

### 3-วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษาทดลองนี้เป็นการดำเนินการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการด้วยการใช้แบบจำลองระบบอัลตราฟิลเตรชันที่มีชุดเยื่อกรองท่อกลวงเส้นใยจมตัวอยู่ในถังปฏิกรณ์เพื่อศึกษาสมรรถนะและสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเยื่อกรอง และศึกษาอิทธิพลและสภาวะทางไฮโดรไดนามิกส์ที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบ รวมถึงศึกษาสาเหตุของฟาวลิง และอัตราการเกิดฟาวลิงในชุดเยื่อกรองที่สภาวะต่างๆ ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดิน-น้ำทิ้งหลังบำบัดขั้นที่สอง ซึ่งเลือกใช้เป็นน้ำตัวอย่างป้อนเข้าระบบฯ เพื่อพัฒนาระบบเยื่อกรองนําร่องที่มีชุดเยื่อกรองจมตัว ซึ่งเดินระบบภายใต้สภาวะที่เหมาะสมและสามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง ลดการสูญเสียน้ำและสารเคมีเพื่อใช้ฟื้นฟูสภาพการทำงานของเยื่อกรอง อีกทั้งสามารถพัฒนาต่อยอดเป็นระบบขนาดเล็ก (Small scale system) เพื่อใช้งานระดับชุมชนและระดับสเกลอุตสาหกรรมทั่วไปเพื่อการใช้ทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด

ในส่วนนี้จะนำเสนอรายละเอียดของระบบแบบจำลอง ชุดเยื่อกรอง และอุปกรณ์ประกอบชุดระบบแบบจำลองที่ใช้ศึกษา อุปกรณ์ประกอบการศึกษา ปริมาณสารปรับสภาพน้ำที่เหมาะสมในแต่ละชุดการทดลอง วิธีการและตัวแปรวิเคราะห์คุณภาพน้ำของตัวอย่างน้ำที่ศึกษา รวมถึงแหล่งน้ำที่ใช้เป็นตัวอย่างน้ำป้อน ลักษณะน้ำป้อน ลักษณะสารปรับสภาพน้ำที่ใช้ และสรุปวิธีการศึกษาทดลองในแต่ละสภาวะของชุดการทดลอง

#### 3-1 วัสดุและอุปกรณ์

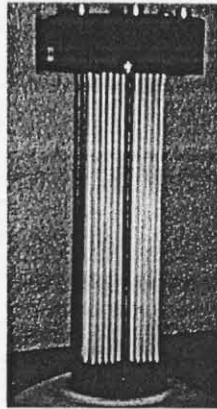
แบบจำลองระบบอัลตราฟิลเตรชันที่มีชุดเยื่อกรองจมตัว อุปกรณ์ทดสอบปริมาณสารปรับสภาพน้ำป้อนและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรคุณภาพน้ำแสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

##### 3-1-1 ชุดเยื่อกรองและแบบจำลองระบบเยื่อกรอง

การศึกษานี้ใช้ชุดเยื่อกรองประเภท Hydrophilic polymer ระดับอัลตราฟิลเตรชันชนิดท่อกลวงเส้นใย (Model UFL 3-Polymem company, France) ที่มีการขึ้นรูปเยื่อกรองแบบท่อกลวงเส้นใยในชุดเยื่อกรองโดยปลายสองข้างของเส้นใยยึดตรึงไว้กับแผ่นพลาสติกด้วยสารเชื่อมชนิดพิเศษโดยปลายด้านท่อด้านหนึ่งของทุกเส้นใยที่ด้านล่างชุดเยื่อกรองถูกอุดปิดไว้ ในขณะที่ปลายท่อเส้นใยด้านบนเปิดเพื่อให้น้ำกรองไหลออกได้ และมีช่องว่างระหว่างเส้นใยที่เอื้อให้เกิดการหมุนเวียนน้ำป้อนในระบบได้อย่างดี (ระยะห่างระหว่างเส้นใยที่ขึ้นรูปในชุดเยื่อกรองประมาณ 2 มม.) (ลักษณะจำเพาะ ดังตารางที่ 3-1 และ ดังรูปที่ 3-1)

ตารางที่ 3-1: ลักษณะจำเพาะของชุดเยื่อกรองศึกษา

ลักษณะ	ค่า
Model	UFL 3
External Diameter of fiber (mm)	2
Number of fibers	72
Fiber length (mm)	200
Filtration surface (m <sup>2</sup> )	0.1
Specific surface area (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	258
Pore size (μm)	0.1
Initial membrane resistance (R <sub>m</sub> , m <sup>-1</sup> , 20°C)	1.0E+12

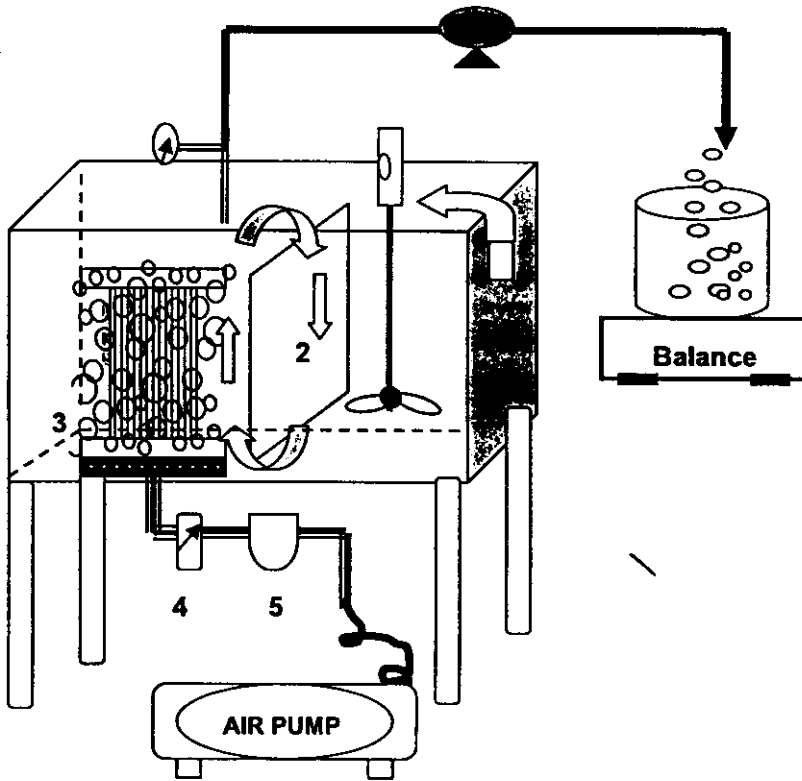


รูปที่ 3-1: ชุดเยื่อกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันชนิดท่อกลวงเส้นใย

ชุดเยื่อกรองถูกติดตั้งให้จมอยู่ในของเหลว ภายในแบบจำลองระบบเยื่อกรองสเกลระดับห้องปฏิบัติการ ทำจากวัสดุเหล็กไร้สนิม มีขนาดความจุประมาณ 60 ลิตร พร้อมขาตั้งและชุดจ่ายอากาศเป็นแผ่นงานมีรูจ่ายอากาศ (ขนาดของฟองอากาศขนาดระหว่าง 0.3-0.5 cm.) ติดตั้งด้านล่างของชุดเยื่อกรองท่อกลวงเส้นใยเพื่อให้ความดันป้อนไหลผ่านเยื่อกรองขณะเดินระบบกรอง โดยต่อเชื่อมเข้ากับปั๊มลม (1 HP/PUMA) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายอากาศซึ่งผ่านการกรองขั้นต้นด้วยชุดกรองอากาศ (Air Filter) ก่อนเข้าระบบฯ โดยปริมาตรของอากาศไหลเข้าระบบฯ สามารถปรับอัตราการป้อนอากาศเข้าระบบด้วยชุดปรับอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow regulator)

ภายในแบบจำลองของระบบซึ่งมีลักษณะเป็นถังสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กว้าง: ยาว: สูง เท่ากับ 25 x 50 x 49 ซม.) มีแผ่นกันทำจากเหล็กไร้สนิมภายในระบบเพื่อทำหน้าที่แบ่งส่วนภายในเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกติดตั้งเยื่อกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันชนิดท่อกลวงเส้นใย ที่มีข้อต่อเข้ากับชุดวัดค่าความดันขณะกรองที่สามารถแสดงผลและรายงานผลแบบต่อเนื่อง ซึ่งแสดงผล และเก็บบันทึกค่าความดันส่งผ่านเมม

เบรนในเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ สำหรับส่วนที่สองติดตั้งชุดกวนผสมของเหลว (IKA-RW20) ที่สามารถปรับระดับรอบการกวนได้เพื่อให้เกิดการกวนผสมขณะทำการทดลองกับตัวอย่างน้ำป้อนเข้าระบบรูปโตะแกรมระบบแสดงดังรูปที่ 3-2



**รูปที่ 3-2: โตะแกรมและภาพแสดงแบบจำลองระบบ**

- (1) คือ ชุดเยื่อกรองทอกลวงเส้นใย, (2) คือ แผ่นกั้นภายในระบบเป็นสองส่วน, (3) คือ ชุดจ่ายอากาศ (4) คือ ชุดปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ และ (5) คือ ชุดกรองอากาศ

### 3-1-2 ชุด Jar Test

ชุด Jar Test ยี่ห้อ Phipps&Bird, Inc., 2000 ใช้สำหรับทดสอบหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมเพื่อปรับสภาพน้ำป้อน ประกอบด้วยชุดกวนมอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบของการกวนเร็วและกวนช้า สามารถตั้งเวลาในแต่ละช่วงการกวนได้ ใช้งานสำหรับบีกเกอร์ทดสอบได้พร้อมกัน 6 สภาวะต่อการทดสอบ

### 3-1-3 อุปกรณ์และเครื่องวิเคราะห์ตัวแปรคุณภาพน้ำและเครื่องแก้ว

- ชุด Reflux COD (Gerhardt)
- ชุดย่อยและกลั่นวิเคราะห์ TKN (Velp Scientifica, Dk20 และ UDK126A)
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic Unicam, Genesis10 UV)

- ชุดกรองสารแขวนลอยแบบสุญญากาศ
- เครื่อง pH meter (HACH, sension1), Turbidimeter (HACH, 2100 N)
- Spectrophotometer (Spectronic Unicam, Genesis10 UV)
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Chyo, JK-200), บีกสุญญากาศ (Gast, 1022-V103-G274x)
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Scientific Kelvinater), ตู้อบแห้ง (Mettler), แผ่นจานร้อน (Thermolyne, Cimarec3)
- เครื่องแก้ว-วัสดุสิ้นเปลืองและสารเคมีสำหรับวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ระบุไว้ในตารางที่ 3-2 ถึง 3-3

## 3-2 ตัวแปรวิเคราะห์ ตัวอย่างน้ำป้อน และสารปรับสภาพน้ำ

ตัวแปรวิเคราะห์คุณภาพน้ำป้อน-น้ำหลังกรอง ลักษณะตัวอย่างน้ำป้อน และลักษณะจำเพาะของสารปรับสภาพที่ใช้ในการศึกษานี้ มีดังต่อไปนี้

### 3-2-1 ตัวแปรวิเคราะห์

ค่าตัวแปรคุณภาพน้ำที่กำหนดในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำป้อน พร้อมวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3-2 และค่าตัวแปรคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำป้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันแสดงดังตารางที่ 3-3 (อ้างอิงตามวิธีการวิเคราะห์ระบุใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, APHA, AWWA and WEF, 1998, Washington D.C., USA.)

### 3-2-2 ตัวอย่างน้ำป้อน

#### 3-2-2-1 น้ำผิวดิน

น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (Reservoir surface water from Prince of Songkla University, RSW) ที่ปรับให้มีค่าความขุ่นระหว่าง 20-100 NTUที่ไม่ปรับสภาพ และที่ปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ เกลือของเหล็ก ( $\text{FeCl}_3$ ), สารส้ม( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ) และ PACI ภายใต้การทดสอบด้วย Jar Test โดยควบคุมค่า pH ของตัวอย่างน้ำป้อนให้อยู่ระหว่าง  $7 \pm 0.5$  โดยเลือกทดสอบการกรองในชุดการทดลองที่ค่าปริมาณความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม และค่าปริมาณสารสร้างตะกอนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม 50% ลักษณะน้ำผิวดินแสดงดังตารางที่ 3-4

**3-2-2-2 น้ำทิ้งหลังบำบัด**

น้ำทิ้งหลังบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะของระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองของโรงพยาบาล สงขลาครินทร์ที่มีค่า BOD<sub>5</sub> ปรับให้อยู่ระหว่าง 5-15 mg/L ลักษณะน้ำทิ้งหลังบำบัดฯ แสดงดังตารางที่ 3-5 (เมื่อ ม.ค. 2549) ถูกป้อนเข้าระบบโดยไม่ปรับสภาพและที่ปรับสภาพด้วยการใช้ผงถ่านกัมมันต์ใน ปริมาณต่างๆ และ เลือกทดสอบการกรองในชุดการทดลองที่ใช้ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมโดย การให้ตัวอย่างน้ำป้อนผสมกับผงถ่านกัมมันต์ด้วยความเร็วในการผสมกวน 250 รอบ/นาที นาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้การดูดซับเกิดขึ้นจนสู่สภาวะสมดุล ที่ค่า pH ของน้ำระหว่าง 7-8

**ตารางที่ 3-2: ตัวแปรคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์ในน้ำป้อนเข้าระบบ**

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์
pH	-	pH meter
Color	Pt-co	Spectrophotometer method
Turbidity	NTU	Nephelometric method
TSS (Total Suspended Solids)	mg/L	Dried at 103 – 105 °C
NOM (Natural Organic Matter)	absorbance, (A)	Ultraviolet Absorption method (254-260 nm)
TOC (Total Organic Carbon)	mg/L	Combustion-Infrared method or Persulfate-Ultraviolet Oxidation method
SBOD (Soluble Biochemical Oxygen Demand-5 days)	mg/L	5 –Day BOD Test
BOD <sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand-5 days)	mg/L	5 –Day BOD Test
SCOD (Soluble Chemical Oxygen Demand)	mg/L	Open Reflux method/or Method by HACH (Reactor Digestion Method with Colorimetric Determination-EPA approved)
COD (Chemical Oxygen Demand)	mg/L	Open Reflux method/or Method by HACH
TKN (Total Kjeldahl Nitrogen)	mg/L	Kjeldahl method
TP (Total Phosphorus)	mg/L	Stannous Chloride method
Protein	mg/L	Spectrophotometer method using bovine serum albumin as the standard solution at a wavelength of 595 nm

ตารางที่ 3-3: ตัวแปรคุณภาพน้ำวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำป้อนเข้าและออกจากระบบเยื่อกรอง

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	ตัวอย่างน้ำป้อนเข้า ระบบเยื่อกรอง	ตัวอย่างน้ำออกจาก ระบบเยื่อกรอง
pH	RSW, TWW, WWC, Co-S	RSW, TWW, WWC, Co-S
Color	RSW, TWW, WWC, Co-S	RSW, TWW, WWC, Co-S
Turbidity	RSW, TWW, WWC, Co-S	RSW, TWW, WWC, Co-S
TSS (Total Suspended Solids)	TWW	TWW
NOM (Natural Organic Matter)	RSW, TWW, WWC	RSW, TWW, WWC
TOC (Total Organic Carbon)	RSW, TWW, WWC	RSW, TWW, WWC
SBOD <sub>5</sub> (Soluble Biochemical Oxygen Demand)	TWW, WWC	-
BOD <sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand-5 days)	TWW, WWC	TWW, WWC
SCOD (Soluble Chemical Oxygen Demand)	TWW, WWC	-
COD (Chemical Oxygen Demand)	TWW, WWC	TWW, WWC
TKN, TP (Total Kjeldahl Nitrogen, Total phosphorus)	TWW, WWC	TWW, WWC
Protein	TWW, WWC	TWW, WWC

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ที่ใช้แทนชื่อตัวอย่างน้ำเข้าระบบเยื่อกรองและออกจากระบบเยื่อกรองอธิบายได้ดังนี้

- RSW = Reservoir surface water from Prince of Songkla University
- TWW = Treated wastewater from Songklanagarind Hospital
- WWC = Water or Wastewater Conditioning by coagulation-flocculation/adsorption
- Co-S = Co-Suspension (FS, ferric chloride suspension), (AS, Alum suspension)  
(PACS, powder activated carbon suspension), (PACl, Polyaluminium Chloride) และ (M-CPAC, mixed coagulant and powder activated carbon suspension)

ตารางที่ 3-4: ลักษณะน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์ (เก็บตัวอย่าง ธ.ค. 2548)

ตัวแปรวิเคราะห์	น้ำดิบ	กรองผ่าน 0.45 µm
pH	6.8±0.5	6.57
Color (Pt-co)	49.46	26.38
Turbidity (NTU)	37.10	11.0
NOM-254 nm (Abs)	-	0.29
Humic acid (mg/L)	-	0.0096
TOC (mg/L)	N.D	N.D

หมายเหตุ: ช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่างวิเคราะห์เป็นช่วงเริ่มต้นฤดูฝนของพื้นที่

ตารางที่ 3-5: ลักษณะน้ำทิ้งหลังบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลสงขลานครินทร์

ตัวแปรวิเคราะห์	น้ำดิบ	กรองผ่าน 0.45 $\mu\text{m}$
pH	6.42	-
Color (Pt-co)	23.09	N.D
Turbidity (NTU)	7.49	N.D
TSS (mg/L)	12.0	-
NOM-254 nm (Abs)	-	0.114
(in term of humic acid, mg/L)		0.004
TOC (mg/L)	-	0.628
SBOD <sub>5</sub> (mg/L)	-	1.3
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	3.9	
SCOD (mg/L)	-	27.0
COD (mg/L)	41.0	-
TKN (mg/L)	1.68	N.D
TP (mg/L)	2.13	1.5
Protein (mg/L)	1.19	N.D

### 3-2-3 สารปรับสภาพน้ำ และสารละลายมาตรฐานกรดอิมิก

สารปรับสภาพน้ำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ (1) สารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ เกลือของเหล็ก ( $\text{FeCl}_3$ ), อลูมิเนียมซัลเฟต หรือ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีคุณภาพระดับ AR-Grade และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่มีคุณภาพระดับ commercial grade สำหรับลดค่าความขุ่นในตัวอย่างน้ำผิวดินที่มีอนุภาคสารแขวนลอยปนเปื้อน และ (2) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงซึ่งใช้เป็นวัสดุดูดซับมลสารพิษที่มีขนาดโมเลกุลเล็กและอยู่ในรูปละลายน้ำ ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงเนื่องจากมีรูพรุนและเป็นโพรงภายใน ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ไม้ กระถาก ที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์-อนินทรีย์โดยใช้ร่วมหรือใช้บำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทำไฮดรอลิก ผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีชื่อการค้า Fluka05120 มีลักษณะจำเพาะดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6: ลักษณะจำเพาะถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ลักษณะจำเพาะ	ค่า
ความสามารถในการดูดซับ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	1,000
ขนาดการกระจายของอนุภาค ( $d_{70\%}$ , $\mu\text{m}$ )	เท่ากับหรือน้อยกว่า 40
ความชื้น (% max)	5
เถ้า (% max)	5

สารละลายกรดฮิวมิก (ชื่อการค้าของบริษัท Fluka 53680) ถูกเลือกใช้เป็นสารละลายมาตรฐานที่เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งละลายในแหล่งน้ำผิวดินต่างๆ และมักพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดฮิวมิกที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยมีลักษณะจำเพาะดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7: องค์ประกอบและลักษณะจำเพาะกรดฮิวมิกชนิดผง

องค์ประกอบและลักษณะ	ค่าเฉลี่ย
สีและลักษณะกายภาพ	ดำ และ เป็นผงเกล็ด
pH	6.5
เถ้า (%)	20
ปริมาณคาร์บอน (%)	49.01
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	4.37
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.71

สารละลายกรดฮิวมิกตั้งต้นถูกเตรียมให้มีความเข้มข้น เท่ากับ 1 g/L ด้วยการละลายผงกรดฮิวมิกในน้ำปราศจากอิออนที่มีค่า pH 11-12 และกวนผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองขนาดรูกรอง 0.45  $\mu\text{m}$  และปรับปริมาตรสุดท้ายรวมเป็น 1 ลิตร เก็บรักษาสภาพสารละลายตั้งต้นในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมทำการพลาสมาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายกรดฮิวมิกกับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ค่า TOC และ ปริมาณสีแท้ทั้งหมดในแต่ละค่าความเข้มข้น พร้อมกับหาช่วงการดูดกลืนแสง UV ของสารละลายกรดฮิวมิกด้วยการทำ UV scanning

### 3-3 สภาวะและชุดการทดลอง

การศึกษานี้สามารถแบ่งสภาวะของการทดลองได้ 2 ส่วน คือ สภาวะของการทดลองในชุด Jar Test เพื่อหาปริมาณของสารปรับสภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับแต่ละชนิดตัวอย่างน้ำป้อนที่ศึกษา และ สภาวะของการทดลองในระบบแบบจำลองเพื่อหาค่าพิกซ์วิกฤตในสภาวะทางไฮโดรไดนามิกส์และในสภาวะที่มีการปรับสภาพน้ำป้อนเข้าระบบ โดยมีข้อมูลดังต่อไปนี้

#### 3-3-1 สภาวะของการทดสอบปริมาณสารปรับสภาพน้ำด้วยชุด Jar Test

ทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ เกลือของเหล็ก ( $\text{FeCl}_3$ ), สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ) และ PACl โดยชุดจาร์เทส (Jar test) ภายใต้สภาวะมาตรฐานความเร็วรอบในการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที และกวนช้า 40 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีในตัวอย่างน้ำป้อนที่เป็นน้ำผิวดิน สำหรับน้ำทิ้งหลังบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง นำมาทดสอบหาปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่เหมาะสม โดยสรุปสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3-8



**ตารางที่ 3-8: สภาวะการทดลองเพื่อหาปริมาณสารปรับสภาพน้ำป้อนที่เหมาะสม**

ชุดการทดลอง	น้ำป้อน	สภาวะที่ศึกษา	
		ชนิดสารปรับสภาพน้ำ	ความเข้มข้น (mg/L)
1. Jar test ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน	- น้ำผิวดิน	FeCl <sub>3</sub> (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·14H <sub>2</sub> O PACI	0, 20, 50, 100, 200, 500
2. Jar test ปริมาณของถ่านกัมมันต์ชนิดผง	- น้ำทิ้งหลังบำบัด	PAC	0, 5, 15, 50, 100, 200, 500, 1,000

**3-3-2 สภาวะการทดสอบการกรองในระบบแบบจำลองเยื่อกรองจมตัว**

ศึกษาและทดสอบสมรรถนะในการกรองน้ำป้อน คือ น้ำผิวดิน และ น้ำทิ้งหลังบำบัด โดยระบบเยื่อกรองที่มีชุดเยื่อกรองท่อกลวงเส้นใยจมตัวระดับอัลตราฟิลเตรชันในตัวอย่างน้ำป้อนที่ไม่ปรับสภาพ และปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอน หรือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่สภาวะการเติมอากาศปริมาตรต่างๆ ในรูปแบบที่ละเท (Batch test) เพื่อหาค่าฟลักซ์วิกฤต (critical flux) ด้วยการเดินระบบที่ค่าฟลักซ์ของการกรองคงที่นาน 30 นาที และเพิ่มค่าฟลักซ์เป็นขั้นบันไดต่อไปหากพบว่าค่าความดันผ่านเยื่อกรอง (Trans membrane pressure, TMP) คงที่ และทดสอบสมรรถนะระบบกรองด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยไม่เกิดฟาวลิงเมื่อเดินระบบที่ค่าฟลักซ์คงที่ที่ค่าฟลักซ์วิกฤตสูง และต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50 % โดยสรุปสภาวะการทดลองกำหนด ดังตารางที่ 3-9

**ตารางที่ 3-9: สภาวะการทดลองเพื่อศึกษาและทดสอบสมรรถนะของระบบฯ**

ชุดการทดลอง	น้ำป้อน	สภาวะต่างๆ ที่ทำการศึกษา		
		สารสร้างตะกอน	ผงถ่านกัมมันต์	การเติมอากาศ (L/min)
1. ทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต	- สารสร้างตะกอน และผงถ่านกัมมันต์			
	- น้ำผิวดิน	ไม่เติม	-	
	- น้ำผิวดิน	ปรับสภาพด้วยสารเคมีที่ค่าที่เหมาะสมจาก	-	

<p>ตารางที่ 3-9 (ต่อ) ชุดการทดลอง</p>		การทดสอบใน Jar Test		<p>0, 10, 20, 40, 80</p>
	- น้ำผิวดิน	ปรับสภาพด้วยสารเคมีที่ค่าต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมจากการทดสอบใน Jar Test 50%	-	
	- น้ำทิ้งหลังบำบัด	-	ไม่เติม	
	- น้ำทิ้งหลังบำบัด	-	เติม PAC ที่ค่าเหมาะสมจาก Jar Test	
<p>2. ทดสอบสมรรถนะการเดินระบบแบบต่อเนื่อง</p>	- น้ำผิวดินไม่ปรับสภาพ		<p>ค่าฟลักซ์วิกฤต สูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50%, ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต 50%</p>	
	- น้ำผิวดินปรับสภาพด้วยสารสร้างตะกอนค่าที่เหมาะสมจากการทดสอบใน Jar Test			
	- น้ำทิ้งหลังบำบัด			
	- น้ำทิ้งหลังบำบัดเติม PAC ที่ค่าเหมาะสมจาก Jar Test			
<p>3. ศึกษาสาเหตุ กลไกการอุดตัน และประสิทธิภาพการล้างเพื่อฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง</p>	- น้ำผิวดินไม่ปรับสภาพ และปรับสภาพด้วยสารเคมีที่ค่าที่เหมาะสมจากการทดสอบใน Jar Test	<p>ฟื้นฟูสภาพด้วยเทคนิคไฮโดรไดนามิกส์และใช้สารเคมีโดยมีการล้างเป็นลำดับขั้นตอน คือ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- การใช้น้ำล้าง</li> <li>- การใช้ความดันป้อนจากฟองอากาศ</li> <li>- การใช้สารเคมีกรด</li> <li>- การใช้สารเคมีด่าง</li> </ul> <p>วัดค่าน้ำซึมผ่านเยื่อกรอง ( Membrane permeability) ก่อนการทดลองในแต่ละชุดการทดลองและภายหลังเสร็จสิ้นแต่ละขั้นตอนของการล้างเพื่อฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง</p>		

### 3-4 วิธีการศึกษา

สำหรับส่วนของวิธีการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้สรุปรวบรวมขั้นตอน และ วิธีการศึกษาสำหรับส่วนของการหาปริมาณสารปรับสภาพน้ำที่เหมาะสม และการทดสอบสมรรถนะการกรอง คือ การหาค่าการซึมผ่านได้เริ่มต้นของของชุดเยื่อกรอง (Initial Membrane Permeability) การทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต และขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพชุดเยื่อกรองเพื่อศึกษากลไก และสาเหตุของการเกิดฟลาวลิ่ง โดยมีรายละเอียดสรุปดังนี้

#### 3-4-1 การทดสอบการสร้าง-รวมตะกอนโดยชุด Jar Test

ประเมินระดับการสร้างและรวมตะกอนเพื่อหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม สำหรับตัวอย่างน้ำป้อนที่เป็นน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ม.สงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ด้วยการใช้ชุดทดสอบ Jar Test ยี่ห้อ Phipps&Bird, Inc., 2000 ที่ประกอบด้วยบีกเกอร์ทดสอบจำนวน 6 ใบ ขนาดความจุ 1 ลิตร ที่มีชุดกวนสำหรับแต่ละบีกเกอร์ทดสอบ ทำการเติมตัวอย่างน้ำผิวดินปริมาตร 1 ลิตรลงในบีกเกอร์ทั้ง 6 ใบ ทำการกวนเร็วด้วยความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที นาน 1 นาที ขณะที่เริ่มกวนเร็วให้เติมสารสร้างตะกอนลงในแต่ละบีกเกอร์ที่ความเข้มข้นกำหนด จากนั้นปรับอัตราการกวนให้อยู่ที่รอบการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที โดยควบคุมค่า pH ให้อยู่ระหว่าง  $7 \pm 0.5$  ด้วยการเติมสารละลายกรดหรือด่างเพื่อควบคุม เมื่อครบเวลาของการกวนช้าให้หยุดทำการกวน และตั้งทิ้งตัวอย่างให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที น้ำใสภายหลังตกตะกอนฟล็อกแล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำตามที่กำหนดตัวแปรวิเคราะห์ คือ pH, Color, Turbidity, NOM-UV-254, Humic acid และ TOC

#### 3-4-2 การทดสอบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ความสามารถในการดูดซับมลสารละลายน้ำในตัวอย่างน้ำป้อนที่เป็นน้ำทิ้งหลังบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ปริมาณต่างๆ กัน คือ 0, 5, 15, 50, 100, 200, 500, 1,000 mg/L ลงในน้ำทิ้งหลังบำบัดปริมาตร 1 ลิตร ทำการกวนผสมที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองตัวอย่างน้ำทิ้งด้วยกระดาษกรอง  $0.45 \mu\text{m}$  เพื่อแยกเอาถ่านกัมมันต์ผงออกจากตัวอย่างทิ้งหลังปรับสภาพและนำตัวอย่างดังกล่าวไปวิเคราะห์ค่าตัวแปรคุณภาพน้ำ ได้แก่ pH, Color, Turbidity, NOM-UV-254, Humic acid, COD, BOD<sub>5</sub>, TP, TKN, Protein

#### 3-4-3 การหาค่าการซึมผ่านได้เริ่มต้นของชุดเยื่อกรอง

##### (Initial Membrane Permeability Measurement)

น้ำกลั่นถูกเลือกใช้เป็นของเหลวอ้างอิงที่ปราศจากสารแขวนลอยและมีความสะอาด เพื่อประเมินหาค่าการซึมผ่านได้เริ่มต้นของชุดเยื่อกรองก่อนนำไปใช้ทดสอบที่สภาวะการทดลองที่กำหนดไว้ ทำการทดสอบกรองน้ำกลั่นผ่านชุดเยื่อกรองที่ค่าฟลักซ์ต่างๆ ( $\text{L/h/m}^2$ ) และบันทึกค่าความดันส่งผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane pressure, TMP-mbar) ที่เกิดขึ้นสำหรับแต่ละค่าฟลักซ์ที่เปลี่ยนไป และนำข้อมูลค่าฟลักซ์และค่า TMP สร้างกราฟความสัมพันธ์จะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง และได้ค่า Permeability ( $\text{L/h/m}^2\text{-bar}$ ) ของชุดเยื่อกรองที่สะอาด ก่อนเริ่มใช้งาน ทั้งนี้ควรประเมินค่า Permeability ตามช่วงเวลาที่ใช้ชุดเยื่อกรองเพื่อดูแนวโน้มของค่า Permeability ที่เปลี่ยนแปลงไป

### 3-4-4 การทดสอบหาค่าฟลักซ์วิกฤต (Critical Flux Determination)

การหาค่าฟลักซ์วิกฤตอ้างอิงบนพื้นฐานแนวคิดของ Field et al., 1995; Howell, 1995 ที่สรุปไว้ว่า ในสภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต ค่าฟลักซ์ของการกรองตัวอย่างน้ำป้อนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความดันส่งผ่านเยื่อกรอง (TMP) ในทางตรงกันข้ามที่สภาวะสูงกว่าสภาวะวิกฤตจะไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าฟลักซ์และค่าความดันส่งผ่าน ทั้งนี้ค่าฟลักซ์วิกฤตขึ้นกับสภาวะต่างๆทางไฮโดรไดนามิกส์ที่มีผลทำให้เกิดแรงเฉือนบนผิวหน้าของเยื่อกรองระหว่างการเดินระบบเยื่อกรอง และลักษณะของสารแขวนลอยนั้นๆที่ทำการกรอง รวมถึงการออกแบบ และจัดรูปแบบต่างๆของกระบวนการย่อยต่างๆ ในระบบเยื่อกรอง ซึ่งรวมเรียกว่าเป็น สภาวะวิกฤต (Critical conditions) ที่พบว่ามีระดับของการสะสมอนุภาคบนผิวเยื่อกรองแตกต่างกันตามสภาวะและเงื่อนไขของการกรองที่ดำเนินการ ขั้นตอนการหาค่าฟลักซ์วิกฤตในแต่ละชุดการทดลอง ทำได้โดยการเริ่มต้นเดินระบบกรอง ที่ค่าฟลักซ์ค่าแรกซึ่งไม่สูงกว่า  $10 \text{ L/h/m}^2$  คงที่เป็นเวลานาน 30 นาที และสังเกตค่าความดันส่งผ่านเยื่อกรอง ถ้าพบว่าคงที่ตลอด 30 นาที ให้เพิ่มค่าฟลักซ์เป็นขั้นบันไดขึ้นละ  $7 \text{ L/h/m}^2$  ต่อไปจนกระทั่งพบว่าค่าความดันผ่านเยื่อกรอง (TMP) ไม่คงที่และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นที่ค่าฟลักซ์ใดๆนั้น ซึ่งค่าฟลักซ์วิกฤตในแต่ละชุดการทดลอง คือ ค่าฟลักซ์ก่อนค่าฟลักซ์ที่ให้ค่าความดันผ่านเยื่อกรองสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

### 3-4-5 การฟื้นฟูสภาพชุดเยื่อกรอง (Mode of Membrane Regeneration)

การฟื้นฟูสภาพชุดเยื่อกรองดำเนินการเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลอง ที่เลือกศึกษาสาเหตุหลักการอุดตัน และ ประสิทธิภาพการล้างเพื่อฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง เพื่อระบุชี้ระดับฟาวลิงที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากกลไก และสาเหตุต่างๆซึ่งส่งผลให้ค่า Permeability ของชุดเยื่อกรองลดต่ำลง หรือ ส่งผลให้ค่าความต้านทานเยื่อกรองรวมสูงขึ้น (Total Membrane Resistance) ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพชุดเยื่อกรองได้ปรับ และเลือกใช้ให้สามารถระบุชี้รูปแบบของฟาวลิงที่เกิดขึ้นได้ โดยวัดค่า Permeability ของชุดเยื่อกรองด้วยน้ำกลั่นทุกครั้งเมื่อเสร็จสิ้นในแต่ละขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีถัดไป โดยสรุปขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพชุดเยื่อกรองเป็นลำดับขั้นดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10: การฟื้นฟูสภาพชุดเยื่อกรอง

ขั้นที่	ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ	สภาวะที่กำหนดระหว่างฟื้นฟูสภาพ	
		อัตรา	เวลา
0	ถ่ายตัวอย่างสารป้อนเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบการกรองออกจากระบบฯ และ เติมน้ำสะอาดเข้าระบบจนท่วมชุดเยื่อกรอง	-	-
1	เติมอากาศให้ความปั่นป่วนสูงบริเวณชุดเยื่อกรอง (Air Turbulence closed to membrane module)	80 L/min	3 นาที
2	ล้างชุดกรองด้วยน้ำกลั่น กรองไหลเอื่อยที่ผิวเยื่อกรอง (Filtered water Rinsing)	-	1 นาที
3	ล้างย้อนด้วยน้ำกลั่น กรองที่อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m <sup>2</sup>	อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m <sup>2</sup>	15 และ 30 นาที
4	ล้างย้อนด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.1 N	อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m <sup>2</sup>	1 และ 2 ชั่วโมง
5	แช่ชุดเยื่อกรองและล้างย้อนด้วยสารละลายต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 N	อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m <sup>2</sup>	1 และ 2 ชั่วโมง
6	ล้างสารเคมีปนเปื้อนตกค้างในชุดเยื่อกรองด้วยน้ำกลั่นกรองแบบล้างย้อน	อัตราการกรองย้อน 15 L/h/m <sup>2</sup>	30 นาที