

## 4-ผลการศึกษา

จากแผนดำเนินงานวิจัยและระเบียบวิธีวิจัย สามารถสรุปผลการศึกษาตามสภาวะของชุดการทดลองที่กำหนดในระบบเยื่อกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันที่มีชุดเยื่อกรองจมตัว โดยตัวอย่างน้ำป้อนที่เป็นน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์ และน้ำทิ้งหลังบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ แสดงผลการศึกษาที่ได้เป็น 5 ส่วน คือ

- ผลการศึกษาประสิทธิภาพการปรับสภาพน้ำผิวดินและน้ำทิ้งหลังบำบัดฯ ด้วยสารปรับสภาพน้ำ (ข้อ 4-1)
- ผลการศึกษาเพื่อหาค่าพลาซิมิกวีกฤตที่สภาวะต่างๆของการศึกษา (ข้อ 4-2, 4-3)
- ผลการศึกษาเพื่อทดสอบสมรรถนะการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (ข้อ 4-4)
- ผลการศึกษาสาเหตุ กลไกการอุดตัน และ ประสิทธิภาพการล้างเพื่อฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง (ข้อ 4-5, 4-6, 4-7)

### 4-1 ประสิทธิภาพการปรับสภาพน้ำผิวดินและน้ำทิ้งหลังบำบัดฯ ด้วยสารปรับสภาพน้ำ

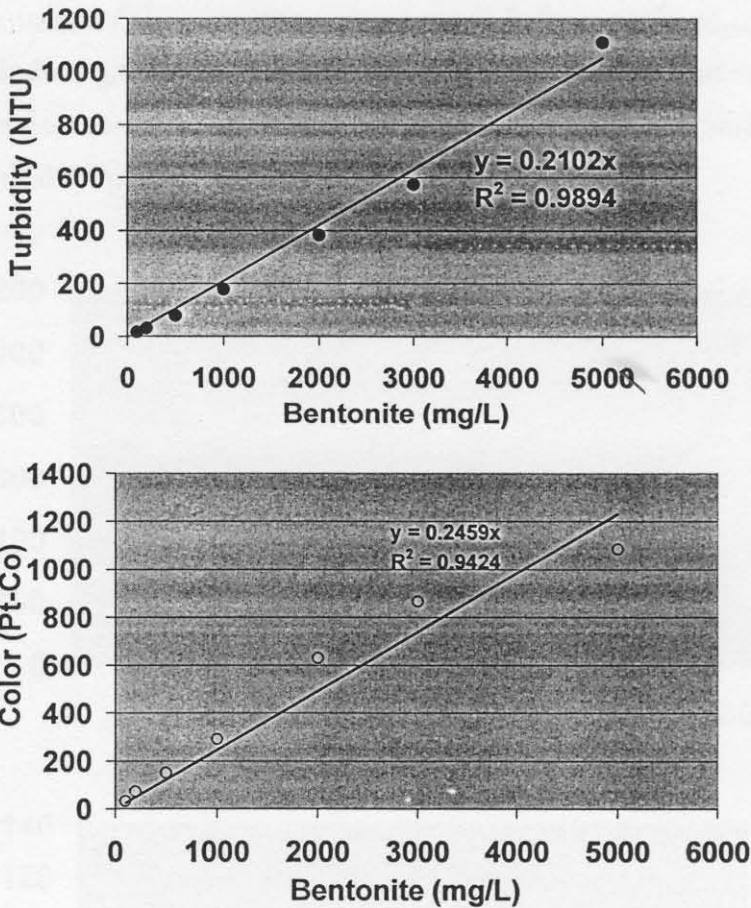
ตัวอย่างน้ำป้อนที่เป็นน้ำใช้ ได้เลือกศึกษาตัวอย่างน้ำผิวดินจริง จากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่เก็บตัวอย่างเป็นที่ละครั้งเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ สารละลายเฟอริกคลอไรด์ สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม และสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ ขณะที่ตัวอย่างน้ำทิ้งหลังบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองก่อนปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการปรับสภาพน้ำทิ้งฯด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณต่างๆ เพื่อศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมในชุดการทดลองที่ศึกษาที่ควบคุมค่า pH ระหว่าง  $7 \pm 0.5$

ทั้งนี้ได้ทดลองศึกษา (เพิ่มเติม) และจำแนกลักษณะจำเพาะของตัวอย่างสารละลายอนุภาคเบนโทไนด์ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคดินและมักใช้เป็นสารละลายสังเคราะห์ที่เป็นตัวแทนลักษณะน้ำผิวดิน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะทั่วไปและผลของการเติมสารสร้างตะกอนที่เลือกทดสอบเพียง 2 ชนิด คือ สารละลายเฟอริกคลอไรด์ สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม

ตัวอย่างสารละลายอนุภาคเบนโทไนด์และสารปรับสภาพน้ำที่ใช้ในการศึกษาถูกจำแนกลักษณะผ่านค่าตัวแปรวิเคราะห์ต่างๆ เช่น ความขุ่น ปริมาณสีปรากฏ เพื่อทำกราฟมาตรฐาน

ความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย รวมถึงวัดขนาดการกระจายตัวของอนุภาคเบนโทไนด์เพื่อเชื่อมโยงกับขนาดอนุภาคที่ได้ภายหลังการใช้สารปรับสภาพน้ำที่มีต่อสมรรถนะการกรอง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายอนุภาคเบนโทไนด์กับค่าความขุ่น และสีปรากฏ ของตัวอย่างน้ำป้อนโมเดลที่เป็นตัวแทนตัวอย่างน้ำผิวดิน ได้กราฟและสมการความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4-1

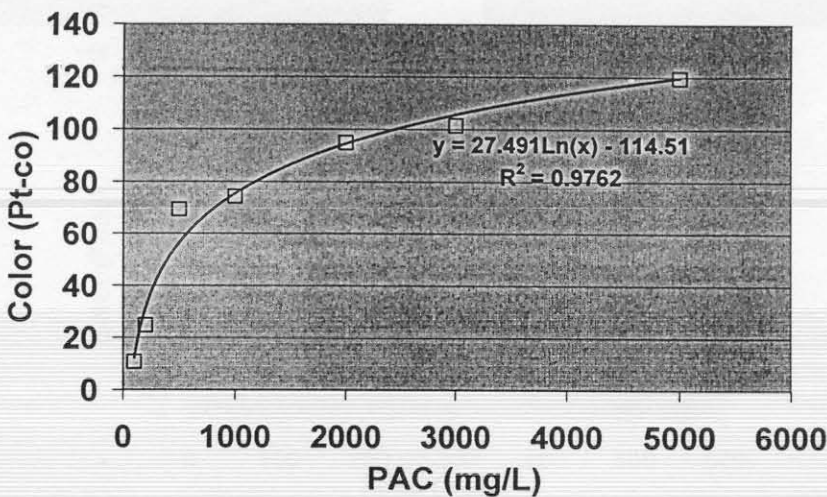
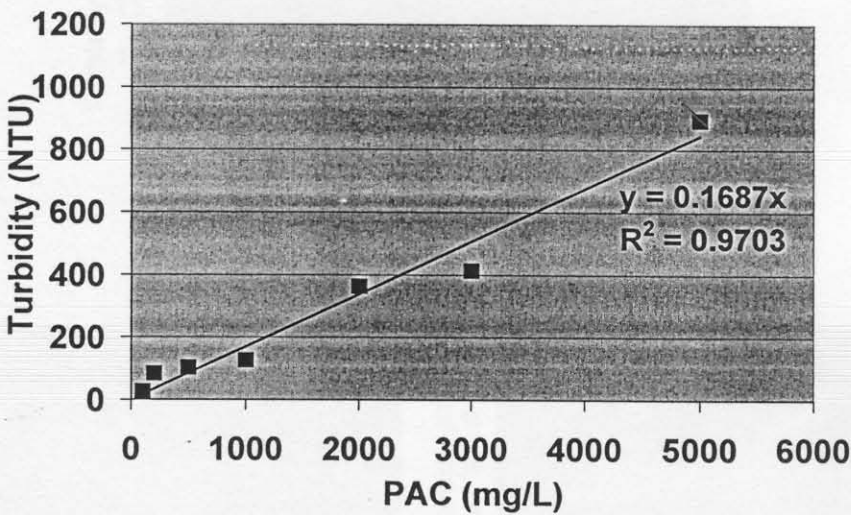


รูปที่ 4-1: กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ของสารละลายอนุภาคเบนโทไนด์

จากกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายอนุภาคเบนโทไนด์กับค่าความขุ่นและสีปรากฏ พบว่า ค่าความขุ่น และ สีปรากฏ ของสารละลายอนุภาคเบนโทไนด์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยพบว่า ค่าความเข้มข้นของสารละลายเบนโทไนด์ระหว่าง 100 - 1,000 mg/L เป็นช่วงที่สอดคล้องที่ให้ค่าความขุ่น และ ค่าสีปรากฏในช่วงที่ใกล้เคียงกับน้ำผิวดินธรรมชาติทั่วไป สำหรับขนาดการกระจายตัวของอนุภาคเบนโทไนด์ มีขนาดเฉลี่ย ( $d_{50\%}$ ) เมื่อทดสอบตัวอย่างความเข้มข้น 5 g/L และ 0.2 g/L มีค่าเท่ากับ 16  $\mu\text{m}$  และ 28  $\mu\text{m}$

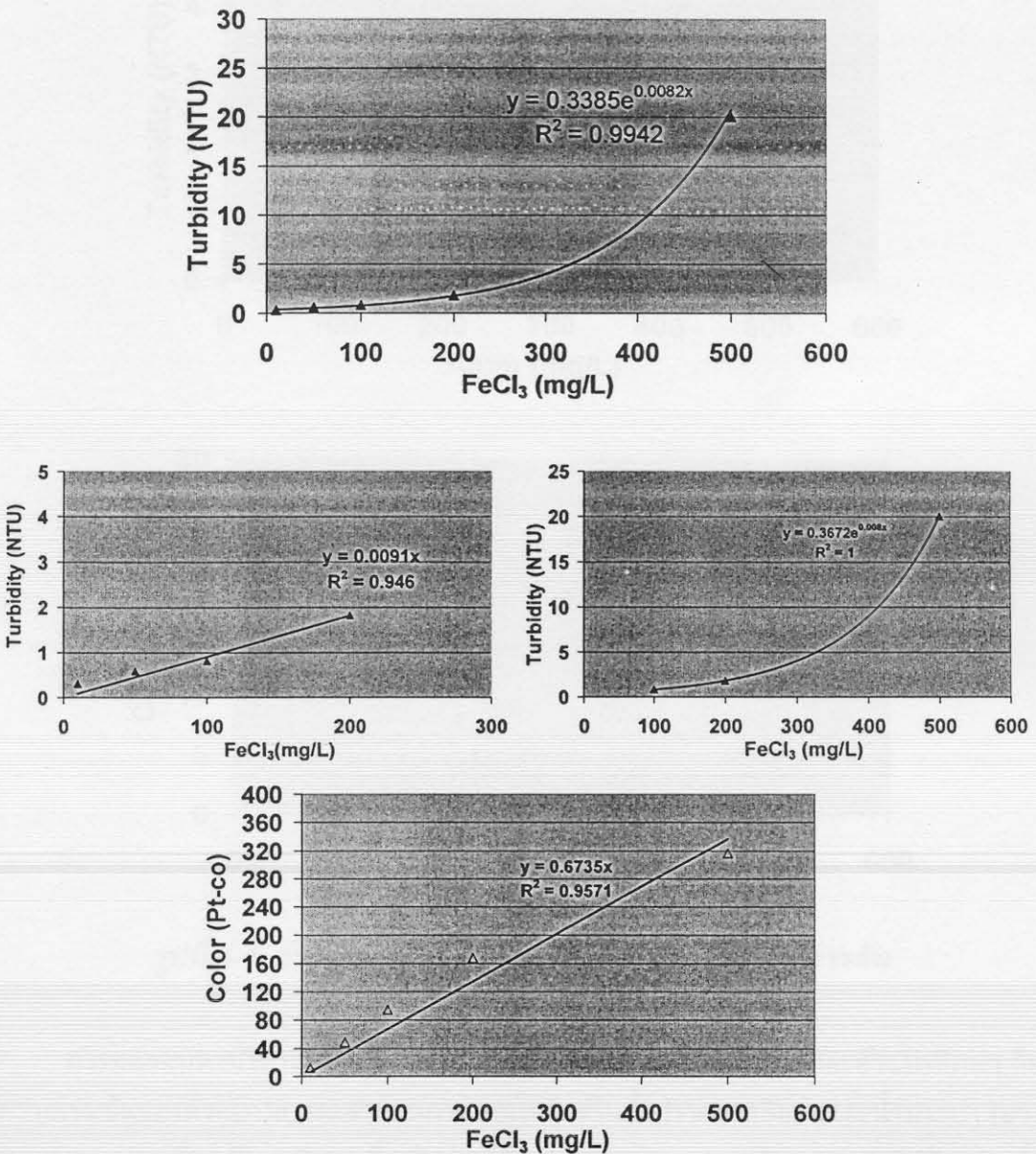
ตามลำดับ (กราฟการกระจายตัว แสดงในภาคผนวก 4) ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของขนาดอนุภาคที่ปรากฏในสารละลายเบนโทไนด์ที่เข้มข้นและเจือจางว่ามีความแตกต่างกันของอนุภาคเฉลี่ยที่วัดได้

สารละลายผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นสารดูดซับเพื่อปรับสภาพน้ำทิ้งหลังบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะในการศึกษานี้ถูกนำมาจำแนกลักษณะได้กราฟและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่น สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้น ดังรูปที่ 4-2 ซึ่งพบว่า มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงของค่าความขุ่นกับความเข้มข้นของสารละลายผงถ่านกัมมันต์ ในขณะที่ค่าสีปรากฏเป็นความสัมพันธ์แบบลอการิทึม ขนาดอนุภาคกระจายตัวซึ่งมีขนาดเฉลี่ย ( $d_{50\%}$ ) เมื่อทดสอบตัวอย่างความเข้มข้น 5 g/L และ 0.2 g/L มีค่าเท่ากับ 47  $\mu\text{m}$  และ 44  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ (กราฟการกระจายตัว แสดงในภาคผนวก 4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงถ่านกัมมันต์ค่อนข้างคงที่ในทุกค่าความเข้มข้นที่ทดสอบ



รูปที่ 4-2: กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ของสารละลายผงถ่านกัมมันต์

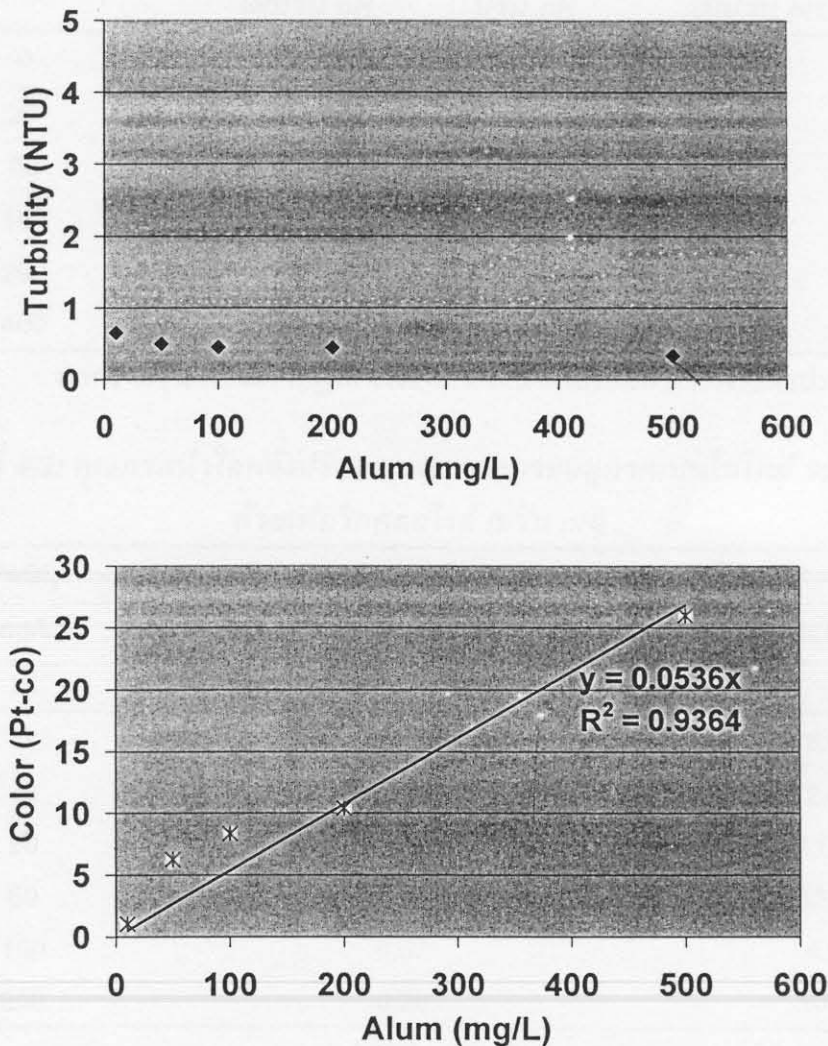
สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ สารละลายสารส้มและ สารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ถูกเลือกใช้เป็นสารสร้างตะกอนเพื่อปรับสภาพน้ำใช้ที่เป็นน้ำผิวดินและทดสอบใช้สารสร้างตะกอนสองชนิดแรกกับสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์เพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลองกับน้ำผิวดิน ทั้งนี้ได้ทำการจำแนกลักษณะของสารสร้างตะกอนทั้งสองชนิดแรกในน้ำตัวอย่างที่เป็นน้ำปราศจากอิออนที่ปรับค่ากรด-ด่าง อยู่ระหว่าง  $7.0 \pm 0.5$  ในชุดทดสอบ Jar Test ภายได้สภาวะเดียวกับการทดสอบกับตัวอย่างน้ำป้อนที่เป็นตัวอย่างน้ำผิวดิน พบว่า ได้ตะกอนของสารสร้างตะกอน คือ เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ และ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่น สีปรากฏ กับค่าความเข้มข้นสารสร้างตะกอน แสดงดังรูปที่ 4-3 และ 4-4



รูปที่ 4-3: กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์



ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นกับความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์นั้น เป็นแบบเพิ่มทวีคูณ โดยมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นตรงที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ไม่สูงกว่า 200 mg/L ในขณะที่ค่าสีปรากฏของสารละลายเฟอริกคลอไรด์กับค่าความเข้มข้นเป็นแบบเชิงเส้นตรง ค่าความขุ่นของสารละลายสารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆมีค่าคงที่ และมีค่าความขุ่นไม่สูงกว่า 1 NTU ขณะที่ค่าสีปรากฏของสารละลายสารส้มในน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง



รูปที่ 4-4: กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ของสารละลายสารส้ม

การทดสอบหาปริมาณสารปรับสภาพน้ำใช้และน้ำทิ้งที่เหมาะสมในแต่ละตัวแปรศึกษา คือ ความเข้มข้นของตัวอย่างสารละลายอนุภาคเบนโทไนด์ในน้ำปราศจากอิออนและน้ำประปา (บางชุดการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ) ซึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบผลของสารสร้างตะกอนกับตัวอย่างน้ำ

ผิวดิน กับชนิดและปริมาณสารปรับสภาพที่ความเข้มข้นต่างๆ และ รูปที่ 4-5-4-6 แสดงดังตารางที่ 4-1-4-4

ตารางที่ 4-1: คุณภาพน้ำใสหลังปรับสภาพสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์ 5,000 mg/L ด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์

FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	Turbidity (NTU)		Color (Pt-Co)	
	ไม่ปรับ pH	ปรับ pH	ไม่ปรับ pH	ปรับ pH
0	11.90	57.20	28.85	81.61
20	1.01	24.00	23.91	40.39
50	0.09	18.10	4.12	39.57
100	0.57	2.29	9.89	4.95
200	0.15	1.13 (0.91)*	4.95	3.30 (11.54)*
400	0.26	1.51 (0.42)*	ND	3.30

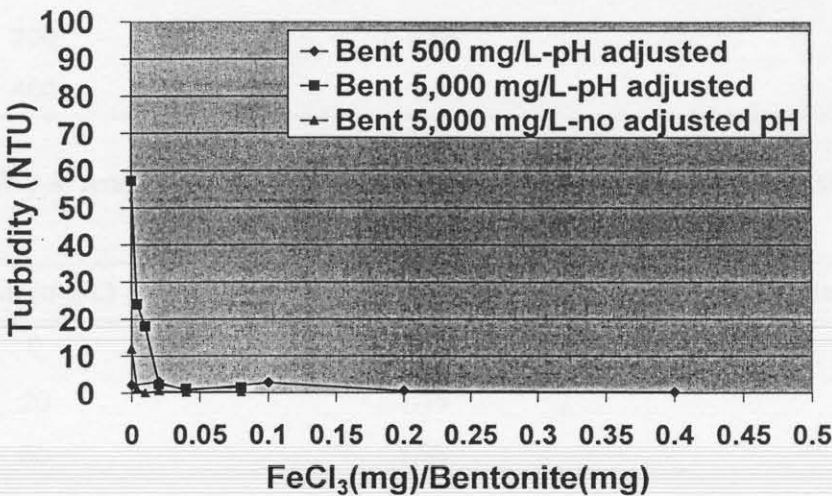
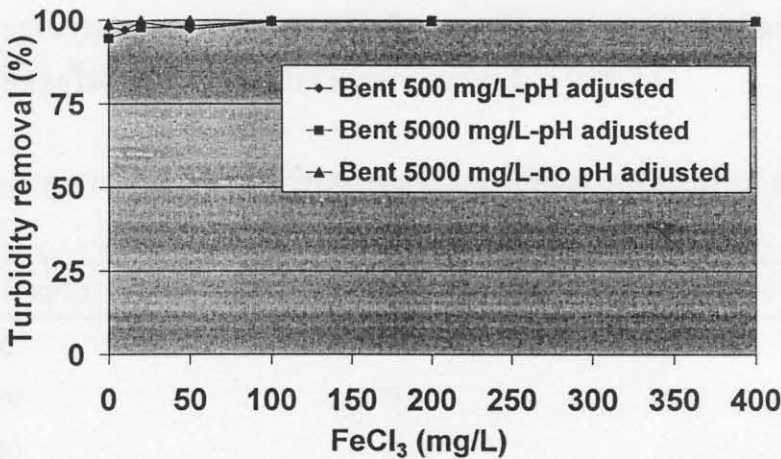
(...)\* คือ ค่าความขุ่น-ค่าสีปรากฏในน้ำใสที่สารละลายเตรียมด้วยการใช้น้ำประปาละลาย

ตารางที่ 4-2: คุณภาพน้ำใสหลังปรับสภาพสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์ 500 mg/L ด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ (ปรับ pH)

FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)
0	2.13	9.07
10	3.04	2.47
20	0.64	11.54
50	2.83	12.37
100	0.57	4.95
200	0.26	10.72

จากข้อมูลข้างต้น ค่าความขุ่นและปริมาณสีปรากฏในน้ำใสหลังเติมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ในสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์ในน้ำปราศจากอิออนความเข้มข้น 5,000 mg/L ในชุดการทดลองที่ปรับและไม่ปรับค่ากรด-ด่าง พบว่า ในสภาวะที่ไม่เติมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์พบว่า ค่าความขุ่นลดลงเนื่องจากการตกตะกอนได้ของอนุภาคเบนโทไนต์ และค่าความขุ่นและสีปรากฏมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4-5) ทั้งนี้ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เหมาะสมกรณีไม่ปรับค่ากรด-ด่างและปรับค่ากรด-ด่าง คือ 20

mg/L และ 100 mg/L ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าความขุ่นลดลงต่ำกว่า 5 NTU และเท่ากับ 10 mg/L สำหรับสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้น 500 mg/L ในสภาวะที่ปรับค่า pH สำหรับคุณภาพน้ำใสหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในสารละลายความเข้มข้น 500 mg/L (ปรับค่าการทดลอง) พบว่า ปริมาณของเฟอริกคลอไรด์เพียง 10 mg/L สามารถประกันคุณภาพน้ำที่ปรับปรุงแล้วให้มีค่าความขุ่นต่ำกว่า 5 NTU อิทธิพลของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ทำให้เกิดการสร้างตะกอน รวมอนุภาคเบนโทไนต์และตกจมในขั้นตอนการตกตะกอน โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าความขุ่นอยู่ระหว่างร้อยละ 97-99 ภายใต้ค่าอัตราส่วนระหว่างมวลเนื้อเฟอริกคลอไรด์ต่อมวลเบนโทไนต์ที่เหมาะสมระหว่าง 0.05-0.1



รูปที่ 4-5: การลดลงของค่าความขุ่นภายหลังกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน: อิทธิพลความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์

ตารางที่ 4-3 และ ตารางที่ 4-4 แสดงค่าความขุ่นและสีปรากฏที่ลดลง ความเข้มข้นของสารส้มที่ทดสอบใช้เป็นสารสร้างตะกอนในสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5,000 mg/L และ 500 mg/L ภายใต้สภาวะที่ปรับค่ากรด-ด่าง ในสภาวะที่ไม่เติมสารละลายสารส้ม พบว่าค่าความขุ่นลดลงเนื่องจากการตกตะกอนได้ของอนุภาคเบนโทไนต์และพบแนวโน้มการลดลงของค่าความขุ่นภายหลังเติมสารละลายสารส้ม ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นเมื่อทดสอบกับสารละลายเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้น 5,000 mg/L ขณะผลการลดค่าความขุ่นในสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์เจือจาง 500 mg/L พบว่าไม่สอดคล้องกับเติมสารละลายสารส้มที่เติมให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น (ดังรูปที่ 4-6) ทั้งนี้ปริมาณของสารละลายสารส้มเพียง 20 mg/L สามารถลดค่าความขุ่นให้ต่ำกว่า 5 NTU ขณะที่ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสารส้มสำหรับสารละลายเบนโทไนต์ความเข้มข้น 5,000 mg/L เท่ากับ 100 mg/L โดยประสิทธิภาพของการลดค่าความขุ่นอยู่ระหว่างร้อยละ 98-99.8 ภายใต้ค่าอัตราส่วนระหว่างมวลเนื้อเฟอริกคลอไรด์ต่อมวลเบนโทไนต์ที่เหมาะสมระหว่าง 0.05-0.1

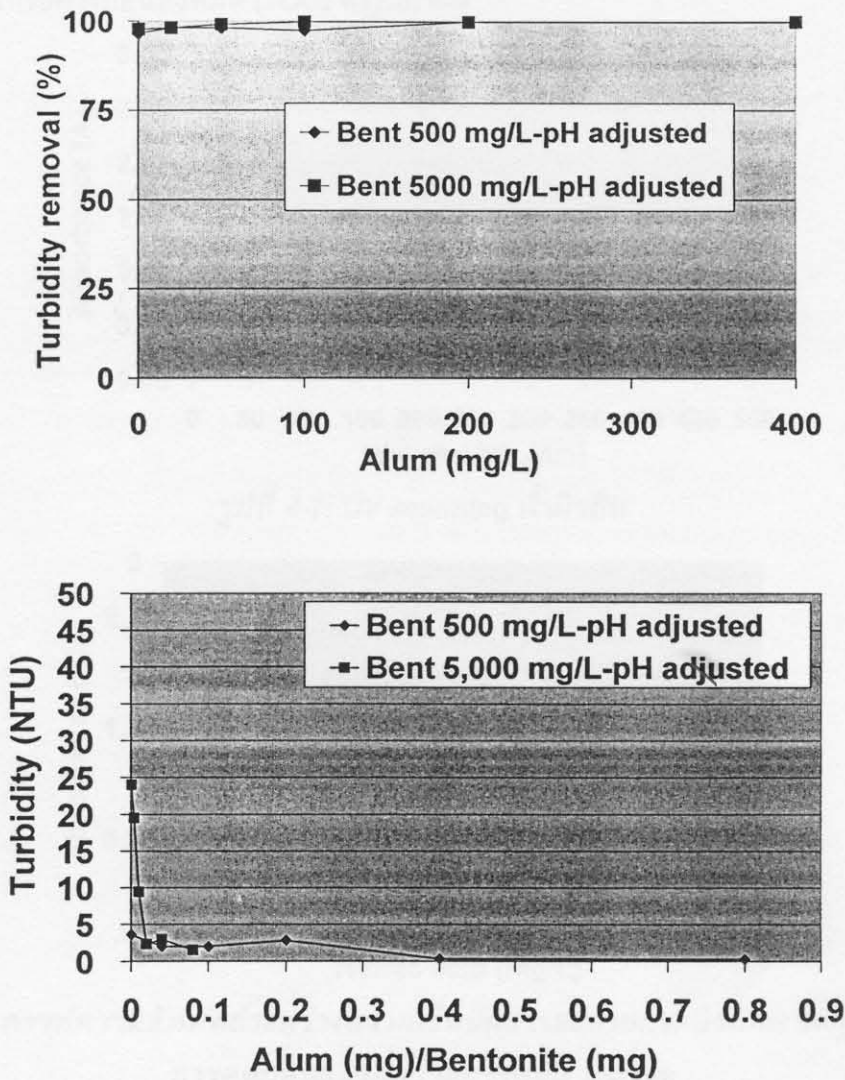
ตารางที่ 4-3: คุณภาพน้ำใสหลังปรับสภาพสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์ 5,000 mg/L ด้วยสารส้ม

Alum (mg/L)	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)
0	24.00	48.39
20	19.50	46.03
50	9.43	27.17
100	2.33	19.52
200	2.96	16.98
400	1.52	22.07

ตารางที่ 4-4: คุณภาพน้ำใสหลังปรับสภาพสารละลายอนุภาคเบนโทไนต์ 500 mg/L ด้วยสารส้ม

Alum (mg/L)	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)
0	3.61	ND
20	1.98	ND
50	1.98	ND
100	2.81	ND
200	0.34	ND
400	0.298	ND

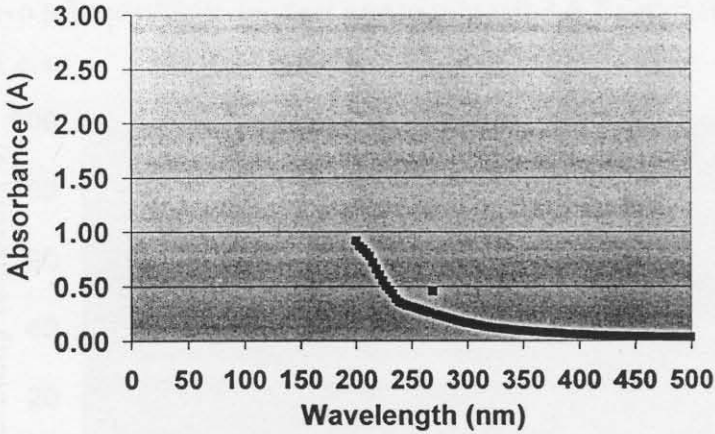




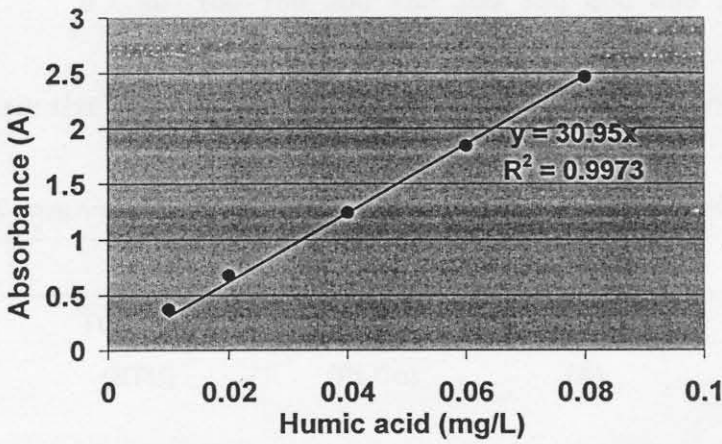
รูปที่ 4-6: การลดลงของค่าความขุ่นภายหลังกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน:  
อิทธิพลความเข้มข้นสารละลายสารส้ม

จากข้อมูลผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินดิบ (ตารางที่ 3-4) พบว่า น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์ ในช่วงต้นฤดูฝนของภูมิภาค มีค่า pH  $6.8 \pm 0.5$  มีระดับความขุ่นค่อนข้างต่ำ คือ 37.10 NTU และมีปริมาณสีปรากฏ 49.46 Pt-co จากการทำ UV Scanning ที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ได้ตั้งรูปที่ 4-7 โดยเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งวัดในรูปของค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่นแสง 254 nm มีค่าเท่ากับ 0.29 Abs เทียบเท่ากับมีสารละลายกรดฮิวมิก เท่ากับ 0.0096 mg/L ด้วยการเทียบค่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดฮิวมิก มาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 254 nm ดังรูปที่ 4-8 มีปริมาณ สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ในน้ำผิวดินมีปริมาณต่ำจนตรวจวิเคราะห์ไม่พบ และ

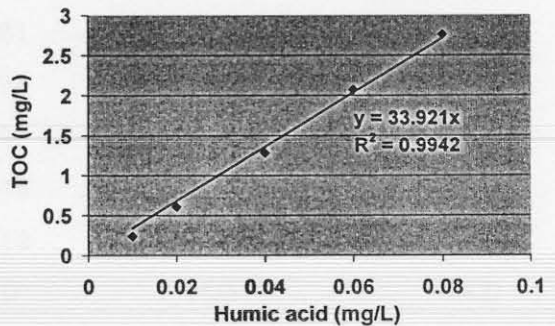
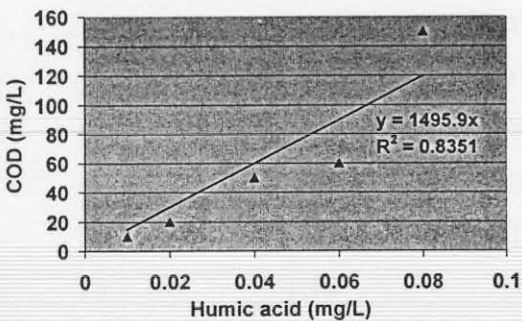
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดฮิวมิกมาตรฐานกับค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-7: UV scanning น้ำผิวดิน

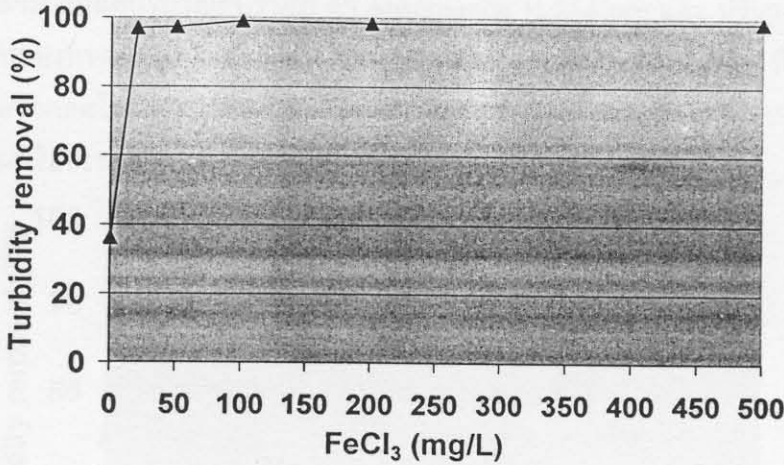


รูปที่ 4-8: กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายกรดฮิวมิกมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 nm



รูปที่ 4-9: กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายกรดฮิวมิกมาตรฐานกับค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูป COD และ TOC

ผลของปริมาณสารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ สารละลายสารส้ม และสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ ต่อคุณภาพน้ำผิวดินหลังกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ที่ pH ระหว่าง 7.0±0.5 ในชุดทดสอบ Jar Test แสดงดังตารางที่ 4-5 ถึง ตารางที่ 4-7 และ ดังรูปที่ 4-10 ถึง รูปที่ 4-12

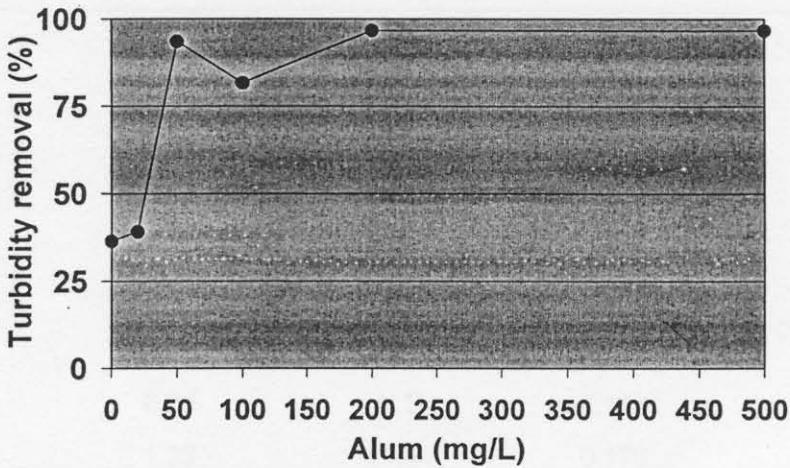


รูปที่ 4-10: ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

ตารางที่ 4-5: คุณภาพน้ำใสหลังปรับสภาพน้ำผิวดิน ด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	ตัวแปรวิเคราะห์			
	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	23.70	33.78	0.120	0.004
6	2.680	17.31	0.137	0.004
9	0.487	10.72	0.155	0.005
12	0.636	32.97	0.326	0.011
15	0.744	21.43	0.229	0.007
18	0.597	13.19	0.115	0.004
20	1.14	N.D	N.D	N.D
50	1.02	N.D	N.D	N.D
100	0.36	N.D	N.D	N.D
200	0.61	N.D	N.D	N.D
500	0.52	N.D	0.001	N.D

ค่าความขุ่น มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์สูงขึ้น ทั้งนี้ปริมาณที่เหมาะสมของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ในการลดค่าความขุ่นในน้ำผิวดิน ให้มีค่าต่ำกว่า 5 NTU คือ 20 mg/L ซึ่งเป็นค่าที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 97 ในขณะที่เดียวกันสามารถลดปริมาณสีปรากฏ ค่า absorbance ที่ 254 nm และ ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของกรดฮิวมิก ให้อยู่ในระดับต่ำจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ที่ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์สูงขึ้นไปส่งผลให้ค่าสีปรากฏ ค่า absorbance ที่ 254 nm และ ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของกรดฮิวมิกลดลงมากขึ้นกว่านี้



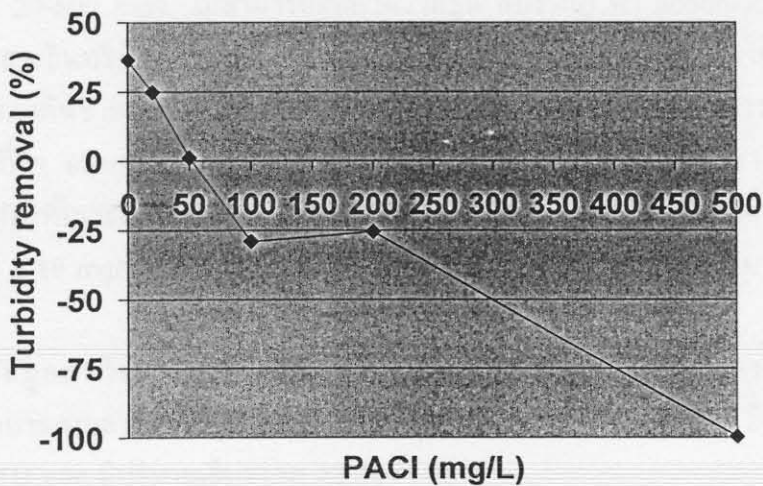
รูปที่ 4-11: ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารละลายสารส้ม

รูปที่ 4-11 และ ตารางที่ 4-6 แสดงคุณภาพน้ำภายหลังเติมปริมาณของสารละลายสารส้ม เป็นสารสร้างตะกอนในตัวอย่างน้ำผิวดิน ภายใต้สภาวะที่ปรับค่ากรด-ด่าง จากผลการทดลอง พบว่า แนวโน้มการลดลงของค่าความขุ่นอย่างชัดเจนภายหลังเติมสารละลายสารส้มที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไปถึงค่า 50 mg/L ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับทำให้ความขุ่นต่ำกว่า 5 NTU และเป็นค่าที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 93-94 ปริมาณสีปรากฏ ค่า absorbance ที่ 254 nm และ ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของกรดฮิวมิกอยู่ในระดับที่ต่ำ



ตารางที่ 4-6: คุณภาพน้ำใสหลังปรับสภาพน้ำผิวดิน ด้วยสารละลายสารส้ม

Alum (mg/L)	ตัวแปรวิเคราะห์			
	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	23.60	38.48	0.360	0.012
5	2.750	31.33	0.350	0.011
10	3.110	14.01	0.117	0.004
20	22.60	43.69	0.126	0.004
30	0.622	9.89	0.141	0.005
40	0.596	32.97	0.311	0.010
50	<b>2.41</b>	<b>12.37</b>	<b>0.005</b>	<b>0.0002</b>
100	6.79	N.D	0.123	0.004
200	1.23	11.54	0.176	0.006
500	1.23	2.47	0.194	0.006



รูปที่ 4-12: ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารละลายพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

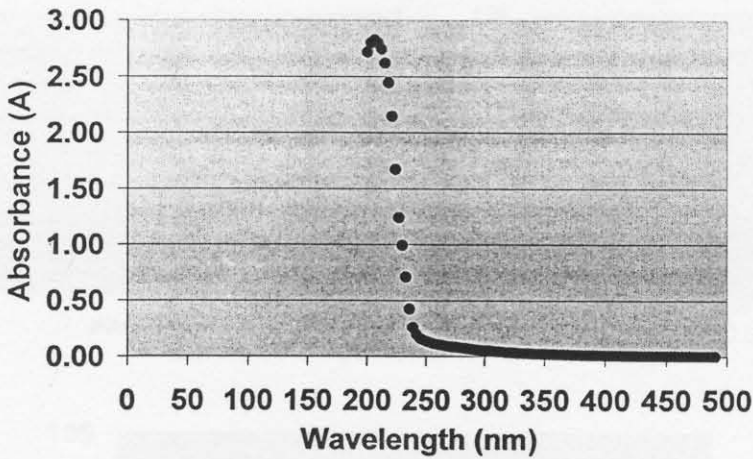


ตารางที่ 4-7: คุณภาพน้ำใสหลังปรับสภาพน้ำผิวดิน ด้วยสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์

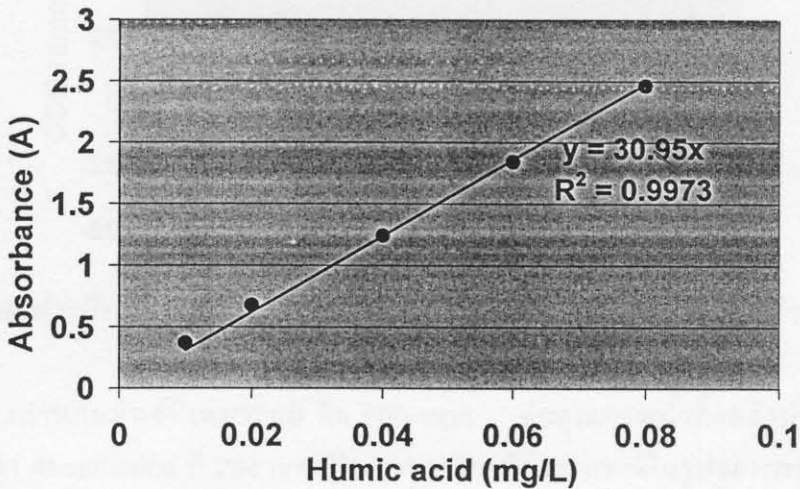
PACl (mg/L)	ตัวแปรวิเคราะห์			
	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	23.60	38.48	0.360	0.012
5	0.430	5.77	0.078	0.003
10	0.391	ND	0.025	0.001
15	0.481	2.47	0.009	0.0003
18	0.425	10.72	0.212	0.007
20	27.90	49.46	0.215	0.007
50	36.70	14.01	0.242	0.008
100	47.90	93.98	0.713	0.023
200	46.60	61.0	0.426	0.014
500	74.10	98.92	0.385	0.012

จากรูปที่ 4-12 และ ข้อมูลในตารางที่ 4-7 พบว่า ปริมาณสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ ระหว่าง 20-500 mg/L ไม่สามารถลดค่าความขุ่น สีปรากฏ ค่า absorbance ที่ 254 nm และ ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของกรดฮิวมิกในน้ำผิวดินที่มาทดสอบได้ แต่กลับส่งผลในทิศทางตรงกันข้าม คือ ทำให้ค่าความขุ่น สีปรากฏ สูงขึ้นกว่าก่อนเติมสารสร้างตะกอนดังกล่าว ในขณะที่ค่า absorbance ที่ 254 nm และ ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของกรดฮิวมิกค่อนข้างคงที่ในระดับค่าเดิม โดยทดสอบเพิ่มเติมในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่า 20 mg/L คือ ระหว่าง 3-18 mg/L และพบว่า ปริมาณสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสม คือ 10 mg/L

ข้อมูลผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ แสดงตารางที่ 3-5 พบว่า มีค่า pH  $6.0 \pm 0.5$  มีระดับความขุ่นต่ำ คือ 7.49 NTU และ มีปริมาณสีปรากฏ 23.09 Pt-co

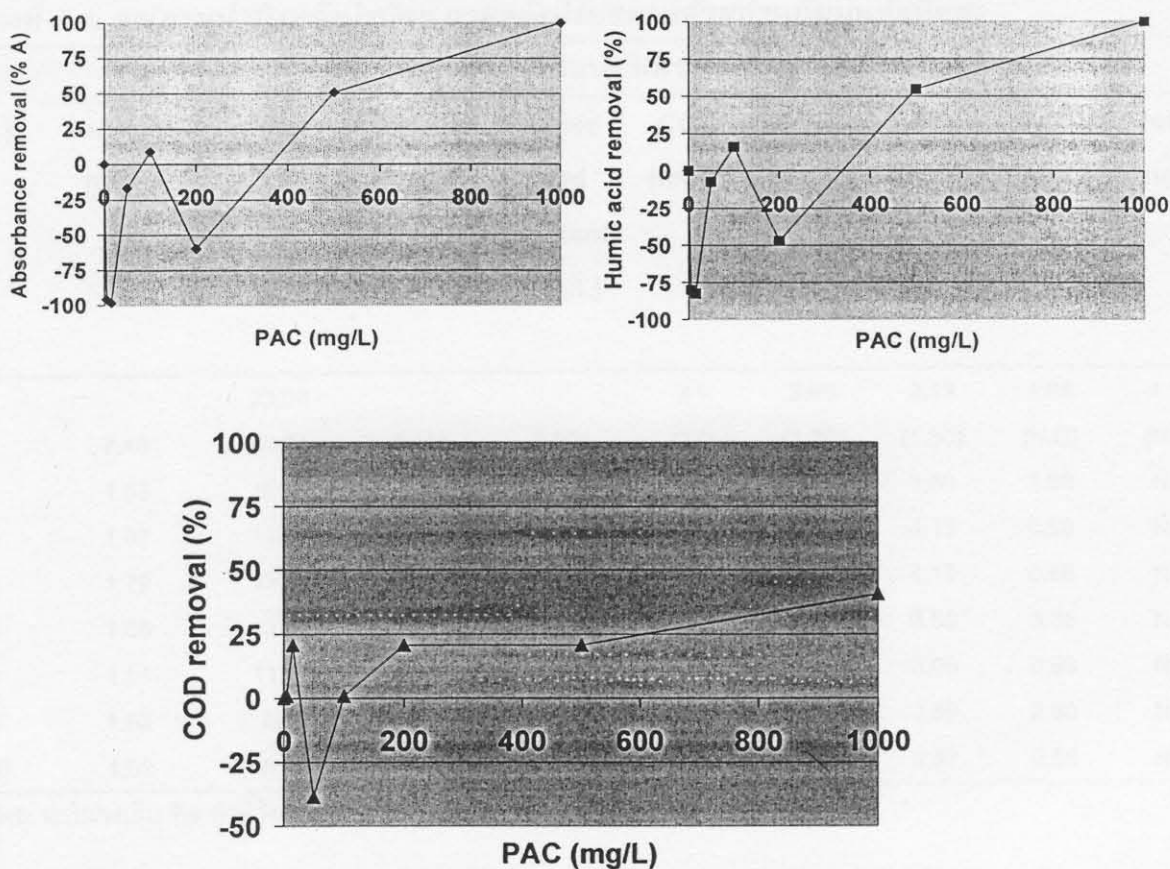


รูปที่ 4-13: UV scanning น้ำทิ้งหลังบำบัด



รูปที่ 4-14: กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายกรดฮิวมิกมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 nm

จากการทำ UV Scanning ที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4-13 โดยเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งวัดในรูปของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 254 nm มีค่าเท่ากับ 0.114 Abs เทียบเท่ากับมีสารละลายกรดฮิวมิก เท่ากับ 0.004 mg/L ด้วยการเทียบกับค่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดฮิวมิกมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 254 nm ดังรูปที่ 4-14 มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ในน้ำทิ้งหลังบำบัด เท่ากับ 0.628 mg/L ในขณะที่เป็นค่า COD ทั้งหมด เท่ากับ 41 mg/L ผลของถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่เติมลงไปปริมาณต่างๆต่อคุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัด ที่ pH ระหว่าง  $7.0 \pm 0.5$  ในชุดทดสอบ Jar Test แสดงดังรูปที่ 4-15 และตารางที่ 4-8



รูปที่ 4-15: ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งหลังบำบัดด้วยผงถ่านกัมมันต์

ผลของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม คือ 500 mg/L ต่อคุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัด พบว่าสามารถลดค่า Absorbance ที่ 254 nm ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของกรดฮิวมิก ได้สูงกว่าร้อยละ 50 โดยค่า BOD<sub>5</sub> ที่คงเหลือค้ำในน้ำทิ้งหลังบำบัด มีระดับต่ำจนไม่สามารถตรวจพบได้ อย่างไรก็ตามยังพบว่ายังมีปริมาณสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ยากและคงเหลือค้ำอยู่ในน้ำทิ้งแม้ว่าภายหลังการปรับสภาพด้วยการใช้ผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่สูงขึ้นถึง 1,000 mg/L ดังนั้นหากต้องการน้ำที่มีคุณภาพสูง ต้องมีการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการบำบัดขั้นสูงภายหลังกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง อย่างไรก็ตามก็สำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อเป็นแหล่งน้ำดิบต้นทุนสำหรับใช้เป็นน้ำใช้ ดังนั้นการเพิ่มกระบวนการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันเพื่อทำใสและเพื่อเป็นการแยกเชื้อโรคที่ทำให้เกิดโรคออกจากน้ำทิ้งๆ ก็เป็นแนวปฏิบัติที่ได้รับการยอมรับว่าทำให้ได้น้ำทิ้งกลับมาเป็นน้ำใช้ที่มีคุณภาพทั้งทางกายภาพและชีวภาพ

ตารางที่ 4-8: คุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัดฯ ภายหลังปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง

PAC (mg/L)	ตัวแปรวิเคราะห์								
	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	TP (mg/L)	TKN (mg/L)	Protein (mg/L)
		23.08			41	3.90	2.13	1.68	1.12
0	7.49	(N.D)	0.114	0.004	(27)	(1.30)	(1.50)	(N.D)	(N.D)
5	1.65	15.66	0.223	0.007	40.65	1.50	3.66	1.68	N.D
15	1.87	11.54	0.226	0.007	32.52	1.00	4.13	0.50	N.D
50	1.79	13.19	0.133	0.004	56.91	0.50	4.19	0.56	N.D
100	1.66	12.37	0.104	0.003	40.65	1.00	3.55	3.36	N.D
200	1.51	11.54	0.182	0.006	32.52	N.D	3.06	0.56	N.D
500	1.03	N.D	0.056	0.002	32.52	N.D	3.89	2.80	N.D
1,000	1.02	N.D	N.D	N.D	24.39	N.D	3.37	0.56	N.D

หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บ คือ ค่าที่วัดในตัวอย่างที่ผ่านกระดาษกรอง 0.45 µm

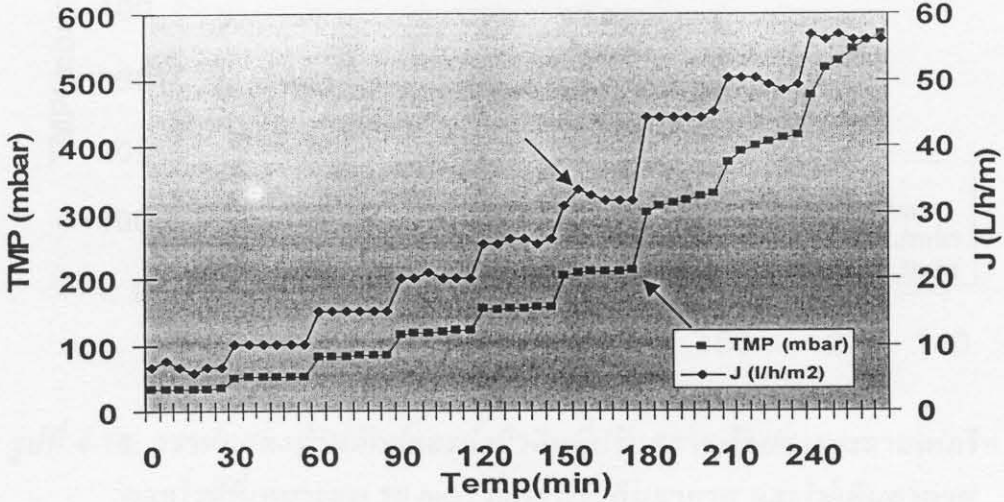
#### 4-2 ผลการศึกษาเพื่อหาค่าฟลักซ์วิกฤตที่สภาวะต่าง ๆ ของการศึกษา (น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์)

ในชุดการทดลองกับตัวอย่างน้ำป้อนจริงที่ใช้ น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ เพื่อศึกษาหาค่าฟลักซ์วิกฤตที่สภาวะต่างๆ โดยทดสอบในสภาวะที่น้ำผิวดินไม่ปรับสภาพและน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมจากการทดสอบใน Jar Test ของสารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ สารละลายเฟอริกคลอไรด์ สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม และสารละลายโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และทดสอบในสภาวะที่อัตราการเติมอากาศเป็น 0, 20, 50, 70 L/min

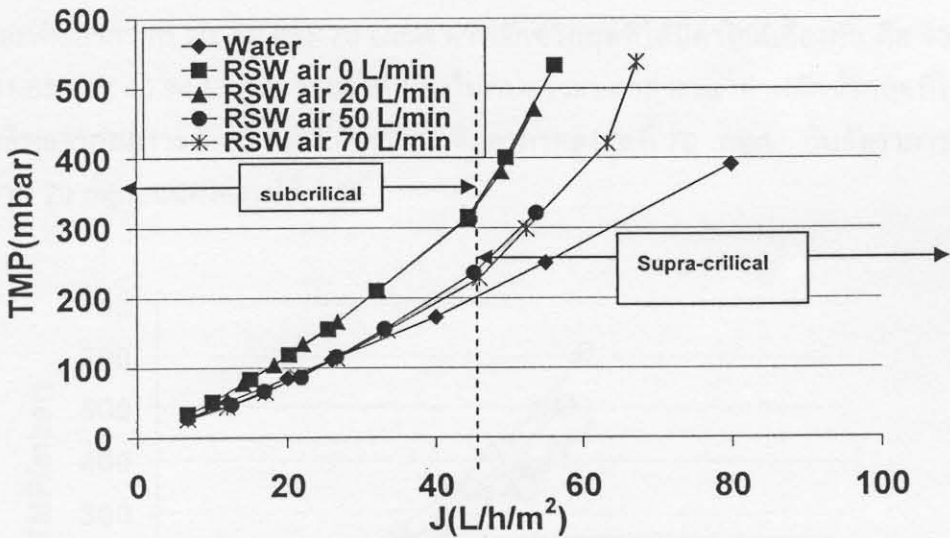
วิธีการหาค่าฟลักซ์วิกฤต นั้น เริ่มต้นด้วยการเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์คงที่ค่าแรกซึ่งไม่สูงกว่า 10 L/h/m<sup>2</sup> คงที่เป็นเวลานาน 30 นาที และสังเกตค่าความดันส่งผ่านเยื่อกรอง ถ้าพบว่าคงที่ตลอด 30 นาที ให้เพิ่มค่าฟลักซ์เป็นขั้นบันไดขั้นละ 7 L/h/m<sup>2</sup> ค่อยไปจนกระทั่งพบว่าค่าความดันผ่านเยื่อกรอง (TMP) ไม่คงที่และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่ง ณ. ที่ค่าฟลักซ์ใด ๆ นั้น โดยค่าฟลักซ์วิกฤตในแต่ละชุดการทดลอง คือ ค่าฟลักซ์ก่อนค่าฟลักซ์ที่ให้ค่าความดันผ่านเยื่อกรองสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ทั้งนี้แสดงค่าฟลักซ์วิกฤตได้จากจากกราฟความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ ค่าความดัน และเวลา ดังรูปที่ 4-16 ที่ทำการทดสอบกับน้ำป้อนผิวดินที่ไม่ปรับสภาพและไม่มีการเติมอากาศ ได้ค่าฟลักซ์วิกฤตเท่ากับ 32.08 L/h/m<sup>2</sup> โดยพบว่า ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำผิวดินที่ไม่ปรับสภาพ

และเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min ได้ค่าฟลักซ์วิกฤตเท่ากับ 32.30, 33.12, 33.47 L/h/m<sup>2</sup> ตามลำดับ (รูปที่ 4-17)



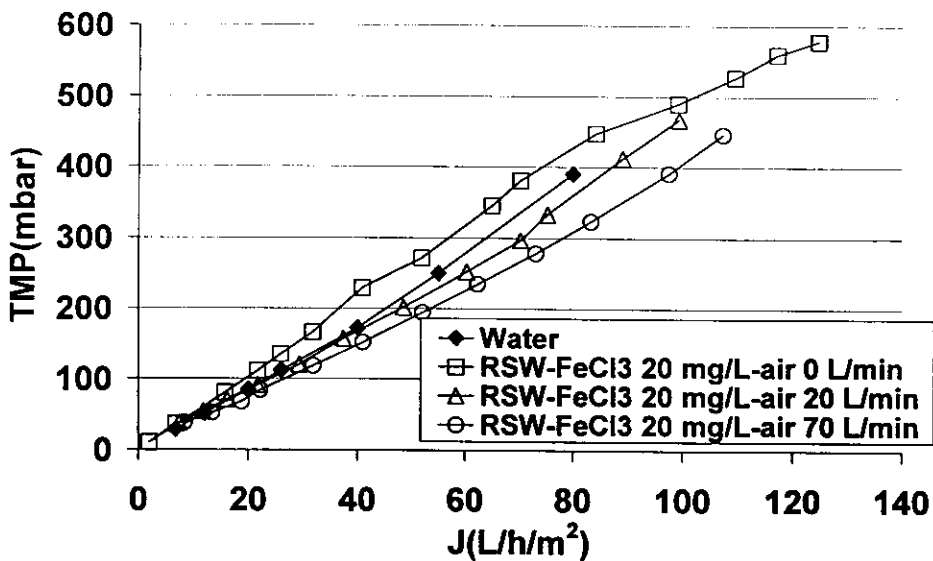
รูปที่ 4-16: กราฟความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ ค่าความดัน และเวลา



รูปที่ 4-17: กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ไม่ปรับสภาพทั้งเติมอากาศ และไม่เติมอากาศ

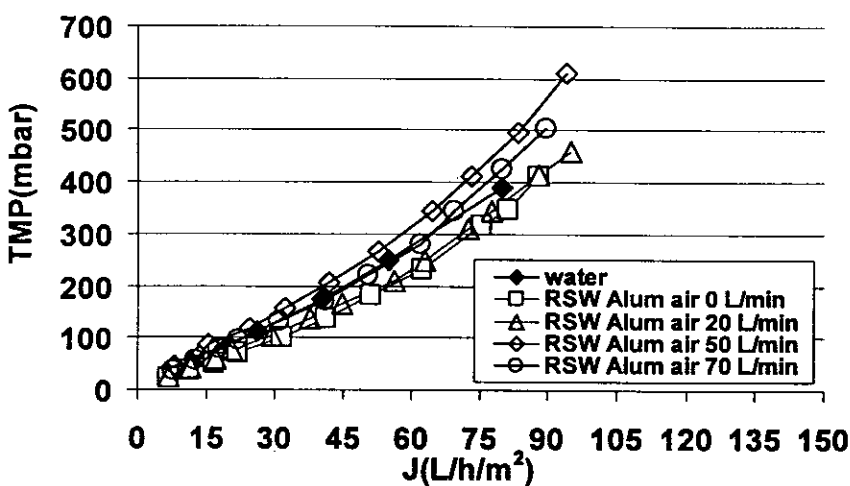
ในชุดการทดลองน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมจากการทดสอบใน Jar Test โดยใช้สารสร้างตะกอน สารละลายเพอริกคลอไรด์ที่ 20 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศ และเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min ได้ค่าฟลักซ์วิกฤตเท่ากับ 109.49, 70.30, 63.17 และ 73.16 L/h/m ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-18



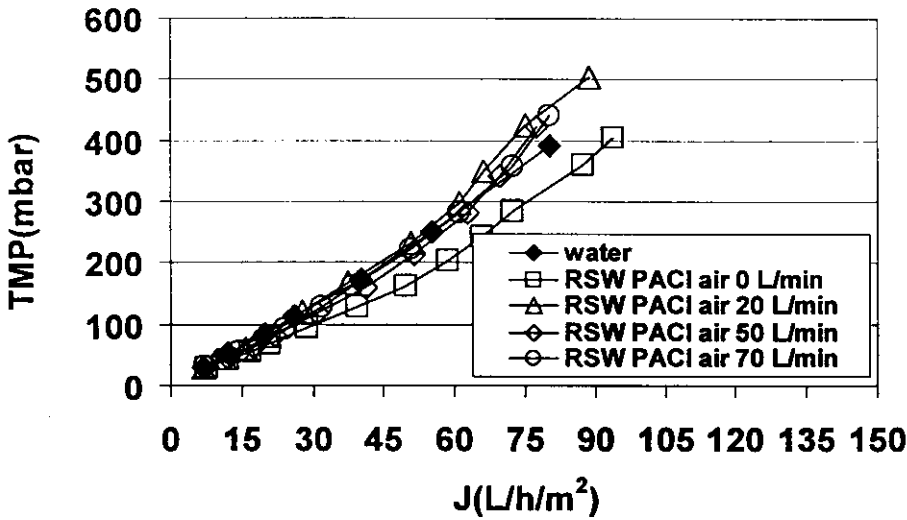


รูปที่ 4-18: กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เหมาะสม 20 mg/L ในสภาวะที่เติมอากาศ และไม่เติมอากาศ

การทดลองของชุดการทดลองน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มด้วยค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 50 mg/L จากการทดสอบใน Jar Test ของสภาวะที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min ค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 40.98, 44.68, 41.83 และ 40.94 L/h/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งไม่พบความแตกต่างของค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้ว่าได้รับอิทธิพลจากสภาวะปั่นป่วนสูงที่อัตราการเติมอากาศสูงสุดที่ 70 mg/L กับอัตราการเติมอากาศต่ำที่ 20 mg/L แสดงดังรูปที่ 4-19



รูปที่ 4-19: กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มด้วยค่าที่เหมาะสม 50 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ



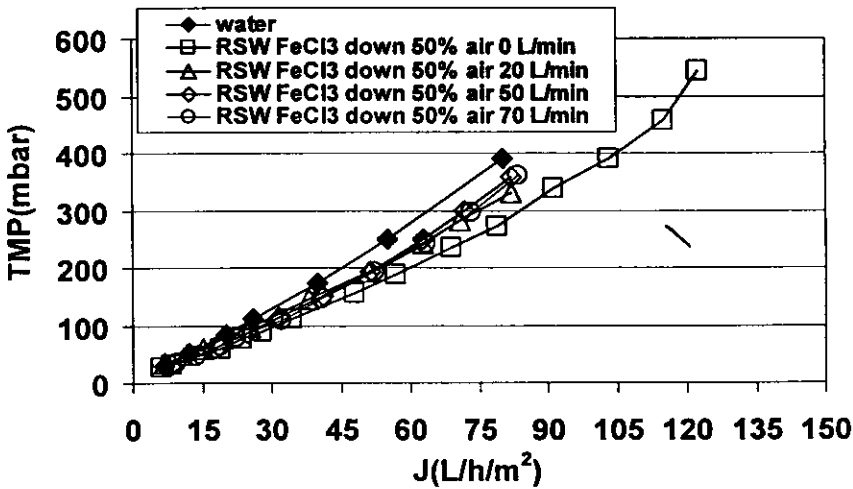
รูปที่ 4-20: กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ด้วยค่าที่เหมาะสม 10 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศ และเติมอากาศ

สำหรับน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยปริมาณที่เหมาะสมของสารละลายโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ ที่มีค่าเท่ากับ 10 mg/L ที่ทำการทดสอบใน Jar Test ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min พบว่า ค่าฟลักซ์วิกฤตของชุดการทดลองที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ 20 L/min มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 28.74 และ 27.87 L/h/m<sup>2</sup> ตามลำดับ และค่าฟลักซ์วิกฤตของชุดการทดลองที่เติมอากาศ 50 และ 70 L/min นั้นก็มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน คือ 40.94 และ 38.32 L/h/m<sup>2</sup> ตามลำดับซึ่งเป็นค่าฟลักซ์ที่พบว่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 0.5 เท่าตัวจากสภาวะที่มีการอัดอากาศการเติมอากาศต่ำ ดังรูปที่ 4-20

จากผลการทดลอง ดังข้างต้น นั้น แสดงให้เห็นว่า ค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้รับในแต่ละสภาวะที่มีการปรับสภาพและไม่ปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอนต่างชนิดกันส่งผลต่อค่าฟลักซ์วิกฤตดังนี้ คือ การเติมสารสร้างตะกอนทุกชนิดส่งผลให้ขนาดของอนุภาครวมเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่า 20 ไมครอน มีลักษณะเป็นปุย มีความพรุน โดยพบว่า สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม และสารละลายโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ มีผลทำให้ค่าฟลักซ์วิกฤตเพิ่มขึ้นประมาณ 0.25 เท่าเปรียบเทียบกับผลในชุดการทดลองที่ไม่มีการปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอนชนิดใดๆ ขณะที่การปรับสภาพน้ำผิวดินด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์มีศักยภาพในการทำให้ค่าฟลักซ์วิกฤตเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุดถึง 2-3 เท่าตัว เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารสร้างตะกอนใน 2 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว เนื่องจากลักษณะของฟล็อกและโครงสร้างชั้นเค้กที่มีความพรุนสูงกว่า ผลของการเติมอากาศร่วมกับการปรับสภาพ ด้วยสารสร้างตะกอนของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ หรือ สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้น

ของค่าฟลักซ์วิกฤตอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการเติมอากาศสูงขึ้นในตัวอย่างน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์พบว่าผลเชิงบวกต่อการเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์วิกฤตในระดับหนึ่ง

ชุดการทดลองที่ใช้น้ำผิวดินที่ปรับสภาพที่ด้วยสารเคมีที่ค่าต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% จากการทดสอบใน Jar Test โดยเติมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ 10 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min และทำการทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต ค่าที่ได้เท่ากับ 91.25, 51.68, 62.75 และ 52.41 L/h/m<sup>2</sup> ตามลำดับดังรูปที่ 4-21 ซึ่งค่าที่ได้ในสภาวะนี้มีค่าต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้รับในสภาวะที่มีการเติมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ 20 mg/L

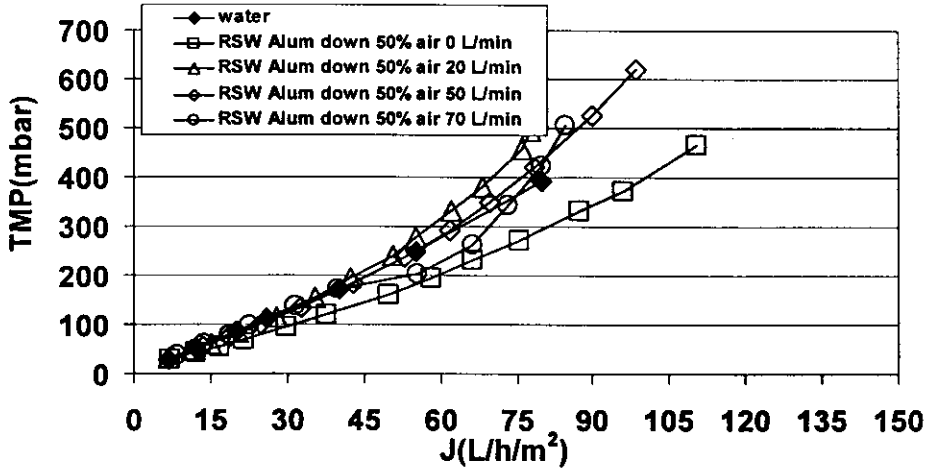


รูปที่ 4-21: กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% 10 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ

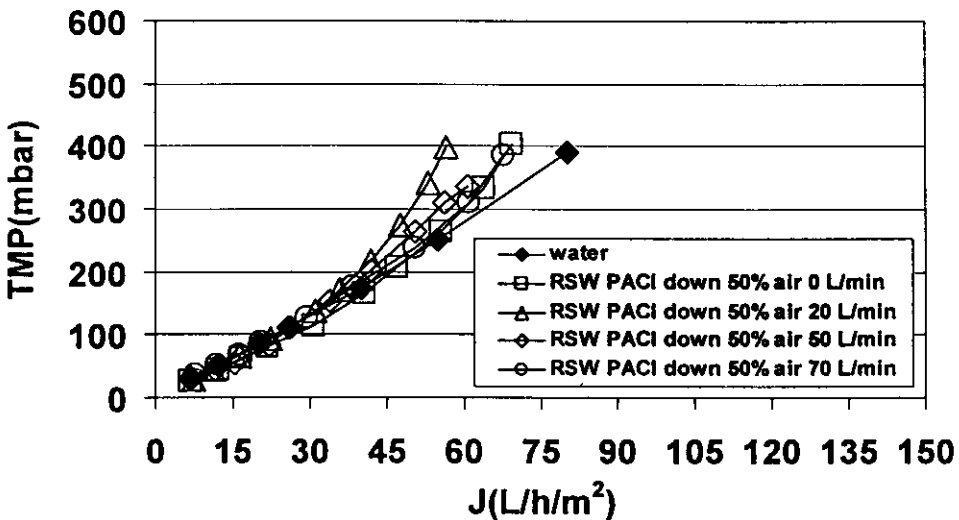
การทดลองของชุดการทดลองของน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% จากการทดสอบใน Jar Test โดยใช้ความเข้มข้น 25 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min ค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้เท่ากับ 37.56, 27.90, 32.44 และ 39.78 L/h/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้รับในสภาวะที่มีการเติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มในความเข้มข้นที่เหมาะสมเล็กน้อย ขณะที่ไม่มีความแตกต่างกันของค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้รับทั้งในสภาวะที่มีอัตราความปั่นป่วนสูงและอัตราความปั่นป่วนต่ำจากการเติมอากาศที่อัตราต่างๆ รวมทั้งไม่มีความแตกต่างของค่าฟลักซ์วิกฤตเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองในสภาวะที่ไม่มีการปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอน (แสดงในรูปที่ 4-22)

ในชุดการทดลองที่เติมสารละลายโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% ในการทดสอบใน Jar Test ความเข้มข้นเท่ากับ 5 mg/L ลงในน้ำผิวดินเพื่อปรับสภาพ และทำการหาค่าฟลักซ์วิกฤตในสภาวะที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min พบว่า

ค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 30.69, 31.02, 26.98 และ 29.31 L/h/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมสารละลายโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% ให้ค่าฟลักซ์วิกฤตไม่แตกต่างจากในสภาวะที่มีการเติมในปริมาณที่เหมาะสม และการเติมอากาศในอัตราที่สูงถึง 70 L/min ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มของค่าฟลักซ์วิกฤตเช่นกัน ดังรูปที่ 4-23



รูปที่ 4-22: กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% 25 mg/L ทั้งที่ไม่เติม อากาศและเติมอากาศ



รูปที่ 4-23: กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% 5 mg/L ทั้งที่ไม่เติม อากาศและเติมอากาศ

จากค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้ในสภาวะต่างๆทั้งที่ทำการปรับสภาพ ไม่ปรับสภาพ เติมอากาศและไม่เติมอากาศของน้ำผิวดิน สรุปค่าไว้ในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9: ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำผิวดินที่ไม่เติมและเติมสารปรับสภาพ ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ

ตัวอย่างน้ำป้อน	ค่าฟลักซ์วิกฤต(L/h/m <sup>2</sup> )				
	การเติมสารสร้างตะกอน	0 L/min	20 L/min	50 L/min	70 L/min
1. น้ำผิวดินดิบ(ไม่เติมสารสร้างตะกอน)		32.08	32.30	33.12	33.47
2. น้ำผิวดินปรับสภาพด้วย FeCl <sub>3</sub> 20 mg/L		109.49	70.30	63.17	73.16
3. น้ำผิวดินปรับสภาพด้วย FeCl <sub>3</sub> 10 mg/L		91.25	51.68	62.75	52.41
4. น้ำผิวดินปรับสภาพด้วย Alum 50 mg/L		40.98	44.68	41.83	40.94
5. น้ำผิวดินปรับสภาพด้วย Alum 25 mg/L		37.56	27.90	32.44	39.78
6. น้ำผิวดินปรับสภาพด้วย PACL 10 mg/L		28.74	27.87	40.94	38.32
7. น้ำผิวดินปรับสภาพด้วย PACL 5 mg/L		30.69	31.02	26.98	29.31

ข้อมูลวิเคราะห์น้ำผิวดินดิบจาก อ่างเก็บน้ำ ม. สงขลานครินทร์ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำ 4 ครั้ง ระหว่างการศึกษาในชุดการทดลองเพื่อหาค่าฟลักซ์วิกฤต โดย พบว่า ค่า pH อยู่ในช่วง 7±0.5 ค่าความขุ่น มีค่าระหว่าง 2.3-3.8 NTU ค่าปริมาณสีทั้งหมด ระหว่าง 10-19 Pt-Co และทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ช่วงความยาวคลื่น 254 nm เพื่อนำไปเปรียบเทียบหาค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปกรดฮิวมิคจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดฮิวมิคมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 254 nm ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์สรุปดังตารางที่ 4-10

ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำทิ้งหลังบำบัดฯ ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า สารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่พิกสูง คือ ที่ 1037 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของอีเทอร์ (C-O-C), 1101 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของอัลกอฮอล์ (C-O), 1423 cm<sup>-1</sup> และ 1481 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิก (COOH), 1643 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนพันธะคู่ (C=C), 3425 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของอะโรมาติก-อัลคีน (C-H) ซึ่ง เป็น หมู่ ฟังก์ ชัน ของ สาร ฮิว มิ ก ( ดัง ภา ค ผน ว ก 5 )

<http://wwwchem.csustan.edu/Tutorials/quickir.htm>

ข้อมูลการวิเคราะห์น้ำผิวดินที่ไม่ทำการปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอน ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min หลังจากผ่านการกรองด้วยระบบเยื่อกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันที่มีแผ่นเยื่อกรองแบบจมตัว โดยทำการวิเคราะห์ค่า pH ค่าความขุ่น



ค่าปริมาณสีทั้งหมด และ ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm พบว่าคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยมีค่าความขุ่นต่ำกว่า 1 NTU มีค่าปริมาณสีทั้งหมดลดลงเพียงเล็กน้อย ค่าการดูดกลืนแสง UV และแปรผลเป็นค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกคงเหลือในน้ำหลังกรอง (ดังแสดงในตารางที่ 4-11) ซึ่งมีคงเหลืออยู่ในปริมาณเท่าเดิมแสดงให้เห็นได้ว่าขนาดรูกรองของเยื่อกรองที่ใช้ไม่สามารถกักกันสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปกรดฮิวมิกซึ่งละลายน้ำได้ ทั้งนี้การปรับสภาพน้ำผิวดินด้วยชั้นคอนกรีตอื่น ๆ จึงมีความจำเป็นที่ต้องนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน

ตารางที่ 4-10: คุณภาพน้ำผิวดินดิบ จากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์

วันที่ทำการเก็บตัวอย่าง (วัน/เดือน/ปี)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
26 มิ.ย. 49	7.40	3.61	18.96	0.116	0.004
17 ก.ค. 49	7.50	2.79	11.54	0.144	0.005
1 ส.ค. 49	7.31	2.31	10.72	0.096	0.003
15 ส.ค. 49	7.33	3.76	9.89	0.065	0.002

ตารางที่ 4-11: คุณภาพน้ำใสภายหลังจากการกรองที่ไม่ปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอน ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ

ปริมาณการเติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	7.38±0.04	0.49±0.23	12.36±0.00	0.089±0.003	0.003±0.000
20	7.41±0.01	0.35±0.00	10.31±0.50	0.100±0.002	0.003±0.000
50	7.46±0.01	0.62±0.47	11.96±0.70	0.109±0.001	0.004±0.000
70	7.47±0.03	0.29±0.01	11.13±0.50	0.107±0.006	0.004±0.000

ตารางที่ 4-12: คุณภาพน้ำใสหลังผ่านการกรอง ที่ปรับสภาพน้ำผิวดินด้วยสารละลาย  
เฟอร์ริกคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสม 20 mg/L ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ

ปริมาณการ เติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	7.64±0.35	0.47±0.12	9.48±0.50	0.096±0.007	0.003±0.000
20	7.86±0.03	0.30±0.14	6.19±0.70	0.030±0.002	0.001±0.000
50	7.52±0.04	0.33±0.12	10.31±0.50	0.100±0.002	0.003±0.000
70	7.53±0.01	0.24±0.01	9.90±0.70	0.094±0.004	0.003±0.000

คุณภาพน้ำผิวดินที่ทำการปรับสภาพน้ำด้วยสารสร้างตะกอน สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสมคือ 20 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min ผลการวิเคราะห์พบว่า คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยในชุดการทดลองที่ทำการเติมอากาศ 20 L/min มีค่าปริมาณสีทั้งหมด ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกต่ำกว่าในชุดการทดลองอื่น ที่ทำการปรับสภาพน้ำด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสม โดยในชุดการทดลองอื่นนั้นได้ค่าออกมาใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ไม่ทำการปรับสภาพน้ำ แสดงในตารางที่ 4-12

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำใสที่ทำการปรับสภาพน้ำด้วย สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มในปริมาณที่เหมาะสมหลังผ่านการกรอง ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min โดยมีค่าความขุ่นต่ำกว่า 1 NTU และค่าปริมาณสีทั้งหมดต่ำกว่า 10 Pt-Co ในทุกชุดการทดลอง แต่มีค่า pH ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิก ใกล้เคียงกับน้ำผิวดินดิบที่ไม่ปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอน รวมทั้งน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอนของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (ตารางที่ 4-13)

ตารางที่ 4-13: คุณภาพน้ำใสหลังผ่านการกรอง ที่ปรับสภาพน้ำผิวดินด้วยสารละลาย โอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มในปริมาณที่เหมาะสม 50 mg/L ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ

ปริมาณการ เติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	7.39±0.03	0.46±0.14	8.62±0.70	0.099±0.004	0.003±0.000
20	7.79±0.04	0.38±0.04	7.01±0.50	0.097±0.001	0.003±0.000
50	7.94±0.04	0.51±0.20	8.25±0.70	0.096±0.001	0.003±0.000
70	7.79±0.00	0.35±0.07	9.82±0.00	0.102±0.001	0.003±0.000

วิเคราะห์น้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโพสลิออลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสม ทั้งที่ไม่เติมอากาศ และเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min คุณภาพน้ำหลังจากผ่านการกรอง พบว่า ค่า pH อยู่ในช่วงเป็นกลาง ค่าความขุ่นต่ำกว่า 1 NTU ในทุกชุดการทดลอง และพบว่าในชุดการทดลองที่เติมอากาศ 70 L/min มีค่าปริมาณสีทั้งหมด ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกต่ำกว่าในทุกชุดการทดลอง คือ 4.95±0.00 Pt-Co, 0.027±0.000 Abs และ 0.001±0.000 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 4-14)

ตารางที่ 4-14: คุณภาพน้ำใสหลังผ่านการกรอง ที่ปรับสภาพน้ำผิวดินด้วยด้วย สารละลายโพสลิออลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสม 10 mg/L ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ

ปริมาณการ เติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	7.40±0.00	0.34±0.01	10.27±0.60	0.106±0.004	0.004±0.000
20	7.70±0.00	0.31±0.00	11.96±0.70	0.109±0.001	0.004±0.000
50	7.61±0.01	0.62±0.13	9.82±0.00	0.102±0.004	0.003±0.000
70	7.72±0.00	0.37±0.12	4.95±0.00	0.027±0.000	0.001±0.000

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินพบว่า การเติมสร้างตะกอนเพื่อปรับสภาพน้ำทั้ง 3 ชนิด รวมทั้งการเติมอากาศไม่ส่งผลทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการกรองน้ำผิวดิน

ดินที่ไม่ปรับสภาพ โดยคุณภาพน้ำทางกายภาพในรูปของค่าความขุ่น ค่าปริมาณสีทั้งหมดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง ยกเว้นเพียงบางชุดการทดลองเท่านั้นที่มีค่าคุณภาพน้ำที่ดีกว่าในชุดการทดลองอื่น ในขณะที่ผลของการเติมสารสร้างตะกอนทั้งสามชนิดไม่ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปละลายน้ำของกรดฮิวมิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการใช้สารดูดติดผิว เช่น ผงถ่านกัมมันต์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับการกรองด้วยเยื่อกรองดังกล่าวเพื่อเพิ่มค่าฟลักซ์ขณะเดินระบบและเป็นการรักษาค่าฟลักซ์ขณะเดินระบบให้คงที่ เนื่องจากลดการเกิดฟาวลิงจากสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ธรรมชาติละลายน้ำ สำหรับข้อมูลคุณภาพน้ำผิวดินที่ทำการปรับสภาพน้ำด้วยสารสร้างตะกอน สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ในปริมาณที่ต่ำกว่าค่าเหมาะสม 50% ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min แสดงในตารางที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์พบว่า มีค่า pH ในทุกชุดการทดลองอยู่ในสภาวะเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย ค่าความขุ่นต่ำกว่า 1 NTU ค่าปริมาณสีทั้งหมด ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิคมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง

คุณภาพน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min พบว่า ค่า pH เป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย ส่วนความขุ่นมีค่าต่ำกว่า 1 NTU ค่าปริมาณสีทั้งหมด ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิคไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ไม่ปรับสภาพ ดังในตารางที่ 4-16

**ตารางที่ 4-15: คุณภาพน้ำใสหลังผ่านการกรอง ที่ปรับสภาพน้ำผิวดิน ด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% (10 mg/L) ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ**

ปริมาณการ เติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	7.37±0.00	0.29±0.20	9.48±0.50	0.092±0.001	0.003±0.000
20	7.51±0.04	0.28±0.03	9.98±0.00	0.093±0.001	0.003±0.000
50	7.94±0.04	0.21±0.07	9.48±0.50	0.093±0.002	0.003±0.000
70	7.58±0.04	0.27±0.05	9.97±0.00	0.092±0.002	0.003±0.000

**ตารางที่4-16: คุณภาพน้ำใสหลังผ่านการกรอง ที่ปรับสภาพน้ำผิวดินด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% (25 mg/L) ไม่เติมอากาศ และเติมอากาศ**

ปริมาณการ เติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	7.37±0.00	0.88±0.10	9.90±0.70	0.101±0.003	0.003±0.000
20	7.70±0.00	0.40±0.13	9.07±0.00	0.099±0.000	0.003±0.000
50	7.61±0.01	0.39±0.01	11.13±0.50	0.107±0.006	0.004±0.000
70	7.72±0.00	0.35±0.06	8.25±0.70	0.102±0.001	0.003±0.000

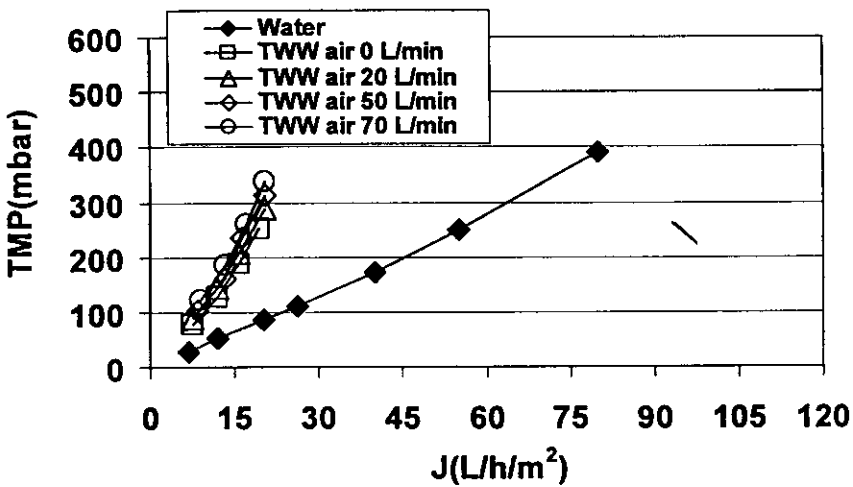
จากการวิเคราะห์ค่าคุณภาพน้ำผิวดินที่ปรับสภาพด้วย สารละลายโพสลิอูมิเนียมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% ทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min พบว่า คุณภาพน้ำมีค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกดีกว่าในชุดการทดลองอื่นที่ปรับสภาพน้ำด้วยสารสร้างตะกอน รวมทั้งในชุดการทดลองที่ไม่มีการปรับสภาพน้ำ และมีค่าความขุ่นไม่เกิน 0.5 NTU ในทุกชุดการทดลองและค่าปริมาณสีทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 10 Pt-Co (ตารางที่ 4-17)

**ตารางที่4-17: คุณภาพน้ำใสหลังผ่านการกรองที่ปรับสภาพน้ำผิวดินด้วยสารละลายโพสลิอูมิเนียมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% (5 mg/L) ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ**

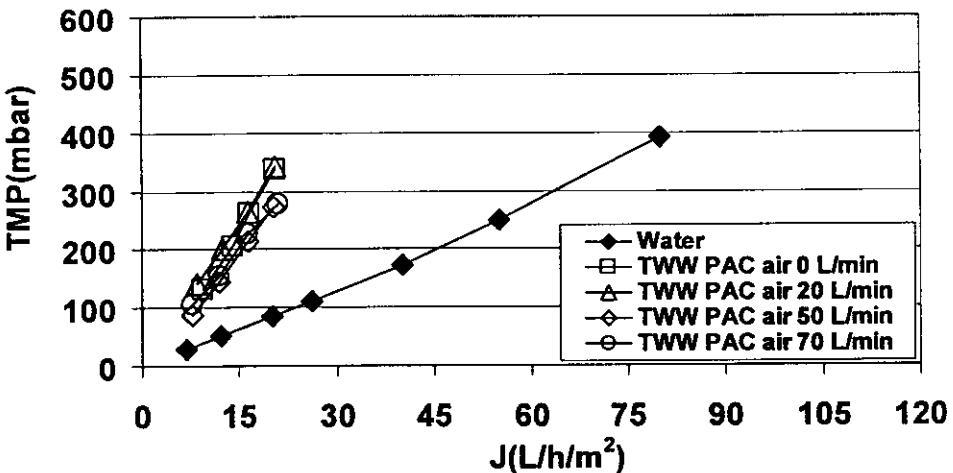
ปริมาณการ เติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์				
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-Co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)
0	7.56±0.04	0.32±0.03	9.89±0.80	0.063±0.006	0.002±0.002
20	7.77±0.06	0.32±0.05	6.77±0.70	0.095±0.001	0.002±0.002
50	7.73±0.01	0.25±0.03	8.00±0.34	0.028±0.003	0.001±0.000
70	7.69±0.01	0.24±0.04	8.24±0.80	0.031±0.004	0.001±0.001

**4-3 ผลการศึกษาเพื่อหาค่าฟลักซ์วิกฤตที่สภาวะต่าง ๆ ของการศึกษา (น้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลสงขลานครินทร์)**

ชุดการทดลองตัวอย่างน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง จากบ่อน้ำบำบัดโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ศึกษาหาค่าฟลักซ์วิกฤตที่สภาวะต่าง ๆ โดยทดสอบในสภาวะที่น้ำทิ้งหลังบำบัดที่ไม่เต็มและเต็มสารคูดัดผิวที่เป็นผงถ่านกัมมันต์ชนิดผงในปริมาณที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองใน Jar Test สำหรับน้ำตัวอย่างที่ไม่เต็มผงถ่านกัมมันต์ และทดสอบในสภาวะที่ไม่เต็มอากาศและที่อัตราการเติมอากาศเป็น 20, 50, 70 L/min ได้ค่าฟลักซ์วิกฤตใกล้เคียงกันเท่ากับ 7.68, 7.68, 8.54 และ 9.11 L/h/m<sup>2</sup> (ดังรูปที่ 4-24) ซึ่งผลของการเติมอากาศที่ปริมาตรสูงไม่ส่งผลให้ค่าฟลักซ์วิกฤตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-24: กราฟแสดงค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำหลังบำบัดขั้นที่สอง ในสภาวะที่ไม่เต็มอากาศและเติมอากาศ



รูปที่ 4-25: กราฟแสดงค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำหลังบำบัดขั้นที่สองที่เติมผงถ่านกัมมันต์ด้วยค่าที่เหมาะสม 500 mg/L ในสภาวะที่ไม่เต็มอากาศและเติมอากาศ

การทดลองในชุดการทดลองน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง ที่เติมผงถ่านกัมมันต์ชนิดผงด้วยค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 500 mg/L จากการทดสอบใน Jar Test ค่าฟลักซ์วิกฤตของในสภาวะที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min พบว่าเท่ากับ 9.39, 8.39, 7.68 และ 7.68 L/h/m<sup>2</sup> (ดังรูปที่ 4-25)เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่น้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองไม่เติมผงถ่านกัมมันต์แล้ว แสดงให้เห็นว่าไม่มีความแตกต่างกันของค่าฟลักซ์วิกฤตที่เพิ่มขึ้นจากการปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ (เพื่อลดค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำในตัวอย่างน้ำทิ้งดังกล่าว) ทั้งนี้ต้องพิจารณาร่วมกับคุณภาพน้ำทิ้งหลังกรองซึ่งจะรายงานต่อไป จะเห็นได้ว่าการเติมสารดูดติดผิวและการเติมอากาศไม่มีผลทำให้ค่าฟลักซ์วิกฤตเพิ่มสูงขึ้นโดยค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้สรุปดังตารางที่ 4-18

**ตารางที่ 4-18: ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำหลังบำบัดขั้นที่สองที่ไม่เติมและเติมสารดูดติดผิว ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ**

ตัวอย่างน้ำป้อน	ค่าฟลักซ์วิกฤต(L/h/m <sup>2</sup> )			
	การเติมสารดูดติดผิว	0 L/min	20 L/min	50 L/min
1. น้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง (ไม่เติมสารดูดติดผิว)	7.68	7.68	8.54	9.11
2. น้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง (เติมสารดูดติดผิว PAC 500 mg/L)	9.34	8.39	7.68	7.68

ข้อมูลวิเคราะห์น้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลสงขลา นครินทร์ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้ง ระหว่างการศึกษาในชุดการทดลองเพื่อหาค่าฟลักซ์วิกฤต โดย พบว่า ค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7 ค่าความขุ่นมีค่าระหว่าง 7-11.5 NTU ค่าปริมาณสีทั้งหมดอยู่ระหว่าง 9-27.5 Pt-co รวมทั้งทำการวิเคราะห์ค่า TSS (Total Suspended Solids), SBOD (Soluble Biochemical Oxygen Demand-5 days), BOD<sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand-5 days), SCOD (Soluble Chemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), TKN (Total Kjeldahl Nitrogen), TP (Total Phosphorus) และค่า Protein ผลการวิเคราะห์สรุปดังตารางที่ 4-19 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำทิ้งหลังบำบัดด้วยเทคนิค FTIR พบว่า สารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่พิกสูง คือ ที่ความยาวคลื่นที่ 1148 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของอัลกอฮอล์ (C-O), 1384 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันเมทิล C-H และหรือเป็นหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิก (COOH), 1631 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนพันธะคู่ (C=C), 3386 cm<sup>-1</sup> เป็นหมู่ฟังก์ชันของอะโรมาติก-อัลคีน (C-H) ซึ่ง เป็น หมู่ ฟังก์ ชัน ของ สาร อี ว มิ ก ( ดัง ภาพ ผ น ว ก 5 ) <http://wwwchem.csustan.edu/Tutorials/quickir.htm> และใช้การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง



UV ที่ช่วงความยาวคลื่น 254 nm เพื่อนำไปเปรียบเทียบหาค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปกรดฮิวมิก จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดฮิวมิกมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 254 nm

**ตารางที่ 4-19: คุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง จากบ่อบำบัด  
โรงพยาบาลสงขลานครินทร์**

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง (วัน/เดือน/ปี)	ตัวแปรวิเคราะห์												
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-co)	UV-254 (A)	Humic acid Content (mg/L)	COD (mg/L)	sCOD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	SBOD <sub>5</sub> (mg/L)	TP (mg/L)	TSS (mg/L)	TKN (mg/L)	Protein (mg/L)
3 ต.ค. 49	6.86	7.23	9.07	0.180	5.571	55.2	36.8	4.2	1.6	1.92	2.0	1.68	1.12
8 ธ.ค. 49	6.55	11.2	27.20	0.190	5.881	73.6	36.8	4.2	1.4	2.03	2.5	2.80	1.14

ข้อมูลการวิเคราะห์น้ำที่ไม่ปรับสภาพด้วยสารทั้งที่ไม่เติมอากาศและเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min หลังจากผ่านการกรองด้วยระบบเยื่อกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันที่เยื่อกรองแบบจุ่มตัว โดยทำการวิเคราะห์ค่า pH ค่าความขุ่น ค่าปริมาณสีทั้งหมด ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm ค่า BOD<sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand-5 days) ค่า COD (Chemical Oxygen Demand) ค่าTKN (Total Kjeldahl Nitrogen) ค่า TP (Total Phosphorus) และค่า Protein พบว่าค่าคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี โดยมีค่าความขุ่นต่ำกว่า 1 NTU ค่าปริมาณสีทั้งหมดและค่าโปรตีน มีค่าน้อยมากจนเครื่องไม่สามารถตรวจวัดได้ ปริมาณกรดฮิวมิกคงเหลือในน้ำเพอมีเอทระหว่าง 1.4-2.9 mg/L ลดลงประมาณร้อยละ 50 เช่นเดียวกับค่าสารอินทรีย์ในรูป COD ส่วนปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD<sub>5</sub> ละลายน้ำมีค่าไม่แตกต่างจากค่าในตัวอย่างก่อนทำการกรอง ขณะที่ค่าตัวแปรวิเคราะห์ตัวอื่นๆ ก็มีค่าต่ำลงดังแสดงในตารางที่ 4-20

**ตารางที่ 4-20: คุณภาพน้ำใสของน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง ภายหลังจากการกรองที่ไม่  
ปรับสภาพด้วยผงถ่านกัมมันต์ ไม่เติมอากาศและเติมอากาศ**

ปริมาณ การ เติม อากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์										
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	TP (mg/L)	TKN (mg/L)	Protein (mg/L)	
0	6.40	0.808	ND	0.082	2.54	18.8	1.1	1.292	1.96	ND	
20	6.97	0.813	ND	0.091	2.81	15.2	1.7	1.328	1.12	ND	
50	6.78	0.857	ND	0.093	2.88	22.8	0.9	1.385	1.68	ND	
70	6.63	0.809	ND	0.044	1.36	9.08	0.7	1.806	2.52	ND	

ตารางที่ 4-21: คุณภาพน้ำใสของน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง ภายหลังจากการกรองที่เติมสารดูดติดผิวที่เป็นผงถ่านกัมมันต์ชนิดผงด้วยค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 500 mg/L ไม่เติม

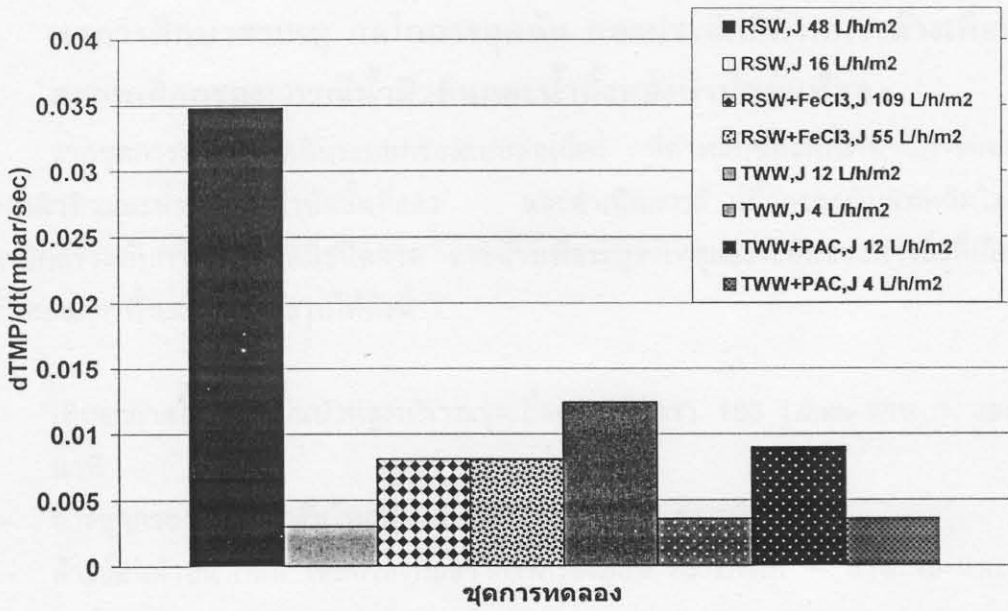
อากาศและเติมอากาศ

ปริมาณการเติมอากาศ (L/min)	ตัวแปรวิเคราะห์									
	pH	Turbidity (NTU)	Color (Pt-co)	UV-254 (A)	Humic acid content (mg/L)	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	TP (mg/L)	TKN (mg/L)	Protein (mg/L)
0	6.29	0.767	ND	0.017	0.53	13.62	1.2	1.563	1.12	ND
20	7.82	0.533	ND	0.055	1.70	17.24	1.4	1.702	1.12	ND
50	6.43	0.487	ND	0.054	1.67	14.02	1.3	1.692	0.56	ND
70	7.72	0.546	ND	0.055	1.70	13.48	1.7	1.749	1.12	ND

คุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองที่ทำการเติมผงถ่านกัมมันต์ด้วยค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 500 mg/L ทั้งที่ไม่เติมอากาศ และเติมอากาศที่ 20, 50 และ 70 L/min แสดงตารางที่ 4-21 ผลการวิเคราะห์พบว่าคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดีและมีผลใกล้เคียงกับค่าคุณภาพน้ำที่ไม่เติมสารดูดติดผิว โดยพบว่าค่าค่าปริมาณสีทั้งหมดและค่าโปรตีน มีค่าน้อยมากจนเครื่องไม่สามารถตรวจวัดได้ และค่าความขุ่นต่ำกว่า 1 NTU เช่นเดียวกัน ขณะที่การปรับสภาพน้ำทิ้งด้วยผงถ่านกัมมันต์สามารถลดปริมาณกรดฮิวมิกในตัวอย่างได้มากกว่าสภาวะที่ไม่เติม โดยมีกรดฮิวมิกเหลือค้างในน้ำเพอมีเอทระหว่าง 0.5-1.7 mg/L ซึ่งลดกว่าร้อยละ 80

4-4 ผลการศึกษาเพื่อทดสอบสมรรถนะการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การศึกษาเพื่อทดสอบสมรรถนะการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยติดตามค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนขณะกรองที่เวลาหนึ่งๆ ซึ่งแสดงถึงค่าความเร็วของการเกิดฟาวลิงในรูปของค่า dTMP/dt ของน้ำผิวดิน และน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองที่ค่าฟลักซ์คงที่ โดยเลือกชุดการทดลองของน้ำผิวดินที่เดินระบบด้วยค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าและต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% (48 และ 16 L/h/m<sup>2</sup>) โดยไม่มีการเติมอากาศและไม่เติมสารปรับสภาพ และชุดการทดลองของน้ำผิวดินที่เดินระบบด้วยค่าฟลักซ์วิกฤตและต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% (106 และ 55 L/h/m<sup>2</sup>) ชุดการทดลองของน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองเลือกชุดการทดลองที่เดินระบบด้วยค่าที่สูงกว่า และต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% (12 และ 4 L/h/m<sup>2</sup>) โดยไม่เติมผงถ่านกัมมันต์และไม่เติมอากาศ และชุดการทดลองที่เติมผงถ่านกัมมันต์ด้วยค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 500 mg/L และไม่มีการเติมอากาศ โดยผลศึกษาแสดงดังรูปที่ 4-26



รูปที่ 4-26: กราฟแสดงอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงเมื่อเดินระบบต่อเนื่องที่ค่าฟลักซ์คงที่ในชุดการทดลองต่าง ๆ

จากค่า dTMP/dt ดังรูปที่ 4-26 พบว่า มีอัตราเร็วของการเกิดฟาวลิงเท่ากับ 0.035 mbar/sec เมื่อกรองตัวอย่างน้ำผิวดินที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าวิกฤต 50% ที่ 48 L/h/m<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าสูงมากกว่า 11 เท่าตัวเปรียบเทียบกับเมื่อกรองตัวอย่างที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าวิกฤต 50% ที่ 16 L/h/m<sup>2</sup> ซึ่งเป็นค่าฟลักซ์ที่ต่ำกว่า 3 เท่า ผลของการเติมเพอริกคลอไรด์ในน้ำผิวดินที่เดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์สูง คือ 106 และ 55 L/h/m<sup>2</sup> พบว่า อัตราเร็วของการเกิดฟาวลิงมีค่าไม่แตกต่างกัน คือ ประมาณ 0.008 mbar/sec ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าในสภาวะที่ไม่มีการเติมเพอริกคลอไรด์ ประมาณ 4 เท่าตัว สำหรับตัวอย่างน้ำทิ้งหลังบำบัด เมื่อเดินระบบกรองอย่างต่อเนื่อง ที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าวิกฤต คือที่ 12 L/h/m<sup>2</sup> นั้น พบว่า อัตราเร็วของการเกิดฟาวลิง เท่ากับ 0.0125 mbar/sec ขณะที่เมื่อกรองตัวอย่างที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าวิกฤต คือ 4 L/h/m<sup>2</sup> นั้น ค่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงมีค่าต่ำกว่าประมาณ 3 เท่าตัว คือ เท่ากับ 0.004 mbar/sec ซึ่งสอดคล้องกับค่าฟลักซ์ที่ต่ำกว่า 3 เท่าเช่นกัน และผลของการเติมผงถ่านกัมมันต์ในน้ำทิ้งหลังบำบัด ก่อนการกรองอย่างต่อเนื่องมีผลทำให้อัตราเร็วของการเกิดฟาวลิงลดลงประมาณ 1.4 เท่า เมื่อกรองที่ค่าฟลักซ์ 12 L/h/m<sup>2</sup> ทั้งนี้การเติมผงถ่านกัมมันต์ไม่ให้เห็นความแตกต่างของค่าอัตราเร็วฟาวลิงเมื่อกรองอย่างต่อเนื่องที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าวิกฤตที่ 4 L/h/m<sup>2</sup>

#### 4-5 ผลการศึกษาสาเหตุ กลไกการอุดตัน และประสิทธิภาพการล้างเพื่อฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง: กรณีน้ำผิวดินและน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง

จากชุดการทดสอบที่เดินระบบกรองแบบต่อเนื่อง ที่ค่าฟลักซ์คงที่ทั้งในชุดการทดลองของน้ำผิวดินและน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง และดำเนินการล้างเยื่อกรองด้วยเทคนิคไฮโดรไดนามิกส์ร่วมกับการใช้สารเคมีชนิดกรด และด่างเพื่อระบุสาเหตุและระดับของฟาวลิงที่เกิดขึ้น ซึ่งขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพที่ใช้สรุปได้ดังนี้

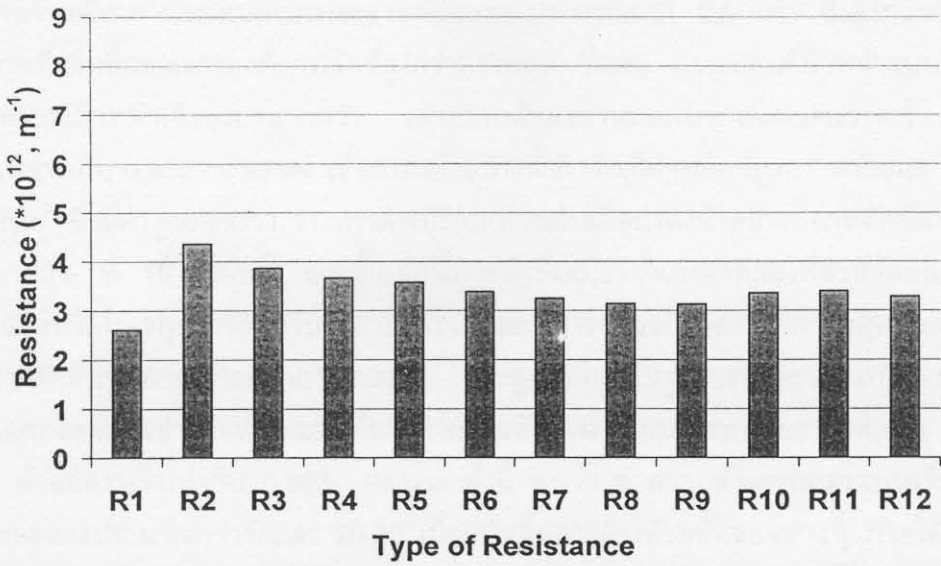
- เดิมอากาศให้ความดันป้อนสูงบริเวณชุดเยื่อกรองที่อัตรา 100 L/min–นาน 1 และ 5 นาที
- ล้างชุดกรองด้วยน้ำกลั่นไหลเอื่อยที่ผิวเยื่อกรอง นาน 1 นาที
- ล้างย้อนด้วยน้ำกลั่น โดยกรองที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> – นาน 15 และ 30 นาที
- ล้างย้อนด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.1 N ที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> –นาน 1 และ 2 ชั่วโมง
- แช่ชุดเยื่อกรองและล้างย้อนด้วยสารละลายต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 N –นาน 1 และ 2 ชั่วโมง
- ล้างสารเคมีปนเปื้อนในชุดเยื่อกรองด้วยน้ำกรองแบบล้างย้อนที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> – นาน 30 นาที

ทำการวัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรอง (Membrane permeability) ในแต่ละชุดการทดลองก่อน และภายหลังทำการล้างฟื้นฟูสภาพเยื่อกรองแต่ละขั้นตอน ผลการทดลองในชุดการทดลองน้ำผิวดินที่เดินระบบอย่างต่อเนื่องที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าวิกฤต 50 % (46 L/h/m<sup>2</sup>) ในสภาวะที่ไม่เติมอากาศและไม่เติมเพอร์ฟลอร์ไรด์ โดยค่าความต้านทาน (R) ที่ปรากฏก่อนการล้างและภายหลังการล้างด้วยขั้นตอนต่างๆ มีความหมายดังนี้

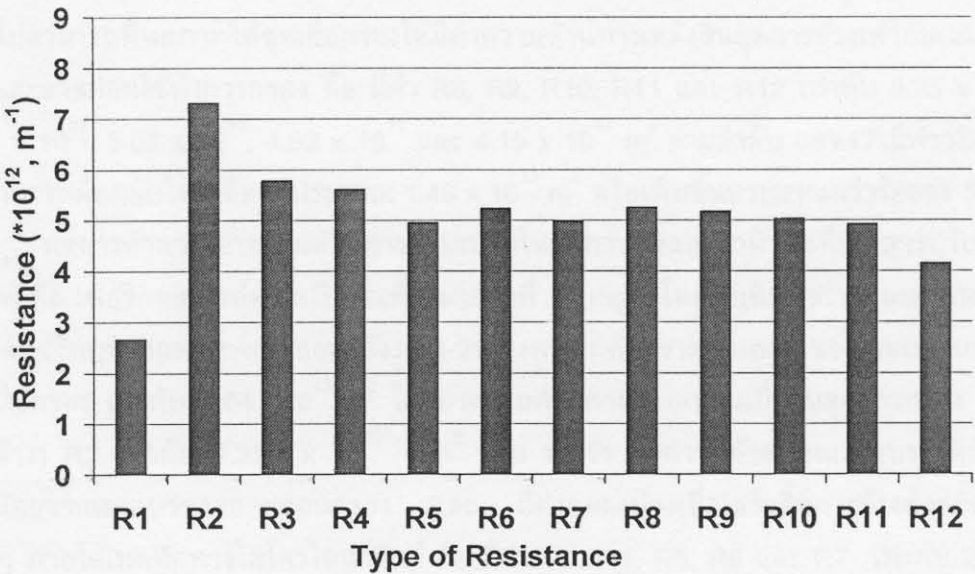
- R1 เยื่อกรองสะอาดก่อนทำการกรอง
- R2 เยื่อกรองหลังสิ้นสุดการกรองในชุดการทดลอง (ก่อนทำการล้างด้วยขั้นตอนต่างๆ)
- R3 เยื่อกรองหลังการเติมอากาศให้ความดันป้อนสูงบริเวณชุดเยื่อกรองที่อัตรา 100 L/min–นาน 1 นาที
- R4 เยื่อกรองหลังการเติมอากาศให้ความดันป้อนสูงบริเวณชุดเยื่อกรองที่อัตรา 100 L/min–นาน 5 นาที
- R5 เยื่อกรองหลังการล้างชุดกรองด้วยน้ำกลั่นไหลเอื่อยที่ผิวเยื่อกรอง นาน 1 นาที
- R6 เยื่อกรองหลังการล้างโดยล้างย้อนด้วยน้ำกรองที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup>

- R7 เยื่อกรองหลังการล้างโดยล้างย้อนด้วยน้ำกรองที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> นาน 30 นาที
- R8 เยื่อกรองหลังการล้างด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.1 N ที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> –นาน 1 ชั่วโมง
- R9 เยื่อกรองหลังการล้างด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.1 N ที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> นาน 2 ชั่วโมง
- R10 เยื่อกรองหลังการแช่ชุดเยื่อกรองและล้างย้อนด้วยสารละลายต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N นาน 1 ชั่วโมง
- R11 เยื่อกรองหลังการแช่ชุดเยื่อกรองและล้างย้อนด้วยสารละลายต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N นาน 2 ชั่วโมง
- R12 เยื่อกรองหลังการล้างล้างสารเคมีบนเป็อนในชุดเยื่อกรองด้วยน้ำกรองแบบล้างย้อนที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> 15 L/h/m<sup>2</sup> นาน 30 นาที

รูปที่ 4-27 พบว่า มีค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรอง เท่ากับ  $2.61 \times 10^{12} \text{ m}^2$  โดยค่าความต้านทานเมมเบรนหลังสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $4.36 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งสูงกว่าค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาดกว่า 2 เท่าตัว ขณะที่ค่าความต้านทานภายหลังการล้างลดลงกว่าร้อยละ 10 เป็นลำดับในแต่ละขั้นตอนการล้างด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ ซึ่งสามารถลดและกำจัดฟาวลิงแบบผันกลับได้ (เดิมอากาศ ล้างด้วยน้ำเอื้อย และล้างย้อนด้วยน้ำกลั่น) คือ R3, R4, R5, R6 และ R7 เท่ากับ  $3.87 \times 10^{12}$ ,  $3.67 \times 10^{12}$ ,  $3.58 \times 10^{12}$ ,  $3.39 \times 10^{12}$ ,  $3.25 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง ทั้งนี้ผลของการล้างฟื้นฟูสภาพด้วยการใช้สารเคมีที่เป็นกรดซิตริกและต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการกรองย้อนที่อัตราการกรองย้อนต่ำ นาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้น สามารถลดค่าความต้านทานเมมเบรนคงเหลืออยู่ได้อีกเพียง เล็กน้อย และไม่สามารถฟื้นฟูสภาพให้ชุดเยื่อกรองมีค่าความต้านทานเท่ากับเมมเบรนสะอาดก่อนใช้ทำการกรอง คือ มีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 เท่ากับ  $3.14 \times 10^{12}$ ,  $3.13 \times 10^{12}$ ,  $3.36 \times 10^{12}$ ,  $3.40 \times 10^{12}$  และ  $3.29 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้ที่คงเหลือค้างอยู่ในชุดเมมเบรนเนื่องจากมีค่าความต้านทานสุดท้ายสูงกว่าค่าความต้านของเมมเบรนสะอาดร้อยละ 20



รูปที่ 4-27: กราฟแสดงค่าความต้านทานของเยื่อกรองในชุดการการทดลองน้ำผิวดินที่เดินค่าต่อเนื้อที่สูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50 % (48 L/h/m<sup>2</sup>) ไม่เติมอากาศและไม่เติมเพอริกคลอไรด์



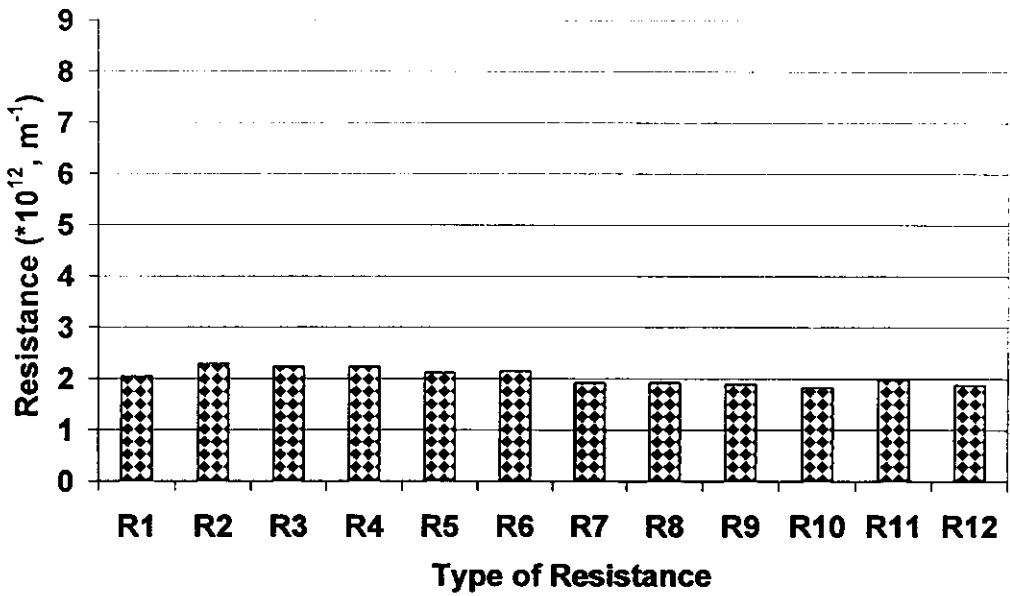
รูปที่ 4-28: กราฟแสดงผลการวัดค่าความต้านของเยื่อกรองในชุดการการทดลองน้ำผิวดินที่เดินค่าต่อเนื้อที่ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50 % (16 L/h/m<sup>2</sup>) ไม่เติมอากาศและไม่เติมเพอริกคลอไรด์

สำหรับชุดการทดลองของน้ำผิวดินที่เดินระบบด้วยค่าฟลักซ์ที่ต่ำกว่าวิกฤต 50% (16 L/h/m<sup>2</sup>) ไม่มีการเติมอากาศและไม่เติมเพอริกคลอไรด์ (ดังรูปที่ 4-28) มีค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรอง เท่ากับ  $2.66 \times 10^{12} \text{ m}^2$  โดยค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $7.31 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งมีค่าความต้านทานเมมเบรนส่วนที่เพิ่ม



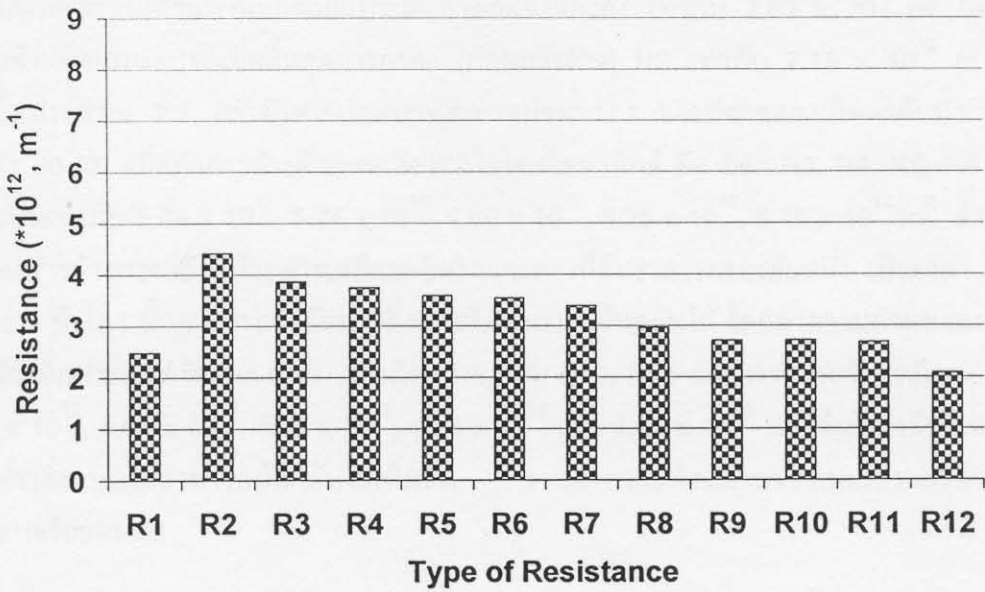
จากค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนกรองประมาณกว่า 2.5 เท่า ซึ่งสูงกว่าค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นขณะกรองที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าวิกฤต ซึ่งพบ การสะสมที่ผิวหน้าแบบเป็นชั้นเค้กที่พบบนผิวหน้าเยื่อกรองมากกว่า (ค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนเพิ่มอย่างรวดเร็ว ด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 0.035 mbar/sec เมื่อกรองตัวอย่างน้ำผิวดินที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าวิกฤต 50% ที่ 48 L/h/m<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าสูงมากกว่า 11 เท่าตัวเปรียบเทียบกับเมื่อกรองตัวอย่างที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าวิกฤต 50% ที่ 16 L/h/m<sup>2</sup>) และชั้นเค้กนี้ทำหน้าที่เสมือนชั้นกรองที่สองที่ช่วยกักกั้นอนุภาคคอลลอยด์หรือโมเลกุลสารอินทรีย์ละลายน้ำไว้ ขณะที่การกรองที่ค่าต่ำกว่าค่าวิกฤตนั้นค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นน่าจะเกิดจากการสะสม และคุดติดภายในรูกรองของสารอินทรีย์ละลายน้ำ อนุภาคคอลลอยด์อย่างต่อเนื่องและเห็นว่าค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนขณะกรองค่อยๆ เพิ่มขึ้น ด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 0.003 Pa/sec ทั้งนี้ พบว่า ค่าความต้านทานเมมเบรนที่เพิ่มขึ้นสามารถลดลงประมาณกว่าร้อยละ 20-30 เมื่อเสร็จสิ้นการล้างด้วยขั้นตอนต่างๆ ภายใต้เทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ คือ มีค่า R3, R4, R5, R6 และ R7 เท่ากับ  $5.78 \times 10^{12}$ ,  $5.61 \times 10^{12}$ ,  $4.95 \times 10^{12}$ ,  $5.23 \times 10^{12}$ ,  $4.98 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> ตามลำดับ สำหรับผลของการล้างพื้นสภาพ ด้วยการใช้น้ำสารเคมีที่เป็นกรดซิดริกและด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการกรองย้อนที่อัตราการกรองย้อนต่ำ นาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้น ลดค่าความต้านทานเมมเบรนคงเหลืออยู่ได้เพียงเล็กน้อย และไม่สามารถฟื้นฟูสภาพให้ชุดเยื่อกรองให้มีค่าความต้านทานหลังสิ้นสุดการล้างเท่ากับเมมเบรนสะอาดก่อนใช้ทำการกรอง คือ มีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 เท่ากับ  $5.25 \times 10^{12}$ ,  $5.17 \times 10^{12}$ ,  $5.03 \times 10^{12}$ ,  $4.92 \times 10^{12}$  และ  $4.15 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> ตามลำดับ แสดงว่ามีฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้เหลืออยู่ประมาณ  $1.49 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> หรือเพิ่มขึ้นประมาณกว่าร้อยละ 50

ผลการคำนวณค่าความต้านทานเมมเบรนในชุดการทดลองน้ำผิวดินที่เดิมสารปรับสภาพ คือ เฟอร์ริกคลอไรด์ด้วยปริมาณที่เหมาะสมที่ 20 mg/L โดยไม่เติมอากาศและเดินระบบที่ค่าฟลักซ์วิกฤต (106 L/h/m<sup>2</sup>) แสดงดังรูป 4-29 ซึ่งพบว่า ค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรอง เท่ากับ  $2.04 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> โดยค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $2.29 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> โดย พบว่า ค่าความต้านทานเมมเบรนที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากเมมเบรนสะอาดก่อนกรอง และ มีค่าลดลงบ้างเมื่อเสร็จสิ้นการล้างด้วยขั้นตอนต่างๆ ภายใต้เทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ คือ มีค่า R3, R4, R5, R6 และ R7 เท่ากับ  $2.23 \times 10^{12}$ ,  $2.23 \times 10^{12}$ ,  $2.12 \times 10^{12}$ ,  $2.14 \times 10^{12}$ ,  $1.92 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> เมื่อเข้าสู่การล้างพื้นสภาพ ด้วยการใช้น้ำสารเคมีที่เป็นกรดซิดริก และด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการกรองย้อนที่อัตราการกรองย้อนต่ำ นาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้น พบว่า ลดลงไม่แตกต่างจากขั้นตอนแรก โดยมีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 เท่ากับ  $1.92 \times 10^{12}$ ,  $1.89 \times 10^{12}$ ,  $1.82 \times 10^{12}$ ,  $1.98 \times 10^{12}$  และ  $1.87 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างกันเมื่อใช้กรดซิดริกและด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาการล้าง 1 และ 2 ชั่วโมง ซึ่งค่าความต้านทานเมื่อเสร็จสิ้นจากชุดการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ามีฟาวลิงน้อยมากหรือแทบไม่มี เนื่องจากค่าความต้านทานไม่แตกต่างจากค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาดก่อนใช้งาน

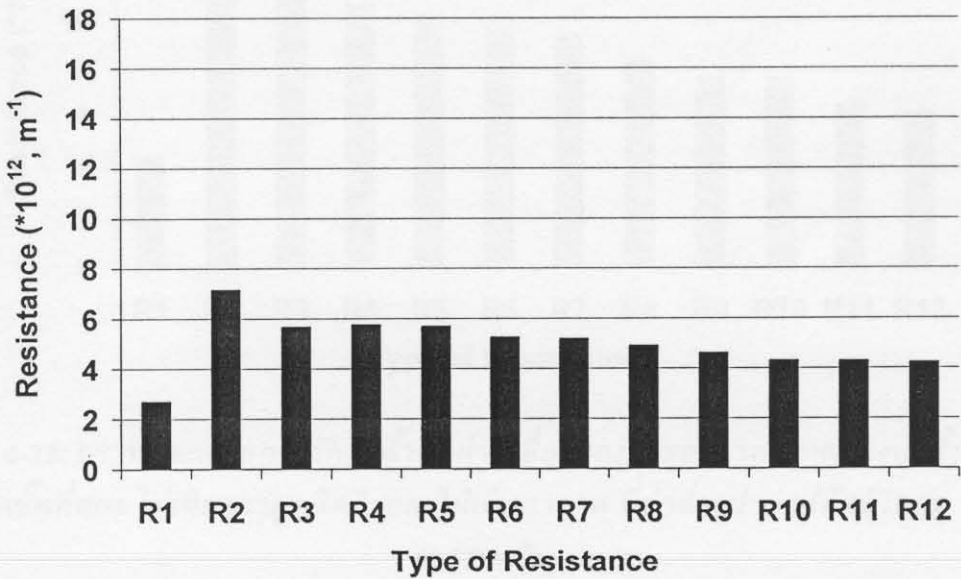


รูปที่ 4-29: กราฟแสดงผลการวัดค่าความต้านทานเยื่อกรองในชุดการทดลองน้ำผิวดินเติมสารปรับสภาพเพอริกคลอไรด์ด้วยปริมาณที่เหมาะสม 20 mg/L ไม่เติมอากาศและเดินระบบที่ค่าฟลักซ์วิกฤต (10๕ L/h/m<sup>2</sup>)

ค่าความต้านทานเมมเบรนในชุดการทดลองน้ำผิวดิน ที่เติมสารปรับสภาพเพอริกคลอไรด์ด้วยปริมาณที่เหมาะสม 20 mg/L ไม่เติมอากาศ และเดินระบบที่ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% (55 L/h/m<sup>2</sup>) แสดงดังรูป 4-30 ซึ่งพบว่า ค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรอง เท่ากับ  $2.48 \times 10^{12} \text{ m}^2$  โดยค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $4.41 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 43 จากเมมเบรนสะอาดก่อนกรอง และมีค่าลดลงเป็นลำดับประมาณร้อยละ 16-30 เมื่อทำการล้างด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ คือ มีค่า R3, R4, R5, R6 และ R7 เป็นเท่ากับ  $3.86 \times 10^{12}$ ,  $3.75 \times 10^{12}$ ,  $3.59 \times 10^{12}$ ,  $3.54 \times 10^{12}$ ,  $3.39 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ จากนั้นการล้างกรองย้อนด้วยสารเคมีกรดซิดริกและต่างที่อัตราการกรองย้อนต่ำ เป็นเวลานาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้นสามารถกำจัดฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้ โดยค่าความต้านทานลดลงอีกประมาณร้อยละ 13-70 โดยมีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 คงค้างเหลือ เท่ากับ  $2.97 \times 10^{12}$ ,  $2.71 \times 10^{12}$ ,  $2.71 \times 10^{12}$ ,  $2.68 \times 10^{12}$  และ  $2.08 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ ซึ่งพบว่าสามารถฟื้นฟูสภาพชุดเมมเบรนได้อย่างสมบูรณ์



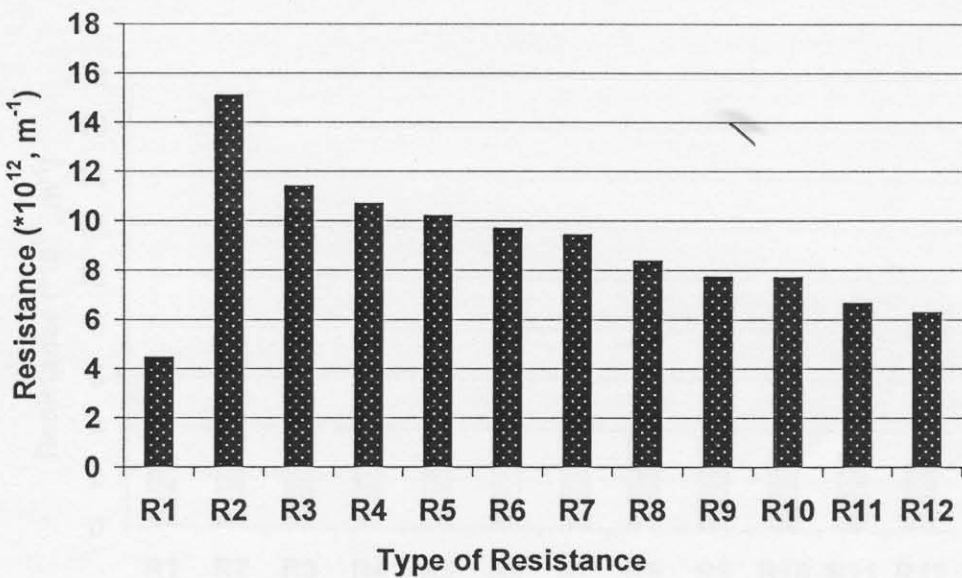
รูปที่ 4-30: กราฟแสดงผลการวัดค่าความต้านทานเยื่อกรองในชุดการทดลองน้ำผิวดินที่เติมเพอริกคลอไรด์ด้วยปริมาณที่เหมาะสม 20 mg/L ไม่เติมอากาศเดิน และระบบที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าวิกฤต 50 % ( 55 L/h/m<sup>2</sup> )



รูปที่ 4-31: กราฟแสดงผลการวัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรองในชุดการทดลองน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองไม่เติมสารดูดติดผิวและไม่เติมอากาศที่ค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% (12 L/h/m<sup>2</sup>)

ชุดการทดลองของน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองจากโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ที่ทำการเดินระบบที่ค่าคงที่ที่สูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% ไม่เติมสารดูดติดผิวและไม่เติมอากาศ (ตั้งรูป 4-31) โดยค่าความต้านทานเมมเบรนจากการล้างตามขั้นตอนต่างๆ ภายหลังเดินระบบอย่าง

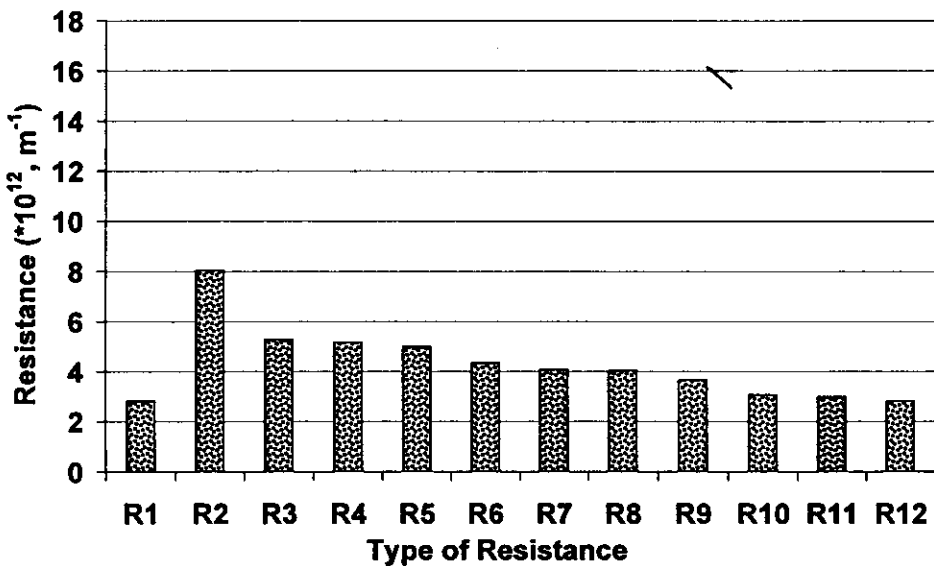
ต่อเนื้อมีค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรอง เท่ากับ  $2.63 \times 10^{12} \text{ m}^2$  โดยค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $7.15 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 2.7 เท่าตัวจากเมมเบรนสะอาดก่อนกรอง และมีค่าลดลงเป็นลำดับประมาณร้อยละ 20-27 เมื่อทำการล้างด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ คือ มีค่า R3, R4, R5, R6 และ R7 เป็นเท่ากับ  $5.66 \times 10^{12}$ ,  $5.76 \times 10^{12}$ ,  $5.69 \times 10^{12}$ ,  $5.25 \times 10^{12}$ ,  $5.19 \times 10^{12} \text{ m}^2$  สำหรับผลของการล้างกรองย้อนด้วยสารเคมีกรดซิตริกและด่างที่อัตราการกรองย้อนต่ำ เป็นเวลา นาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้นสามารถกำจัดฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้ โดยค่าความต้านทานลดลงเล็กน้อยอีกประมาณร้อยละ 6-18 โดยมีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 คงค้างเหลือ เท่ากับ  $4.90 \times 10^{12}$ ,  $4.60 \times 10^{12}$ ,  $4.29 \times 10^{12}$ ,  $4.28 \times 10^{12}$  และ  $4.22 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งยังคงมีการสะสมของฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้เพิ่มขึ้น จากค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดอยู่ประมาณร้อยละ 60



รูปที่ 4-32: กราฟแสดงผลการวัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรองในชุดการการทดลองน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง ไม่เติมสารดูดติดผิวและไม่เติมอากาศ ที่ค่าต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% ( $4 \text{ L/h/m}^2$ )

ผลการทดลองในชุดการทดลองน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง ที่ไม่เติมสารดูดติดผิวและไม่เติมอากาศ เติกระบบด้วยค่าฟลักซ์คงที่ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% (รูปที่ 4-32) ค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรอง เท่ากับ  $4.46 \times 10^{12} \text{ m}^2$  โดยค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $15.10 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งมีค่าความต้านทานเมมเบรนส่วนที่เพิ่มจากค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนกรองประมาณกว่า 3.3 เท่า ซึ่งสูงกว่าค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นขณะกรองที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าวิกฤต (แม้ว่าการเดินระบบ

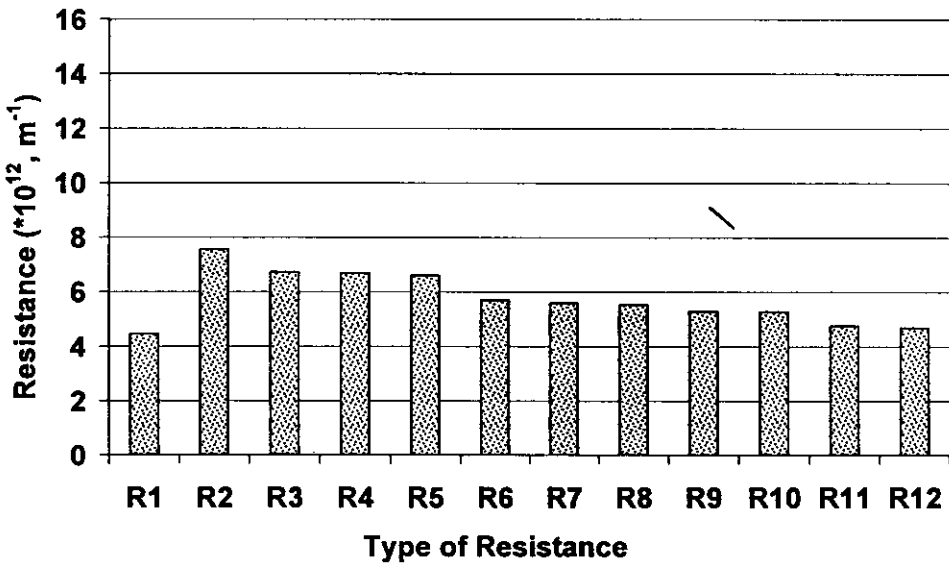
กรองอย่างต่อเนื่องที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าวิกฤต คือที่  $12 \text{ L/h/m}^2$  นั้น มีอัตราเร็วการของการเกิดฟาวลิง เท่ากับ  $0.0125 \text{ mbar/sec}$  ขณะที่เมื่อกรองตัวอย่างที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าวิกฤต คือ  $4 \text{ L/h/m}^2$  นั้น ค่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงมีค่าต่ำกว่าประมาณ 3 เท่าตัว คือ เท่ากับ  $0.004 \text{ mbar/sec}$  เช่นเดียวกับที่พบในชุดการทดลองกับน้ำผิวดิน โดยเมื่อทำการล้างด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ แล้ว มีค่าลดลงเป็นลำดับประมาณร้อยละ 26-37 คือ มีค่า R3, R4, R5, R6 และ R7 เป็นเท่ากับ  $11.40 \times 10^{12}$ ,  $10.70 \times 10^{12}$ ,  $10.20 \times 10^{12}$ ,  $9.69 \times 10^{12}$ ,  $9.42 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ผลของการล้างกรองย้อนด้วยสารเคมีกรดซิตริกและด่างที่อัตราการกรองย้อนต่ำ เป็นเวลานาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้นสามารถกำจัดฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้ โดยค่าความต้านทานลดลงเป็นลำดับอีกประมาณร้อยละ 11-33 โดยมีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 คงค้างเหลือเท่ากับ  $8.38 \times 10^{12}$ ,  $7.73 \times 10^{12}$ ,  $7.71 \times 10^{12}$ ,  $6.67 \times 10^{12}$  และ  $6.29 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ และยังคงพบว่าค่าความต้านทานสุดท้ายสูงกว่าค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาดอยู่ร้อยละ 40 ซึ่งเกิดจากฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้



รูปที่ 4-33: กราฟแสดงผลการวัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรองในชุดการการทดลองน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง เติมสารดูดติดผิวที่เป็นผงถ่านกัมมันต์ชนิดผงด้วยค่าที่เหมาะสม 500 mg/L และไม่เติมอากาศ ที่ค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% ( $12 \text{ L/h/m}^2$ )

การทดลองในชุดการทดลองของน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สองที่ทำการเติมสารดูดติดผิวที่เป็นผงถ่านกัมมันต์ชนิดผงด้วยค่าที่เหมาะสม 500 mg/L ไม่มีการเติมอากาศ และเดินระบบด้วยค่าฟลักซ์คงที่ที่สูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% (ดังรูปที่ 4-33) โดยค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรอง เท่ากับ  $2.81 \times 10^{12} \text{ m}^2$  โดยค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $8.05 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งมีค่าความต้านทานเมมเบรนส่วนที่เพิ่มจากค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนกรองเกือบ 4 เท่า โดยเมื่อทำการล้างด้วยเทคนิคทาง

ไฮโดรไดนามิกส์ แล้ว มีค่าลดลงเป็นลำดับประมาณร้อยละ 34-49 คือ มีค่า R3, R4, R5, R6 และ R7 เป็นเท่ากับ  $5.27 \times 10^{12}$ ,  $5.17 \times 10^{12}$ ,  $4.99 \times 10^{12}$ ,  $4.35 \times 10^{12}$ ,  $4.08 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ส่วนผลของการล้างกรองย้อนด้วยสารเคมีกรดซัลฟิวริกและด่างที่อัตราการกรองย้อนต่ำ เป็นเวลานาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้นสามารถกำจัดฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้ โดยค่าความต้านทานลดลงเป็นลำดับอีกประมาณร้อยละ 1-31 โดยมีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 คงค้างเหลือเท่ากับ  $4.04 \times 10^{12}$ ,  $3.66 \times 10^{12}$ ,  $3.07 \times 10^{12}$ ,  $2.99 \times 10^{12}$  และ  $2.81 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ ทั้งนี้ในชุดการทดลองนี้ขั้นตอนการล้างทั้งหมดสามารถฟื้นฟูสภาพชุดเมมเบรนได้อย่างสมบูรณ์ คือ ไม่พบฟาวลิงตกค้างเนื่องจากเป็นผลจากการเติมผงถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับสารละลายอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ซึ่งเป็นสาเหตุของฟาวลิงแบบไม่ผันกลับแม้ว่าจะเดินระบบกรองที่ค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤตก็ตาม



รูปที่ 4-34: กราฟแสดงผลการวัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรองในชุดการการทดลองน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง เติมสารดูดซับผิวที่เป็นผงถ่านกัมมันต์ชนิดผงด้วยค่าที่เหมาะสม 500 mg/Lและไม่เติมอากาศ ที่ค่าต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50% ( $4 \text{ L/h/m}^2$ )

ผลการทดลองในชุดการทดลองน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง ที่เดินระบบด้วยค่าฟลักซ์คงที่ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต เติมสารดูดซับผิวที่เป็นผงถ่านกัมมันต์ชนิดผงด้วยค่าที่เหมาะสม 500 mg/L ไม่เติมอากาศ (รูปที่ 4-34) โดยมีค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรองเท่ากับ  $4.46 \times 10^{12} \text{ m}^2$  โดยค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 เท่ากับ  $7.55 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งมีค่าความต้านทานเมมเบรนส่วนที่เพิ่มมาจากค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนกรองเกือบ 2 เท่า โดยเมื่อทำการล้างด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ แล้วมีค่าลดลงเป็นลำดับประมาณร้อยละ 11-26 คือ มีค่า R3, R4, R5, R6 และ R7 เท่ากับ  $6.71 \times 10^{12}$ ,  $6.68 \times 10^{12}$ ,  $6.59 \times 10^{12}$ ,  $5.70 \times 10^{12}$ ,  $5.58 \times 10^{12} \text{ m}^2$  สำหรับผลของการล้างกรองย้อนด้วยสารเคมีกรดซัลฟิวริกและด่างที่อัตราการกรองย้อนต่ำ เป็นเวลานาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้น



สามารถกำจัดฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้เล็กน้อยโดยค่าความต้านทานลดลงเป็นลำดับ อีกประมาณร้อยละ 0.8-16 โดยมีค่า R8, R9, R10, R11 และ R12 คงค้างเหลือ เท่ากับ  $5.53 \times 10^{12}$ ,  $5.29 \times 10^{12}$ ,  $5.27 \times 10^{12}$ ,  $4.75 \times 10^{12}$  และ  $4.69 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ทั้งนี้ในชุดการทดลองนี้ ขั้นตอนการล้างทั้งหมดสามารถฟื้นฟูสภาพชุดเมมเบรนได้อย่างสมบูรณ์ คือ ไม่พบฟาวลิงตกค้าง เนื่องจากเป็นผลจากการเติมผงถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดติดสารละลายอินทรีย์ในน้ำทิ้งซึ่งเป็น สาเหตุของฟาวลิงแบบไม่ผันกลับ

ทั้งนี้ได้สรุปภาพรวมของค่าความต้านทานภายหลังจากการล้างตามขั้นตอน iva ding ตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-22: สรุปค่าความต้านทานภายหลังขั้นตอนการล้างฟื้นฟูสภาพเมื่อกรองน้ำผิวดิน และ น้ำทิ้งหลังบำบัด

ชุดการทดลอง J = 30 L/h/m <sup>2</sup>	ประเภทของค่าความต้านทาน: Type of Resistance (*10 <sup>12</sup> , m <sup>2</sup> )											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
1	2.61	4.36	3.87	3.67	3.58	3.39	3.25	3.14	3.13	3.36	3.4	3.29
2	2.66	7.31	5.78	5.61	4.95	5.23	4.98	5.25	5.17	5.03	4.92	4.15
3	2.04	2.29	2.23	2.23	2.12	2.14	1.92	1.92	1.89	1.82	1.98	1.87
4	2.48	4.41	3.86	3.75	3.59	3.54	3.39	2.97	2.71	2.72	2.68	2.08
5	2.68	7.15	5.66	5.76	5.69	5.25	5.19	4.9	4.6	4.29	4.28	4.22
6	4.46	15.1	11.4	10.7	10.2	9.69	9.42	8.38	7.73	7.71	6.67	6.29
7	2.81	8.05	5.27	5.17	4.99	4.35	4.08	4.04	3.66	3.07	2.99	2.81
8	4.46	7.55	6.71	6.68	6.59	5.7	5.58	5.53	5.29	5.27	4.75	4.69

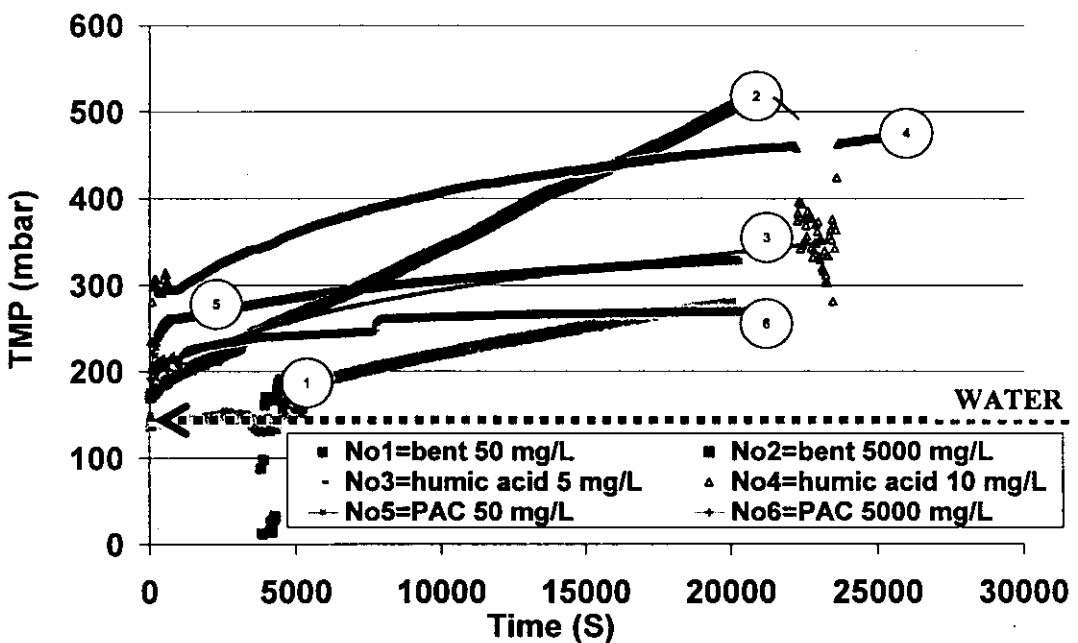
หมายเหตุ: RSW = น้ำผิวดิน, TWW = น้ำทิ้งหลังบำบัด, PAC = ผงถ่านกัมมันต์, J = ค่าฟลักซ์, NA = No Aeration, NC = Non conditioning, A = Aeration and C = conditioning โดยสภาวะของแต่ละชุดการทดลองในตารางเป็นดังนี้

ชุด 1 = RSW; J 48 L/h/m<sup>2</sup>; NA-NC, ชุด 2 = RSW; J 16 L/h/m<sup>2</sup>; NA-NC, ชุด 3 = RSW; J 106 L/h/m<sup>2</sup>; NA-C-FeCl<sub>3</sub>, ชุด 4 = RSW; J 55 L/h/m<sup>2</sup>; NA-C-FeCl<sub>3</sub>, ชุด 5 = TWW; J 12 L/h/m<sup>2</sup>; NA-NC, ชุด 6 = TWW; J 4 L/h/m<sup>2</sup>; NA-NC, ชุด 7 = TWW; J 12 L/h/m<sup>2</sup>; NA-C with PAC, ชุด 8 = TWW; J 4 L/h/m<sup>2</sup>; NA-C with PAC,

4-6 ผลการศึกษาเพื่อทดสอบสมรรถนะการเดินระบบแบบต่อเนื่อง:

กรณี Model suspension (สารละลายกรดฮิวมิก สารแขวนลอยอนุภาค เบนโทไนต์ สารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ และสารผสมสองชนิด)

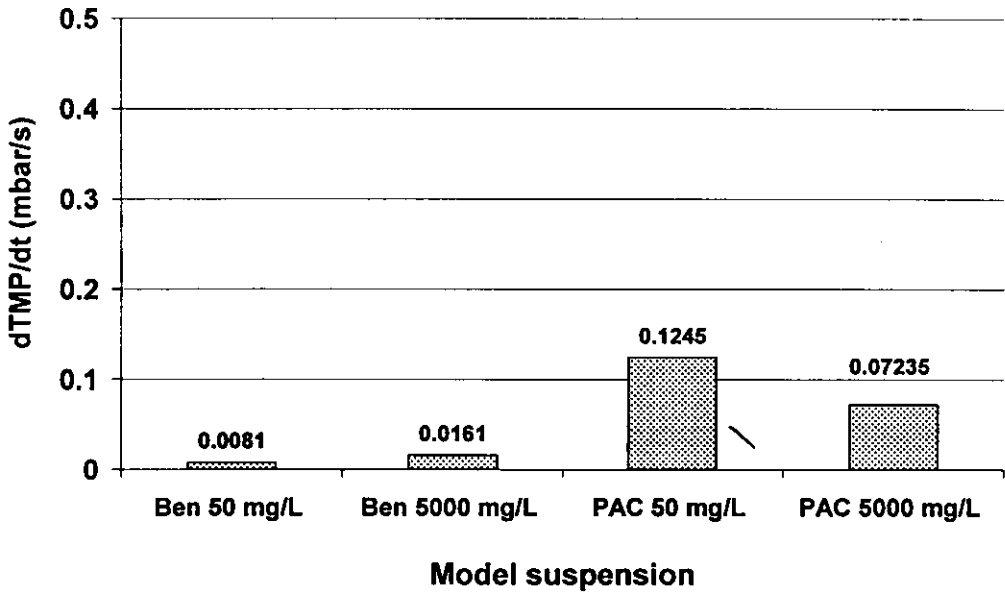
สำหรับส่วนงานวิจัยในหัวข้อนี้ ได้เลือกตัวอย่างโมเดลสารแขวนลอย และสารละลายที่เป็นตัวแทนองค์ประกอบที่พบในน้ำผิวดินและน้ำทิ้งหลังบำบัดแล้ว ได้แก่ สารแขวนลอยอนุภาค เบนโทไนต์ (สารแขวนลอยอินทรีย์) สารละลายกรดฮิวมิก (ชนิดของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่พบเป็นสัดส่วนกว่าร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์ธรรมชาติละลายน้ำทั้งหมดในน้ำผิวดิน และน้ำทิ้งชุมชนหลังบำบัด) และสารแขวนลอยอนุภาคผงถ่านกัมมันต์ (เป็นสารปรับสภาพน้ำเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ สี กลิ่น รส ซึ่งนิยมใช้)



รูปที่ 4-35: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนกับเวลาขณะเดินระบบกรองตัวอย่างสารป้อนโมเดลชนิดเดียว ที่ค่าฟลักซ์ 30 L/h/m<sup>2</sup> และไม่เติมอากาศ

รูปที่ 4-35 แสดงการติดตามค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนที่เกิดขึ้นขณะกรองสารป้อนชนิดเดียว จำนวน 3 ชนิดสารป้อน โดยแต่ละชนิดสารป้อนศึกษาที่ 2 ค่าความเข้มข้น ดังนี้ สารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนต์ความเข้มข้น 50 และ 5,000 mg/L, สารละลายกรดฮิวมิก 5 และ 10 mg/L และ สารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ 50 และ 5,000 mg/L จากกราฟเห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนเมื่อเวลาการกรองเพิ่มขึ้น ที่ค่าฟลักซ์คงที่ที่ 30

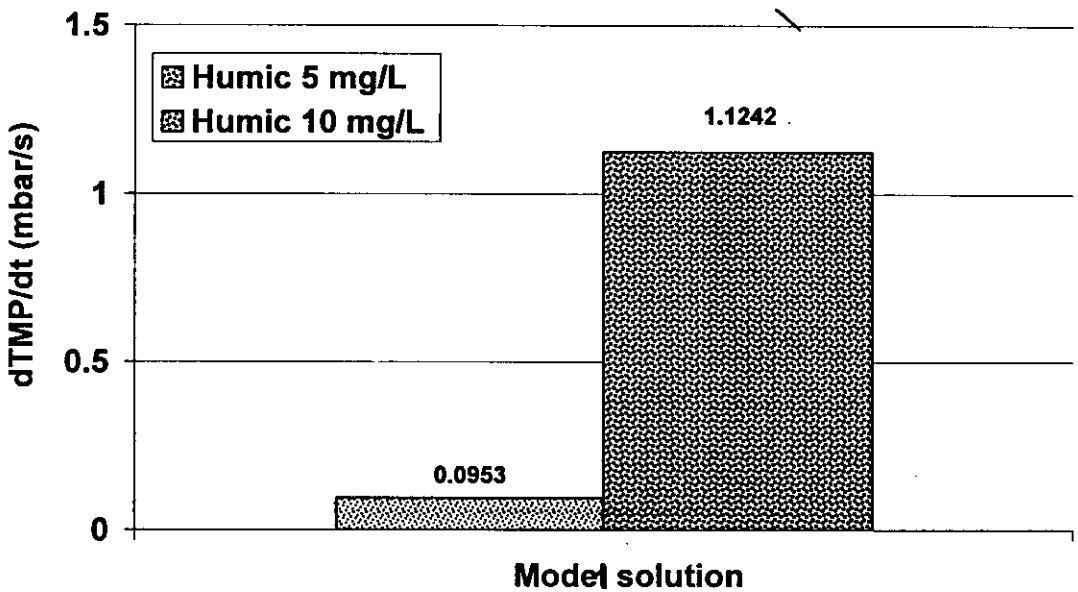
$L/h/m^2$  ในสภาวะที่ไม่มีการเติมอากาศ ซึ่งพบว่า เมื่อกรองโมเดลสารป้อนชนิดที่เป็นสารแขวนลอย คือ เบนโทไนด์ มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรงและมีความชันมากกว่า เปรียบเทียบกับ สารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงช่วงแรกๆ ของการกรองและเส้นแนวโน้มมีความชันลดลง ซึ่งผลการคำนวณเมื่อกรองสารป้อนทั้งสองที่ความเข้มข้น 50 และ 5,000 mg/L พบว่า อัตราเร็วของการเกิดฟาวลิง ( $dTMP/dt$ , mbar/s) แสดงดังรูปที่ 4-36



รูปที่ 4-36: กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วฟาวลิงเฉลี่ย ( $dTMP/dt$ ) ขณะกรองตัวอย่างสารป้อนโมเดลสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์และผงถ่านกัมมันต์ที่ค่าฟลักซ์  $30 L/h/m^2$  และไม่เติมอากาศ

สารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์มีค่าเฉลี่ยอัตราเร็วของการเกิดฟาวลิงตลอดช่วงเวลากกรองสูงกว่าสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์ 15 เท่า คือ มีค่า  $0.1245 mbar/s$  โดยเบนโทไนด์มีค่าเป็น  $0.0081 mbar/s$  และจากกราฟที่ 4-35 ในช่วงเริ่มต้นกรองสารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ 6 นาทีแรกมีค่าอัตราเร็วฟาวลิงสูงสุด คือ เท่ากับ  $0.2455 mbar/s$  ขณะที่สารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์มีค่าคงที่ตลอดเวลา กรณีเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นสูง  $5,000 mg/L$  ก็พบลักษณะเช่นเดียวกัน คือ อัตราเร็วการเกิดฟาวลิงเมื่อกรองสารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์มีค่าสูงกว่าเมื่อกรองสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์ประมาณ 7 เท่า ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าลักษณะของอนุภาคที่แตกต่างกัน (ขนาดเบนโทไนด์ประมาณ 15-27 ไมครอน และ ผงถ่านกัมมันต์ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 40 ไมครอน) ส่งผลให้อนุภาคผงถ่านกัมมันต์ซึ่งมีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าเกาะที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ง่ายและมากกว่าภายใต้สภาวะที่ไม่มีควมปั่นป่วนจากการเติมอากาศ และเมื่อพิจารณาที่ชนิดสารป้อนเดียวกันแต่ความเข้มข้นต่างกัน พบว่า อัตราเร็วของการเกิดฟาวลิง

เมื่อกรองสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์เพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่ไม่สัมพันธ์แบบแปรผันตรง กับค่าความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่ทดสอบ คือ ที่ความเข้มข้น 5,000 mg/L มีอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงสูงกว่าประมาณ 2 เท่าตัว เปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้น 50 mg/L ขณะที่อัตราเร็วการเกิดฟาวลิงของสารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ลดลงประมาณ 1.7 เท่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์จาก 50 เป็น 5,000 mg/L แสดงให้เห็นว่าผลของการเติมผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่มากไม่ส่งผลให้ค่าอัตราเร็วฟาวลิงสูงขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มข้นผงถ่านกัมมันต์สูงถึง 5,000 mg/L การเกิดขึ้นเค้กอย่างรวดเร็วบนผิวหน้าเมมเบรนจากอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 47.22 ไมครอน (แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเบนโทไนด์และผงถ่านกัมมันต์ ดังภาคผนวก 4) โดยมีช่วงกว้างของการกระจายตัวเป็น  $47.22 \pm 30.33$  ไมครอน เป็นชั้นเค้กที่มีการเรียงตัวแบบสุ่ม-ซ้อนทับ ซึ่งทำให้อนุภาคขนาดเล็กมีโอกาสน้อยที่จะเข้าไปบล็อกหรือเรียงตัวเป็นชั้นแรกหรือชิดกับผิวหน้าเมมเบรน จึงน่าจะเกิดเป็นโครงสร้างพรุนกว่าชั้นเค้กจากอนุภาคผงถ่านกัมมันต์เมื่อการกรองที่ความเข้มข้นต่ำซึ่งมีความหนาของชั้นเค้กน้อย แต่มีการเรียงตัวกันแน่น (จากการที่อนุภาคขนาดเล็กมีโอกาสพอกๆกับอนุภาคขนาดใหญ่ที่จะสะสมบนผิวหน้าเมมเบรน)ทำให้ค่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงสูง

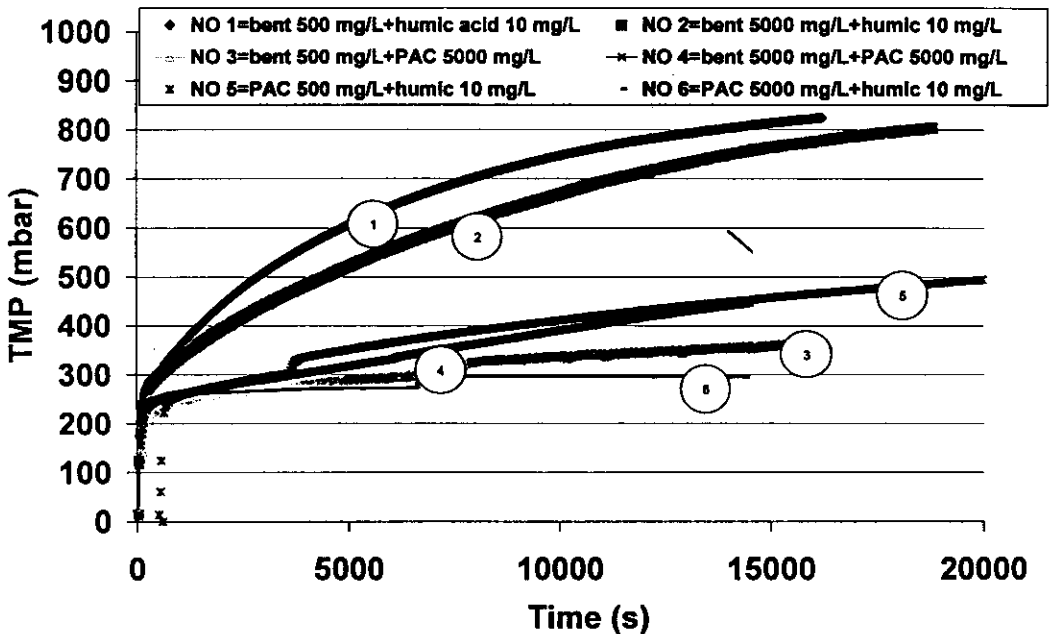


รูปที่ 4-37: ค่าอัตราเร็วฟาวลิงเฉลี่ย (dTMP/dt) ขณะกรองตัวอย่างสารป้อนโมเดล สารละลายกรดฮิวมิก ที่ค่าฟลักซ์  $30 \text{ L/h/m}^2$  และไม่เติมอากาศ

รูปที่ 4-37 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วฟาวลิงเฉลี่ยในรูปของค่า dTMP/dt เมื่อกรองสารป้อนโมเดลของสารละลายกรดฮิวมิก ที่ค่าฟลักซ์คงที่ที่  $30 \text{ L/h/m}^2$  และไม่มีการเติมอากาศ ผลการทดลอง พบว่า ค่าอัตราเร็วฟาวลิงเฉลี่ยกรองกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 mg/L เท่ากับ 0.0953 mbar/s ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าประมาณ 10 เท่าตัวเทียบกับค่าอัตราเร็วฟาวลิงที่

เกิดขึ้นเมื่อกรองกรดฮิวมิกความเข้มข้น 10 mg/L แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงจากสารละลายไม่เป็นสัดส่วนที่แปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารป้อน ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันเพียง 2 เท่า

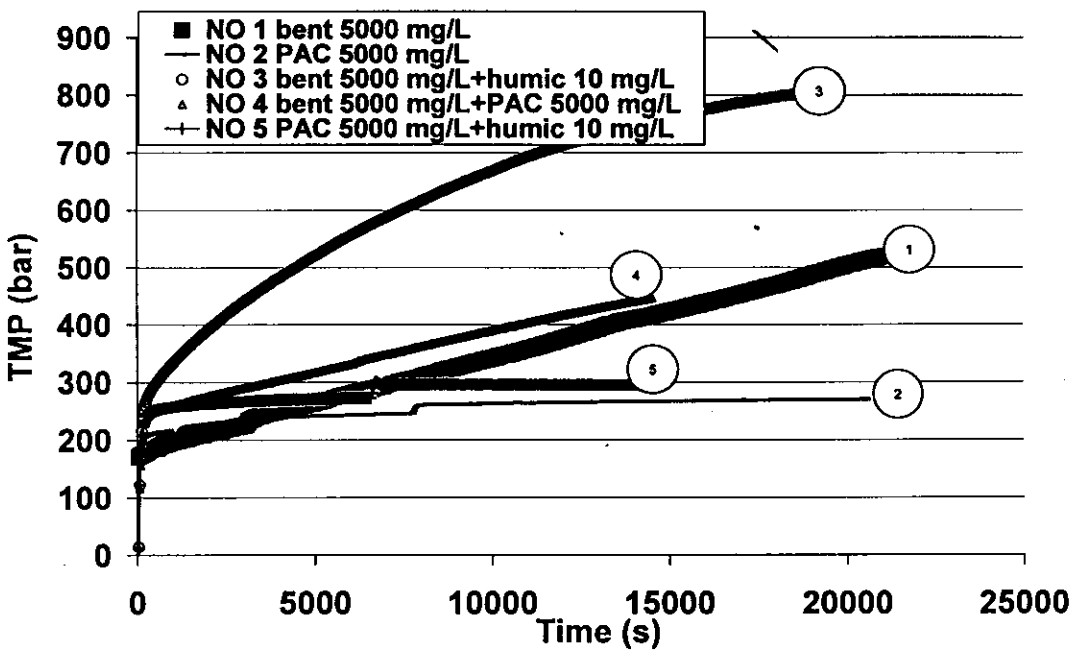
รูปที่ 4-38 แสดงการติดตามค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนที่เกิดขึ้นขณะกรองสารป้อนชนิดผสมสองชนิด ระหว่าง 1) สารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์กับสารละลายกรดฮิวมิก 2) สารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์กับสารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ และ 3) สารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์กับสารละลายกรดฮิวมิก โดยแต่ละชนิดสารป้อนผสมศึกษาที่ 2 ค่าความเข้มข้น ณ ที่ค่าฟลักซ์ 30 L/h/m<sup>2</sup> และไม่มีการเติมอากาศ



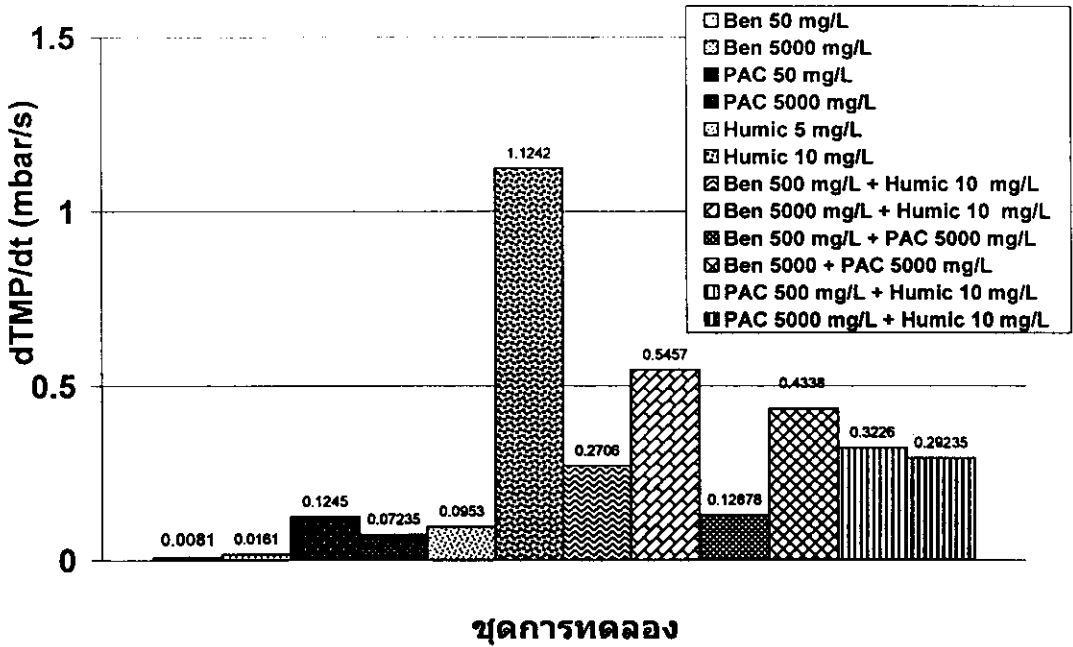
รูปที่ 4-38: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนกับเวลาขณะเดินระบบกรองตัวอย่างสารป้อนโมเดลชนิดผสม ที่ค่าฟลักซ์ 30 L/h/m<sup>2</sup> และไม่เติมอากาศ

ผลการทดลองพบว่า ลักษณะของเส้นกราฟเห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนเมื่อเวลาการกรองเพิ่มขึ้น โดยมีความชันสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการกรองในทุกชุดการทดสอบสารป้อนผสมสองชนิด ภายหลังจาก 10 นาทีแรกของการกรองแล้ว พบว่า เส้นแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนค่อยๆ ลดลงในสารป้อนผสม ระหว่างเบนโทไนด์กับกรดฮิวมิกทั้งสองค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนโทไนด์ ขณะที่ค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนลดลงอย่างรวดเร็ว และคงที่เมื่อกรองสารป้อนผสมระหว่างเบนโทไนด์กับผงถ่านกัมมันต์ทั้งสองค่าความเข้มข้น และเมื่อกรองสารป้อนผสมระหว่างผงถ่านกัมมันต์กับกรดฮิวมิกที่ความเข้มข้นผงถ่านกัมมันต์ที่ 5,000 mg/L ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่มี

ขีดความสามารถในการดูดติดโมเลกุลสารอินทรีย์ฮิวมิกได้สูงกว่าที่ความเข้มข้น 500 mg/L ทำให้ปริมาณของฮิวมิกคงเหลืออยู่และเป็นสาเหตุให้ค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องกับเวลากรอง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนกับเวลากรองในสารป้อนชนิดเดียว คือ เบนโทไนด์ และ ผงถ่านกัมมันต์ กับ สารป้อนชนิดผสมที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยทั้งสองชนิดชนิดละ 5,000 mg/L (ดังรูปที่ 4-39) พบว่า ค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนในสารป้อนชนิดผสมเพิ่มขึ้นสูงกว่าสารป้อนชนิดเดียวเมื่อเวลากรองเพิ่มขึ้น และผลของการผสมสารแขวนลอยเบนโทไนด์ที่ความเข้มข้นต่ำที่ 500 mg/L กับผงถ่านกัมมันต์ 5,000 mg/L มีลักษณะแนวโน้มของค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนกับเวลาต่ำกว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นเบนโทไนด์ 5,000 mg/L โดยเฉพาะการเติมผสมกรดฮิวมิกร่วมกับเบนโทไนด์ที่ความเข้มข้น 500 และ 5,000 mg/L เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะเมื่อผสมกรดฮิวมิกกับเบนโทไนด์ความเข้มข้นต่ำที่ 500 mg/L โดยสรุปค่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิง ( $dTMP/dt$ ) ของสารป้อนเดี่ยวและผสมได้ดังรูปที่ 4-40



รูปที่ 4-39: กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนกับเวลาขณะเดินระบบกรองโมเดลเบนโทไนด์ ถ่านกัมมันต์ชนิดเดียว กับ ชนิดผสม ที่ค่าฟลักซ์ 30 L/h/m<sup>2</sup> และไม่เติมอากาศ



ชุดการทดลอง

รูปที่ 4-40: กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วฟาวลิงเฉลี่ย (dTMP/dt) ขณะกรองตัวอย่างสารป้อนโมเดลผสมของสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์ ผงถ่านกัมมันต์ และสารละลายกรดฮิวมิก ที่ค่าฟลักซ์ 30 L/h/m<sup>2</sup> และไม่เติมอากาศ

ผลการคำนวณค่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงในสารป้อน 3 ชนิดที่อยู่ในลักษณะชนิดเดียว และชนิดผสมเมื่อกรองที่ค่าฟลักซ์ที่ 30 L/h/m<sup>2</sup> พบว่า อัตราเร็วการเกิดฟาวลิงสูงสุดคือ 1.142 mbar/s เมื่อกรองสารละลายกรดฮิวมิกความเข้มข้น 10 mg/L และ สารป้อนผสมของเบนโทไนด์ ที่ความเข้มข้น 5,000 ร่วมกับกรดฮิวมิกความเข้มข้น 10 mg/L ซึ่งมีค่าเป็น 0.5457 mbar/s และ สารป้อนผสมระหว่างเบนโทไนด์กับผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นทั้งสองเป็น 5,000 mg/L มีค่าเท่ากับ 0.4338 mbar/s ตามลำดับ ซึ่งสารละลายที่มีขนาดโมเลกุลเล็กที่พบในน้ำผิวดินและน้ำทิ้งหลังบำบัดส่วนใหญ่ คือ สารอินทรีย์ธรรมชาติ นอกจากจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดฟาวลิงแบบไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ระดับสูงขณะกรองเมมเบรนชนิดรูพรุนแล้ว (ดูผลการทดลองหัวข้อ 4-6) ยังเป็นสาเหตุของการเกิดสารก่อกัมเริงหากระบบผลิตน้ำใช้มีการใช้คลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรค และการกรองสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูงหรือการที่สารแขวนลอยไม่ได้ถูกถ่ายทิ้งจากระบบกรองฯ ก็เป็นประเด็นเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฟาวลิงอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นการกรองเนื่องจากการสะสมของอนุภาคแขวนลอยจนกลายเป็นชั้นสะสมบนผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งถือว่าเป็นฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพได้ (ดูหัวข้อ 4-6) ด้วยการฟื้นฟูสภาพหรือล้างด้วยเทคนิคทางไฮดรไดนามิกส์



**4-7 ผลการศึกษาสาเหตุ กลไกการอุดตัน และประสิทธิภาพการล้าง เพื่อฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง: กรณี Model suspension (สารละลายกรดฮิวก สารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์ สารแขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ และสารผสมสองชนิด)**

ศึกษาสาเหตุ กลไกการอุดตัน และประสิทธิภาพการล้างเพื่อฟื้นฟูสภาพ กรณีตัวอย่างน้ำป้อนเป็นโมเดลสารแขวนลอยชนิดต่าง โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการทดสอบที่เดินระบบกรองแบบต่อเนื่อง ที่ค่าฟลักซ์คงที่ทั้งในชุดการทดลองของน้ำผิวดินและน้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง (หัวข้อ 3.5) และดำเนินการล้างเยื่อกรองด้วยเทคนิคไฮโดรไดนามิกส์ร่วมกับการใช้สารเคมีชนิดกรดและด่างเพื่อระบุสาเหตุและระดับของฟาวลิงที่เกิดขึ้น ซึ่งขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพที่ใช้สรุปได้ดังนี้

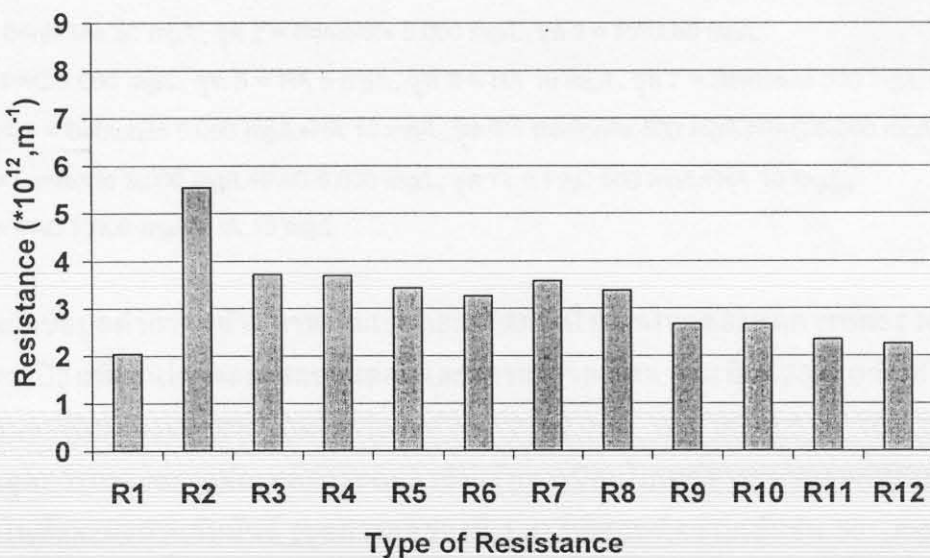
- เติมอากาศให้ความดันป้อนสูงบริเวณชุดเยื่อกรองที่อัตรา 100 L/min-นาน 1 และ 5 นาที
- ล้างชุดกรองด้วยน้ำกลั่นไหลเอื่อยที่ผิวเยื่อกรอง นาน 1 นาที
- ล้างย้อนด้วยน้ำกลั่น โดยกรองที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> - นาน 15 และ 30 นาที
- ล้างย้อนด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.1 N ที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> -นาน 1 และ 2 ชั่วโมง
- แช่ชุดเยื่อกรองและล้างย้อนด้วยสารละลายต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 N -นาน 1 และ 2 ชั่วโมง
- ล้างสารเคมีปนเปื้อนในชุดเยื่อกรองด้วยน้ำกรองแบบล้างย้อนที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> - นาน 30 นาที

ทำการวัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรอง (Membrane permeability) ในแต่ละชุดการทดลองก่อนและภายหลังทำการล้างฟื้นฟูสภาพเยื่อกรองแต่ละขั้นตอน โดยค่าความต้านทาน (R) ที่ปรากฏก่อนการล้างและภายหลังการล้างด้วยขั้นตอนต่าง ๆ มีความหมายดังนี้

- R1 เยื่อกรองสะอาดก่อนทำการกรอง
- R2 เยื่อกรองหลังสิ้นสุดการกรองในชุดการทดลอง (ก่อนทำการล้างด้วยขั้นตอนต่าง ๆ)
- R3 เยื่อกรองหลังการเติมอากาศให้ความดันป้อนสูงบริเวณชุดเยื่อกรองที่อัตรา 100 L/min-นาน 1 นาที
- R4 เยื่อกรองหลังการเติมอากาศให้ความดันป้อนสูงบริเวณชุดเยื่อกรองที่อัตรา 100 L/min-นาน 5 นาที

- R5 เยื่อกรองหลังการล้างชุดกรองด้วยน้ำกลั่นไหลเอื่อยที่ผิวเยื่อกรอง นาน 1 นาที
- R6 เยื่อกรองหลังการล้างโดยล้างย้อนด้วยน้ำกรองที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> นาน 15 นาที
- R7 เยื่อกรองหลังการล้างโดยล้างย้อนด้วยน้ำกรองที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> นาน 30 นาที
- R8 เยื่อกรองหลังการล้างด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.1 N ที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> -นาน 1 ชั่วโมง
- R9 เยื่อกรองหลังการล้างด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.1 N ที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> นาน 2 ชั่วโมง
- R10 เยื่อกรองหลังการแช่ชุดเยื่อกรองและล้างย้อนด้วยสารละลายต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N นาน 1 ชั่วโมง
- R11 เยื่อกรองหลังการแช่ชุดเยื่อกรองและล้างย้อนด้วยสารละลายต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N นาน 2 ชั่วโมง
- R12 เยื่อกรองหลังการล้างล้างสารเคมีปนเปื้อนในชุดเยื่อกรองด้วยน้ำกรองแบบล้างย้อนที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m<sup>2</sup> 15 L/h/m<sup>2</sup> นาน 30 นาที

แสดงตัวอย่างแนวโน้มการลดลงของค่าความต้านทานหลังจากแต่ละขั้นตอนการล้างพื้นสภาพ ดังตัวอย่างรูปที่ 4-41 (และได้แสดงรูปความสัมพันธ์ของทุกชุดการทดลองไว้ในภาคผนวก) โดยตารางที่ 4-23 สรุปค่าความต้านทานภายหลังเสร็จสิ้นการล้างพื้นสภาพด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4-41: กราฟแสดงผลการวัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรองในชุดการทดลองสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์ 50 mg/L ที่ค่าฟลักซ์ 30 L/h/m<sup>2</sup> และไม่เติมอากาศ

ตารางที่ 4-23: สรุปค่าความต้านทานภายหลังขั้นตอนการล้างพื้นสภาพ  
เมื่อกรอง Model suspension

ชุดการ ทดลอง J = 30 L/h/m <sup>2</sup>	ประเภทของค่าความต้านทาน: Type of Resistance (*10 <sup>12</sup> , m <sup>-1</sup> )											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
1-2.72	2.04	5.55	3.72	3.70	3.43	3.26	3.58	3.38	2.67	2.66	2.34	2.25
2-2.7	2.12	5.72	4.24	3.88	3.80	3.36	3.20	2.74	2.63	2.38	2.21	2.19
3-2.1	2.29	4.84	3.59	3.11	3.09	3.03	2.88	3.11	2.88	2.50	2.43	2.41
4-2.3	2.48	5.74	4.90	3.68	3.52	3.24	3.08	2.91	2.80	2.63	2.55	2.54
5-2.4	2.68	6.51	5.73	5.50	5.20	4.83	4.77	4.28	4.46	3.98	3.80	3.80
6-1.7	2.81	4.63	3.71	3.65	3.43	3.29	3.28	3.01	2.95	2.92	2.50	2.71
7-3.2	2.29	7.31	6.73	5.49	5.00	3.94	3.56	3.43	3.30	2.94	2.79	2.59
8-2.9	2.66	7.97	6.66	6.35	6.01	5.12	4.43	4.11	3.52	3.07	2.72	2.49
9-2.6	2.04	5.37	3.85	3.59	3.44	3.28	3.28	3.33	2.69	2.57	2.48	2.28
10-2.9	2.29	6.62	4.15	3.91	3.87	3.64	3.45	3.18	3.08	2.80	2.52	2.28
11-3.0	2.23	6.69	5.30	4.76	4.05	3.63	3.16	2.99	2.99	2.70	2.52	2.45
12-2.6	2.48	6.48	4.78	4.00	3.78	3.45	3.23	2.99	2.73	2.76	2.61	2.46

หมายเหตุ: สภาวะของแต่ละชุดการทดลองในตาราง เป็นดังนี้

ชุด 1 = Bentonite 50 mg/L, ชุด 2 = Bentonite 5,000 mg/L, ชุด 3 = PAC 50 mg/L,

ชุด 4 = PAC 5,000 mg/L, ชุด 5 = HA 5 mg/L, ชุด 6 = HA 10 mg/L, ชุด 7 = Bentonite 500 mg/L+HA 10

mg/L, ชุด 8 = Bentonite 5,000 mg/L+HA 10 mg/L, ชุด 9 = Bentonite 500 mg/L+PAC 5,000 mg/L,

ชุด 10 = Bentonite 5,000 mg/L+PAC 5,000 mg/L, ชุด 11 = PAC 500 mg/L+HA 10 mg/L,

ชุด 12 = PAC 5,000 mg/L+HA 10 mg/L

จากข้อมูลค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาดก่อนใช้งานในแต่ละชุดการทดลองสำหรับ  
กรองสารป้อนที่เป็นโมเดลสารแขวนลอยและสารละลาย ดังตารางที่ 4-23 พบว่า ค่าความ  
ต้านทานของเมมเบรนสะอาดก่อนใช้กรองมีค่าระหว่าง  $2.04 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  -  $2.81 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  โดย  
เมื่อสิ้นสุดการกรองของแต่ละชุดการทดลองสำหรับสารป้อนโมเดลสารแขวนลอยของอนุภาค  
เบนโทไนด์และผงถ่านกัมมันต์ (ชุดการทดลองที่ 1-4) ทดสอบที่ความเข้มข้น 50 mg/L และ  
5,000 mg/L พบว่า ค่าความต้านทานเมมเบรนหลังสิ้นสุดการกรอง (ก่อนการล้าง) R2 สูงกว่าค่า  
ความต้านทานเมมเบรนสะอาดมากกว่า 2.5 เท่าตัว คือ มีค่าระหว่าง  $4.84 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  -  $5.74 \times$

$10^{12}$   $m^2$  โดยการกรองสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์และผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น 5,000 mg/L ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเปรียบเทียบกับเมื่อกรองที่ความเข้มข้น 50 mg/L และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างชัดเจนของค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นภายหลังสิ้นสุดการกรองของแต่ละชนิดสารแขวนลอยที่ทดสอบ ทั้งนี้จะไม่สอดคล้องกับค่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงที่คำนวณได้ ซึ่งความเป็นได้ที่เกิดขึ้น คือ เมื่อหยุดการกรองการมีการหลุดออกของสะสมของอนุภาคที่ชั้นด้านนอกสุดของผิวหน้าเมมเบรน ทำให้ค่าความต้านทานของชั้นสะสมของอนุภาคเบนโทไนด์และผงถ่านกัมมันต์ที่วัดได้มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากขั้นตอนการล้างที่กำหนดไว้เป็นลำดับ นั้น พบว่า เทคนิคการเติมอากาศแบบระยะเวลาสั้นและเพิ่มเวลาให้เกิดการปั่นป่วนที่ชุดเมมเบรน ส่งผลให้ลดการสะสมของชั้นเค้กและเป็นการกำจัดฟาวลิงแบบผันกลับได้ คือ ทำให้ค่าความต้านทาน R3, R4, R5 ของชุดการทดลองที่ทดสอบกับสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์และผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นสูงที่ 5,000 mg/L มีค่าลดลงกว่าร้อยละ 25-30 ขณะที่ต่อมาล้างด้วยน้ำเอื้อยให้ผลไม่เด่นชัดในการลดค่าความต้านทานเช่นเดียวกับการล้างย้อนด้วยน้ำกรอง ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานลดลงเป็นลำดับขั้นเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 10 ทั้งนี้ผลของการล้างฟื้นฟูสภาพด้วยการใช้สารเคมีที่เป็นกรดซิดริกและต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการกรองย้อนที่อัตราการกรองย้อนต่ำ นาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้น สามารถช่วยให้ค่าความต้านทานเมมเบรนลดลงอีกร้อยละ 30 จากขั้นตอนการล้างย้อนด้วยน้ำกรอง และสามารถฟื้นฟูสภาพให้ชุดเยื่อกรองมีค่าความต้านทานใกล้เคียงกับเมมเบรนสะอาดก่อนใช้ทำการกรอง คือ มีค่า R9, R10, R11 และ R12 อยู่ในช่วง  $2.63-2.88 \times 10^{12}$ ,  $2.38-2.66 \times 10^{12}$ ,  $2.21-2.55 \times 10^{12}$ , และ  $2.19-2.54 \times 10^{12}$   $m^2$  ตามลำดับ และยังคงเหลือบางส่วนของฟาวลิงที่ค้างอยู่ในชุดเมมเบรนเนื่องจากมีค่าความต้านทานสุดท้ายสูงกว่าค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดเล็กน้อย

ผลการล้างชุดกรองเมื่อสิ้นสุดชุดการทดลองที่ 5 และ 6 ซึ่งกรองสารป้อมโมเดลสารละลายของกรดซิวมิกที่ความเข้มข้น 5 mg/L และ 10 mg/L พบว่า ค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรองเพิ่มสูงขึ้น (ก่อนการล้าง,R2) สูงกว่า 2.4 และ 1.7 เท่าตัวของค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาด คือ มีค่า  $6.51 \times 10^{12}$   $m^2$  และ  $4.63 \times 10^{12}$   $m^2$  ตามลำดับ ซึ่งผลการกรองสารละลายกรดซิวมิกที่ความเข้มข้น 10 mg/L ให้ค่าความต้านทานเมมเบรนน้อยกว่าเมื่อกรองที่ความเข้มข้น 5 mg/L ซึ่งกลไก และชนิดของการเกิดฟาวลิงที่เกิดขึ้นเมื่อกรองกรดซิวมิกที่ความเข้มข้นต่ำและสูง เป็นตัวกำหนดระดับของฟาวลิงและค่าความต้านทานที่ปรากฏภายหลังจากการล้างชุดกรองเป็นลำดับขั้น โดยพบว่า การเติมอากาศให้เกิดความปั่นป่วนที่ชุดเมมเบรนทำให้ค่าความต้านทานเมมเบรนลดลงร้อยละ 20 และ ร้อยละ 25 จากค่าที่ปรากฏหลังสิ้นสุดการกรองที่ความเข้มข้น 5 mg/L และ 10 mg/L และเมื่อล้างย้อนด้วยน้ำกรองสะอาดส่งผลให้ค่าความต้านทานลดลงอีกเพียงเล็กน้อย คือ ประมาณร้อยละ 8 และ ร้อยละ 4 จากค่าความต้านทานเมื่อสิ้นสุดการล้างด้วยการเติมอากาศ ในท้ายสุดของขั้นตอนการล้างที่ใช้สารเคมี

กรดและด่างเพื่อฟื้นฟูสภาพชุดกรองนี้ พบว่า ค่าความต้านทานของเมมเบรนในชุดการทดลองที่ กรองกรดชีวмик 5 mg/L มีค่าความต้านทานสุดท้ายเท่ากับ  $3.8 \times 10^{12} \text{ m}^2$  สูงกว่าค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาด ( $2.68 \times 10^{12} \text{ m}^2$ ) ก่อนการกรองอยู่ประมาณร้อยละ 40 ขณะที่ค่าความต้านทานเมมเบรนสุดท้ายเมื่อกรองกรดชีวмик 10 mg/L มีค่า  $2.7 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาดเล็กน้อย และเป็นการชี้ให้เห็นว่าการกรองกรดชีวмикที่ความเข้มข้นต่ำเกิดฟาวลิงแบบไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ และทำการฟื้นฟูสภาพได้ยากมากกว่าเมื่อกรองที่ความเข้มข้นสูง สิ่งนี้น่าจะเกิดจากลักษณะของแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสารชีวмикที่สามารถติดแน่นกับวัสดุเมมเบรนสูง อันเนื่องจากโครงสร้างของการเกาะติดที่เกิดขึ้น แข็งแรงกว่า (ชั้นบาง) ลักษณะของโครงสร้างที่เกิดการเกาะติดของโมเลกุลชีวмикเข้มข้นน่าจะเกิดจากการเรียงตัวแบบสุม เป็นชั้นแค้กที่หนา ซึ่งแม้ว่าจะเป็นฟาวลิงแบบฟื้นฟูสภาพไม่ได้ด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ แต่สามารถฟื้นฟูสภาพได้อย่างสมบูรณ์ด้วยสารเคมีพื้นฐาน คือ กรดและด่าง

การผสมระหว่างสารแขวนลอยเบนโทไนต์เข้มข้น 50 mg/L และ 5,000 mg/L กับกรดชีวмик 10 mg/L ทำให้ค่าความต้านทานเมมเบรนเมื่อสิ้นสุดการกรอง (R2) เพิ่มขึ้นประมาณ 3.2 เท่า และ 2.9 เท่า เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาดเริ่มต้นที่มีค่าเป็น  $2.29 \times 10^{12} \text{ m}^2$  และ  $2.66 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้สูงกว่ากรณีที่ทำ การกรองในสารป้อนชนิดเดียวของสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนต์ และสูงกว่าเล็กน้อยเทียบกับเมื่อกรองสารละลายกรดชีวмикชนิดเดียว (แม้ว่าอัตราเร็วของการเกิดฟาวลิงขณะกรอง สารละลายกรดชีวмикที่คำนวณได้ พบว่า มีค่าสูงกว่ากรณีกรองสารละลายผสมสองชนิดนี้ เนื่องจากค่าอัตราเร็วการเกิดฟาวลิงของสารละลายกรดชีวмикสูงในช่วงเริ่มต้น ซึ่งฟาวลิงเกิดอย่างรวดเร็ว และรุนแรงจากทั้งการสะสมเป็นแค้กความพรุนต่ำร่วมกับการอุดตันภายในรูหรือปลอกกรอง ขณะที่การกรองอนุภาคเบนโทไนต์อัตราเร็วจะคงที่ตลอด และเป็นฟาวลิงแบบชั้นแค้กสะสม) ผลการล้างฟื้นฟูสภาพใน 2 ชุดการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการเติมอากาศให้ปั่นป่วนทำให้ค่าความต้านทานเมมเบรนลดลงร้อยละ 25 และ ร้อยละ 20 จากค่าที่ปรากฏ หลังสิ้นสุดการกรอง การล้างย้อนด้วยน้ำกรองเป็นเทคนิคที่ได้ผลดีในการฟื้นฟูสภาพชุดกรองในชุดการทดลองนี้โดยทำให้ค่าความต้านทานลดลงอีกร้อยละ 28 และ ร้อยละ 19 จากค่าที่คงเหลือ ภายหลังจากการเติมอากาศที่ชุดกรอง แสดงให้เห็นว่าฟาวลิงกว่าร้อยละ 50 เป็นแบบฟื้นฟูสภาพได้ และส่วนที่เหลือภายหลังล้างด้วยสารเคมี คือ กรดซิดริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานที่เหลือค้างลดลงอีกร้อยละ 29 และ ร้อยละ 46 ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานที่ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ในชุดการทดลองที่ 8 มีค่ามากกว่า และเป็นผลโดยตรงจากความเข้มข้นของอนุภาคเบนโทไนต์เข้มข้นที่น่าจะเกิดแรงกระทำกับโมเลกุลกรดชีวмикแล้วเกาะสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนมากกว่า ค่าความต้านทานของเมมเบรนในชุดการทดลองที่ 7 มีความต้านทานสุดท้ายเท่ากับ  $2.59 \times 10^{12} \text{ m}^2$  สูงกว่าค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาด ( $2.29 \times 10^{12}$

m<sup>2</sup>) ก่อนการกรองอยู่ประมาณร้อยละ 15 ขณะที่ค่าความต้านทานเมมเบรนสุดท้ายเมื่อกรองชุด การทดลองที่ 8 สามารถฟื้นฟูสภาพได้ 100% มีค่า  $2.49 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความ ต้านทานเมมเบรนสะอาดเล็กน้อย

ผลการกรองสารแขวนลอยผสมระหว่างเบนโทไนด์กับผงถ่านกัมมันต์ที่สองค่าของความ เข้มข้นของเบนโทไนด์ (ชุดการทดลองที่ 9 = Bentonite 500 mg/L+PAC 5,000 mg/L, ชุด 10 = Bentonite 5,000 mg/L+PAC 5,000 mg/L) พบว่า ค่าความต้านทานสิ้นสุดการกรอง (R2) เพิ่มขึ้นประมาณ 2.6 เท่า และ 2.9 เท่า เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาด เริ่มต้นที่มีค่าเป็น  $2.04 \times 10^{12} \text{ m}^2$  และ  $2.29 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานที่ เพิ่มขึ้นสูงกว่ากรณีที่ทำการกรองสารป้อนชนิดเดียวของสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์ และ ผงถ่านกัมมันต์ แต่มีค่าใกล้เคียงกับกรณีกรองสารผสมในชุดการทดลองที่ 7 และ 8 รวมถึง ใกล้เคียงกับเมื่อกรองสารป้อนชนิดเดียวของกรดฮิวมิก จากขั้นตอนการล้างที่กำหนดไว้เป็น ลำดับ พบว่า เทคนิคการเติมอากาศแบบระยะเวลาสั้นและเพิ่มเวลาให้เกิดการปั่นป่วนที่ชุดเมม เบรน ส่งผลให้การสะสมของชั้นเค้กและเป็นการกำจัดฟาวลิงแบบผันกลับได้ คือ ทำให้ค่า ความต้านทาน R3 และ R4 ของชุดการทดลองที่ 9 และ ชุดที่ 10 มีค่าลดลงกว่าร้อยละ 28-33 และ ร้อยละ 37-41 ขณะที่ต่อมาล้างด้วยน้ำเอื้อยให้ผลไม่เด่นชัดในการลดค่าความต้านทาน(R5) เช่นเดียวกับการล้างย้อนด้วยน้ำกรอง ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานลดลง (R6 และ R7) เป็น ลำดับขั้นเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 4-10 ทั้งนี้ผลของการล้างฟื้นฟูสภาพด้วยการใช้สารเคมีที่ เป็นกรดซิตริกไม่ส่งผลให้ต่อการลดค่าความต้านทานอย่างชัดเจน ขณะที่การใช้สารเคมีที่เป็นด่าง ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการกรองย้อนที่อัตราการกรองย้อนต่ำ นาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้น สามารถช่วยให้ค่าความต้านทานเมมเบรนลดลงอีกร้อยละ 25 และร้อยละ 18 ตามลำดับ จาก ขั้นตอนการล้างย้อนด้วยน้ำกรอง และสามารถฟื้นฟูสภาพให้ชุดเยื่อกรองมีค่าความต้านทาน ใกล้เคียงกับเมมเบรนสะอาดก่อนใช้ทำการกรองในทั้งสองชุดการทดสอบ คือ มีค่า R12 เท่ากับ  $2.28 \times 10^{12} \text{ m}^2$

ชุดการทดลองที่ 11 (PAC 500 mg/L+HA 10 mg/L) และ ชุดที่ 12 (PAC 5,000 mg/L+HA 10 mg/L) พบว่า ค่าความต้านทานสิ้นสุดการกรอง (R2) เพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า และ 2.6 เท่า เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานเมมเบรนสะอาดเริ่มต้นที่มีค่าเป็น  $2.23 \times 10^{12} \text{ m}^2$  และ  $2.48 \times 10^{12} \text{ m}^2$  ตามลำดับ ซึ่งการเติมผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่สูง คือ 5,000 mg/L ไม่ส่งผลให้ค่าความต้านทานหลังสิ้นสุดการกรองเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่มีการผสมด้วย สารละลายกรดฮิวมิก พบว่ามีค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้นกว่า กรณีที่ทำชนิดเดียวของสาร แขวนลอยผงถ่านกัมมันต์ และสูงกว่าเล็กน้อยเทียบกับเมื่อกรองสารละลายกรดฮิวมิกชนิดเดียว หากเปรียบเทียบกับสารป้อนผสมระหว่างสารแขวนลอยอนุภาคเบนโทไนด์กับกรดฮิวมิก (ชุด การทดลองที่ 7 และ 8) พบว่า ชุดการทดลองที่ 11 และ ชุดที่ 12 มีค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเมมเบรนสิ้นสุดการกรองต่ำกว่า เนื่องจากผลของการดูดติดโมเลกุลสารอินทรีย์อิวมิคส่วนหนึ่งไว้ในผงถ่านกัมมันต์

ผลการล้างพื้นสภาพเมมเบรนจากการทดลองชุดการทดลองที่ 11 และ ชุดที่ 12 พบว่าเทคนิคการเติมอากาศให้ปั่นป่วนทำให้ค่าความต้านทานเมมเบรน (R3 และ R4) ลดลงร้อยละ 20-28 และร้อยละ 26-38 จากค่าที่ปรากฏหลังสิ้นสุดการกรอง ส่งผลให้ลดการสะสมของชั้นเค้กและเป็นการกำจัดฟาวลิงแบบผันกลับได้ระดับดี ขณะที่ต่อมาล้างด้วยน้ำเอื้อยให้ผลไม่ชัดเจนในการลดค่าความต้านทาน(R5) ส่วนการล้างย้อนด้วยน้ำกรอง นั้นทำให้ค่าความต้านทานลดลง (R6 และ R7) เป็นลำดับขั้นเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 24-33 และร้อยละ 13-19 ตามลำดับ ทั้งนี้ผลของการล้างพื้นสภาพด้วยการใช้สารเคมีที่เป็นกรดซิดริกส่งผลให้ต่อการลดค่าความต้านทานลดลงเพียงร้อยละ 5-7 จากขั้นตอนการล้างย้อนด้วยน้ำกรอง และการใช้สารเคมีที่เป็นด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการกรองย้อนที่อัตราการกรองย้อนต่ำ นาน 1 และ 2 ชั่วโมง นั้นสามารถช่วยให้ค่าความต้านทานเมมเบรนลดลงอีกร้อยละ 15 และร้อยละ 4 ตามลำดับ จากขั้นตอนการล้างย้อนด้วยกรดซิดริก และชุดเยื่อกรองภายหลังใช้ทดสอบชุดการทดลองที่ 11 มีค่าความต้านทาน (R12) สูงกว่าค่าของเมมเบรนสะอาดประมาณร้อยละ 10 และสำหรับชุดการทดลองที่ 12 ค่า R12 ต่ำกว่าค่าที่พบในเมมเบรนสะอาดก่อนกรอง ซึ่งพื้นสภาพได้อย่างสมบูรณ์