

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของน้ำทิ้งที่เข้าระบบ

ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม ซึ่งเป็นน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมซึ่งได้ผ่านระบบบำบัดหลักของโรงงานซึ่งเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพมาแล้ว คุณสมบัติโดยรวมของน้ำทิ้ง ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น จะมีปัญหาบ้างก็จะเป็นในด้านของสี ซึ่งมีความเข้มข้นสูงพอสมควร โดยขึ้นกับกระบวนการฟอกย้อมในแต่ละชุดของโรงงาน

4.1.1 คุณสมบัติน้ำดิบสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

น้ำทิ้งที่นำมาใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้จากการเก็บจากรางระบายน้ำทิ้งของโรงงานที่ออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ และเก็บน้ำใหม่เพื่อใช้กับแต่ละชุดการทดลอง คุณสมบัติของน้ำทิ้งที่เก็บมาแต่ละครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำทิ้งที่เก็บมาจากโรงงานเพื่อใช้ในการทดลอง

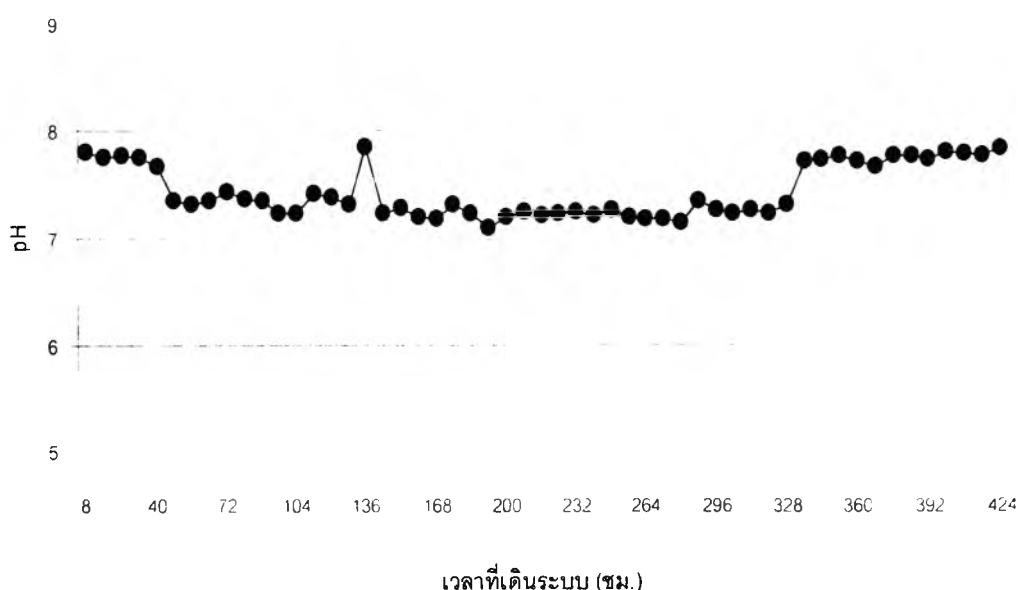
| คุณสมบัติ | หน่วย | ช่วงค่า | ค่าเฉลี่ย |
|--------------------------|-------|-------------|-----------|
| พีเอช | - | 7.7 - 8 | 7.82 |
| อุณหภูมิ | °C | 29 - 33 | 30.87 |
| ความนำไฟฟ้า | µS | 2430 - 2770 | 2595 |
| ความขุ่น | NTU | 7 - 21 | 13.64 |
| สี | SU | 7 - 24 | 12.33 |
| | ADMI | 116 - 371 | 197.26 |
| SDI | - | 8.59 - 18.4 | 14.65 |
| SDI หลังผ่าน ไล์กรอง 5µm | - | 3.1 - 3.7 | 3.43 |
| ของแข็งทั้งหมด | mg/l | 1490 - 2250 | 1844.5 |

| คุณสมบัติ | หน่วย | ช่วงค่า | ค่าเฉลี่ย |
|-----------------------|------------------------|-------------|-----------|
| ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด | mg/l | 20 - 58 | 32.5 |
| ของแข็งละลายทั้งหมด | mg/l | 1470 - 2190 | 1805 |
| ความกระด้างทั้งหมด | mg/l CaCO ₃ | 27 - 150 | 91.25 |
| สภาพด่างทั้งหมด | mg/l CaCO ₃ | 150 - 223 | 201.25 |
| แคลเซียม | mg/l CaCO ₃ | 25 - 95 | 64.38 |
| คลอไรด์ | mg/l Cl | 92.5 - 280 | 212.44 |
| ค่าดัชนีแลงเกิลีย์ | | -0.6 - 0.49 | 0.028 |

4.1.2 คุณสมบัติน้ำที่ตลอดช่วงการทดลองในระดับขนาดทดสอบ (Pilot Scale)

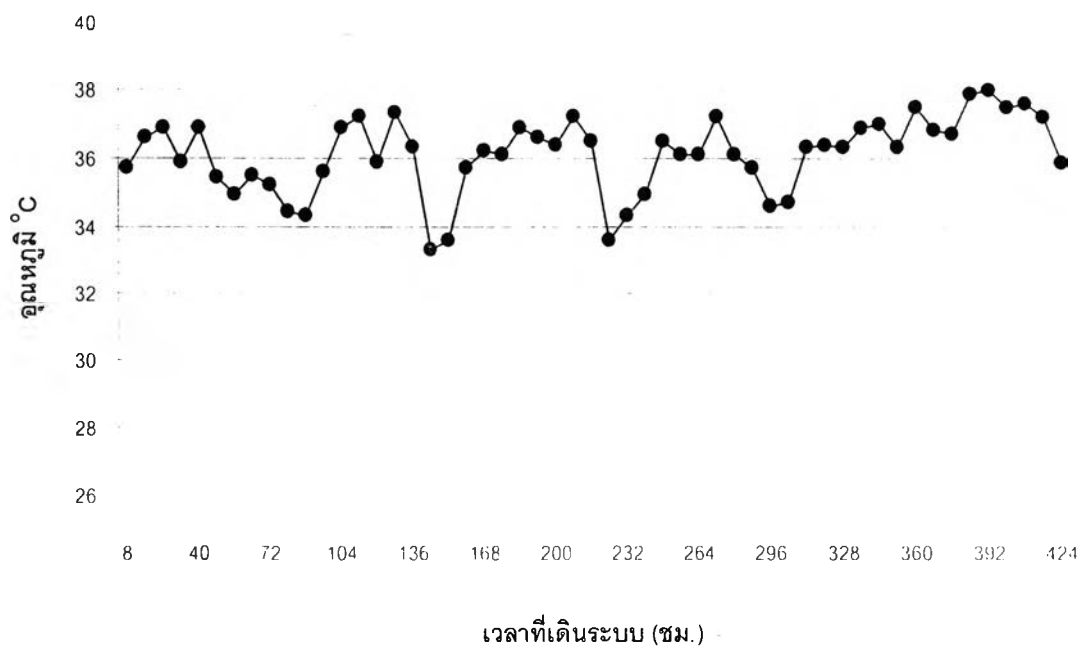
ในการทดลองที่โรงงานนี้ได้ทำการสูบน้ำทิ้งจากรางระบายน้ำโดยตรงเข้าสู่ระบบ และมีการตรวจสอบคุณสมบัติน้ำที่เข้าระบบทุก ๆ 8 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 424 ชั่วโมง ซึ่งคุณสมบัติน้ำทิ้งที่เข้าระบบของการทดลองที่โรงงานแสดงดังรูปที่ 4.1 - 4.13

ค่าพีเอชของน้ำที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 7.1 - 7.9 ซึ่งเป็นช่วงค่าที่ปกติ และไม่กระทบต่อการทำงานของตัวเมมเบรน ค่าพีเอช รูปที่ 4.1 แสดงช่วงของพีเอชที่เข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

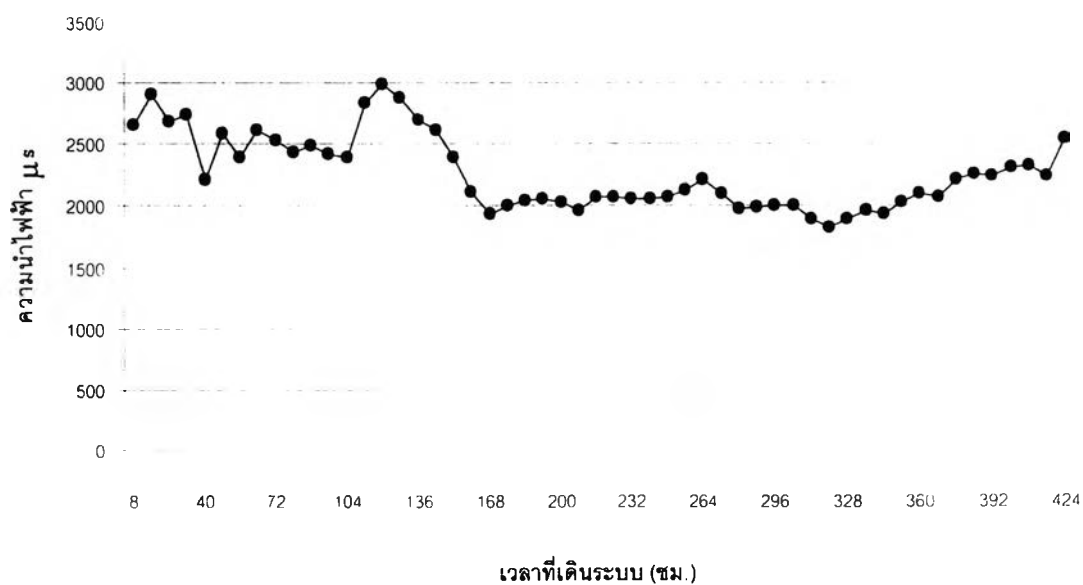


รูปที่ 4.1 ค่า pH ของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

ในส่วนของคุณภูมิของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานที่จะเข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน จะมีค่าอยู่ระหว่าง 33 – 38 องศาเซลเซียส และค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่เข้าระบบจะมีค่าระหว่าง 1820 – 2990 μs ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

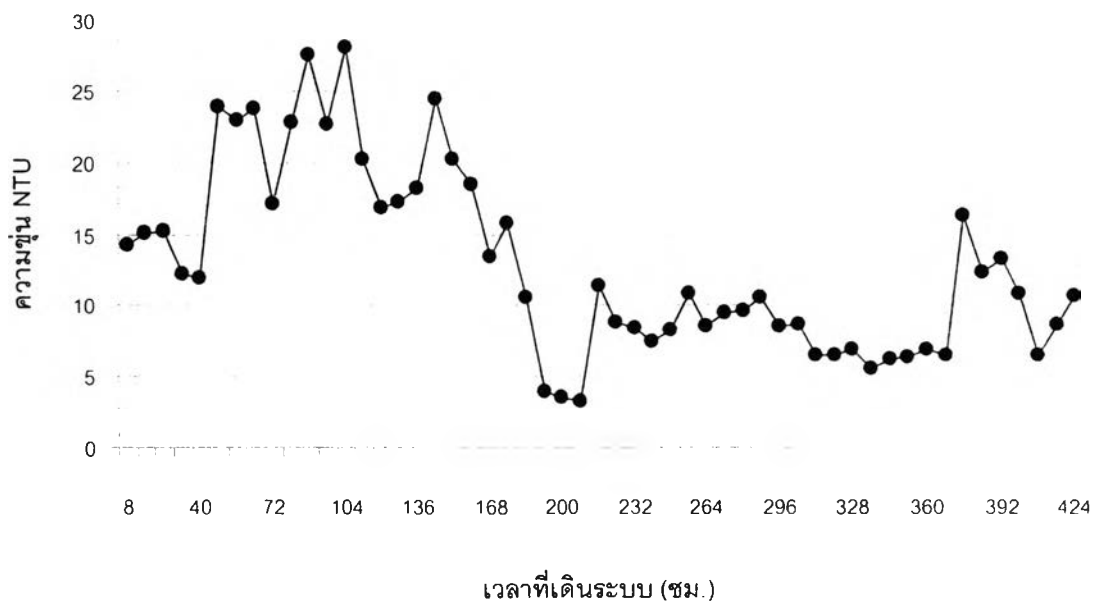


รูปที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน

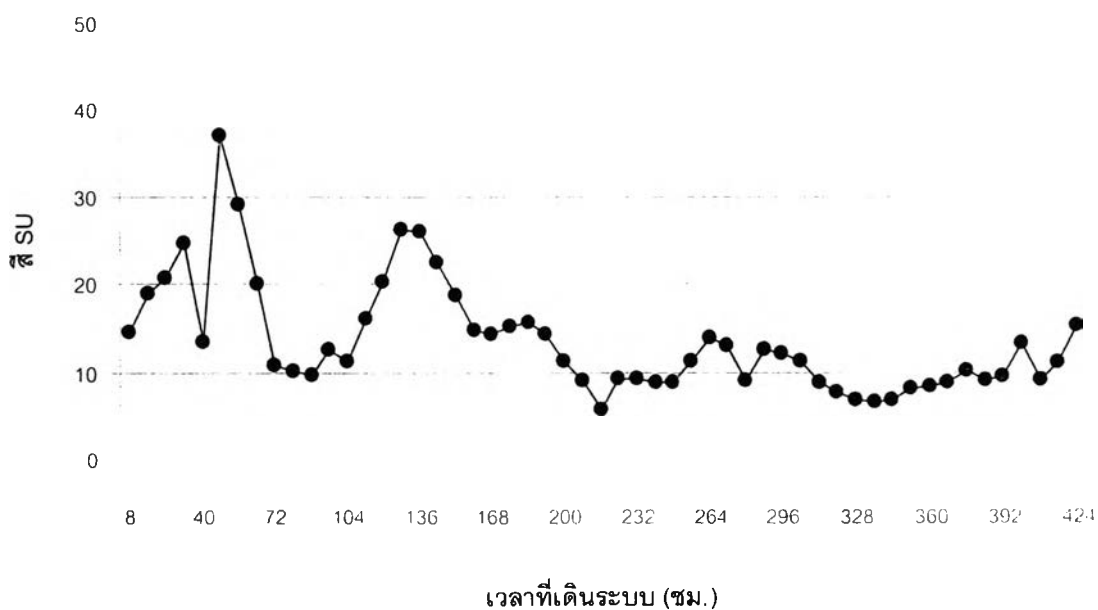


รูปที่ 4.3 ค่าความนำไฟฟ้ากับระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน

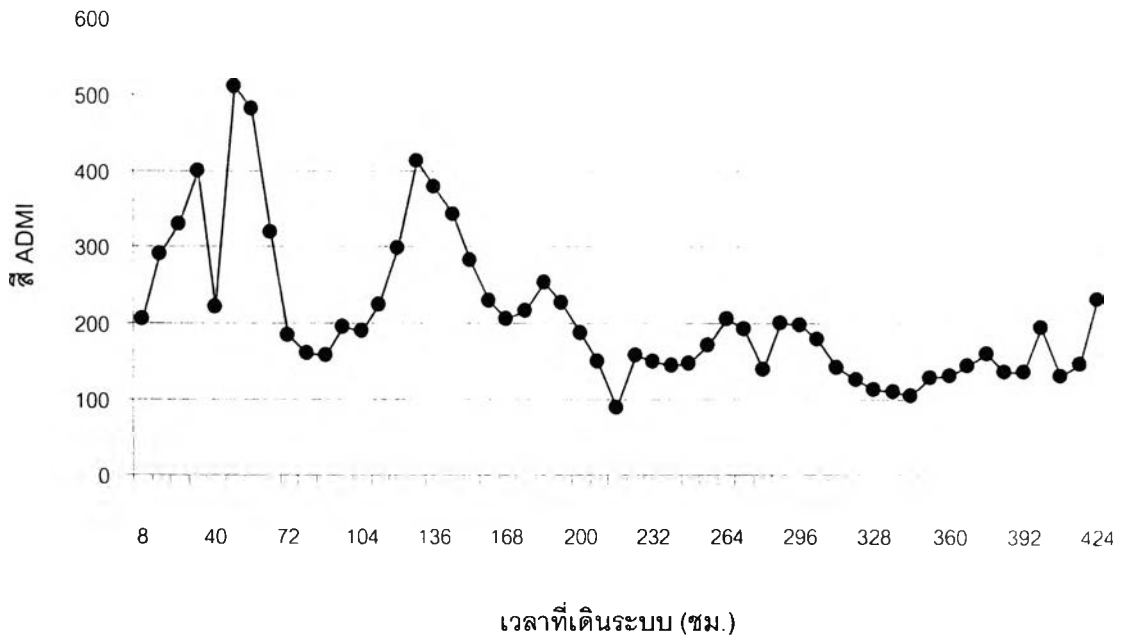
สำหรับในด้านของสีและความขุ่นของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดนั้นก็สามรถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยค่าของความขุ่นมีค่าอยู่ที่ 3.28 – 28.1 NTU ในขณะที่สีมีค่าอยู่ระหว่าง 5.7 – 37.1 ในหน่วย SU และ 89.9 – 509.9 ในหน่วย ADMI ความขุ่น และสีใน SU และ ADMI ของน้ำที่เข้าระบบ แสดงดังรูปที่ 4.4 – 4.6



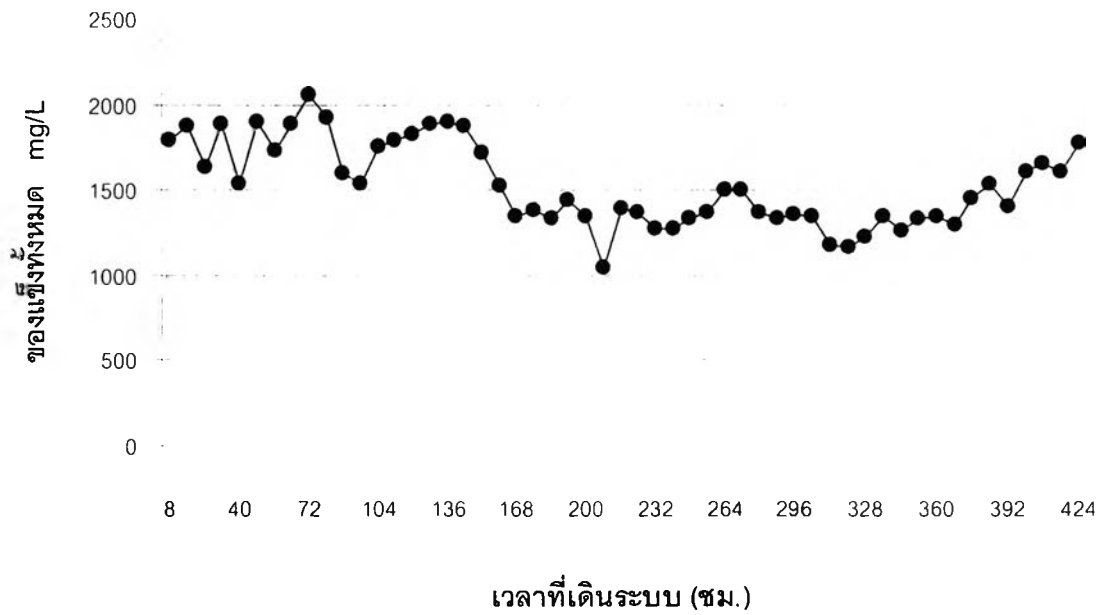
รูปที่ 4.4 ค่าความขุ่นของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน



รูปที่ 4.5 สีของน้ำที่เข้าระบบในหน่วย SU ตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน

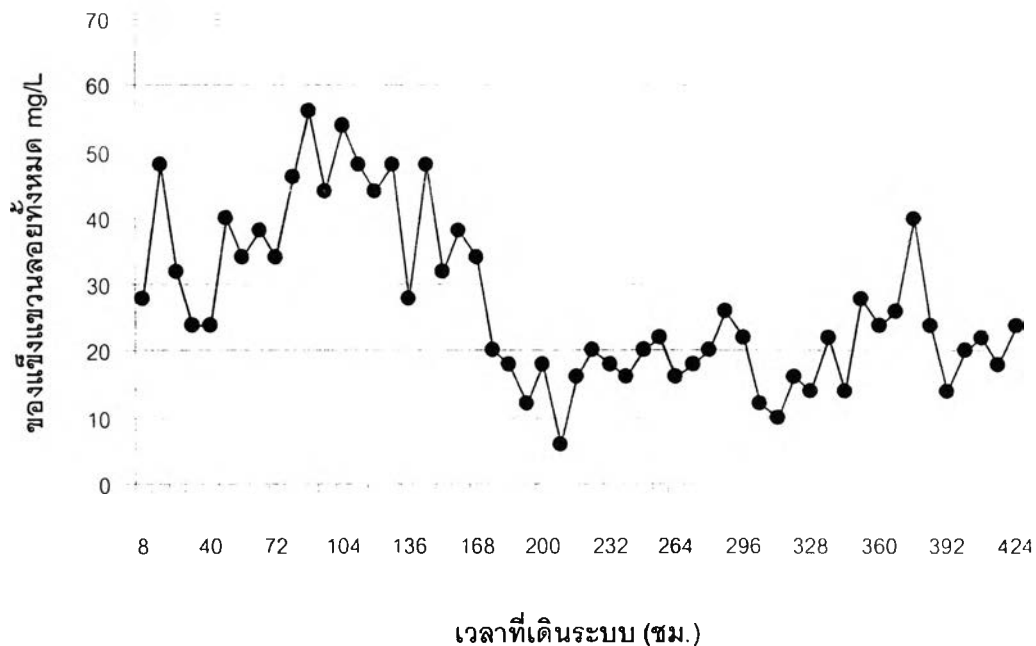


รูปที่ 4.6 ค่าของน้ำที่เข้าระบบในหน่วย ADMU ตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน

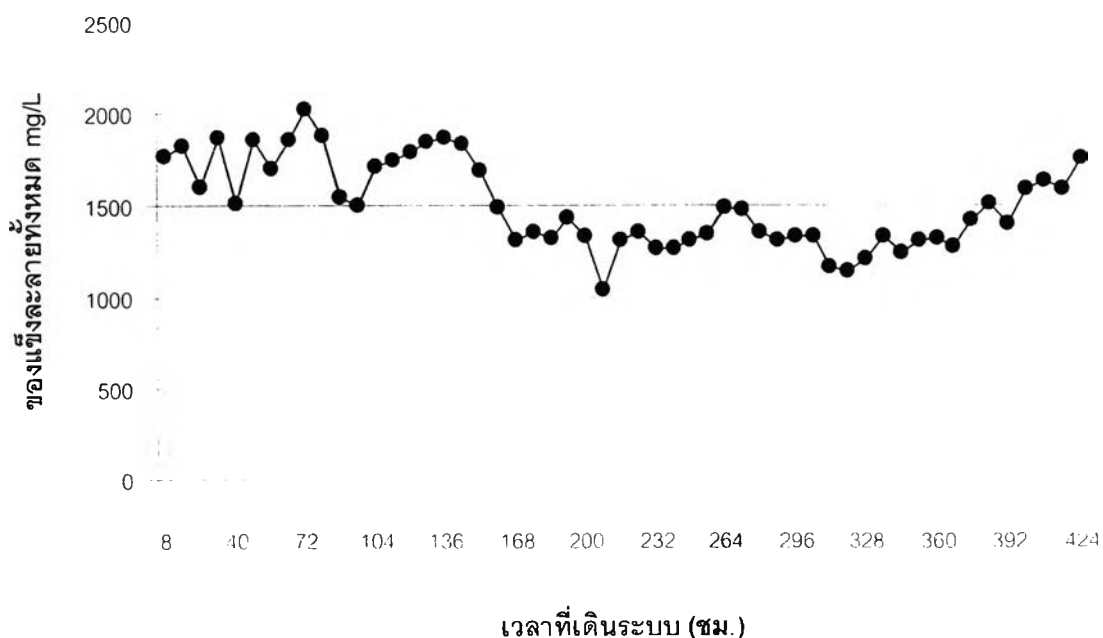


รูปที่ 4.7 ของแข็งทั้งหมดในน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

ในด้านของของแข็งประกอบด้วยของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายในน้ำที่เข้าระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 1,050 – 2,060 mg/l, 6 – 84 mg/l และ 1,044 – 2,066 mg/l ตามลำดับ และแสดงดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

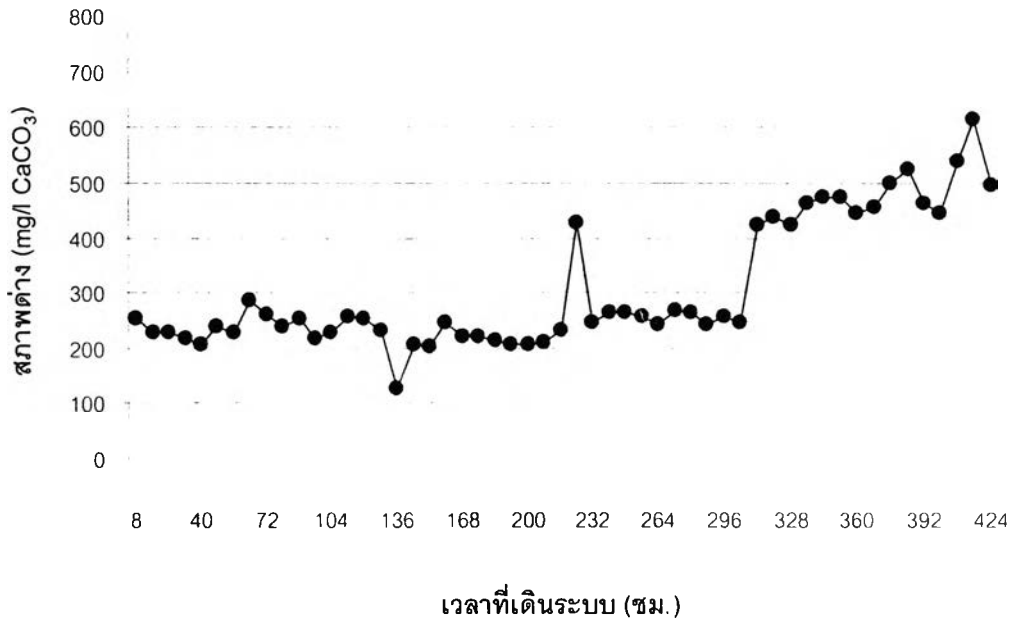


รูปที่ 4.8 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

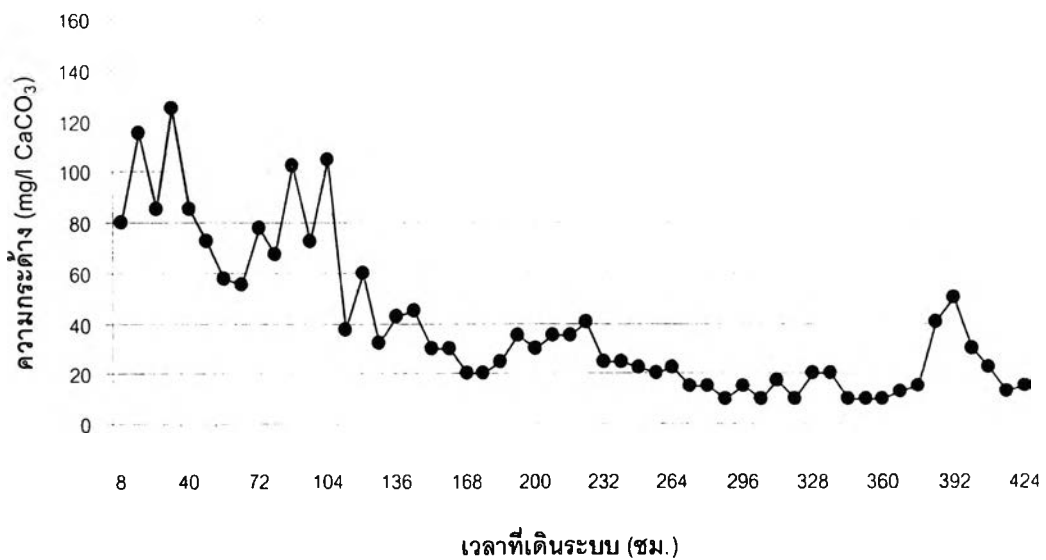


รูปที่ 4.9 ของแข็งละลายทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน

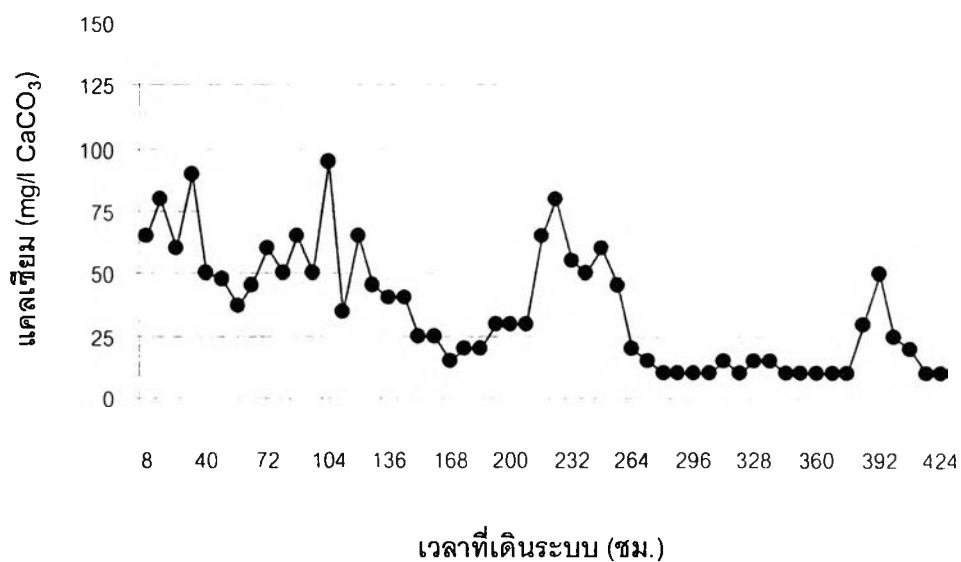
สภาพต่างของน้ำที่เข้าในระบบนั้นอยู่ที่ 127.5 – 617.5 mg/l CaCO₃ ในขณะที่ความกระด้างอยู่ที่ 10 - 125 mg/l CaCO₃ และค่าของแคลเซียมอยู่ระหว่าง 10 – 95 mg/l CaCO₃ ในขณะที่คลอไรด์มีค่าอยู่ที่ 88.7 – 282.4 mg/l Cl สภาพต่าง ความกระด้าง แคลเซียม และคลอไรด์ในน้ำที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันแสดงดังรูปที่ 4.10 – 4.13 ตามลำดับ



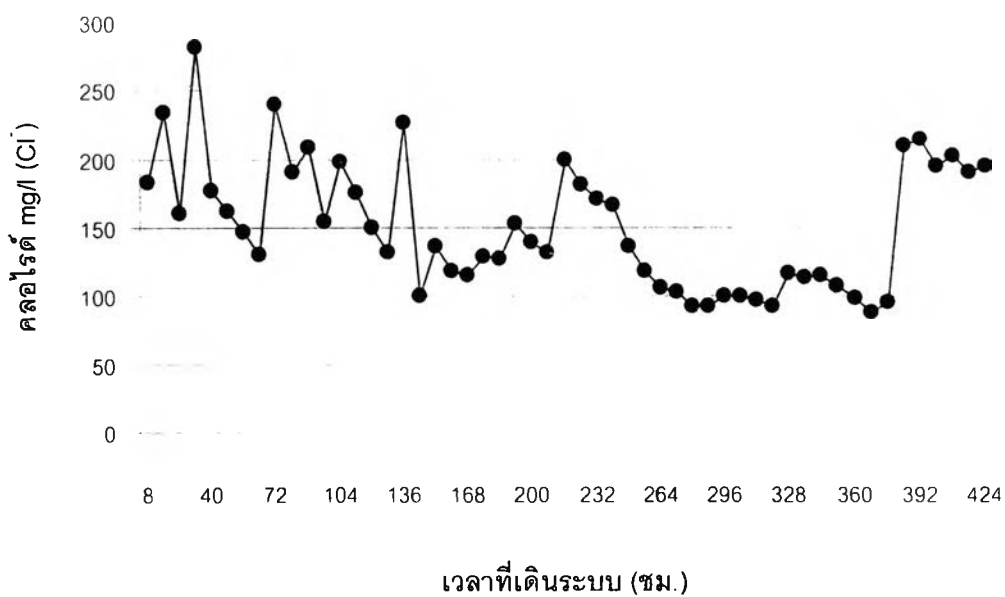
รูปที่ 4.10 สภาพต่างทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน



รูปที่ 4.11 ความกระด้างทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน



รูปที่ 4.12 แคลเซียมของน้ำที่เข้าระบบตลอดเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน



รูปที่ 4.13 ค่าคลอไรด์ของน้ำดิบที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน

4.2 ผลการทดลองของการทดลองด้วยชุด Test Cell ในห้องปฏิบัติการ

สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ จะทดสอบการเดินระบบกับชุด Test Cell เพื่อหาสภาพการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการเดินระบบทดลองในระดับขนาดทดสอบ (Pilot Scale) ที่โรงงานต่อไป

4.2.1 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพของระบบ

จากการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนของความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเดินระบบ กับประสิทธิภาพของระบบ คือเมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบแล้วอัตราการผลิตน้ำสะอาด รวมถึงคุณภาพของน้ำที่ผลิตได้จะมีคุณภาพดีขึ้น

4.2.1.1 ผลของความดันในการเดินระบบต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

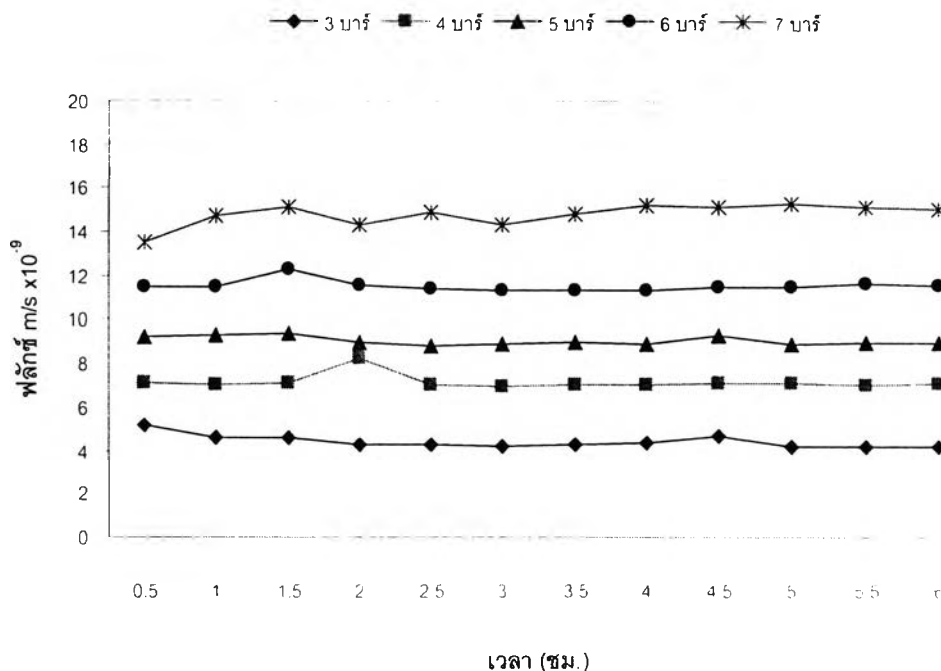
อัตราการผลิตน้ำสะอาดของแต่ละชุดทดลอง จะเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น และผลการทดลองก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุวิทย์ กิตติภูมิชัย (2543) และ ปฏิรูป ผลจันทร์ (2544) รวมถึงงานวิจัยอีกหลายชิ้นก็ได้ผลสอดคล้องกัน ซึ่งก็พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้นั้นจะแปรผันตรงกับความดันที่ใช้ในการเดินระบบ ในการใช้ความดันในการเดินระบบแต่ละค่าตลอดระยะเวลาการทดลองแต่ละชุด ค่า Flux ตลอดการทดลองไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เพราะช่วงเวลาในการทดลองไม่ยาวนาน และการที่เลือกใช้ค่า Crossflow Velocity ที่สูงถึง 0.7 เมตรต่อวินาที ซึ่งเพียงพอที่จะป้องกันการเกิด Concentration Polarization ได้ตลอดช่วงเวลาการทดลอง ความสัมพันธ์ระหว่างความดันต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาดหรือค่า Flux แสดงดังรูปที่ 4.14 และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันที่ใช้ได้แก่สมการที่ 2.8

$$F_w = K_w[\Delta P - \Delta \pi] \quad (2.8)$$

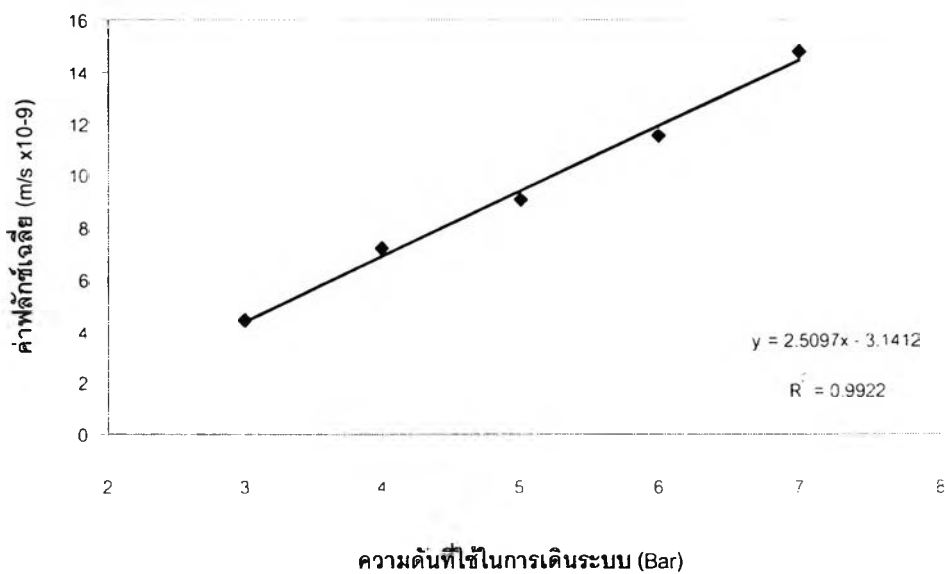
จากสมการที่ 2.8 เห็นได้ชัดว่าเมื่อเพิ่มความดัน (ΔP) ให้สูงขึ้นค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ได้ (F_w) ก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อค่าแรงดันออสโมติก ($\Delta \pi$) มีค่าคงที่ และจากกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการเดินระบบกับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ จะสามารถหาค่า K_w ซึ่งก็คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ($m^3/m^2 \cdot s \cdot bar$) โดยได้ค่า K_w ของการทดลองนี้ได้เท่ากับ

$2.51 \times 10^{-9} \text{ (m}^3/\text{m}^2\text{-s-bar)}$ และได้สมการแทนความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าฟลักซ์สำหรับการทดลองนี้ก็คือ

$$F_w = 2.51 \times 10^{-9} [\Delta P - \Delta \pi] - 3.1412 \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบที่ความดันต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 1.1



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยและความดันในการเดินระบบค่าต่าง ๆ

4.2.1.2 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าพีเอช

ผลของความดันในการเดินระบบที่มีต่อค่าพีเอชก็มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละชุดการทดลอง และในน้ำสะอาดมีค่าพีเอชสูงกว่าในน้ำดิบเล็กน้อย แต่ไม่เห็นผลเด่นชัดนัก เนื่องจากการทดลองใช้ชุด test cell ซึ่งพื้นที่ผิวเมมเบรนค่อนข้างน้อย อัตราการผลิตน้ำสะอาดก็ค่อนข้างต่ำมาก โดยที่ค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 7.4 – 7.8 และรูปที่ 4.17 (ก) แสดงถึงค่าพีเอชในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ

4.2.1.3 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลาย

เมื่อเพิ่มความดันในการเดินระบบทำให้ค่าความนำไฟฟ้ารวมถึงค่าของแข็งละลายในน้ำสะอาดที่ผลิตได้ลดลง นั่นคือค่าร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายจะสูงขึ้นตามความดันในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้นแนวโน้มที่จะเกิด Concentration Polarization ก็สูงขึ้น และอาจจะก่อให้เกิดฟิล์มบาง ๆ บนผิวหน้าเมมเบรน หรือความหนาแน่นของตัวถูกละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน จนทำให้มีโอกาสหลุดผ่านเมมเบรนไปได้ ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง และได้พบว่าที่ความดันในการเดินระบบ 7 บาร์ ค่าร้อยละของการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าเริ่มมีค่าคงที่ ในขณะที่การกำจัดของแข็งละลายเริ่มมีค่าคงที่เช่นกัน ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของสุวิทย์ กิตติภูมิชัย (2543) และปฏิรูป ผลจันทร์ (2544)

ประสิทธิภาพในการกำจัดความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในการเดินระบบนั้น สามารถอธิบายได้โดยการทำสมการแบบจำลองการละลาย-การแพร่ (2.15) ให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น

$$C_p = \frac{K_s \cdot C_f}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (2.15)$$

เมื่อทำสมการที่ 2.15 ให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น จะได้เป็น

$$\frac{C_p}{C_i} = \frac{K_s}{K_s + x \cdot K_w (\Delta P - \Delta \pi)} \quad (4.2)$$

$$\text{โดยที่ } x = \frac{(2 - 2R)}{2 - R}$$

จากสมการที่ 4.2 ค่าร้อยละของการกำจัด สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\text{ร้อยละของการกำจัด} = \left[1 - \frac{K_s}{K_s + x \cdot K_w (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100 \quad (4.3)$$

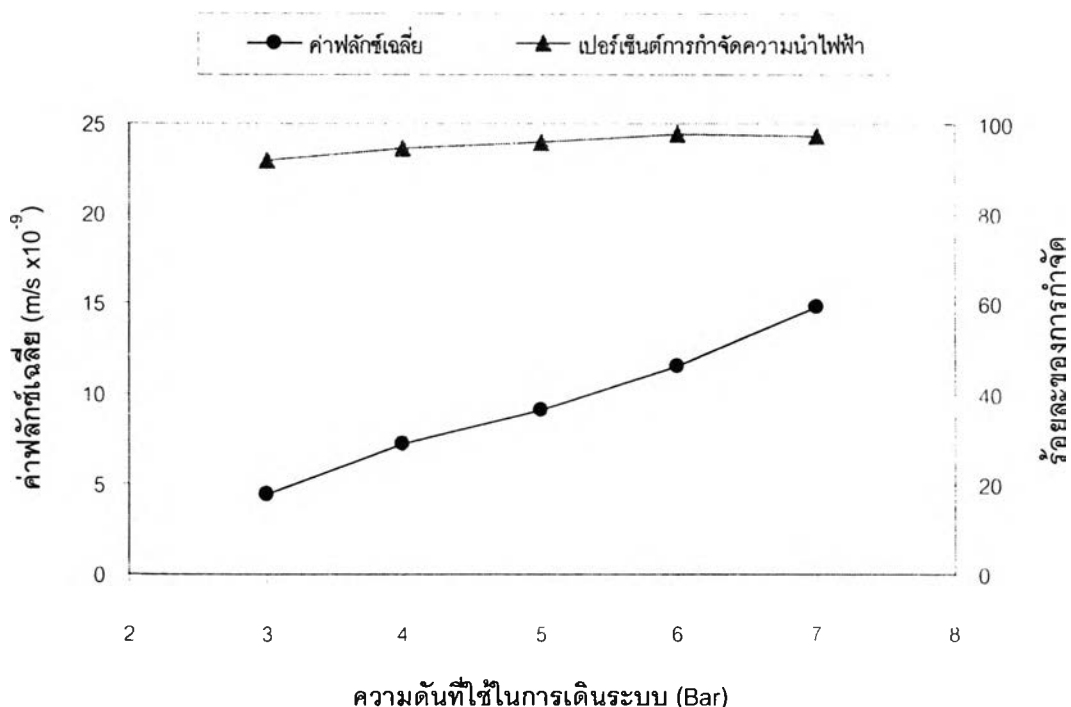
จากสมการที่ 4.3 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อเพิ่มค่าความดันในการเดินระบบที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละของการกำจัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าการเพิ่มความดันจะมีผลให้ค่า R หรือค่า % Recovery สูงขึ้นและทำให้ค่า x ลดลงแต่ค่า R ในการทดลองนี้น้อยมากคืออยู่ที่ประมาณไม่เกิน 0.08 % ทำให้การลดลงของค่า x มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความดันที่ใช้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันในการเดินระบบจึงทำให้เทอม $x \cdot K_w (\Delta P - \Delta \pi)$ ที่เป็นตัวหารมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นด้วย

เมื่อแทนค่า (วิธีหาค่า K_s แสดงในภาคผนวกที่ ค1) ลงในสมการที่ 4.3 จะสามารถหาความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดและความดันในการเดินระบบได้ดังสมการที่ 4.4 สำหรับร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า และสมการที่ 4.5 สำหรับร้อยละของการกำจัดของแข็งละลาย ซึ่งจะมีประโยชน์ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบโดยควบคุมจากความดัน

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า} = \left[1 - \frac{0.3631}{0.3631 + 2.51 \times 10^{-9} \cdot x \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100 \quad (4.4)$$

$$\text{ร้อยละของการกำจัดของแข็งละลาย} = \left[1 - \frac{0.5386}{0.5386 + 2.51 \times 10^{-9} \cdot x \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100 \quad (4.5)$$

รูปที่ 4.16 แสดงถึงค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้และร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าที่ความดันในการเดินระบบต่าง ๆ และรูปที่ 4.17 (ข) และ 4.17 (ค) แสดงถึงค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตามลำดับ

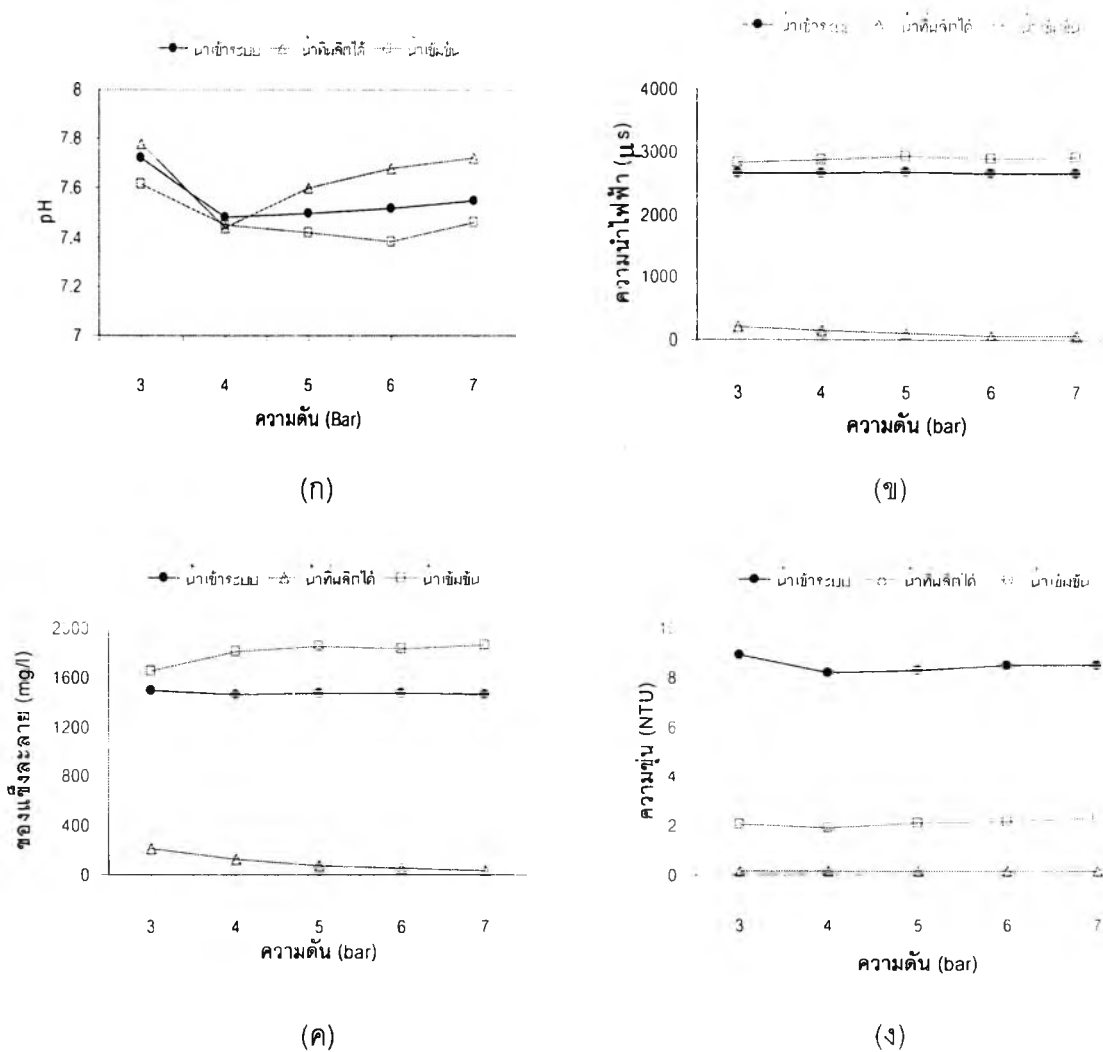


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าฟลักซ์เฉลี่ยและร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าของการทดลองชุดที่ 1.1

4.2.1.4 ผลของความดันในการเดินระบบต่อความขุ่น

ในการทดลองพบว่าทุกชุดการทดลองสามารถกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกัน คือ ประมาณร้อยละ 98 ซึ่งความดันในการเดินระบบจะไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบมากนัก ทั้งนี้เพราะ การกำจัดความขุ่นที่ส่วนใหญ่จะเป็นอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่จะอาศัยกระบวนการกรองติดผิวในการกำจัดเป็นหลัก ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวไม่สามารถผ่านผิวเมมเบรนได้อยู่แล้ว อีกทั้งความขุ่นส่วนหนึ่งจะถูกกำจัดโดยไส้กรองขนาด 5 ไมครอนที่ใช้เป็นระบบบำบัดเบื้องต้นไปแล้วด้วย ซึ่งสังเกตได้จากค่า SDI ในน้ำดิบที่ลดลงเมื่อผ่าน ไส้กรองขนาด 5 ไมครอนจาก ค่าเฉลี่ย 14.45 ลงเหลือ 3.4 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดสำหรับกระบวนการเมมเบรนที่ SDI เท่ากับ 5 ดังนั้นการเพิ่มความดันในการ

เดินระบบนั้นจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมากนัก และความขุ่นของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.17

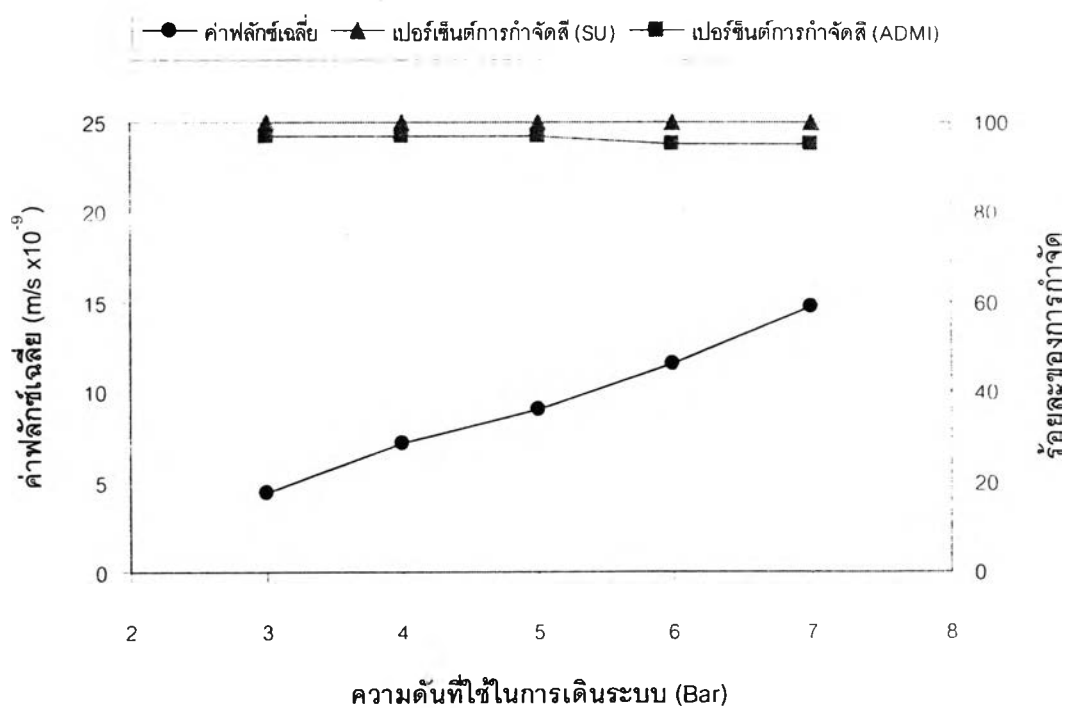


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความดันต่อพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและความขุ่นในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ ของการทดลองชุดที่ 1.1

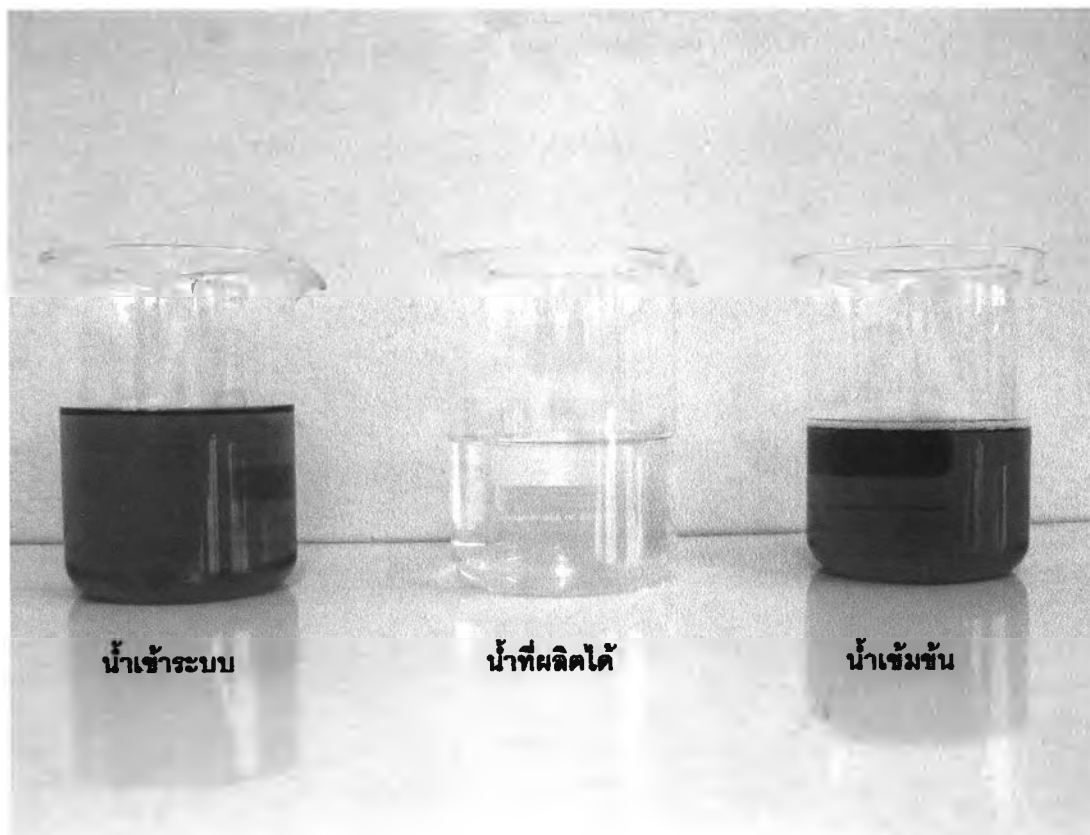
4.2.1.5 ผลของความดันในการเดินระบบต่อสีในหน่วย SU และ ADMI

สำหรับในหน่วย SU พบว่าทุกชุดการทดลองให้ผลไปในทำนองเดียวกันกับการกำจัดความขุ่น คือสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 99 – 100 กับทุก ๆ ค่าความดันในการเดินระบบ ในขณะที่หน่วย ADMI จะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 96 – 97 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในการใช้นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมของ Machenbach (1998) และ Tang C.

(2002) ซึ่งพบว่าทุกการทดลองสามารถกำจัดสีได้จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งกลไกในการกำจัดจะคล้ายคลึงกับกลไกในการกำจัดความขุ่น เนื่องจากอนุภาคของสีเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ถึงแม้จะเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีเช่นสีประเภท รีแอคทีฟ แต่ขนาดโมเลกุลก็ยิ่งใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนมาก โดยที่มีน้ำหนักโมเลกุลของสีประเภทรีแอคทีฟ สูงถึงประมาณ 3,000 ดาลตัน ขึ้นไป ในขณะที่ค่า MWCO ของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันอยู่ที่ประมาณ 1,000 – 10,000 ดาลตัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงมาก รูปที่ 4.18 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความดันในการเดินระบบต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละของการกำจัดสีในหน่วย SU และ ADMI รูปที่ 4.19 แสดงถึงน้ำที่เข้าระบบ น้ำสะอาดที่ผลิตได้ และน้ำเข้มข้น จะเห็นว่าน้ำเข้มข้นจะมีสีสูงกว่าน้ำดิบเล็กน้อยในขณะที่น้ำสะอาดไม่สามารถมองเห็นสีด้วยตาเปล่า และรูปที่ 4.21 (ก) และ 4.21 (ข) แสดงถึงความดันในการเดินระบบและสีน้ำในส่วนต่างๆ ของระบบในหน่วย SU และ ADMI ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดสีของการทดลองชุดที่ 1.1



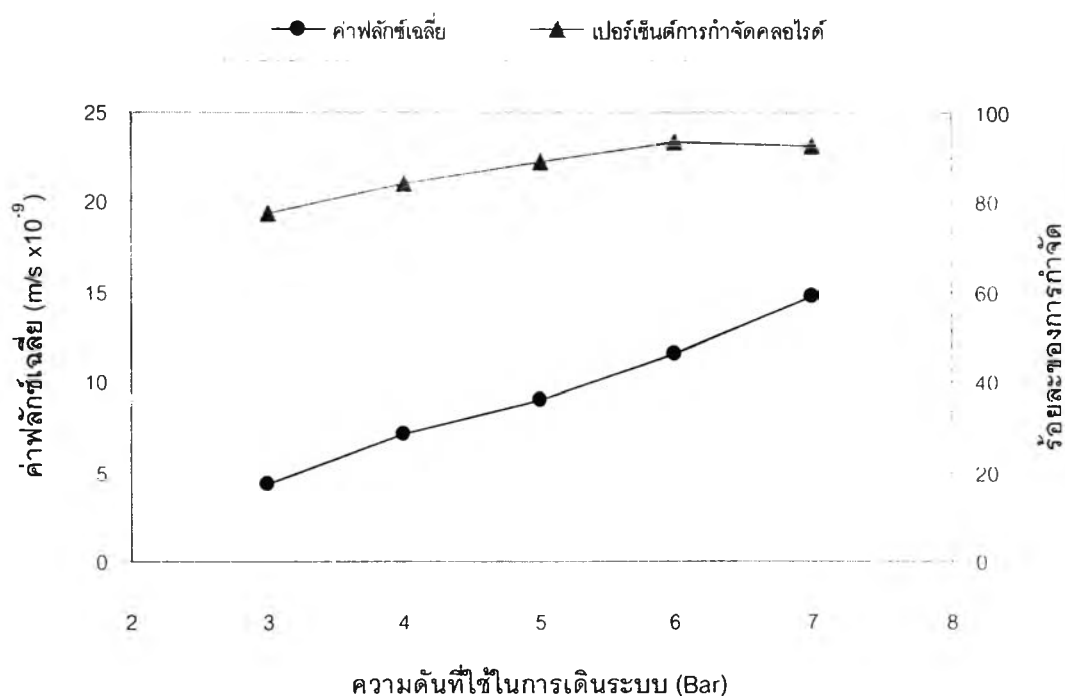
รูปที่ 4.19 แสดงสีของน้ำดิบ น้ำสะอาด และน้ำเข้มข้น จากการทดลอง

4.2.1.6 ผลของความดันในการเดินระบบต่อคลอไรด์

สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์นั้นก็สูงขึ้นตามค่าความดันในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งความดันในการเดินระบบเท่ากับ 7 บาร์ ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์จึงเริ่มคงที่ โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์อยู่ระหว่างร้อยละ 78 – 94 ทั้งนี้เนื่องจากที่ความดันสูง ๆ จะมีแนวโน้มในการเกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเมมเบรน เมื่อความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้นค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลายก็จะสูงตามไปด้วย ความสัมพันธ์ของความดันในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าความดันในการเดินระบบที่สูงกว่า 6 บาร์ขึ้นไปไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นอีก ปริมาณคลอไรด์ในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบแสดงดังรูปที่ 4.21 (ค)

ในการทำนายร้อยละของการกำจัดคลอไรด์นั้น สามารถนำสมการที่ 4.3 มาใช้ทำนายได้เช่นกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดคลอไรด์ กับความดันในการเดินระบบได้ดังสมการที่ 4.6 ซึ่งสมการนี้จะสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ของระบบต่อความดันในการเดินระบบได้

$$\text{ร้อยละของการกำจัดคลอไรด์} = \left[1 - \frac{1.1541}{1.1541 + 2.51 \times 10^{-9} \cdot x \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100 \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าฟลักซ์เฉลี่ยและร้อยละของการกำจัดคลอไรด์ของการทดลองชุดที่ 1.1

4.2.1.7 ผลของความดันในการเดินระบบต่อสภาพต่างทั้งหมด

ในการทดลองที่แต่ละค่าความดันเดินระบบพบว่าสามารถกำจัดค่าสภาพต่างทั้งหมดอยู่ระหว่างร้อยละ 84 – 94 โดยร้อยละของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นตามความดันที่ใช้ในการเดินระบบ แต่เมื่อความดันในการเดินระบบเท่ากับ 7 บาร์ ร้อยละของการกำจัดค่าสภาพต่างทั้งหมดเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ค่าความดันในการเดินระบบสูง ๆ จะมีแนวโน้มในการเกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนที่เรียกว่าปรากฏการณ์ Concentration Polarization ทำให้โอกาสที่ออกต่าง ๆ จะ

ผ่านเมมเบรนไปได้มีสูงขึ้น มีผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงด้วย ซึ่งสามารถใช้แบบจำลองการละลาย-การแพร่ เพื่ออธิบายกลไกการจัดสภาพต่างได้ดังสมการที่ 4.7 สภาพต่างของน้ำในแต่ละส่วนของระบบแสดงดังรูปที่ 4.21 (ง) และความสัมพันธ์ของความดันในการเดินระบบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่างแสดงดังรูปที่ 4.22 (ก)

$$\text{ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง} = \left[1 - \frac{0.9703}{0.9703 + 2.51 \times 10^{-9} \cdot x \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100 \quad (4.7)$$

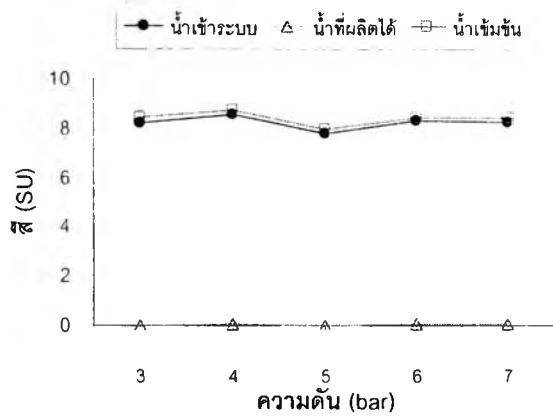
4.2.1.8 ผลของความดันในการเดินระบบต่อแคลเซียมและความกระด้างทั้งหมด

จากทุกชุดการทดลองพบว่าสามารถกำจัดความกระด้างทั้งหมดได้มากกว่าร้อยละ 95 เช่นเดียวกับกรณีของแคลเซียม ทั้งนี้เนื่องจากความกระด้างเกิดจากอิออนที่มีประจุ +2 เช่นเดียวกับแคลเซียมที่มีขนาดใหญ่ และด้วยแรงผลักทางประจุไฟฟ้าของอิออน ทำให้ไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปได้ ซึ่งก็เป็นคุณสมบัติเด่นหนึ่งของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันที่สามารถกำจัดความกระด้างรวมทั้งอิออนที่มีประจุมากกว่าหนึ่งได้ดี

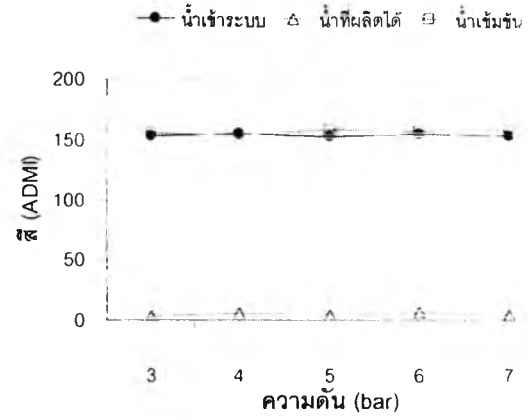
จากสมการที่ 4.3 สามารถนำมาใช้อธิบายถึงร้อยละของการกำจัดความกระด้างและแคลเซียมได้เช่นกัน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ในการกำจัดความกระด้างดังกับความดันสมการที่ 4.8 และสมการที่ 4.9 สำหรับร้อยละของการกำจัดแคลเซียม สมการที่ 4.8 และ 4.9 จะช่วยทำนายถึงประสิทธิภาพของระบบที่ความดันในการเดินระบบต่าง ๆ ได้ และมีประโยชน์ในการควบคุมระบบได้ ความสัมพันธ์ของความดันและความกระด้างของน้ำในส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.21(จ) และสำหรับแคลเซียมในรูป 4.21 (ฉ) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันในการเดินระบบกับร้อยละของการกำจัดค่าความกระด้างและแคลเซียมแสดงดังรูปที่ 4.22 (ข) และ 4.22 (ค)

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความกระด้าง} = \left[1 - \frac{0.1014}{0.1014 + 2.51 \times 10^{-9} \cdot x \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100 \quad (4.8)$$

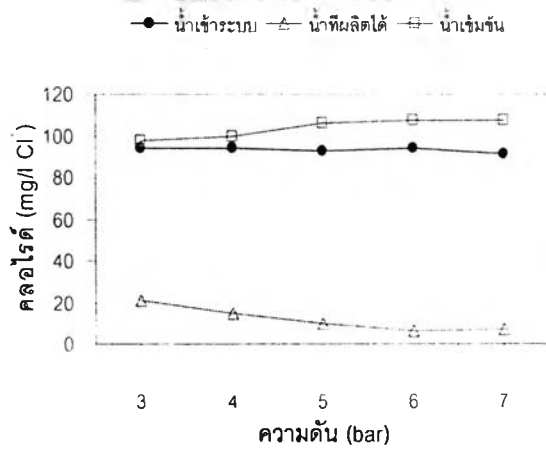
$$\text{ร้อยละของการกำจัดแคลเซียม} = \left[1 - \frac{0.0944}{0.0944 + 2.51 \times 10^{-9} \cdot x \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100 \quad (4.9)$$



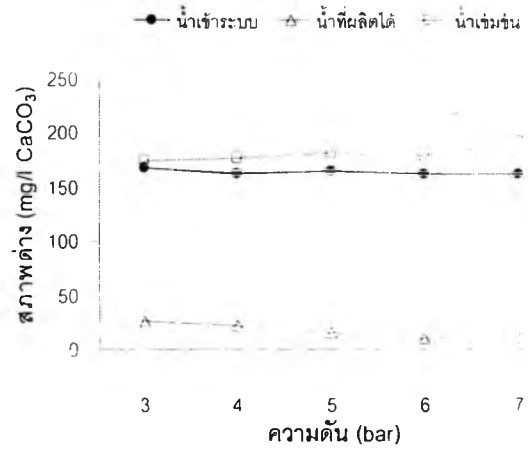
(ก)



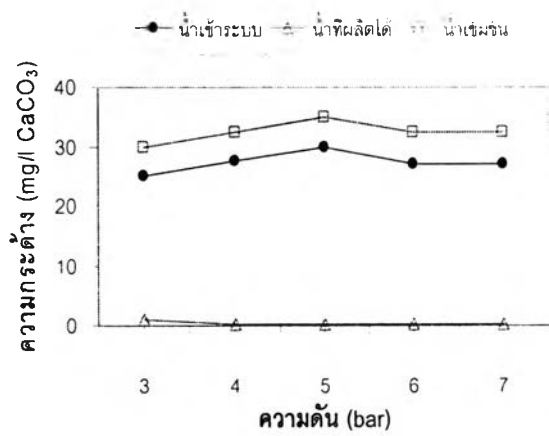
(ข)



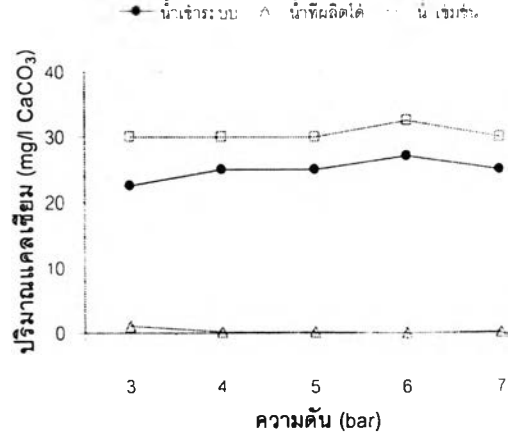
(ค)



(ง)

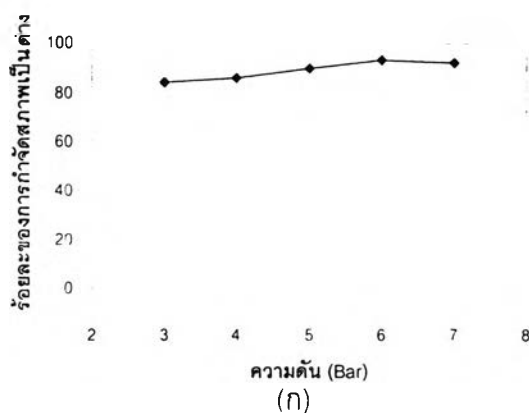


(จ)

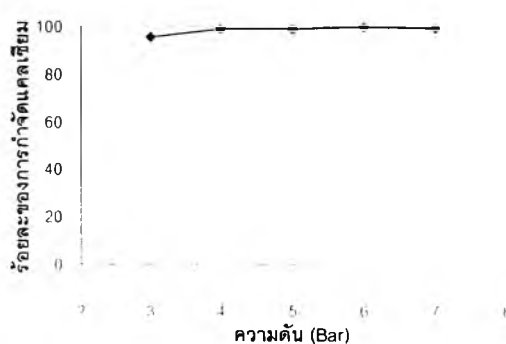


(ฉ)

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของความดันในการเดินระบบกับค่าคลอไรด์ สภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ของน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบของการทดลองชุดที่ 1.1



(ข)

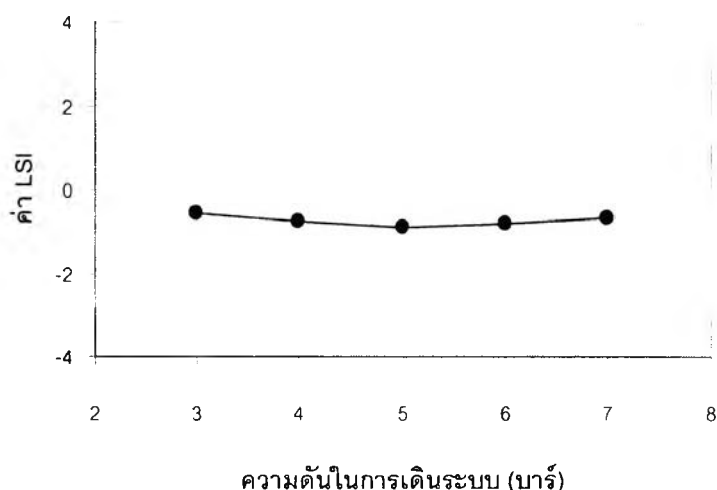


(ค)

รูปที่ 4.22 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ความดันในการเดินระบบค่าต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 1.1

4.2.1.9 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าดัชนีแลงเกิลียร์ (Langier Saturation Index) ของน้ำเข้มข้น

จากผลการทดลองพบว่าที่ความดันเดินระบบต่าง ๆ ในแต่ละชุดการทดลองได้ให้ต่อค่าดัชนีแลงเกิลียร์ ในน้ำเข้มข้นเป็นค่าลบโดยตลอด โดยอยู่ที่ระหว่าง -0.5 ถึง -0.9 และไม่แตกต่างกันนักที่แต่ละค่าความดันที่ใช้ในการเดินระบบ ซึ่งแสดงว่าไม่มีแนวโน้มในการเกิดตะกอนภายในระบบ ถึงแม้จะใช้ความดันที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าของแคลเซียมและสภาพต่างทั้งหมดในน้ำที่เข้าระบบนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ อีกทั้งอุณหภูมิก็ไม่สูงมาก ทำให้ไม่เกิดการอิมตัวของแคลเซียมจนเกิดตะกอนในระบบ ซึ่งค่าดัชนีแลงเกิลียร์ในน้ำเข้มข้นที่เป็นลบนั้นเหมาะกับการใช้ระบบเมมเบรนโดยที่จะไม่ก่อให้เกิดตะกอนขึ้นบนผิวหน้าเมมเบรน ความสัมพันธ์ของความดันในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อค่าดัชนีแลงเกิลียร์ แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีแลงเกลียร์ และความดันในการเดินระบบของการทดลองชุดที่ 1.1

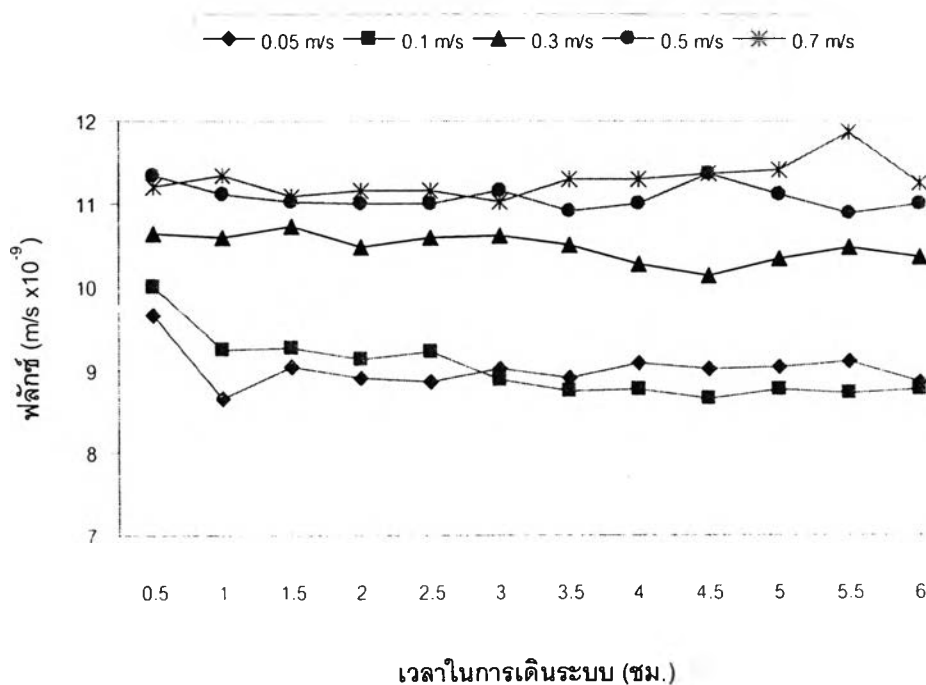
4.2.2 ผลของ Crossflow Velocity ต่อการเกิด Concentration Polarization

จากการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อใช้ค่า Crossflow Velocity ที่สูงขึ้นนั้นจะมีผลให้ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ที่ผลิตได้สูงตามไปด้วย รวมถึงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบยังดีขึ้นด้วย และพบว่าค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมที่สุดคือตั้งแต่ 0.5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป จากการทดลองชุดที่ 1.1 ได้เลือกค่าความดันในการเดินระบบสำหรับการทดลองในชุดที่ 1.2 นี้ที่ 6 บาร์เนื่องจากเป็นค่าความดันในการเดินระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ว่าที่ความดันเดินระบบ 7 บาร์ จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงขึ้นแต่ประสิทธิภาพการกำจัดก็ไม่ได้สูงขึ้นตาม จึงเลือกใช้ความดันในการเดินระบบที่ 6 บาร์ ซึ่งก็เพียงพอแล้วกับประสิทธิภาพโดยรวม และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานอีกด้วย

4.2.2.1 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

เมื่อมีการเพิ่มค่า Crossflow Velocity ให้สูงขึ้นจะเป็นการลดการสะสมของอนุภาคต่าง ๆ บริเวณผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งเป็นการลดแนวโน้มที่จะเกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization และยังทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นด้วย จากการทดลองพบว่าที่ค่า Crossflow Velocity ตั้งแต่ 0.5 เมตรต่อวินาที ขึ้นไปจะไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ หมายถึงที่ค่าความเร็วดังกล่าวนี้ เป็นค่าที่จะไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization กับเมมเบรน คือเป็นค่าความเร็วที่เพียงพอที่จะสร้าง

ความปั่นป่วนที่ผิวหน้าเมมเบรนเพียงพอที่จะชะผิวหน้าเมมเบรนและไม่ทำให้เกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่าง ๆ ซึ่งที่ค่า Crossflow Velocity 0.05, 0.1 และ 0.3 เมตรต่อวินาที ค่าฟลักซ์มีแนวโน้มจะลดลงเมื่อเดินระบบไปได้ระยะหนึ่ง อันเกิดจากค่า Crossflow Velocity ที่น้อยไปจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization จนทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงเมื่อเดินระบบได้ระยะหนึ่ง ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อฟลักซ์แสดงดังรูปที่ 4.24 และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crossflow Velocity ต่าง ๆ ในการเดินระบบกับฟลักซ์แสดงดังรูปที่ 4.25

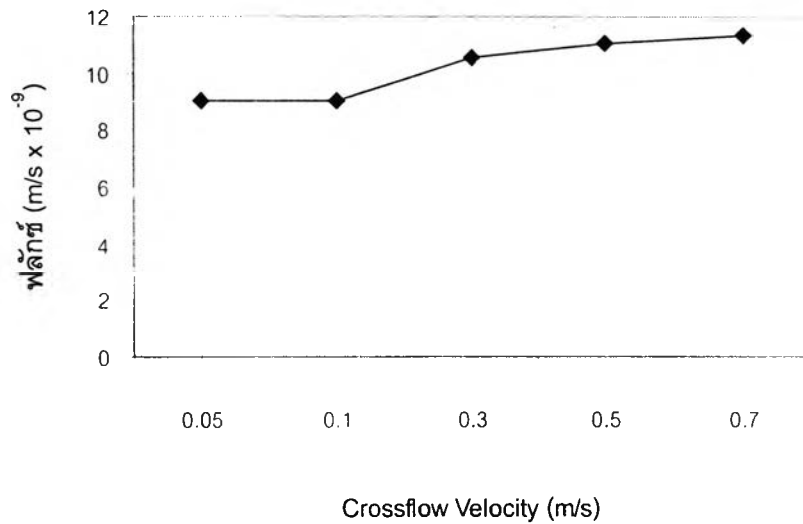


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์และเวลาการเดินระบบที่ Crossflow Velocity ต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 1.2

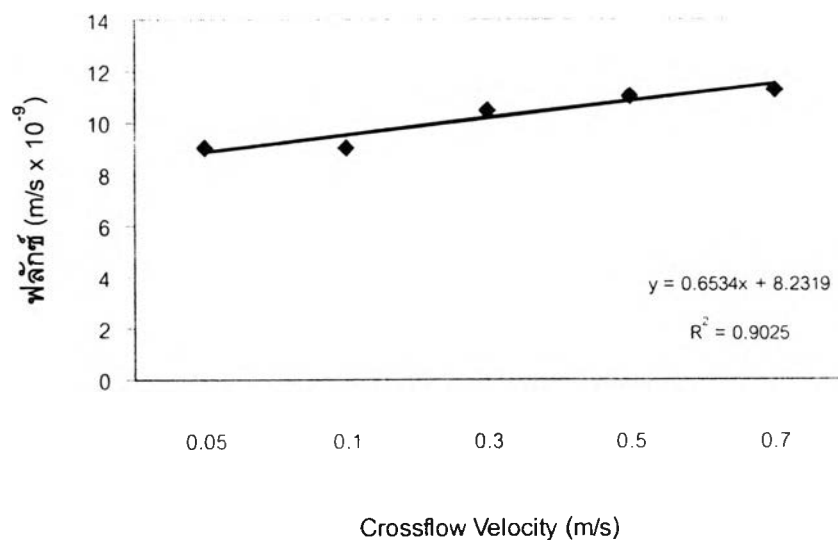
จากรูปที่ 4.25 พอลจะประเมินความสัมพันธ์ของค่า Crossflow Velocity กับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ตามรูปที่ 4.26 และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crossflow Velocity ได้ดังสมการที่ 4.10

$$\text{ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด} = 0.6534 \cdot \text{Crossflow Velocity} + 8.2319 \quad (4.10)$$

สมการที่ 4.10 นี้ช่วยให้เราสามารถประเมินถึงปริมาณน้ำสะอาดที่ผลิตได้ในการใช้ค่า Crossflow Velocity ค่าต่าง ๆ ได้ ถึงแม้ว่าค่า Crossflow Velocity ไม่ใช่ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตน้ำสะอาดของระบบเมมเบรน แต่ก็มีส่วนต่อการสะสมตัวของอนุภาคต่าง ๆ บนผิวหน้าของเมมเบรน ดังนั้นการควบคุมค่า Crossflow Velocity ที่พอเพียงจะช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และ Crossflow Velocity ในการเดินระบบ ของ การทดลองชุดที่ 1.2



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และ Crossflow Velocity ในการเดินระบบ ของ การทดลองชุดที่ 1.2

4.2.2.2 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อค่าพีเอช

ผลการทดลองพบว่าค่า Crossflow Velocity ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองก็ไม่ได้มีผลต่อค่าพีเอชอย่างเห็นชัดจนนักเท่าใดนัก พีเอชของระบบทั้งน้ำดิบและน้ำสะอาด รวมทั้งน้ำเข้มข้นไม่ต่างกันมากนักทั้งนี้เนื่องจากระบบที่ใช้ทดลองมีขนาดเล็ก และอัตราการผลิตน้ำสะอาดค่อนข้างต่ำ และน้ำดิบที่เข้าระบบมีสภาพพีเอชที่เพียงพอจึงทำให้น้ำค่าพีเอชแต่ละส่วนไม่ต่างกันมากนัก โดยที่ค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าอยู่ระหว่าง 7.6 – 7.8 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าพีเอชของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.28 (ก)

4.2.2.3 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ค่า Crossflow Velocity ที่สูงขึ้น ค่าความนำไฟฟ้าในน้ำสะอาดจะลดลงหรือกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความนำไฟฟ้าของระบบเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ค่า Crossflow Velocity ที่สูงขึ้น และพบว่าที่ค่า Crossflow Velocity ที่สูงกว่า 0.5 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าก็ไม่สูงขึ้นแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่สูงกว่า 0.5 เมตรต่อวินาที เป็นค่าที่สูงพอที่จะสร้างความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน และสามารถป้องกันการเกิด Concentration Polarization ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตัวถูกละลายในน้ำ (Bian R. และคณะ, 2000) คือเป็นความเร็วที่เพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่าง ๆ ที่ผิวหน้าเมมเบรนได้แล้ว เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายพบว่าเมื่อใช้ค่า Crossflow Velocity ที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งละลายจะสูงขึ้นตาม และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายของแต่ละชุดการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 95 – 98 รูปที่ 4.27 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่า Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและประสิทธิภาพในการกำจัดความนำไฟฟ้า และความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.28 (ข) และ 4.28 (ค) ตามลำดับ

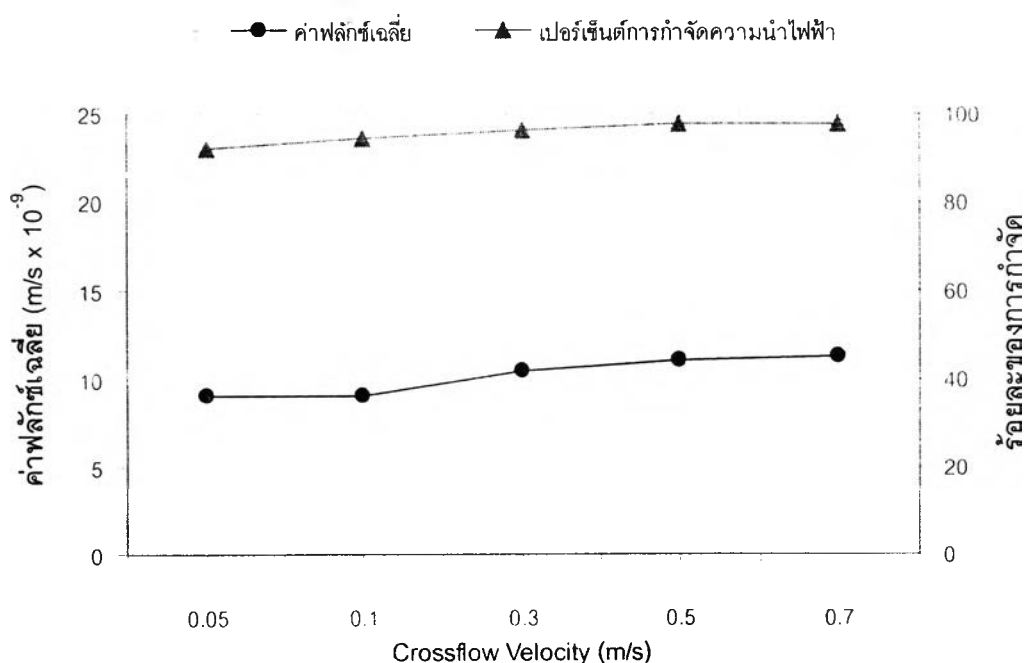
สมการที่ 4.3 สามารถนำมาดัดแปลงเพื่ออธิบายประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายและค่า Crossflow Velocity โดยที่เทอมของ $K_w(\Delta P - \Delta \pi)$ นั่นก็คือค่า ฟลักซ์ของน้ำสะอาดหรือ F_w นั้นเอง ดังนั้นสามารถจัดสมการ 4.3 ให้อยู่ในรูปใหม่ดังสมการที่ 4.11 และโดยที่ความสัมพันธ์ของค่า Crossflow Velocity กับฟลักซ์ของน้ำที่ผลิตหรือ F_w ได้ดังสมการที่ 4.10 ดังนั้นเมื่อทราบค่า Crossflow Velocity ก็จะสามารถประเมินค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดได้

$$\text{ร้อยละของการกำจัด} = \left[1 - \frac{K_s}{K_s + x \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.11 สามารถหาความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า และร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายได้ตั้งสมการที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ เมื่อ CV คือ Crossflow Velocity (การหาค่า Ks แสดงในภาคผนวก ค2)

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า} = \left[1 - \frac{0.6771}{0.6771 + x \cdot (0.6534 \cdot CV + 8.2319)} \right] \cdot 100 \quad (4.12)$$

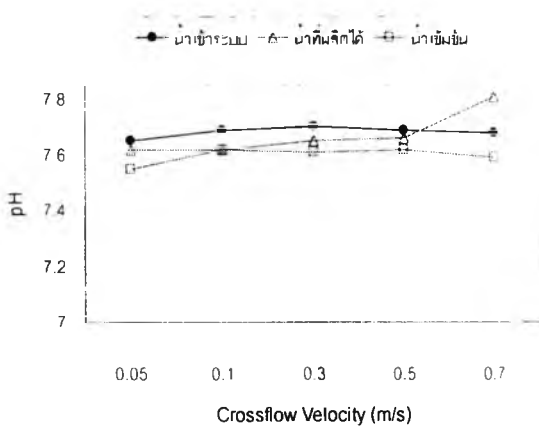
$$\text{ร้อยละของการกำจัดของแข็งละลาย} = \left[1 - \frac{0.3557}{0.3557 + x \cdot (0.6534 \cdot CV + 8.2319)} \right] \cdot 100 \quad (4.13)$$



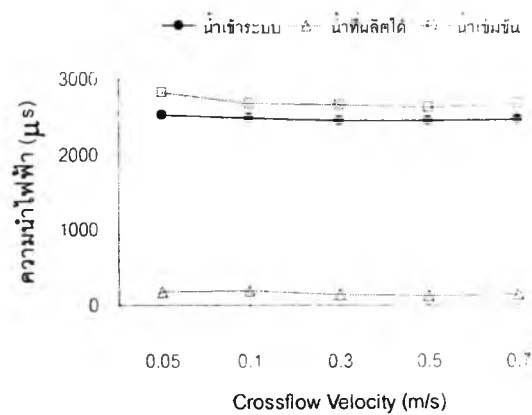
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์เจลลี่ของน้ำสะอาดและ ร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า ของการทดลองชุดที่ 1.2

4.2.2.4 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อความขุ่น

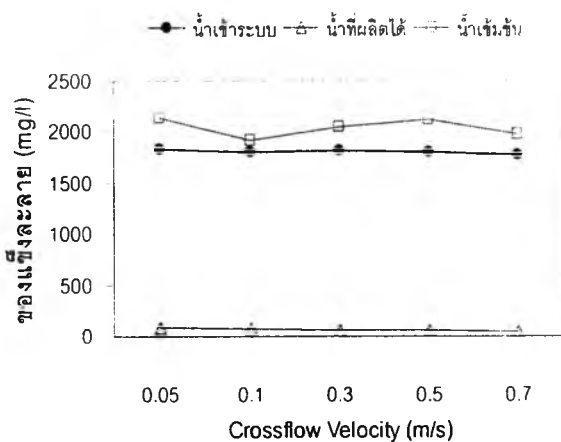
ในการทดลองพบว่าสามารถกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 97 - 99 และพบว่าการใช้ Crossflow velocity ค่าต่าง ๆ ไม่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดความขุ่นมากนัก เนื่องจากการกำจัดความขุ่นของกระบวนการเมมเบรนจะอาศัยกระบวนการกรองติดผิวเป็นหลัก ซึ่งอนุภาคความขุ่นที่ส่วนใหญ่มักเป็นสารแขวนลอยจะมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนมาก และส่วนหนึ่งก็จะถูกกำจัดด้วยไส้กรองขนาด 5 ไมครอนอีกด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นค่อนข้างสูงทุกชุดการทดลอง อย่างไรก็ตามการใช้ค่า Crossflow Velocity ที่เพียงพอก็สามารถป้องกันการสะสมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ บนผิวหน้าเมมเบรนได้ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนตามมาได้ ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าความขุ่นของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.28 (ง)



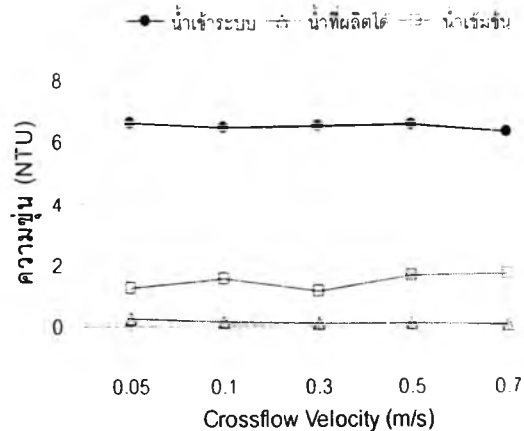
(ก)



(ข)



(ค)

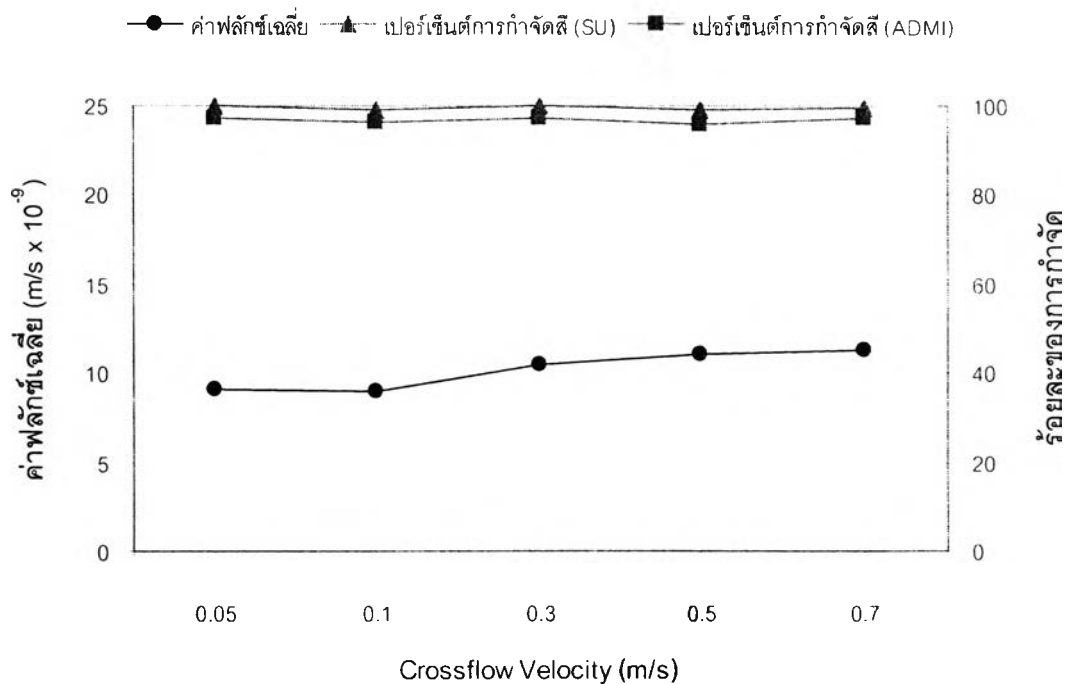


(ง)

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและ ความขุ่นในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ ของการทดลองชุดที่ 1.2

4.2.2.5 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อสีในหน่วย SU และ ADMI

ผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.1.5 คือทุกชุดการทดลองสามารถกำจัดสีได้ทั้งหมดในหน่วย SU และร้อยละ 95 – 97 ในหน่วย ADMI ซึ่งไม่สามารถมองเห็นสีได้ด้วยตาเปล่าอีก ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดรูพรุนของเมมเบรน ทำให้สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก ในขณะที่ความเข้มข้นที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคสีที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนมาได้จึงค้างอยู่ในน้ำเข้มข้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าช่วงค่า Crossflow Velocity ที่ใช้นั้นไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งในหน่วย SU และ ADMI ถึงแม้จะมีผลให้ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยความสัมพันธ์ของค่า Crossflow Velocity ที่ใช้กับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้และประสิทธิภาพในการกำจัดสีในหน่วย SU และ ADMI แสดงดังรูปที่ 4.29 และความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity กับสีในหน่วย SU และ ADMI ของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบ แสดงดังรูปที่ 4.31 (ก) และ 4.31 (ข) ตามลำดับ



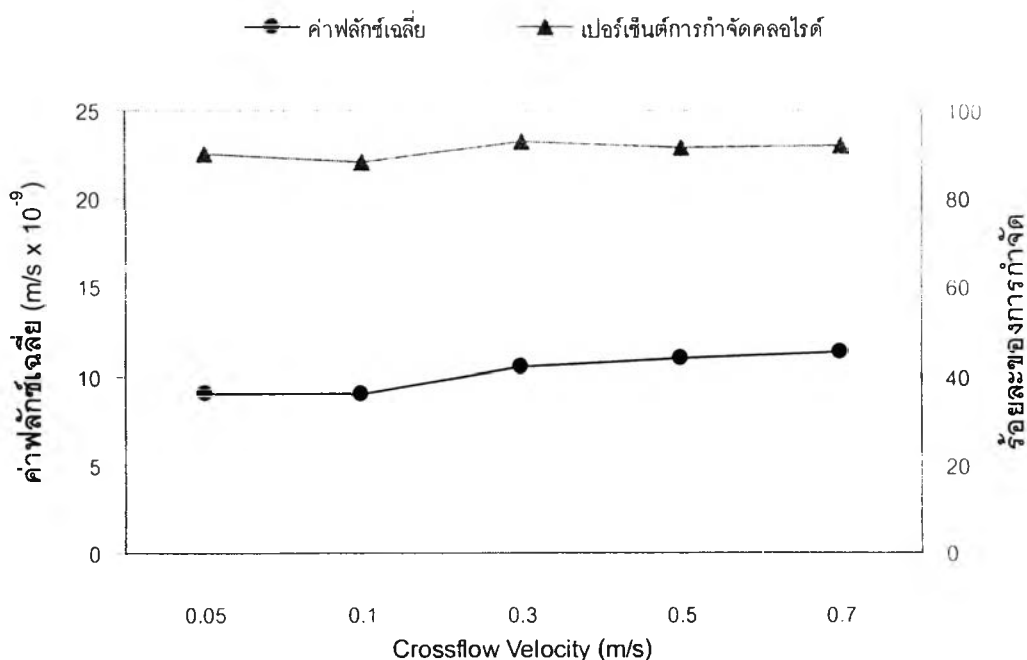
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดสีของการทดลองชุดที่ 1.2

4.2.2.6 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อคลอไรด์

ประสิทธิภาพของการกำจัดคลอไรด์ในการทดลองนี้อยู่ที่ร้อยละ 88 – 92 และพบว่าเมื่อเพิ่มค่า Crossflow Velocity ให้สูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์จะสูงขึ้นเล็กน้อย ด้วยเหตุผลเดียวกับการกำจัดสภาพต่าง ซึ่งเป็นอิออนที่มีประจุบหนึ่งเหมือนกัน คือค่า Crossflow Velocity ที่ใช้นั้นพอเพียงอยู่แล้ว โดยจากการทดลองพบว่าค่าที่สูงกว่า 0.3 เมตรต่อวินาที จะทำให้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดสูงขึ้น แต่ก็ไม่ได้มีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์สูงขึ้นอีก ความสัมพันธ์ของค่า Crossflow Velocity ที่ใช้กับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้และประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 4.30 และความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity กับคลอไรด์ของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของระบบแสดงดังรูปที่ 4.31 (ค)

สมการที่ 4.11 นั้นสามารถใช้อธิบายถึงประสิทธิภาพของการกำจัดคลอไรด์กับค่า Crossflow Velocity ในเทอมของค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดได้เช่นกัน โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การกำจัดคลอไรด์กับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดได้ดังสมการที่ 4.14

$$\text{ร้อยละของการกำจัดคลอไรด์} = \left[1 - \frac{0.9846}{0.9846 + x \cdot (0.6534 \cdot CV + 8.2319)} \right] \cdot 100 \quad (4.14)$$



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและ ร้อยละของการกำจัดคลอไรด์ ของการทดลองชุดที่ 1.2

4.2.2.7 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อสภาพต่างทั้งหมด

ในการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสภาพต่างทั้งหมดอยู่ที่ระหว่างร้อยละ 90 – 91 ซึ่งเมื่อเพิ่มค่า Crossflow Velocity ให้สูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ด้วยเหตุผลในทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ผ่านมาคือการใช้ค่า Crossflow Velocity ที่สูงพอจะช่วยชะผิวหน้าเมมเบรนทำให้ลดการสะสมตัวของอนุภาคต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นบนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนได้ ซึ่งพบว่าที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที นั้นค่อนข้างจะเพียงพอแล้วในการป้องกันปัญหา Concentration Polarization ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้ค่าที่สูงขึ้นประสิทธิภาพก็ไม่ได้สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนอีกต่อไป สำหรับความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity กับสภาพต่างของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของระบบแสดงดังรูปที่ 4.31 (ง) และความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่างแสดงดังรูปที่ 4.32 (ก)

และจากสมการที่ 4.11 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดสภาพต่างกับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ดังสมการที่ 4.15

$$\text{ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง} = \left[1 - \frac{0.943}{0.943 + x \cdot (0.6534 \cdot CV + 8.2319)} \right] \cdot 100 \quad (4.15)$$

4.2.2.8 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อแคลเซียมและความกระด้าง

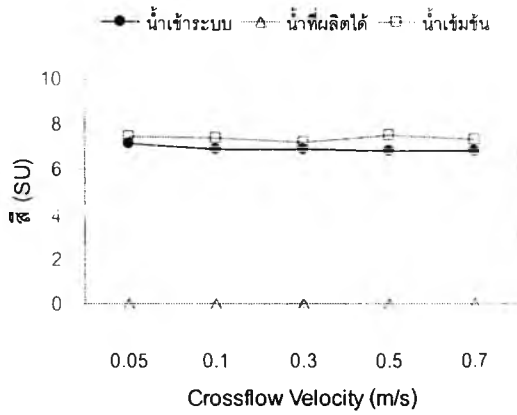
จากผลการทดลองพบว่าที่ค่า Crossflow Velocity ในแต่ละชุดการทดลองพบว่าสามารถกำจัดแคลเซียมความกระด้างจากน้ำเข้าระบบได้มากกว่าร้อยละ 99 โดยค่อนข้างคงที่ในทุก ๆ ชุดการทดลอง และค่า Crossflow Velocity ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมากนัก เนื่องจากเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันมีคุณสมบัติในการกำจัดความกระด้างซึ่งก็รวมทั้งแคลเซียมได้ดีอยู่แล้ว ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.8 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อความกระด้างและแคลเซียมของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของระบบแสดงดังรูปที่ 4.31 (จ) และ 4.31 (ฉ)

ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดความกระด้างและแคลเซียมกับค่า Crossflow Velocity นั้นสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 4.11 เช่นกัน โดยที่ค่า Crossflow Velocity นั้นอยู่ในเทอม

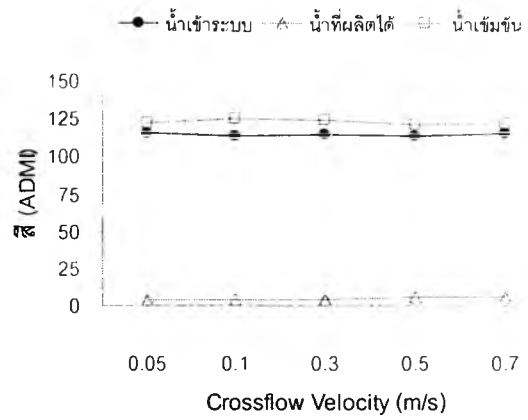
ของฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ และความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดความกระด้างรวมถึงแคลเซียมกับฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้แสดงดังสมการที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งทั้งสองสมการนี้สามารถใช้นำมาหาประสิทธิภาพของระบบจากการควบคุมค่า Crossflow Velocity ได้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crossflow Velocity ในการเดินระบบกับร้อยละของการกำจัดความกระด้างทั้งหมดและแคลเซียมแสดงดังรูปที่ 4.32 (ข) และ 4.32 (ค)

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความกระด้าง} = \left[1 - \frac{0.03449}{0.03449 + x \cdot (0.6534 \cdot CV + 8.2319)} \right] \cdot 100 \quad (4.16)$$

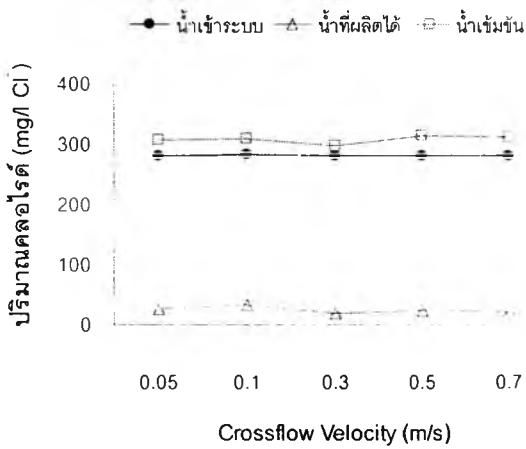
$$\text{ร้อยละของการกำจัดแคลเซียม} = \left[1 - \frac{0.03648}{0.03648 + x \cdot (0.6534 \cdot CV + 8.2319)} \right] \cdot 100 \quad (4.17)$$



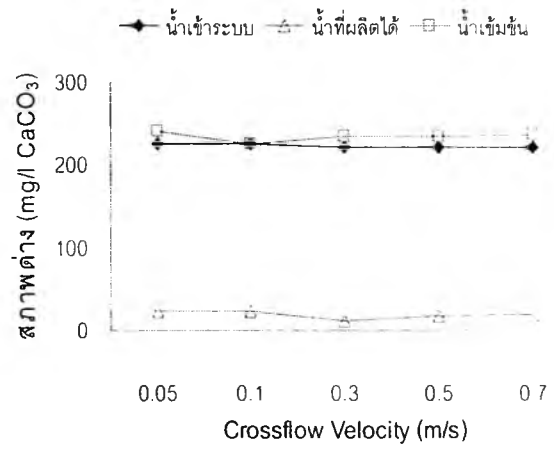
(ก)



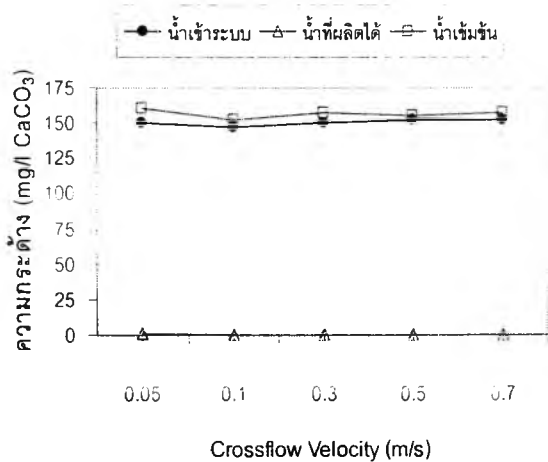
(ข)



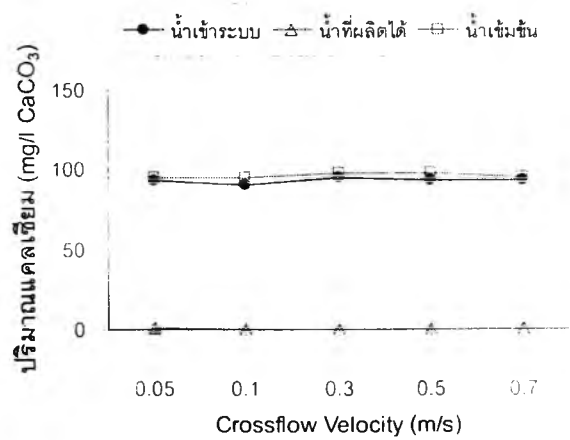
(ค)



(ง)

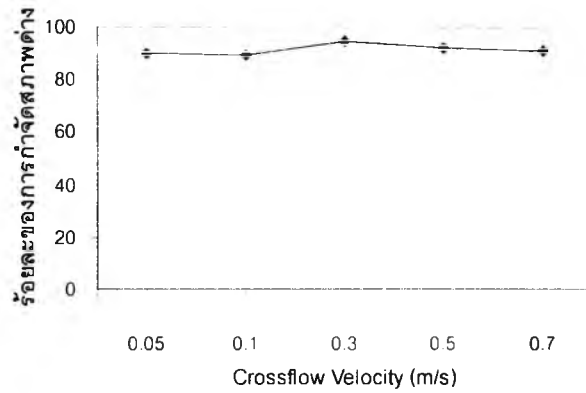


(จ)

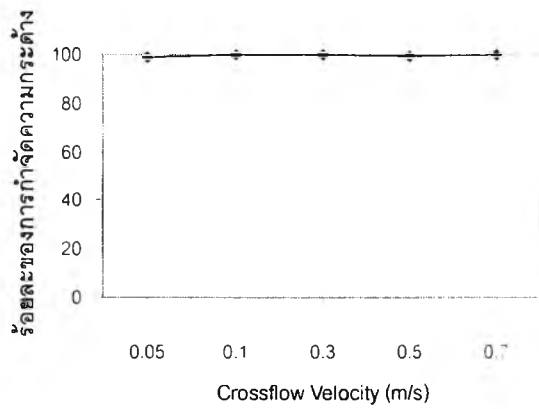


(ฉ)

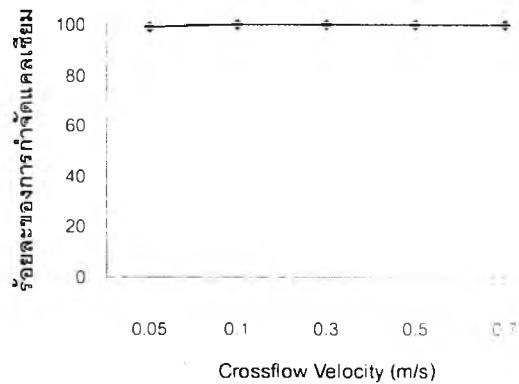
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบกับค่า สลิวไรต์ สภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ของน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบของการทดลองชุดที่ 1.2



(ก)



(ข)



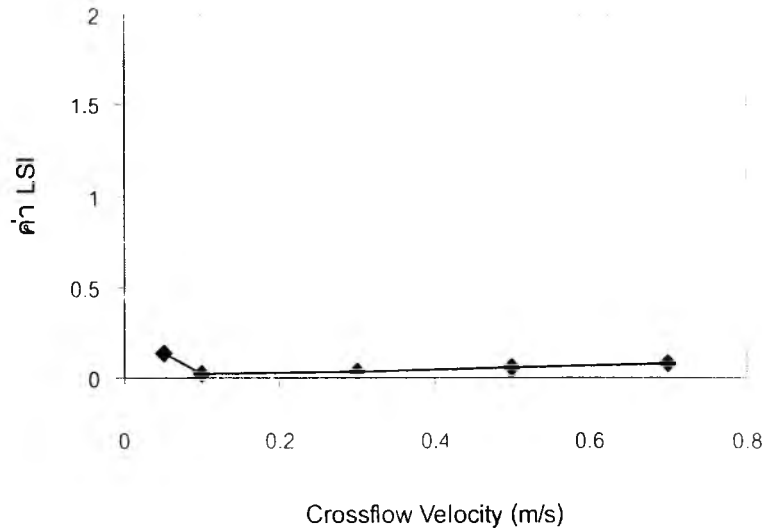
(ค)

รูปที่ 4.32 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ Crossflow Velocity ในการเดินระบบค่าต่าง ๆ

4.2.2.9 ผลของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบต่อค่าดัชนีแลงเกิลีย์ (Langier Saturation Index) ของน้ำเข้มข้น

จากผลการทดลองพบว่าค่า Crossflow Velocity ที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีผลต่อค่าดัชนีแลงเกิลีย์ มากนัก เพราะว่าค่าดัชนีแลงเกิลีย์นั้นจะมีปัจจัยมาจากปริมาณแคลเซียม สภาพต่าง พีเอช และอุณหภูมิ ในน้ำที่เข้าระบบมากกว่าผลของ Crossflow Velocity ซึ่งพบว่าค่าดัชนีแลงเกิลีย์ อยู่ประมาณ 0.02 – 0.14 ค่าที่ได้นี้เป็นค่าบวกทั้งหมดซึ่งหมายความว่าระบบมีแนวโน้มที่จะเกิดตะกรันจากแคลเซียมได้ แต่ก็ยังมีแนวโน้มที่น้อยเพราะค่าถึงแม้ว่าเป็นบวกแต่ก็ยังต่ำมากอยู่ใกล้เคียงศูนย์ และมีค่าไม่เกินค่ากำหนดคือน้อยกว่า 1 ซึ่งถือว่าสามารถยอมรับได้ในระบบเมมเบรน โดยมีโอกาสเกิด

ตะกอนบนผิวหน้าของเมมเบรนได้น้อย ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อค่าดัชนีแรงเกลียว แสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีแรงเกลียว และ Crossflow Velocity ที่ใช้

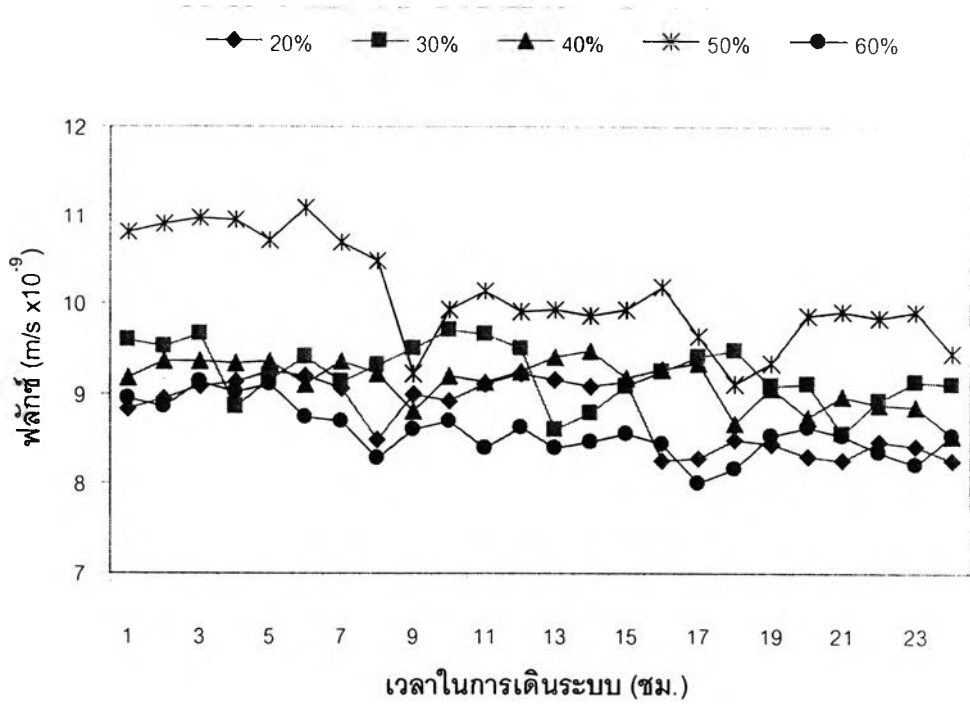
4.2.3 ผลของการควบคุมค่า % Recovery ต่อประสิทธิภาพของระบบ

ในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 5 ชุดการทดลอง โดยควบคุมค่า % Recovery หรือ อัตราการผลิตน้ำสะอาด ที่ร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 ตามลำดับ โดยควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองชุดที่ 1.1 และ 1.2 โดยใช้ ความดันในการเดินระบบที่ 6 บาร์ ค่า Crossflow Velocity ที่ 0.5 เมตรต่อวินาที ในการทดลอง ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะพิจารณาจากอัตราการผลิตน้ำสะอาดและประสิทธิภาพการกำจัดประกอบกัน โดยพบว่าค่าความดันในการเดินระบบที่ 6 บาร์ จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงเพียงพอ แม้ว่าค่าที่ 7 บาร์จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงขึ้นแต่ประสิทธิภาพการกำจัดกลับไม่สูงขึ้นตาม เช่นเดียวกับค่า Crossflow Velocity ค่า 0.5 เมตรต่อวินาทีเป็นค่าที่ให้ค่าฟลักซ์สูงและค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ในขณะที่ค่าที่ต่ำกว่านี้จะให้ค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่ต่ำกว่าและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเดินระบบไประยะเวลาหนึ่ง และค่าที่สูงกว่า 0.5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปก็ไม่ได้ส่งผลให้ค่าฟลักซ์สูงขึ้นมากนัก ส่วนในด้านประสิทธิภาพการกำจัดนั้น พบว่าค่า Crossflow Velocity ที่สูงกว่า 0.3 เมตรขึ้นไปก็จะเพียงพอต่อประสิทธิภาพของระบบ เพราะแม้จะเพิ่มค่า Crossflow Velocity ให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดก็ไม่ได้สูงขึ้นตาม เมื่อดูถึงค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้และประสิทธิภาพของระบบแล้ว ค่า

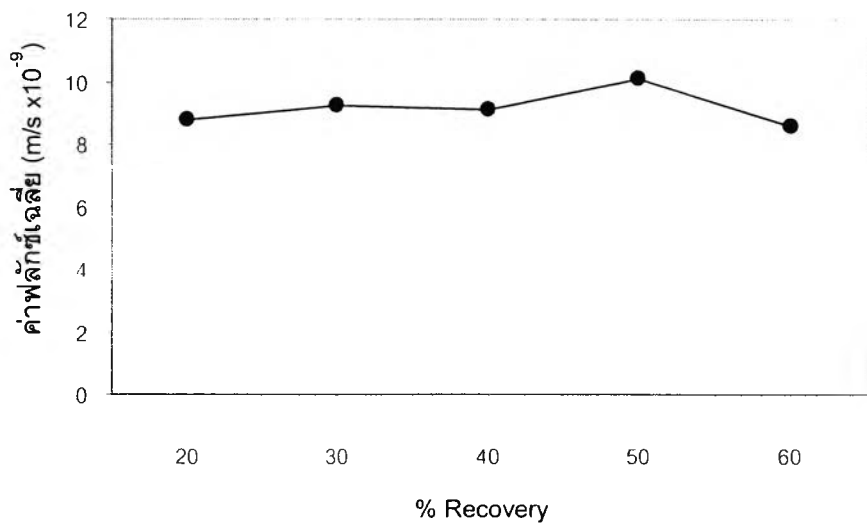
ความดันและ Crossflow Velocity ที่เหมาะสมในการเดินระบบจึงอยู่ที่ 6 บาร์และ 0.5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ จึงเลือกค่านี้เพื่อใช้ในการทดลองกับค่า % Recovery ต่าง ๆ ต่อไป

4.2.3.1 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

จากการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลองเมื่อเดินระบบไปได้ซักระยะหนึ่งจะพบว่าฟลักซ์ของระบบจะลดลงไป โดยเฉพาะ เมื่อค่า % Recovery สูงขึ้นค่าฟลักซ์จะมีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าเมื่อใช้ค่า % Recovery น้อย ๆ ซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยของ Johan Schaep (1998) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ค่า % Recovery ที่สูงมากขึ้น จะทำให้น้ำที่เวียนกลับเข้าระบบมีความเข้มข้นสูงขึ้นซึ่งเป็นเหตุให้มีโอกาสเกิดการอุดตันหรือ Fouling บนผิวเมมเบรนได้เร็วขึ้น และความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบที่สูงขึ้นยังส่งผลให้แรงดันออสโมติกมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย และค่าฟลักซ์ของแต่ละชุดการทดลอง มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ % Recovery ที่สูงขึ้น แต่เมื่อใช้ค่าที่ร้อยละ 60 กลับพบว่าค่าฟลักซ์กลับลดลง โดยที่ค่าฟลักซ์เฉลี่ยของแต่ละค่า % Recovery ได้แก่ 8.78, 9.23, 9.13, 10.12 และ 8.58 $\text{m/s} \times 10^{-9}$ ที่ % Recovery ร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะค่า % Recovery ที่ร้อยละ 60 นี้ทำให้น้ำที่เวียนเข้าระบบมีความเข้มข้นของสารละลายสูงมาก มีผลทำให้ค่าแรงดันออสโมติกของสารละลายในระบบสูงตามไปด้วย ในขณะที่ความดันที่ใช้ในการเดินระบบยังมีค่าคงที่ ทำให้ค่าฟลักซ์ของระบบลดลง และจากการที่สารละลายในระบบมีความเข้มข้นสูงขึ้นที่ค่า % Recovery สูงขึ้นยังเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดการอุดตันเร็วกว่าจนทำให้ค่าฟลักซ์เฉลี่ยของระบบลดลงมาก ความสัมพันธ์ของ % Recovery ในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อฟลักซ์แสดงดังรูปที่ 4.34 และความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Recovery ในการเดินระบบกับเปอร์เซ็นต์การฟลักซ์แสดงดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบที่ % Recovery ต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 2



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และ % Recovery ในการเดินระบบของการทดลองชุดที่ 2

4.2.3.2 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อค่าพีเอช

ในการทดลองพบว่าที่ค่า % Recovery สูงขึ้น ค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีแนวโน้มสูงขึ้น เช่นเดียวกับน้ำเข้มข้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่ม % Recovery จะทำให้ความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบสูงขึ้น รวมถึงความเข้มข้นของสารประกอบพวกคาร์บอเนตที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์สูงขึ้นด้วย ทำให้มีโอกาสที่จะหลุดออกมากับน้ำสะอาดมากขึ้น เช่นเดียวกับในส่วนของน้ำเข้มข้นที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้สารประกอบพวกคาร์บอเนตสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่น้ำเข้มข้นที่ออกจากระบบจะมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7.9 – 8.2 และในน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบจะมีค่าระหว่าง 7.9 - 8.4 และความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อค่าพีเอชของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.37 (ก)

4.2.3.3 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของระบบค่อนข้างสูงมาก โดยประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 90 – 95 ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายอยู่ที่ร้อยละ 93 – 99 ซึ่งค่อนข้างเห็นได้ชัดว่าการเพิ่ม % Recovery ในการเดินระบบทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายลดลงไป ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่ม % Recovery ในการเดินระบบให้สูงขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ในน้ำที่เข้าระบบจะสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของน้ำที่เข้าสู่ระบบสูงขึ้นด้วย เป็นผลให้ค่าแรงดันออสโมติกสูงขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงไปด้วย นอกจากนี้ยังทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิด Fouling บนผิวหน้าเมมเบรนสูงตามไปด้วย ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.37 (ข) และ 4.37 (ค) ตามลำดับ

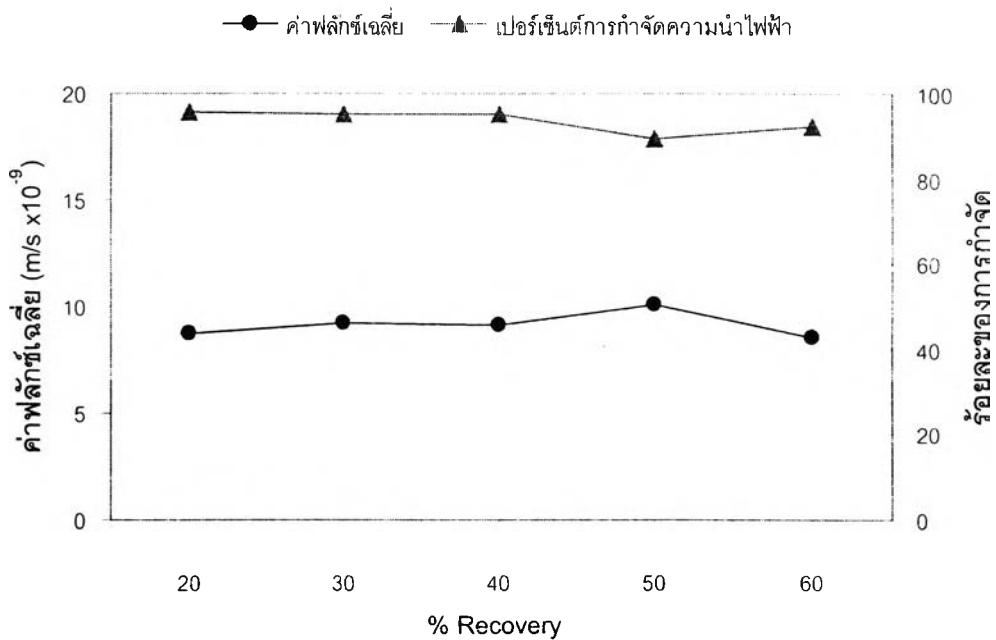
จากสมการที่ 4.11 เมื่อ $x = (2-2R)/(2-R)$ และ R ก็คือ % Recovery ของระบบจึงแทนค่า x ลงในสมการ จะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการกำจัดและ % Recovery ได้ดังสมการที่ 4.18 คือ

$$\text{ร้อยละของการกำจัด} = \left[1 - \frac{K_s}{K_s + \left(\frac{2-2R}{2-R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.18)$$

และจากสมการที่ 4.18 จะสามารถหาความสัมพันธ์ของ % Recovery กับร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายได้ดังสมการที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Recovery ในการเดินระบบกับค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.36

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า} = \left[1 - \frac{0.6421}{0.6421 + \left(\frac{2 - 2R}{2 - R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.19)$$

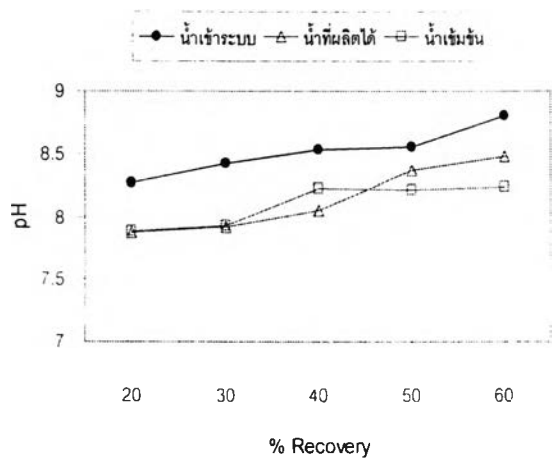
$$\text{ร้อยละของการกำจัดของแข็งละลาย} = \left[1 - \frac{0.4459}{0.4459 + \left(\frac{2 - 2R}{2 - R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.20)$$



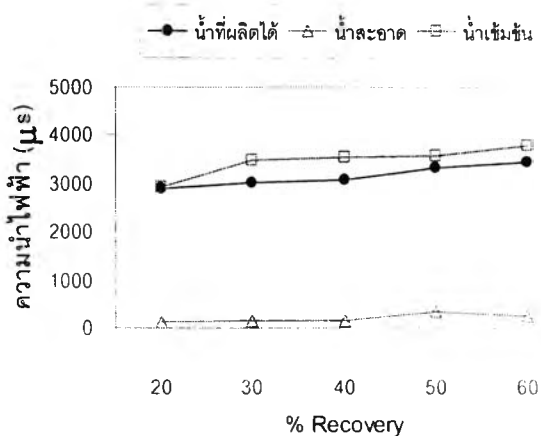
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Recovery ในการเดินระบบต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาดและความนำไฟฟ้า ของการทดลองชุดที่ 2

4.2.3.4 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อความขุ่น

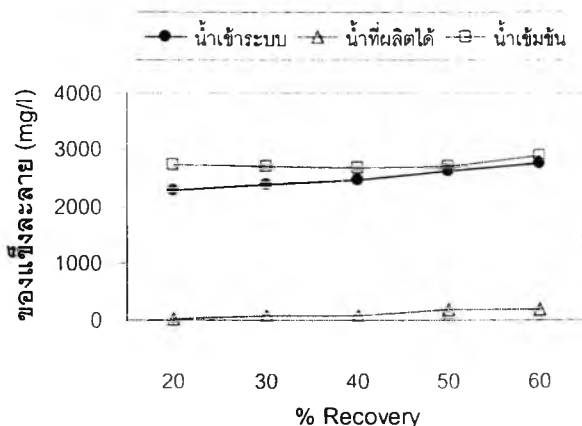
สำหรับในด้านความขุ่นผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกับการทดลองชุดที่ 1.1 และ 1.2 คือสามารถกำจัดความขุ่นได้สูงมาก คือสูงกว่าร้อยละ 98 ซึ่งที่การใช้ค่า % Recovery ต่าง ๆ ไม่ได้มีผลเด่นชัดนักเกี่ยวกับการกำจัดความขุ่น ทั้งนี้เนื่องจากกลไกในการกำจัดความขุ่น เป็นกลไกของการกรองติดผิว และโดยทั่วไปความขุ่นเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ที่ไม่สามารถจะผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปได้อยู่แล้ว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า % Recovery ในการเดินระบบจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมากนัก ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อความขุ่นของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.37 (ง)



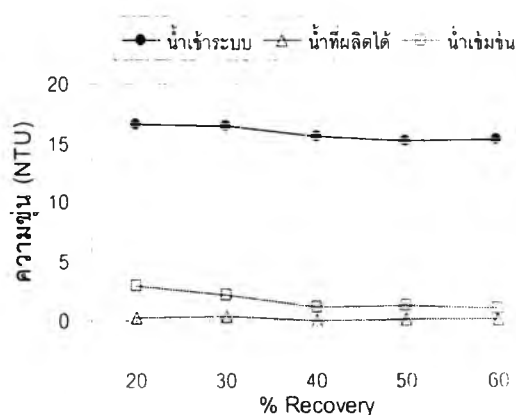
(ก)



(ข)



(ค)

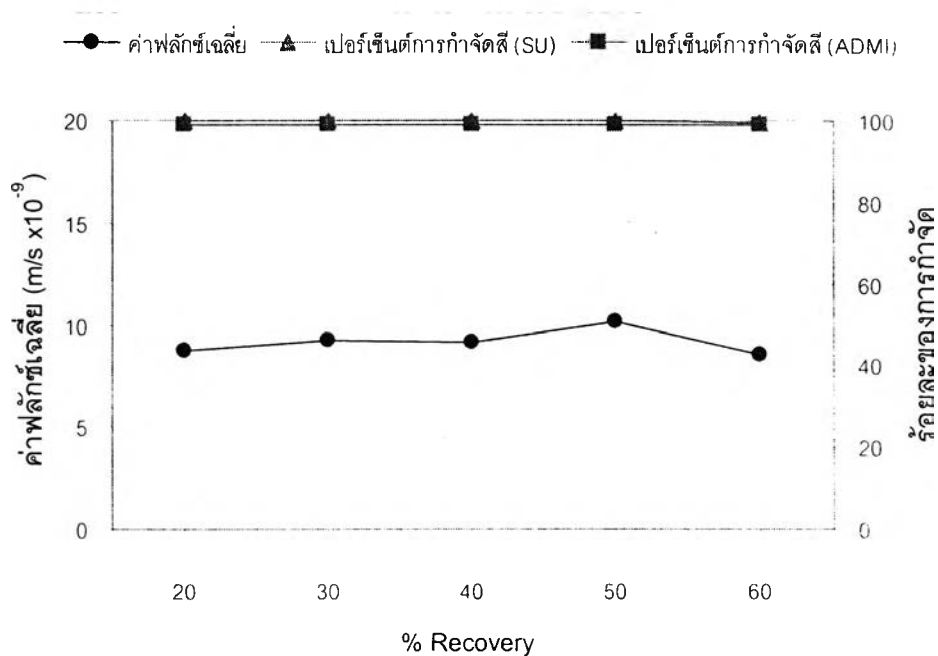


(ง)

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและความขุ่นในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ ของการทดลองชุดที่ 2

4.2.3.5 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อสีในหน่วย SU และ ADMI

ผลการทดลองก็ยังเป็นไปในทำนองเดียวกับการทดลองชุดที่ 1.1 และ 1.2 ก็คือทุกชุด การทดลองสามารถกำจัดสีได้ทั้งหมดในหน่วย SU และสูงกว่าร้อยละ 98 ในหน่วย ADMI โดยพบว่าค่าของ % Recovery แต่ละค่าที่ใช้ในการทดลอง ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี ซึ่งทั้งนี้เนื่องมาจากกลไกการกำจัดสีเป็นกลไกการกรองติดผิวเป็นกลไกหลัก เพราะโมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนมาก จึงไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.5 และ 4.2.2.5 รูปที่ 4.38 แสดงถึงความสัมพันธ์กับ % Recovery ต่อค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพในการกำจัดสีในหน่วย SU และ ADMI และรูปที่ 4.40 (ก) และ 4.40 (ข) แสดงความสัมพันธ์ของ % Recovery กับสีในหน่วย SU และ ADMI ของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของระบบ



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดสีของการทดลองชุดที่ 2

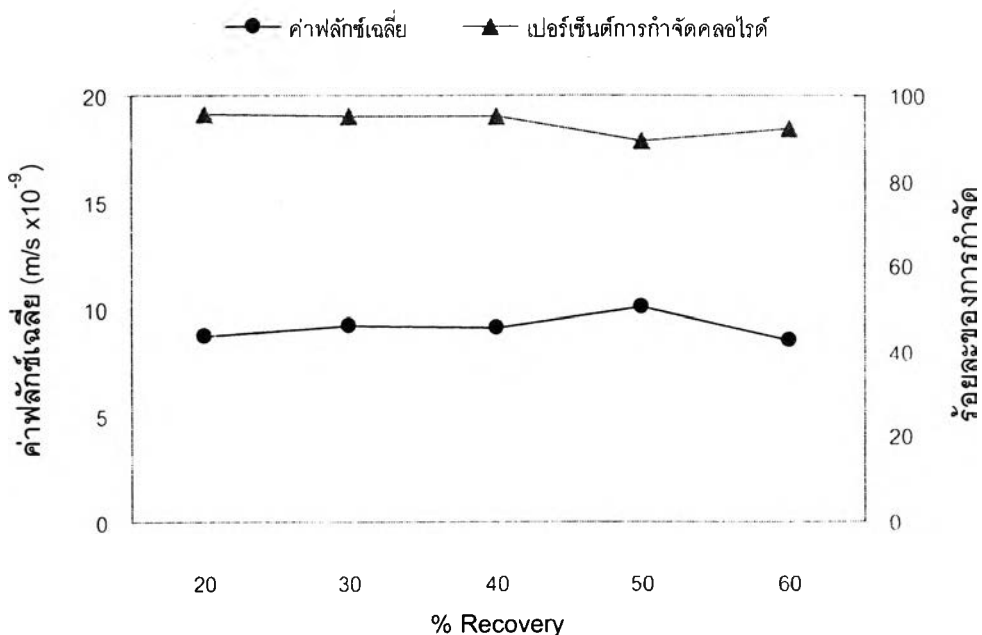
4.2.3.6 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อคลอไรด์

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ของแต่ละชุดการทดลองอยู่ที่ระหว่างร้อยละ 85 – 92 และพบว่าการเพิ่มค่า % Recovery จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการ

กำจัดคลอไรด์ โดยที่เมื่อเพิ่มค่า % Recovery ให้สูงขึ้นจะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการเพิ่มค่า % Recovery ที่สูงขึ้นมีผลให้ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ในน้ำที่เข้าระบบมีสูงขึ้นทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้นด้วยจนทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบลดลง รวมทั้งค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลายก็จะสูงตามไปด้วย

สมการที่ 4.18 สามารถใช้แสดงถึงร้อยละของการกำจัดคลอไรด์และค่า % Recovery ได้เช่นกัน ซึ่งสมการแสดงความสัมพันธ์นี้ได้แก่สมการที่ 4.24 และความสัมพันธระหว่งค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 4.39 และความสัมพันธ์ระหว่าง % Recovery กับคลอไรด์ของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของระบบแสดงดังรูปที่ 4.40 (ค)

$$\text{ร้อยละของการกำจัดคลอไรด์} = \left[1 - \frac{1.1728}{1.1728 + \left(\frac{2 - 2R}{2 - R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.21)$$



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดคลอไรด์ของการทดลองชุดที่ 2

4.2.3.7 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อสภาพต่างทั้งหมด

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสภาพต่างของแต่ละชุดการทดลอง จะอยู่ที่ร้อยละ 81 – 94 และเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย ก็คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสภาพต่างเริ่มลดลงเมื่อใช้ค่า % Recovery ที่สูงขึ้น และลดลงมากที่สุดที่ค่า % Recovery สูงกว่าร้อยละ 40 ขึ้นไป เพราะการที่ใช้ค่า % Recovery สูง ๆ ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าระบบจะสูงขึ้นมากทำให้มีแนวโน้มให้เกิด Concentration Polarization สูงตามไปด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Recovery และประสิทธิภาพในการกำจัดสภาพต่างนี้ สามารถใช้สมการที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์เช่นกัน แสดงดังสมการที่ 4.22 ซึ่งสามารถใช้สมการนี้ ประมาณค่าร้อยละของการกำจัดสภาพต่างที่ใช้ค่า % Recovery ต่าง ๆ ได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง % Recovery กับสภาพต่างของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของระบบแสดงดังรูปที่ 4.40 (ง) และความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Recovery ในการเดินระบบกับร้อยละของการกำจัดสภาพต่างทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.41

$$\text{ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง} = \left[1 - \frac{1.2195}{1.2195 + \left(\frac{2 - 2R}{2 - R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.22)$$

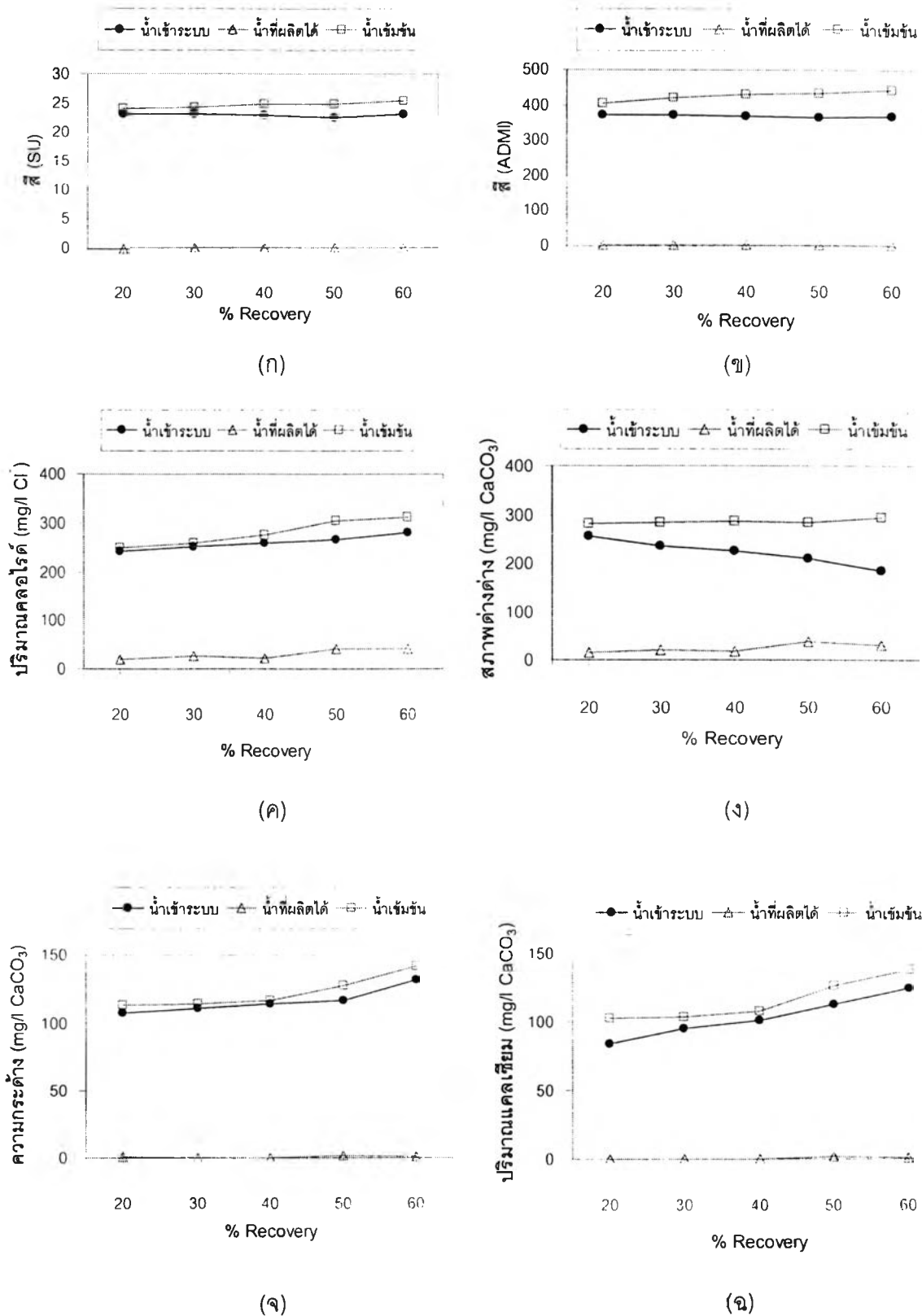
4.2.3.8 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อแคลเซียมและความกระด้างทั้งหมด

สำหรับแคลเซียมและความกระด้างนั้นในทุก ๆ ชุดการทดลองสามารถกำจัดได้สูงกว่าร้อยละ 99 และที่ค่า % Recovery ต่าง ๆ นั้น ไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างมากนัก ซึ่งทั้งนี้เนื่องมาจากอิออนที่เป็นสาเหตุของความกระด้างเป็นอิออนประเภทที่มีประจุ +2 เช่น แคลเซียมและแมกนีเซียม หรือสารประกอบของอิออนเหล่านี้ ซึ่งจะมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ และไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปได้ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.8 และ 4.2.2.8 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างนั้นสูงมาก

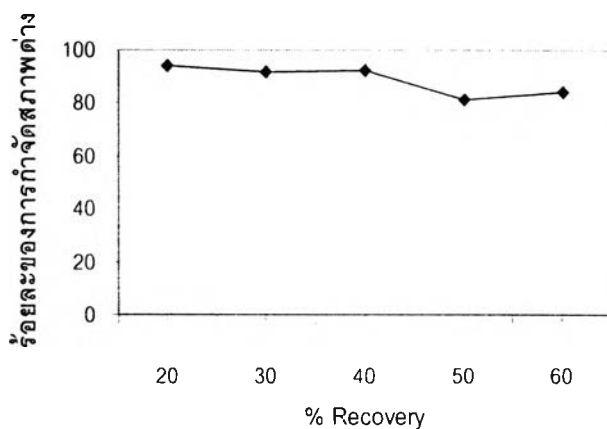
ความสัมพันธ์ของค่า % Recovery ที่มีผลต่อร้อยละของการกำจัดของความกระด้างและแคลเซียมสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.18 เช่นกัน ซึ่งแทนได้ดังสมการที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่าง % Recovery กับความกระด้างและแคลเซียมของน้ำในส่วนต่างๆ ของระบบแสดงดังรูปที่ 4.40 (จ) และ 4.40 (ข) ตามลำดับ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Recovery ในการเดินระบบกับร้อยละของการกำจัดความกระด้างทั้งหมด และแคลเซียมแสดงดังรูปที่ 4.41

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความกระด้าง} = \left[1 - \frac{0.0432}{0.0432 + \left(\frac{2 - 2R}{2 - R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.23)$$

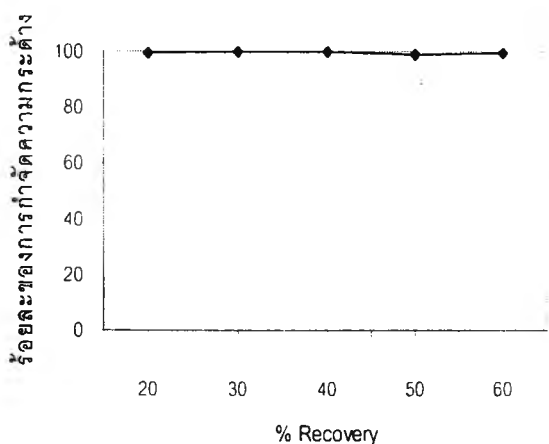
$$\text{ร้อยละของการกำจัดแคลเซียม} = \left[1 - \frac{0.0386}{0.0386 + \left(\frac{2 - 2R}{2 - R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.24)$$



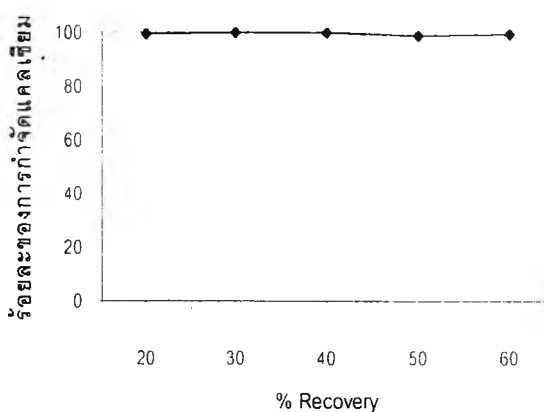
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ในการเดินระบบกับค่า คลอไรด์ สภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ของน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ ของการทดลอง ชุดที่ 2



(ก)



(ข)



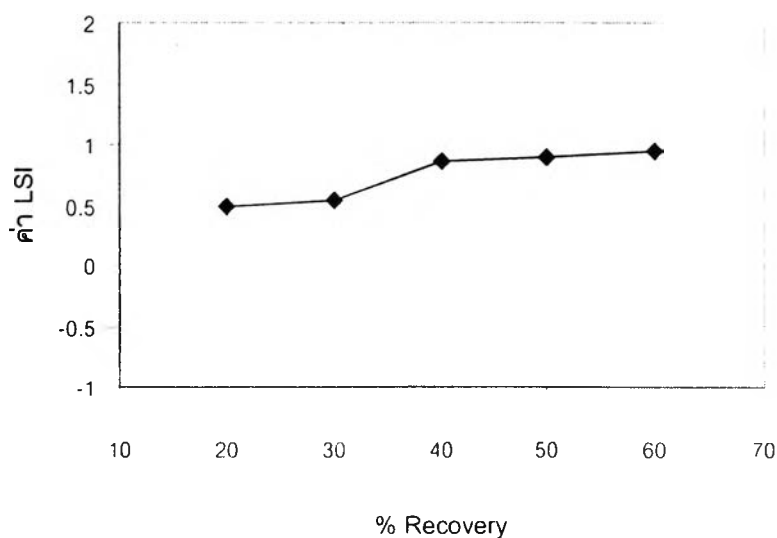
(ค)

รูปที่ 4.41 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ % Recovery ในการเดินระบบค่าต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 2

4.2.3.9 ผลของค่า % Recovery ในการเดินระบบต่อค่าดัชนีแลงเกลียร์ (Langier Saturation Index) ของน้ำเข้มข้น

จากการทดลองเห็นได้ชัดว่าการเพิ่มค่า % Recovery ที่ใช้ในการเดินระบบนั้น มีผลกับค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้นอย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มค่า % Recovery ในการเดินระบบจะทำให้ค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้นสูงขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้นอยู่ที่ 0.5 - 0.9 และเป็นค่าบวกทั้งหมด โดยที่ตั้งแต่ค่า % Recovery ที่ร้อยละ 40 นั้น ค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้นจะสูงขึ้นมากเริ่มที่เข้าใกล้ 1 และค่าดัชนีแลงเกลียร์ที่เป็นบวกนี้บ่งชี้ว่าอาจมีแนวโน้มกับการเกิดตะกอนบนผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่า % Recovery จะทำให้น้ำที่เวียนกลับ

เข้าระบบนั้นมีความเข้มข้นสูงขึ้นทั้งปริมาณแคลเซียม ความกระด้างและสภาพต่าง ทำให้มีผลให้ค่าดัชนีแลงเกลียร์ที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าดัชนีแลงเกลียร์ที่ได้จากแต่ละชุดการทดลองยังมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งถือว่ายังอยู่ในเกณฑ์ของการใช้ระบบเมมเบรนที่ยอมรับได้ ความสัมพันธ์ของค่า % Recovery ในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อค่าดัชนีแลงเกลียร์ แสดงดังรูปที่ 4.42



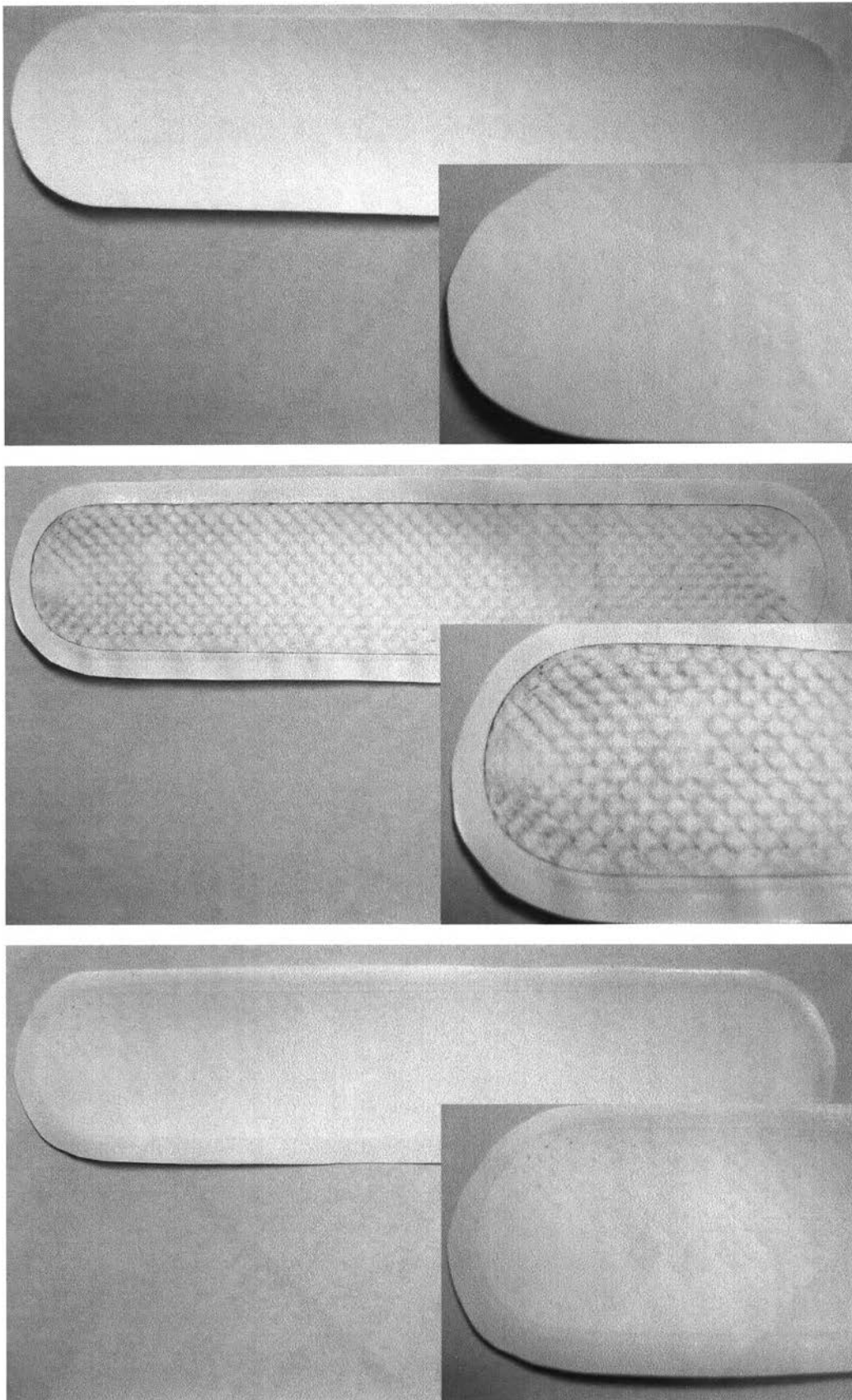
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีแลงเกลียร์ที่ % Recovery ในการเดินระบบ

4.2.4 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อประสิทธิภาพของระบบ

จากการทดลองในชุดที่ 2 ได้พบว่าการที่เพิ่มค่า % Recovery นั้นค่อนข้างมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างชัดเจนทั้งในด้านฟลักซ์ที่ลดลง และประสิทธิภาพของระบบก็ลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากมีแนวโน้มที่จะเกิดการ Fouling บนผิวเมมเบรนสูงขึ้น รวมถึงคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ก็ต่ำลง และค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเดินระบบครั้งนี้ ซึ่งให้ค่าฟลักซ์ลดลงช้าที่สุด รวมถึงคุณภาพน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีคุณภาพดีจะอยู่ที่ % Recovery เท่ากับร้อยละ 40 ซึ่งจะได้นำมาทดสอบหาระบบ Pretreatment ที่เหมาะสมในการทดลองชุดที่ 3 นี้ โดยค่าที่ควบคุมก็คือใช้ความดันเดินระบบที่ 6 บาร์ ค่า Crossflow velocity ที่ 0.5 เมตรต่อวินาที และ % Recovery ที่ร้อยละ 40 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดกับระบบที่ให้ค่า ฟลักซ์ได้สูงและคงที่มากที่สุด รวมถึงคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ดีที่สุด

ในการเลือกระบบ Pretreatment จะเลือก 2 วิธี ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก และนำไปใช้งานจริงได้ โดยเลือกวิธีเติมกรด และการเพิ่มระบบกรองไมโครฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอนเข้ากับระบบ ซึ่งการเติมกรดลงไปจะช่วยป้องกันการเกิด Scaling อันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิด Fouling ในเติมกรดจะควบคุมพีเอชของน้ำที่เข้าระบบให้อยู่ที่ประมาณ 6 และอีกวิธีคือการเพิ่มชุดไมโครฟิลเตอร์ขนาด 0.3 ไมครอน เพื่อให้กรองเอาอนุภาคขนาดเล็กที่หลุดมาจากไส้กรองขนาด 5 ไมครอน ออกไม่ให้ออกมาถึงระบบเพื่อลดปัญหาการเกิด Fouling จากการที่มีอนุภาคไปอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาถึงกลไกการเกิด Fouling บนเมมเบรน ของการนำมาบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมอีกด้วย ปัญหาการลดลงของประสิทธิภาพของระบบเนื่องจาก Fouling นั้นเกิดมาจากปัญหาของการเกิด Scaling หรือปัญหาจากการสะสมตัวของอนุภาคขนาดเล็กบนผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งในการทดลองก็ได้พบว่า ปัญหาการเกิด Fouling ของระบบน่าจะมีสาเหตุมาจากการอุดตันของอนุภาคขนาดเล็กบนผิวหน้าเมมเบรน มากกว่าปัญหาจากการเกิด Scaling เพราะ เมื่อใช้กรดเป็น Pretreatment ค่าฟลักซ์ก็ยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเดินระบบไปได้ระยะหนึ่ง แต่เมื่อใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment ค่าฟลักซ์ไม่มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตลอดช่วงการทดลอง รวมถึงคุณภาพน้ำที่ได้ยังสูงกว่าการเติมกรดเข้าระบบเพื่อเป็น Pretreatment

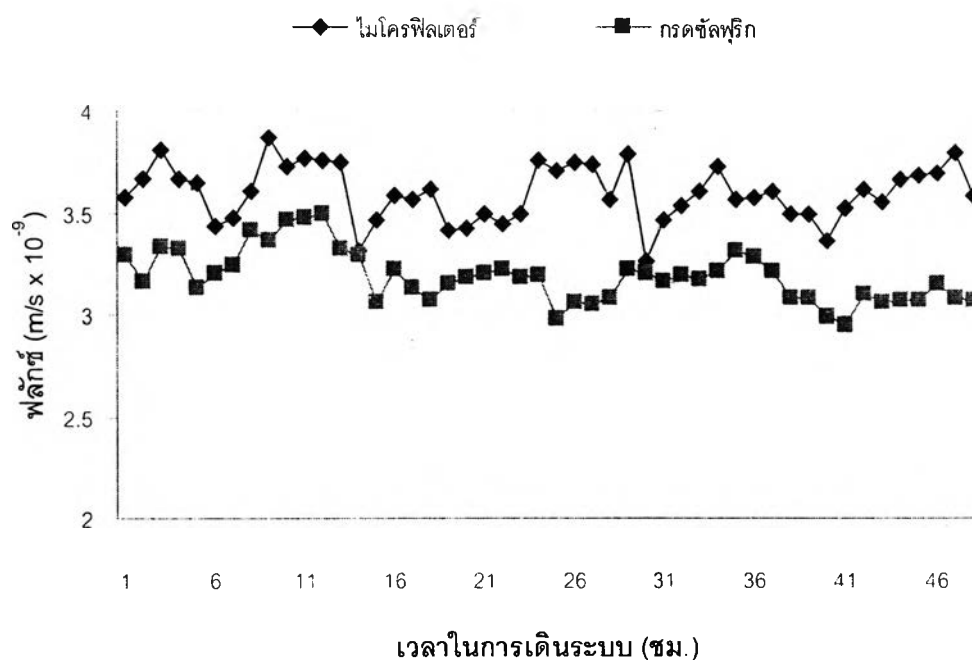
รูปที่ 4.43 แสดงให้เห็นถึงเมมเบรนก่อนการทดลอง เมมเบรนที่เกิด Fouling จากการทดลองที่ไม่มีระบบ Pretreatment ใด ๆ และเมมเบรนที่เกิด Fouling จากการทดลองที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment ซึ่งจะเห็นว่า การใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์จะช่วยลดภาระของระบบนาโนฟิลเตรชันได้อย่างมากทำให้ประสิทธิภาพของระบบค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.43 เมมเบรนก่อนการทดลอง (บน) และหลังทำการทดลอง โดยไม่มีชุดไมโครฟิลเตอร์ (กลาง) และมีระบบไมโครฟิลเตอร์ (ล่าง) ของการทดลองชุดที่ 3

4.2.4.1 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

จากการทดลองพบว่าการเพิ่มชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment ค่าฟลักซ์ค่อนข้างคงที่ ไม่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดตลอดการทดลอง ในขณะที่การเติมกรดนั้นเมื่อเดินระบบไปได้ประมาณ 12 ชั่วโมง ค่าฟลักซ์เริ่มลดลงประมาณร้อยละ 14 นอกจากนี้ค่าฟลักซ์เฉลี่ยยังต่ำกว่าการที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment อีกด้วย ซึ่งแสดงได้ว่าปัญหาการเกิด Fouling ของระบบน่าจะมีแนวโน้มมาจากการที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ไปอุดตันที่ผิวหน้าเมมเบรน มากกว่าเกิดจาก Scaling อีกทั้งการเติมกรด ซึ่งในที่นี้เลือกใช้กรดซัลฟริก เนื่องจากเป็นกรดที่มีราคาถูกนี้ยังทำให้สารละลายมีแรงดันออสโมติกสูงขึ้นจึงมีผลให้ประสิทธิภาพของระบบไม่ได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการเพิ่มชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อฟลักซ์แสดงดังรูปที่ 4.44



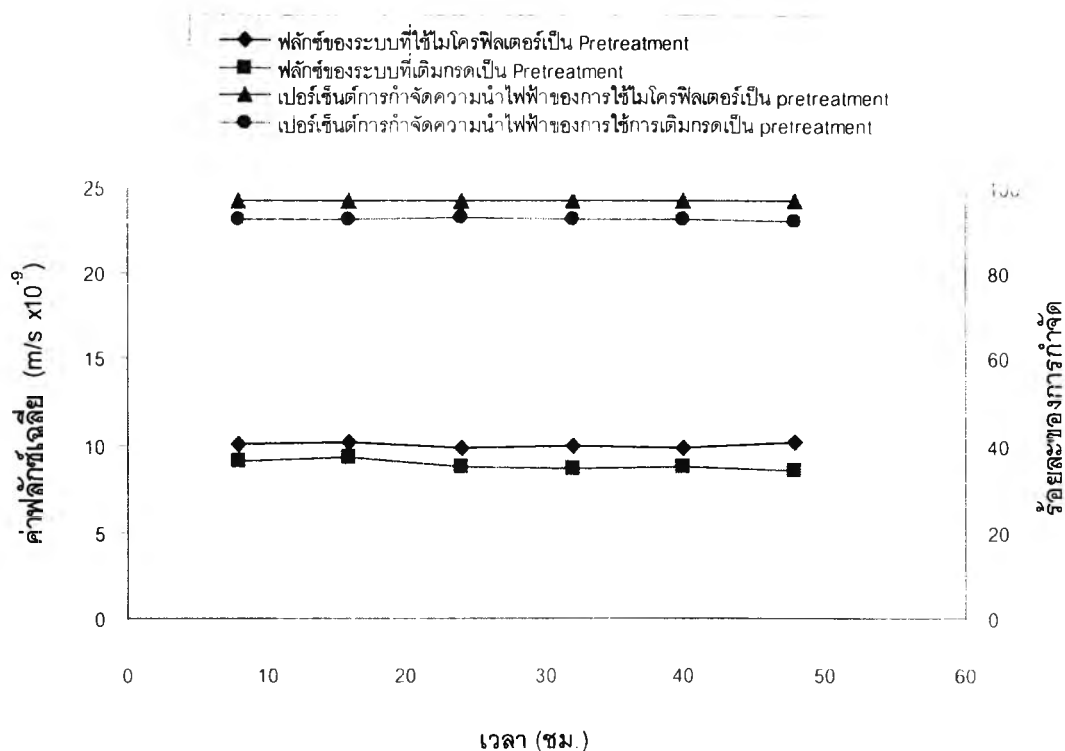
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบที่ Pretreatment ต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 3

4.2.4.2 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อค่าพีเอช

จากการทดลองพบว่าทั้งการใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์และการเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment ก็ไม่ได้มีผลต่อค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มากนัก แต่การเติมกรดนั้นทำให้พีเอชของระบบมีค่าลดลง โดยที่ระบบที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment จะมีค่าพีเอชประมาณ 8 ในขณะที่ระบบใช้กรดซัลฟูริกเป็นระบบ Pretreatment จะมีค่าพีเอชประมาณ 6.8 - 7 ความสัมพันธ์ของพีเอชในน้ำแต่ละส่วนของระบบกับช่วงเวลาการทดลองของ Pretreatment แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.46 (ก)

4.2.4.3 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

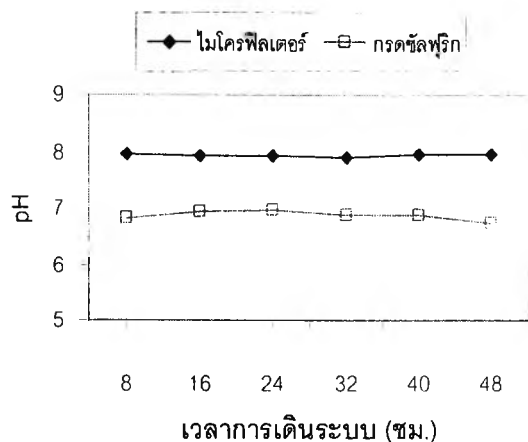
จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 92 - 97 และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายอยู่ที่ประมาณร้อยละ 89 - 92 โดยที่การใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์นั้นจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความนำไฟฟ้าได้สูงกว่าเล็กน้อยคืออยู่ที่ประมาณร้อยละ 97 และกรณีที่ใช้กรดเป็น Pretreatment จะมีประสิทธิภาพการกำจัดประมาณร้อยละ 92 - 93 ในขณะที่การกำจัดของแข็งละลายของระบบที่ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณร้อยละ 89 - 92 และอยู่ที่ประมาณร้อยละ 88 - 90 สำหรับระบบที่ใช้การเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วิธีเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment นั้นจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายของระบบมีค่าสูงขึ้นทำให้ค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดการสะสมตัวของอนุภาคและอิมออนต่าง ๆ ที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนจึงเป็นไปได้มากกว่า นอกจากนี้การที่ความเข้มข้นของสารละลายในระบบที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ค่าแรงดันออสโมติกและอัตราการซึมผ่านของตัวถูกละลายนั้นสูงขึ้นตามมาอีกด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมลดลง ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ในการเดินระบบแต่ละชนิดที่มีต่อค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำแต่ละส่วนของระบบกับช่วงเวลาการทดลองของ Pretreatment แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.46 (ข) และ 4.46 (ค) ตามลำดับ



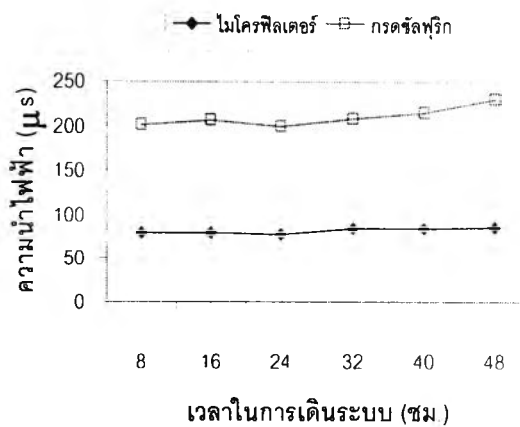
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า ของการทดลองชุดที่ 3

4.2.4.4 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อความขุ่น

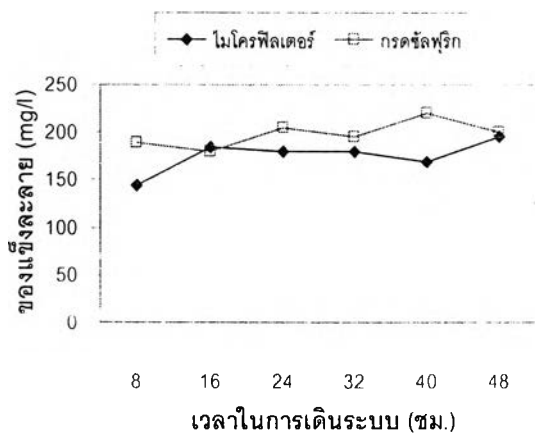
ประสิทธิภาพของระบบที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็น Pretreatment นั้นค่อนข้างสูงกว่าระบบที่ใช้การเติมกรดเป็น Pretreatment เล็กน้อย แต่ก็ถือว่าการกำจัดความขุ่นยังคงสูงมากคือมากกว่าร้อยละ 99 ที่เป็นเช่นนี้เพราะระบบไมโครฟิลเตอร์สามารถกำจัดความขุ่นได้สูงอยู่แล้วดังนั้นน้ำที่เข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชันจึงมีความขุ่นค่อนข้างต่ำ ตัวของระบบนาโนฟิลเตรชันจึงไม่ต้องรับภาระมากนัก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นค่อนข้างสูง ในขณะที่การใช้การเติมกรดเป็น Pretreatment ไม่ได้ช่วยลดความขุ่นของน้ำที่จะเข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชันได้เลย อย่างไรก็ตามตัวระบบนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนเองนั้นก็มีความสามารถสูงในการกำจัดความขุ่นอยู่แล้ว โดยอาศัยกลไกของการกรองติดผิวเป็นกลไกหลักในการกำจัด เพราะความขุ่นนั้นส่วนใหญ่เป็นอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่อยู่แล้วจึงไม่สามารถหลุดลอดผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปได้ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของระบบสูงและไม่ต่างกันมากนักทั้งในการที่เพิ่มชุดไมโครฟิลเตอร์เป็น Pretreatment หรือจะเป็นการเติมกรดเพื่อเป็น Pretreatment ก็ตาม และความสัมพันธ์ของความขุ่นในน้ำแต่ละส่วนของระบบกับช่วงเวลาการทดลองของ Pretreatment แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.46 (ง)



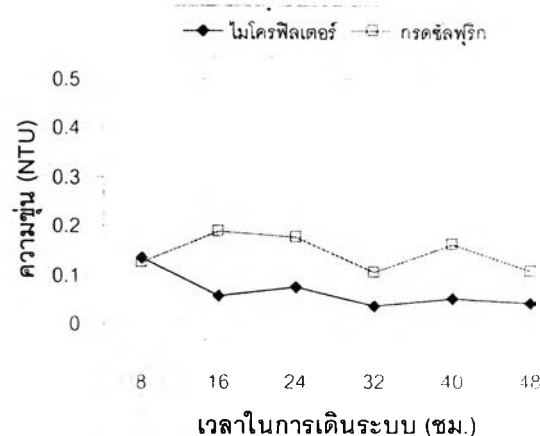
(ก)



(ข)



(ค)



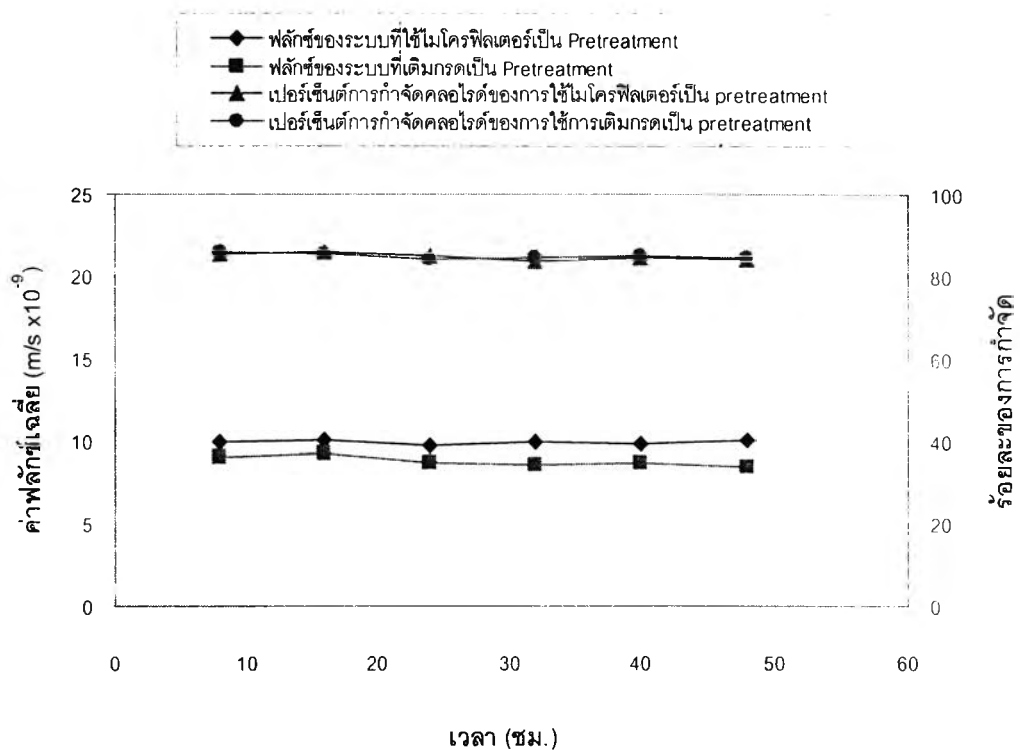
(ง)

รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ของพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและ ความขุ่นในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบที่ใช้ Pretreatment แต่ละชนิดของการทดลองชุดที่ 3

4.2.4.5 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อสีในหน่วย SU และ ADMI

ในการทำงานเดียวกับการทดลองชุดที่ 1.1 และ 1.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบสูงมาก คือสามารถกำจัดสีในน้ำดิบได้ทั้งหมดในหน่วย SU และ อยู่ที่ร้อยละ 98 – 99 ในหน่วย ADMI โดยไม่ขึ้นกับระบบ Pretreatment แต่อย่างไร เนื่องจากโมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับรูพรุนของนาโนฟิลเตอร์ชั้นเมมเบรน ทำให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ซึ่งกำจัดโดยอาศัยกลไกการกรองติดผิวเป็นหลัก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.5 , 4.2.2.5 และ 4.2.3.5 จึงพบว่าระบบ Pretreatment

นั้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ในการเดินระบบแต่ละชนิดที่มีต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาดและประสิทธิภาพในการกำจัดสีในหน่วย ADMI ตลอดระยะเวลาการเดินระบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.47 ขณะที่ความสัมพันธ์ของสีในหน่วย SU และ ADMI ในน้ำแต่ละส่วนของระบบกับช่วงเวลาการทดลองของ Pretreatment แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.49 (ก) และ 4.49 (ข) ตามลำดับ

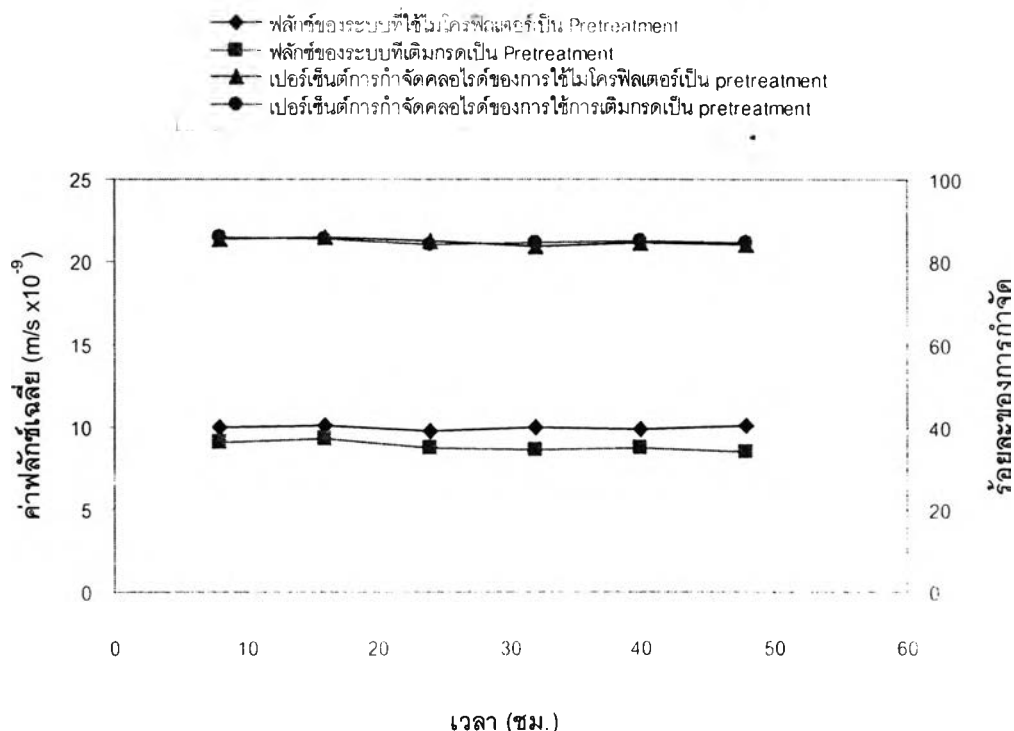


รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดสีของการทดลองชุดที่ 3

4.2.4.6 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อคลอรีน

ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดคลอรีนนั้น พบว่าทั้งการทดลองที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็น Pretreatment และการใช้การเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment ก็ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไม่ต่างกัน โดยอยู่ที่ร้อยละ 85 ซึ่งการเติมกรดไม่ได้มีผลกับอ็อกซิคลอรีนในน้ำเลยและระบบไมโครฟิลเตอร์ก็ไม่สามารถจะดักอ็อกซิคลอรีนได้ แสดงว่าทั้งการเติมกรดหรือการชุดไมโครฟิลเตอร์ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนแต่อย่างใด และประสิทธิภาพการกำจัดไม่สูงนัก ทั้งนี้เนื่องจากคลอรีนเป็นอ็อกซิที่มีประจุ -1 ซึ่งมีขนาดเล็กมากจึงมีโอกาสที่จะหลุดผ่านรูพรุนของแผ่นเมมเบรนได้

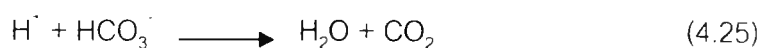
มาก ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำที่ผลิตได้ และ ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ในน้ำที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ของคลอไรด์ในน้ำแต่ละ ส่วนของระบบกับช่วงเวลาการทดลองของ Pretreatment แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.49 (ค)



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดคลอไรด์ของการทดลองชุดที่ 3

4.2.4.7 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อสภาพต่างทั้งหมด

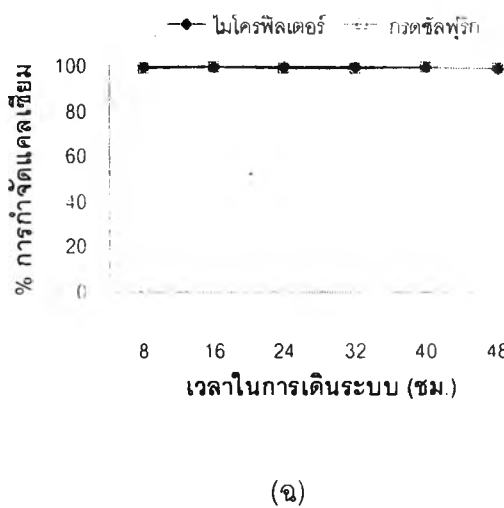
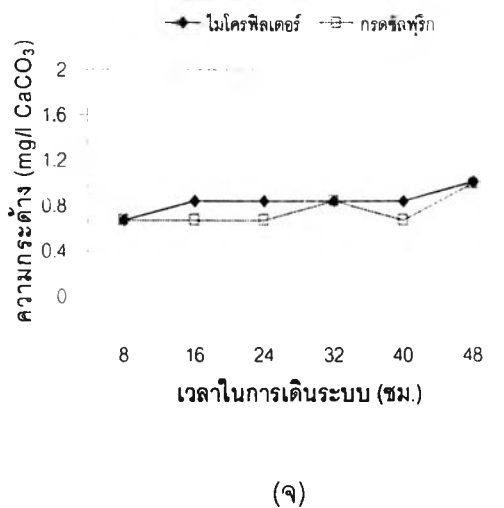
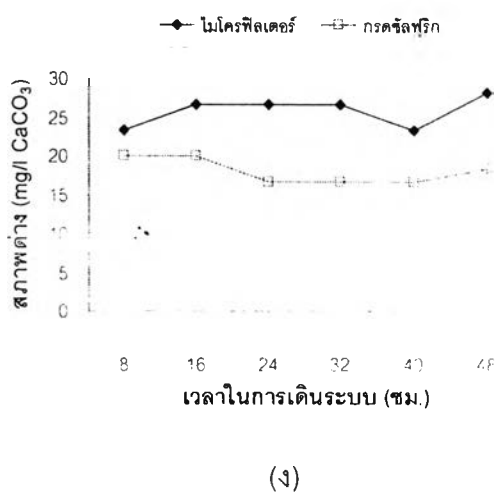
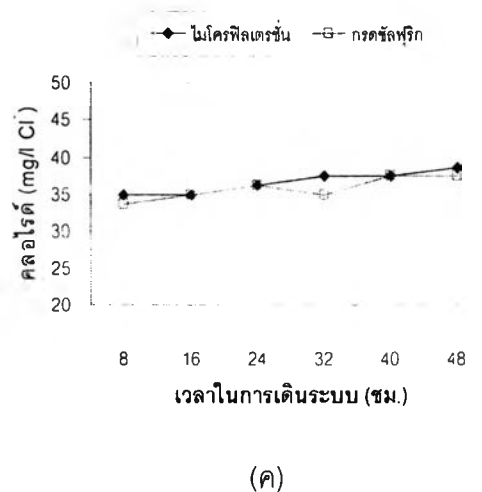
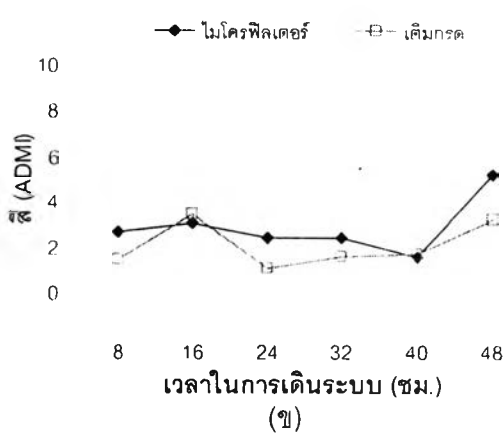
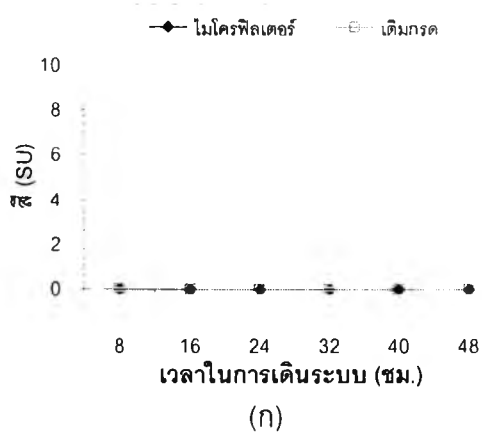
จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่างของแต่ละชุดการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 82 – 87 โดยที่การใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment นั้นจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ต่ำกว่าการใช้การเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment ทั้งนี้เนื่องจากการเติมกรดจะไปทำให้สภาพต่างลดลง และค่าพีเอชของน้ำที่เข้าระบบมีค่าน้อยกว่า 8.3 ซึ่งสภาพต่างส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ HCO_3^- ดังนั้นเมื่อเติมกรดเข้าไปในระบบจะได้รับความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.25 ซึ่งทำให้สภาพต่างลดลง จึงทำให้ภาระของระบบน้อยลงตามไปด้วย



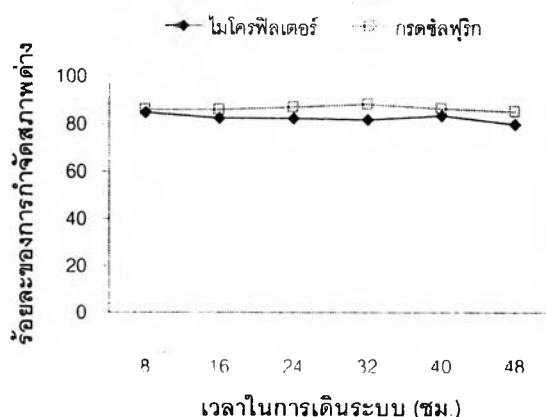
ส่วนในกรณีที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment นั้นไม่ได้มีผลต่อสภาพต่างของระบบเท่าใด ทำให้สภาพต่างของน้ำที่เข้าระบบไม่ได้ลดลง จึงพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่ากว่าการใช้วิธีการเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก และถือว่าประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่างยังสูงอยู่พอสมควร ความสัมพันธ์ของสภาพต่างในน้ำแต่ละส่วนของระบบกับช่วงเวลาการทดลองของ Pretreatment แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.49 (ง) และประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่างของการใช้ Pretreatment แต่ละระบบตลอดระยะเวลาการเดินระบบแสดงดังรูปที่ 4.50

4.2.4.8 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อความกระด้างทั้งหมดและแคลเซียม

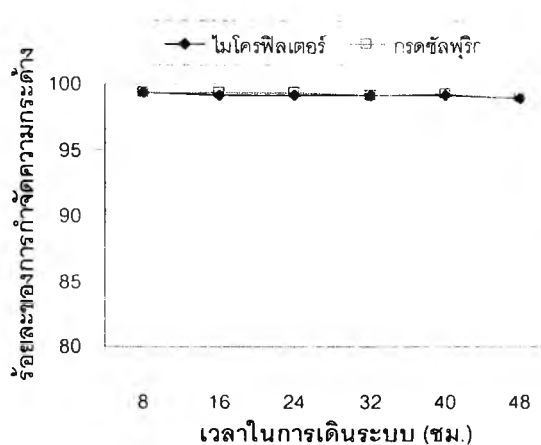
จากการทดลองก็พบว่าในการทดลองที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เพิ่มนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดไม่แตกต่างกับระบบที่ใช้การเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment เพราะอูออนประจุบวก 2 นั้นก็สามารถผ่านระบบไมโครฟิลเตอร์ไปได้ ในขณะที่การเติมกรดนั้นไม่ได้มีผลให้ปริมาณอูออนลดลงเพียงแต่จะมีผลช่วยลดแนวโน้มในการเกิดตะกอนของแคลเซียม และประสิทธิภาพโดยรวมก็ยังถือว่าสูงมาก ทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเซียมและความกระด้าง คือสูงกว่าร้อยละ 99 ทั้งนี้เนื่องมาจากแคลเซียมและความกระด้างจะเกิดจากสารประกอบของอูออนที่มีประจุ +2 ซึ่งมีขนาดใหญ่และไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปได้ ความสัมพันธ์ของความกระด้างและแคลเซียมในน้ำแต่ละส่วนของระบบกับช่วงเวลาการทดลองของ Pretreatment แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.49 (จ) และ 4.49 (ฉ) ตามลำดับ โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและแคลเซียมในน้ำที่ผลิตได้ของ Pretreatment แต่ละชนิดตลอดระยะเวลาเดินระบบแสดงดังรูปที่ 4.50



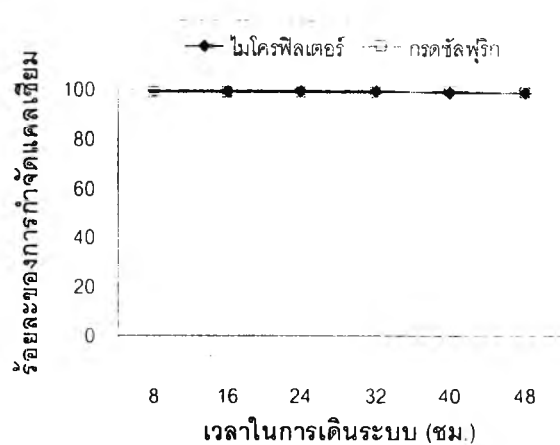
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ของค่า คลอไรด์ สภาพด่าง ความกระด้าง และแคลเซียมในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบที่ใช้ Pretreatment แต่ละชนิดของการทดลองชุดที่ 3



(ก)



(ข)



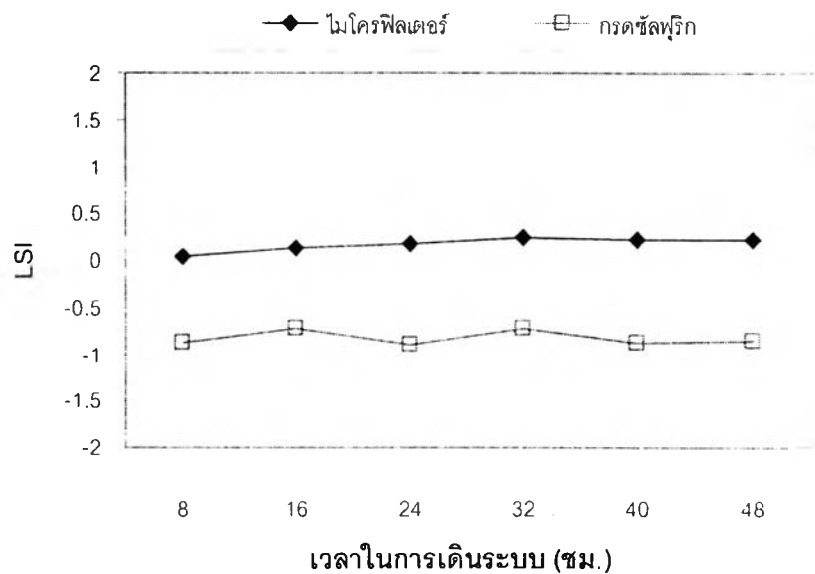
(ค)

รูปที่ 4.50 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ Pretreatment ในการเดินระบบแบบต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 3

4.2.4.9 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อค่าดัชนีแลงเกิลีย์ (Langier Saturation Index) ของน้ำเข้าชั้น

จากการทดลองพบว่าการใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment จะทำให้ค่าดัชนีแลงเกิลีย์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.17 แสดงว่าระบบไมโครฟิลเตอร์นั้นไม่ได้มีผลในการลดลงของค่าดัชนีแลงเกิลีย์แต่อย่างใด ในขณะที่การใช้การเติมกรดเป็นระบบ Pretreatment ค่าดัชนีแลงเกิลีย์จะติดลบ และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ -0.83 ซึ่งการเติมกรดนั้น ช่วยลดค่าพีเอชของระบบ และส่งผลให้ค่าดัชนีแลงเกิลีย์มีค่าลดลง ซึ่งค่าติดลบนี้จะแสดงให้เห็นว่าระบบไม่มีแนวโน้มในการเกิด Fouling อันเนื่องมาจากการ

เกิดตะกอนของแคลเซียม แต่อย่างไรก็ตามค่าค่าดัชนีแลงเกลียร์จากการที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment ก็มีค่ามากกว่าศูนย์เพียงเล็กน้อยยังไม่ถึงหนึ่ง ซึ่งก็จะมีผลให้เกิดการตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตรุนแรงมากนัก และยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้ระบบเมมเบรน ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ในการเดินระบบแต่ละค่าที่มีต่อค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้นตลอดระยะเวลาการเดินระบบแสดงดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ของดัชนีแลงเกลียร์กับเวลาการเดินระบบที่ Pretreatment ต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 3

จากการทดลองพบว่าในการใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment นั้นช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำที่เข้าระบบดีกว่าการใช้ระบบการเติมกรด เว้นแต่ในด้านสภาพต่างซึ่งการเติมกรดจะช่วยกำจัดได้ดีกว่า แต่จากประสิทธิภาพโดยรวมก็ยิ่งถือว่าสูงมากคืออยู่ที่สูงกว่าร้อยละ 80 – 100 และประสิทธิภาพของการใช้ระบบ Pretreatment ทั้ง 2 ประเภท ก็มีค่าใกล้เคียงกัน

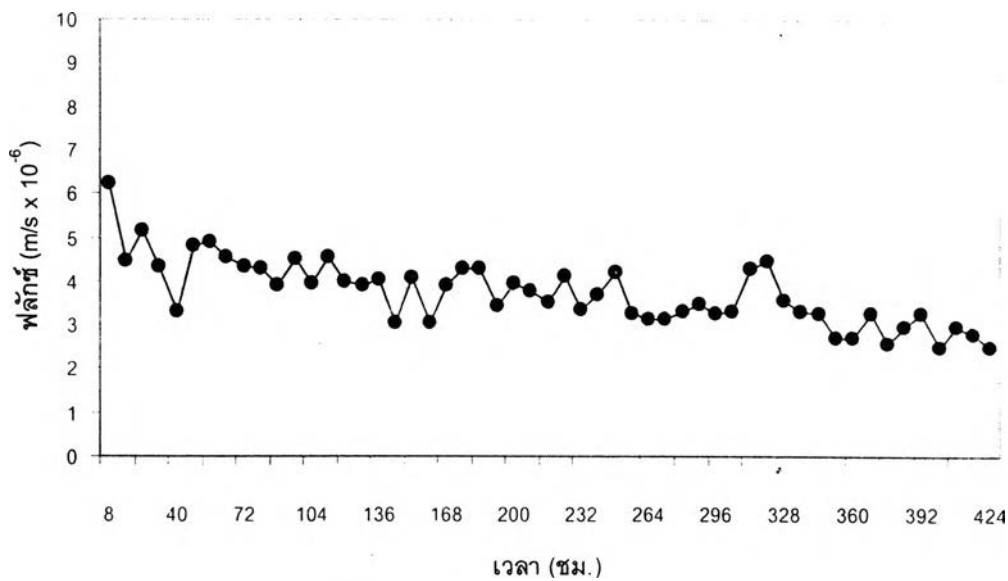
4.3 ผลการทดลองของการทดลองด้วยชุด Pilot Scale ณ โรงงานตัวอย่าง

หลังจากทำการทดลองในห้องปฏิบัติการแล้ว จึงได้เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเดินระบบ โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ค่าฟลักซ์ และคุณภาพน้ำสะอาดที่ได้ ซึ่งจากผลการทดลองได้พบว่าค่าความดันในการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดคือค่าที่ 6 บาร์ ค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ค่าที่ 0.5 เมตรต่อวินาที ค่า % Recovery ที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ค่าที่ร้อยละ 40 และระบบ Pretreatment ที่เหมาะสมที่สุดคือการเพิ่มชุดไมโครฟิลเตอร์กับน้ำดิบก่อนเข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบค่อนข้างคงที่โดยเฉพาะในด้านของประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ ซึ่งในส่วนของสีกำจัดได้ทั้งหมด ตลอดจนการทดลองรวมทั้งสารอื่น ๆ ก็มีประสิทธิภาพสูง และไม่ลดลงมากนักตลอดการทดลอง ส่วนในด้านของฟลักซ์ของน้ำสะอาดก็มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองเช่นกัน ซึ่งพบว่าหลังจากประมาณ 360 ชั่วโมง ค่าฟลักซ์จะลดลงเล็กน้อยแต่ก็ไม่มากนักและไม่มีความสำคัญต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาดของระบบ

4.3.1 อัตราการผลิตน้ำสะอาด

จากการทดลองพบว่าฟลักซ์จะลดลงเล็กน้อยในช่วงแรก ๆ ของการเดินระบบ โดยช่วงประมาณ 40 ชั่วโมงแรกนั้นค่าฟลักซ์จะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเนื่องมาจาก อาจจะมีฟองอากาศอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของระบบ หลังจากชั่วโมงที่ 40 ไปแล้วจึงค่อนข้างจะคงที่เนื่องจากอากาศหรือสิ่งต่าง ๆ ที่อาจจะอุดตันอยู่ในระบบถูกไล่ออกไปจนหมดแล้ว และจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเดินระบบผ่านไปประมาณ 360 ชั่วโมงหรือประมาณ 15 วัน โดยจะมีการล้างเมมเบรนด้วยกรดซิตริก และ EDTA อย่างละประมาณ 2 ชั่วโมงที่ชั่วโมงที่ 360 เนื่องจากฟลักซ์ลดลงไปมากพอสมควร และหลังจากล้างเมมเบรนแล้วก็พบว่าเมื่อเดินระบบต่อค่าฟลักซ์ ก็สูงกลับมาเล็กน้อยแล้วก็ลดลงไปอีก จึงเป็นไปได้ว่าบนผิวเมมเบรนนั้นน่าจะเกิด Fouling แล้ว ซึ่งไม่สามารถจะแก้ไขให้ค่าฟลักซ์กลับมาดังเดิมได้ โดยที่ Fouling น่าจะเกิดจากการอุดตันของอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กมากกว่า จากการเกิดตะกอนของแคลเซียมหรือความกระด้าง เพราะในน้ำดิบมีความขุ่นค่อนข้างสูง ถึงแม้จะผ่านชุดไมโครฟิลเตอร์แล้วก็ตาม ในขณะที่แคลเซียมและความกระด้างในน้ำดิบมีค่าค่อนข้างน้อย ทำให้น่าจะเป็นสาเหตุรองจากการอุดตันเนื่องจากสารแขวนลอย ในการทำให้เกิด Fouling บนเมมเบรน รูปที่ 4.44 แสดงถึงค่าฟลักซ์ของระบบกับระยะเวลาในการเดินระบบ



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน

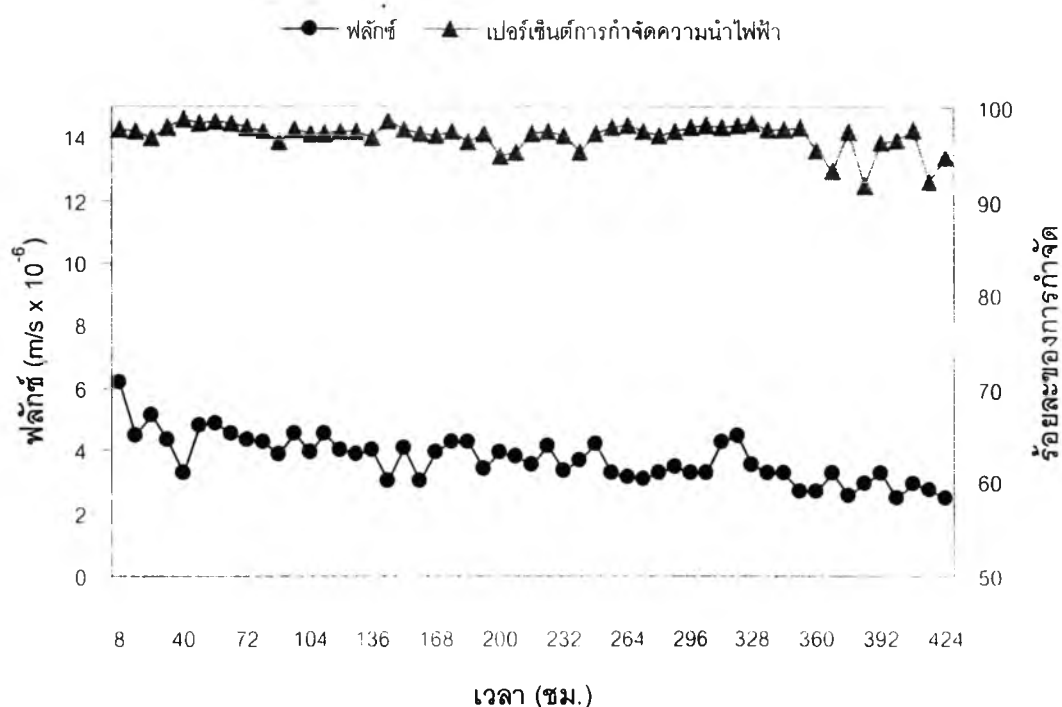
4.3.2 ผลของค่าพีเอช

จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จะมีค่าต่ำกว่าพีเอชของน้ำดิบที่เข้าระบบ ในขณะที่พีเอชของน้ำเข้มข้นค่าจะใกล้เคียงกับน้ำที่เข้าระบบ แต่มีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อย โดยที่พีเอชของน้ำที่เข้าระบบอยู่ที่ระหว่าง 7 – 7.8 พีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าอยู่ระหว่าง 5.5 – 6.5 และพีเอชของน้ำเข้มข้นที่ออกจากระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 6.3 – 7.8 รูปที่ 4.56 (ก) แสดงค่าพีเอชในน้ำส่วนต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาเดินระบบของระบบของการทดลองที่โรงงาน

4.3.3 ผลของค่าความความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ อยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 – 99 แต่จะเริ่มลดลงเมื่อเดินระบบไปประมาณ 360 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายก็เป็นไปในทำนองเดียวกันคือ ประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 80 – 100 ซึ่งช่วงแรกของการทดลองก็จะมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเดินระบบไปได้ประมาณ 300 ชั่วโมงจะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดเริ่มลดลงซึ่งมีความเป็นไปได้ว่ามีสาเหตุมาจากการที่เริ่มจะเกิด Fouling บนผิวหน้าเมมเบรนแล้ว ทำให้ฟลักซ์ลดลงและความเข้มข้นของตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้น

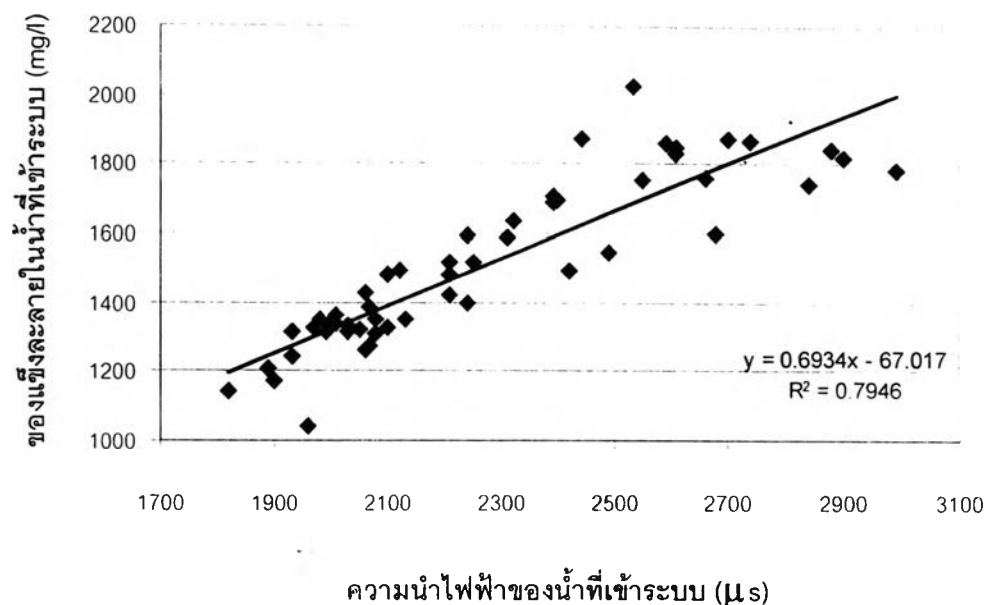
ทำให้อัตราการซึมผ่านของตัวถูกละลายสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงหลังเริ่มลดลง ความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้า ตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.53 และรูปที่ 4.56 (ข) และ 4.56 (ค) แสดงค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำส่วนต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาเดินระบบของระบบของการทดลองที่โรงงานตามลำดับ



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า ตลอดระยะเวลาการทดลอง ของชุดการทดลองที่โรงงาน

จากการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายได้ เนื่องจากความนำไฟฟ้านั้นวัดได้จากปริมาณของสารละลายในน้ำ และความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายแสดงได้ดังสมการที่ 4.26 จากสมการนี้เมื่อวัดค่าของความนำไฟฟ้า จะสามารถคำนวณหาของแข็งละลายได้ซึ่งจะมีประโยชน์ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบเบื้องต้นได้ และความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายแสดงดังรูปที่ 4.54

$$TDS_t = 0.6934 \cdot \text{Conductivity}_t - 67.017 \quad (4.26)$$



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของชุดการทดลองที่โรงงาน

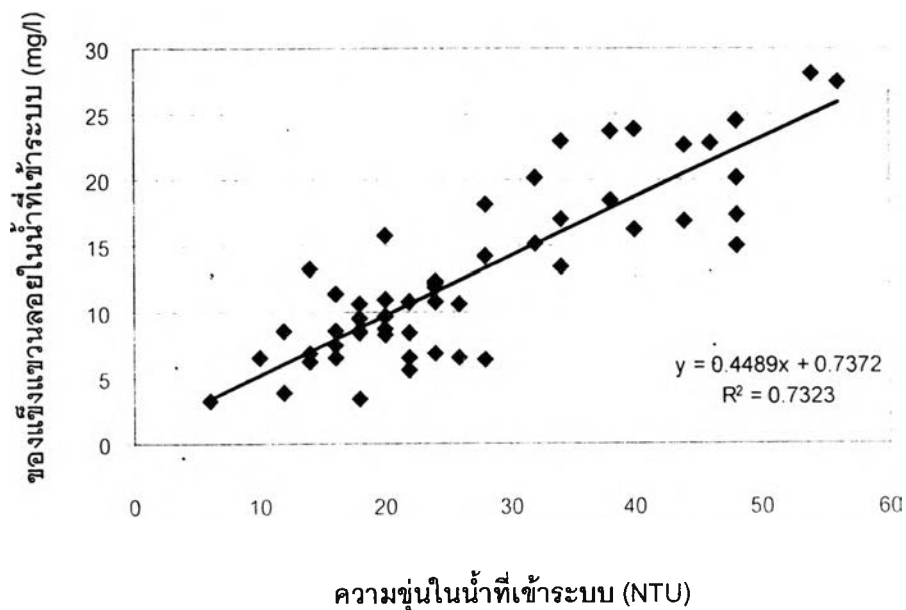
4.3.4 ผลของค่าความขุ่น

ตลอดเวลาการทดลองพบว่าระบบสามารถกำจัดความขุ่นได้สูงมาก คือร้อยละ 98 - 100 ซึ่งทั้งนี้เพราะว่าความขุ่นเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับรูพรุนของเมมเบรนจึงทำให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ อีกทั้งการที่มีชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment ทำให้ความขุ่นส่วนใหญ่จะถูกกำจัดไปแล้วโดยไส้กรองไมโครฟิลเตอร์ขนาด 0.3 ไมครอน จึงทำให้เหลืออนุภาคที่มีขนาดเล็กมากเท่านั้นหลุดผ่านเข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชัน จึงทำให้ระบบนาโนฟิลเตรชันไม่ต้องรับภาระมากนัก ดูจากน้ำเข้มข้นที่ออกจากระบบ จะมีความขุ่นค่อนข้างต่ำ คืออยู่ที่ระหว่าง 0.4 - 5.5 NTU ในขณะที่ความขุ่นในน้ำดิบที่เข้าระบบนั้นมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 7.4 - 16.3 โดยที่กลไกหลักในการกำจัดความขุ่นนั้นจะเป็นกลไกของการกรองติดผิว ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.5 ซึ่งอนุภาคที่หลุดผ่านระบบไมโครฟิลเตรชันนี้เองจะถูกกรองติดอยู่บนผิวหน้าเมมเบรนและเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของ Fouling และพบว่าในระหว่างการทดลองไส้กรองไมโครฟิลเตอร์จะตันค่อนข้างเร็ว คือในหนึ่งชุดจะสามารถใช้ได้ประมาณ 4 - 5 วันเท่านั้น หลังจากนั้นความดันลดจะค่อนข้างมาก คือประมาณ 1 บาร์ และต้องทำการเปลี่ยนชุดใหม่

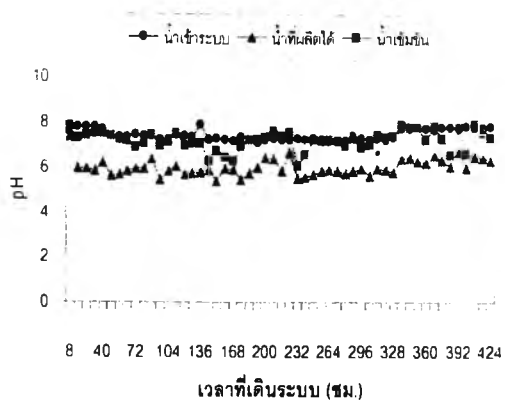
ความขุ่นนั้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารแขวนลอย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อปัญหาการเกิด Fouling ของเมมเบรนได้มาก ดังนั้นถ้าเราสามารถประมาณปริมาณสาร

แขวนลอยในน้ำดิบได้จะช่วยประเมินถึงประสิทธิภาพของระบบได้ด้วย จากงานวิจัยสามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณสารแขวนลอยกับความขุ่นได้ดังรูปที่ 4.55 และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นและของแข็งแขวนลอยแสดงดังสมการที่ 4.27 ซึ่งจากสมการที่ 4.27 นี้ก็จะสามารถประมาณค่าของแข็งแขวนลอยได้เมื่อทราบค่าของความขุ่นในหน่วย NTU และรูปที่ 4.56 (ง) แสดงค่าความขุ่นในน้ำส่วนต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาเดินระบบของระบบของการทดลองที่โรงงาน

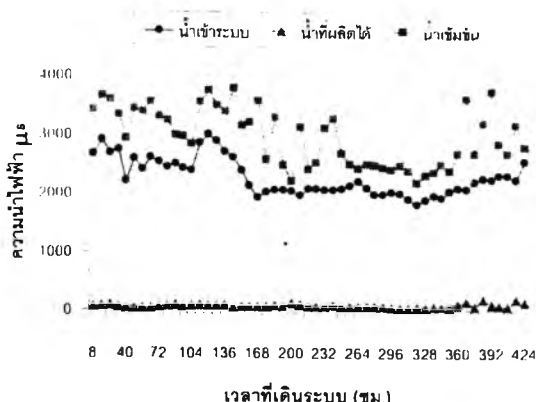
$$TSS_t = 0.4489 \cdot NTU_t + 0.7372 \quad (4.27)$$



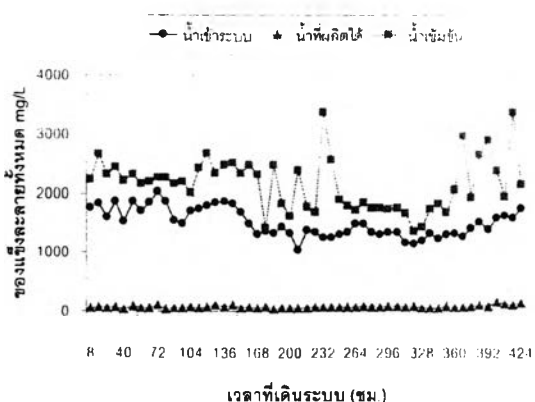
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ของความขุ่นและของแข็งแขวนลอยในน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน



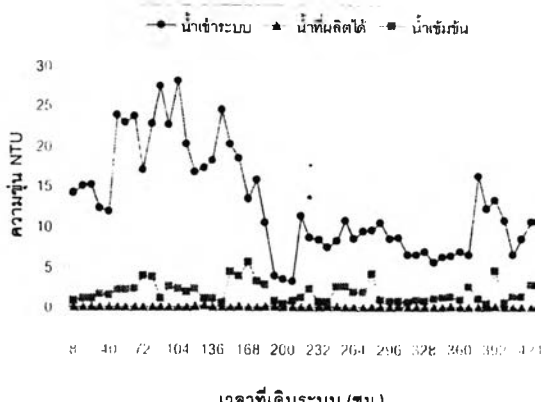
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ของพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและ ความขุ่นในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน

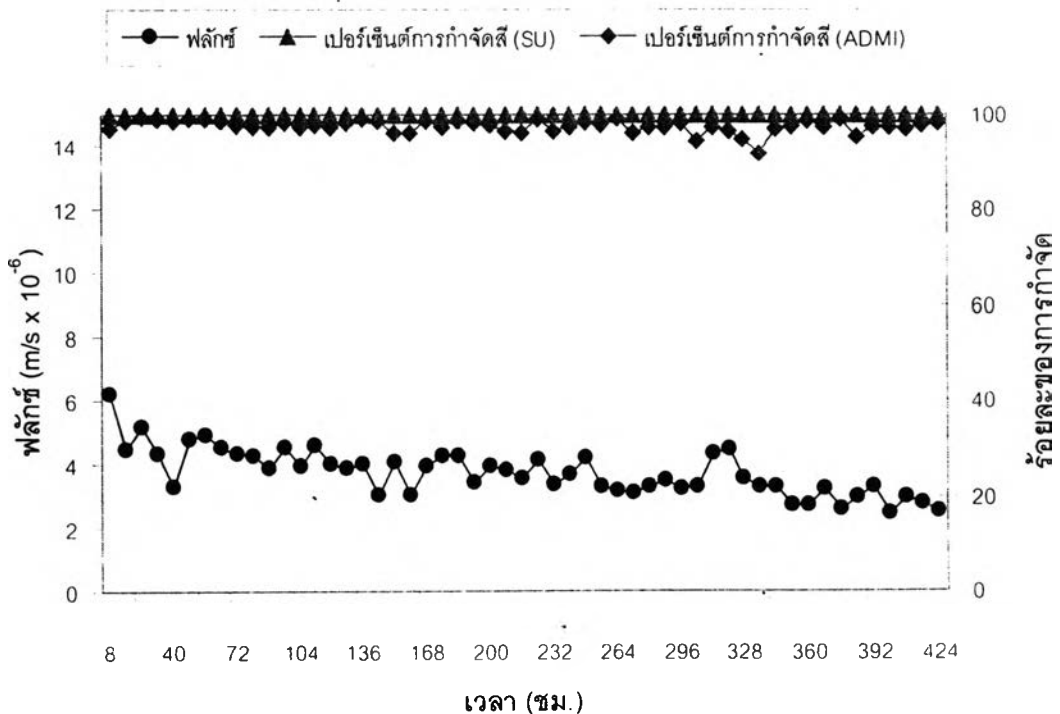
4.3.5 ผลของค่าสีในหน่วย SU และ ADMI

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีก็มีผลไปทำนองเดียวกับความขุ่น คือมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากตลอดการทดลองคือสามารถกำจัดสีได้ทั้งหมดตลอดการทดลองในหน่วย SU และร้อยละ 96 – 100 ในหน่วย ADMI ด้วยเหตุผลในการทำนองเดียวกับกับการกำจัดความขุ่นคือโมเลกุลของสีนั้นมีขนาดใหญ่กว่ามากเมื่อเทียบกับรูพรุนของเมมเบรนแม้จะเป็นสารละลายก็ตาม ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดจึงสูงมาก ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.5 แต่การที่ใช้ชุดไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบ Pretreatment นั้นไม่ได้ช่วยกำจัดสีได้มากนักทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้มข้นที่ออกจากระบบยังมีสีที่สูงกว่าน้ำที่เข้าระบบ โดยที่สีของน้ำดิบที่เข้าระบบมีค่าระหว่าง 6.6 – 29.1 ในหน่วย SU และ 89.9 – 509.9 ใน

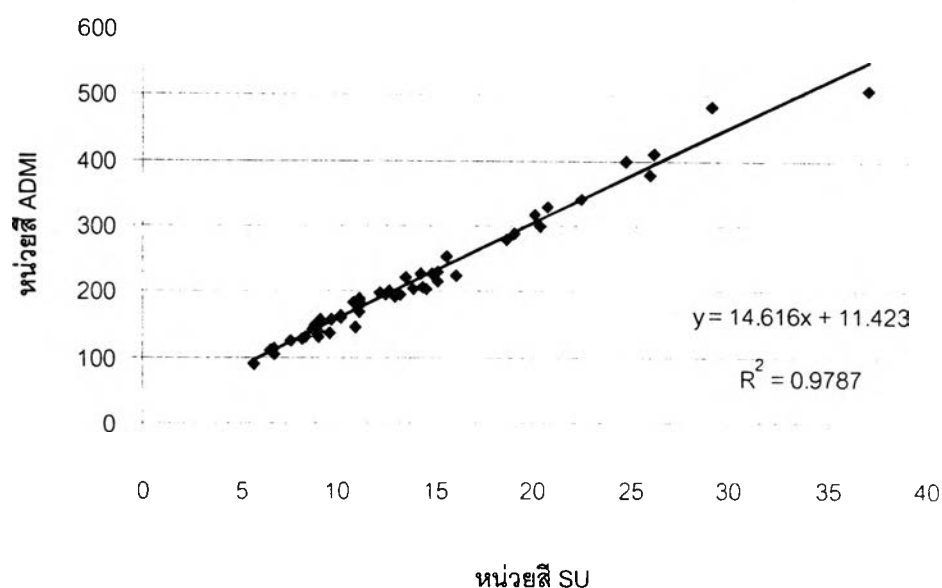
หน่วย ADMI ในขณะที่สีของน้ำเข้มข้นมีค่าระหว่าง 8.7 – 44.9 ในหน่วย SU และ 145 – 566 แสดงว่าสีส่วนใหญ่ยังสามารถผ่านไส้กรองไมโครฟิลเตอร์ขนาด 0.3 ไมครอนมาได้มาก และไส้กรองไมโครฟิลเตอร์นั้นมีประสิทธิภาพมากในการกำจัดความขุ่นที่เป็นอนุภาคแขวนลอย แต่อย่างไรก็ตามตัวนาโนฟิลเตรชันเองก็มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ทั้งหมดจากการทดลอง แต่ด้วยเหตุนี้เองโมเลกุลของสีที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ก็อาจจะถูกกักติดอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิด Fouling บนผิวหน้าเมมเบรน สำหรับค่าความสัมพันธ์ของฟลักซ์ของน้ำสะอาด และประสิทธิภาพการกำจัดสีในหน่วย SU และ ADMI ตลอดระยะเวลาการเดินระบบแสดงดังรูปที่ 4.57 โดยที่ค่าสีในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตลอดระยะเวลาการทดลองที่โรงงานในหน่วย SU และ ADMI แสดงดังรูปที่ 4.60 (ก) และ 4.60 (ข) ตามลำดับ

จากการทดลองจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วย SU และ ADMI ในน้ำที่เข้าระบบได้ ดังรูปที่ 4.58 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.28 โดยที่สมการนี้สามารถใช้หาค่าสีในหน่วย ADMI ได้เมื่อทราบค่าสีในหน่วย SU แล้ว

$$\text{สี (ADMI)} = 14.616 \cdot \text{สี (SU)} + 11.423 \quad (4.28)$$



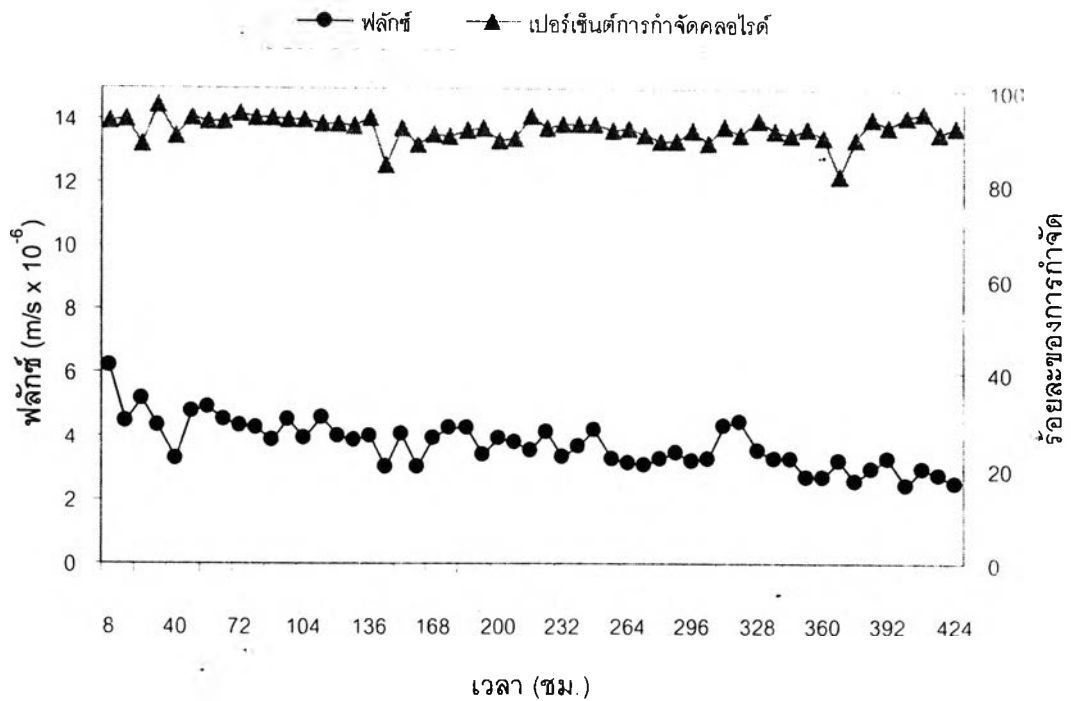
รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละของการกำจัดสี ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์สีในหน่วย SU และ ADMI ของน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.3.6 ผลของค่าคลอไรด์

ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ของระบบตลอดระยะเวลาการทดลอง อยู่ที่ประมาณร้อยละ 82 – 97 และมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งกลไกที่สำคัญในการกำจัดจะเป็นกลไกทางไฟฟ้า เนื่องจากผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งมีประจุลบนั้นผลักกับประจุลบของคลอไรด์ แต่เมื่อความเข้มข้นของไอออนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้น อัตราการซึมผ่านของตัวถูกละลายก็จะสูงขึ้น จนทำให้โอกาสที่ไอออนหลุดผ่านเมมเบรนสูงขึ้นด้วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.6 โดยที่ค่าคลอไรด์ในน้ำดิบที่เข้าระบบ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 101 – 282 mg/l Cl ในน้ำสะอาดที่ผลิตได้จะมีค่าระหว่าง 10 – 17.5 mg/l Cl และค่าคลอไรด์ในน้ำเข้มข้นที่ออกจากระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 112 – 300 mg/l Cl สำหรับค่าความสัมพันธ์ของฟลักซ์ของน้ำสะอาด และประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ตลอดระยะเวลาการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.59 โดยที่คลอไรด์ในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตลอดระยะเวลาการทดลองที่โรงงาน แสดงดังรูปที่ 4.60 (ค)



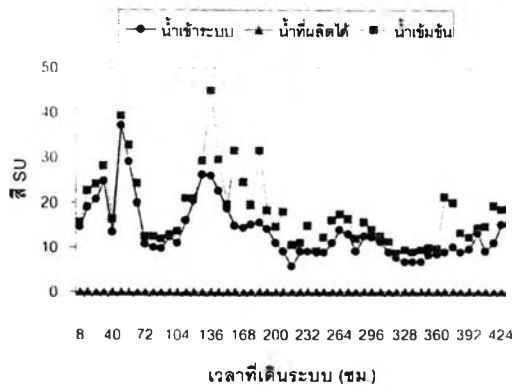
รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ฟลักซ์ของน้ำสะอาดและประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ ตลอดระยะเวลาการทดลอง ของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.3.7 ผลของค่าสภาพต่างทั้งหมด

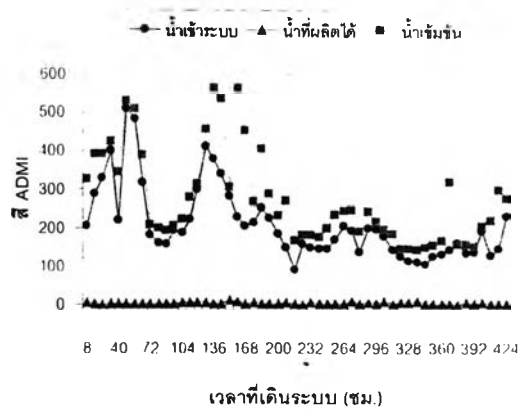
จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่างค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง และมีค่าประมาณร้อยละ 80 – 95 ทั้งนี้เนื่องจากสภาพต่างส่วนใหญ่ที่เป็นไบคาร์บอเนตนั้นมีประจุลบหนึ่ง ซึ่งสามารถกำจัดได้ด้วยแรงผลักระหว่างประจุลบบนผิวหน้าของเมมเบรน แต่มีแนวโน้มว่าช่วงท้ายการทดลองที่หลัง 360 ชั่วโมงไปแล้วว่าประสิทธิภาพจะลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจากเกิดการสะสมตัวของอิออนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้น จนกระทั่งบางส่วนสามารถผ่านผิวหน้าเมมเบรนไปได้ โดยที่สภาพต่างของน้ำดิบที่เข้าระบบจะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 127.5 – 615 mg/l CaCO₃ ซึ่งเป็นช่วงที่ค่อนข้างกว้าง ในช่วงหลัง ๆ ของการทดลองที่หลังประมาณชั่วโมงที่ 300 ไปค่าสภาพต่างค่อนข้างสูงขึ้นมาก ในขณะที่น้ำสะอาดที่ผลิตได้จะมีค่าระหว่าง 15 – 90 mg/l CaCO₃ และน้ำเข้มข้นจะมีค่าระหว่าง 227.5 – 725 mg/l CaCO₃ สภาพต่างของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.60 (ง) สำหรับค่าความสัมพันธ์ของฟลักซ์ของน้ำสะอาดและประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่างตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.61 (ก)

4.3.7 ผลของค่าความกระด้างทั้งหมดและแคลเซียม

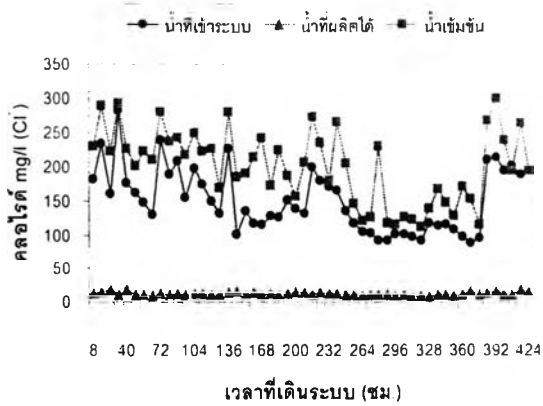
ผลการทดลองในการกำจัดแคลเซียมและความกระด้างพบว่าเป็นไปในทำนองเดียวกับการทดลองในห้องทดลอง คือสามารถกำจัดความกระด้างและแคลเซียมได้ทั้งหมด ซึ่งความกระด้างของน้ำดิบที่เข้าระบบจะมีค่าระหว่าง 10 – 125 mg/l CaCO_3 ในน้ำเข้มข้นจะมีค่าระหว่าง 20 – 130 mg/l CaCO_3 และมีค่าระหว่าง 0 – 4.5 mg/l CaCO_3 ในน้ำสะอาดที่ผลิตได้ สำหรับในด้านของแคลเซียมในน้ำดิบที่เข้าระบบจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 95 mg/l CaCO_3 ในน้ำเข้มข้นจะมีค่าระหว่าง 15 – 155 mg/l CaCO_3 และมีค่าระหว่าง 0 – 6.5 mg/l CaCO_3 ในน้ำสะอาดที่ผลิตได้ จากการทดลองแสดงว่าระบบนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและแคลเซียมได้สูงมากตลอดการทดลอง ความกระด้างและแคลเซียมของน้ำส่วนต่าง ๆ ในระบบตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.60 (จ) และ 4.60 (ข) ตามลำดับ สำหรับค่าความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดกับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและแคลเซียมตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.61 (ข) และ 4.61 (ค) ตามลำดับ



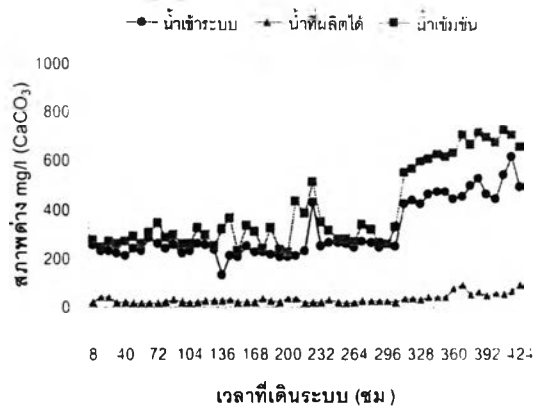
(ก)



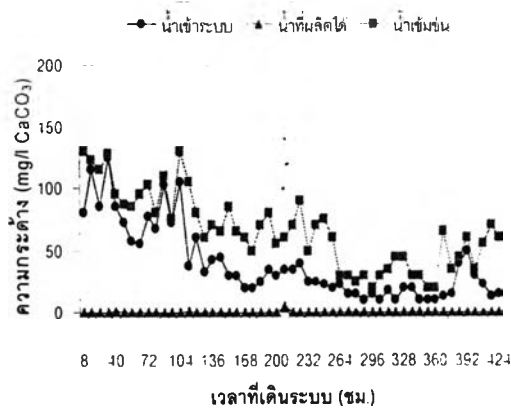
(ข)



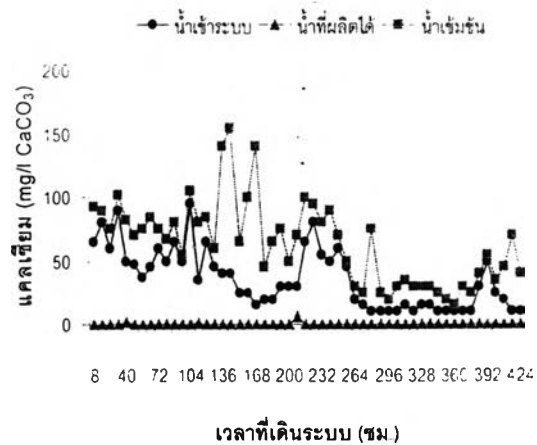
(ค)



(ง)

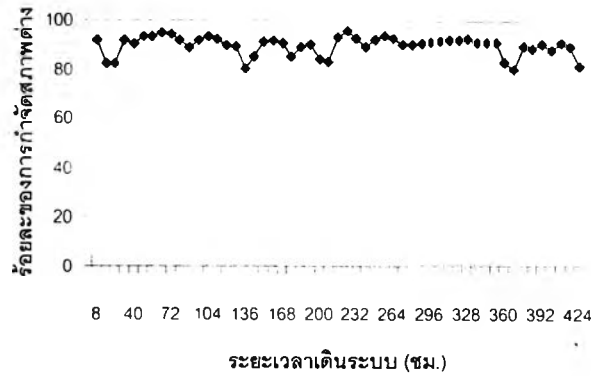


(จ)

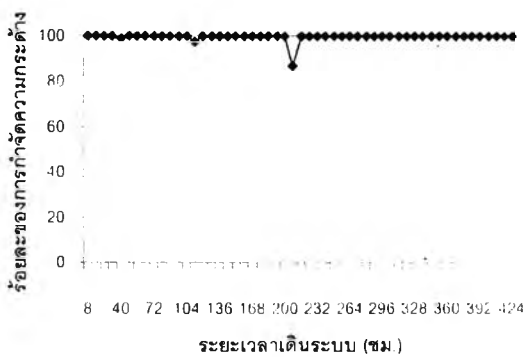


(ฉ)

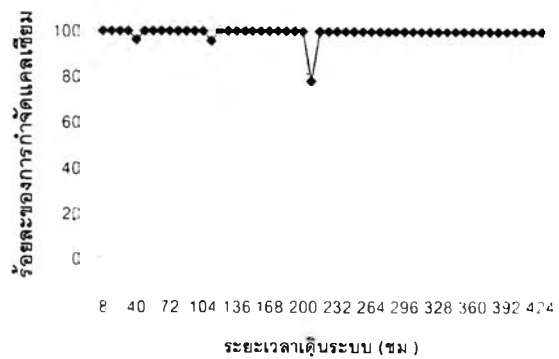
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ของค่า สภาพต่าง คลอไรด์ ความกระด้าง และแคลเซียมในน้ำส่วน
ต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน



(ก)



(ข)

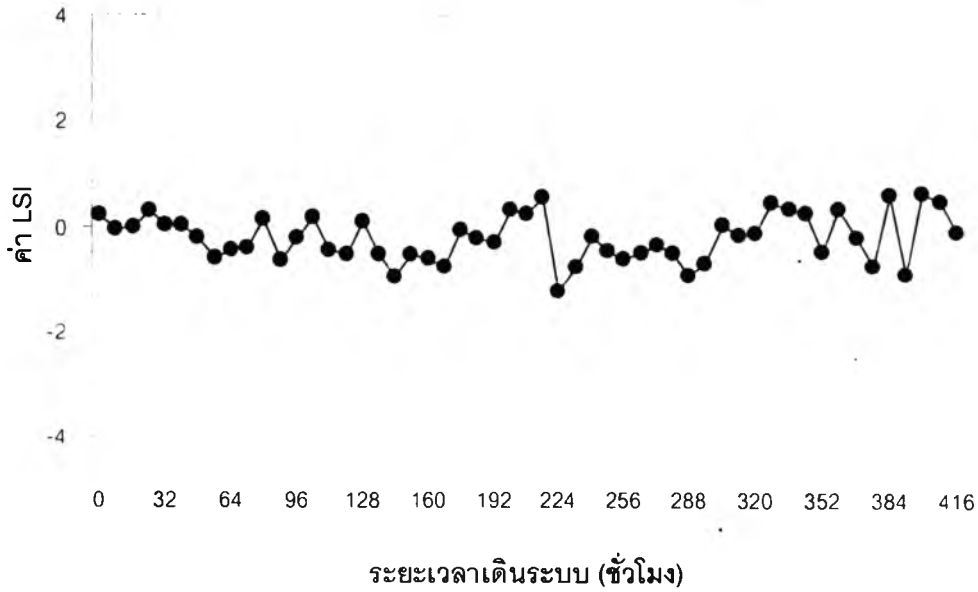


(ค)

รูปที่ 4.61 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และคลอรีน ตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน ของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.3.9 ผลของค่าดัชนีแลงเกิลีย์ (Langier Saturation Index)

จากการทดลองพบว่าค่าดัชนีแลงเกิลีย์ตลอดการทดลองจะมีค่าไม่คงที่ และเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาแต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงก็ไม่สูงมากนัก ซึ่งค่าจะอยู่ระหว่าง -1.2 ถึง 0.5 และค่าส่วนใหญ่จะอยู่ในค่าลบ โดยค่าดัชนีแลงเกิลีย์เฉลี่ยอยู่ที่ -0.2 ซึ่งหมายความว่าระบบนั้นจะมีแนวโน้มในการเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมมากนั้น ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบที่ลดลงเล็กน้อยในช่วงทำการทดลองนั้นน่าจะเกิดมาจากสาเหตุของ Fouling เนื่องจากอนุภาคต่าง ๆ บนผิวหน้าเมมเบรนโดยตรงมากกว่าจะเกิดจากการเกิดตะกอนของแคลเซียม สำหรับความสัมพันธ์ของค่าดัชนีแลงเกิลีย์ ในน้ำส่วนต่าง ๆ จากการทดลองกับระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.62



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีแลงเกิลีย์รของน้ำเข้มข้นและเวลาในการเดินระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.3.10 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบ

จากสมการของแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ตามสมการที่ 4.3 ซึ่งสามารถใช้อธิบายกับค่าความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ความกระด้าง แคลเซียม สภาพต่าง และคลอไรด์ได้ ซึ่งสามารถดัดแปลงสมการที่ 2.15 ดังแสดงได้ในสมการที่ 4.28 คือ

$$C_p = Z \cdot C_f \quad (4.29)$$

$$\text{โดยที่} \quad Z = \frac{K_s}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (4.30)$$

$$\text{และ} \quad F_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) \quad (4.31)$$

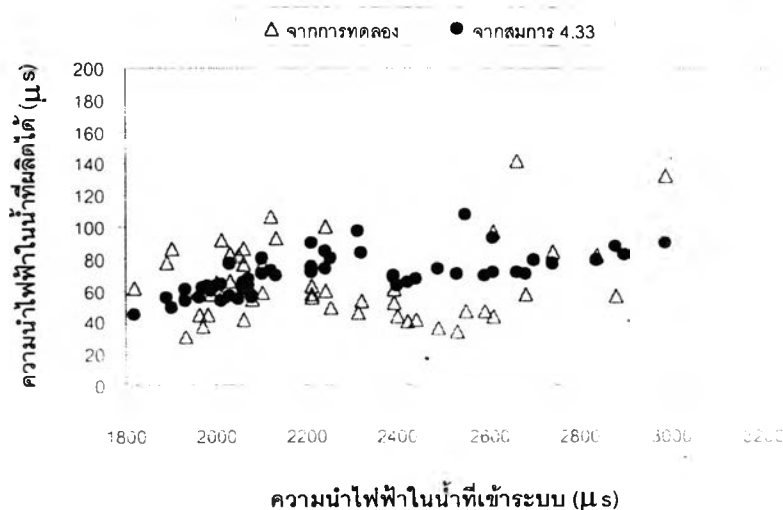
$$\text{หรือ} \quad Z = \frac{K_s}{F_w \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (4.32)$$

จากสมการที่ 4.30 เมื่อทราบค่า F_w , R , และ Z ก็จะสามารถหาค่า K_s ได้ (ดูภาคผนวกที่ ค4) และสามารถหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.2

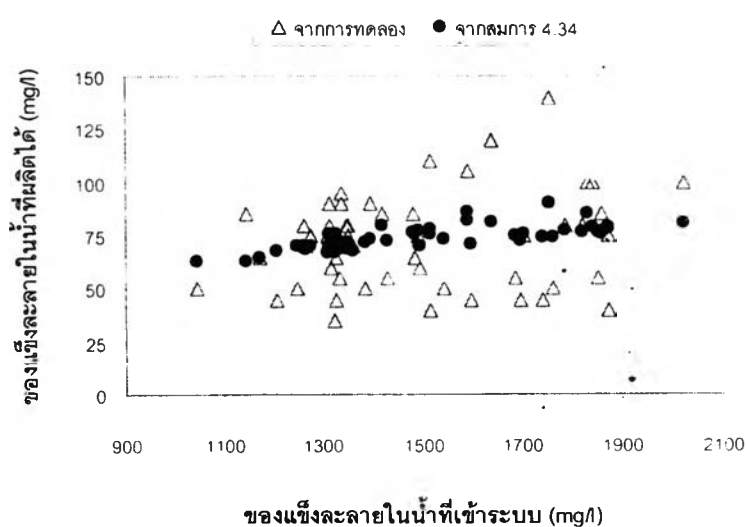
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของสารแต่ละชนิดในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชัน

| ชนิดของสารละลาย | แบบจำลองการละลาย – การแพร่ |
|-----------------|---|
| ความนำไฟฟ้า | $\text{Conductivity}_p = \frac{1.71 \times 10^{-7} \cdot \text{Conductivity}_f}{F_w \left[\frac{(2-2R)}{(2-R)} \right] + 1.71 \times 10^{-3}} - 16.067 \quad (4.33)$ |
| ของแข็งละลาย | $\text{TDS}_p = \frac{6.03 \times 10^{-8} \cdot \text{TDS}_f}{F_w \left[\frac{(2-2R)}{(2-R)} \right] + 2.75 \times 10^{-3}} + 41.483 \quad (4.34)$ |
| ความกระด้าง | $\text{TH}_p = \frac{1.38 \times 10^{-9} \cdot \text{TH}_f}{F_w \left[\frac{(2-2R)}{(2-R)} \right] + 0.147} + 0.1029 \quad (4.35)$ |
| แคลเซียม | $\text{Ca}_p = \frac{8.28 \times 10^{-10} \cdot \text{Ca}_f}{F_w \left[\frac{(2-2R)}{(2-R)} \right] + 0.161} + 0.2011 \quad (4.36)$ |
| สภาพด่าง | $\text{TA}_p = \frac{3.38 \times 10^{-7} \cdot \text{TA}_f}{F_w \left[\frac{(2-2R)}{(2-R)} \right] + 1.57 \times 10^{-2}} - 2.7759 \quad (4.37)$ |
| คลอไรด์ | $\text{Cl}_p = \frac{5.86 \times 10^{-8} \cdot \text{Cl}_f}{F_w \left[\frac{(2-2R)}{(2-R)} \right] + 2.91 \times 10^{-2}} + 8.719 \quad (4.38)$ |

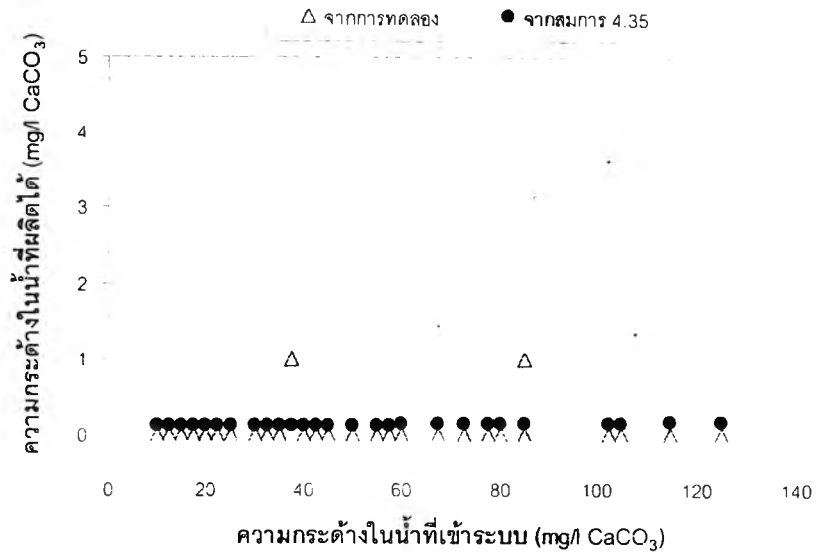
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทราบค่าความเข้มข้นของสารละลายในส่วนของน้ำที่เข้าระบบก็จะสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายในส่วนของน้ำที่ผลิตได้ ในด้านของความขุ่นและสีนั้นจะอาศัยกลไกในการกรองติดผิวเป็นหลักในการกำจัด เนื่องจากอนุภาคของความขุ่นและสีจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนอยู่แล้ว ดังนั้นสมการของการละลาย-การแพร่จึงไม่สามารถใช้อธิบายได้ชัดเจนนัก และรูปที่ 4.63 – 4.68 จะแสดงถึงค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการในตารางที่ 4.2 สำหรับการประเมินปริมาณความสัมพันธ์ของสารละลายแต่ละชนิดในน้ำสะอาดที่ผลิตได้ กับปริมาณของสารละลายต่าง ๆ ในน้ำที่เข้าระบบ



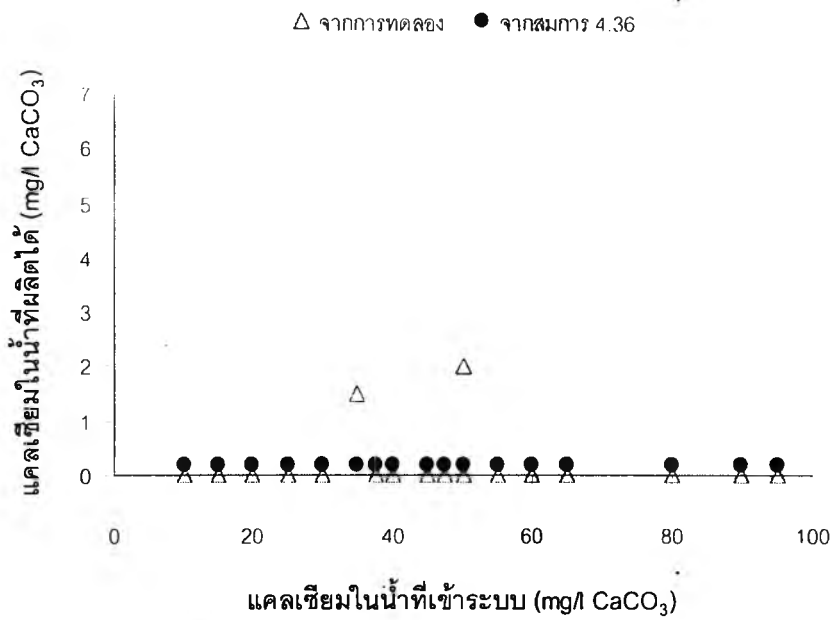
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ความนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน



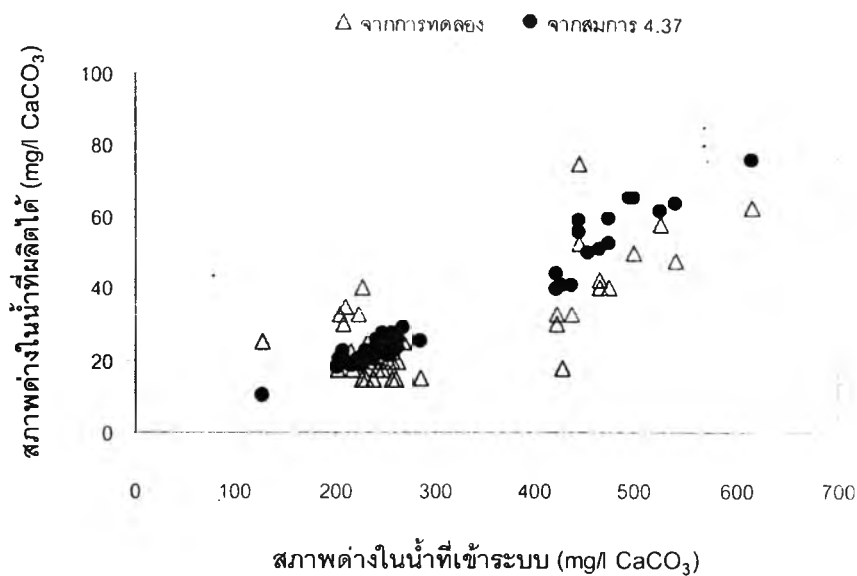
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ของแข็งละลายในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน



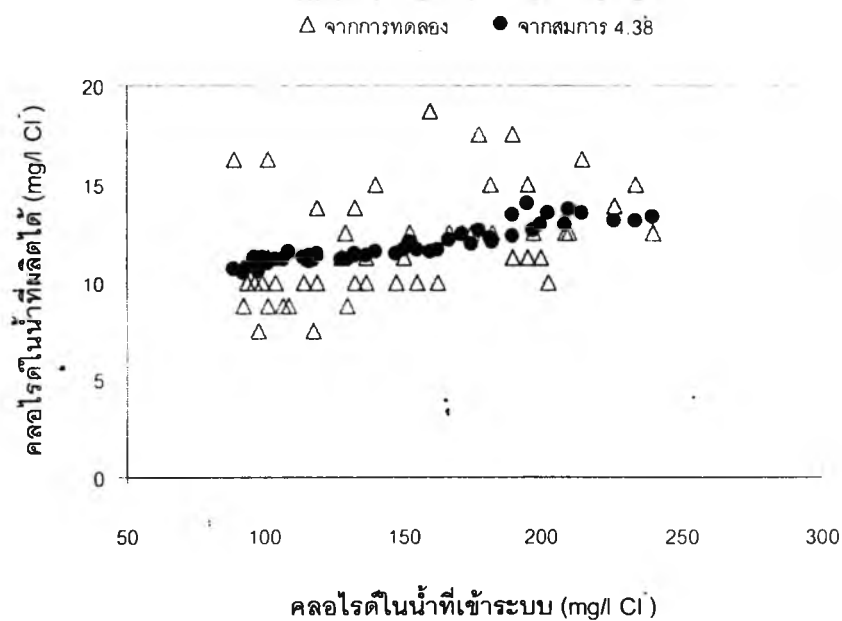
รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน



รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์แคลเซียมในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน

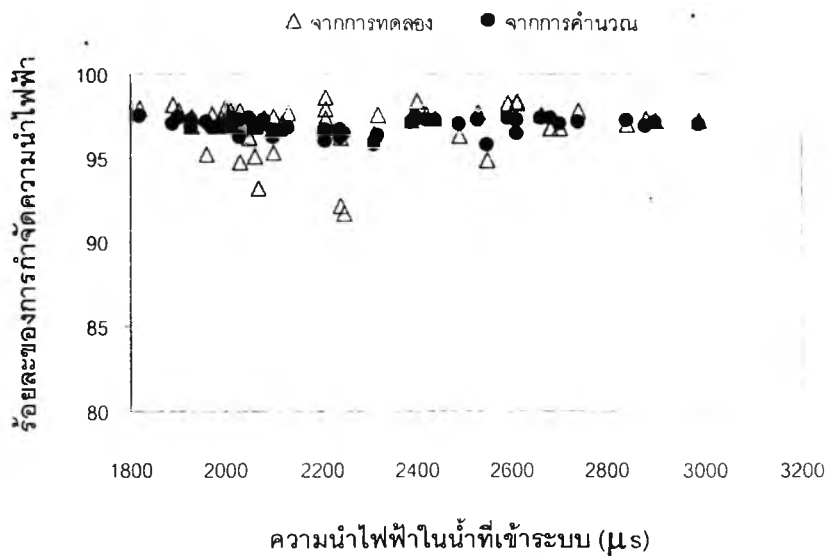


รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์สภาพต่างในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน

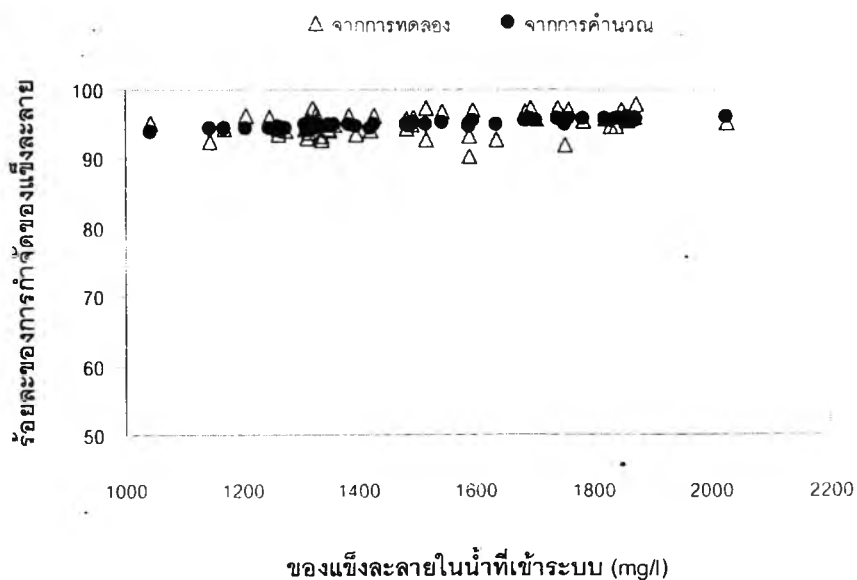


รูปที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์คลอไรด์ในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน

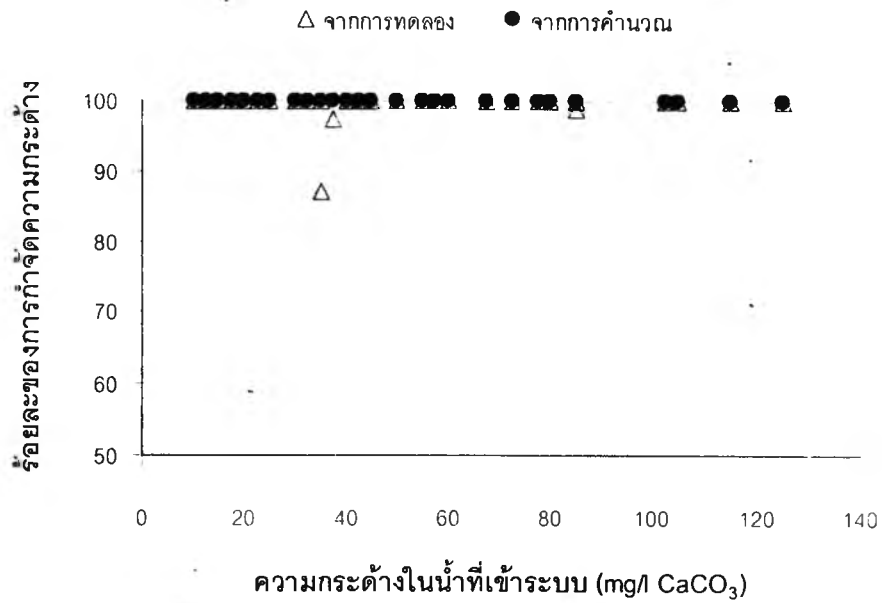
จากตารางที่ 4.2 สมการที่ 4.33 - 4.38 เมื่อคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายในน้ำที่ผลิตได้ก็จะสามารถหาประสิทธิภาพการกำจัดในรูปของร้อยละของการกำจัดได้ ดังนั้นเมื่อทราบความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าระบบ ก็จะสามารถประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายแต่ละชนิดได้เช่นกัน ซึ่งรูปที่ 4.69 - 4.74 จะแสดงการเปรียบเทียบการหาร้อยละของการกำจัดที่ได้จากการทดลองและจากสมการที่ 4.33 - 4.38



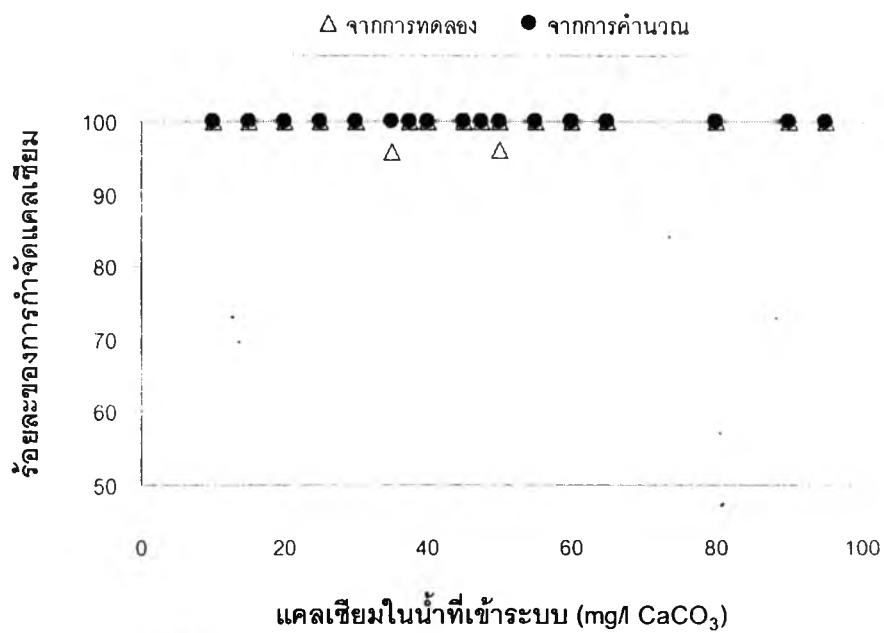
รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน



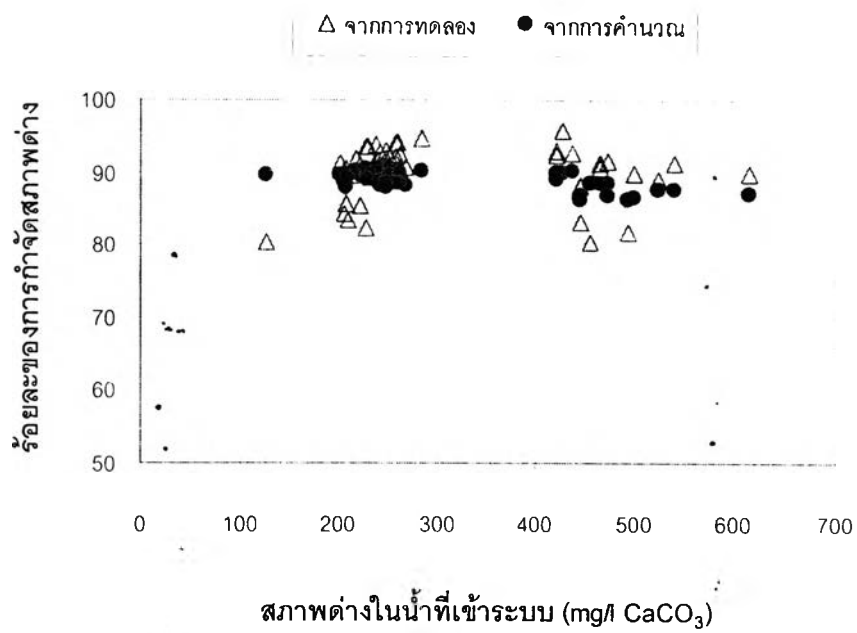
รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายและของแข็งละลายในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน



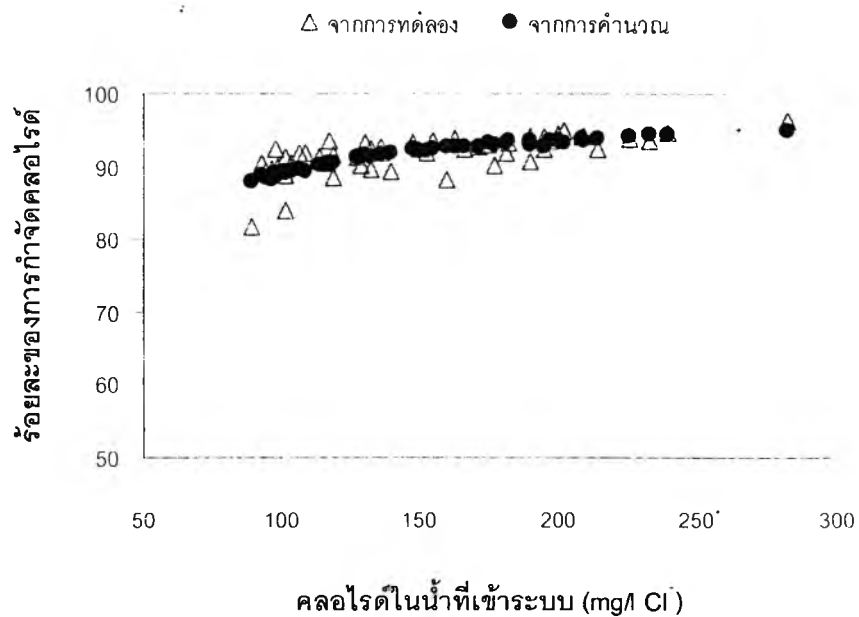
รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดความกระด้างและความกระด้างในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน



รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดแคลเซียมและแคลเซียมในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน



รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดสภาพต่างและสภาพต่างในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน



รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดคลอรีนและความนำไฟฟ้าในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.4 การวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่ายและการลงทุนในการดำเนินระบบ

สำหรับการวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่ายและการลงทุนในงานวิจัยนี้จะพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ เช่นพื้นที่ ปริมาณน้ำดิบ จากโรงงานตัวอย่างเป็นหลักในการคำนวณ โดยระบบนาโนฟิลเตรชันนี้จะรับน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นที่สองมาแล้วเข้าสู่ระบบโดยตรง ในการคำนวณค่าใช้จ่ายจะแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในส่วนของการลงทุน ค่าใช้จ่ายในส่วนดำเนินการ และค่าใช้จ่ายในส่วนของการบำรุงรักษา

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยระบบนาโนฟิลเตรชันมีสมมติฐานดังนี้ ระบบสามารถรองรับน้ำทิ้งจากโรงงานซึ่งผ่านการบำบัดขั้นที่สองมาแล้ว โดยมีอัตราการบำบัดน้ำทิ้งได้ $3,500 \text{ m}^3/\text{d}$

การดำเนินการของระบบ จะทำงาน 300 วันต่อปี และทำงานวันละ 24 ชั่วโมง

อายุการทำงานของระบบเท่ากับ 15 ปี

อายุการทำงานของเมมเบรนเท่ากับ 3 ปี

ผลิตน้ำได้ปีละ $704,160 \text{ m}^3$

4.4.1 เงินลงทุนเริ่มต้น

เงินลงทุนต่อหน่วยของระบบนาโนฟิลเตรชันจะขึ้นอยู่กับ ทำเลที่ตั้ง การปรับปรุงสถานที่ ขนาดของกำลังการผลิต การปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้น (Degree of Pretreatment) โดยรายละเอียดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของเงินลงทุนเบื้องต้นของระบบนาโนฟิลเตรชัน

| รายการ | จำนวนเงิน (บาท) |
|---|-------------------|
| การปรับปรุงพื้นที่ก่อสร้าง | 100,000 |
| อาคารและสำนักงาน | 750,000 |
| ระบบบำบัดขั้นต้น และระบบล้างเมมเบรน | 3,000,000 |
| โครงสร้างและอุปกรณ์ประกอบของระบบ และเมมเบรน | 13,200,000 |
| บ่อหรือถังสำหรับเก็บน้ำที่ผลิตได้ | 200,000 |
| รวม | 17,250,000 |

คิดรวมเป็นเงินลงทุนทั้งหมดสำหรับระบบที่ผลิตน้ำสะอาดได้ 821,450 ลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 17,250,000 บาท ให้โครงการมีอายุ 15 ปี และอัตราดอกเบี้ยเท่ากับร้อยละ 7.5 จะคิดเป็นเงิน ต้นทุนเริ่มต้นเท่ากับ 2.78 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (การคำนวณต้นทุนรายปีดูในภาคผนวก ง)

4.4.2 ต้นทุนด้านการดำเนินงาน

สำหรับในด้านของต้นทุนการดำเนินการจะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ค่าแรงงาน

ค่าใช้จ่ายเรื่องการเปลี่ยนเมมเบรน

ค่าใช้จ่ายในเรื่องการเปลี่ยนไส้กรองชุดไมโครฟิลเตรชัน

ค่าซ่อมบำรุงรักษา

4.4.2.1 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้นับว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในด้านของต้นทุนการดำเนินการของระบบนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งการใช้พลังงานจะใช้กับส่วนของปั๊มแรงดันสูงที่ใช้กับระบบนาโนฟิลเตรชัน และปั๊มแรงดันต่ำสำหรับสูบน้ำทิ้งจากระบบบำบัดเข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชัน นอกจากนี้ก็จะเป็นพลังงานในด้านอื่นได้แก่ค่าไฟฟ้าสำหรับให้ความสว่าง เป็นต้น รายละเอียดของพลังงานที่ใช้ในระบบนาโนฟิลเตรชันแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

| รายการ | KWh/m ³ | จำนวนเงิน (บาท) |
|------------------------|--------------------|-----------------|
| ปั๊มแรงดันสูง | 0.699 | 2.097 |
| ปั๊มแรงดันต่ำ | 0.343 | 1.029 |
| ปั๊มของชุดบำบัดขั้นต้น | 0.343 | 1.029 |
| ปั๊มสารเคมี | 0.31 | 0.93 |
| ปั๊มน้ำสะอาด | 0.23 | 0.69 |
| รวม | | 5.775 |

หมายเหตุ : คำนวณที่ค่าไฟฟ้า 3 บาทต่อหน่วย

4.4.2.2 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ในการทำงานของระบบนาโนฟิลเตรชันจะต้องมีการใช้สารเคมีต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยได้แก่ในส่วนของการล้างทำความสะอาดเมมเบรน การฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนเมมเบรน การเก็บรักษาเมมเบรน สำหรับชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้นั้นจะขึ้นกับคุณสมบัติของน้ำที่จะบำบัด ในด้านการใช้สารเคมีจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือการใช้แบบต่อเนื่องและแบบเป็นช่วงเวลา ตารางที่ 4.5 แสดงถึงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้กับระบบนาโนฟิลเตรชันและราคาต่อหน่วยการผลิต

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี

| รายการ | ราคา (บาท ต่อ กก.) | อัตราการใช้ | จำนวนเงิน (บาท ต่อ ลบ. ม.) |
|---------------------------|-----------------------|-------------|-------------------------------|
| สารเคมีที่ใช้ต่อเนื่อง | | | |
| โซเดียมเมตาโบซัลไฟท์ | 25 | 6 ppm | 0.22 |
| Antiscalant | 165 | 5 ppm | 1.23 |
| สารเคมีที่ใช้เป็นช่วงเวลา | | | |
| กรดซिटริก | 57 | 4 ครั้ง/ปี | 0.002 |
| EDTA | 110 | 4 ครั้ง/ปี | 0.003 |
| ดีเทอเจนท์ | 120 | 4 ครั้ง/ปี | 0.001 |
| ฟอร์มาลดีไฮด์ | 10 | 1 ครั้ง/ปี | 0.0005 |
| รวม | | | 1.4565 |

4.4.2.3 ค่าแรงงาน

ค่าแรงงานจะสัมพันธ์กับขนาดของระบบซึ่งถ้าเครื่องแยกอยู่โดดเดี่ยวอาจจะจำเป็นต้องมีคนเฝ้าอยู่ตลอดต่างหาก ในขณะที่เมื่อเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดทั้งหมด ก็อาจจะไม่ต้องมีการดูแลเป็นพิเศษ โดยอาศัยระบบอัตโนมัติควบคุม ในกรณีของโรงงานตัวอย่างจะได้จัดเข้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดทั้งหมด โดยให้มีเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการอยู่ตลอด 24 ชั่วโมงแบ่งเป็น 3 กะ และผู้ควบคุม 1 คน ช่างเครื่อง 1 คน รายละเอียดของค่าใช้จ่ายด้านแรงงานแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายในด้านค่าแรงงาน

| รายการ | จำนวน | บาทต่อปี | บาท ต่อ ลบ. ม. |
|---------------|-------|----------|----------------|
| ผู้ควบคุม | 1 | 120,000 | 0.34 |
| ผู้ปฏิบัติงาน | 3 | 216,000 | 0.62 |
| ช่างเครื่อง | 1 | 96,000 | 0.27 |
| รวม | | | 1.23 |

4.4.2.3 ค่าใช้จ่ายเรื่องการเปลี่ยนเมมเบรน

โดยทั่วไปเมมเบรนจะมีอายุใช้งานได้ถึง 3 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำที่เข้าระบบการใช้งานและการดูแลรักษาทำความสะอาดด้วย โดยที่อัตราการเปลี่ยนทดแทนอยู่ที่ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน คิดเป็นต้นทุนการเปลี่ยนทดแทนเมมเบรน 1.022 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

4.4.2.4 ค่าใช้จ่ายในเรื่องการเปลี่ยนไส้กรองไมโครฟิลเตอร์

สำหรับตัวไส้กรองไมโครฟิลเตอร์ชั้นนั้นอายุการใช้งานก็จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำที่เข้าระบบด้วยเช่นเดียวกับชุดนาโนฟิลเตอร์ชั้น รวมถึงการดูแลรักษาทำความสะอาดด้วยเช่นกัน โดยที่อัตราการเปลี่ยนทดแทนอยู่ที่ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน ซึ่งจะเป็นต้นทุนเท่ากับ 0.017 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

4.4.2.5 ค่าซ่อมบำรุงรักษา

ค่าซ่อมบำรุงรักษาจะขึ้นอยู่กับ อัตราการเปลี่ยนทดแทนจริง หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเงินลงทุน ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา

| รายการ | จำนวน | จำนวนเงิน (บาท ต่อ ลบ. ม.) |
|----------------------|--------------------|-------------------------------|
| Cartridge Filter | เปลี่ยน 2 ครั้ง/ปี | 0.142 |
| ปั๊มและมอเตอร์ | 6% ของต้นทุน | 0.167 |
| การควบคุมและการใช้ไฟ | 5% ของต้นทุน | 0.139 |
| อาคารและเครื่องมือ | 3% ของต้นทุน | 0.083 |
| ระบบท่อ | 5% ของต้นทุน | 0.139 |
| รวม | | 0.670 |

4.4.3 ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตของระบบนาโนฟิลเตรชัน

จากการคำนวณราคาต้นทุนต่อหน่วยในส่วนต่าง ๆ ตามหัวข้อที่ 4.4.2.1 ถึง 4.4.2.5 จะสามารถสรุปต้นทุนทั้งหมดในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยระบบนาโนฟิลเตรชัน สำหรับโรงงานฟอกย้อมได้เท่ากับ 12.95 หรือประมาณ 13 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ดังรายละเอียดตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สรุปต้นทุนในการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม

| รายการ | จำนวนเงิน (บาท ต่อ ลบ. ม.) | เปอร์เซ็นต์ ของต้นทุนรวม |
|--|-------------------------------|-----------------------------|
| ต้นทุนเงินลงทุน | 2.78 | 21.5 % |
| ต้นทุนด้านพลังงาน | 5.775 | 44.6 % |
| ต้นทุนด้านสารเคมี | 1.4565 | 11.2 % |
| ต้นทุนด้านแรงงาน | 1.23 | 9.5 % |
| ต้นทุนด้านการเปลี่ยนเมมเบรน | 1.022 | 7.9 % |
| ต้นทุนด้านการเปลี่ยนไส้กรองไมโครฟิลเตอร์ | 0.017 | 0.13 % |
| ต้นทุนด้านการซ่อมบำรุงรักษา | 0.67 | 5.17 % |
| รวม | 12.9505 | 100 % |

4.5 ความเป็นไปได้ในการนำน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่ของ กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

จากผลการทดลองทั้งในห้องทดลองและการทดลองที่โรงงานได้พบว่า ระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถที่จะบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองมาแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือสามารถกำจัดสีได้ทั้งหมด และกำจัดอิออนอื่น ๆ ได้สูงกว่าร้อยละ 80 ขึ้นไป คุณภาพน้ำที่ผลิตได้จึงสูงพอที่จะนำกลับไปใช้กับส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต เช่น ในส่วนของการฟอกย้อม การซักล้างทำความสะอาด เป็นต้น สำหรับคุณภาพของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 และคุณภาพน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 สรุปคุณภาพน้ำที่บำบัดได้จากการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชั่น

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าเฉลี่ย |
|------------------------|------------------------|-----------|
| pH | | 6.01 |
| อุณหภูมิ | °C | 38.35 |
| ความนำไฟฟ้า | μs | 69.07 |
| ของแข็งละลาย | mg/l | 113.75 |
| ความขุ่น | NTU | 0.05 |
| ความเข้มสีในหน่วย SU | SU | - |
| ความเข้มสีในหน่วย ADMI | ADMI | 4.36 |
| ความกระด้าง | mg/l CaCO ₃ | 0.12 |
| แคลเซียม | mg/l CaCO ₃ | 0.19 |
| สภาพต่าง | mg/l CaCO ₃ | 30.75 |
| คลอไรด์ | mg/l Cl ⁻ | 11.86 |

ตารางที่ 4.10 คุณภาพน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการฟอกย้อม

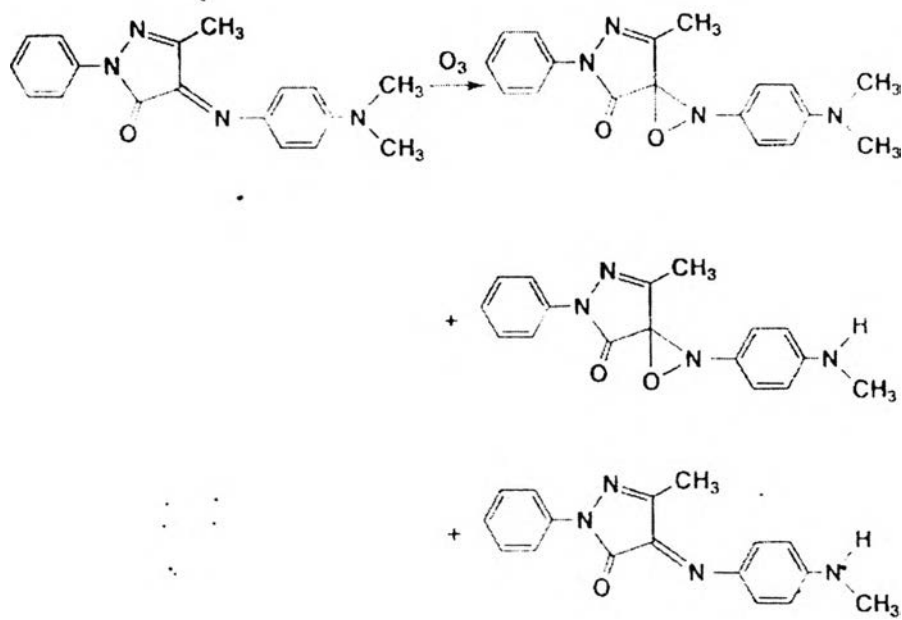
| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าที่ยอมรับได้ |
|----------------------|------------------------|-----------------|
| pH | | 7 - 9 |
| ความขุ่น | NTU | < 5 |
| ความเข้มสีในหน่วย SU | SU | < 10 |
| ความกระด้าง | mg/l CaCO ₃ | < 70 |
| แคลเซียม | mg/l CaCO ₃ | < 3 |
| สภาพต่าง | mg/l CaCO ₃ | < 100 |
| คลอไรด์ | mg/l Cl ⁻ | < 250 |

เมื่อศึกษาถึงคุณภาพน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมตามตารางที่ 4.10 แล้วจะพบว่าคุณภาพน้ำที่ได้จากระบบนาโนฟิลเตรชั่นนั้นสามารถนำไปใช้กับกระบวนการฟอกย้อมได้ จะมีในส่วนของพีเอชที่ต่ำกว่าข้อกำหนดของโรงงานไปเล็กน้อยเนื่องมาจากน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคาร์บอนเนตสูงจึงทำให้ค่าพีเอชต่ำ แต่ไม่มีผลต่อกระบวนการฟอกย้อมมากนัก

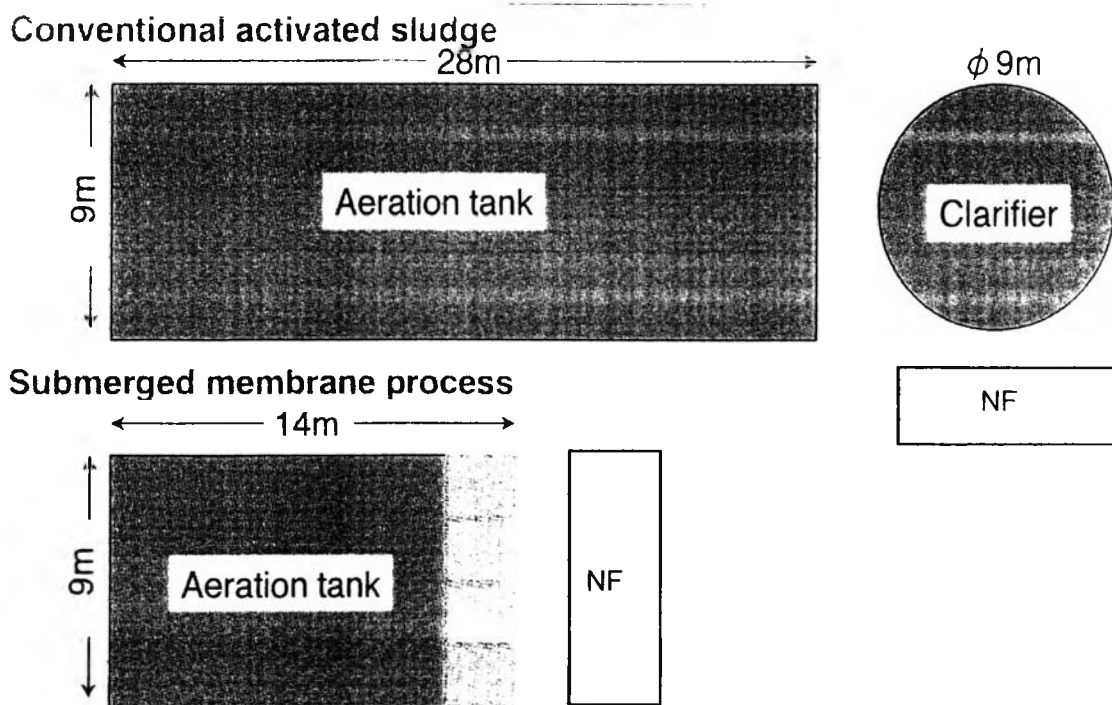
เพราะสามารถเพิ่มพีเอชได้ด้วยการไล้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออก นอกจากการนำไปใช้ในกระบวนการฟอกย้อมยังสามารถนำมาใช้ในส่วนของวงจรล้างหลังการฟอกย้อมได้ รวมถึงการนำกลับไปใช้กับอาคารได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามถ้าจะนำกลับมาใช้ในกิจกรรมประจำวันมนุษย์จำเป็นต้องศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ เพิ่มเติม ได้แก่ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย และสารโลหะหนัก เป็นต้น

การใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันถือว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม ถึงแม้ว่าระบบบำบัดแบบเติมอากาศจะสามารถช่วยลดค่าซีโอดีและบีโอดีลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็พบว่าไม่สามารถกำจัดสีได้ทั้งหมดรวมถึงปริมาณของแข็งละลายก็ยังคงเหลืออยู่ในน้ำค่อนข้างสูง ทำให้ไม่สามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อีก แม้ว่าจะมีกระบวนการอื่นที่สามารถกำจัดสีได้ดี เช่น การใช้โอโซนซึ่งสามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน ปฏิบัติการของการกำจัดสีด้วยโอโซนแสดงดังรูปที่ 4.75 แต่โอโซนก็ไม่สามารถลดปริมาณของแข็งละลายได้ นอกจากนี้การใช้กระบวนการโอโซนยังก่อให้เกิดสารอนุพันธ์ตัวใหม่ขึ้นมาจากการออกซิไดซ์ของโอโซนที่ไม่สมบูรณ์ โดยที่เราไม่สามารถควบคุมได้ อีกทั้งการใช้โอโซนค่อนข้างจะมีราคาสูงและใช้พลังงานมากในส่วนของเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้การใช้โอโซนนั้นไม่เหมาะกับการใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมากนัก เช่นเดียวกับการใช้คลอรีนในการกำจัดสี ซึ่งตัวคลอรีนสามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ก็ไม่ได้ช่วยให้ปริมาณของแข็งละลายลดลง ในขณะเดียวกันยังอาจจะก่อให้เกิดสารตัวใหม่ขึ้นได้ และตัวของโอโซนกับคลอรีนนั้นก็เป็สารอันตรายจึงต้องให้ความสนใจระมัดระวังในการใช้งานอยู่มาก ทำให้การใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันจะมีความเหมาะสมกว่ามาก

ดังนั้นการเลือกระบบนาโนฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่จึงมีความเหมาะสมมากกว่าเพราะสามารถกำจัดสีได้ทั้งหมด รวมถึงสามารถกำจัดของแข็งละลายได้สูงมาก และในส่วนของระบบก็มีการใช้งานที่แพร่หลายมากขึ้นทำให้แนวโน้มของวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะตัวเมมเบรนก็มีราคาถูกลง เมื่อมีการศึกษาและออกแบบ ที่เหมาะสมแล้วสามารถนำไปใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียเดิมได้เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต หรืออาจจะใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง สิ่งที่สำคัญที่สุดคือต้องศึกษาถึงระบบบำบัดขั้นต้นที่เหมาะสม เพื่อจะได้ยืดอายุของตัวเมมเบรนให้ใช้งานได้ยาวนานขึ้น โดยจากการทดลองใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันที่ทำการกรองในแบบ Dead End เป็นระบบบำบัดขั้นต้น พบว่าเกิดการอุดตันได้เร็วทำให้ต้องเปลี่ยนได้กรองไมโครฟิลเตอร์ค่อนข้างบ่อยต้นทุนในส่วนนี้จึงสูง ซึ่งถ้ามีการนำระบบไมโครฟิลเตรชันที่ใช้การกรองแบบ Crossflow Filtration มาใช้จะช่วยลดปัญหาการอุดตันได้เนื่องจากการไหลของน้ำจะช่วยชะผิวของเมมเบรนเป็นการทำความสะอาดไปในตัว ทำให้การอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรนลดลง



รูปที่ 4.75 ปฏิกิริยาของการกำจัดสีประเภทอะโซด้วยโอโซน



รูปที่ 4.76 การเปรียบเทียบระบบบำบัดแบบเติมอากาศและแบบ submerged membrane ตามด้วยระบบนาโนฟิลเตรชัน

โดยปกติโรงงานฟอกย้อมจะใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ ถ้านำระบบ Submerge Membrane Bio Reactor มาใช้แทนระบบตะกอนเร่ง ก็จะเป็นการลดขนาดของระบบบำบัดลงได้ถึงครึ่งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.76 และน้ำที่ได้จากระบบ Submerge Membrane Bio Reactor ยังมีความสะอาดและใส ซึ่งสามารถนำเข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชันได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านระบบบำบัดขั้นต้นอีก จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดโดยรวมลงได้มาก

จากนโยบายของทางรัฐที่จะไม่ให้มีการใช้น้ำใต้ดินในปี 2547 นี้ การนำน้ำทิ้งมาบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต หรือใช้กับส่วนต่าง ๆ ของโรงงาน จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนของโรงงานได้ และกระบวนการนาโนฟิลเตรชันก็เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจมากในการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่