค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการลดการใช้น้ำประปาได้ประมาณ 2,093 บาท/ปี โดยมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบกรองคาร์บอนิกประมาณ 49,400 บาท ซึ่งจะคืนทุนภายใน 23.6 ปี ดังนั้นการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่สำหรับการล้างทำความสะอาดบ่อน้ำล้างเพียงอย่างเดียว จึงไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ รายละเอียดการประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุง ค่าต้นทุนการกรอง และค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

##### ค. ความเป็นไปได้ทางสิ่งแวดล้อม

สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ 96 ลบ.ม./ปี

ตารางที่ 4.16 ประมาณการค่าดำเนินการปรับปรุงสำหรับน้ำที่จากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ใหม่

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อ หน่วย (บาท)	ราคา รวม (บาท)
<b>ค่าระบบกรองคาร์บอน</b>				
- ชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ 100 ไมโครเมตร	1	ชุด	1,200	1,200
- ปัมป์สูบน้ำ 0.75 กิโลวัตต์ 70 ลิตร/นาที	1	เครื่อง	10,000	10,000
- ชุดกรองคาร์บอน 5 ไมโครเมตร	1	ชุด	1,200	1,200
- ถังน้ำไฟเบอร์กลาส 1,000 ล.	3	ถัง	12,000	36,000
- ระบบท่อและวาล์ว	1	เหมา	1,000	1,000
รวมค่าระบบกรองคาร์บอน				49,400

ตารางที่ 4.17 ประมาณการค่าต้นทุนการกรองสำหรับน้ำที่จากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ใหม่

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อ หน่วย (บาท)	ราคา รวม (บาท)
<b>ค่าต้นทุนการกรอง (ประเมิน 1 วัน)</b>				
- ค่าสูบน้ำอัตรา 101 ลบ.ม./วัน ใช้ไฟฟ้า 4.8 กิโลวัตต์. ชั่วโมง ๆ ละ 3 บาท				14.4
- ค่าไส้กรองคาร์บอน 5 ไมโครเมตร เปลี่ยนทุกเดือน จำนวนหนึ่งท่อน ราคาท่อน ๆ ละ 250 บาท				8.3
รวมค่าใช้จ่ายต่อวัน 101 ลบ.ม./วัน				22.7
ดังนั้นต้นทุนการกรองหนึ่งลูกบาศก์เมตร				0.22

ตารางที่ 4.18 ประมาณการค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ใหม่

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อ หน่วย (บาท)	ราคา รวม (บาท)
<b>ประหยัดค่าใช้จ่ายต้นทุนน้ำล้างต่อปี</b> ปริมาณน้ำทิ้งที่กรองกลับมาใช้เป็นน้ำล้างทำความสะอาดบ่อน้ำล้าง (ต้นทุนรวมเท่ากับต้นทุนน้ำประปา 22 บาท/ลบ.ม. ลบต้นทุนการกรองน้ำทิ้ง 0.22 บาท/ลบ.ม.)	96	ลบ.ม.	21.8	2,093

#### 4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการสำรวจ และวิเคราะห์สมดุลมวลน้ำในขั้นตอนการล้างชิ้นงานในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต วิเคราะห์การใช้น้ำเฉลี่ยต่อพื้นที่ผิวชิ้นงาน 1,000 ตร.ม. พบว่าการล้างสารละลายต่างออกจากผิวชิ้นงาน (ล้างสวนกระแสดสองขั้นตอน) ใช้น้ำประปา 2.19 ลบ.ม. โดยใช้ในสองลักษณะ คือ ใช้เป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายน้ำล้าง 1.36 ลบ.ม. และใช้เป็นน้ำล้างสวนกระแสด 0.83 ลบ.ม. ปริมาณการใช้น้ำสำหรับเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างนั้น มากกว่าที่ใช้สำหรับล้างสวนกระแสด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณเก็บกักของน้ำในบ่อน้ำล้าง และความถี่ในการเปลี่ยนถ่าย ส่วนการล้างสารละลายฟอสเฟตออกจากผิวชิ้นงาน (ล้างสวนกระแสดสี่ขั้นตอน) ใช้น้ำประปาสำหรับเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างในบ่อน้ำล้างสองขั้นตอนแรก 1.20 ลบ.ม. ใช้น้ำอาร์โอสำหรับเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างในบ่อน้ำล้างสองขั้นตอนหลัง 1.00 ลบ.ม. ใช้น้ำอาร์โอล้างสวนกระแสด 0.83 ลบ.ม. ซึ่งปริมาณน้ำเปลี่ยนถ่ายน้ำล้าง 2.20 ลบ.ม. มากกว่าน้ำล้างสวนกระแสด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณเก็บกักของน้ำในบ่อน้ำล้าง และความถี่ในการเปลี่ยนถ่าย

ผลการศึกษาแนวทางเลือกตามหลักการของเทคโนโลยีสะอาดในส่วนของการลดการใช้ทรัพยากรน้ำ ซึ่งจะส่งผลถึงการลดปริมาณการเกิดน้ำเสียด้วย ทางเลือกที่ศึกษาได้แก่ (1) ลดการใช้น้ำในระบบล้างสวนกระแสด (2) ล้างสวนกระแสดแบบนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ (3) นำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ (4) นำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาสรุปได้ดังต่อไปนี้

ทางเลือกที่ 1 ลดการใช้น้ำในระบบล้างสวนกระแสด : ผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำล้างที่บ่อน้ำล้างในแต่ละบ่อ พบว่าความปนเปื้อนสารละลายเคมีในบ่อน้ำล้าง จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบมีแนวโน้มสม่ำเสมอ ทั้งนี้ได้ควบคุมอัตราน้ำล้างสวนกระแสดให้มีความต่อเนื่อง

และคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความปนเปื้อนสารละลายเคมีในบ่อน้ำล่างจึงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของมวลของสารละลายเคมีที่ถูกล้างออกจากชั้นงาน แล้วไหลลงไปบ่อน้ำล่าง ซึ่งชั้นงานในแต่ละประเภทจะนำมวลของสารละลายเคมีคิดมาด้วยไม่เท่ากัน ดังนั้นการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อน้ำล่างจึงไม่ได้ช่วยชะลอความปนเปื้อนสารละลายเคมีในบ่อน้ำล่าง จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำล่าง ส่งผลถึงการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดการใช้น้ำลงได้ คงมีการใช้น้ำเฉพาะการล้างสวนกระแสดเท่านั้น

ทางเลือกที่ 2 ล้างสวนกระแสดแบบนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ : การจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ของฟอสเฟตในห้องปฏิบัติการ โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำในบ่อน้ำล่างในขั้นตอนการล้างสารละลายต่าง ที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสารละลายต่าง แล้วใช้น้ำล้างสวนกระแสดสองชนิดเปรียบเทียบกัน คือ น้ำประปา และน้ำเสีย (น้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากน้ำล้างสวนกระแสดในขั้นตอนการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟต) และทดสอบการยึดติดสีบนผิวชั้นงานที่จุ่มผ่านบ่อกระบวนการเคลื่อนที่ฟอสเฟตจำลอง พบว่าการใช้น้ำเสียเป็นน้ำล้างสวนกระแสด จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำล้างในบ่อน้ำล่างสุดท้าย ซึ่งเป็นบ่อน้ำล่างที่เติมน้ำล้างสวนกระแสดลงไป โดยน้ำเสียจะช่วยลดค่าพีเอช และลดค่าสภาพต่าง แต่เพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้า และค่าสภาพกรดของน้ำล้าง แต่ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการยึดติดสีบนผิวชั้นงาน ดังนั้นสามารถลดการใช้น้ำประปาสำหรับล้างสวนกระแสดในขั้นตอนการล้างสารละลายต่างได้ โดยใช้น้ำเสียจากน้ำล้างสวนกระแสดในขั้นตอนการล้างสารละลายสังกะสีฟอสเฟตเป็นน้ำล้างสวนกระแสดแทน

ทางเลือกที่ 3 นำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ : การนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมากรองผ่านเมมเบรนอาร์โอใหม่ เปรียบเสมือนการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการกรองให้ระบบอาร์โอชุดเดิม แต่เป็นระบบอาร์โอแยกอิสระที่สามารถควบคุมระบบได้อย่างเหมาะสม และเลือกพื้นที่ผิวของเมมเบรนอาร์โอได้เหมาะสม ซึ่งจากการทดลองนำน้ำประปา และน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอมากรองด้วยระบบอาร์โอต้นแบบ ที่มีการจัดระบบแบบมีการวนกลับ เพื่อปรับค่าเปอร์เซ็นต์แยกกลับให้ได้ร้อยละ 75 และ 60 ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการกรองน้ำคงที่ 31.6 ลิ./ตร.ม.ชม. ใช้แรงขับดันน้ำ 125 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าเมื่อใช้น้ำประปาเป็นน้ำป้อน น้ำป้อนก่อนผ่านเมมเบรน และน้ำอาร์โอ มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 966 และ 10.5 ไมโครซีเมนต์/ชม. ตามลำดับ ส่วนเมื่อใช้น้ำทิ้งจากระบบอาร์โอเป็นน้ำป้อน น้ำป้อนก่อนผ่านเมมเบรน และน้ำอาร์โอ มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 1,208 และ 11.3 ไมโครซีเมนต์/ชม. ตามลำดับ การนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมากรองผ่านเมมเบรนอาร์โออีกชุดหนึ่ง จะช่วยลดปริมาณน้ำประปาที่จะป้อนเมมเบรนอาร์โอชุดเดิมได้ และลดต้นทุนของค่าน้ำป้อนลง โดยปริมาณน้ำที่สามารถแยกกลับมาใช้ใหม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอ และน้ำอาร์โอที่ต้องการ ทั้งนี้เมมเบรนอาร์โอจะมีประสิทธิภาพในการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าได้ค่อนข้างคงที่เฉลี่ยร้อยละ 99 ดังนั้นถ้าควบคุมให้น้ำที่จะส่ง

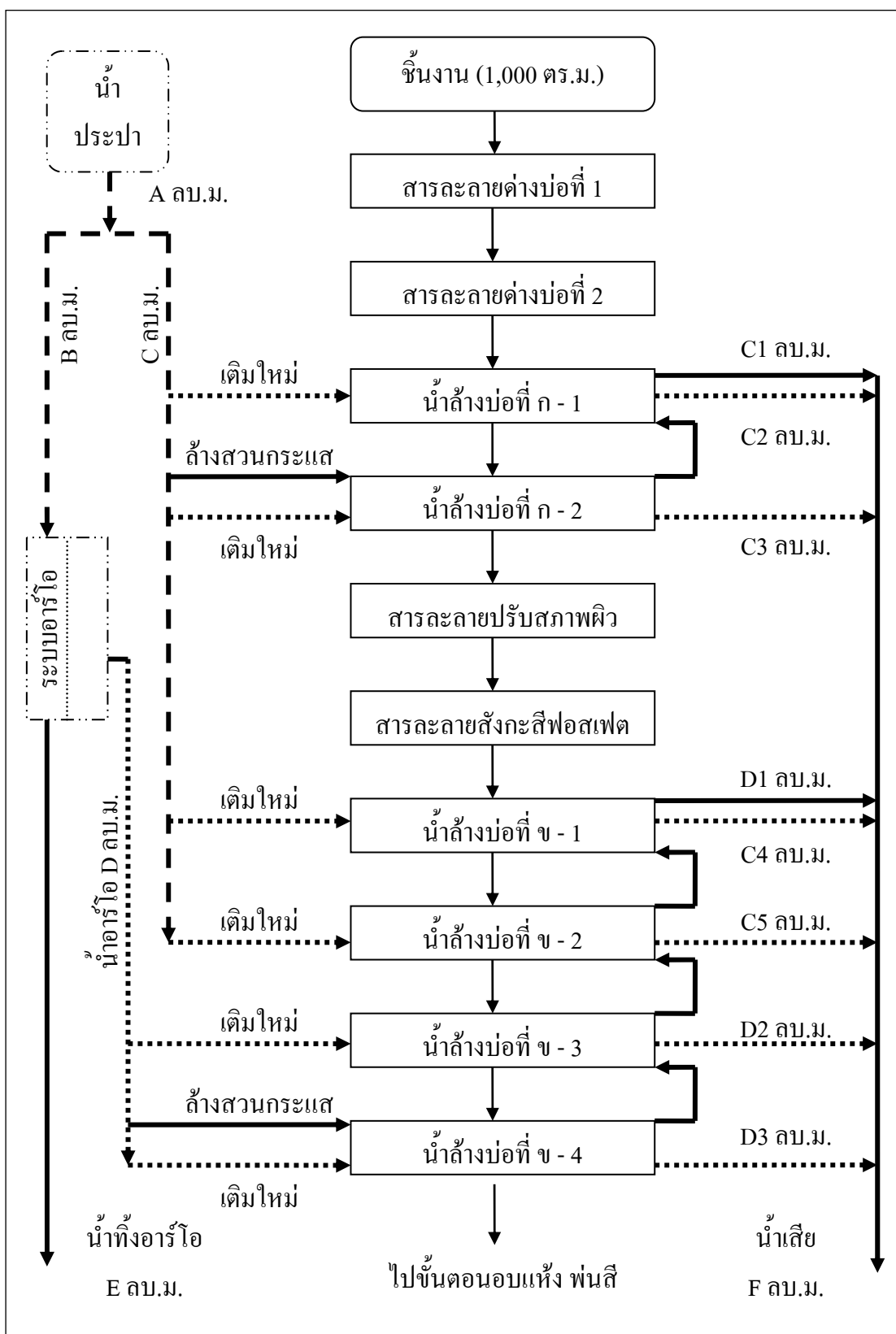
เข้าสู่เมมเบรนอาร์โอมี่ค่าสภาพการนำไฟฟ้าคงที่แล้ว จะมีผลให้น้ำอาร์โอมี่ค่าสภาพการนำไฟฟ้าคงที่ด้วย

ทางเลือกที่ 4 นำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ : น้ำเสียจากการล้างชิ้นงาน จะเป็นน้ำล้างรวม เมื่อทำการบำบัดด้วยวิธีเคมี – กายภาพ ก่อตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น ปูนขาว น้ำเสียที่ผ่านการก่อก้อน และตกตะกอนแล้วนำมากรองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ ที่มีขนาดช่องเปิด 100 ไมโครเมตร แล้วจึงปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.5 - 9.0 แล้วกรองผ่านชุดกรองแบบคาร์บอนที่มีขนาดช่องเปิด 5 ไมโครเมตร พบว่าน้ำที่ผ่านชุดกรองแบบคาร์บอนมีความขุ่นอยู่ในช่วง 2.6 - 2.9 NTU ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเป็นน้ำล้างทำความสะอาดบ่อน้ำล้างแทนการใช้น้ำประปาได้ แต่มีความคั่งค่าน้อย เนื่องจากการล้างทำความสะอาดบ่อน้ำล้างใช้ปริมาณน้ำไม่มาก แต่ต้องลงทุนเรื่องระบบกรองน้ำทิ้งสูง ซึ่งจะคืนทุนภายใน 23.6 ปี

จากทางเลือกในการลดการใช้น้ำที่ได้ศึกษามา ได้แก่ (1) ล้างสวนกระแสบแบบไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อน้ำล้าง (2) ล้างสวนกระแสบแบบนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ (3) นำน้ำทิ้งอาร์โอมี่กลับมาใช้ใหม่ นั้นทำการประเมินสมมูลมวลน้ำที่เกี่ยวข้องกับการล้างชิ้นงาน พิจารณาในแต่ละทางเลือก โดยประเมินจากลักษณะการใช้น้ำ และการเกิดน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ผลประเมินสมมูลมวลน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.19 และประเมินความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และทางสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 4.20

การล้างสวนกระแสบแบบไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อน้ำล้าง ซึ่งเป็นแนวทางเลือกที่หนึ่ง มีความเป็นไปได้มากที่สุด โดยสามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ร้อยละ 65.8 ลดปริมาณการใช้น้ำอาร์โอมี่ได้ร้อยละ 54.6 ลดปริมาณน้ำเสียได้ร้อยละ 68.2 ซึ่งไม่มีการลงทุนเพิ่มเติมใด ๆ ส่วนการล้างสวนกระแสบแบบนำน้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งเป็นทางเลือกที่สอง จะสามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ร้อยละ 13.1 และลดปริมาณน้ำเสียได้ร้อยละ 15.9 แต่ไม่ได้ลดปริมาณการใช้น้ำอาร์โอมี่ ซึ่งมีการลงทุนเพิ่มเติมเฉพาะการต่อท่อเชื่อมระหว่างบ่อน้ำล้างเท่านั้น ถ้านำแนวทางที่หนึ่ง และแนวทางที่สองมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน จะสามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ร้อยละ 78.9 ลดปริมาณการใช้น้ำอาร์โอมี่ได้ร้อยละ 54.6 ลดปริมาณน้ำเสียได้ร้อยละ 84.1 ส่วนการนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอมี่กลับมาใช้ใหม่นั้น จะสามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ร้อยละ 12.3 ซึ่งมีการลงทุนระบบอาร์โอมี่เพิ่มเติม จะคืนทุนภายใน 4.2 ปี ถ้านำแนวทางเลือกที่หนึ่ง แนวทางเลือกที่สอง และแนวทางเลือกที่สามมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน จะสามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ร้อยละ 91.2 ลดปริมาณการใช้น้ำอาร์โอมี่ได้ร้อยละ 54.6 ลดปริมาณน้ำเสียได้ร้อยละ 84.1





รูปที่ 4.19 ลักษณะการใช้น้ำและการเกิดน้ำเสียในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต

ตารางที่ 4.19 สรุปประเมินปริมาณการใช้น้ำและการเกิดน้ำเสียของแต่ละทางเลือก

ลักษณะการใช้น้ำและการเกิดน้ำเสีย	ปริมาณน้ำ ลบ.ม./1,000 ตร.ม.			
	สถานะ ปัจจุบัน	ทางเลือก ที่ 1	ทางเลือก ที่ 2	ทางเลือก ที่ 3
A = น้ำประปาที่ใช้ทั้งหมด ลดปริมาณการใช้น้ำประปา ร้อยละการลดปริมาณการใช้น้ำประปา	6.32	2.16 4.16 (65.8)	5.49 0.83 (13.1)	5.54 0.78 (12.3)
B = น้ำประปาที่ใช้ผลิตน้ำอาร์โอ	2.93	1.33	2.93	2.15
C = น้ำประปาที่ใช้ในการล้างชิ้นงาน	3.39	0.83	2.56	3.39
C1 = น้ำประปาล้างสวนกระแสในการล้างต่าง	0.83	0.83	0	0.83
C2 = น้ำประปาเปลี่ยนถ่ายที่บ่อน้ำล้าง ก - 1	0.68	0	0.68	0.68
C3 = น้ำประปาเปลี่ยนถ่ายที่บ่อน้ำล้าง ก - 2	0.68	0	0.68	0.68
C4 = น้ำประปาเปลี่ยนถ่ายที่บ่อน้ำล้าง ข - 1	0.56	0	0.56	0.56
C5 = น้ำประปาเปลี่ยนถ่ายที่บ่อน้ำล้าง ข - 2	0.64	0	0.64	0.64
D = น้ำอาร์โอที่ใช้ทั้งหมด ลดปริมาณการใช้น้ำอาร์โอ ร้อยละการลดปริมาณการใช้น้ำอาร์โอ	1.83	0.83 1.00 (54.6)	1.83 0 (0)	1.83 0 (0)
D1 = น้ำอาร์โอล้างสวนกระแสในการล้าง สารละลายสังกะสีฟอสเฟต	0.83	0.83	0.83	0.83
D2 = น้ำอาร์โอเปลี่ยนถ่ายที่บ่อน้ำล้าง ข - 3	0.36	0	0.36	0.36
D3 = น้ำอาร์โอเปลี่ยนถ่ายที่บ่อน้ำล้าง ข - 4	0.64	0	0.64	0.64
E = น้ำทิ้งจากระบบอาร์โอ ลดปริมาณน้ำทิ้งอาร์โอ	1.10	0.50 0.60	1.10 0	0.32 0.78
F = น้ำเสีย ลดปริมาณน้ำเสีย ร้อยละการลดปริมาณน้ำเสีย	5.22	1.66 3.56 (68.2)	4.39 0.83 (15.9)	5.22 0 (0)

ตารางที่ 4.20 สรุปความเป็นไปได้ของทางเลือกในการลดการใช้น้ำ

ลำดับ ที่	แนวทางเลือก	ความเป็นไปได้ทาง สิ่งแวดล้อม	ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์		
			งบ ลงทุน (บาท)	ค่าใช้จ่ายที่ ประหยัดได้ (บาท/ปี)	จุดคืน ทุน
1	ล้างสวนกระแสบแบบไม่ มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำใน บ่อน้ำล้าง	ลดน้ำประปา 4,366 ลบ.ม./ปี ลดน้ำอาร์โอ 1,049 ลบ.ม./ปี ลดน้ำทิ้งอาร์โอ 630 ลบ.ม./ปี และลดน้ำเสีย 3,736 ลบ.ม./ปี	ไม่มี	345,865	ทันที
2	ล้างสวนกระแสบแบบนำ น้ำเสียกลับมาใช้ซ้ำ	ลดน้ำประปา 871 ลบ.ม./ปี และลดน้ำเสีย 871 ลบ.ม./ปี	360	56,615	สองวัน
3	นำน้ำทิ้งอาร์โอกลับมา ใช้ใหม่	ลดน้ำประปา 819 ลบ.ม./ปี ลดน้ำทิ้งอาร์โอ 819 ลบ.ม./ปี	160,000	38,115	4.2 ปี

หมายเหตุ ปริมาณการใช้น้ำประปាក่อนการใช้น้ำแนวทางลดการใช้น้ำประมาณ 6,632 ลบ.ม./ปี

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

อุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญและเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมากมาย โลหะสำเร็จที่ผลิตจากเหล็กและเหล็กอาบสังกะสี มีปริมาณมาก ซึ่งจะผ่านการตกแต่งด้วยการชุบเคลือบฟอสเฟตก่อนแล้วตามด้วยการชุบเคลือบสี การตกแต่งโลหะสำเร็จมีการใช้น้ำในปริมาณมากโดยเฉพาะขั้นตอนการล้างชิ้นงาน ในอดีตได้มีการศึกษาวิธีการลดการใช้น้ำและลดการเกิดน้ำเสีย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดี แต่ยังคงมีแนวทางอื่นที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการใช้น้ำและลดปริมาณน้ำเสียได้ตามหลักการของเทคโนโลยีสะอาด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาลดการใช้น้ำและนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

จากการสำรวจโรงงานและศึกษาสมมูลมวลน้ำในขั้นตอนการล้างชิ้นงาน พบว่าการล้างชิ้นงานเป็นการล้างแบบสวนกระแส แบ่งเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่หนึ่งเป็นการล้างล้างก่อนชุบเคลือบฟอสเฟตประกอบด้วยสองบ่อน้ำล้าง ใช้น้ำประปาเป็นน้ำล้างทั้งน้ำเปลี่ยนถ่ายและน้ำล้างสวนกระแส ช่วงที่สองเป็นการล้างหลังชุบเคลือบฟอสเฟตประกอบด้วยสี่บ่อน้ำล้าง ใช้น้ำประปาเป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายในสองบ่อน้ำล้างแรก ใช้น้ำอาร์โอเป็นน้ำเปลี่ยนถ่ายในสองบ่อน้ำล้างหลังและใช้เป็นน้ำล้างสวนกระแส เมื่อชิ้นงานได้ผ่านการล้างในแต่ละบ่อน้ำล้างคำนวณเป็นพื้นที่ผิวชิ้นงาน 1,000 ตร.ม. ทำให้การล้างชิ้นงานทั้งสองช่วงใช้น้ำประปา 6.32 ลบ.ม. ใช้น้ำอาร์โอ 1.83 ลบ.ม. และปล่อยน้ำเสีย 5.22 ลบ.ม. และระบบอาร์โอที่ใช้น้ำประปาผลิตน้ำอาร์โอมีน้ำทิ้ง 1.10 ลบ.ม.

การล้างสวนกระแสในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต มีสองช่วงดังที่กล่าวมา บ่อน้ำล้างแต่ละบ่อจะถูกควบคุมค่าปนเปื้อนในรูปของ ค่าสภาพต่าง ค่าสภาพกรด และค่าสภาพการนำไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำในแต่ละบ่อน้ำล้าง พบว่าถ้าการล้างชิ้นงานในการเคลือบฟอสเฟต มีจำนวนบ่อน้ำล้างเพิ่มขึ้น คุณลักษณะของน้ำล้างจะมีค่าปนเปื้อนลดลง อย่างไรก็ตามค่าความปนเปื้อนในน้ำล้าง จะมีค่าสม่ำเสมอ นอกจากนี้ในช่วงการล้างหลังชุบเคลือบฟอสเฟต ควบคุมอัตราน้ำล้างสวนกระแส 150 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถควบคุมค่าความปนเปื้อนในน้ำล้างของแต่ละบ่อน้ำล้างไม่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานควบคุมและมีค่าความปนเปื้อนในน้ำล้างสม่ำเสมอ

ผลการศึกษา พบว่าสามารถลดการใช้น้ำประปาและน้ำอาร์โอได้ร้อยละ 66 และ 55 ตามลำดับ และลดการปล่อยปริมาณน้ำเสียได้ร้อยละ 68 ในขณะที่เดียวกันน้ำเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการล้างหลังซุบเคลือบฟอสเฟต สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำประปาในขั้นตอนการล้างต่างก่อนซุบเคลือบฟอสเฟตได้โดยตรง โดยการควบคุมค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่บ่อน้ำล้างสุดท้ายไม่เกิน 200 ไมโครซีเมนต์/ซม. จากการศึกษาการยึดติดสีบนผิวชิ้นงาน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทั้ง 2 กรณี การนำน้ำเสียจากขั้นตอนการล้างหลังซุบเคลือบฟอสเฟตกลับมาใช้ซ้ำ สามารถลดการใช้น้ำประปาได้เพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 13 และลดการปล่อยปริมาณน้ำเสียได้เพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 16 ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ปีละ 402,480 บาท โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

การนำน้ำทิ้งจากระบบอาร์โอกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านเยื่อกรองเมมเบรนระบบอาร์โอด้วยอัตราการกรองคงที่ 31.6 ลิตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง สามารถผลิตเป็นน้ำอาร์โอได้ร้อยละ 60 ที่ประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าร้อยละ 99 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 11.3 ไมโครซีเมนต์/ซม. ซึ่งไม่เกินค่าควบคุม 12 ไมโครซีเมนต์/ซม. สามารถลดการใช้น้ำประปาได้เพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 12 ประหยัดค่าใช้จ่ายได้เพิ่มขึ้นอีก 38,115 บาทต่อปี โดยใช้เงินลงทุนค่าเครื่องกรองอาร์โอ 160,000 บาท ระยะเวลาคืนทุน 4.2 ปี ในขณะที่นำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมารองผ่านชุดกรองแบบแผ่นดิสก์ และชุดกรองคาร์บอน สามารถประหยัดน้ำประปาได้ปีละ 96 ลูกบาศก์เมตร ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 2,093 บาทต่อปี แต่ใช้เงินลงทุนค่าเครื่องกรอง 49,400 บาท ระยะเวลาคืนทุน 23.6 ปี

## 5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

5.2.1 โรงงานอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จทั่ว ๆ ไปสามารถนำหลักการของการล้างสวนกระแสน้ำหลายขั้นตอน โดยไม่มีความจำเป็นต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำล้างไปใช้ได้ จะช่วยลดปริมาณน้ำล้างในส่วนของการเปลี่ยนถ่ายในบ่อน้ำล้างได้

5.2.2 โรงงานอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ ที่ใช้กระบวนการเคลือบฟอสเฟต ที่ใช้ระบบการล้างสวนกระแสน้ำหลายขั้นตอนเหมือนกับที่โรงงานตัวอย่างใช้ สามารถเปรียบเทียบระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่กำหนดในน้ำล้างของแต่ละบ่อน้ำล้างได้

5.2.3 โรงงานอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จ ที่ใช้กระบวนการเคลือบฟอสเฟต สามารถนำหลักการของการนำน้ำเสียจากการล้างหลังซุบเคลือบฟอสเฟตมาใช้ซ้ำต่อเนื่องสำหรับล้างต่างไปประยุกต์ใช้ได้ จะช่วยลดน้ำล้างสวนกระแสน้ำสำหรับล้างต่างได้

5.2.4 ระบบอาร์โอถึงแม้จะเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการตกแต่งโลหะสำเร็จ แต่เป็นระบบที่แยกอิสระ ดังนั้นสามารถนำระบบอาร์โอที่แยกชุดอิสระและจัดระบบแบบมีกรวนกลับไป

ประยุกต์ใช้เสริมระบบอาร์โอที่มีอยู่เดิมได้ จะช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์แยกกลับโดยรวมของระบบอาร์โอ ซึ่งจะช่วยประหยัดต้นทุนค่าน้ำป้อนได้ ทั้งนี้ น้ำที่จากระบบอาร์โอที่จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำที่จากระบบอาร์โอ และค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอาร์โอที่ต้องการ

### 5.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

จากการศึกษานี้ พบว่าการลดการใช้ น้ำในระบบการล้างสวนกระแสและการนำน้ำเสียจากการล้างหลังชุบเคลือบฟอสเฟตมาใช้ซ้ำต่อเนื่องสำหรับล้างต่าง จะช่วยลดการใช้น้ำล้างและลดการเกิดปริมาณน้ำเสียได้มากขึ้น แต่ยังคงมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากน้ำล้างสวนกระแสที่ต้องปล่อยทิ้งที่บ่อน้ำล้างขั้นตอนแรก การประยุกต์ใช้เทคนิคการนำน้ำกลับมาใช้หมุนเวียนเป็นที่นิยมใช้ในระบบการล้างสวนกระแส เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียและยังสามารถนำน้ำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ โดยไม่มีการปล่อยน้ำล้างในแต่ละบ่อทิ้ง ดังนั้นควรศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการนำน้ำกลับมาใช้หมุนเวียนมาประยุกต์ใช้กับขั้นตอนการล้างชิ้นงาน หากมีความเป็นไปได้จะช่วยลดปริมาณน้ำเสียให้เหลือน้อยที่สุดได้ และยังช่วยลดการใช้น้ำประปาลงได้เป็นอย่างมาก

## รายการอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2545). **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ**. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2548). **หลักปฏิบัติเพื่อการป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมสาขาขุบโลหะ**. กรุงเทพฯ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2549). **ค้นหาข้อมูลโรงงาน [ออนไลน์]**. ได้จาก: <http://www.diw.go.th/diw/data1 search.asp>
- จุฑารัตน์ อริยะธรรมถาวร. (2546). การนำเทคโนโลยีสะอาดมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นิตา จิตพิพัฒนกุล. (2545). การชุบเคลือบผิวสังกะสีฟอสเฟตบนโลหะผสมสังกะสีนิกเกิลเพื่อสมบัติด้านความต้านทานการกัดกร่อนและเพิ่มสมบัติการยึดติดสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พรพรม อินทวงศ์. (2544). การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตชิป. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ไพศาล วีรกิจ. (2549). **การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : หจก. นำอักษรการพิมพ์.
- ภาณุมาศ เหลืองปัญญากุล. (2545). การปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการผลิตกรดอะมิโนโดยวิธีออสโมซิสผันกลับ . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม สาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. (2542). **วิศวกรรมการประปา เล่ม 2**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. (2543). **กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ไทยเส็ง.

- Amjad, Z. (1993). **Reverse Osmosis : Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications**. New York : Van Nostrand Reinhold.
- APHA, AWWA, and WEF. (1998). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 20<sup>th</sup> ed. Washington D.C., USA.
- Benito, Y., and Ruíz, M.L. (2002). Reverse Osmosis Applied to Metal Finishing Wastewater. **Desalination** 142 (3) : 222-234.
- Bird, R.W. (1995). Aqueous Alkaline Cleaners : A Better Alternative. **Metal Finishing** 93 (3): 10-12.
- Castelblanque, J., and Salimbeni, F. (2004). NF and RO Membrane for the Recovery and Reuse of Water and Concentrated Metallic Salts from Waste Produced in the Electroplating Process. **Desalination** 167 : 65-73.
- Donofrio, J. (2000). Zinc Phosphating. **Metal Finishing** 98 (6) : 57-73.
- Eckenfelder, W.W.Jr. (1989). **Industrial Water Pollution Control**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- Filmtec. (2005). **Reverse Osmosis Membranes Technical Manual** [On-line]. Available : <http://www.Filmtec.com>
- Glucina, K., Alvarez, A., and Laîné, J.M. (2000). Assessment of an Integrated Membrane System for Surface Water Treatment. **Desalination** 132 (1-3) : 73-82.
- Gruss, B. (2000). Iron Phosphating. **Metal Finishing** 98 (6) : 52-56.
- Ipek, U. (2005). Removal of Ni (II) and Zn (II) from an Aqueous Solution by Reverse Osmosis. **Desalination** 174 (2) : 161-169.
- Juang, R.S., and Shiau, R.C. (2000). Metal Removal from Aqueous Solutions Using Chitosan - Enhanced Membrane Filtration. **Journal of Membrane Science** 165 : 159-167.
- Karakulski, K., and Morawski, A.W. (2002). Treatment of Spent Emulsion from a Cable Factory by an Integrated UF/NF Membrane System. **Desalination** 149 (1-3) : 163-167.
- Kim, S.L., Chen, J.P., and Ting, Y.P. (2002). Study on Feed Pretreatment for Membrane Filtration of Secondary Effluent. **Separation and Purification Technology** 29 : 171-179.
- Kurniawan, T. A., Chan, G.Y.S., Lo, W - H., and Babel, S. (2006). Physico-Chemical Treatment Techniques for Wastewater Laden with Heavy Metals. **Chemical Engineering Journal**.



- Lee, J-W., Kwon, T-O., and Moon, I-S. (2005). Performance of Polyamide Reverse Osmosis Membranes for Steel Wastewater Reuse. **Desalination** 177 (1-3) : 69-82.
- Palmer, S.A.K., Breton, M.A., Nunno, T.J., Sullivan, D.M., and Surprenant, N.F. (1988). **Metal / Cyanide Containing Wastes Treatment Technologies**. Polluting Technology Review NO.158. New Jersey: Noyes Data Corporation.
- PRC Environmental Management, Inc. (1989). **Hazardous Waste Reduction in the Metal Finishing Industry**. Pollution Technology Review No. 176. USA : Noyes Data Corporation.
- Qin, J-J., Oo, M-H., Wai, M-N., Ang, C-M., Wong, F-S., and Lee, H. (2003). A Dual Membrane UF/RO Process for Reclamation of Spent Rinses from a Nickel-Plating Operation-a Case Study. **Water Research** 37 (13) : 3269-3278.
- Qin, J-J., Wai, M-N., Oo, M-H., and Lee, H. (2004). A Pilot Study for Reclamation of a Combined Rinse from a Nickel Plating Operation Using a Dual-Membrane UF/RO Process. **Desalination** 161 (2) : 155-167.
- Qin, J-J., Wai, M-N., Oo, M-H., and Wong, F-S. (2002). A Feasibility Study on the Treatment and Recycling of a Wastewater from Metal Plating. **Journal of Membrane Science** 208 : 213-221.
- Sapari, N., Tdris, A., and Hisham, N. (1996). Total Removal of Heavy Metal from Mixed Plating Rinse Wastewater. **Desalination** 106 (1-3) : 419-422.
- Theodore, Lo., and McGuinn, Y.C., (1992). **Pollution Prevention**. แปลโดย โกศลย์ คูสำราญ, วงศ์พันธ์ ลิขปเสนีย์, ชำรงรัตน์ มุ่งเจริญ, อนวัช เพ็ชรสิงห์ และ จินดา อุดชาชน. งานแปลของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ อันดับที่ 186. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- U.S.Environmental Protection Agency. (1996). **Manual Pollution Prevention in the Paints and Coatings Industry**. EPA/625/R-96/003. Washington, DC : U.S.EPA.
- U.S.Environmental Protection Agency. (1999). **Technical Approaches to Charaterizing and Cleaning Up Metal Finishing Sites Under the Brownfields Initiative**. EPA/625/R-98/006. Washington, DC : U.S.EPA.
- Wachinski, A.M., and Etzel, J.E. (1997). **Environmental Ion Exchange : Principles and Design**. New York : Lewis Publishers.

Wong, F-S., Qin, J-J., Wai, M-N., Lim, A.L., and Adiga, M. (2002). A Pilot Study on a Membrane Process for the Treatment and Recycling of Spent Final Rinse Water from Electroless Plating . **Separation and Purification Technology** 29 (1) : 41-51.

ภาคผนวก ก

รายละเอียดเพิ่มเติมวิธีการทดลอง

## รายละเอียดเพิ่มเติมวิธีการทดลอง

### ก.1 การทดสอบการยึดติดดีด้วยวิธี Cross - Cut Tape Test

1. เลือกพื้นที่ที่ต้องการทดสอบ โดยพื้นที่นั้น ๆ ต้องปราศจากสิ่งสกปรก คราบน้ำมัน
2. ทำรอยตัดเส้นตรงบนผิวเคลือบ
  - ถ้าผิวเคลือบมีความหนาไม่เกิน 50 ไมโครเมตร ทำรอยตัดบนผิวเคลือบทั้งหมด 11 เส้น โดยระยะห่างระหว่างรอยตัดแต่ละเส้นห่างกัน 1 มิลลิเมตร
  - ถ้าผิวเคลือบมีความหนาระหว่าง 50 ไมโครเมตรถึง 125 ไมโครเมตร ทำรอยตัดบนผิวเคลือบทั้งหมด 6 เส้น โดยระยะห่างระหว่างรอยตัดแต่ละเส้นห่างกัน 1 มิลลิเมตร
  - รอยตัดแต่ละเส้นมีความยาว 20 มิลลิเมตร รอยตัดที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง ต้องใช้เครื่องมือตัดกรีดรอยให้ผ่านชั้นผิวเคลือบถึงผิวเหล็กเพียงครั้งเดียวอย่างต่อเนื่อง (One Steady Motion)
3. ใช้แปรงขนอ่อน ๆ หรือกระดาษทิชชูปิดเศษผิวเคลือบที่เกิดจากการตัดออก
4. นำเทปกาวขนาด 1 นิ้ว มาตัดบนรอยกากบาท โดยให้รอยกากบาทอยู่กึ่งกลางเทปกาว ติดเทปกาวไปในทิศทางเดียว ติดให้เรียบโดยใช้ยางลบที่ปลายดินสอค่อยขยับให้เรียบไปทางเดียวกัน
5. ปลดอยเทปกาวให้ติดเป็นเวลา  $90 \pm 30$  วินาที แล้วดึงที่ปลายเทปกาวออกอย่างรวดเร็ว ทำมุม 180 องศา โดยที่ไม่เกิดการกระตุกของเทปกาว โดยพิจารณาการยึดติดดีจากการหลุดของสีที่เทปกาว ตามปริมาณการหลุดออก แล้วรายงานผลการทดสอบดังนี้
  - 5A บริเวณขอบของรอยตัดเรียบ ไม่เกิดการหลุดของผิวเคลือบ
  - 4A มีชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของผิวเคลือบที่บริเวณรอยตัดกันของแต่ละเส้น หลุดออกน้อยกว่าร้อยละ 5
  - 3A มีชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของผิวเคลือบที่บริเวณรอยตัดกันของแต่ละเส้น และขอบของรอยตัดหลุดออกร้อยละ 5 - 15
  - 2A เกิดการหลุดของพื้นที่สีเหลี่ยม และขอบของรอยตัดร้อยละ 15 - 35
  - 1A เกิดการหลุดของพื้นที่สีเหลี่ยมเป็นแถบบริเวณมุมขอบของรอยตัดร้อยละ 35 - 65
  - 0A เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบมากกว่าร้อยละ 65

## ก.2 การหาความเหมาะสมของฟลักซ์ และประสิทธิภาพการกักกัน

### สำหรับระบบอาร์โอ

1. จากรูปที่ 3.12 เปิดวาล์วหมายเลข 23, 1, 3, 6, 9, 10, 12, 13, 15, 27 ปิดวาล์วที่ไม่เกี่ยวข้อง
2. ใช้สายยางต่อจากวาล์วหมายเลข 15 ไปปล่อยลงถังป้อนคือ UF Feed Tank
3. เปิดปั๊มหมายเลข P2 และ P3
4. ปรับวาล์วหมายเลข 3 และ 12 เพื่อให้อัตราการรีเทนเทตคงที่เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการเพอมีเอทแปรเปลี่ยนเท่ากับ 3, 4, 5, 6 ลิตรต่อนาที
5. เมื่อปรับอัตราการเพอมีเอทได้ในแต่ละค่า อ่านค่าแรงขับเคลื่อนที่มาตรวัดแรงดัน PG3 และเก็บตัวอย่างน้ำเพอมีเอท และรีเทนเทตนำมาวิเคราะห์ค่าสภาพการนำไฟฟ้า จำนวนประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้า
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อนกับอัตราการเพอมีเอทต่อพื้นที่ผิวเมมเบรน , แรงขับเคลื่อนกับประสิทธิภาพการกักกัน
7. พิจารณาอัตราการเพอมีเอทต่อพื้นที่ผิวเมมเบรนที่ใช้แรงดันต่ำแต่ได้ประสิทธิภาพการกักกันค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูง

## ก.3 การหาเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่เหมาะสมสำหรับระบบอาร์โอ

1. จากรูปที่ 3.12 เปิดวาล์วหมายเลข 23, 1, 3, 6, 9, 10, 12, 13, 11, 25, 27 ปิดวาล์วที่ไม่เกี่ยวข้อง
2. น้ำในถังป้อนมีประมาณ 240 ลิตร
3. เปิดปั๊มหมายเลข P2 และ P3
4. ปรับวาล์วหมายเลข 3 และ 12 เพื่อให้อัตราการรีเทนเทตคงที่เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการเพอมีเอทเท่ากับค่าที่เลือกได้จากการหาความเหมาะสมของฟลักซ์ และประสิทธิภาพการกักกัน
5. ในทุก ๆ 5 นาทีอ่านค่าสภาพการนำไฟฟ้าจากเครื่องวัดที่ตำแหน่ง CM และบันทึกปริมาณน้ำเพอมีเอท
6. เมื่อปริมาณน้ำที่ถังป้อนใกล้หมดให้ปิดปั๊มหมายเลข P2 และ P3
7. คำนวณเปอร์เซ็นต์แยกกลับ

8. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แยกกลับกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำเพอมีเอท
9. พิจารณาเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่ได้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าประมาณ 12 ไมโครซีเมนต์ต่อชม.

#### ก.4 การเดินระบบอาร์โอแบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 3.12 เปิดวาล์วหมายเลข 23, 1, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 22, 24, 25 ปิดวาล์วที่ไม่เกี่ยวข้อง

1. ใช้สายยางเชื่อมต่อระหว่างวาล์วหมายเลข 24 กับ 22
2. คำนวณเปอร์เซ็นต์แยกกลับ
3. เปิดปั๊มหมายเลข P2 และ P3
4. ปรับวาล์วหมายเลข 3 และ 12 เพื่อให้อัตราการรีเทนเทคองที่เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการน้ำเพอมีเอทเท่ากับค่าที่เลือกได้จากการหาการหาความเหมาะสมของฟลักซ์ และประสิทธิภาพการกักกัน
5. ปล่อน้ำทิ้งที่วาล์วหมายเลข 14 ด้วยอัตราที่คำนวณได้จากสมการหาเปอร์เซ็นต์แยกกลับ
6. เดินระบบไปเรื่อย ๆ โดยควบคุมอัตราการน้ำเพอมีเอท และรีเทนเททให้คงที่โดยปรับวาล์วหมายเลข 3 และ 12

**ภาคผนวก ข**

**ผลการทดลอง**

ตารางที่ ข1 ข้อมูลวิเคราะห์สมดุลมวลน้ำในระบบการล้างในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต

วันที่	ระยะเวลา การผลิต	จำนวน ชิ้นงาน	พื้นที่ผิว ชิ้นงาน	น้ำล้าง สวน กระแส	อัตราน้ำเติมใหม่ที่บ่อน้ำล้าง (ล./ตร.ม.)					
	นาที	ชิ้น	ตร.ม.	ล/ตร.ม.	ก - 1	ก - 2	ข - 1	ข - 2	ข - 3	ข - 4
1	1,070	1,284	1,654	1.62	1.03	1.03	0.42	0.48	0.27	0.48
2	1,107	1,328	3,014	0.92	0.56	0.56	0.23	0.27	0.15	0.27
3	1,124	1,349	3,211	0.87	0.53	0.53	0.22	0.25	0.14	0.25
4	1,059	1,271	2,387	1.11	0.71	0.71	0.29	0.34	0.19	0.34
5	814	977	1,555	1.31	1.09	1.09	0.45	0.51	0.29	0.51
6	324	389	935	0.87	1.82	1.82	0.75	0.86	0.48	0.86
7	988	1,186	4,522	0.55	0.38	0.38	0.15	0.18	0.10	0.18
8	997	1,197	5,412	0.46	0.31	0.31	0.13	0.15	0.08	0.15
9	1,067	1,280	5,690	0.47	0.30	0.30	0.12	0.14	0.08	0.14
10	934	1,121	3,858	0.61	0.44	0.44	0.18	0.21	0.12	0.21
11	976	1,172	6,238	0.39	0.27	0.27	0.11	0.13	0.07	0.13
รวม	10,459	12,554	38,476							
เฉลี่ย	951	1,141	3,498	0.83	0.68	0.68	0.28	0.32	0.18	0.32



ตารางที่ ข2 คุณลักษณะสารละลายต่างบ่อที่ 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	8.7	10.6	10.3	0.3
สภาพนำการไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ ชม.	15,697	20,280	17,925	906
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	3,765	6,265	4,768	393
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	10,235	13,400	11,190	647

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 62 ข้อมูล

ตารางที่ ข3 คุณลักษณะสารละลายต่างบ่อที่ 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	9.3	10.6	10.3	0.3
สภาพนำการไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ชม.	14,340	19,050	17,682	937
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	3,485	6,235	4,751	436
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	9,885	12,785	11,118	663

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 47 ข้อมูล

ตารางที่ ข4 คุณลักษณะสารละลายต่างบ่อที่ 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	9.8	10.5	10.3	0.2
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ชม.	16,443	19,493	18,026	724
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	4,400	6,750	4,978	437
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	10,535	12,615	11,441	631

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 31 ข้อมูล

ตารางที่ ข5 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	6.5	10.4	8.7	1.2
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	447	2,187	1,024	485
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	435	117	124
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	100	1,085	382	231

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 64 ข้อมูล

ตารางที่ ข6 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	6.7	10.2	9.0	1.0
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	580	3,057	1,598	617
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	815	249	172
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	215	1,105	615	246

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 47 ข้อมูล

ตารางที่ ข7 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	7.3	10.3	9.3	0.8
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	980	2,780	1,753	460
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	585	240	128
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	185	1,315	654	268

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 33 ข้อมูล

ตารางที่ ข8 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	5.2	10.2	7.8	1.3
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	357	677	466	72
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	285	96	43

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 67 ข้อมูล

ตารางที่ ข9 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	6.0	10.2	8.1	1.1
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	369	803	516	11
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	350	119	57

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 44 ข้อมูล

ตารางที่ ข10 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ก - 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต

(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	5.7	9.8	8.1	1.2
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	417	1,067	531	129
สภาพด่างฟีนอล์ฟทาลิน	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	235	127	60

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 29 ข้อมูล

ตารางที่ ข11 คุณลักษณะสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	2.9	4.1	3.3	0.2
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	19,580	31,493	24,259	2,546
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	165	635	451	120
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	6,685	8,965	7,686	447

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 64 ข้อมูล

ตารางที่ ข12 คุณลักษณะสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.1	3.9	3.4	0.3
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	20,000	29,113	24,119	2,591
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	165	615	388	89
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	6,400	9,165	7,467	482

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 47 ข้อมูล

ตารางที่ ข13 คุณลักษณะสารละลายสังกะสีฟอสเฟต ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.0	3.9	3.4	0.2
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	20,020	39,526	24,830	4,466
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	135	585	387	114
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	6,450	8,365	7,458	372

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 31 ข้อมูล

ตารางที่ ข14 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.0	6.2	4.4	0.7
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	300	2,800	1,315	577
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	100	665.0	275	113

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 64 ข้อมูล

ตารางที่ ข15 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.4	5.3	4.2	0.4
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	497	2,677	1,823	528
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	85	700	347	140

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 48 ข้อมูล

ตารางที่ ข16 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 1 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.1	5.1	3.8	0.4
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	1,007	3,010	1,863	523
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	65	685	353	134

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 30 ข้อมูล

ตารางที่ ข17 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.8	7.0	5.7	0.8
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	103	583	337	85
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	250	75	38

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 64 ข้อมูล

ตารางที่ ข18 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	3.7	7.0	5.3	0.9
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	257	790	397	108
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	185	82	42

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 47 ข้อมูล

ตารางที่ ข19 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 2 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	4.3	7.0	5.1	0.7
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	273	727	408	89
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	185	98	43

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 31 ข้อมูล

ตารางที่ ข20 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	4.7	8.2	5.8	0.6
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	50	240	148	40
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	50	50	ไม่พบ

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 66 ข้อมูล

ตารางที่ ข21 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	4.0	6.9	5.6	0.7
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	50	250	159	51
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	50	50	ไม่พบ

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 46 ข้อมูล

ตารางที่ ข22 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 3 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	4.3	6.6	5.4	0.6
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	80	300	183	47
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	50	50	ไม่พบ

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 33 ข้อมูล

ตารางที่ ข23 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 0 - 1,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	4.9	7.4	5.9	0.6
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	20	167	103	41
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	50	50	ไม่พบ

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 66 ข้อมูล

ตารางที่ ข24 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 1,001 - 2,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	4.8	7.0	5.7	0.5
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	30	180	115	42
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	50	50	ไม่พบ

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 46 ข้อมูล

ตารางที่ ข25 คุณลักษณะน้ำล้างบ่อที่ ข - 4 ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟต  
(พื้นที่ผิวชิ้นงานสะสม 2,001 - 3,000 ตารางเมตร ผ่านบ่อกระบวนการ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น			
		ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
พีเอช	ไม่มีหน่วย	4.9	6.4	5.6	0.4
สภาพการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ซม.	41	170	121	41
สภาพกรดแร่	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	50	50	50	ไม่พบ

หมายเหตุ จำนวนข้อมูล 31 ข้อมูล



ตารางที่ ข26 ค่าเฉลี่ยคุณลักษณะน้ำล้าง และสารละลายเคมี

ในบ่อกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	น้ำ ประปา	น้ำ อาร์โอ	สารละลายเคมีในบ่อกระบวนการ เคลือบสังกะสีฟอสเฟต			
			สารละลาย ต่างบ่อที่ 1	สารละลาย ต่างบ่อที่ 2	สารละลาย ปรับ สภาพผิว	สารละลาย สังกะสี ฟอสเฟต
พีเอช	6.9	6.7	10.0	10.0	7.9	3.0
สภาพการนำไฟฟ้า	454	20	25,047	20,793	2,447	23,873
สภาพต่างฟีนอล์ฟทาลิน	ไม่พบ	ไม่พบ	5,900	4,900	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพต่างทั้งหมด	95	5.0	15,150	12,017	517	ไม่พบ
สภาพกรดแร่	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	392
สภาพกรดทั้งหมด	10	5.0	ไม่พบ	ไม่พบ	33	7,867

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์มีหน่วยเป็น มก./ล. as CaCO<sub>3</sub> ยกเว้นค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น

ไมโครซีเมนต์/ซม. ส่วนค่าพีเอชไม่มีหน่วย

ตารางที่ ข27 คุณลักษณะน้ำล้างในบ่อน้ำล้าง ก - 1 ของการล้างสารละลายต่าง  
ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	ใช้น้ำประปาล้างสวนกระแส				ใช้น้ำทิ้งล้างสวนกระแส			
	ปริมาณน้ำล้าง (มล.)				ปริมาณน้ำล้าง (มล.)			
	1,480	580	270	130	1,480	580	270	130
พีเอช	9.8	10.0	9.9	10.1	7.6	8.7	9.5	9.8
สภาพการนำไฟฟ้า	1,533	2,600	3,950	4,390	2,260	3,497	4,211	4,697
สภาพค่าฟีนอล์ฟทาไลน์	393	580	757	918	13.0	167	467	723
สภาพค่าทั้งหมด	773	1,353	1,903	2,338	717	1,213	1,813	2,210
สภาพกรดแร่	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์มีหน่วยเป็น มก./ล. as CaCO<sub>3</sub> ยกเว้นค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น ไมโครซีเมนต์/ชม. ส่วนค่าพีเอชไม่มีหน่วย

ตารางที่ ข28 คุณลักษณะน้ำล้างในบ่อน้ำล้าง ก - 2 ของการล้างสารละลายต่าง  
ในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	ใช้น้ำประปาล้างสวนกระแส				ใช้น้ำทิ้งล้างสวนกระแส			
	ปริมาณน้ำล้าง (มล.)				ปริมาณน้ำล้าง (มล.)			
	1,480	580	270	130	1,480	580	270	130
พีเอช	8.8	9.3	9.3	9.6	5.1	5.8	6.2	6.6
สภาพการนำไฟฟ้า	625	831	1,106	1,378	1,472	2,343	2,477	2,590
สภาพค่าฟีนอล์ฟทาไลน์	48	128	200	220	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพค่าทั้งหมด	262	390	527	637	45.0	157	393	443
สภาพกรดแร่	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	387	340	323	240

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์มีหน่วยเป็น มก./ล. as CaCO<sub>3</sub> ยกเว้นค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น ไมโครซีเมนต์/ชม. ส่วนค่าพีเอชไม่มีหน่วย

ตารางที่ ข29 คุณลักษณะน้ำล้างในบ่อน้ำล้าง ข - 1 และ ข - 4 ของการล้างสารละลาย  
สังกะสีฟอสเฟตในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตจำลองในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	บ่อน้ำล้างแรก (บ่อ ข - 1)				บ่อน้ำล้างสุดท้าย (บ่อ ข - 4)			
	ปริมาณน้ำล้าง (มล.)				ปริมาณน้ำล้าง (มล.)			
	1,480	580	270	130	1,480	580	270	130
พีเอช	3.7	3.6	3.2	3.3	5.8	5.5	5.5	4.9
สภาพการนำไฟฟ้า	1,828	3,127	4,427	5,450	52	100	151	205
สภาพด่าง ฟีนอล์ฟทาลีน	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพด่างทั้งหมด	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดแตร	10.0	32.0	43.0	55.0	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สภาพกรดทั้งหมด	983	1,040	1,180	1,270	10	22	22	53

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์มีหน่วยเป็น มก./ล. as CaCO<sub>3</sub> ยกเว้นค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น  
ไมโครซีเมนต์/ซม. ส่วนค่าพีเอชไม่มีหน่วย

ตารางที่ ข30 ผลของแรงขับเคลื่อนต่อฟลักซ์ และประสิทธิภาพการกักกัน  
สำหรับระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำประปาเป็นน้ำป้อน)

ครั้งที่	แรงขับเคลื่อน (ป้อนต่อตารางนิ้ว)	อัตราน้ำ (ลิตรต่อนาที)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม.ชม.)	ค่าสภาพ การนำไฟฟ้า ของน้ำอาร์โอ (ไมโครซีเมนต์/ชม.)	ประสิทธิภาพ การกักกัน (ร้อยละ)
		น้ำ ป้อน	น้ำ อาร์โอ			
1	110	13	3	23.7	4.5	98.8
2	110	13	3	23.7	4.4	98.8
3	110	13	3	23.7	4.4	98.8
เฉลี่ย	110	13	3	23.7	4.4	98.8
1	125	14	4	31.6	3.8	99.0
2	125	14	4	31.6	3.8	99.0
3	125	14	4	31.6	3.9	99.0
เฉลี่ย	125	14	4	31.6	3.8	99.0
1	150	15	5	39.5	3.6	99.1
2	150	15	5	39.5	3.6	99.1
3	150	15	5	39.5	3.6	99.1
เฉลี่ย	150	15	5	39.5	3.6	99.1
1	170	16	6	47.4	3.5	99.1
2	170	16	6	47.4	3.5	99.1
3	170	16	6	47.4	3.5	99.1
เฉลี่ย	170	16	6	47.4	3.5	99.1

หมายเหตุ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำประปาที่ใช้ในการทดลอง 380 ไมโครซีเมนต์/ชม.

ตารางที่ ข31 ผลของแรงขับเคลื่อนต่อฟลักซ์ และประสิทธิภาพการกักกัน  
สำหรับระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำทิ้งอาร์โอเป็นน้ำป้อน)

ครั้งที่	แรงขับเคลื่อน (ป้อนต่อตารางนิ้ว)	อัตราน้ำ (ลิตรต่อนาที)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม.ชม.)	ค่าสภาพ การนำไฟฟ้า ของน้ำอาร์โอ (ไมโครซีเมนต์/ชม.)	ประสิทธิภาพ การกักกัน (ร้อยละ)
		น้ำ ป้อน	น้ำ อาร์โอ			
1	110	13	3	23.7	8.4	98.9
2	110	13	3	23.7	8.7	98.9
3	110	13	3	23.7	8.5	98.9
เฉลี่ย	110	13	3	23.7	8.5	98.9
1	125	14	4	31.6	7.7	99.0
2	125	14	4	31.6	7.6	99.0
3	125	14	4	31.6	7.8	99.0
เฉลี่ย	125	14	4	31.6	7.7	99.0
1	150	15	5	39.5	7.1	99.1
2	150	15	5	39.5	7.2	99.1
3	150	15	5	39.5	7.3	99.1
เฉลี่ย	150	15	5	39.5	7.2	99.1
1	170	16	6	47.4	7.4	99.0
2	170	16	6	47.4	7.3	99.01
3	170	16	6	47.4	7.4	99.0
เฉลี่ย	170	16	6	47.4	7.4	99.0

หมายเหตุ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำประปาที่ใช้ในการทดลอง 770 ไมโครซีเมนต์/ชม.

ตารางที่ ข32 ผลของเปอร์เซ็นต์แยกกลับต่อคุณภาพน้ำอาร์โอ  
สำหรับระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำประปาเป็นน้ำป้อน)

เปอร์เซ็นต์แยกกลับ (ร้อยละ)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)		ประสิทธิภาพการกักกัน (ร้อยละ)
	น้ำก่อนเข้าเมมเบรน	น้ำอาร์โอ	
8.3	430	4.9	98.9
16.7	460	5.0	98.9
25.0	500	5.2	99.0
33.3	530	5.4	99.0
41.7	590	5.7	99.0
50.0	650	6.2	99.1
58.3	730	6.7	99.1
66.7	840	7.7	99.1
75.0	990	9.0	99.1
83.3	1,210	11.3	99.1
91.7	1,540	14.9	99.0
		เฉลี่ย	99.0

หมายเหตุ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำประปาที่ใช้ในการทดลอง 400 ไมโครซีเมนต์/ซม.

สถานะควบคุม : อัตราน้ำป้อน และอัตราน้ำเพอมีเอท 14 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

ตารางที่ ข33 ผลของเปอร์เซ็นต์แยกกลับต่อคุณภาพน้ำอาร์โอ  
สำหรับระบบอาร์โอต้นแบบ (กรณีน้ำทิ้งอาร์โอเป็นน้ำป้อน)

เปอร์เซ็นต์แยกกลับ (ร้อยละ)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)		ประสิทธิภาพการกักกัน (ร้อยละ)
	น้ำก่อนเข้าเมมเบรน	น้ำอาร์โอ	
8.3	750	8.0	98.9
16.7	790	7.8	99.0
25.0	900	8.2	99.1
33.3	970	8.9	99.1
41.7	1,060	9.8	99.1
50.0	1,200	10.6	99.1
58.3	1,360	11.7	99.1
66.7	1,480	13.0	99.1
75.0	1,690	14.4	99.2
83.3	1,910	15.6	99.2
91.7	2,370	19.2	99.2
		เฉลี่ย	99.1

หมายเหตุ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งๆที่ใช้ในการทดลอง 730 ไมโครซีเมนต์/ซม.

สถานะควบคุม : อัตราน้ำป้อนและอัตราน้ำเพอมีเอท 14 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ



ตารางที่ ข34 แรงขับเคลื่อน และลักษณะน้ำในระหว่างเดินระบบอาร์ไอต้นแบบ  
(กรณีน้ำประปาเป็นน้ำป้อน)

พารามิเตอร์	ชนิดของน้ำ	จำนวน ข้อมูล	ความเข้มข้น			
			ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	S.D.
แรงขับเคลื่อน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		25	120.0	125.0	121.4	2.1
พีเอช (ไม่มีหน่วย)	น้ำป้อน	25	6.9	7.3	7.1	0.1
	น้ำรีเทนเทท	25	7.5	7.7	7.6	0.1
	น้ำอาร์ไอ	25	5.2	6.9	6.4	0.4
สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)	น้ำป้อน	25	340.0	360.0	345.0	5.7
	น้ำรีเทนเทท	25	1,210.0	1,390.0	1,271.0	34.9
	น้ำอาร์ไอ	25	9.0	12.2	10.5	0.7
	การกักกัน (%)	25	96.5	97.4	97.0	0.2
ความขุ่น (NTU)	น้ำป้อน	25	0.7	1.1	0.9	0.1
	น้ำรีเทนเทท	25	0.6	0.9	0.8	0.1
	น้ำอาร์ไอ	25	0.5	0.8	0.7	0.1
ความกระด้าง (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	น้ำป้อน	3	127.0	130.0	129.0	1.4
	น้ำรีเทนเทท	3	504.0	550.0	521.0	20.4
	น้ำอาร์ไอ	3	0.5	0.5	0.5	0.0
	การกักกัน (%)	3	99.6	99.6	99.6	0.0
สภาพด่างทั้งหมด (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	น้ำป้อน	25	100.0	200.0	132.0	31.2
	น้ำรีเทนเทท	25	300.0	400.0	352.0	29.9
	น้ำอาร์ไอ	25	5.0	5.0	5.0	0.0
สภาพกรดทั้งหมด (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	น้ำป้อน	25	10.0	10.0	10.0	0.0
	น้ำรีเทนเทท	25	10.0	10.0	10.0	0.0
	น้ำอาร์ไอ	25	5.0	5.0	5.0	0.0

หมายเหตุ สภาพะควบคุม : เฟอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 75.0 และเพอมีอเทฟลักซ์ 31.6 ล./ตร.ม.ซม.

ตารางที่ ข35 แรงขับเคลื่อน และลักษณะน้ำในระหว่างเดินระบบอาร์โอต้นแบบ  
(กรณีน้ำทิ้งอาร์โอเป็นน้ำป้อน)

พารามิเตอร์	ชนิดของน้ำ	จำนวน ข้อมูล	ความเข้มข้น			
			ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	SD
แรงขับเคลื่อน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		64	115.0	125.0	121.7	2.9
พีเอช (ไม่มีหน่วย)	น้ำป้อน	64	7.2	7.9	7.5	0.1
	น้ำรีเทนเทท	64	7.7	7.9	7.8	0.1
	น้ำอาร์โอ	64	5.9	7.0	6.6	0.3
สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)	น้ำป้อน	64	570.0	860.0	681.0	61.3
	น้ำรีเทนเทท	64	1,260.0	1,860.0	1,545.0	118.4
	น้ำอาร์โอ	64	9.1	13.5	11.3	0.9
	การกักกัน (%)	64	98.1	98.6	98.3	0.1
ความขุ่น (NTU)	น้ำป้อน	64	0.5	1.2	0.8	0.2
	น้ำรีเทนเทท	64	0.4	0.8	0.6	0.1
	น้ำอาร์โอ	64	0.4	0.8	0.5	0.1
ความกระด้าง (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	น้ำป้อน	3	230.0	237.0	234.0	19.3
	น้ำรีเทนเทท	3	580.0	600.0	590.0	64.2
	น้ำอาร์โอ	3	0.5	0.5	0.5	0.0
	การกักกัน (%)	3	99.8	99.8	99.8	0.0
สภาพด่างทั้งหมด (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	น้ำป้อน	64	150.0	250.0	189.0	21.2
	น้ำรีเทนเทท	64	325.0	450.0	410.0	35.1
	น้ำอาร์โอ	64	5.0	5.0	5.0	0.0
สภาพกรดทั้งหมด (มก./ล. as CaCO <sub>3</sub> )	น้ำป้อน	64	10.0	10.0	10.0	0.0
	น้ำรีเทนเทท	64	20.0	20.0	20.0	0.0
	น้ำอาร์โอ	64	5.0	5.0	5.0	0.0

หมายเหตุ สภาพควบคุม : เเปอร์เซ็นต์แยกกลับร้อยละ 60.0 และเพอมีเอทฟลักซ์ 31.6 ล./ตร.ม.ชม.

ตารางที่ ข36 ลักษณะน้ำเสีย น้ำทิ้ง และน้ำกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

พารามิเตอร์	หน่วย	ตัวอย่างน้ำ			
		ชุดน้ำ ตัวอย่าง	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำผ่าน ยูเอฟ
พีเอช	ไม่มีหน่วย	1	7.2	11.6	6.7
		2	7.2	11.7	5.7
		3	7.0	11.5	7.6
	เฉลี่ย		7.1	11.6	6.7
ความขุ่น (NTU)	NTU	1	75	16	1.4
		2	359	14	0.7
		3	89	4.9	1.2
	เฉลี่ย		174	11.5	1.1
ค่าสภาพนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์ /ชม.	1	623	2,960	1,748
		2	603	3,250	1,932
		3	480	1,980	1,356
	เฉลี่ย		569	2,730	1,679
ค่าสภาพด่างทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	1	200	700	37.5
		2	200	725	31.3
		3	200	475	100.0
	เฉลี่ย		200	633.3	56.3
ค่าสภาพกรดทั้งหมด	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	1	75	ไม่พบ	12.5
		2	75	ไม่พบ	18.8
		3	75	ไม่พบ	12.5
	เฉลี่ย		75	ไม่พบ	14.6
ความกระด้าง	มก./ล. as CaCO <sub>3</sub>	1	280	420	460
		2	220	440	530
		3	80	250	370
	เฉลี่ย		580	370	453

ตารางที่ ข37 สภาพการซึมผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย  
(เพอมีเอทฟลักซ์ 87.5 ล./ตร.ม.ชม.)

ระยะเวลา การกรอง (นาที)	$\mu R$ (ปาสคาล.วินาที/เมตร)	$L_p$ (ล./ตร.ม.ชม.(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว))	ระยะเวลา ล้างย้อน (นาที)
0	5,957,280,000	4.2	-
10	7,943,040,000	3.1	-
10	5,957,280,000	4.2	75
20	6,950,160,000	3.6	-
20	5,957,280,000	4.2	60
30	6,950,160,000	3.6	-
30	5,957,280,000	4.2	60

หมายเหตุ ทดลองเดินระบบกรองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ความคุมเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่ 50

ตารางที่ ข38 สภาพการซึมผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย  
(เพอมีเอทฟลักซ์ 100.0 ล./ตร.ม.ชม.)

ระยะเวลา การกรอง (นาที)	$\mu R$ (ปาสคาล.วินาที/เมตร)	$L_p$ (ล./ตร.ม.ชม.(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว))	ระยะเวลา ล้างย้อน (นาที)
0	3,971,520,000	6.3	-
10	6,453,720,000	3.9	-
10	4,964,400,000	5.0	30
20	6,950,160,000	3.6	-
20	5,957,280,000	4.2	30
30	6,950,160,000	3.6	-
30	7,446,600,000	4.2	45

หมายเหตุ ทดลองเดินระบบกรองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ความคุมเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่ 50

ตารางที่ ข39 สภาพการซึมผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย  
(เพอมีเอทฟลักซ์ 112.5 ล./ตร.ม.ชม.)

ระยะเวลา การกรอง (นาที)	$\mu R$ (ปาสคาล.วินาที/เมตร)	$L_p$ (ล./ตร.ม.ชม.(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว))	ระยะเวลา ล้างย้อน (นาที)
0	5,460,840,000	4.6	-
3	5,957,280,000	4.2	-
3	4,964,400,000	5.0	30
6	5,957,280,000	4.2	-
6	5,460,840,000	4.6	30
9	5,957,280,000	4.2	-

หมายเหตุ ทดลองเดินระบบกรองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ความคุมเปอร์เซ็นต์แยกกลับที่ 50

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

สุนทร แส่นหุ่ม (2550). การลดการใช้น้ำในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จโดยอาศัยเทคโนโลยีสะอาด. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 6., หน้า 181

## ประวัติผู้เขียน

นายสุนทร แสนหุม เกิดเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2516 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร เริ่มการศึกษาในระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนชุมชนดงมะไฟเจริญศิลป์, ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนดงมะไฟวิทยา, ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล จังหวัดสกลนคร จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา หลังจากสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2539 ได้เข้าทำงานที่งานประปาและสิ่งแวดล้อม ส่วนอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำแหน่งวิศวกร และวิศวกรหัวหน้างานประปาและสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ

ปี พ.ศ. 2546 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยสอนและวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 6 ประจำปี พ.ศ. 2550 เรื่องการลดการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบฟอสเฟตในอุตสาหกรรมตกแต่งโลหะสำเร็จโดยอาศัยเทคโนโลยีสะอาด