



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

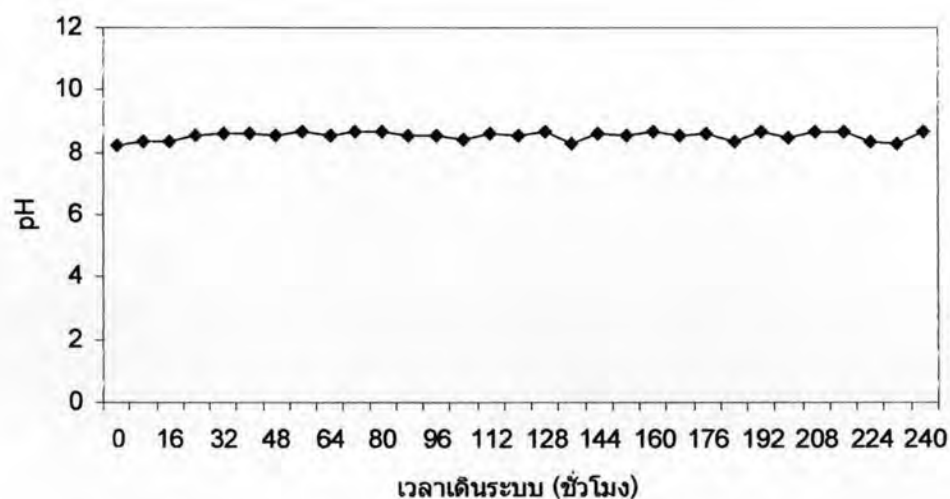
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้น้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระป๋องน้ำอัดลมอะลูมิเนียม ซึ่งสมบัติโดยรวมของน้ำทิ้งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

4.1.1 สมบัติของน้ำทิ้งตลอดช่วงการทดลองในระดับทดสอบ (Pilot Scale)

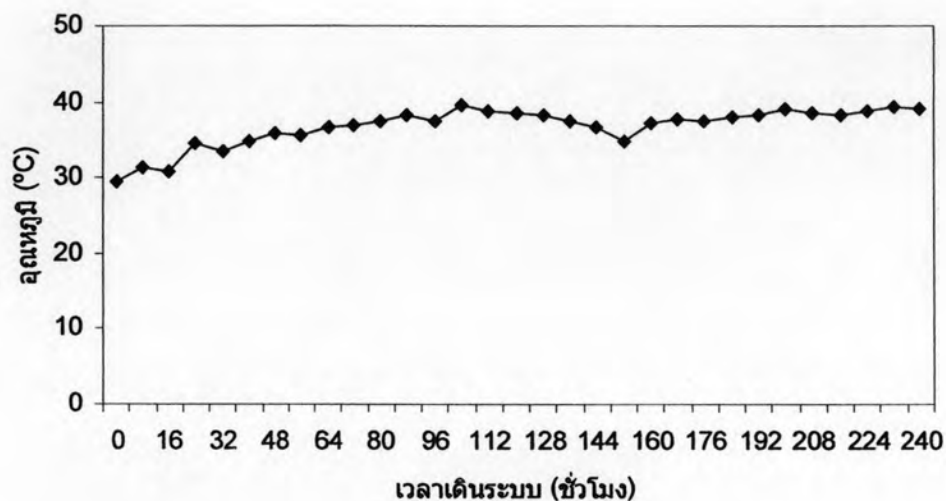
ในการทดลองที่โรงงานจะเป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องกัน (Semi-continuous) เนื่องจากระบบระบายน้ำทิ้งของระบบหล่อเย็นเป็นระบบอัตโนมัติ จึงไม่ได้ทิ้งน้ำออกมาจากระบบตลอดเวลา โดยในการทดลองจะทำการสูบน้ำทิ้งที่ผ่านถังกรองทรายมาเป็นน้ำเข้าระบบ โดยจะมีการตรวจสอบสมบัติของน้ำที่เข้าระบบทุกครั้งก่อนเข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งใช้เวลาในการเดินระบบ 8 ชั่วโมงต่อวัน รวมทั้งสิ้น 240 ชั่วโมง

ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วง 8.4 – 8.8 ดังรูปที่ 4.1

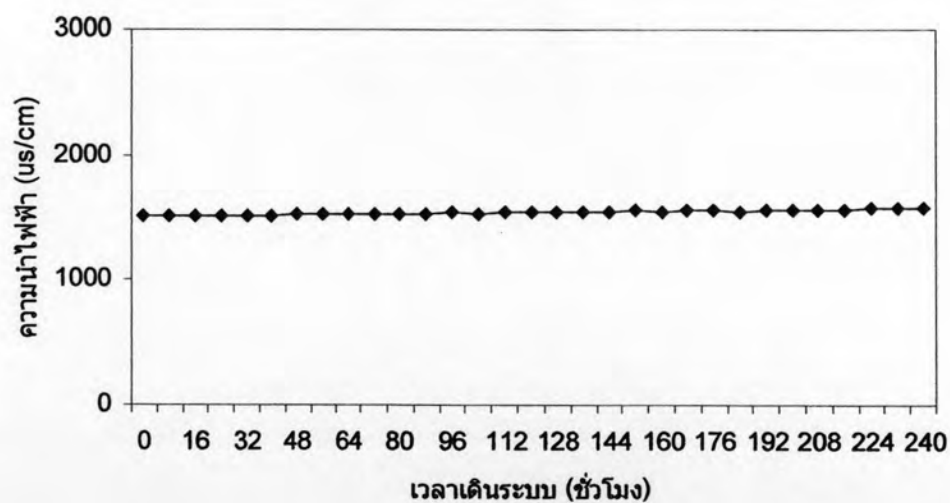


รูปที่ 4.1 ค่า pH ของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

ส่วนอุณหภูมิของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 29.5 – 39.7 °C และค่าความนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าระหว่าง 1,511 – 1,582 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

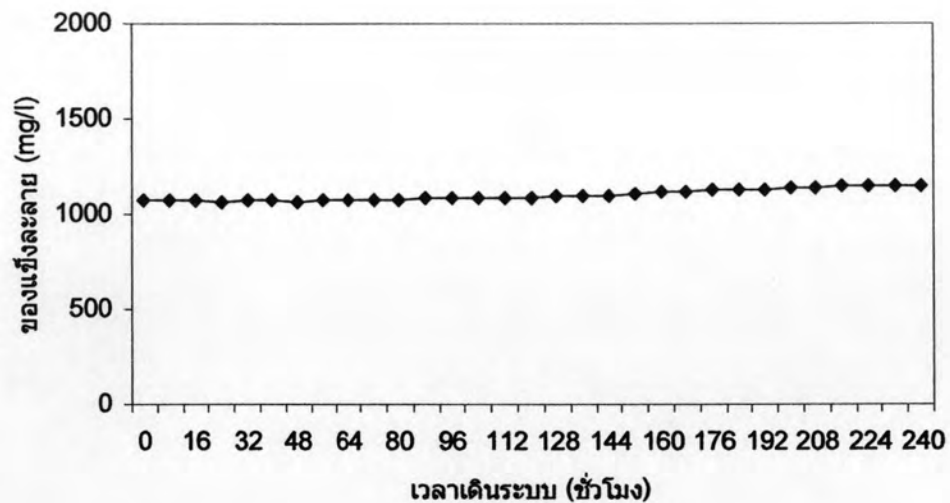


รูปที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

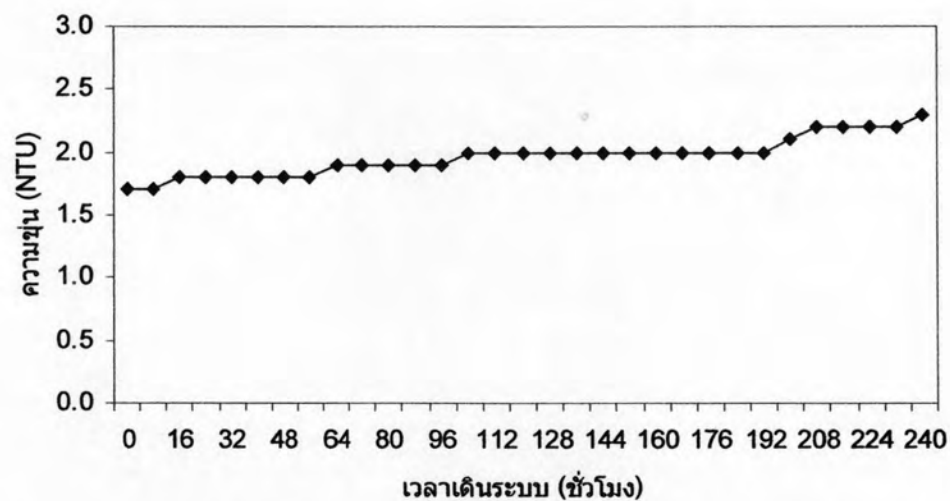


รูปที่ 4.3 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

สำหรับของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1,072 – 1,154 mg/l และค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าระหว่าง 1.7 – 2.3 NTU ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

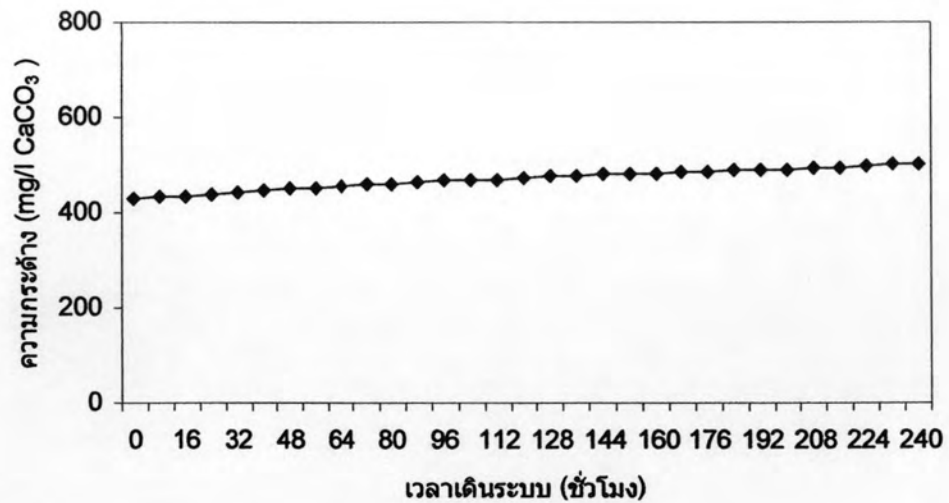


รูปที่ 4.4 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

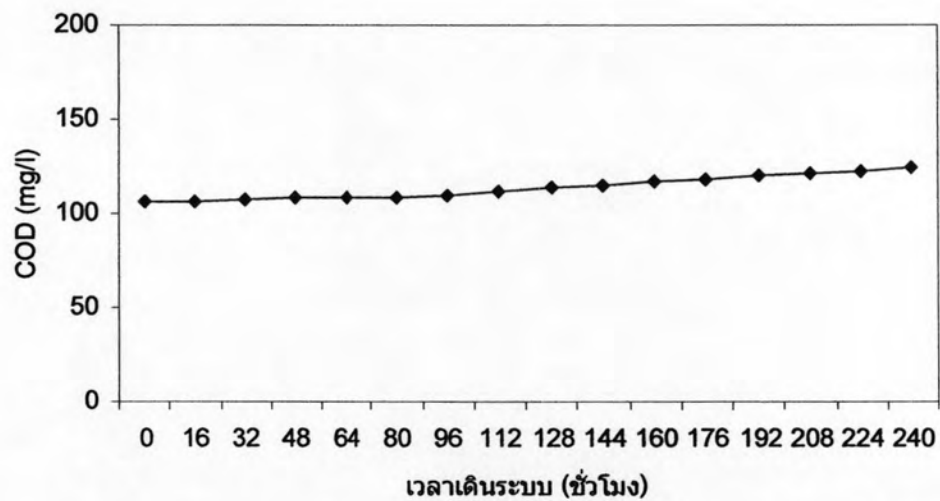


รูปที่ 4.5 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

ในขณะที่ความกระด้างของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 430 – 503 mg/l CaCO_3 และค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 106 – 125 mg/l ดังในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

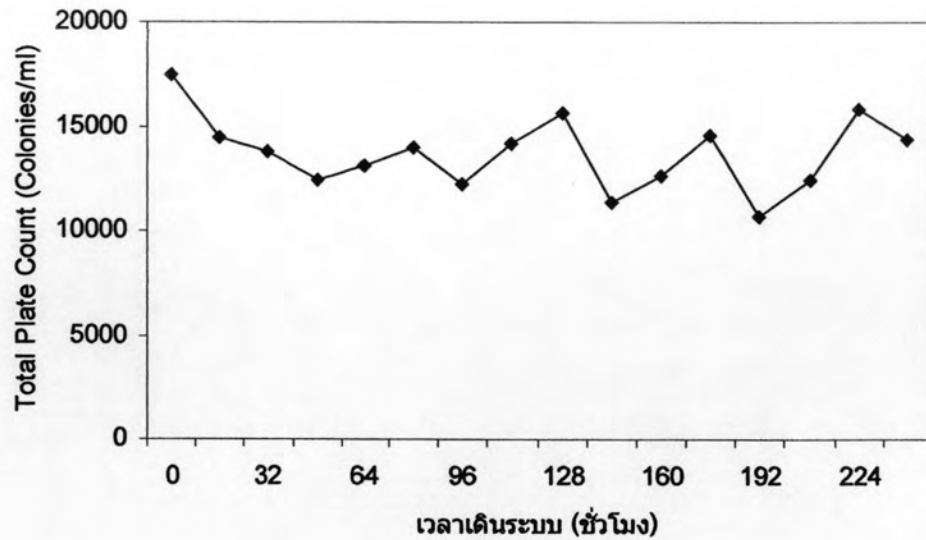


รูปที่ 4.6 ค่าความกระด้างของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

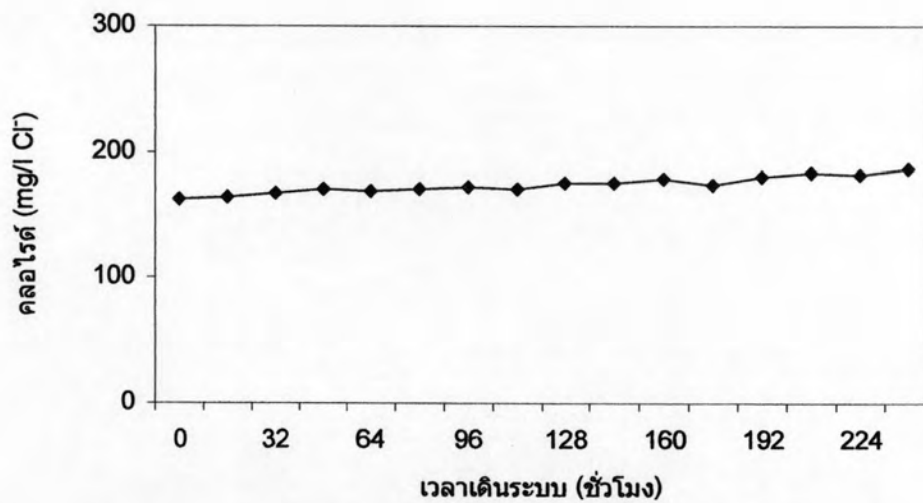


รูปที่ 4.7 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

ปริมาณแบคทีเรียของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 10,700 – 17,500 Colonies/ml และค่าคลอไรด์ของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 162 – 186 mg/l Cl⁻ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

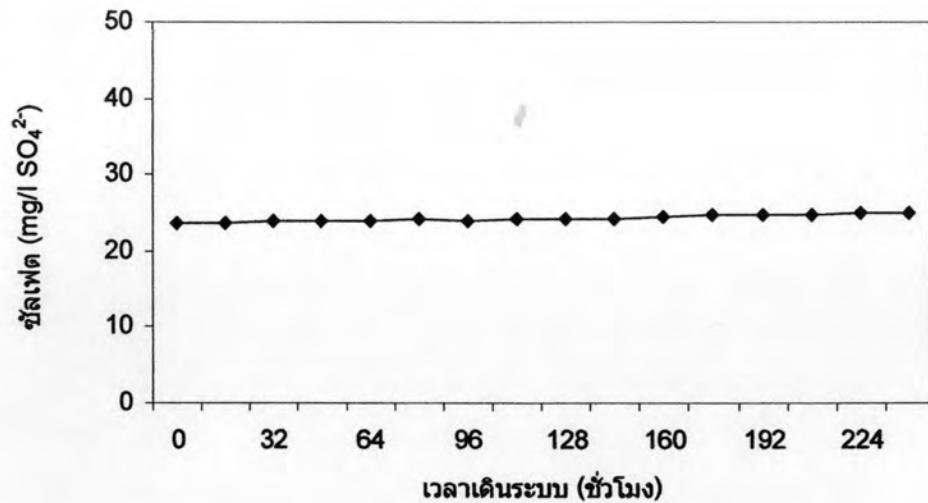


รูปที่ 4.8 ปริมาณแบคทีเรียของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

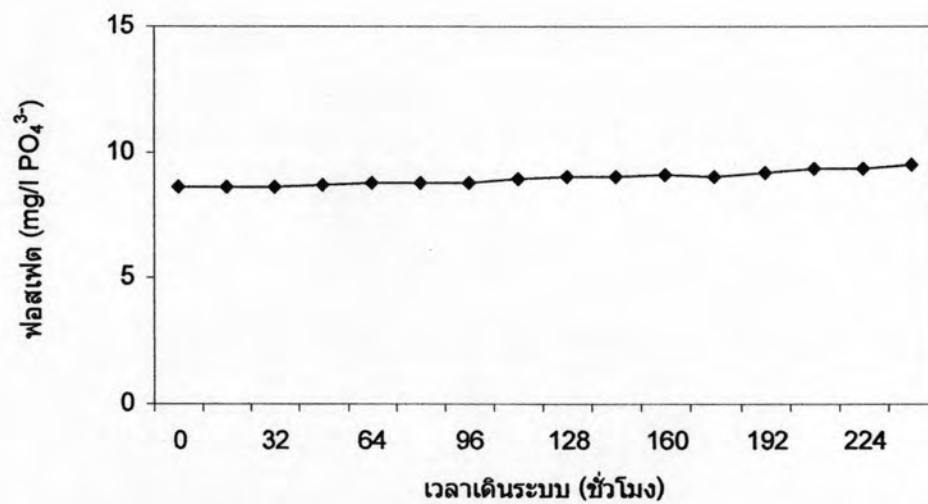


รูปที่ 4.9 ค่าคลอไรด์ของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

ซัลเฟตของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 23.8 – 25 mg/l SO_4^{2-} และค่าฟอสเฟตของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 8.6 – 9.5 mg/l PO_4^{3-} ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ค่าซัลเฟตของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

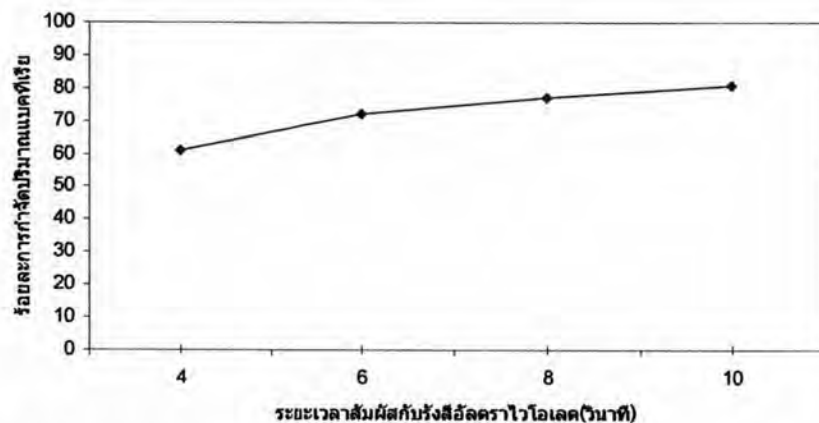


รูปที่ 4.11 ค่าฟอสเฟตของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน

4.2 ผลของการใช้ระบบรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นระบบบำบัดขั้นต้นต่อการลดลงของปริมาณแบคทีเรีย

จากการทดลอง พบว่า การเพิ่มระยะเวลาสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้มากขึ้น ส่งผลทำให้ปริมาณแบคทีเรียลดลง เนื่องจากมีระยะเวลาเพียงพอให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตสัมผัสกับน้ำทิ้งที่ออกมาจากระบบหล่อเย็นได้นานขึ้น โดยกลไกการกำจัดแบคทีเรียเกิดจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ทำปฏิกิริยากับกรดนิวคลีอิกและโปรตีนในเซลล์แบคทีเรีย จนทำให้กรดนิวคลีอิกและโปรตีนเกิดการเสียสภาพไป เป็นผลทำให้เชื้อแบคทีเรียถูกทำลาย โดยสอดคล้องกับผลงานวิจัยของรัฐพลทาทอง (2000) ซึ่งระยะเวลาสัมผัสของน้ำทิ้งที่ออกมาจากระบบหล่อเย็นที่ผ่านการกรองด้วยถังกรองทรายกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ 10 วินาที เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียถึงร้อยละ 80 ซึ่งถือว่าสูงที่สุดที่สามารถทำการทดลองได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือ คือ ขนาดของกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในการทดลองนี้เพียง 50 วัตต์ ซึ่งอาจมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอที่จะสามารถกำจัดปริมาณแบคทีเรียให้หมดไปได้ในระยะเวลาที่เท่ากันได้ รวมทั้งระยะเวลาสัมผัสของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่นานถึง 10 วินาที มีผลทำให้อัตราไหลของน้ำในระบบหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีค่าต่ำ ถ้าเพิ่มระยะเวลาสัมผัสของรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้มากกว่า 10 วินาที อาจทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียสูงมากกว่าร้อยละ 80 แต่อัตราไหลของน้ำในระบบหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีค่าต่ำลงอีก จนไม่สามารถเดินระบบร่วมของสองระบบได้ ขนาดของกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียจึงไม่สูงเท่าที่ควร



รูปที่ 4.12 ผลของระยะเวลาสัมผัสของน้ำกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาต่างๆ

4.3 ผลจากชุดการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบร่วมของรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับนาโนฟิลเตรชันที่มีระบบบำบัดขั้นต้นด้วยระบบรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยชุด Pilot Scale ณ โรงงานตัวอย่าง

หลังจากน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นผ่านการกรองด้วยถังกรองทรายและการฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้ว จึงดำเนินการทดลองต่อไปด้วยระบบนาโนฟิลเตรชัน

4.3.1 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพของระบบ

ในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง เพื่อหาความดันในการเดินระบบที่เหมาะสม คือ 3, 4, 5 และ 6 บาร์ โดยควบคุมอัตราการสวนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ที่ร้อยละ 50 และระยะเวลาสัมผัสกับน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ 10 วินาที

จากการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนในด้านของความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเดินระบบกับประสิทธิภาพของระบบ คือเมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบแล้ว อัตราการผลิตน้ำสะอาดสูงขึ้น รวมถึงคุณภาพของน้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ Dilution Effect (Waypa และคณะ, 1997) คือเมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น ก็จะทำให้อัตราการไหลของน้ำ Permeate เพิ่มขึ้น ในขณะที่สิ่งเจือปนไม่สามารถไหลผ่านเมมเบรนด้วยอัตราการไหลที่สูงเทียบเท่ากับในกรณีของน้ำ permeate เป็นผลทำให้น้ำ permeate มีความเข้มข้นของสิ่งเจือปนมีค่าลดลง

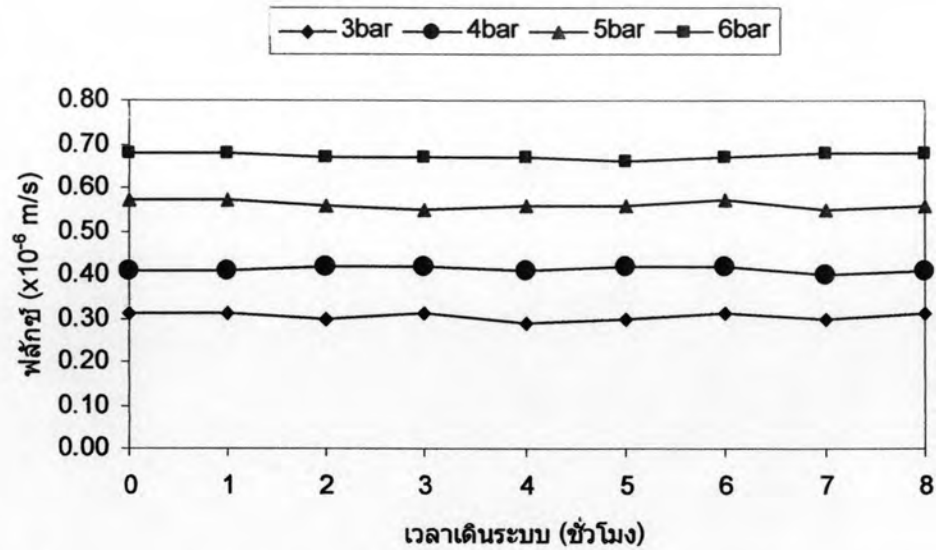
4.3.1.1 ผลของความดันในการเดินระบบต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

อัตราการผลิตน้ำสะอาดของแต่ละชุดการทดลอง จะเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นและผลการทดลองก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปฏิรูป ผลจันทร์ (2544) สนธยา สรหงส์ (2546) และวลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม (2550) รวมถึงงานวิจัยอีกหลายชิ้นก็ได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน ซึ่งพบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้นั้น จะแปรผันตรงกับความดันที่ใช้ในการเดินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันที่ใช้ ดังแสดงในสมการ 2.7

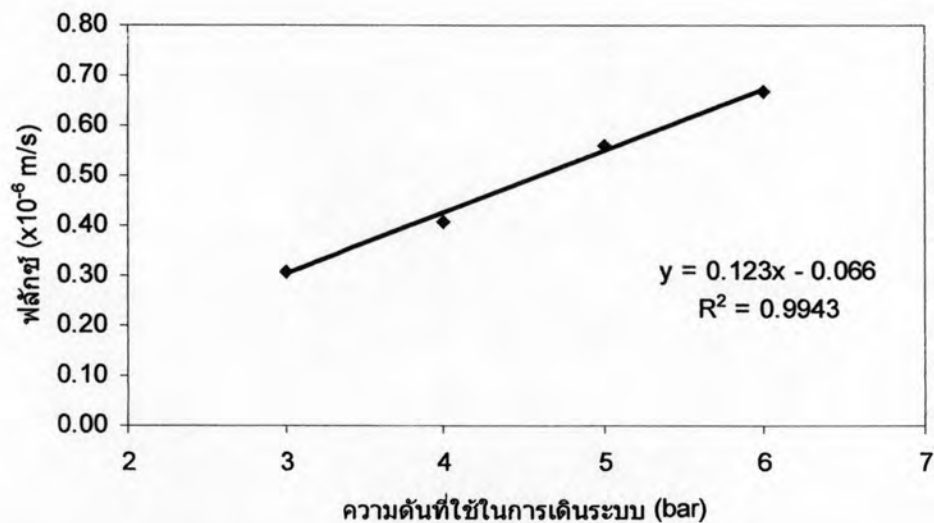
$$F_w = K_w [\Delta P - \Delta \pi] \quad (2.7)$$

จากสมการ 2.7 จะพบว่าเมื่อเพิ่มความดัน (ΔP) ให้สูงขึ้น เป็นผลทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ได้ (F_w) สูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ค่าแรงดันออสโมติก ($\Delta \pi$) มีค่าคงที่ และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการเดินระบบกับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ จะสามารถหาค่า K_w ซึ่งก็คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ($m^3/m^2-s-bar$) โดยที่ค่า K_w ของการทดลองนี้เท่ากับ 0.123×10^{-6} ($m^3/m^2-s-bar$) และได้สมการแทนความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าฟลักซ์สำหรับการทดลองนี้ คือ

$$F_w = 0.123 \times 10^{-6} [\Delta P] - 0.066 \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาในการเดินระบบที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยกับความดันในการเดินระบบค่าต่างๆ

4.3.1.2 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าพีเอช

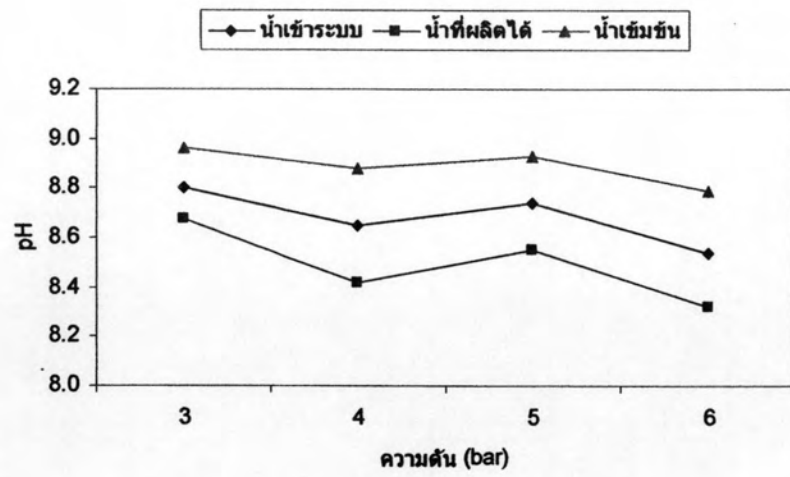
ผลของความดันในการเดินระบบที่มีต่อค่าพีเอชในแต่ละชุดการทดลองมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันและในน้ำสะอาดจะมีต่ำกว่าในน้ำที่เข้าระบบเล็กน้อย โดยที่ค่าพีเอชของน้ำที่เข้าระบบอยู่ในช่วงระหว่าง 8.4 – 8.8 อีกส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเมมเบรน ซึ่งช่วงพีเอช 3 – 10 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเมมเบรน และรูปที่ 4.15 (ก) แสดงถึงค่าพีเอชในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

4.3.1.3 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

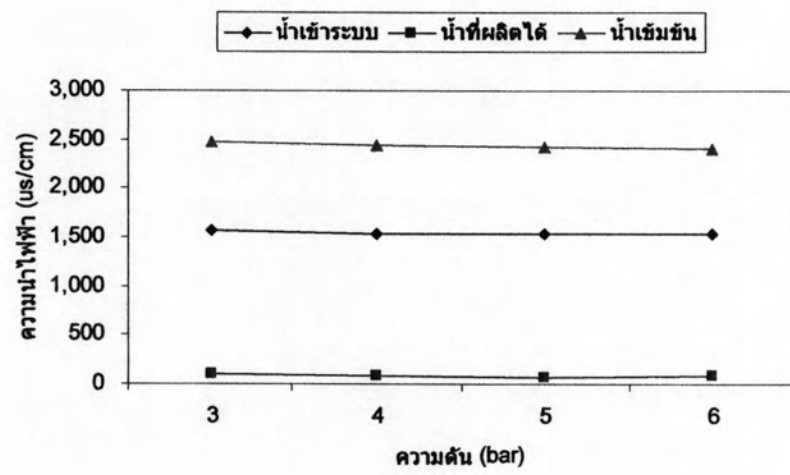
จากการทดลองจะพบว่า เมื่อเพิ่มความดันในการเดินระบบ เป็นผลทำให้ค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำสะอาดที่ผลิตได้ลดลง แสดงว่าค่าร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายจะสูงขึ้นตามความดันในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้นแนวโน้มที่จะเกิด Concentration Polarization จะสูงขึ้นตาม เนื่องจากเกิดชั้นฟิล์มบางๆ ของสิ่งปนเปื้อนบนผิวหน้าเมมเบรน หรือความหนาแน่นของตัวถูกละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน จนทำให้มีโอกาสหลุดผ่านเมมเบรนไปได้ ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง อีกทั้งน้ำที่เข้าระบบมีความเข้มข้นสูง ทำให้สารละลายต่างๆ มีค่าสูงตามไปด้วย เป็นผลให้ค่าแรงดันออสโมติกในระบบสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของสนธยา สรหงส์ (2546) และวลัยรัตน์ อุตตมะปรางกรม (2550) ซึ่งรูปที่ 4.15 (ข) และรูปที่ 4.15 (ค) แสดงถึงค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำส่วนต่างๆ ของระบบตามลำดับ

4.3.1.4 ผลของความดันในการเดินระบบต่อความขุ่น

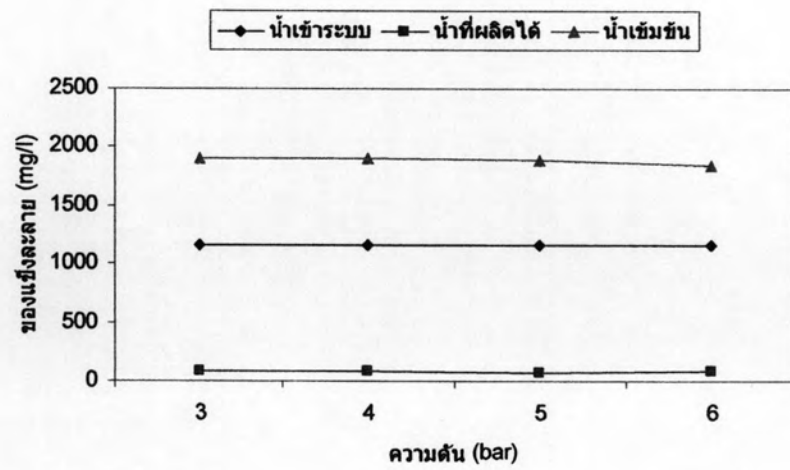
ในการทดลองพบว่าทุกชุดการทดลองมีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกัน คือ ประมาณร้อยละ 95 ขึ้นไป ซึ่งความดันในการเดินระบบจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมากนัก เนื่องจากความขุ่นส่วนใหญ่เกิดอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่จึงถูกกำจัดด้วยกระบวนการกรองเป็นหลัก ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวไม่สามารถผ่านผิวเมมเบรนได้อยู่แล้วและอาจมีโอกาสดกตะกอนของอนุภาคต่างๆ ระหว่างการเดินระบบได้ อีกทั้งความขุ่นส่วนหนึ่งจะถูกกำจัดโดยไส้กรองขนาด 5 ไมครอนที่ใช้เป็นระบบกรองขั้นต้น ซึ่งผลการทดลองก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2007) และรูปที่ 4.15 (ง) แสดงถึงค่าความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆ ของระบบ



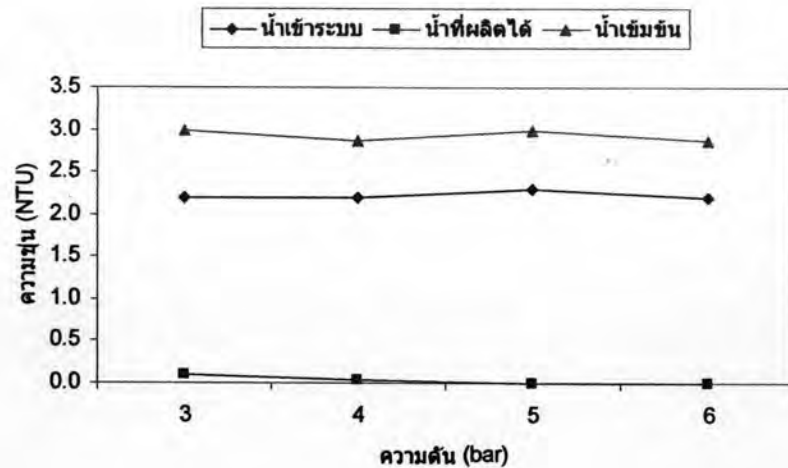
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย และความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

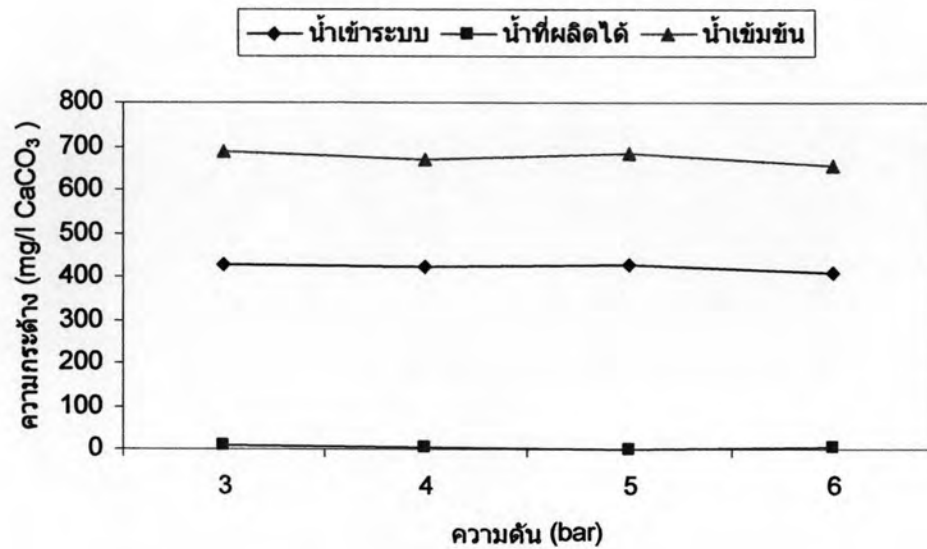
4.3.1.5 ผลของความดันในการเดินระบบต่อความกระด้างทั้งหมด

จากทุกชุดการทดลองจะพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดมีค่ามากกว่าร้อยละ 98 เนื่องจากความกระด้างส่วนใหญ่เกิดจากแคลเซียมที่มีประจุไอออนบวกสองด้วยแรงผลักทางประจุไฟฟ้าของไอออนและขนาดของแคลเซียมที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ไอออนดังกล่าวไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นอีกข้อหนึ่งของเมมเบรนแบบนาโนฟิลเตรชันที่มีความสามารถในการกำจัดไอออนที่มีประจุมากกว่าหนึ่งได้ดี และรูปที่ 4.16 (ก) แสดงถึงค่าความกระด้างทั้งหมดในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

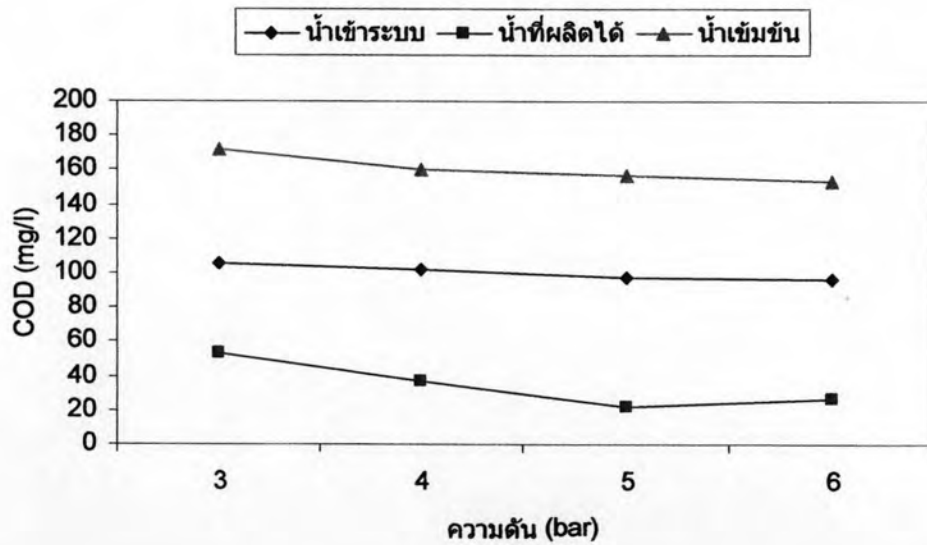
4.3.1.6 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าซีไอดี

จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการกำจัดซีไอดีของแต่ละชุดความดันมีค่าแตกต่างกันไป คือเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น แนวโน้มของประสิทธิภาพในการกำจัดก็สูงขึ้นตามไปด้วย และข้อสำคัญอีกประการหนึ่งคือ ความสามารถในการกำจัดขึ้นอยู่กับการทำงานของระบบนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Bes-Pia และคณะ (2002) ได้ศึกษาการนำน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอกลับมาใช้ใหม่ โดยมีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีก่อนเข้าระบบอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน พบว่า กระบวนการทางกายภาพและเคมีสามารถกำจัดซีไอดีได้ถึงร้อยละ 50 หลังจากนั้นนำไปผ่านระบบเมมเบรนอีกครั้ง พบว่า

ระบบอัลตราฟิลเตรชันไม่สามารถกำจัดซีโอทีได้มากนัก ในขณะที่ระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดซีโอทีได้มากกว่าร้อยละ 96 และรูปที่ 4.16 (ข) แสดงถึงค่าซีโอทีในน้ำส่วนต่างๆของระบบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความดันต่อความกระด้างทั้งหมดและค่าซีโอทีในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

4.3.1.7 ผลของความดันในการเดินระบบต่อปริมาณแบคทีเรีย

ในการทดลองพบว่าทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียได้มากกว่าร้อยละ 99 เนื่องจากน้ำที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน จะต้องมีการบำบัดขั้นต้นด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตก่อนอยู่แล้ว เป็นผลทำให้ในน้ำก่อนเข้าระบบนาโนฟิลเตรชันมีปริมาณแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ในน้ำประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณแบคทีเรียเริ่มต้น อีกทั้งรูพรุนของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันมีขนาดเล็กกว่าขนาดของแบคทีเรียอยู่มาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียของระบบนาโนฟิลเตรชันมีค่าสูง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันในการเดินระบบจึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียมากนัก และรูปที่ 4.17 (ก) แสดงถึงปริมาณแบคทีเรียในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

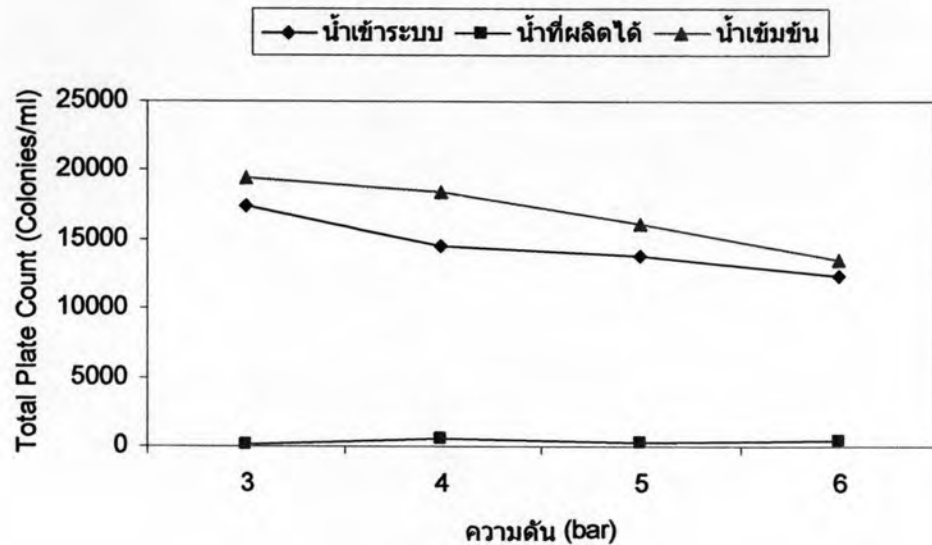
4.3.1.8 ผลของความดันในการเดินระบบต่อคลอไรด์

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์นั้นสูงขึ้นตามความดันในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์อยู่ระหว่างร้อยละ 62-76 แต่ที่ความดันสูงๆ และความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบสูง (วลัยรัตน์ อุดตมะปรากรม, 2550) มีผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆในน้ำมีค่ามากขึ้น ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น แนวโน้มการเกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization ส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำลดลง โอกาสที่อนุภาคต่างๆบนผิวหน้าเมมเบรนหลุดผ่านรูพรุนเมมเบรนไปได้และคลอไรด์มีประจุทางไฟฟ้าลบหนึ่ง รวมทั้งขนาดอออนมีขนาดเล็ก ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง นอกจากนี้ความสามารถในการกำจัดคลอไรด์มาจากกลไกการทำงานของเมมเบรน เนื่องจากเมมเบรนเป็นวัสดุชนิด Polypiperazine-amide ซึ่งประจุบนผิวเมมเบรนเป็นลบ จึงเกิดการผลักกันระหว่างประจุลบ คลอไรด์จึงถูกกำจัดออกไป ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Radier และคณะ (2001) และรูปที่ 4.17 (ข) แสดงถึงคลอไรด์ในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

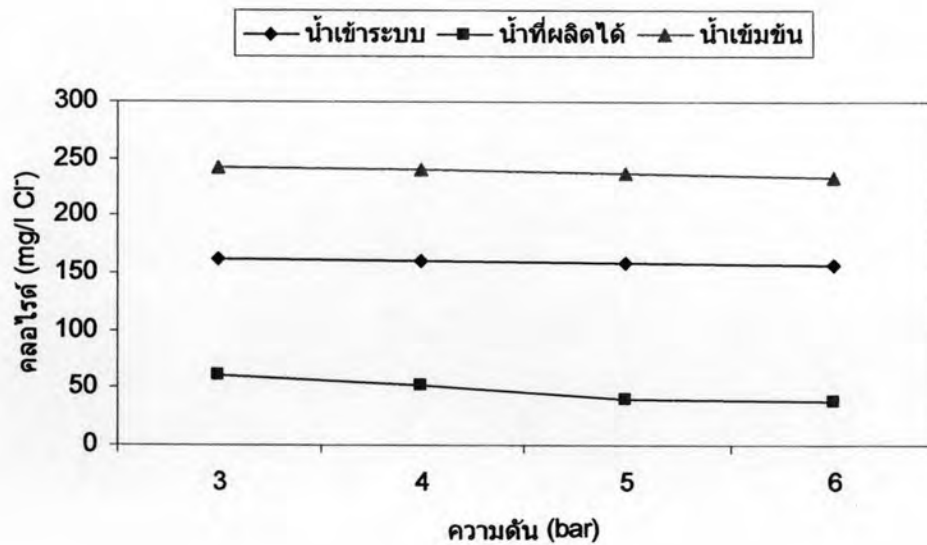
4.3.1.9 ผลของความดันในการเดินระบบต่อซัลเฟตและฟอสเฟต

ในการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตนั้นสูงขึ้นตามความดันในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตอยู่ระหว่างร้อยละ 95 – 99 และมากกว่าร้อยละ 98 ตามลำดับ ความสามารถในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตเกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของอออนที่มีประจุทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสถานะของสารละลายของ

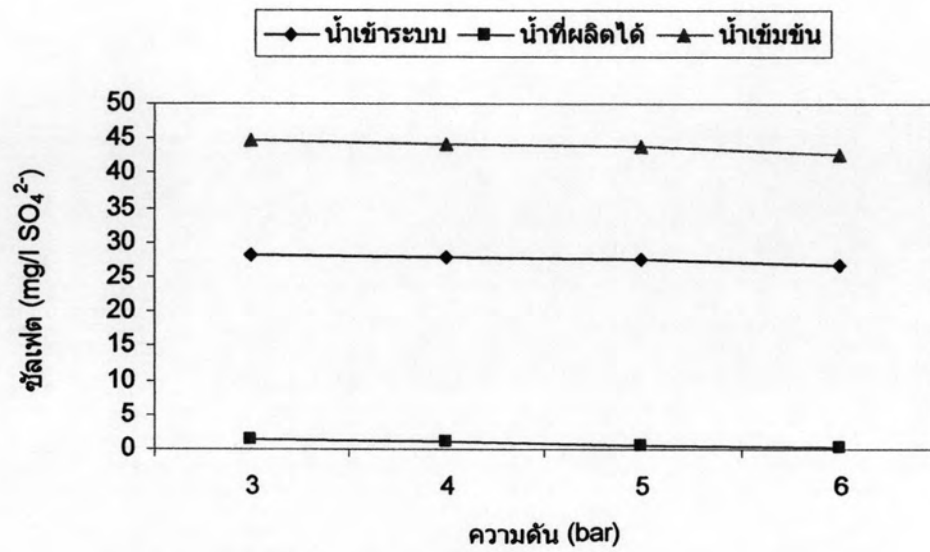
ซัลเฟตและฟอสเฟต คือ ลบสอง และ ลบสาม ตามลำดับ ส่งผลให้เกิดแรงผลักดันระหว่างประจุลบของซัลเฟตและฟอสเฟตกับผิวเมมเบรน รวมถึงขนาดของอิออนของซัลเฟตและฟอสเฟตมีขนาดใหญ่กว่าพูนของเมมเบรนจึงถูกกรองและกำจัดออกไปได้ โดยสอดคล้องกับการวิจัยของ Radier และคณะ (2001) ซึ่งรูปที่ 4.17 (ค) และรูปที่ 4.17 (ง) แสดงถึงซัลเฟตและฟอสเฟตในน้ำส่วนต่างๆของระบบตามลำดับ



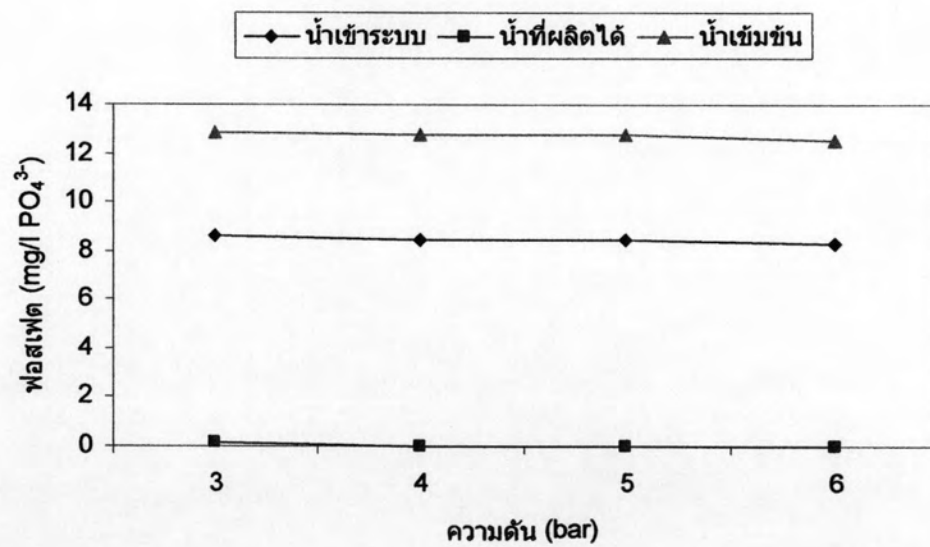
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความดันต่อปริมาณแบคทีเรีย คลอไรด์ ซัลเฟตและฟอสเฟตในน้ำ ส่วนต่างๆของระบบ

4.3.2 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ต่อประสิทธิภาพของระบบ

ในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง เพื่อหาอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด (%Recovery) ที่เหมาะสมที่ร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 ตามลำดับ โดยควบคุมความดันในการเดินระบบที่ 5 บาร์ และระยะเวลาสัมผัสกับน้ำของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ 10 วินาที ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะพิจารณาจากอัตราการผลิตน้ำสะอาดและประสิทธิภาพการกำจัดประกอบกัน โดยพบว่าค่าความดันในการเดินระบบที่ 5 บาร์ จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงเพียงพอ แม้ว่าที่ความดัน 6 บาร์ จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงขึ้นแต่ประสิทธิภาพการกำจัดโดยรวมกลับไม่สูงขึ้นมากนัก ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของสนธยา สรหงส์ (2546) และวลัยรัตน์ อุดตมะปรากรม (2550) เมื่อดูถึงค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้และประสิทธิภาพของระบบแล้ว ค่าความดันที่เหมาะสมในการเดินระบบจึงอยู่ที่ 5 บาร์ จึงเลือกค่านี้เพื่อใช้ในการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด (%Recovery) ต่อไป

4.3.2.1 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

จากการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลองเมื่อเดินระบบไปได้ระยะเวลาหนึ่ง ค่าฟลักซ์ของระบบจะค่อยๆ ลดลง โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)สูงขึ้น มีผลทำให้ค่าฟลักซ์จะมีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)น้อยๆ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ค่าอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ที่สูงขึ้น จะทำให้น้ำที่เวียนกลับเข้าระบบมีความเข้มข้นสูงขึ้นซึ่งเป็นเหตุให้มีโอกาสเกิดการอุดตันบนผิวเมมเบรนได้เร็วขึ้น และความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบที่สูงขึ้นยังส่งผลให้แรงดันออสโมติกมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของวลัยรัตน์ อุดตมะปรากรม (2550) และค่าฟลักซ์ของแต่ละชุดการทดลอง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

4.3.2.2 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อค่าพีเอช

ในการทดลองพบว่า อัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ที่สูงขึ้น ค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีแนวโน้มสูงขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด (%Recovery) จะทำให้ความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบสูงขึ้น รวมถึงความเข้มข้นของสารประกอบพวกคาร์บอเนตที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์สูงขึ้นด้วย ทำให้มีโอกาสที่จะหลุดออกมากับน้ำสะอาดมี

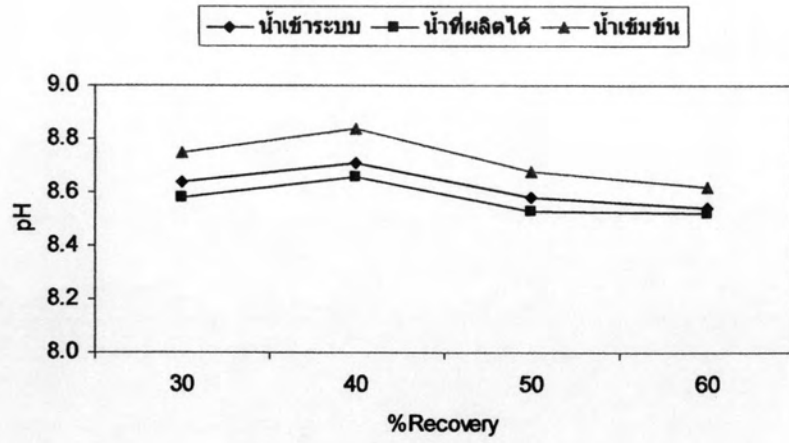
มากขึ้น และในน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าที่เอชอยู่ระหว่าง 8.2 - 8.7 และความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อค่าที่เอชของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.18 (ก)

4.3.2.3 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

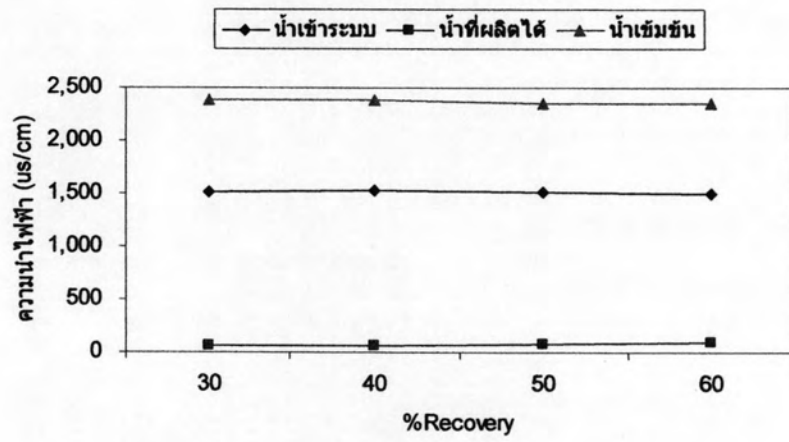
จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของระบบมีค่าสูง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 94 – 96 ขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายอยู่ที่ร้อยละ 94 – 96 เช่นเดียวกัน ซึ่งพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ในการเดินระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของระบบลดลงไป ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายต่างๆในน้ำที่เข้าระบบมีค่าสูง ทำให้ค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของน้ำที่เข้าระบบสูงขึ้นด้วย เป็นผลให้ค่าแรงดันออสโมติกสูงขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงไปด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของสนธยา สรหงส์ (2546) และวลัยรัตน์ อุตตะมะปากรม (2550) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.18 (ข) และ รูปที่ 4.18 (ค) ตามลำดับ

4.3.2.4 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อความขุ่น

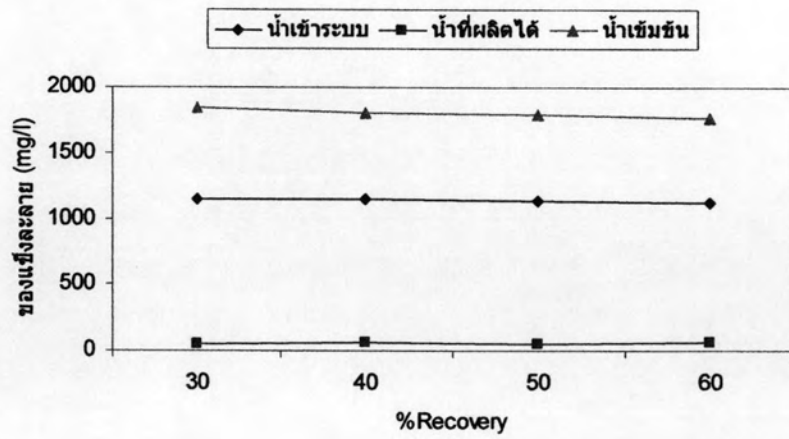
สำหรับในการทดลองด้านความขุ่น พบว่า ทุกชุดการทดลองมีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้หมด ซึ่งอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ในการเดินระบบจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นอย่างชัดเจนนัก เนื่องจากกลไกการกำจัดความขุ่น เป็นกลไกของการกรองติดผิว และโดยทั่วไปความขุ่นเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ที่ไม่สามารถจะผ่านรูพรุนเมมเบรนไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ในการเดินระบบจึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมากนัก ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อค่าความขุ่นของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.18 (ง)



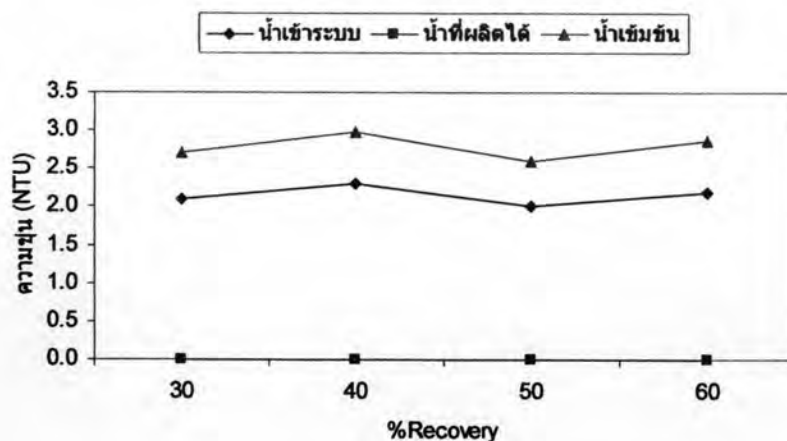
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแตรังละลาย และความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

4.3.2.5 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อความกระด้างทั้งหมด

สำหรับในการทดลองด้านความกระด้างนั้น พบว่า ทุกชุดการทดลองมีความสามารถในการกำจัดความกระด้างได้หมด ทั้งนี้เนื่องมาจากอิออนของแคลเซียมที่มีประจุบวกสอง ซึ่งเป็นสาเหตุของความกระด้าง อิออนนี้มีขนาดใหญ่ และไม่สามารถผ่านรูพรุนเมมเบรนไปได้ จึงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ในการเดินระบบไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อความกระด้างของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.19 (ก)

4.3.2.6 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อค่าซีโอดี

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ให้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายต่างๆในน้ำที่เข้าระบบมีค่าสูง ส่งผลทำให้ค่าซีโอดีที่เข้าระบบสูงขึ้นด้วย เป็นผลให้ค่าแรงดันออสโมติกสูงขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการกำจัดลดลงไปด้วย ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อค่าซีโอดีของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.19 (ข)

4.3.2.7 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อปริมาณแบคทีเรีย

ในทุกชุดการทดลอง พบว่า มีความสามารถในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียได้หมดสาเหตุหนึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตก่อนที่น้ำจะเข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียสูงถึงร้อยละ 80 ที่ระยะเวลาสัมผัสของรังสียูวีและน้ำเข้าระบบ 10 วินาที อีกทั้งแบคทีเรียไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันไปได้เนื่องจากรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าขนาดของแบคทีเรียอยู่มาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ในการเดินระบบจึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียมากนัก ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อปริมาณแบคทีเรียของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.19 (ค)

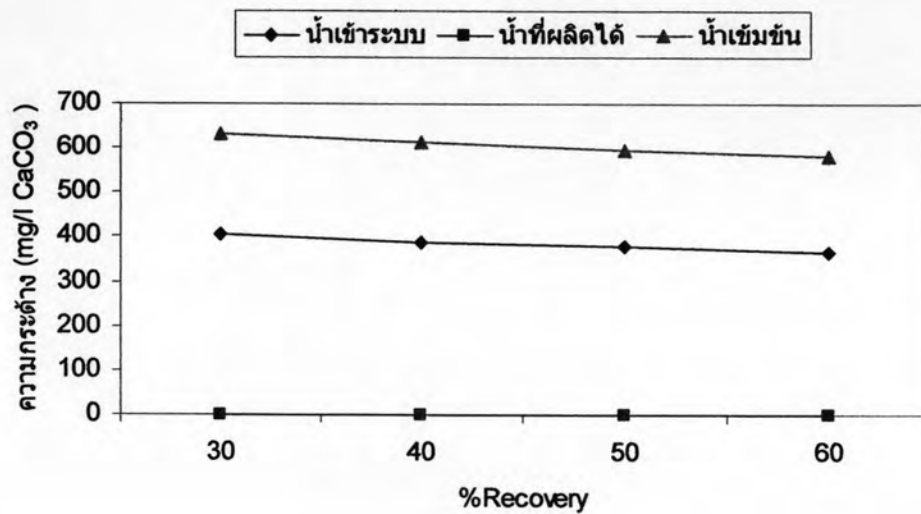
4.3.2.8 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อคลอไรด์

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ของแต่ละชุดการทดลองอยู่ระหว่างร้อยละ 69 – 79 และการเพิ่มค่าอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ให้สูงขึ้น จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ให้ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่าอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ให้สูงขึ้น มีผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆในน้ำที่เข้าระบบมีค่าสูง เป็นผลให้ค่าแรงดันออสโมติกสูงขึ้นด้วย จนทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบลดลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของRadier และคณะ (2001) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อคลอไรด์ของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.19 (ง)

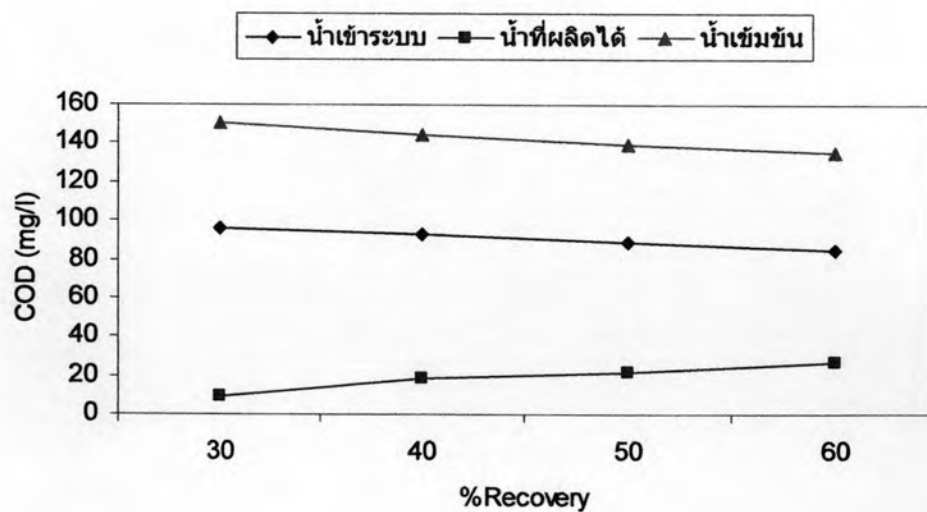
4.3.2.9 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery)ในการเดินระบบต่อซัลเฟตและฟอสเฟต

ในการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตนั้นค่อนข้างคงที่ เนื่องจากทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตอยู่ระหว่างร้อยละ 98– 100 และร้อยละ 100 ตามลำดับ กลไกในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตเกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของอิออนที่มีประจุทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสภาวะของสารละลาย คือ ลบสอง และ ลบสาม ตามลำดับ

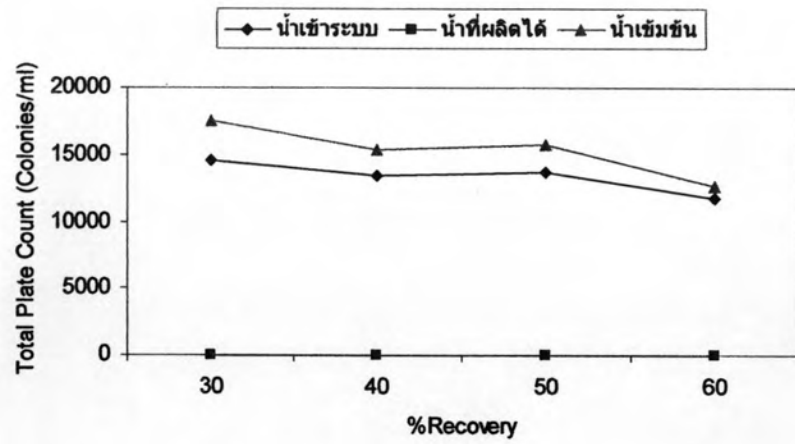
ส่งผลให้เกิดแรงผลักดันระหว่างประจุลบของซิลเฟตและฟอสเฟตกับผิวเมมเบรน รวมถึงขนาดของอิออนของซิลเฟตและฟอสเฟตมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนจึงถูกกรองและกำจัดออกไปได้ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของRadier และคณะ (2001) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อซิลเฟตและฟอสเฟตของน้ำส่วนต่างๆของระบบแสดงดังรูปที่ 4.19 (จ) และรูปที่ 4.19 (ฉ)



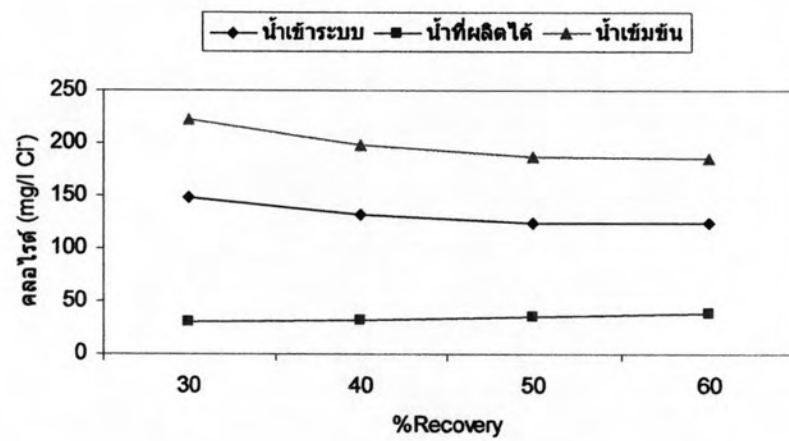
(จ)



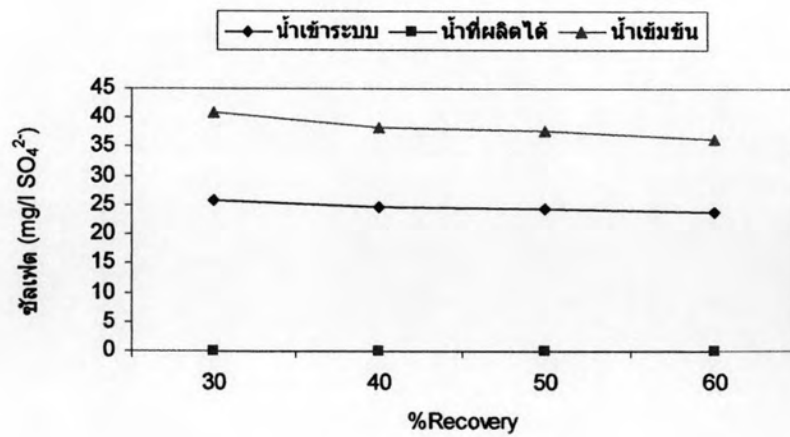
(ฉ)



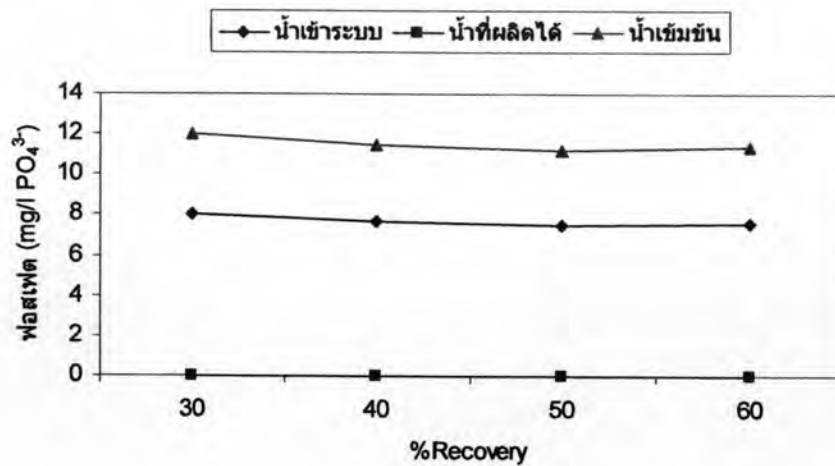
(ค)



(ง)



(จ)



(จ)

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%Recovery) ต่อความกระด้าง ซีโอดี ปริมาณแบคทีเรีย คลอไรด์ ซัลเฟต และฟอสเฟตในน้ำส่วนต่างๆของระบบ

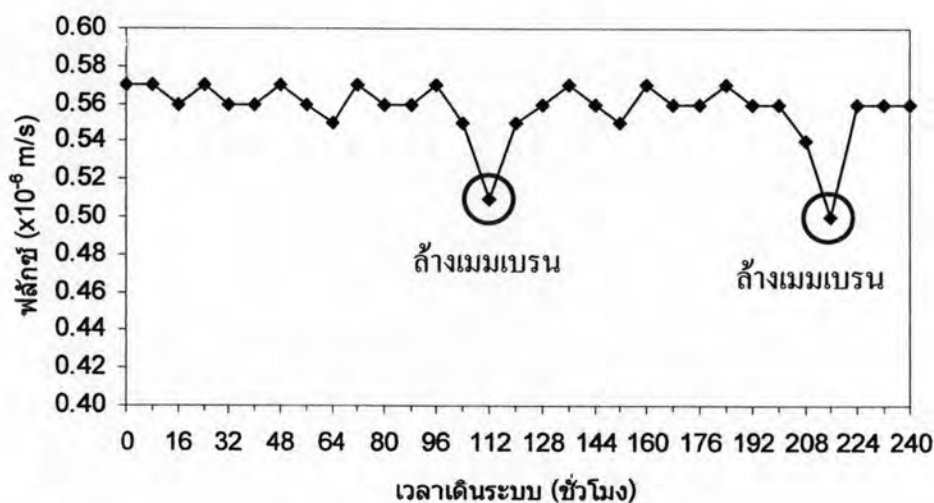
4.4 ผลการทดลองของการเดินระบบร่วมระยะยาวของหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับระบบ นาโนฟิลเตรชันที่มีระบบบำบัดขั้นต้นด้วยระบบรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดย ชุด Pilot Scale ณ โรงงานตัวอย่าง

หลังจากทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบระยะยาว โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ค่าฟลักซ์ และคุณภาพของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาสัมผัสของน้ำทิ้งที่ออกมาจากระบบหล่อเย็นกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เหมาะสมคือ 10 วินาที ค่าความดันในการเดินระบบที่เหมาะสม คือ 5 บาร์ และอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด (%Recovery) ที่เหมาะสมที่ร้อยละ 30 เนื่องจากให้ค่าฟลักซ์สูงถึง 0.57×10^{-6} m/s รวมถึงประสิทธิภาพในการกำจัดคอนข้างสูงโดยประสิทธิภาพในการกำจัดความนำไฟฟ้า 96%, ของแข็งละลาย 96%, ซีโอดี 90% และคลอไรด์ 79% ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของสนธยา สรหงส์ (2546) และวลัยรัตน์ อุดตมะปรากรม (2550)

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพโดยรวมตลอดการเดินระบบระยะยาวค่อนข้างคงที่ ในด้านประสิทธิภาพของการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆมีค่าสูงตลอดการทดลอง ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ก็มีค่าคงที่ตลอดการทดลองเช่นกัน ยกเว้นชั่วโมงที่ 112 และชั่วโมงที่ 216 ที่ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดลดลงมากกว่าร้อยละ 10 ของค่าฟลักซ์เริ่มต้น ซึ่งคาดว่าอาจเกิดการอุดตันจากการสะสมตัวของมลสารบนผิวหน้าเมมเบรนได้

4.4.1 อัตราการผลิตน้ำสะอาด

จากการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์ในช่วง 8 – 48 ชั่วโมงแรก จะมีค่าค่อนข้างสูง หลังจากนั้นเมื่อเดินระบบไปจนถึงชั่วโมงที่ 112 ค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด สาเหตุน่าจะเกิดจากการสะสมตัวของมลสารบนผิวหน้าเมมเบรนได้ จึงเกิดการอุดตันในช่วงเวลาดังกล่าว หลังจากนั้นทำความสะอาดเบื้องต้นโดยการป้อนน้ำสะอาดผ่านเมมเบรนเป็นเวลา 30 นาที พบว่า ค่าฟลักซ์กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ต่อมาถึงชั่วโมงที่ 216 ค่าฟลักซ์กลับลดลงมาอีกครั้ง หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดอีกครั้ง ปรากฏว่าค่าฟลักซ์กลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของสนรยา สรหงส์ (2546) และวลัยรัตน์ อุตตมะปราการ (2550) และรูปที่ 4.20 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบระยะยาว



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบระยะยาว

4.4.2 ผลของค่าพีเอช

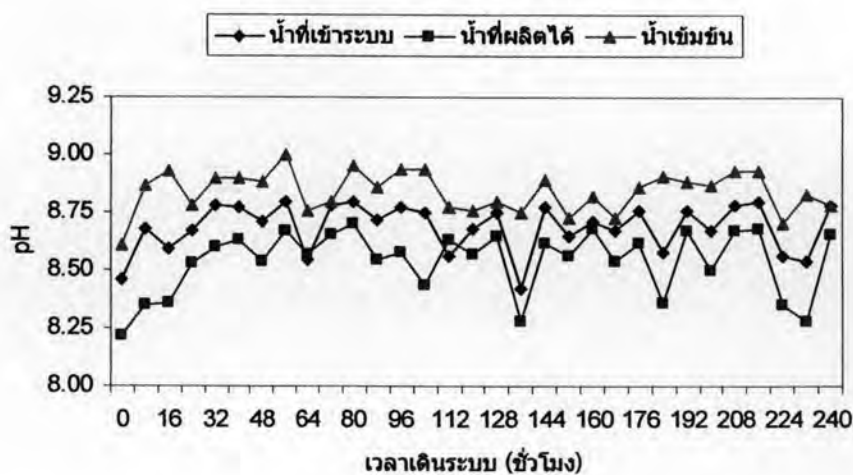
จากการทดลองพบว่า ค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จะมีค่าต่ำกว่าพีเอชของน้ำที่เข้าระบบ ในขณะที่น้ำเข้มข้นมีค่าพีเอชมากกว่าน้ำสะอาด โดยที่พีเอชของน้ำที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 8.4 – 8.8 พีเอชของน้ำสะอาดอยู่ในช่วง 8.2 – 8.7 และพีเอชของน้ำเข้มข้นอยู่ในช่วง 8.4 – 9.0 แสดงดังรูปที่ 4.21 (ก)

4.4.3 ผลของค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

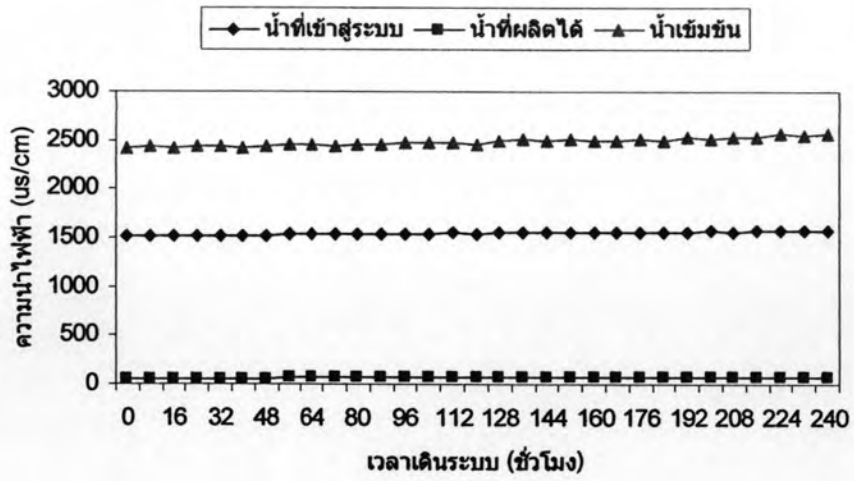
ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ โดยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 94 – 96 และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายก็เป็นไปในแนวทางเดียวกันคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 91 – 95 ซึ่งความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของน้ำที่เข้าระบบมีค่าระหว่าง 1511 – 1582 $\mu\text{s/cm}$ และ 1072-1154 mg/l ตามลำดับ และในน้ำเข้มข้นจะมีความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายอยู่ในช่วง 2420– 2570 $\mu\text{s/cm}$ และ 1760-1910 mg/l ตามลำดับ รวมทั้งความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำสะอาดมีค่าอยู่ระหว่าง 60 – 80 $\mu\text{s/cm}$ และ 44 - 63 mg/l ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของสนธยา สรหงส์ (2546) และวลัยรัตน์ อุตตะมะปรากรม (2550) โดยความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำส่วนต่างๆของการเดินระบบระยะยาว แสดงดังรูปที่ 4.21 (ข) และรูปที่ 4.21 (ค)

4.4.4 ผลของต่อความขุ่น

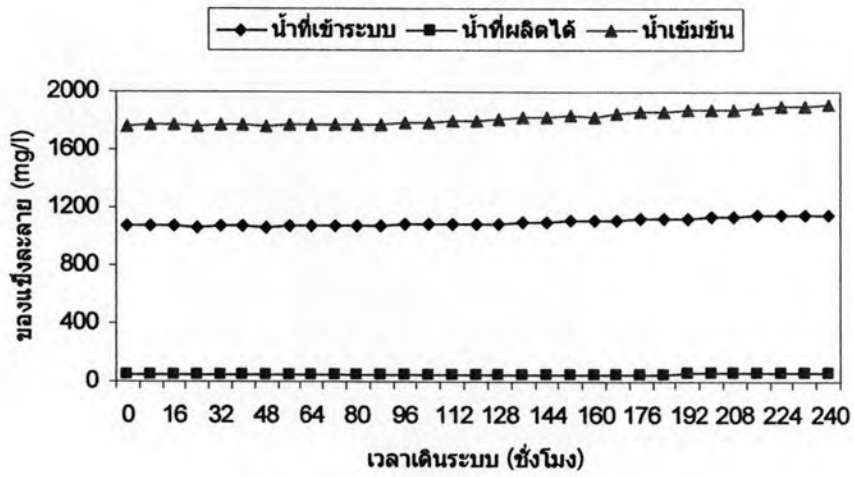
ตลอดเวลาการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงมาก คือที่ร้อยละ 99 – 100 โดยทั่วไปความขุ่นเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับรูพรุนของเมมเบรน จึงไม่สามารถจะผ่านรูพรุนเมมเบรนไปได้ และน้ำที่เข้าระบบมีค่าความขุ่นต่ำมาก คือ 1.7 – 2.3 NTU เท่านั้นเป็นผลทำให้โอกาสที่อนุภาคของความขุ่นจะหลุดไปถึงเมมเบรนจึงน้อยลง รวมทั้งอีกทั้งความขุ่นส่วนหนึ่งจะถูกกำจัดโดยไส้กรองขนาด 5 ไมครอนที่ใช้เป็นระบบกรองขั้นต้น ส่วนความขุ่นของน้ำเข้มข้นอยู่ในช่วง 2.2 - 3.0 NTU และความขุ่นของน้ำสะอาดอยู่ในช่วง 0 – 0.1 NTU โดยความสัมพันธ์ของค่าความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆของการเดินระบบระยะยาว แสดงดังรูปที่ 4.21 (ง)



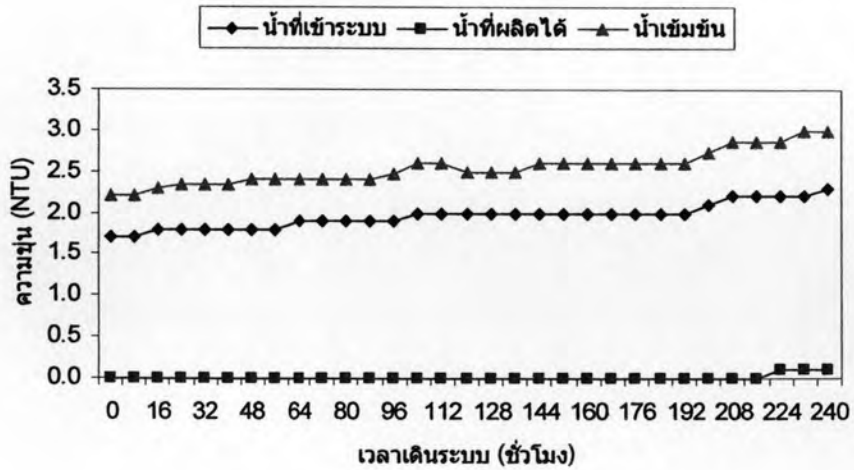
(ง)



(ข)



(ค)



(ง)

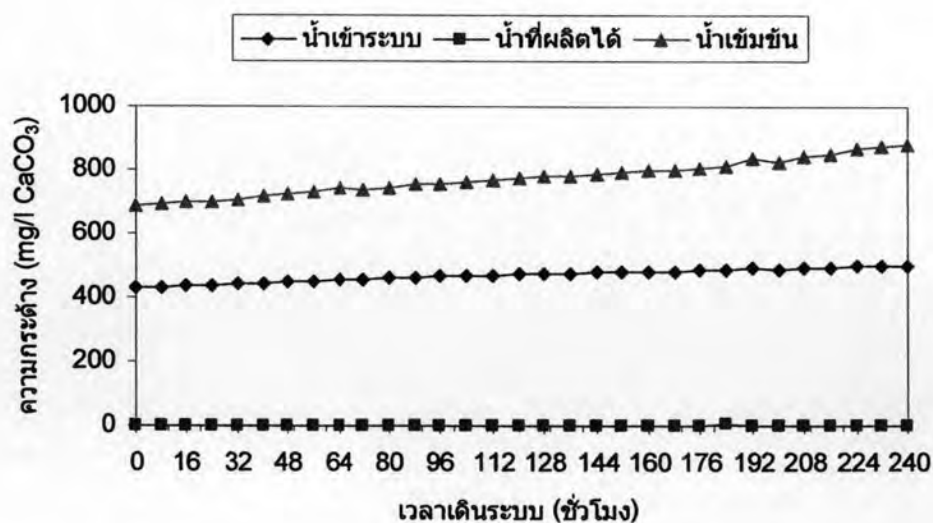
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย และความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาว ของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.4.5 ผลของต่อความความกระด้างทั้งหมด

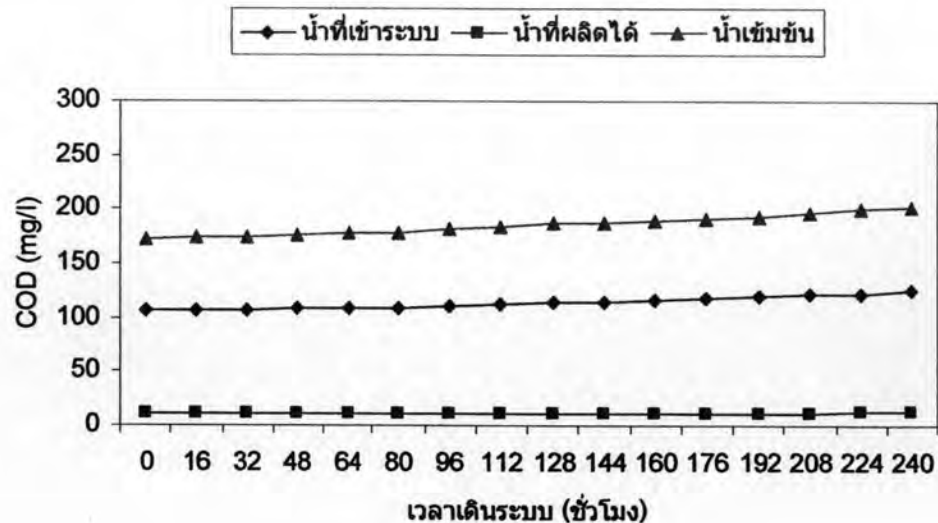
ในการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสามารถกำจัดได้ทั้งหมด ซึ่งความกระด้างของน้ำที่เข้าระบบมีค่าระหว่าง 430 – 503 mg/l CaCO_3 และในน้ำเข้มข้นจะมีค่าความกระด้างอยู่ในช่วง 690 – 880 mg/l CaCO_3 รวมทั้งความกระด้างในน้ำสะอาดมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 4 mg/l CaCO_3 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้สูงมากตลอดเวลาการเดินระบบ ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าความกระด้างในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาวแสดงดังรูปที่ 4.22 (ก)

4.4.6 ผลของต่อซีไอดี

จากการทดลอง พบว่า ระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดค่าซีไอดีได้ค่อนข้างดี คือที่ร้อยละ 75 – 79 โดยที่น้ำเข้าระบบมีค่าซีไอดีอยู่ระหว่าง 106 – 125 mg/l และน้ำสะอาดมีค่าซีไอดีอยู่ระหว่าง 10.5 – 12.4 mg/l ส่วนน้ำเข้มข้นมีค่าซีไอดีอยู่ระหว่าง 172 – 202 mg/l โดยสอดคล้องกับการวิจัยของ Zhang และคณะ (2007) ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าซีไอดีในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาวแสดงดังรูปที่ 4.22 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของความกระด้างทั้งหมด และซีโอดีในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาว ของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.4.7 ผลของต่อปริมาณแบคทีเรีย

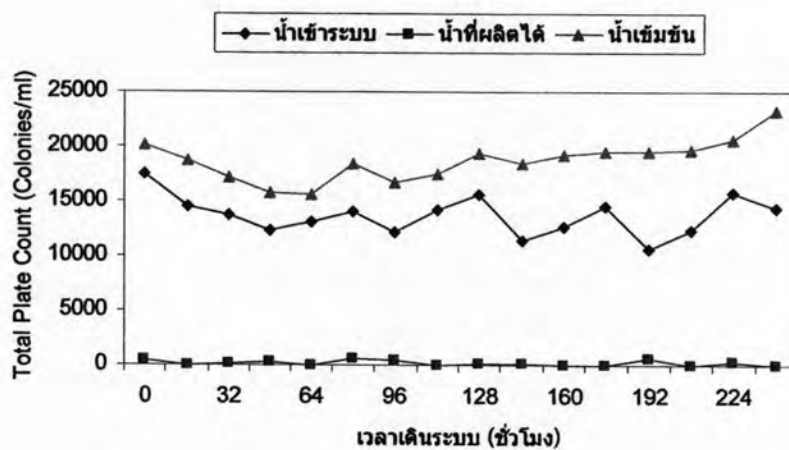
จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแบคทีเรียได้หมด เนื่องจากจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตก่อนที่น้ำจะเข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน ทำให้แบคทีเรียถูกทำลายไปมาก โดยที่น้ำเข้าระบบมีปริมาณแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 10,700 – 17,500 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีปริมาณแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 0 – 700 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ส่วนน้ำเข้มข้นมีปริมาณแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 15,600 – 23,300 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ซึ่งความสัมพันธ์ของปริมาณแบคทีเรียของน้ำส่วนต่างๆของการเดินระบบระยะยาว แสดงดังรูปที่ 4.23 (ก)

4.4.8 ผลของต่อค่าคลอไรด์

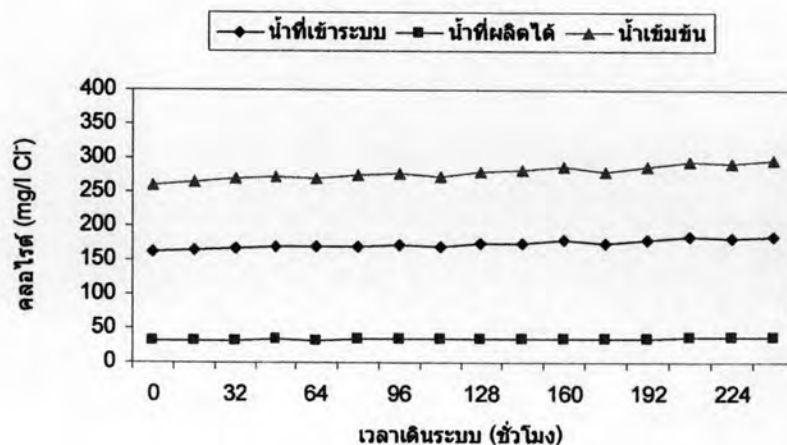
ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ตลอดระยะเวลาที่เดินระบบ อยู่ที่ร้อยละ 75 – 79 ซึ่งค่าที่ได้ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง โดยกลไกทางประจุไฟฟ้าเป็นกลไกที่สำคัญในการกำจัดคลอไรด์ เนื่องจากผิวของเมมเบรนเป็นประจุลบจึงสามารถผลัดกับประจุลบของคลอไรด์ โดยที่น้ำเข้าระบบมีค่าคลอไรด์อยู่ระหว่าง 162 – 186 mg/l Cl^- และน้ำสะอาดมีคลอไรด์อยู่ระหว่าง 32 – 37 mg/l Cl^- ส่วนน้ำเข้มข้นมีคลอไรด์อยู่ระหว่าง 261 – 298 mg/l Cl^- ซึ่งความสัมพันธ์ของคลอไรด์ในน้ำส่วนต่างๆของการเดินระบบระยะยาวแสดงดังรูปที่ 4.23 (ข)

4.4.9 ผลต่อซัลเฟตและฟอสเฟต

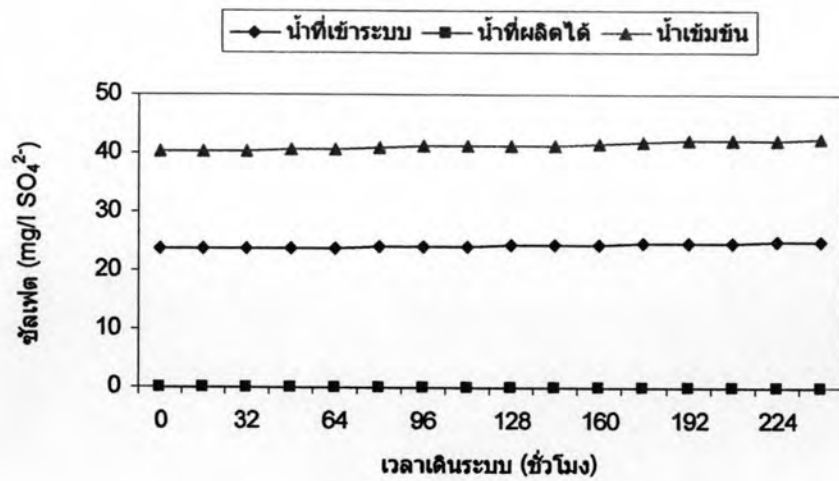
จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตตลอดการเดินระบบระยะยาว อยู่ที่ประมาณร้อยละ 98 – 100 และ 99 – 100 ตามลำดับ ซึ่งค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง โดยมีกลไกที่สำคัญในการกำจัดซัลเฟตและฟอสเฟตคือ แรงผลักของประจุไฟฟ้าลบของอิออน รวมทั้งขนาดอิออนของซัลเฟตและฟอสเฟตใหญ่กว่าขนาดรูพรุนเมมเบรนมาก ทำให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ จึงทำให้มีความสามารถกำจัดที่สูง โดยที่น้ำเข้าระบบมีค่าซัลเฟตและฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 23.8 – 25 mg/l SO_4^{2-} และ 8.6 – 9.5 mg/l PO_4^{3-} ตามลำดับ และน้ำสะอาดไม่พบว่ามีซัลเฟตและฟอสเฟตอยู่ ส่วนน้ำเข้มข้นมีซัลเฟตและฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 40.2 – 42.5 mg/l SO_4^{2-} และ 13.7 – 15.2 mg/l PO_4^{3-} ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับการวิจัยของ Radier และคณะ (2001) ซึ่งความสัมพันธ์ของซัลเฟตและฟอสเฟตในน้ำส่วนต่างๆของการเดินระบบระยะยาวแสดงดังรูปที่ 4.23 (ค) และ 4.23 (ง) ตามลำดับ



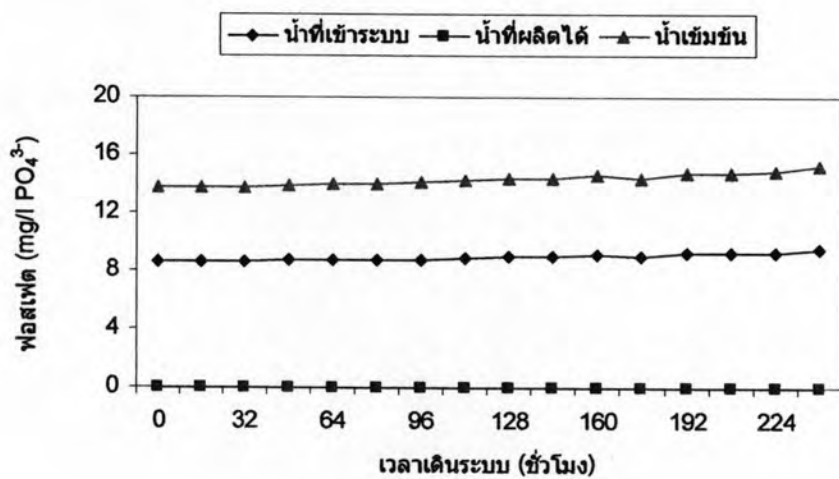
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของปริมาณแบคทีเรีย คลอไรด์ ซัลเฟต และฟอสเฟตในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาวของชุดการทดลองที่โรงงาน

4.4.10 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบ

จากสมการแบบจำลองการละลาย - การแพร่ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำ Permeate และน้ำ Influent เพื่อให้อธิบายกับค่าความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ความกระด้าง คลอไรด์ ซัลเฟต และฟอสเฟต โดยดัดแปลงมาจากสมการที่ 2.13

$$C_p = \frac{K_s \cdot C_f}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (2.13)$$

$$C_p = Z \cdot C_f \quad (4.2)$$

โดยที่ $Z_i = \frac{K_s}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (4.3)$

และ $F_w = K_w [\Delta P - \Delta \pi] \quad (4.4)$

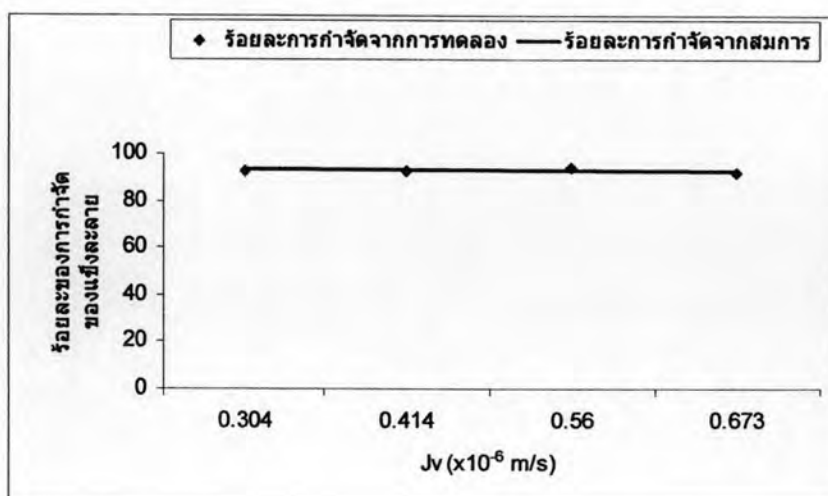
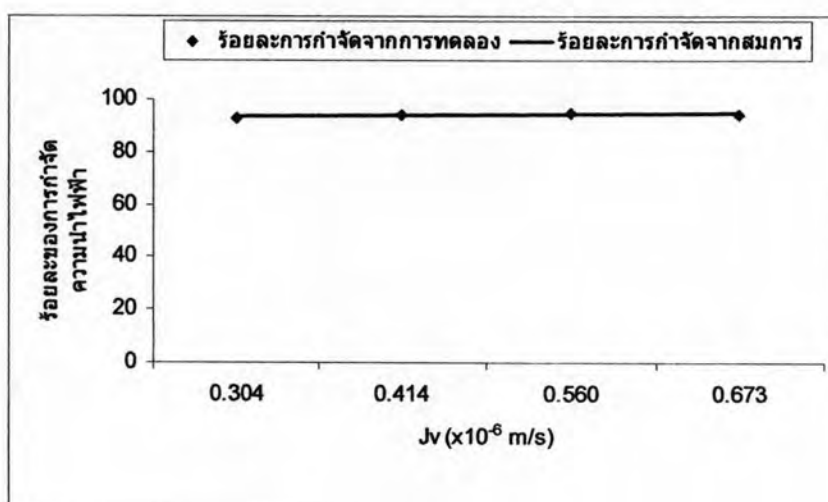
หรือ $Z_i = \frac{K_s}{F_w \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (4.5)$

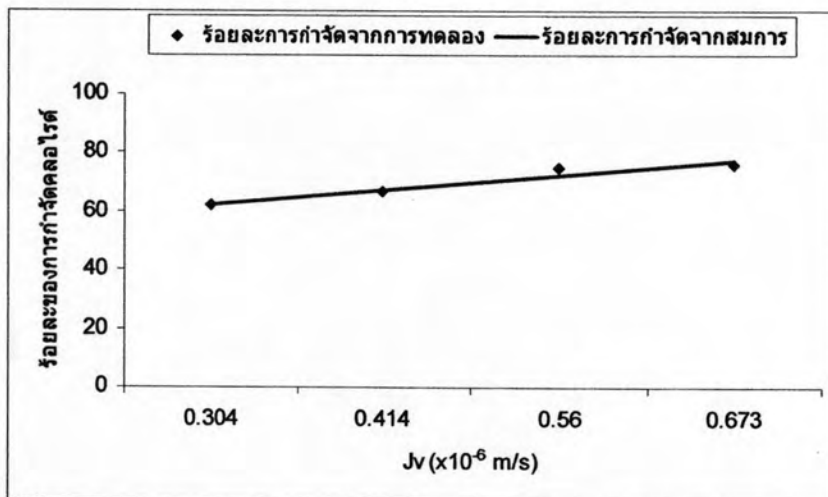
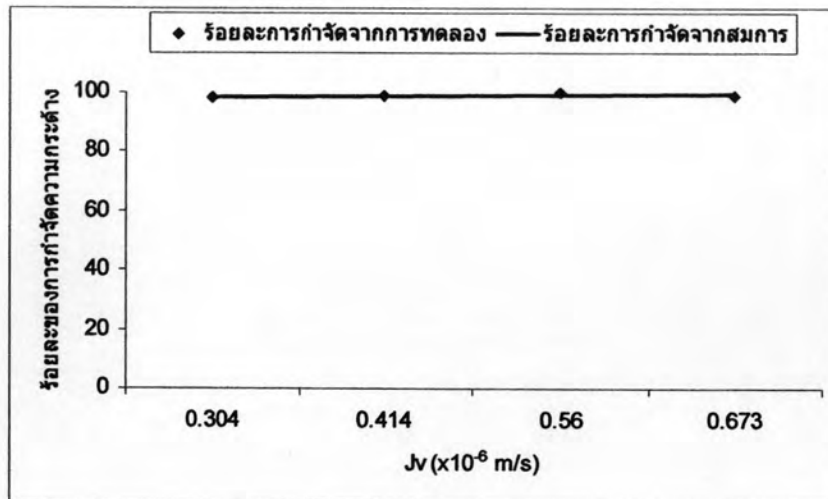
จากสมการ 4.5 เมื่อทราบค่า Z_i , F_w และ R ก็จะสามารถหาค่า K_s ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของสารแต่ละชนิดในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชัน

ชนิดของสารละลาย	แบบจำลองการละลาย - การแพร่
ความนำไฟฟ้า	$Conductiv_i \cdot_p = \frac{2.04 \times 10^{-8} \cdot Conductiv_i \cdot_f}{F_w \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + 2.04 \times 10^{-8}} - 438.9$
ของแข็งละลาย	$TDS \cdot_p = \frac{6.31 \times 10^{-8} \cdot TDS \cdot_f}{F_w \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + 6.31 \times 10^{-8}} - 165.8$
ความกระด้าง	$TH \cdot_p = \frac{4.28 \times 10^{-9} \cdot TH \cdot_f}{F_w \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + 4.28 \times 10^{-9}} + 0.0472$
คลอไรด์	$Cl^- \cdot_p = \frac{1.56 \times 10^{-7} \cdot Cl^- \cdot_f}{F_w \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + 1.56 \times 10^{-7}} - 3.358$

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้ทราบว่าเมื่อทราบค่าความเข้มข้นของสารละลายในส่วนของน้ำที่เข้าระบบ ซึ่งสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายในส่วนของน้ำที่ผลิตได้ ส่วนความเข้มข้นจะถูกกำจัดโดยอาศัยกลไกในการกรองติดผิวเป็นหลัก เนื่องจากอนุภาคของความเข้มข้นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนอยู่แล้ว ในด้านของซัลเฟตกับฟอสเฟตมีกลไกที่สำคัญในการกำจัด คือ แรงผลักรังสีประจุไฟฟ้าลบบของอิออน รวมทั้งขนาดอิออนของซัลเฟตและฟอสเฟตใหญ่กว่าขนาดรูพรุนเมมเบรนมาก ทำให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ดังนั้นสมการของการละลาย-การแพร่จึงไม่สามารถใช้ในการอธิบายได้ชัดเจนนัก และรูปที่ 4.24 แสดงถึงค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการในตารางที่ 4.1 สำหรับการนำไปใช้ประเมินปริมาณความสัมพันธ์ของสารละลายต่างๆ ในน้ำที่เข้าระบบกับปริมาณของสารละลายแต่ละชนิดในน้ำสะอาดที่ผลิตได้โดยเทียบกับร้อยละของการกำจัดและค่าฟลักซ์ต่างๆ





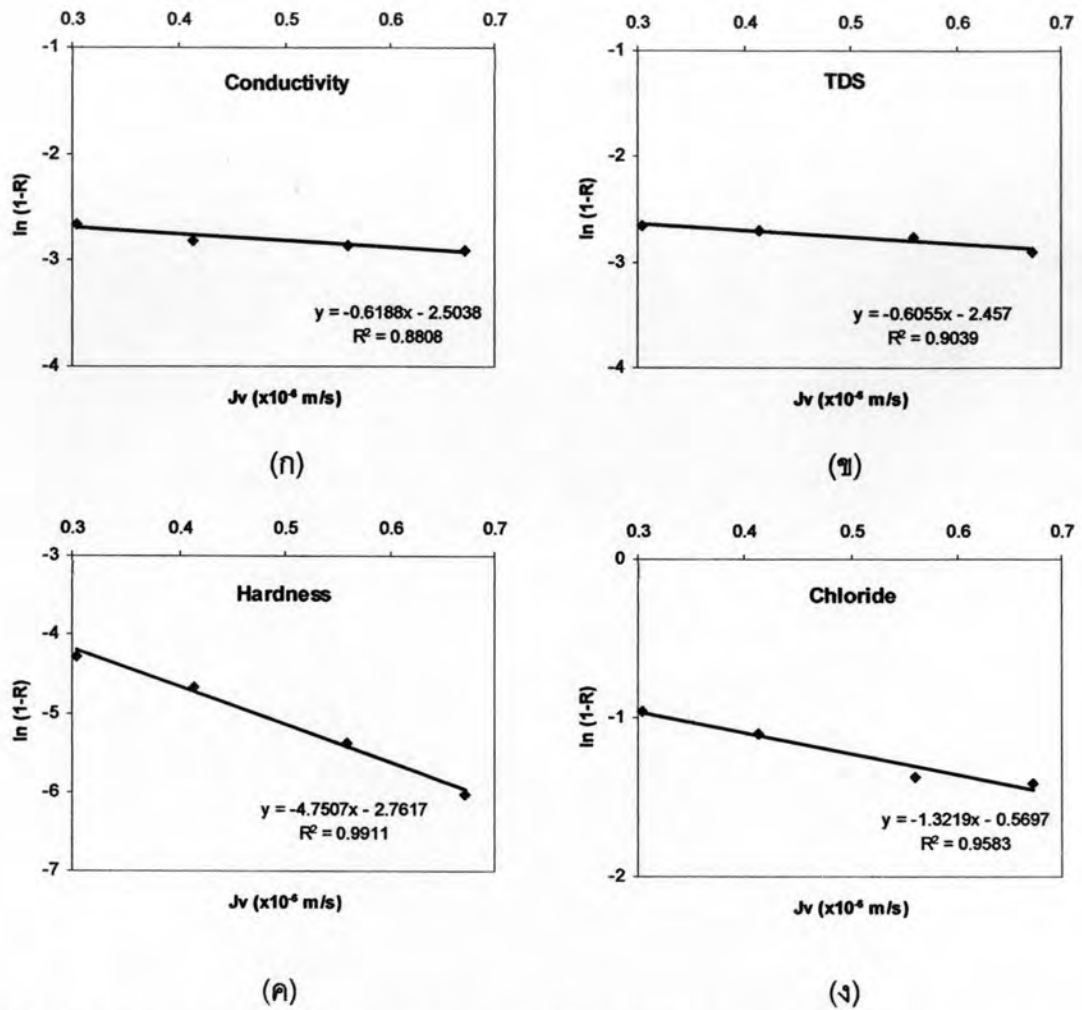
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Flux กับร้อยละการกำจัดความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ความกระด้าง และคลอรีนของชุดการทดลองที่โรงงานโดยเทียบค่าที่ได้จากสมการ

4.4.11 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความดันที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด โดยใช้ Garba Model

จากการสูตร

$$\ln(1 - R) = \frac{-1}{K_{effi}} Jv + \ln \Phi$$

$$R = 1 - \frac{Cp}{Cf}$$



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flux และ ln (1-R) ของชุดการทดลอง

(ก) ความนำไฟฟ้า (ข) ของแข็งละลาย (ค) ความกระด้าง (ง) คลอไรด์

จากรูปที่ 4.28 จะพบว่าเมื่อนำค่าฟลักซ์และ ln (1-R) มา plot กราฟจะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการกำจัดความนำไฟฟ้า, ของแข็งละลาย, ความกระด้าง และคลอไรด์ จะเพิ่มขึ้นตามความดันที่สูงขึ้น จึงเป็นไปตามทฤษฎีของ Garba ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และ ln (1-R)

พารามิเตอร์	แบบจำลองของ Garba	K_{eff}	Φ
ความนำไฟฟ้า	$\ln (1-R) = -0.6188Jv - 2.5038$	1.616031	0.081774
ของแข็งละลาย	$\ln (1-R) = -0.6055Jv - 2.457$	1.651528	0.085692
ความกระด้าง	$\ln (1-R) = -4.7507Jv - 2.7617$	0.210495	0.063184
คลอไรด์	$\ln (1-R) = -1.3219Jv - 0.5697$	0.756487	0.565695

4.5 ความเป็นไปได้ในการนำน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับระบบนาโนฟิลเตรชัน

ตารางที่ 4.3 สรุปคุณภาพน้ำที่บำบัดได้จากการใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับระบบนาโนฟิลเตรชัน

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย
pH	-	8.68
Conductivity	μs	72.61
Total Dissolved Solid	mg/l	53.13
Turbidity	NTU	0.01
Total Hardness	mg/l CaCO_3	0.26
COD	mg/l	10.5
Total Plate Count	Colonies/ml	2.81
Chloride	mg/l Cl^-	29.25
Sulphate	mg/l SO_4^{2-}	0
Phosphate	mg/l PO_4^{3-}	0

ตารางที่ 4.4 คุณภาพน้ำสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นที่โรงงาน

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย
pH	-	8.0-9.2
Conductivity	μs	<1,500
Total Dissolved Solid	mg/l	<1,200
Turbidity	NTU	<5
Total Hardness	mg/l CaCO_3	300-750
COD	mg/l	<100
Total Plate Count	Colonies/ml	<100,000
Chloride	mg/l Cl^-	<150
Sulphate	mg/l SO_4^{2-}	<200
Phosphate	mg/l PO_4^{3-}	8-12

ตารางที่ 4.5 คุณภาพน้ำสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย
pH	-	7.5-9.0
Conductivity	µs	<1,200
Total Dissolved Solid	mg/l	<2,000
Total Hardness	mg/l CaCO ₃	<500
COD	mg/l	<120
Total Plate Count	Colonies/ml	<1,000
Chloride	mg/l Cl ⁻	<250
Sulphate	mg/l SO ₄ ²⁻	<250

เมื่อศึกษาถึงคุณภาพน้ำที่ได้จากระบบหล่อเย็นที่ติดตั้งอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันดังแสดงในตารางที่ 4.3 แล้วจะพบว่าคุณภาพน้ำที่ได้จากหล่อเย็นที่ติดตั้งอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันนั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบหล่อเย็นได้ โดยนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นที่โรงงานและตามมาตรฐานอุตสาหกรรม รวมถึงยังสามารถนำน้ำดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

การใช้หล่อเย็นที่ติดตั้งอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันนั้นถือว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็น ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานเป็นแบบใช้สารเคมีเป็นหลักเนื่องจากปัญหาน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากการปนเปื้อนของน้ำมันที่ใช้หล่อลื่นเครื่องจักรในการผลิต และน้ำเสียจากส่วนอื่นๆก็มีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งอยู่แล้ว แต่น้ำเสียจากส่วนต่างๆจะรวมกันมายังบ่อพักรวมจึงทำให้ค่าของน้ำเสียส่วนใหญ่ก็มีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ดังนั้นน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นจึงมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำทิ้งรวมทั้งหมด ค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายน้ำที่สูงจากน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นจะถูกเจือจางโดยน้ำเสียรวม แต่การนำน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ด้วยหล่อเย็นที่ติดตั้งอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถกำจัดความขุ่น ความกระด้าง ปริมาณแบคทีเรีย ซัลเฟต และฟอสเฟตได้ทั้งหมด รวมทั้งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ซีโอดี และคลอไรด์ เนื่องจากกลไกการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันอันได้แก่ กลไกทางกายภาพของรูพรุนเมมเบรนที่มีขนาดเล็กมาก สารต่างๆที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 จะถูกกำจัดโดยวิธีกรองติดค้าง และกลไกเนื่องจากแรงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิต เพราะตัวเมมเบรนจะมีประจุลบ ทำ

ให้อิออนลบต่างๆในน้ำถูกผลักออกจากตัวเมมเบรน ยิ่งประจุอิออนลบยิ่งมาก การกำจัดก็ยิ่งมากตามไปด้วย

ในปัจจุบันการใช้งานของระบบนาโนฟิลเตรชันมีความนิยมแพร่หลายมากขึ้น มีผลทำให้แนวโน้มราคาของวัสดุอุปกรณ์ต่างๆมีราคาถูกลง เมื่อมีการศึกษาและออกแบบที่เหมาะสมแล้วสามารถนำไปใช้บำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นมาใช้ใหม่ ซึ่งสิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันคือ ต้องมีการศึกษาถึงระบบบำบัดขั้นต้นที่เหมาะสม เพื่อจะได้ยืดอายุของระบบและตัวเมมเบรนให้ใช้งานได้ยาวนานยิ่งขึ้น